

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาแปลงรูปสัณฐานคาร์บอนเป็นกราไฟต์เทียม
GRAPHITIZING FURNACE



นายณรงค์เดช ศรีอัสวอมร
Mr. NARONGDEJ SRIASSAWAARMORN

เลขหมู่ _____
เลขทะเบียน 17840
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2535

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พศ. 2535

ISBN 974-8157-72-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GRAPHITIZING FURNACE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1992

ISBN 974-8157-72-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เตาแปลงรูปอสัณฐานคาร์บอนเป็นกราฟต์เทียม
นักศึกษา	นายณรงค์เดช ศรีอัสวอมร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุภี บรรจงจิตร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พศ.	2535

บทคัดย่อ

ในการพัฒนาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมของอสัณฐานคาร์บอนเป็นกราฟต์เทียม หรือ อิเล็กโตรกราฟต์นั้น วัตถุประสงค์คือต้องการให้กราฟต์เทียมที่ได้มีคุณสมบัติในด้าน เสถียรภาพความร้อนและแรงเสียดทานดีและคุณสมบัติฟิลิคส์ด้านอื่นๆดีกว่ากราฟต์ธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดลองและออกแบบสร้างเตากราฟต์ไทยซึ่ง โดยไม่เพียงแต่จะมุ่ง ให้ความร้อนสูงในช่วง 2200 - 3000 องศาเซลเซียส เท่านั้นแต่ยังคำนึงถึงการเลือกฉนวน บุเตาและการคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของผนังเตาให้ความร้อน และพลังงาน โดย ให้สอดคล้องกับการนำความร้อน ซึ่งจะต้องคำนึงถึงขนาดของผนัง อุณหภูมิที่ต้องการตลอดจน แรงกดที่ผิวสัมผัสของคาร์บอนงานวิจัยนี้นับว่าก่อให้เกิดประโยชน์แก่ภาคอุตสาหกรรมภายใน ประเทศ ทั้งนี้เพราะสามารถลดการนำเข้าของกราฟต์จากต่างประเทศ และยังสามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพในการผลิตเพื่อส่งออกไปยังประเทศในกลุ่มอาเซียนได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีก็เพราะได้รับความกรุณาจากรองศาสตราจารย์
ศุภี บรรจงจิตร ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณรัตนชัย เวโรจน์พัฒนา กรรมการบริหารบริษัท ไทยคาร์
บอนแอนดกราไฟต์ จำกัด และ Mr. Alan E. Goldman ที่ปรึกษาพิเศษที่กรุณาแนะ
แนวทางและคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยคาร์บอนแอนดกราไฟต์ จำกัด ที่ออกทุนสนับสนุน
สนุนการวิจัยนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความร่วม
ประสานงานมาด้วยดี

นายณรงค์เดช ศรีอัสวอมร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์/คำย่อ/คำนิยามของศัพท์ที่ใช้.....	VIII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและสาเหตุ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 แนวความคิด.....	2
1.4 ขอบข่ายของการทำวิทยานิพนธ์.....	3
2. หลักการทำงานของเตากราไฟต์ไทยซึ่ง และทฤษฎี.....	4
2.1 การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน.....	4
2.2 ทฤษฎีความต้านทานไฟฟ้าเชิงลบของอัสทริยานคาร์บอน.....	8
2.3 ความต้านทานไฟฟ้าผิวสัมผัสและความต้านทานไฟฟ้าภายในสาร.....	11
2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับค่าการนำความร้อน.....	15
3. การออกแบบเตากราไฟต์ไทยซึ่ง.....	25
3.1 เงื่อนไขความเหมาะสมด้านความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับช่วงเวลา การใช้พลังงานไฟฟ้า.....	25
3.2 หลักเศรษฐศาสตร์.....	26
3.3 กำหนดชนิดและขนาดวัสดุ อุปกรณ์ในเตากราไฟต์ไทยซึ่ง.....	28

4. การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนเพื่อกำหนดอุณหภูมิของคาร์บอนที่ต้องการทำการกราฟต์โทซิ่ง.....	34
4.1 ศึกษาสารที่ใช้ทำถ่านววน ศึกษาสารความต้านทานที่ให้ความร้อนแก่แก๊สอสังฐานคาร์บอน.....	34
4.2 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนที่สูญเสียของอสังฐานคาร์บอนพลังงานความร้อนสะสมในถ่านววนและผนังอิฐ.....	37
5. ผลการทดลองจากการเผาในขบวนกรกราฟต์โทซิ่ง.....	47
5.1 การวัดผลพลังงานไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า อุณหภูมิ.....	47
5.2 การเตรียมการให้พลังงานสำหรับผงถ่านววนที่เป็นพีชท์.....	47
5.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของอิเล็กโตรกรรไฟต์กับอสังฐานคาร์บอน.....	48
6. สรุปผลการทดลอง และการวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
7. สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์ทั้งหมด และข้อเสนอแนะ.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก 1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิเล็กโตรกรรไฟต์ที่ผลิตขึ้นกับอิเล็กโตรกรรไฟต์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	57
ภาคผนวก 1.2 มาตรฐานอิเล็กโตรกรรไฟต์กองทัพสหรัฐอเมริกา.....	58
ภาคผนวก 2 รูปแสดงเตากรรไฟต์โทซิ่งและเครื่องมือที่ใช้.....	59
ภาคผนวก 3 แผนภูมิการผลิตอสังฐานคาร์บอน และอิเล็กโตรกรรไฟต์.....	66
ภาคผนวก 4 เปรียบเทียบชอ์ฟท์คาร์บอน และฮาร์ดคาร์บอน.....	67
ภาคผนวก 5 ข้อมูลด้านอิฐทนไฟ.....	68
ภาคผนวก 6 ตารางเปรียบเทียบตะแกรงร้อนหน้าสเมท-ไมครอน.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	72

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางกระจายความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดต่างๆ.....	25
ตารางที่ 3.2 ตารางจำแนกต้นทุนการผลิตอิเล็กทรอนิกส์.....	26
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงราคาพลังงานชนิดต่างๆ.....	27
ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบการปรับแรงดันไฟฟ้าแบบคี่.....	29
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของฮาร์ท และซอฟต์แวร์คาร์บอน.....	34
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติที่คี่ของพลังงานชนิดต่างๆ.....	36
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความร้อนจำเพาะของคาร์บอน.....	38
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงชั้นความหนาของพลังงาน.....	40
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าพลังงานความร้อนในแท่งคาร์บอน.....	40
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการแผ่กระจายความร้อนของพลังงาน.....	41
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงความร้อนสะสมในพลังงาน.....	42
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงพลังงานสูญเสียผ่านชั้นฉนวน.....	42
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด.....	45
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงพลังงานไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, เวลา.....	48
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงประสิทธิภาพความร้อนของเตา.....	48
ตารางที่ 5.3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐฐานคาร์บอน กับอิเล็กทรอนิกส์.....	49
ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตได้กับอิเล็กทรอนิกส์ ต่างประเทศ.....	57
ตารางที่ ค.2 มาตรฐานอิเล็กทรอนิกส์ของกองทัพอเมริกัน.....	58
ตารางที่ ค.3 แสดงหน่วยวัดเทียบตะแกรงส่วนผงกับหน่วยไมครอน.....	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปเตากราฟไฟต์ไททซ์ซิ่ง..... 4
2.2	รูปคริสตอลไลน์ของคาร์บอนทั่วไป..... 9
2.3	รูปกราฟความร้อนจำเพาะของคาร์บอน..... 16
2.4	รูปกราฟการนำความร้อนของคาร์บอนที่ผลึกขนาดแตกต่างกัน..... 18
2.5	รูปกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของผงพิชท์โค้ก..... 21
2.6	รูปกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของผงอิเล็กโตรกราฟไฟต์..... 22
2.7	รูปกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของผงถ่านหุงข้าว..... 23
2.8	รูปกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะกับขนาดบรรจุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน..... 24
3.1	รูปวงจรไฟฟ้าของเตากราฟไฟต์ไททซ์ซิ่ง..... 31
3.2	รูปโครงสร้างเตาและส่วนประกอบ..... 32
3.3	รูปวงจรไฟฟ้าของเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า..... 33
5.1	รูปกราฟแสดงผลการทดลองหาค่าพลังงานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ..... 50
5.2	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของคาร์บอน..... 51
ภ.1-ภ.13	รูปการเรียงแท่งคาร์บอนในเตาและการวัดผลรวมถึงอุปกรณ์เครื่องมือวัด..... 59
ภ.14	แสดงรูปแผนภูมิการผลิตสัณฐานคาร์บอนและอิเล็กโตรกราฟไฟต์..... 66
ภ.15	แสดงรูปโครงสร้างผลึกของชาร์ตคาร์บอนและซอฟต์แวร์คาร์บอน..... 67

คำอธิบายสัญลักษณ์

	หน่วย
α = ค่าการแผ่กระจายความร้อน	เมตร ² /วินาที
β = ค่าคงที่	-
e = อุณหภูมิที่จุดต่างๆ	องศาเซลเซียส
γ = ค่าคงที่	-
ψ = เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง	เวเบอร์
ϕ = ประจุความร้อน	วัตต์
ρ = ปริมาตรอนุภาค	-
ρ = ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	โอห์ม-ซม.
a = รัศมีพื้นที่สัมผัสของอนุภาค 2 อนุภาค	อังสตรอม
C = ค่าความร้อนจำเพาะ	กิโลวัตต์-ซม./กก. /องศาเซลเซียส
D = ความหนาแน่นประจุความร้อน	วัตต์/ ตร. เมตร
E = ค่าอิลาสติคโมดูลัส	นิวตัน/ตร. เมตร/มม.
F = แรงกด	นิวตัน
G = ความลาดเอียงของอุณหภูมิ/ระยะทาง	องศาเซลเซียส/เมตร
H = ค่าความแข็ง	นิวตัน/ตร. มม.
h = ระยะความสูง	ไมครอน
I = กระแสไฟฟ้า	แอมป์
K = ค่าการนำความร้อน	วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส
L_T = ระยะทางเฉลี่ยภายในผลึก	อังสตรอม
L_B = ระยะทางเฉลี่ยที่ขอบผลึก	อังสตรอม
P = แรงกดอัด	กก./ตร. ซม.
Q = ประจุความร้อน	กิโลวัตต์-ซม.
R = ความต้านทานไฟฟ้า	โอห์ม
S = พื้นที่หน้าตัดที่ประจุความร้อนผ่าน	ตร. เมตร
T = เวลาในการให้กำลังงาน	ซม.
V = ความเร็วคลื่นอนุภาค	
W = กำลังงาน	กิโลวัตต์-ซม.

บทที่ 1

บทนำ

คาร์บอนนับเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ในอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะนำมาใช้เป็นวัสดุช่วยนำกระแสไฟฟ้า ความร้อน วัสดุรองเส้น วัสดุทนความร้อน วัสดุเคลือบป้องกันของเหลว แก๊ส รั่วไหล และอื่นๆ อีกมากมายอย่างไรก็ตามแม้ปัจจุบัน ในประเทศไทยสามารถผลิต อสัณฐานคาร์บอนได้เอง แต่อสัณฐานคาร์บอนยังมีข้อจำกัดด้านการนำความร้อน-ไฟฟ้าต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทานยังสูงอยู่จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปโครงสร้างการยึดเกาะอะตอมของอสัณฐานคาร์บอน ให้เป็นอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟต์ เพื่อเหตุผลด้านคุณสมบัติการนำ ความร้อน-ไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะดีขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ มุ่งศึกษาออกแบบเตาอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟต์ ขึ้นใช้เองในประเทศไทยในเชิงวิจัยควบคู่กับเชิงพาณิชย์ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการยึดเกาะอะตอมของอสัณฐานคาร์บอนเสียใหม่ให้เป็นอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟต์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของคาร์บอนให้เหมาะสมกับลักษณะงาน

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็น 7 บท โดยแต่ละบทจะมีเนื้อหา ดังนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและสาเหตุวัตถุประสงค์แนวคิดและขอบข่ายในการทำวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการแปลงโครงสร้างการยึดเกาะอะตอมของอสัณฐานคาร์บอน ทฤษฎีความต้านทานไฟฟ้าในตัววัสดุและความต้านทานไฟฟ้า ณ จุด สัมผัส และหลักการทำงานของเตา
- บทที่ 3 กล่าวถึงเงื่อนไขการออกแบบและการสร้างเตา
- บทที่ 4 กล่าวถึงการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อนสะสมพลังงานที่สูญเสียไปกับความร้อน การศึกษาความเหมาะสมของวัสดุขนาด
- บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลอง หาประสิทธิภาพของเตาและคุณสมบัติของอสัณฐานคาร์บอนที่ได้แปลงรูปเป็นอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟต์แล้ว
- บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง
- บทที่ 7 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ

ในตอนท้ายจะเป็นภาคผนวก และเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ที่มาและสาเหตุ

ปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมคาร์บอนในประเทศไทยได้เจริญก้าวหน้ามากได้มีการผลิตอัสฟัลท์คาร์บอนขึ้นใช้เอง แต่เนื่องจากความจำกัดด้านคุณสมบัติการใช้งานของอัสฟัลท์คาร์บอนจึงมีแนวความคิดที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัสฟัลท์คาร์บอนให้ดียิ่งขึ้นอย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่จะมาช่วยในการแปลงรูปโครงสร้างการยึดเกาะอะตอม ของอัสฟัลท์คาร์บอนนั้นในประเทศไทย และแถบประเทศอาเซียนยังไม่มีใครสร้างขึ้นมา ก่อนการศึกษาค้นคว้านี้มุ่ง เพื่อคิดออกแบบ สร้างเตาแปลงรูปโครงสร้างอะตอมของอัสฟัลท์คาร์บอนขึ้นใช้เอง

1.2 วัตถุประสงค์

จากเหตุผลดังกล่าว จะเห็นว่าอุตสาหกรรมคาร์บอนในประเทศไทยยังขาดความรู้ทักษะความชำนาญในการที่จะสร้างเตาดังนี้ จึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูล และทำการทดลองเกี่ยวกับลักษณะการปฏิบัติการเดินเครื่อง เป็นพิเศษ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิขั้นสุดท้ายนั้นจะสูงมากตั้งแต่ 2200 -3000 องศาเซลเซียส

ส่วนมากปัญหาสำคัญคือวัสดุตัวความต้านทานไฟฟ้า ที่จะเป็นตัวให้ความร้อนแก่อัสฟัลท์คาร์บอน และวัสดุฉนวนที่จะป้องกันความร้อนจากภายในสู่ภายนอกนั้นยังมีราคาสูง และไม่มีคุณสมบัติที่ดีที่จะพาให้บรรลุมูลวัตถุประสงค์การผลิตจึงต้องมีการค้นคว้า ศึกษาหาวัสดุภายในประเทศที่มีราคาถูก และคุณสมบัติในการทำหน้าที่ของตัวเองให้ถูกต้อง

1.3 แนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์

1.3.1 ลักษณะการทำงานของเตาทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่คือ

1.3.1.1 การให้ความร้อนโดยตรงจากแหล่งพลังงานแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ แบบแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.3.1.2 การให้ความร้อนทางอ้อม เป็นแบบตัวความต้านทานไฟฟ้าส่งผ่านความร้อนโดยการนำ พา และแผ่รังสีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 แนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเพื่อสร้างเตาให้มีอุณหภูมิสุดท้ายสูงตั้งแต่ 2200-3000 องศาเซลเซียสและคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์คือให้ทองจากการเผามีน้ำหนักมาก และใช้เวลาในการเผาสั้นภายใน 1 วัน ไม่ต้องการเตรียมการด้านอุณหภูมิ จากผลการศึกษาพบว่าเตาแบบให้ความร้อนโดยตรงให้คุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นมากกว่าแบบอื่น

1.4 ขอบข่ายของการทำวิทยานิพนธ์

เนื่องจากการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน มีตัวแปรอันเกี่ยวเนื่องกับความต้านทานสภาพการนำความร้อนของวัสดุ และที่สำคัญฉนวนที่ใช้ป้องกันผิวของแท่งอัญฐานคาร์บอนเป็นสภาพพวงละเอียด จำต้องศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สภาพแรงกดดันระหว่างอนุภาคเล็กๆ ต่างๆ ที่มีปัจจัยของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง จึงจะทราบค่าการนำความร้อนที่จุดต่างๆ เพื่อหาค่าความหนาของฉนวน เพื่อผลของการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมถึงศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของอัญฐานคาร์บอนเป็นอิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 2

หลักการดำเนินงานของเตากราไฟต์ไทยซึ่ง และทฤษฎี

2.1 การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

2.1.1 การแปลงรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ตามที่ได้กล่าวข้างต้นถึง การเลือกวิธีการสร้างความร้อนแก่สัณฐานคาร์บอนใช้วิธีให้ความร้อนโดยตรง (Direct -Heating) โดยให้คาร์บอนที่ต้องการเผาเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า และให้วัสดุสารความต้านทานไฟฟ้าเป็นเม็ดหุ้มล้อมรอบแท่งคาร์บอน และเป็นส่วนให้ความร้อนโดยตรงโดยที่วงจรต่ออนุกรมกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **รูปที่ 2.1** รูปเตากราฟไฟต์ไทยซึ่ง เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดตทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = KG \quad (2.1.3)$$

D = เป็นความหนาแน่นประจุความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ความร้อนผ่าน

G = ขนาดความลาดเอียงของอุณหภูมิที่ต่างกัน

K = ค่าการนำความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ดังนั้นจากสมการเวกเตอร์ที่ 2.1.3 สามารถเขียนความสัมพันธ์รูปสมการ คิฟเฟอเรนเชียลได้ว่า

$$\frac{d\Phi}{ds} = -K \frac{d\Theta}{dx} \quad (2.1.4)$$

โดยที่

Φ = ประจุความร้อน(หน่วยวัตต์)

Θ = อุณหภูมิ (หน่วยองศาเซลเซียส)

S = พื้นที่ทั้งหมดที่ประจุความร้อนเคลื่อนผ่าน(ตารางเมตร)

X = ระยะห่างจากจุดที่อุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ(เมตร)

K = ค่าการนำความร้อน (วัตต์ ต่อ เมตร * องศาเซลเซียส)

จากสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้กฎเกณฑ์คือ

1. การเคลื่อนที่ของประจุความร้อนไปในแนวทางเดียวกัน ลำดับลาดเอียงของอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ

2. ขนาดความหนาแน่นประจุต่อหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนกับขนาด ความลาดเอียงของอุณหภูมิที่ต่างกันเครื่องหมายลบแสดงถึงการเคลื่อนที่ ของประจุความร้อนไปในทิศทางที่อุณหภูมิต่ำกว่า

2.1.3 การเก็บสะสมพลังงานความร้อนในผงฉนวนและความสูญเสียความร้อนที่ผนังแม้ว่าผงฉนวนจะมีความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า Charge มาก จนสามารถตัดทิ้งได้ในการคำนวณสมการกำลังไฟฟ้าแต่ในสมการพลังงานไฟฟ้าจะเห็นว่า เวลาเป็นตัวแปรที่มีให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่คิดว่าควรเป็นส่วนสร้างความร้อนแก่ Charge ในเวลา t_1 ชั่วโมง ยังถูกใช้ในการสร้างส่วนสะสมพลังงานความร้อนในผงฉนวนและผนังอิฐในเวลา t_2 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังต้องชดเชยส่วนความร้อนที่สูญเสียออก เขตปริมาตรของกำแพงผนังเตาและส่วนบนอีก

t_3 ชั่วโมง ดังนั้นในสมการกำลังไฟฟ้าดูเหมือนว่าถูกใช้ไปใน Charge เท่านั้นแต่ในสมการพลังงานไฟฟ้าได้มีการใช้เวลา t_2 และ t_3 ด้วยเหตุผลดังกล่าวดังนั้นในทางอุณหพลศาสตร์ ถ้าไม่จำเป็นต้องเก็บสะสมพลังงานความร้อน และชดเชยส่วนสูญเสียความร้อนแล้วพลังงานไฟฟ้าจะมีเพียงเวลา t_1 เท่านั้นซึ่งจะใช้เวลานานในการเผาไหม้หรือการจุดมุ่งหมายในอุณหภูมิต่ำ แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ที่จะเป็นเช่นนั้น ดังจะยกตัวอย่างระบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electro Mechanical Machine) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เห็นสมการพลังงานที่แยกออกให้เห็นส่วนสะสมพลังงานถึง 2 ส่วน คือพลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็ก และพลังงานจลน์สะสมในมวลที่หมุนอยู่ (Rotating Mass) นอกจากนี้ยังต้องชดเชยพลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้า และระบบมวลที่หมุนอยู่ซึ่งพอจะสรุปสมการ พลังงานไฟฟ้าซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อไปใช้งานขับหรือหมุนโหลดทางกลดังนี้

$$W_e = (W_{le} + W_{lm}) + (W_{fs} + W_{sm}) + W_m \quad (2.1.5)$$

- W_e = พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ระบบต้องการ
- W_{le} = พลังงานที่ชดเชยส่วนสูญเสียในความต้านทานไฟฟ้า
- W_{lm} = พลังงานที่ชดเชยส่วนสูญเสียในแนวเสียดทานที่จุดสัมผัสของส่วนที่หมุนกับส่วนที่อยู่กับที่ แรงเสียดทานในส่วนของลมที่ใบพัด
- W_{fs} = พลังงานที่เก็บสะสมในรูปสนามแม่เหล็ก
- W_{sm} = พลังงานที่เก็บสะสมในรูปมวลที่หมุนพลังงานจลน์
- W_m = พลังงานกลที่ต้องการใช้จริง

และถ้าจะดูสมการกำลังไฟฟ้าที่ใช้จริงสำหรับระบบนี้จะเป็น

$$v_i = R i^2 + i \frac{d\psi}{dt} \quad (2.1.6)$$

- v = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
- i = กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
- R = ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)
- ψ = เส้นแรงแม่เหล็ก (เกาส์)
- t = เวลา (วินาที)

ตั้งจะเห็นว่าในสมการกำลังงานไม่มีส่วนใดบอกถึงส่วนที่ใช้กับกำลังกล แต่เมื่อมีเวลามาเกี่ยวข้อง ทำให้เห็นพลังงานจลน์สะสม และส่วนสูญเสียทางกลทันที

2.1.4 สมการพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานความร้อน

จากหัวข้อที่ 2.1.3 จะได้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบเตากราไฟต์โทซิ่งนี้จะเป็น

$$W_e = (W_{el} + W_{hl}) + W_{st} + W_{hc} \quad (2.1.7)$$

W_e = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

W_{el} = พลังงานที่ชดเชยส่วนสูญเสียในความต้านทานไฟฟ้า

W_{hl} = พลังงานที่ชดเชยส่วนสูญเสียในรูปความร้อนที่รอบนอกของผนังเตา

W_{st} = พลังงานที่เก็บสะสมความร้อนที่ฟองถ่านและผนังอิฐ

W_{hc} = พลังงานของความร้อนที่ Charge ได้รับ

2.2 ทฤษฎี ความต้านทานไฟฟ้าของคาร์บอนเชิงลบ

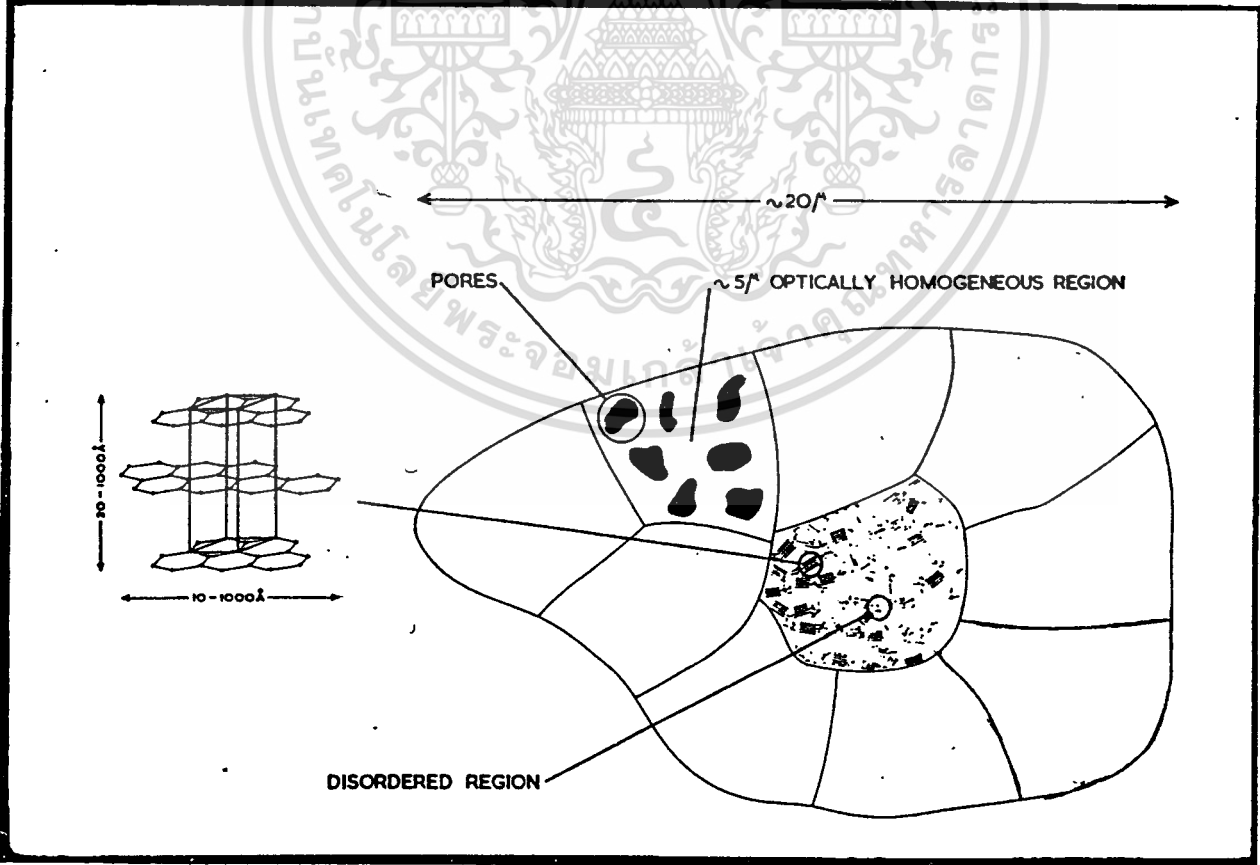
เนื่องจากการแปลงรูปสัณฐานคาร์บอน ให้เป็นอิเล็กโตรกราไฟต์ได้นั้น ต้องอาศัยความร้อนตั้งแต่ 2200 - 3000 องศาเซลเซียส จึงจะทำให้สัณฐานคาร์บอนที่มีโครงสร้างอะตอมเรียงเป็นลักษณะหกเหลี่ยม เป็นแผ่นขนานกัน

แต่ลักษณะแต่ละแผ่นไปคนละทางไม่เป็นระเบียบ มีความห่างแต่ละชั้น

3.44 อังสตรอม และแต่ละผลึกคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมาก เพราะมีชั้นเรียงกันน้อยมากประมาณ 25 อังสตรอม

แต่เมื่อให้อุณหภูมิแก่สัณฐานคาร์บอนสูงขึ้นจนถึง 2200 - 3000 องศาเซลเซียส โครงสร้างอะตอมจะเรียงกันขนานกันในแนวทางเดียวกันจะมีแขนระหว่างชั้นอ่อนๆ มากขึ้นจนเกือบเหมือนโครงสร้างอะตอมของกราไฟต์ธรรมชาติมากขึ้นผลึกของคาร์บอนที่กำลังจะเป็นอิเล็กโตรกราไฟต์ จะเริ่มโตขึ้นเป็น 50 อังสตรอม ถึง 1000 อังสตรอม และแขนระหว่างชั้นจะลดขนาดลงจาก 3.44 อังสตรอม เป็น 3.35 อังสตรอม

เมื่อหันกลับมาพิจารณาค่าความต้านทานไฟฟ้าของคาร์บอน อนุกรมเม็ดคาร์บอน คาร์บอนอสัณฐานในรูป (PETROLEUM COKE , COAL TAR PITCH) ซึ่งอยู่ในสภาพของเหลวจนถึง 450 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นของแข็ง เป็นคาร์บอนนิ่มและจากการให้ความร้อนจาก 500 - 800 องศาเซลเซียส จะมีกลุ่มแก๊สเกิดขึ้นมากความต้านทานไฟฟ้าจะลดจาก 10^7 โอห์ม-ซม. เป็น 10^{-2} โอห์ม-ซม. ผลที่ความต้านทานไฟฟ้าลดลงมากเช่นนี้ แก๊สไฮโดรเจนถูกขับออกจากพันธะอิเล็กตรอน σ จากขอบอะตอมที่เคยจับกับไฮโดรเจนจะว่างอยู่ไม่มีคู่ เป็นเหตุให้อิเล็กตรอน π จากการจับตัวกันระหว่างชั้นเลื่อนขึ้นมาเป็นอิเล็กตรอนจับคู่กันใหม่ ช่องว่างที่อิเล็กตรอนทั้งไปจะเกิดในส่วนของช่องพลังงานกลายเป็นช่องพลังงานที่มีประจุบวกกับลบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และนี่เองเป็นส่วนช่วยทำให้เกิดการลดลงอย่างมากสำหรับค่าความต้านทานในช่องพลังงาน จำนวนประจุบวกที่เพิ่มเกินเข้ามาจนอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เพิ่มในแถบบน ช่องพลังงานจะลดลงมากเป็นลำดับ แต่อย่างไรก็ดี ในช่องอนุกรม 800 - 2000 องศาเซลเซียส จะไม่มีปรากฏการณ์เช่นนี้มากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ในช่วงให้ความร้อนอุณหภูมิต่ำๆ ตั้งแต่ 500 - 800 องศาเซลเซียส นี้ จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งชนจะเกิดขึ้นน้อย จนไม่เป็นผลเท่ากับปรากฏการณ์ แรกที่กล่าวถึงแต่สามารถอธิบายค่าความต้านทานในห้องอุณหภูมิสูงจาก 800 องศาเซลเซียส ขึ้นไปได้การวิ่งชนของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อสตรายที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้นคล้ายๆ กับอากัปกิริยาของพวกโลหะ จำนวนประจุจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิแต่ผลของความต้านทานของโลหะเปลี่ยนเพราะเนื่องจากการวิ่งชนของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดพลังงาน แต่ในคาร์บอนจะมีผลการวิ่งชนของอิเล็กตรอนที่ขอบของผลึก และส่วนสำหรับระหว่างผลึกสำหรับผลึกคาร์บอนที่เล็กมากนี้ ผลการวิ่งชนของอิเล็กตรอน จะมีผลมากในแง่ของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทาน นี้เป็นผลอย่างมากกับการวิ่งชนของอิเล็กตรอน

ดังนั้น ค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน กับการให้ความร้อนจาก 1200 - 2000 องศาเซลเซียส พอจะสรุปได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งชนจะลดลง เพราะผลึกเริ่มโตขึ้น ดังนั้นในมวลสารก็จะมีอิเล็กตรอนที่ขอบผลึกและจุดสัมผัสระหว่างผลึกลดลงอย่างแน่นอนมีผลให้การวิ่งชนของอิเล็กตรอนไม่ได้มากเช่นโลหะ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่าความต้านทานของคาร์บอนที่ได้รับการแปลงรูปโครงสร้างอะตอมเป็นอิเล็กโตรกราไฟต์พยายามจะรักษาค่าความต้านทานให้คงที่ด้วยเหตุผล 2 ประการคือ ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น จาก 800 - 2000 องศาเซลเซียส อัตราการลดช่องพลังงานจะเริ่มช้าลงมาก ขณะเดียวกันในส่วนการวิ่งชนของอิเล็กตรอนที่ขอบผลึกและจุดสัมผัสก็เริ่มน้อยลงด้วยเช่นกัน

2.3 ทฤษฎีความต้านทานไฟฟ้าจุดสัมผัสระหว่างอนุภาค

ความต้านทานไฟฟ้าจุดสัมผัสกล่าวว่าเมื่ออนุภาคกลม 2 อนุภาคบริสุทธิ์ มาสัมผัสกับความต้านทานไฟฟ้าที่จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุดนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานภายใน เม็ดอนุภาคกับจุดสัมผัสนั้น ตามค่ากล่าวของ โฮล์ม คือ

$$\text{ความต้านทานไฟฟ้า} = \frac{\rho}{\pi a}$$

$$\rho = \text{ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยของเม็ดอนุภาค} \quad (2.3.1)$$

$$a = \text{รัศมีของวงจุดสัมผัสนั้น}$$

ขนาดของพื้นที่จุดสัมผัสจะขึ้นอยู่กับแรงกดอัดระหว่าง 2 อนุภาค สำหรับความเป็นจริงเม็ดอนุภาคที่เป็นผงเหล่านี้นักไม่ได้จดจุดต่อจุด 2 อนุภาคแต่จะสัมผัสกันหลายอนุภาคซึ่งกันและกัน จึงมีจุดสัมผัสเพิ่มขึ้น n จุดตามความหนาแน่นของการบรรจุ ซึ่งจะเขียนเป็นสมการ

$$n = \beta \left(\frac{4}{3} \pi R^3 N \right)^D = \beta^D \quad (2.3.2)$$

n = จำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร

D และ β = เป็นค่าคงที่

R = รัศมีของเม็ดอนุภาคนั้น

ถ้าคิดว่ากระแสไหลผ่านวงอนุภาคชั้นเป็นทรงกระบอกสูง h ซึ่งคิดว่ามีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค และจะขึ้นกับลักษณะการบรรจุสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$h = \frac{4}{3} R \chi \rho^{-1} q \quad (2.3.3)$$

q และ χ เป็นค่าคงที่ (< 1)

ถ้าจะแบ่งดวงเป็นชั้นๆ สูง h ในแต่ละชั้นจะมีค่าความต้านทานในแต่ละชั้นมี $M=N+h$ จำนวนอนุภาคและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของเม็ดอนุภาคในหน่วยปริมาตรที่ต้องการทั้งหมดมีค่าในหน่วย Mn หลายๆ หน่วยขนานกันแต่อนุกรมกันด้วยแต่ละชั้น h ชั้น

ดังนั้น ความต้านทานจำเพาะ

$$\rho = \frac{1/n}{Nhn} \cdot \frac{\rho}{\pi a} \quad (2.3.4)$$

a = เป็นฟังก์ชันของแรงกด P ที่กดอัดและการบรรจุ ρ ถ้าให้แรงกดต่อจะสัมพันธ์คือ

$$F = KP/Mn \quad (2.3.5)$$

โดย K เป็นแรงกดของอนุภาคต่ออนุภาคในแนวเฉลี่ย 45 องศา จะมีค่า = $\sqrt{2}$ ดังนั้นค่า a จะขึ้นอยู่กับค่า P บนการเปลี่ยนรูปตามแรงกดดังต่อไปนี้

a การเปลี่ยนรูปโดยการยุบตัว ตามทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าถ้า 2 อนุภาคสัมผัสกันจะได้

$$a = 1.11(Fr/2E)^{1/3} \quad (2.3.6)$$

E = อีลาสติก โมดูลัส (ELASTIC MODULUS)

$$\text{แทนค่า a } \rho = \frac{0.58}{(k\beta^2 \chi^5)^{1/3}} \frac{\rho}{p^{1/3} \chi^k} \cdot \frac{1}{p^{1/3} \chi^k} = 0.34 \cdot \frac{\rho}{p^{1/3} \chi^k} \frac{E^{1/3}}{p^{1/3} \chi} \quad (2.3.7)$$

$$\text{เมื่อ } K = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} d - \frac{5}{3} q \quad (\text{ให้ } \chi = 0.8, q = 0.5) \quad (2.3.8)$$

(b) การเปลี่ยนรูปตามจุดจำกัดซิลด์พอยต์

$$\text{ค่าแรงกด } F = \pi a^2 H \tag{2.3.9}$$

$$a = (KP/Mn\pi H)^{1/2}$$

$$\nu = \frac{0.75 H^{1/2}}{(K\sigma^3)^{1/2}} \cdot \frac{1}{P^{1/2} \nu^k}$$

$$= 0.445 \nu \frac{H^{1/2}}{P^{1/2} \nu^{3/4}} \\ (K=1/2 + 1/2 d - 3/2 q)$$

เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่าง ν และ P ให้ $\nu = P^{-s}$

ค่าความลาดเอียง s ได้จากการประเมินค่า ν ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า P โดยที่ $\log \nu = -s/\log P$, $\nu = 1/\nu$ และทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าค่า ν จะขึ้นกับแรงกด P แต่จะขึ้นกับค่า ν เพียงเล็กน้อย ส่วนค่าความลาดเอียง s จะขึ้นกับลักษณะจุดสัมผัส และไม่เปลี่ยนตามการบรรจุ การทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงที่ใช้ยึดจะมีค่าความลาดเอียง $s > 0.5$ ไม่ว่าจะใช้เม็ดอนุภาค ละเอียดขนาดไหน แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และหากต้องการหาความสัมพันธ์ จากการทดลองพบว่าถ้ามีการบรรจุขนาดอนุภาคแตกต่างกันถึง 1 ต่อ 16 เท่า จะได้ขนาดบรรจุแตกต่างกันเพียง 5-15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจ่ายแรงกดอัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจะเปลี่ยนตามสมการโดยไม่คำนึงถึงค่าขนาดของเม็ดอนุภาคเมื่อมีการอัดจนแล้ว การบรรจุใน ν จะไม่แปรเปลี่ยนเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนเนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจุดสัมผัสดังสมการ

$$a = a_0 + c \cdot \log(ct+1) \tag{2.3.10}$$

เมื่อ a_0 เป็นจุดสัมผัสเริ่มต้นที่ค่าแรงกดอัด P_0 ดังนั้น

$$\frac{R_0 - R}{R_0} = \frac{C}{a_0} - \log(ct+1) \quad (2.3.11)$$

จากการทดลองพบว่า $(R_0 - R) / R_0$ เป็นสัดส่วนผกผันกับ $1/P_0$ พื้นที่จุดสัมผัส C ไม่ขึ้นกับแรงกดอัด บางครั้งจะสังเกตว่าแม้จะเพิ่มแรงกดอัดขึ้นไปพื้นที่จุดสัมผัสก็ไม่เพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะกับแรงกดโดยเฉพา H ตรงจุดกึ่งกลางจุดสัมผัสจนพื้นที่นั้นเปลี่ยนรูปจนถึงจุดยึดพอสต์ รัศมีของพื้นที่ใหม่จะมีขนาดเท่ากันหรือน้อยกว่ารัศมีของเม็ดอนุภาค ตามสมการ

$$H = 3F/2\pi a^2 \quad (2.3.12)$$

$$P_H = \sigma \beta \mu^{K''} H^3/E^2 = 3.2 \mu^{5/2} H^3/E^2 \quad (2.3.13)$$

เมื่อ $K'' = 1+d-q$ ถ้ารัศมีของจุดสัมผัสเล็กมากและไม่เท่ากันหรือขึ้นกับขนาดรัศมีอนุภาคจะได้ว่า μ ในสมการที่ 2.3.4 จะมีค่าน้อยสำหรับผงอนุภาคเล็ก ขณะที่เม็ดอนุภาคลดลงความลาดเอียงของเส้นกราฟจะเพิ่มขึ้นและแรงกดอัดลดลงจะทำให้ค่าคงที่ K ผิดพลาด และเม็ดอนุภาคที่ใหญ่กว่าจะมีการจมฝังในผิวมากกว่าอนุภาคเล็ก นอกจากนั้นขณะที่เม็ดอนุภาคเล็กลงจุดสัมผัสในเนื้อที่ที่เล็กลงมากจะทำให้ค่า Hardness H เพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดที่ถูกต้องค่าอิลาสติกโมดูลัสจะมาก ตามสัดส่วนของขนาดในหน่วยเล็ก ๆ

ค่าความลาดเอียงของกราฟจะสอดคล้องกับสมการ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลจากขนาดและแรงกดอัดจะมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งสิ้น แต่การเปลี่ยนแปลงค่า H และ E ไม่สามารถนำมาอธิบายผลของขนาดเม็ดอนุภาคได้

ความลาดเอียงของกราฟสำหรับเม็ดอนุภาคใหญ่ประมาณ 0.3 ดูเหมือนว่าจะสอดคล้องกับการหย่อนตัว ซึ่งกลไกการหย่อนตัวนั้นซับซ้อนยากต่อการอธิบาย พื้นที่จุดสัมผัสจะแบนราบลงทันทีที่มีแรงกดต่อกัน ในสมการที่ 2.3.12 ไม่สามารถนำมาอธิบายได้

2.4 ทฤษฎีการนำความร้อนในวัสดุคาร์บอน

ในแท่งคาร์บอนที่ทำการ กราฟไฟต์ไทป์ซึ่งแล้ว ผลึกเล็กๆ ของกราฟไฟต์จะถูกเกี่ยวค้ำกันแต่ยังไม่เป็นระเบียบชั้นของผลึกกราฟไฟต์หลายผลึกเล็กๆ เชื่อมต่อกันซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความร้อนจะอาศัยชั้นผลึกเหล่านี้ส่งผ่านความร้อนตามลูกศรถ้าชั้นผลึกไหนไม่มีการเชื่อมโยงถึงกันจะเป็นอุปสรรค และต้านทานการไหลของความร้อน และนี่เองที่เป็นสาเหตุให้การนำความร้อนของอสัณฐานคาร์บอน หลายผลึกมีค่าต่ำกว่ากราฟไฟต์ธรรมชาติซึ่งมีการเชื่อมโยงชั้นจนเป็นส่วนแทบจะเป็นส่วนเดียวกันซึ่งเรียกผลึกเดี่ยว

2.4.1 การส่งผ่านความร้อนในผลึกอโลหะ

โลหะและอโลหะมีลักษณะการนำความร้อนแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โลหะจะนำความร้อนโดยไม่มีชั้นกับอโลหะมากนัก แต่อโลหะจะนำความร้อนเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ค่า K การนำความร้อนจะมีค่าสูงสุดในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ และลดลงสู่ค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น ในผลึกอโลหะมีค่าการนำความร้อนสูงสุดดีกว่าโลหะที่นำความร้อนดี แต่ถ้าเฉลี่ยทุกช่วงอุณหภูมิการนำความร้อนของโลหะจะดีกว่ามาก

สำหรับผลึกที่เป็นฉนวนไฟฟ้า หลังงานความร้อนจะถูกส่งผ่านในโครงข่ายการยึดเกาะของอะตอมโดยวิธีการสั่นทำให้เกิดคลื่นอคูสติกเคลื่อนที่ไปตามโครงข่ายนั้น ความต้านทานความร้อนจะขึ้นอยู่กับทิศทางการหักเหของคลื่นอคูสติก (Acoustic) โดยเกิดขึ้นที่ภายในผลึก เนื่องจากการเคลื่อนของอคูสติกและที่ขอบผลึก

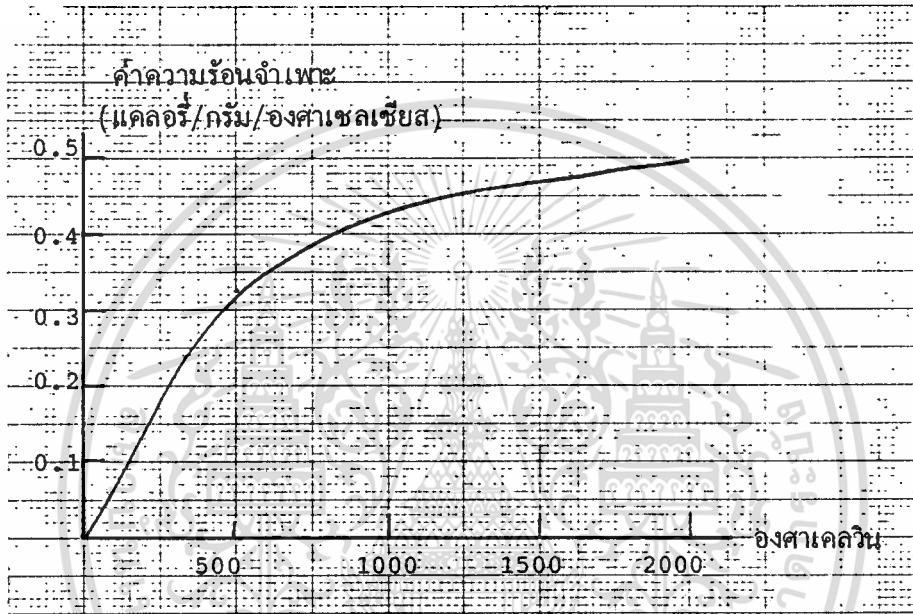
ตามปกติสมการการนำความร้อนของผลึกอโลหะจะเป็น

$$K = 1/3 CVL \quad (2.4.1)$$

C = ความร้อนจำเพาะ/หน่วยปริมาตร

V = ความเร็วคลื่นอคูสติกที่พาความร้อนไป

L = ระยะทางเฉลี่ยของคลื่นอคูสติก



รูปที่ 2.3 ค่าความร้อนจำเพาะของกราไฟต์และคาร์บอนทั่วไป

สำหรับสาระทั่วไป ค่าความร้อนจำเพาะของอะตอมจะขึ้นอยู่กับการสั่นของโครงข่ายการยึดเกาะซึ่งแปรตามค่า T_3 ที่อุณหภูมิต่ำ และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ T ในช่วงอุณหภูมิสูง การทดลองของค่า K ในช่วงอุณหภูมิสูงเกินเนื่องจากการเพิ่มค่าความร้อนจำเพาะอย่างช้ามากผนวกกับการลดลงของระยะทางเฉลี่ย (mfp) ของคลื่นอคูสติกการที่ mfp ลดลงนี้เกิดจากการเพิ่มความถี่ของคลื่นอคูสติกอย่างมาก ขนาดของคลื่นก็เพิ่มอีกด้วย และผลจากการที่คลื่นเดินทางผ่านระยะทางเฉลี่ยสั้นๆ นี้เอง ประกอบกับการเคลื่อนของอุณหภูมิในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกมากพอที่จะหักเหทิศทางของคลื่นได้ ทำให้ค่า K ลดลงมาก ซึ่งได้ข้อสรุปว่า

$$L \propto \frac{1}{T} \text{ ที่อุณหภูมิสูง}$$

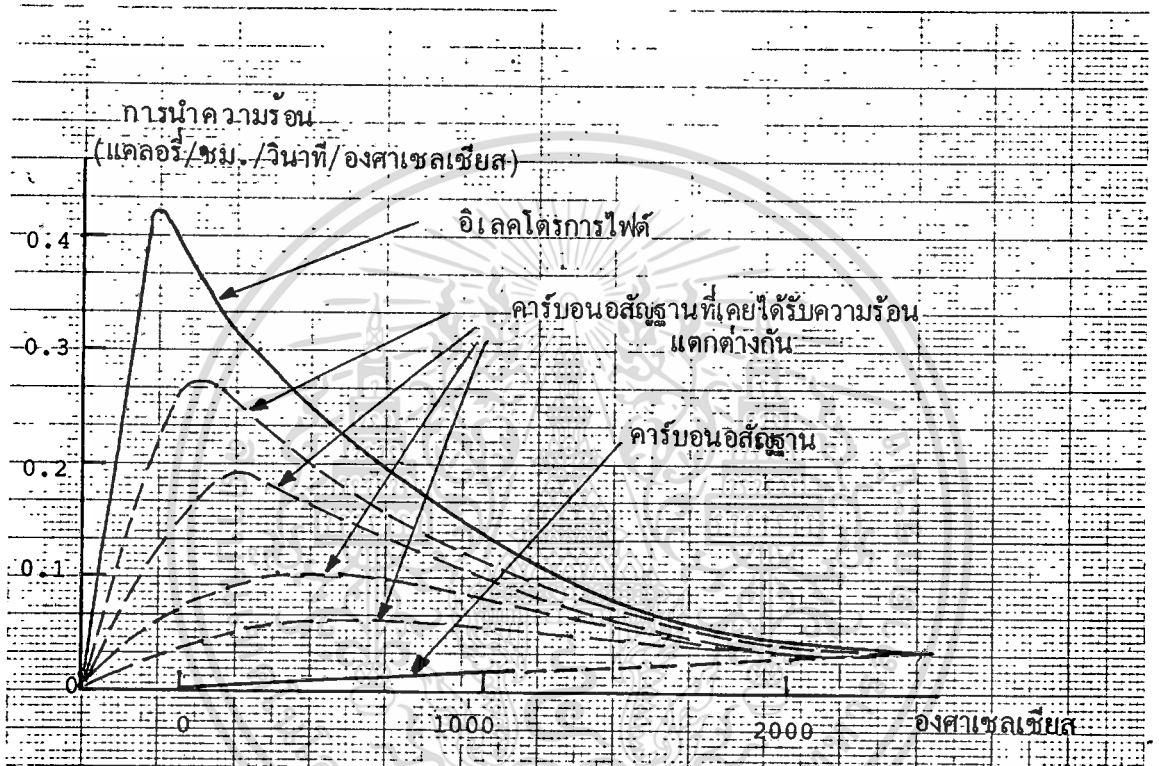
ที่อุณหภูมิต่ำคลื่นอนุสติกจะเดินทางผ่านไปนในโครงข่ายนี้ได้โดยไม่มีกรหักเหมากนัก และเมื่อระยะทางเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นคลื่นนี้จะถูกหักเหที่ขอบผลึก และโครงข่ายที่เกาะเกี่ยวกันไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ระยะทาง L (mfp) ขึ้นอยู่กับขนาดผลึกและระยะทางเฉลี่ยระหว่างช่องว่างที่ไม่เชื่อมต่อกันของผลึก ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำค่าการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ เช่นเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะ

ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิต่ำ ค่าการนำความร้อนสูงสุดจะเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุ 2 ประการคือ

1. ระยะทาง (mfp) L_T ที่เป็นไปตามอุณหภูมิต่ำในผลึก
2. ระยะทาง (mfp) L_B ที่เป็นไปตามการหักเหที่ขอบผลึกหรือช่องต่อที่ไม่สนิท

รูปร่างของกราฟที่มีการนำความร้อนสูงสุดจะขึ้นกับหลายปัจจัยคือ ถ้าระยะทางเฉลี่ย (mfp) ระหว่างผลึกทั้ง 2 น้อยเกินไปหรือรูปผลึกไม่สมบูรณ์ มีสิ่งแปลกปลอมมาก อาจจะทำให้เกิดความต้านทานการไหลของความร้อนค่า K ที่จุดสูงสุดนี้จะลดลงได้

2.4.2 การส่งผ่านความร้อนในผลึกอสัญฐานคาร์บอน



รูปที่ 2.4 การนำความร้อนของคาร์บอนที่มีผลึกขนาดแตกต่างกัน

แสดงถึงวัสดุอย่างเดียวกัน แต่เคยได้รับความร้อนแตกต่างกัน กราฟแสดงให้เห็นว่ายิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลึกยิ่งโตมากขึ้นเท่าไร ค่าการนำความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำใกล้อุณหภูมิแวดล้อมมาก และยิ่งผลึกเล็กมากค่าการนำความร้อนจะไปสูงสุดที่อุณหภูมิสูงมาก ในกราฟอัตราขนาดผลึกจะชิดกันหรือไม่มีความต้านทานระหว่างขอบผลึก ค่าการนำความร้อน K จะไม่แปรตามขนาดของผลึกเลยในช่วงอุณหภูมิสูงทั้งนี้เพราะ L_T (mfp) นั้นสั้นมากจนไม่มีการหักเหที่ขอบผลึกใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า K ของอสัณฐานคาร์บอนจะเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ มากกว่า การเคลื่อนของอุณหภูมิในโครงข่าย นอกจากนั้นความต้านทานการเคลื่อนของอุณหภูมิที่ขอบผลึก ยิ่งขึ้นกับอุณหภูมิด้วยและถ้าคาร์บอนใดไม่เคยได้รับความร้อนมากพอในครั้งก่อน ค่าการนำ ความร้อนของมันยังคงเป็นเส้นกราฟเดิม จนกว่าจะได้รับความร้อนมากกว่าครั้งก่อนมากๆ กราฟจะขยับตัวขึ้นข้างบน

สำหรับคาร์บอนที่เผาไล่ไฮโดรเจนในช่วงคาร์บอนไนซ์แล้วถึง 727 องศาเซลเซียส จะทำให้โมเลกุลของมันมีอะตอมคาร์บอนมาก ค่าการนำความร้อนจะสูงขึ้นเป็นสัดส่วนกับ อุณหภูมิ ตามผลึกที่โตขึ้นจากการวัดการนำความร้อนในกราไฟต์ธรรมชาติ ความร้อนจะถูกนำ ผ่านในชั้นอะตอม จากการศึกษาหลายครั้งพบว่าค่าการนำความร้อนกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ของอสัณฐานคาร์บอนและกราไฟต์หลายผลึกมีค่าสัมพันธ์กันโดยสมการ

$$K \text{ (แคลอรี/ซม./วินาที/องศาเซลเซียส)} \times \rho \text{ (โอห์ม-ซม.)} = 0.00031 \pm 5\% \quad (2.4.2)$$

ซึ่งหมายความว่าค่าการนำความร้อนมักจะได้จากการคำนวณ จากค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดได้ที่อุณหภูมิปกติ

2.4.3 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะกับการนำความร้อนของผงอนุภาค

ค่าความนำความร้อนของเม็ดผงโดยทั่วไป อาจจะทำการวัดได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ค่าความต้านทานไฟฟ้าพอจะทำการวัดได้

เมื่อคุณพฤติกรรมของผงคาร์บอนว่าจะเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้า การนำความร้อนจากพารามิเตอร์อะไร เช่นแรงกดอัด อุณหภูมิที่เคยได้รับ ขนาดของเม็ดผง อุณหภูมิที่ได้จากการให้ความร้อนในปัจจุบัน

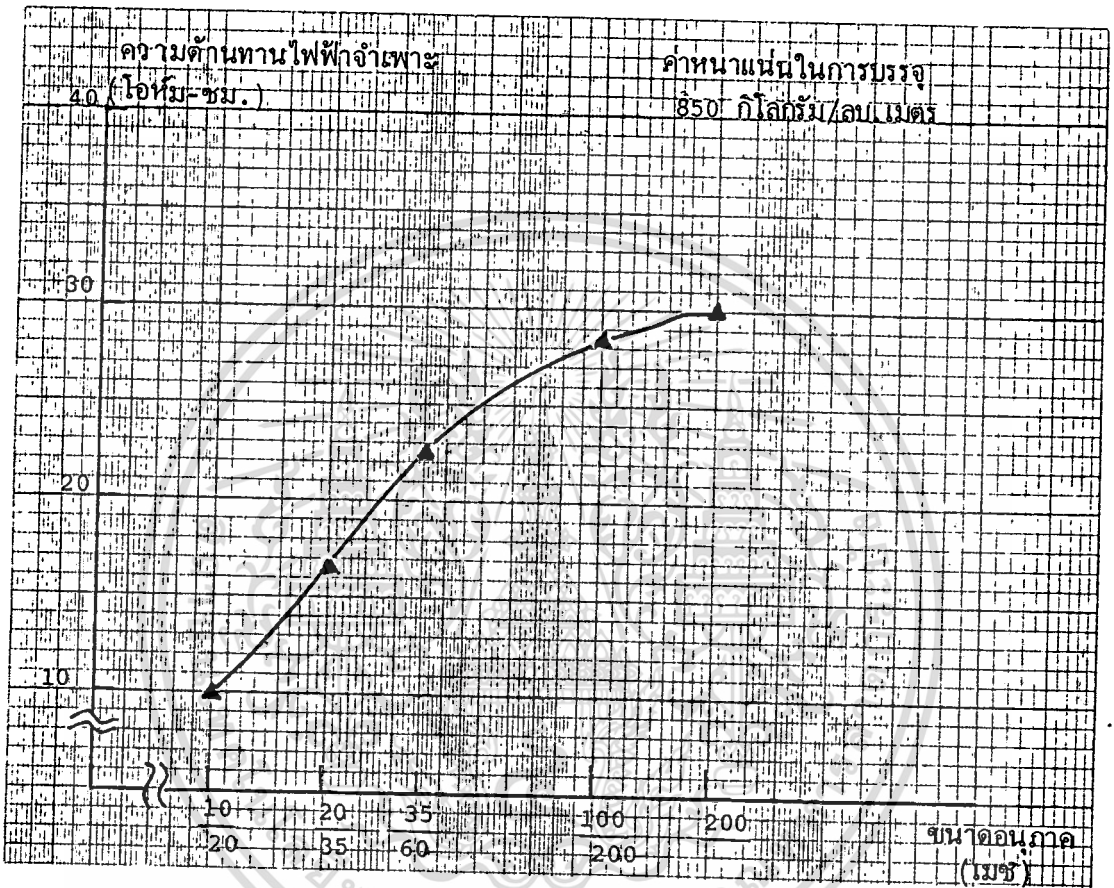
ผลการทดลองพบว่าความนำความร้อน และค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต้องเกี่ยวข้องกับผลการเปลี่ยนขนาดเม็ดผงอนุภาคและอุณหภูมิที่เคยได้รับที่อุณหภูมิต่ำ

ผงที่มีเม็ดขนาดใหญ่ จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า เพราะจุดสัมผัสต่างกัน น้อยกว่าเมื่อเทียบกับความต้านทานไฟฟ้าในตัวมันเอง ผงความต้านทานไฟฟ้าที่เคยได้รับ อุณหภูมิสูงจะมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า ปีโตรเลียมโค๊กมักจะได้รับการกราไฟต์โทซซึ่งง่ายกว่าจะมีโอกาสที่ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า

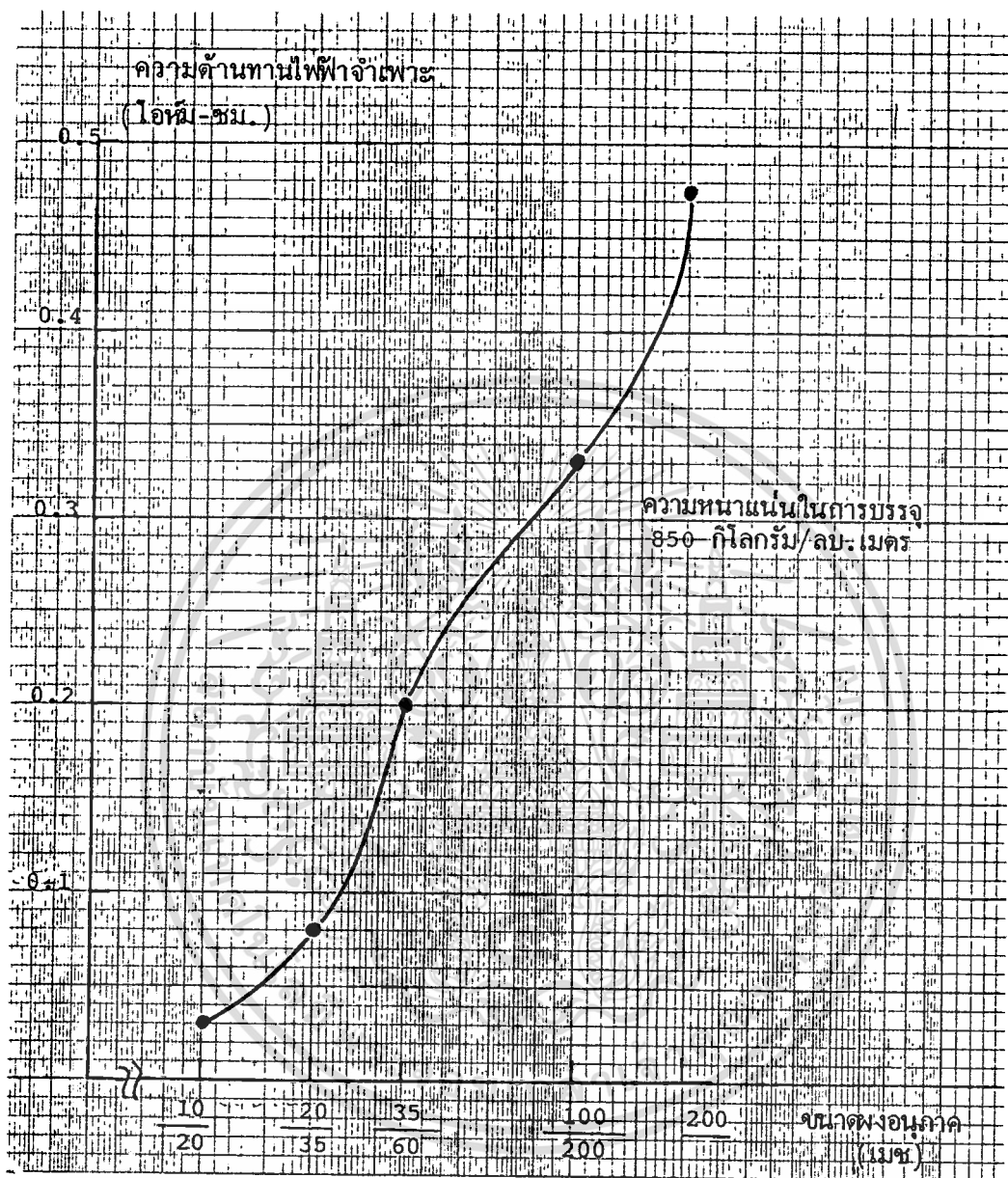
ค่าความนำความร้อนจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและขนาดเม็ดผงที่เคยรับอุณหภูมิสูงจะมีค่าความนำความร้อนสูงขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ค่าความนำความร้อนของผงเม็ดละเอียดมากจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิตามการเพิ่มของการพาความร้อน และแพร่กระจายตามลักษณะการส่งผ่านความร้อนส่วนการนำความร้อนผ่านผงจะลดลงตามอุณหภูมิ

ส่วนผงเม็ดใหญ่จะมีการนำความร้อนอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทั้งนี้เพราะมีช่องว่างที่ใหญ่กว่า และจุดสัมผัสน้อยกว่าจึงเป็นส่วนลดตัวขวางกัน การพาความร้อนและแพร่กระจายความร้อน

ผงปีโตรเลียมโค๊กที่เป็นโอเลคโตรกราไฟต์แล้ว เป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุด และค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด ความต้านทานไฟฟ้าสามารถบอกค่าความนำความร้อนได้

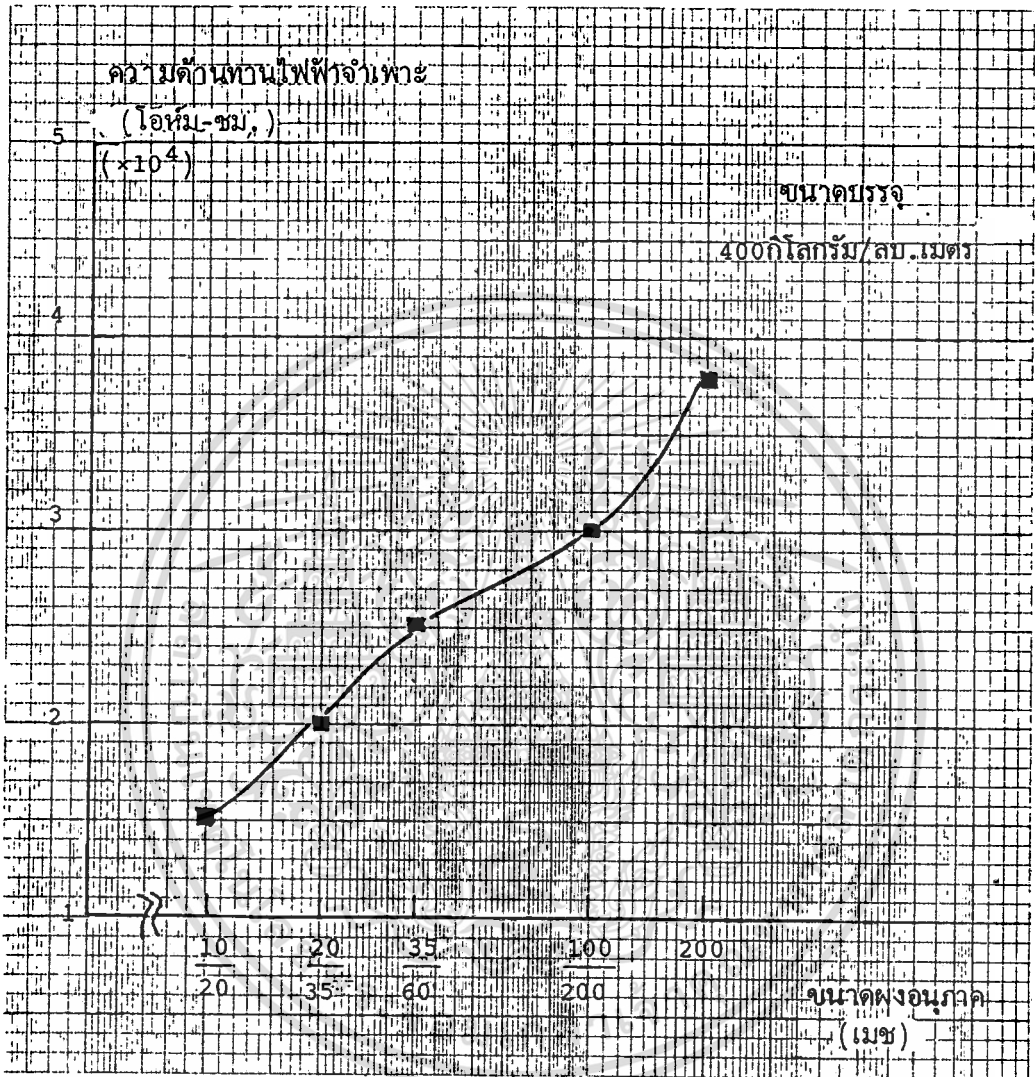


รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ
ที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันของพิชท์โค้ก (PITCH COKE)

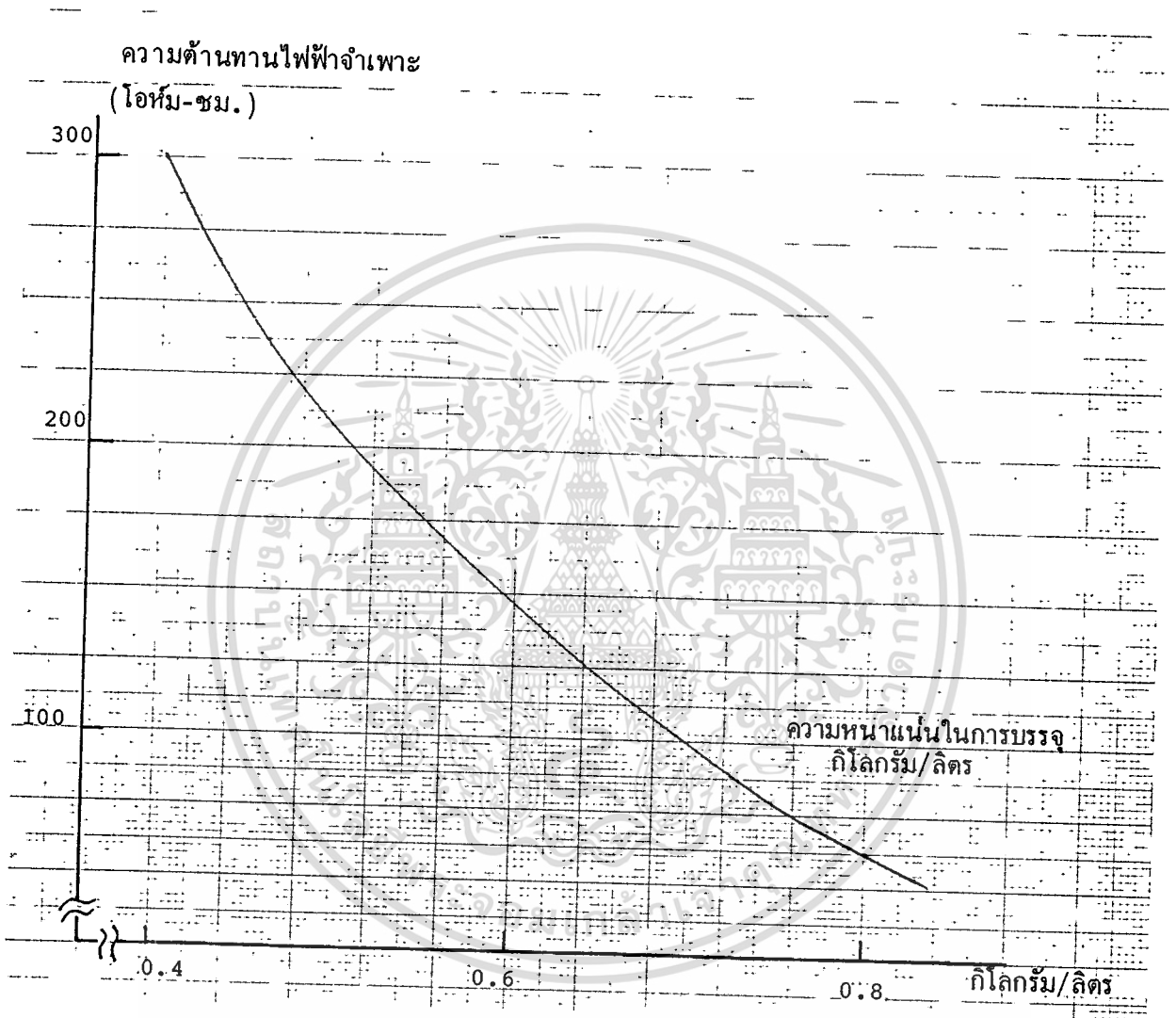


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ
ที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันของผงโค้ก (ELECTROGRAPHITE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ
ที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันของถ่านหุงข้าว (HARD CARBON)



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ
กับความหนาแน่นในการบรรจุของเทอร์โมลบลด

บทที่ 3

การออกแบบเตากราไฟต์ไทยซึ่ง

3.1 เงื่อนไขความเหมาะสมด้านความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด กับช่วงเวลาการใช้งานพลังงานไฟฟ้า

ช่วงเวลาการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในรอบ 1 วัน ซึ่งปกติโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆพยายามจัดระเบียบวางแผนการเดินทางเดินเครื่องจักร เพื่อพยายามรักษาระดับการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบเดือนเป็นการควบคุมค่าดีมานด์ ชาร์จ (Peak Demand Charge) การที่จะดำเนินการเปิดเตากราไฟต์ไทยซึ่งเพื่อการทดลองเผาจริง จำต้องศึกษาดูตารางเวลาการใช้ไปในรอบ 1 วันว่าเป็นเท่าไร (สถานที่ที่ตั้งเตากราไฟต์ไทยซึ่ง : บริษัทไทยคาร์บอนแอนดกร้าไฟต์ จำกัด) จากการสำรวจกำลังไฟฟ้าที่ใช้แบ่งตามลักษณะโหลดต่างๆ ดังนี้.

ตาราง 3.1 กระจายความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดต่างๆ

โหลด	พิกัดกำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	องค์ประกอบ	อัตราส่วน (%) ต่อกำลังไฟฟ้า ทั้งหมด
เตาไฟฟ้า (BATCH)	40 (4หน่วย)	>0.95	14.7%
เตาไฟฟ้า (CONTINUOUS)	120 (2หน่วย) 230 (1หน่วย)	0.90 0.80	43.3%
เตาเผาใช้แก๊ซ (BATCH)	10 (2หน่วย)	0.60	1.8%
เครื่องไฮดรอลิค (อัดแบบขึ้นรูป)	24 (2หน่วย)	0.80	4.4%
เครื่องผสมใหญ่	90 (2หน่วย)	0.70	16.6%
เครื่องผสมเล็ก	30 (4หน่วย)	0.60	11.0%
เครื่องอัดแบบ	7.5 (5หน่วย)	0.75	3.5%
เครื่องล้างอุลตราโซนิค	20 (1หน่วย)	0.80	1.8%
อุปกรณ์สำนักงาน รวมแสงสว่างและอื่นๆ	30 (1หน่วย)	0.60	2.7%

จากตารางพบว่าโหลดประเภทเตาไฟฟ้าคิดเป็น 60% ของโหลดทั้งหมดและจากค่าองค์ประกอบกำลังเฉลี่ยมากกว่า 0.9 (Lagging) และถ้าจำแนกเป็นค่าองค์ประกอบการใช้ไฟฟ้า(Service Factor) มากกว่า 50% (ในรอบ 1 เดือน) ทำให้พบว่าการจะเลือกเวลาเลี้ยงโหลดประเภทเตาไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญ โดยเตาแบบเดิมต่อเนื่องที่มีค่าพิกัดมากที่สุดใช้เวลาทำงาน 2 วัน ติดต่อกัน ส่วนแบบเผาเป็นรุ่นๆ (BATCH) จะมีรอบทำงานสั้นสุดภายใน 1 วัน สลับกัน 4 หน่วย แต่ละวันในสัปดาห์ตั้งนั้นในสัปดาห์หนึ่งอาจมี 1 วัน ที่โหลดจำนวนมากเช่น เตากราไฟต์ไทยซึ่งสามารถเดินเครื่องได้และเว้นการ Cooling อีก 1 สัปดาห์เต็มนี้หมายความว่าใน 1 เดือนจะดำเนินการเผาเตากราไฟต์ไทยซึ่งนี้ 2 ครั้ง

จากการติดตามค่าความร้อนต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อเดือน ซึ่งจะเปลี่ยนตามฤดูกาลจะสูงสุดประมาณ 250 กิโลวัตต์ ต่อเดือน ดังนั้นการจะเดินเครื่องเตากราไฟต์ไทยซึ่งจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 230 กิโลวัตต์ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 20.00 น. - 8.00 น. ของวันรุ่งขึ้นแต่เนื่องจากการแปลงพลังงานด้านเข้ากระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ไปยังด้านออกซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าตรง ต้องมีประสิทธิภาพและองค์ประกอบกำลังเป็นเครื่องบั่นทอน (0.9 x 0.87) ซึ่งพอจะประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีให้แก่ขบวนการการแปรรูปประมาณ 180 กิโลวัตต์

3.2 หลักเศรษฐศาสตร์

เงื่อนไขที่สำคัญนอกเหนือจากค่าพลังงานแล้ว ยังต้องคำนึงถึงวัสดุต้นทุนในการผลิตซึ่งในที่นี้ จะจำแนกต้นทุนการผลิตโอเลคโตรกราไฟต์ดังนี้.

ตารางที่ 3.2 การจำแนกต้นทุนการผลิตโอเลคโตรกราไฟต์

การแจกแจงราคาต้นทุน	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของราคาขาย
ค่าวัตถุดิบทั้งหมด (วัสดุทางตรง)	25-30%
ค่าพลังงานไฟฟ้า	5-45%
ค่าแรงงาน	10-15%
ค่าเสื่อมราคา, ภาษี, ดอกเบี้ย	20-25%
ค่าวัสดุฉนวนหุ้มท่อสัญญาณคาร์บอน	10-30%

หมายเหตุ ข้อมูลนี้เหมาะสำหรับเตาเผาไพไรต์ไทยซึ่งที่มีกำลังผลิตน้อยกว่า 500 กิโลกรัมต่อครั้ง ถ้าเปรียบเทียบต้นทุนทั้งหมด จะเห็นว่าต้นทุนที่สามารถควบคุมได้ตามหลักวิศวกรรมได้มากที่สุด คงจะเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าวัสดุขนานหุ้มท่อ

สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าได้กล่าวแล้วว่าถ้ามีการวางแผนการใช้ไฟฟ้าในรอบวัน/เดือน ให้อัตราการใช้ค่าต้นทุนพลังงานค่อนข้างต่ำแต่ถ้าต้องการผลิต (Productivity) มากขึ้นอาจทำให้ค่ากินเปลวกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาก (Peak Demand Charge) ทางแก้ไขต้องสร้างเตาจำนวนมากกว่าเป็น 8 เตาเพื่อ เฉลี่ยให้มีผลผลิตออกทุกวันในรอบเดือน ทำให้เฉลี่ยค่า Demand Charge ไม่ถึง 5% ของค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต้นทุนพลังงานจะอยู่ประมาณ 7%

สำหรับค่าวัสดุขนานหุ้มท่อเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำแนกค่าการนำความร้อน ค่าความหนาแน่นของมวลสารขนาดของเม็ดผงว่า เล็กหรือใหญ่ ซึ่งในการทำวิทยานิพนธ์มุ่งศึกษาสภาพต่างๆ ของฉนวนและผลการทดลองดูว่าได้ช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้มากเท่าไร

ตารางที่ 3.3 ราคาผงฉนวนหุ้มเตาแบบต่างๆ

ชนิดของวัสดุผงฉนวนที่เลือกมาทดลอง	ราคาต่อกิโลกรัม
ผงฉนวนเทอร์มอล แบลค ชื่อการค้า เทอร์แมซ(Thermax)	มากกว่า 50 บาท
ผงฉนวน พิชท์ โด๊ก(Pitch Coke)	ของเหลือจากขบวนการผลิต อสังขารคาร์บอน(10-20 บาท)
ผงฉนวนถ่านหุงข้าว(ไม้โกงกาง) (Mangrove Charcoal)	ประมาณ 5-10 บาท

3.3 การกำหนดชนิดและขนาดวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในเตากราฟไฟต์โทซิ่ง

3.3.1 ขนาดผนังเตารูปร่างวัสดุและฐานราก

เนื่องจากใช้ฐานรากเดิมของเตาแก๊ส ซึ่งยังไม่ได้มีการก่อสร้าง จำนวน 10 ตารางเมตรกว้าง 1.6 เมตร ยาวประมาณ 6.25 เมตร รั้งน้ำหนักได้มากกว่า 2 ตัน/ตร.เมตร เพื่อให้ช่างนำงานการก่อเตาด้วยอิฐทนไฟเบอร์ K 43 ของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด จะได้เตามีขนาดความกว้าง 1.6 เมตร ยาว 4.34 เมตร สูง 1.35 เมตร โดสใช้อิฐทนไฟ (อุณหภูมิได้ถึง 1300 องศาเซลเซียส) ขนาด 4 นิ้ว ยาว 9 นิ้วหนา 3 นิ้ว จำนวนถึง 1500 ก้อน และเมื่อรวมน้ำหนักหล่อด้วยปูนทนความร้อน (1300 องศาเซลเซียส) จะประมาณน้ำหนักตัวเตา 7.5 ตัน ในพื้นที่ 7 ตารางเมตร ทำให้ฐานรากรับน้ำหนักเตาประมาณ 1 ตัน/ตร.เมตร และคาดว่าเมื่อรวมน้ำหนักของก้อนอิฐฐานคาร์บอนและผองฉนวนประมาณสูงสุด 5 ตัน ทำให้ฐานรากยังคงรับน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ได้ไม่เกินพิกัด

ทั้งนี้จากขนาดที่ถูกกำหนดโดยฐานรากทำให้ได้เตาเผาที่มีผนังหนา 9 นิ้วทำให้เนื้อที่ภายในคงเหลือความกว้าง 114 ซม. ยาว 388 ซม. ลึก 92 ซม. คิดเป็นปริมาตร 4 ลบ.เมตร

3.3.2 ขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และการปรับแรงดันไฟฟ้า

จากเงื่อนไขของการใช้กำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาทำงานในวันหนึ่ง ทำให้มีข้อจำกัดในด้านกำลังไฟฟ้าพิกัด ถูกจำกัดที่ 180 กิโลวัตต์ดีซี เพื่อการแปลงรูปโครงสร้างอะตอมของอิฐฐานคาร์บอน

นอกจากนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าควรเป็นอุปกรณ์ที่สามารถปรับแรงดันด้านนอกได้ตั้งแต่ 0-60 โวลต์ดีซี กระแสไฟได้ถึง 6000 แอมป์ดีซี ซึ่งทำให้พิกัดตัวแหล่งจ่ายไฟมากกว่า 180 กิโลวัตต์ ถึง 2 เท่า

ส่วนอุปกรณ์ควบคุมได้เลือกแบบ เอส ซี อาร์ ซึ่งทำหน้าที่ทั้งปรับแรงดันและกรองกระแสไฟฟ้า เอซี ให้เป็น ดีซี อีกด้วย

ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบระบบการปรับแรงดันไฟฟ้าแบบดีซี

ระบบการปรับแรงดันไฟ	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบเปลี่ยนแทปหม้อแปลง โดยใช้แมกเนติก- คอนแทกเตอร์	1. แข็งแรงคงทน 2. ราคาปานกลาง 3. ฮาร์โมนิกน้อย 4. ประสิทธิภาพและ องค์ประกอบกำลังดี	1. อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า ได้แก่แมกเนติก-คอนแทก เตอร์ชำรุดง่าย 2. เกิดกระแสกระชากในวงจรสูง 3. การปรับแรงดันไม่คงที่และไม่ ละเอียด 4. น้ำหนักมากเกินสิ่งที่ติดตั้ง
ระบบชัททูล์เรเบิล รีแอคเตอร์	1. แข็งแรงทนทาน 2. ปรับแรงดันได้ ละเอียด 3. ประสิทธิภาพและ องค์ประกอบกำลัง ปานกลาง	1. น้ำหนักมาก 2. ฮาร์โมนิกจากการหักล้าง เส้นแรงแม่เหล็กสูงทำให้ เกิดความสูญเสียในเนื้อเหล็ก 3. ซ่อมบำรุงยาก 4. ราคาแพง
ระบบ เอส.ซี.อาร์	1. น้ำหนักเบาใช้เนื้อที่ น้อย 2. ปรับแรงดันได้ ละเอียดและนุ่มนวล ไม่มีกระแสกระชาก ไม่ดึงพลังงาน 3. ดูแลรักษาง่ายชิ้นส่วน กลไกน้อย	1. ราคาแพง 2. ฮาร์โมนิกจากการปรับมุม ไฟรั้งมากถ้าควบคุมไม่ดี 3. องค์ประกอบกำลังขึ้นอยู่กับ การปรับมุมไฟรั้ง

และจากตารางเปรียบเทียบ ระบบการปรับแรงดันที่มีใช้ในปัจจุบันได้ข้อสรุปที่ระบบ เอส ซี อาร์สามารถ แก้ปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าของโรงงาน ในสามที่ใช้กำลังไฟสูงในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาและลดช่วงเวลาการหยุดหรือขาดตอนการจำหน่ายพลังงาน ทำให้ความสูญเสียพลังงานความร้อนน้อยกว่า

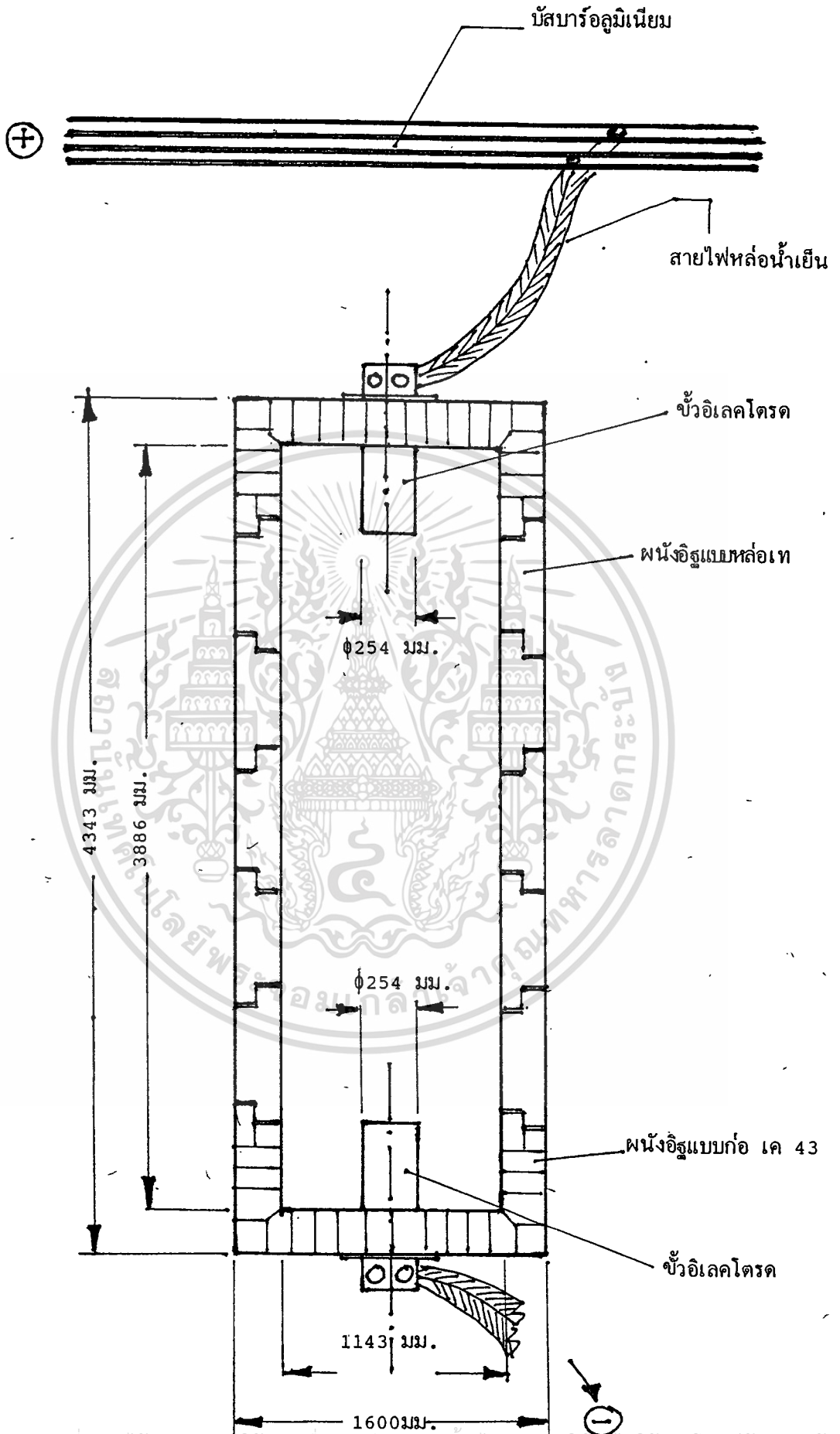
นอกจากนี้ค่า ริพเพิล น้อยด้วยเนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้ออกเป็นลักษณะดับเบิ้ลสตาร์ 6 เฟส

3.3.3 การกำหนดขนาดบัสบาร์และขั้วอิเล็กทรอนิกส์ (แอมป์/ตร.มม.)

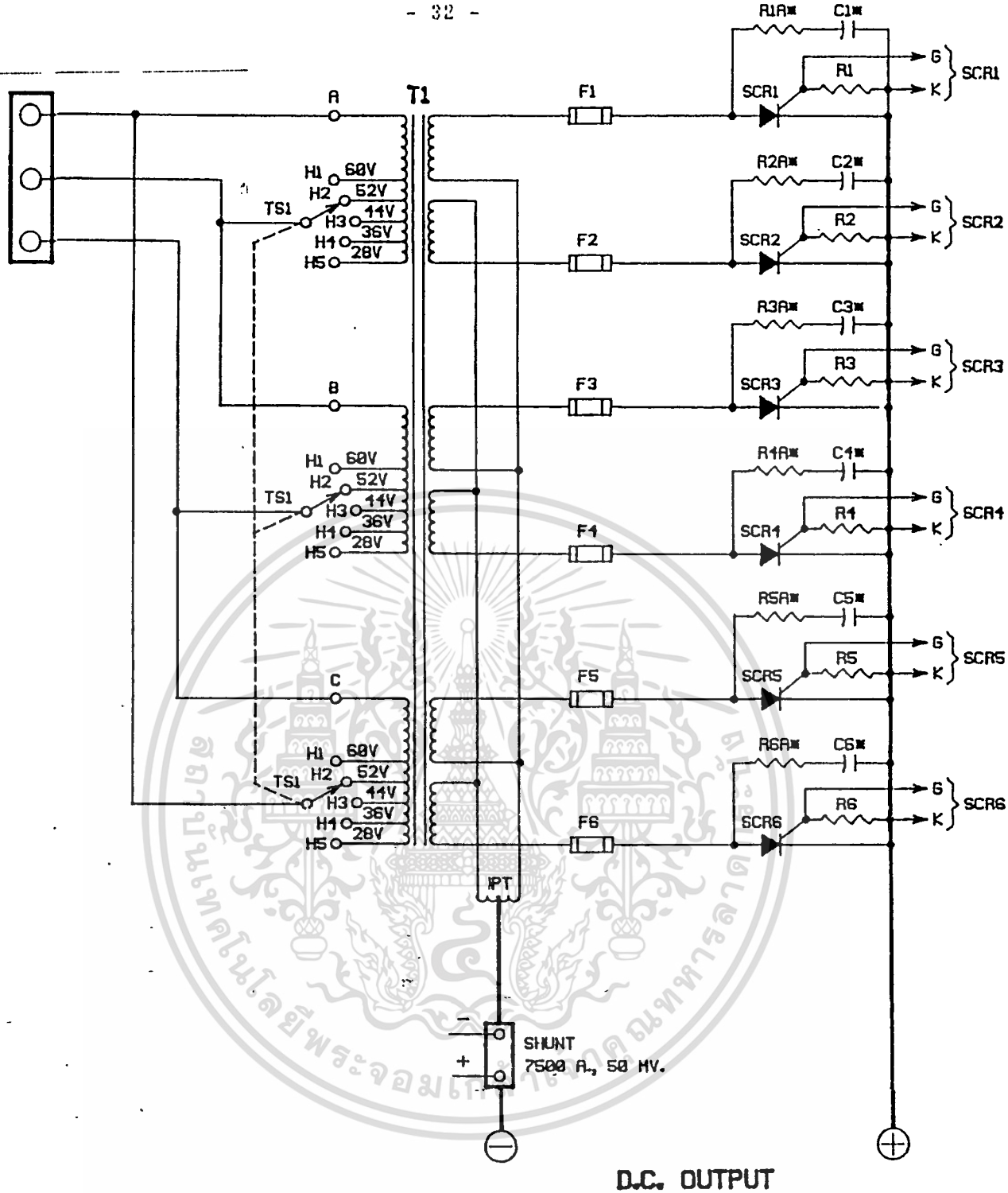
-ขนาดของบัสบาร์กำหนดให้รับความหนาแน่นกระแสไฟ 0.8 แอมป์/ตร.มม. ในขั้นสุดท้ายของการเผาซึ่งใช้กระแสไฟประมาณ 6000 แอมป์ สูงสุด ดังนั้นขนาดที่เป็นแผ่นอลูมิเนียมที่หาได้ง่ายในท้องตลาด จะเป็นขนาดหนา 1/2 นิ้ว และกว้าง 6 นิ้ว จะใช้ต่อขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วละประมาณ 4 แผ่น ยาวมากกว่า 15 เมตร เพื่อเป็นระยะปลอดภัยที่ แหล่งจ่ายไฟควรอยู่ห่างจากเตาโดยมีผนังกันความร้อน และการระเบิดจากอุบัติเหตุ

ถ้าอลูมิเนียมมีค่าความต้านทานจำเพาะ 3.0 ไมโครโอห์ม-ซม. ความต้านทานรวมของอลูมิเนียมบัสบาร์ จะเป็น 0.00006 โอห์ม

-ขนาดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ จะเลือกเป็นอิเล็กทรอนิกส์กราไฟต์ ที่มักใช้เป็นขั้วไว้หลอมละลายโลหะในโรงงานหลอมต่างๆ ซึ่งมีขนาดความโตเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 ซม. ยาว 92 ซม. 2 ขั้ว (บวกและลบ) ปกติขั้วอิเล็กทรอนิกส์มักมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 1000 ไมโครโอห์ม-ซม. ดังนั้นความต้านทานขั้วทั้งสองจะประมาณ 0.00034 โอห์ม



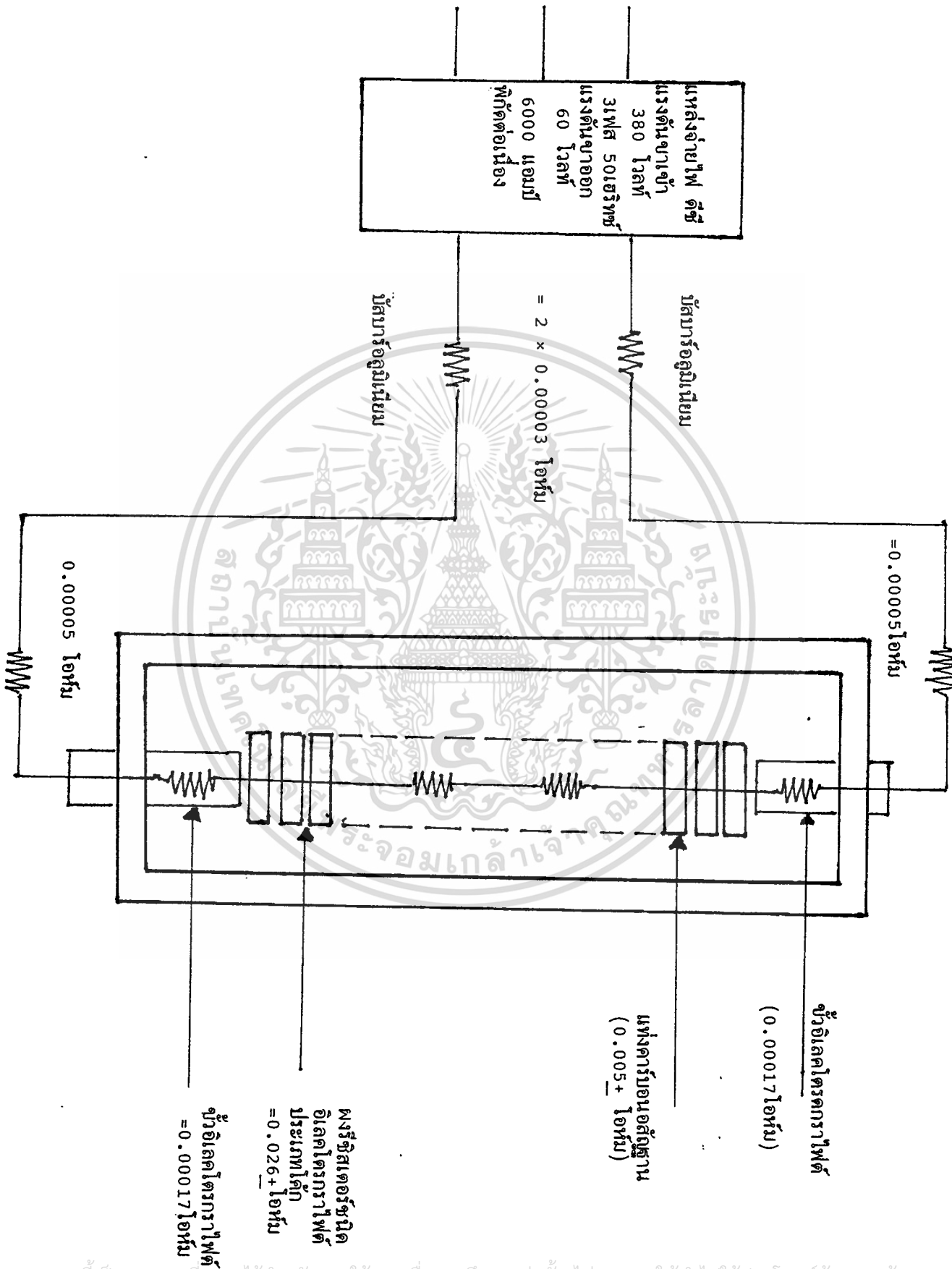
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 โครงสร้างเตาและส่วนประกอบ
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แก่ผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาออก	6000 แอมป์ 60/52/44/36/28 โวลต์
พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า	216 กิโลวัตต์ สูงสุด
ปรับแรงดันไฟฟ้า	380 โวลต์ ± 5% 3เฟส 50 เฮิรตซ์
ขนาดมิติ	เอสซีอาร์
ความคลาดเคลื่อน	สูง 80 นิ้ว กว้าง 72 นิ้ว หนา 60 นิ้ว
ริฟเฟิล	± 1%
	5%

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ ดีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจรเตดกรรราไฟต์ไซซซิง

เอกสารนั้เป็นเอกสารทึสงวนไว้ทึ้สำหรับการใ้่งวงนทึ้จกคอรคึณทึ้ท้งนั้ นั้ไม่อนุญาตใ้่งนั้งใ้่งประโคคณนั้ใ้่งการค้่า
ไม่ว่ากรณนั้ใดคทึ้ถึ้งสััน อึ้กทึ้งทึ้หมนั้ใ้ให้ค้ดแปลงนั้เอหา และตึ้องอึ้งอึ้งถึ้งเจ้าของเอกสารทึ้ครึ้งทึ้มีการนั้งไปใ้

บทที่ 4

การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน เพื่อกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการ

4.1 การศึกษาสารที่ใช้ทำงานและวัสดุความต้านทานไฟฟ้าให้ความร้อน

ในบทที่ 2 ที่ผ่านมามีทำให้เข้าใจพฤติกรรมการนำความร้อนของผงคาร์บอนต่าง ๆ ว่าจุด เริ่มต้นที่ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิปกติ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$K \text{ (แคลลอรี่/ชม. วินาที องศาเซลเซียส)} \times \mu \text{ (โอห์มชม.)} = 0.00031 + 5\%$$

ซึ่งในการจะเลือกวัสดุใด ขนาดผงเท่าไร ล้วนคำนึงถึงค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นอันดับแรก เพื่อกำหนดค่าความร้อนที่จะคาดคะเนได้ในเบื้องต้น ส่วนเรื่องชนิดนั้นมักพิจารณาจาก ฮาร์ดคาร์บอนและซอฟท์คาร์บอน ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของฮาร์ดคาร์บอนและซอฟท์คาร์บอน

ฮาร์ดคาร์บอน	ซอฟท์คาร์บอน
<p>1. ได้จากการทำคาร์บอนไนซ์วัสดุในลักษณะสภาพของแข็ง เช่น ถ่านที่ได้จากสิ่งมีชีวิตถ่านหินต่างๆ เรซินสังเคราะห์</p> <p>2. ยากต่อการทำกราฟไฟต์ไทป์ เพราะเนื่องจากมีองค์ประกอบออกซิเจนมาก และไฮโดรเจนต่ำ ดังนั้น การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ไฮโดรเจนจะถูกขับออกจากพันธเคมีเร็วมาก จึงไม่ค่อยก่อรูปให้ผลึกเติบโตได้</p> <p>3. มีรูพรุนระหว่างผลึกมากและมักไม่พหุขาม เรียงตัวในแนวทางเดียวกัน จึงมีค่าความหนาแน่นน้ำหนักน้อยกว่า</p> <p>4. มีค่าความต้านทานจำนวนสูงแม้จะได้รับการให้ความร้อนมากค่าความต้านทานไฟฟ้าจะไม่ลดลง</p>	<p>1. ได้จากการทำคาร์บอนไนซ์วัสดุในลักษณะสภาพของเหลว เช่น โคลกที่ได้จากการแตกต่างทางเคมีในกากน้ำมัน, กากน้ำมันถ่านหิน</p> <p>2. มักเป็นสารอโรเมติก(C/H สูง)ไฮโดรเจนจะถูกขับออกจากพันธเคมีอุณหภูมิต่ำและช้ากว่าทำให้เกิดการก่อรูปผลึกให้โตได้ง่ายต่อการทำกราฟไฟต์ไทป์</p> <p>3. มีรูพรุนระหว่างผลึกน้อยและมักจะเรียงตัวในแนวทางเดียวกัน มีความหนาแน่นน้ำหนักสูง</p> <p>4. มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ ถ้าได้รับความร้อนมาก ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงมาก</p>

ผลจากการศึกษาในบทที่ 2 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของผงคาร์บอนนั้น มีปัจจัยการเปลี่ยนค่าโดยตรง ดังนี้

1. ขนาดของอนุภาค
2. ความหนาแน่นของการบรรจุผงในปริมาตรจำกัด
3. อุณหภูมิที่ได้รับ
4. ชนิดของผงคาร์บอน (ฮาร์ดคาร์บอน หรือ ซอฟท์คาร์บอน)

4.1.1 เงื่อนไขการเลือกชนิดและขนาดของผงฉนวน

ผงฉนวนที่ใช้ควรมีคุณสมบัติหลักดังนี้

- ก. มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงเป็นฉนวนไฟฟ้า และจากกฎความสัมพันธ์ของค่า ความต้านทานไฟฟ้ากับความนำความร้อน จะทำให้ฉนวนนั้นมีค่าการนำความร้อนลดลงไปด้วย
- ข. มีขนาดใหญ่พอให้แก๊สสามารถผ่านออกไปได้ ในช่วงตอนบนของแท่งอิฐฐานคาร์บอนที่จะเผา (CHARGE)
- ค. เป็นคาร์บอนที่ทำกราไฟต์โทซิ่งยาก ซึ่งหมายถึง ขนาดของผลึกโตไม่มากเมื่อผ่านการให้ความร้อนแล้ว ทำให้ใช้งานได้หลายครั้ง
- ง. ไอระเหยและสารไม่บริสุทธิ์ไม่มาก
- จ. ราคาไม่แพง หาได้ง่ายในประเทศ
- ฉ. ความหนาแน่นต่ำ ในการบรรจุทำให้ใช้ปริมาณต่อน้ำหนักไม่มากนัก ทำให้ไม่เป็นส่วนสะสมพลังงานความร้อนมาก
- ซ. ในช่วงห่อหุ้มแท่งอิฐฐานคาร์บอน ควรมีขนาดเล็กพอที่จะไม่ให้อากาศ (ออกซิเจน) แทรกตัวเข้าไปทำการออกซิไดซ์กับแท่งคาร์บอนได้

จากเงื่อนไขดังกล่าว ได้ทำการศึกษาโดยนำผงฉนวน 3 ชนิดมาทดลอง คือ

1. ผงฉนวนเทอร์มอลแมกซ์ (THERMAX) ล้วน
2. ผงฉนวนพิชท์โค้ก (PITCH COKE)
3. ผงฉนวนทำจากถ่านหุงข้าว (ไม้โกงกาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ดีของผงฉนวน 3 ชนิด

คุณสมบัติ	ผงฉนวนถ่าน หุงข้าว	ผงฉนวนเทอร์ มอลแบลค	ผงฉนวน พิกท์โล็ค	หน่วย
ค่าความต้านทานไฟฟ้า จำเพาะ (อุณหภูมิปกติ)	37,000	300	20	โอห์ม-ซม
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เม็ดผง	-32+170	-2500	-32+170	ไมครอน
ความหนาแน่นในการ บรรจุ	0.4-0.5	0.4	0.75-0.90	กรัม/ลบ.
การทำกราฟต์ไทซิง	ยาก	ปานกลาง	ง่าย	
ไอระเหยและสารไม่ บริสุทธิ์	25	น้อยกว่า 3	4-6	เปอร์เซ็นต์
ราคาจำหน่าย	5-8	50	-	บาท/กก.
ค่าการนำความร้อนที่ คำนวณได้ (อุณหภูมิปกติ)	0.35×10^{-5}	0.42×10^{-3}	0.65×10^{-2}	วัตต์/เมตร /องศาเซลเซียส

4.1.2 เงื่อนไขการเลือกชนิดและขนาดของผงให้ความร้อนแก่แท่งอิฐฐานคาร์บอน

- ก. มีคุณสมบัติให้การส่งผ่านความร้อนดี
- ข. ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำไม่เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิมากนัก
- ค. ควรมีขนาดเม็ดผงขนาดใหญ่ เพื่อว่าจะได้มีค่าขนาดของอิลาสติคต่ำ เพื่อผลในการบรรจุไม่ว่าความหนาแน่นจะเพิ่มมากเท่าไร จะไม่เป็นตัวแปรในการเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้า

ง. ควรผ่านการทำการไฟต์ไทซึ่งแล้ว

จ. ไอระเหย และสารไม่บริสุทธิ์น้อย

จากเงื่อนไขดังกล่าว และหลักประหยัดในการทำการทดลองจึงเลือกผงเม็ดใหญ่ -15+35 ไมโครเมตร ที่บดจากข้าวโอเลคโตรดในเตาหลอมเหล็กไม่ใช้งาน ซึ่งเป็นอิเลคโตรกราฟไฟต์ ซึ่งผ่านการให้ความร้อนนับตั้งแต่การทำกราฟไฟต์ไทซึ่งมาก่อนรวมถึงการให้ร้อนระหว่างใช้งานเป็นตัวให้พลังงานอาร์คเพื่อหลอมเหล็ก ดังนั้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าในตัวมันจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้อยมาก ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่หาได้จาก การนำเม็ดผงขนาด -15+35 ไมโครเมตร มาหาได้ค่าประมาณ 0.177-0.210 โอห์ม-ซม. ที่ความหนาแน่นบรรจุ 0.8-0.9 กรัม/ลบ.ซม.

4.2 การคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อนของอิฐฐานคาร์บอน

พลังงานความร้อนสะสมในฉนวนผงคาร์บอน และปริมาณความร้อนที่สูญเสีย

ในการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด ในการทำการไฟต์ไทซึ่งแก่อิฐฐานคาร์บอน สิ่งสำคัญที่สุดคือ จะต้องทราบว่า ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารฉนวนและสารความต้านทานไฟฟ้าให้ความร้อนเป็นอย่างดี ตั้งแต่สภาวะอุณหภูมิปกติจนถึงอุณหภูมิสุดท้าย ประมาณ 2200-2800 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ เนื่องจากพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่านี้ จะพาไปสู่ค่าการนำความร้อน ค่าแผ่กระจายความร้อน ค่าสูญเสียด้านพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า และอื่น ๆ

4.2.1 การหาค่าขึ้นความหนาของผงฉนวน

สิ่งสำคัญในการหาค่าขึ้นความหนา นี้ ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังนี้

ก. ต้องเป็นความหนาที่ให้การแผ่กระจายความร้อนจนอุณหภูมิภายนอกสุดที่ขีดผนังเตายังคงเป็นอุณหภูมิแวดล้อมอยู่ภายในเวลา 24 ชม. ซึ่งเป็นเวลาที่มากกว่าการทำกราฟไฟต์ไทซึ่งเล็กน้อย เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนในช่วงให้ความร้อน

ข. นอกจากนั้น ในช่วงเวลา 7 วันที่หยุดพักการให้ความร้อน ควรรักษาระดับอุณหภูมิภายนอกชนิดหนึ่งเตมี่อุณหภูมิไม่เกิน 1300 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาอายุการใช้งานของอิฐทนไฟ

ค. ชนิดของผงฉนวน ควรมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง เพื่อผลของการนำความร้อนน้อยรวมถึงชั้นแผ่นกระจายความร้อนน้อยด้วย ทำให้สิ้นเปลืองผงฉนวนไม่มาก ระยะความหนาของชั้นฉนวนเลือกจากการนำเอาพิชท์โค้กมาเป็นฉนวนมาตรฐานในการคำนวณ

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ ความร้อนจำเพาะของคาร์บอนและกราไฟต์
ทั่วไป

อุณหภูมิ องศา เซลเซียส	เคลวิน	ความร้อนจำเพาะของคาร์บอน/กราไฟต์ แคลอรี/กรัม/ องศาเซลเซียส (กิโลวัตต์-ชม./กก./ องศาเซลเซียส) $\times 10^{-4}$	
27	300	0.1723	2.00
77	350	0.209	2.43
127	400	0.245	2.85
177	450	0.276	3.20
227	500	0.303	3.52
277	550	0.323	3.76
327	600	0.340	3.95
377	650	0.356	4.14
427	700	0.370	4.30
477	750	0.382	4.44
527	800	0.393	4.57
577	850	0.402	4.67
627	900	0.409	4.75

อุณหภูมิ องศา เซลเซียส	เคลวิน	ความร้อนจำเพาะของคาร์บอน/กราไฟต์ แคลอรี/กรัม/ องศาเซลเซียส	(กิโลวัตต์-ชม./กก./ องศาเซลเซียส) $\times 10^{-4}$
677	950	0.415	4.83
727	1000	0.421	4.89
827	1100	0.432	5.00
927	1200	0.442	5.15
1027	1300	0.452	5.25
1127	1400	0.460	5.35
1227	1500	0.468	5.44
1327	1600	0.474	5.51
1527	1800	0.486	5.65
1727	2000	0.496	5.77
1927	2200	0.504	5.86
2127	2400	0.511	5.94
2327	2600	0.516	6.00
2527	2800	0.521	6.06
2727	3000	0.527	6.13
2927	3200	0.536	6.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคำนวณสมมุติจาก ค่าอุณหภูมิสุดท้าย 2827 องศาเซลเซียส ทั้งไว้ 24 ชม. แล้ว ค่าอุณหภูมิอีกด้านหนึ่งของฉนวนจะเป็น 27 องศาเซลเซียส ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงขึ้นความหนาของฉนวน

ค่าการนำความร้อนโดยเฉลี่ย	0.203 วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส
ค่าความร้อนจำเพาะโดยเฉลี่ย	1474 จูลส์/กก./องศาเซลเซียส
ค่าการแผ่กระจายความร้อน	0.229×10^{-6} เมตร ² /วินาที
เวลาที่ใช้ในการแผ่กระจาย	86400 วินาที
ระยะความหนาของชั้นฉนวนที่คำนวณได้	ประมาณ 0.40 เมตร

โดยอุณหภูมิเฉลี่ย 1400 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่ระยะความหนา 0.20 เมตร

4.2.2 การคำนวณหาพลังงานความร้อนในแท่งอิฐฐานคาร์บอน

ได้จากการคำนวณความร้อนจำเพาะเฉลี่ยจากช่องอุณหภูมิ 2 ช่องจากตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความร้อนจำเพาะของคาร์บอนทั่วไป จะได้ว่า

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานความร้อนที่แท่งคาร์บอนที่อุณหภูมิต่างๆ

ช่วงอุณหภูมิ	ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ย	ค่าพลังงานความร้อน
30-800	4.00×10^{-4}	0.32
800-1400	5.34×10^{-4}	0.32
1400-2000	5.76×10^{-4}	0.34
2000-2800	6.13×10^{-4}	0.49

4.2.3 การคำนวณพลังงานความร้อนสะสมในผงฉนวน

การคำนวณพลังงานความร้อนสะสมก็คล้ายกับการคำนวณความในถังคาร์บอน โดยแบ่งเป็นช่วงอุณหภูมิและหาอุณหภูมิเฉลี่ยที่มีสะสมในผงฉนวน และคูณเงื่อนงำที่อุณหภูมิดังกล่าว ใช้เวลาจำกัดในการแผ่กระจายความร้อนไปได้เป็นระยะความหนาเท่าไร โดยดูจากตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของคาร์บอนกับอุณหภูมิและตารางการแผ่กระจายความร้อน ณ อุณหภูมิจุดต่าง ๆ แล้วนำเอาระยะชั้นความหนาที่รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิเหล่านั้น ถึงอุณหภูมิปกติ 30 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาปริมาณผงที่ได้รับความร้อนส่วนเวลาที่กำหนดให้ของ อุณหภูมิชั้นในอัตราเท่าไร

ตารางที่ 4.6 การแผ่กระจายความร้อนที่อุณหภูมิที่ผนังเตาด้านในเป็น 30 องศาเซลเซียส

ช่วงอุณหภูมิ ที่ถังคาร์บอน (องศา เซลเซียส)	ค่าการนำ ความร้อน เฉลี่ย (วัตต์/เมตร/ เซลเซียส)	ความร้อน จำเพาะ เฉลี่ย (จูลส์/กก./ เซลเซียส)	ค่าการแผ่ กระจาย ความร้อน (เมตร ² / วินาที)	เวลาที่ ใช้ในการ แผ่กระจาย (วินาที)	ระยะความ หนาชั้นฉนวน (เมตร)
800	0.061	1260	0.806×10^{-7}	10800	0.08
1400	0.103	1363	0.125×10^{-6}	25200	0.16
2000	0.146	1422	0.171×10^{-6}	39600	0.23
2800	0.203	1474	0.229×10^{-6}	86400	0.40

ความหนาแน่นของผงฉนวนเทอร์แมซ์ ประมาณ 600 กก./ลบ. เมตร

ตารางที่ 4.7 แสดงพลังงานความร้อนสะสมในผงฉนวน

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ปริมาตรของผงฉนวน ที่ได้รับความร้อน (ลบ. เมตร)	พลังงานความร้อน ที่สะสมในฉนวน (กิโลวัตต์-ชม.)	อุณหภูมิเฉลี่ย (เซลเซียส)
800	0.42	39	385
1400	1.04	228	685
2000	1.75	596	985
2800	4.72	2404	1385

4.2.4 การคำนวณพลังงานความร้อนที่สูญเสียผ่านผงฉนวน

การคำนวณพลังงานที่สูญเสียจะคำนวณจากช่องอุณหภูมิตั้งเป็นเดิม 4 ช่วง โดยจะต้องหาทางที่ที่ประจุความร้อนผ่านออกไปในแต่ละ 4 ช่วงอุณหภูมิมีค่าเท่าใด แล้วต้องเฉลี่ยค่าอุณหภูมิในแต่ละช่วงที่แจ้งแล้วในตารางที่ 4.6 เพื่อจะได้นำเวลาในการสร้างความร้อนมาหาค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียต่อไป

ตารางที่ 4.8 แสดงพลังงานความร้อนสูญเสีย

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ระยะความหนา ชั้นฉนวน (เมตร)	พื้นที่ทั้งหมดที่ประจุ ความร้อนผ่าน (ตร. เมตร)	พลังงานความร้อนที่สูญเสีย ผ่านชั้นผงฉนวน (กิโลวัตต์-ชม.)
800	0.08	5.64	4.96
1400	0.16	8.36	14.75
2000	0.23	10.98	27.46
2800	0.40	18.34	167.58

ส่วนพลังงานความร้อนที่สูญเสียที่ขั้วอิเล็กโตรดบวกและลบทั้ง 2 ด้านนั้น จะคิดเฉพาะ การนำความร้อนมา สู้ผนังเตา แต่เนื่องจาก ค่าการนำความร้อนของขั้วอิเล็กโตรด ซึ่งเป็น อิเล็กโตรกรรไฟต์ มีค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิปกติ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 150 วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส และ 12 วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส ที่ 2800 องศาเซลเซียส ดังนั้นการคำนวณหาค่าประจุความร้อนรั่วไหลจึงได้ค่าการนำ ความร้อนเฉลี่ย 80 วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส โดยที่ขนาดพื้นที่ที่ประจุความร้อนเคลื่อนผ่านจะมีขนาด 0.038 ตร.เมตร ความยาว 0.9 เมตร ซึ่งได้ว่าตลอดช่วงที่มีการให้ความร้อน 24 ชม. จะมีความร้อนสูญเสีย ที่ขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้ว คิดเป็นพลังงาน 225 กิโลวัตต์-ชม.

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่สูญเสียในระบบทั้งหมด จะมาจากการนำความร้อนผ่านขั้วอิเล็กโตรดและขึ้นความหนาของผนังเตา ซึ่งคิดเป็นจำนวน 393 กิโลวัตต์-ชม. และถ้าชดเชยในการรั่วไหลจุดอื่นประมาณอีก 10 เปอร์เซ็นต์ ความสูญเสียทั้งระบบตลอดระยะเวลาให้ความร้อนจะประมาณ 432 กิโลวัตต์-ชม.

4.2.5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการให้พลังงานความร้อน

จากเงื่อนไขต่างๆ ที่ผ่านมา ทำให้เตาที่บรรจุแก๊สออกซิเจนคาร์บอนได้ประมาณ 0.099 ลบ.เมตร และผงความต้านทานให้ความร้อนอีก 0.091 ลบ.เมตร ซึ่งผงความต้านทานนี้มีความสำคัญมากในการให้ความร้อนแก่แก๊สออกซิเจนคาร์บอนถ้าไม่มีผงความต้านทานนี้จะมีพลังงานสูญเสียด้านไฟฟ้ามาก กล่าวคือ ค่าความต้านทานของทั้งวงจร ควรจะได้จากผงความต้านทานมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อรวมทั้งแก๊สออกซิเจนคาร์บอนกับผงความต้านทานจะทำให้มีความต้านทานเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ของวงจรทั้งหมด แต่ขนาดปริมาตรสี่ส่วนของแก๊สออกซิเจนคาร์บอนกับปริมาตรของผงความต้านทาน อาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดและความต้านทานจำเพาะของทั้ง 2 ส่วนว่าเป็นอย่างไร

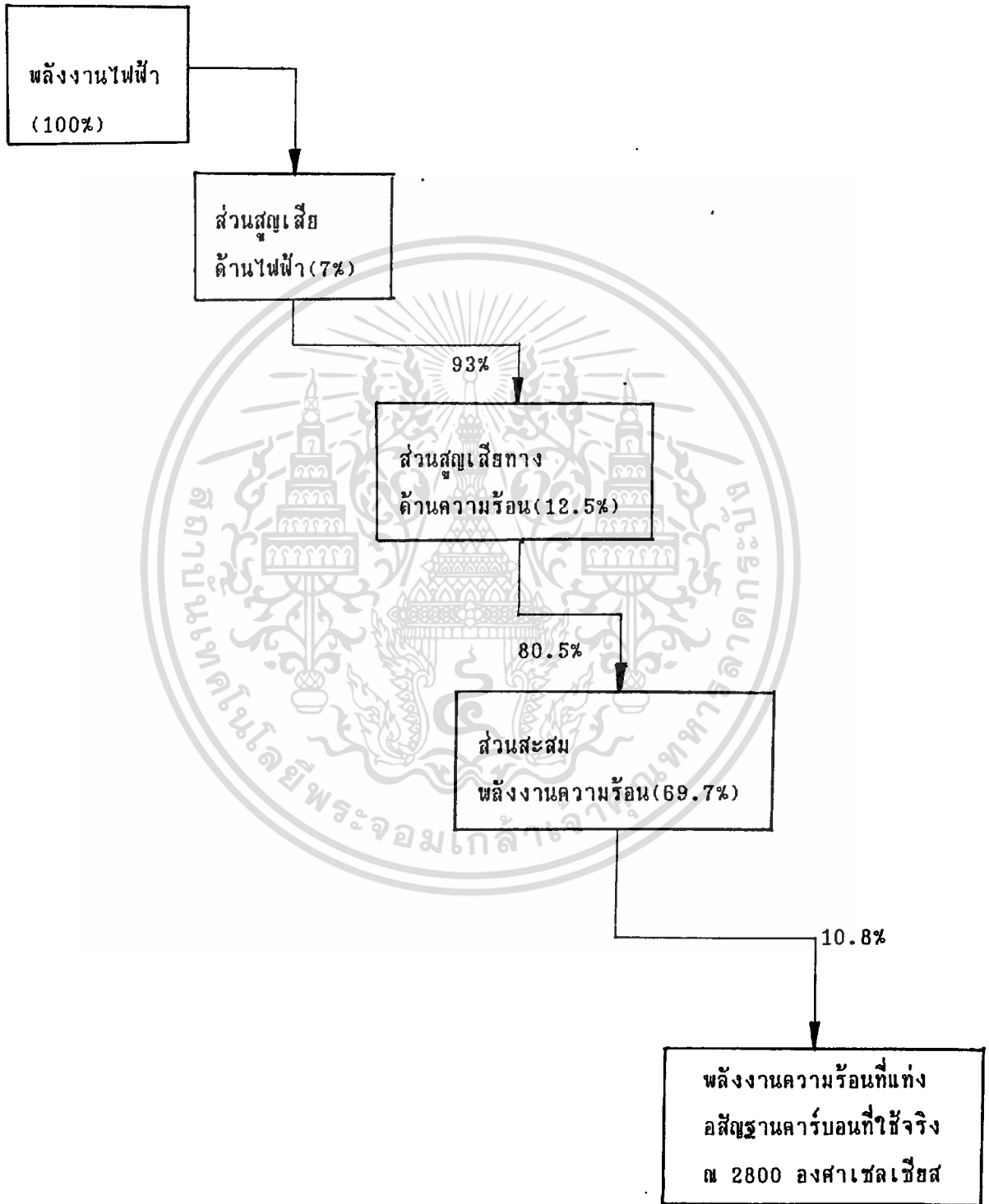
การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการนำเอาพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากแก๊สออกซิเจนคาร์บอนและผงความต้านทานให้ความร้อน รวมพลังงานความร้อนสะสมในผงจนวนตลอดเวลาที่ให้ความร้อน หลังจากนั้น จึงมารวมค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียในระบบโดยผ่านขึ้นความหนาของผงจนวน และในหัวอิเล็กโตรดทั้งสองและยังต้องมารวมค่าความต้านทานไฟฟ้าภายนอกที่ไม่เกี่ยวข้องกับช่วงที่ให้ความร้อน

จากหัวข้อ 4.1.3 เมื่อนำเอาออกซิเจนคาร์บอน ซึ่งมีขนาด 15 ซม. x 15 ซม. หนา 4 ซม. มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตามแนวอัดมีค่า 0.016 โอห์ม-ซม. จำนวน 112 ก้อน มาวางเรียงกันโดยมีผงความต้านทานไฟฟ้าชนิดอิเล็กโตรกราไฟต์ (ให้มีขนาด -15+35 ไทเธอร์เมซ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะประมาณ 0.177 โอห์ม-ซม. เมื่อบรรจุให้มีความหนาแน่น 850 กิโลกรัม/ลบ.เมตร) มาแทรกกันระหว่างกลางทุกแห่ง โดยให้แต่ละแห่งเรียงกันในแนวยาวตั้งแต่หัวหัวอิเล็กโตรดบวกไปยังหัวอิเล็กโตรดลบจำนวน 2 แถวชิดกันซึ่งพบว่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างแก๊สออกซิเจนคาร์บอนในแนวยาว ควรมีระยะห่าง 1.33 ซม. เพื่อให้ผงความต้านทานดังกล่าวแทรกตัว ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็น 82.5 เปอร์เซ็นต์ของวงจรความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด และอีก 15 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าของความต้านทานของแก๊สออกซิเจนคาร์บอน ซึ่งจะได้น้ำหนักของออกซิเจนคาร์บอนทั้งหมด 171 กิโลกรัม และผงความต้านทานประมาณ 76 กิโลกรัมรวมเป็นน้ำหนักรวมของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน (Charge) ทั้งสิ้นประมาณ 250 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบต้องการแต่ละช่วงอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิของแท่งคาร์บอน (องศาเซลเซียส)	30-800	800-1400	1400-2000	2000-2800
รวมพลังงานความร้อนในแท่ง คาร์บอน(กิโลวัตต์-ชม.)	80	160	250	373
รวมพลังงานความร้อนสะสม ในผงฉนวน(กิโลวัตต์-ชม.)	39	228	596	2404
รวมพลังงานความร้อนสูญเสีย ทั้งหมด(กิโลวัตต์-ชม.)	18.4	60	131	432
รวมพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการ ให้ความร้อนทั้งหมด (กิโลวัตต์-ชม.)	137.4	448	977	3209

4.2.6 ประสิทธิภาพด้านพลังงานความร้อนในระบบ เมื่อคิดที่อุณหภูมิสุดท้าย 2800 องศา-เซลเซียส จะได้ว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองจากการเผาในขบวนการกราฟไฟด์โทซิ่ง

5.1 การทดลอง

การทดลองเผาได้ใช้ แท่งอิฐฐานคาร์บอนที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ มาแล้ว (เป็นขบวนการให้ความร้อนเบื้องต้นอย่างช้าๆ เพื่อไล่ไอระเหยไฮโดรเจน กำมะถัน เป็นต้น) ซึ่งทำจากโคลกผสมกราฟไฟด์ และคาร์บอนแบลค อันเป็นอิฐฐานคาร์บอนที่ทำการกราฟไฟด์โทซิ่งง่าย และโอกาสที่จะทำให้ผลึกโครงสร้างอะตอมโตได้มาก ขนาดที่ใช้สำหรับการทดลอง 4 ครั้งเป็นขนาดเดียวกัน คือ 15 ซม. x 15 ซม.หนา 4 ซม. จำนวน 112 แท่งทุกครั้ง และผงดำนทานที่ทำการนำเอาซิลิโวลโคทรคที่ใช้แล้วมาบดให้ได้ขนาด -15+35 ไมโครเมตร ตัวแปรที่เปลี่ยนคือ ผงถ่าน 3 ชนิด ซึ่งได้ให้รายละเอียดได้ในบทที่ 4 เพื่อหาประสิทธิภาพ และความประหยัดในการให้ความร้อนแต่ละครั้งเพื่อเปรียบเทียบข้อสรุป

ซึ่งจากบทที่ 4 ก็ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบความร้อน พบว่าผงถ่านเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในอันที่จะช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ กล่าวคือถ้าผงถ่านที่ได้มีค่าการนำความร้อนไม่ดีตั้งแต่ต้นจนขบวนการให้ความร้อน พลังงานสะสมจะลดลงอย่างมากซึ่งในการทดลองครั้งแรก จะนำเอาผงถ่านที่มีใช้เป็นของเหลือจากขบวนการอื่น แต่มีค่าการนำความร้อนต่ำทดลอง เพื่อดูค่าพลังงาน ส่วนในการทดลองครั้งที่ 3 ใช้ผงถ่านคุณภาพดีราคาแพง มาทดลองซึ่งเป็นผงถ่านที่ใช้ในการคำนวณในบทที่ 4 และสุดท้ายจะได้นำผงถ่านราคาถูกที่หาได้ในประเทศแต่มีไอระเหยมาก มีความปนเปื้อนมากแต่สภาพการนำความร้อนต่ำ เพื่อทดสอบหาจุดประหยัดทั้งราคาและค่าพลังงาน

5.2 การเตรียมการให้พลังงาน สำหรับผงถ่านที่เป็นอิฐ

อิฐที่โคลกที่นำมาใช้เทินเตานั้นมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 20 โอห์ม-ซม. และเป็นตัวที่ใช้ในการคำนวณ หาค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะป้อนเตา ดังนั้นการทดลองครั้งแรกและครั้งที่ 2 เป็นการให้พลังงานชนิดอิฐโคลก เพื่อทดสอบ ส่วนครั้งที่ 3 จะใช้เทอร์มอลแบลคทดสอบ และครั้งที่ 4 ใช้ผงถ่านถ่านหุงข้าวผสมอิฐโคลก (70 : 30) ทดสอบ

ตารางที่ 5.1 การให้พลังงานจะอ้างอิงจากการคำนวณ และมาหาค่ากำลังไฟฟ้า
ที่ป้อนเข้าไปดังนี้

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชม.)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	เวลา (ชม.)
30- 800	138	46.0	3
800-1400	310	77.5	4
1400-2000	529	105.8	5
2000-2800	2232	186.0	12

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองทั้ง 4 ครั้งในกราฟจะได้ค่าประสิทธิภาพความร้อนดังนี้

ชนิดพลังงาน	ประสิทธิภาพความร้อนที่อุณหภูมิ 2500 องศาเซลเซียส
ครั้งที่ 1	พืชที่โตัก 15%
ครั้งที่ 2	พืชที่โตัก ---
ครั้งที่ 3	เทอร์มอลแบลค 18.8%
ครั้งที่ 4	ผงถ่านหุงข้าวผสมพืชที่โตัก 24.3%

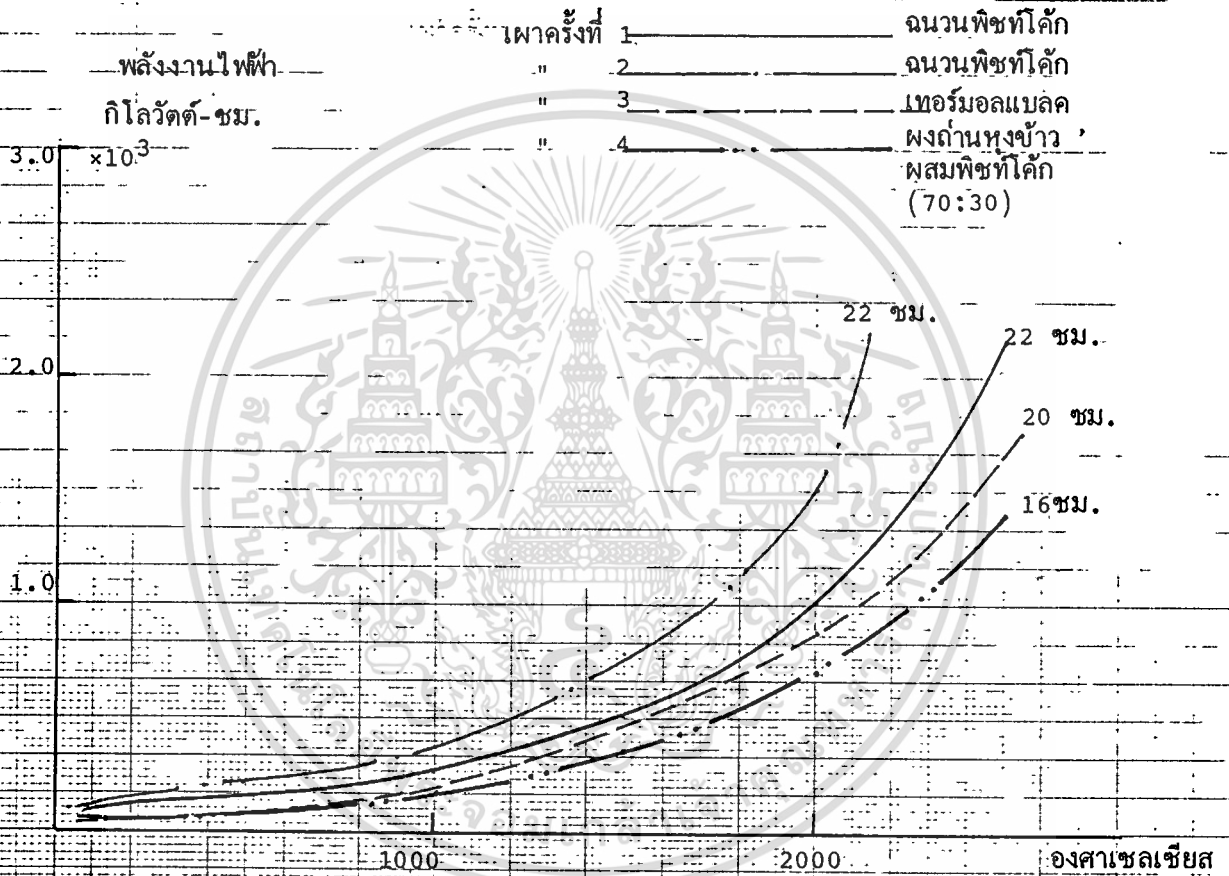
5.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติกายภาพของสื่อฐานคาร์บอนกับอิเล็กทรอนิกส์กราฟไฟต์

จากการทำกราฟไฟต์โทซิ่ง อีลิวชันคาร์บอนทั้ง 4 ครั้ง ที่ได้เพียง 2500 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาล้ากล้องสำหรับสองเครื่องวัดไพโรมิเตอร์ เกิดการออกซิไดซ์จนมีไอระเหยอบดบังทำให้ไม่สามารถประเมินอุณหภูมิให้เกินกว่า 2500 องศาเซลเซียส จึงต้องหยุดขบวนการทั้งที่มีโอกาสจะทำให้ความร้อนถึง 2800 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แน่นอนแต่อย่างไรก็ตามเมื่อได้อัฒฐานคาร์บอนที่ได้แปลงสภาพเป็นอิเล็กโตรกราไฟต์แล้ว ได้ตัดชิ้นงาน 50 ชิ้นงานจากการเผา 4 ครั้ง ไปทดลองหาคุณสมบัติทางกายภาพเปรียบเทียบซึ่งได้ตามตารางต่อไปนี้.

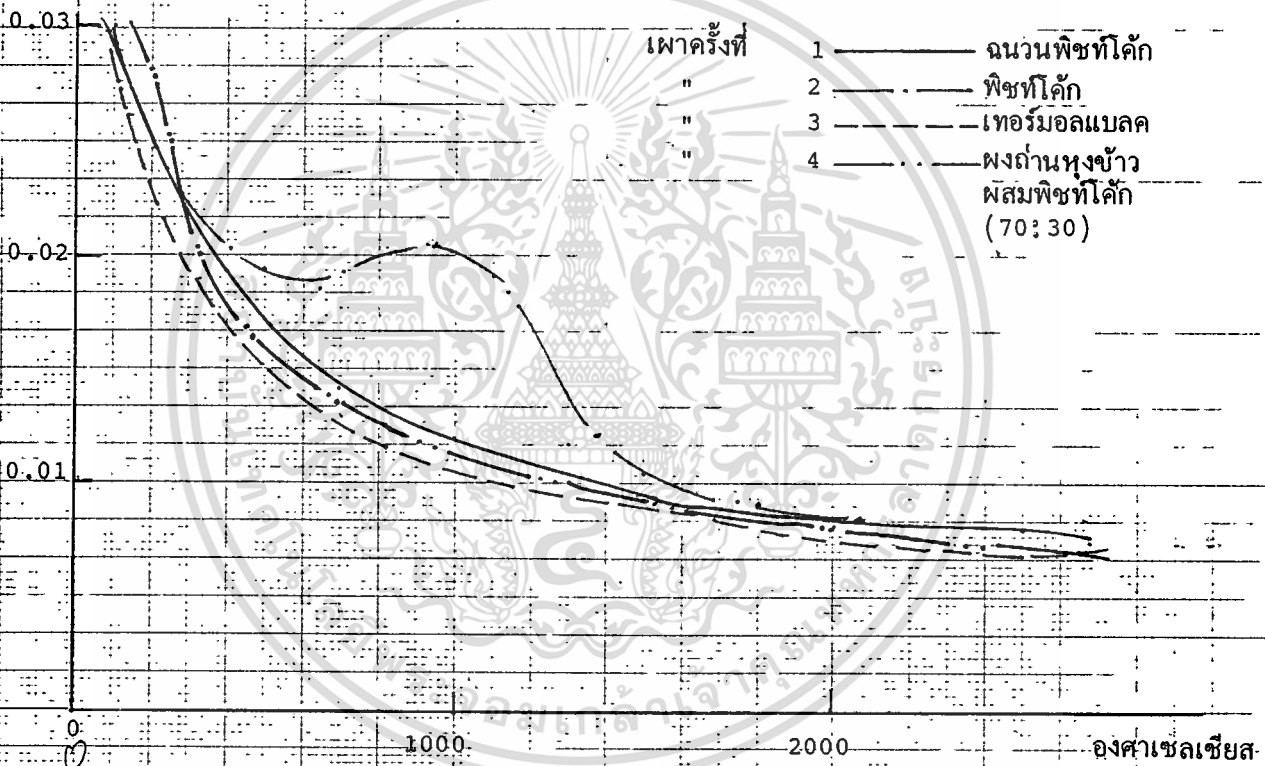
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของอัฐฐานคาร์บอน กับ อิเล็กโตรกราไฟต์

คุณสมบัติกายภาพ	อัฐฐานคาร์บอน	อิเล็กโตรกราไฟต์
ความหนาแน่น (กรัม/ลบซม.)	1.66 ($\sigma_n = 0.007$)	1.716 ($\sigma_n = 0.009$)
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ไมโครโอห์ม-เมตร) แนว A	31.2 ($\sigma_n = 0.42$)	11.6 ($\sigma_n = 0.36$)
ความเปราะ(Breaking Strength) (กิโลกรัม/ตรซม.)	317.2 ($\sigma_n = 14.16$)	279.6 ($\sigma_n = 12.96$)
ความแข็ง(Shore c)	64.8 ($\sigma_n = 0.66$)	38.4 ($\sigma_n = 1.05$)



รูป 5.1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่จับกับอุณหภูมิ

ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งคาร์บอนอสัญฐานกับฟังก์ความต้านทาน (โอห์ม)



รูป 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของแท่งคาร์บอน+ฟังก์ความต้านทานกับอุณหภูมิ

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและการวิจารณ์

จากการทดลองที่ผ่านมาทั้ง 4 ครั้ง แสดงให้เห็นข้อเปรียบเทียบด้านพลังงานไฟฟ้าที่ต้องป้อนเข้ากับระบบอย่างมาก กล่าวคือการทดลองครั้งแรกและครั้งที่ 2 ใช้ผงพืชที่โด้กที่เป็นของเหลือจากการผลิตขบวนการอื่น มาทดลองแทนเป็นผงถั่วกันความร้อน แต่ปรากฏว่าดึงพลังงานไปสะสมมากและนอกจากนั้นยังเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจึงทำให้ ประจุความร้อนรั่วไหลมากทำให้อุณหภูมิขึ้นบนสุดของผงถั่วที่โรยมีการส่งผ่านความร้อนแบบการพาความร้อนทำให้สูญเสียความร้อนสูงมาก ประกอบกับพิกัดสูงสุดที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าถูกจำกัดทำให้การผลิตพลังงานเข้าไปเอาชนะการส่งผ่านความร้อนไม่ทัน ทำให้ผงถั่วเกิดการ อ็อกซิไดซ์ กลายเป็นเถ้า และเสียคุณภาพไปในที่สุดซึ่งการจะควบคุมมิให้อุณหภูมิเกินกว่านี้คงทำได้ยาก

อีกประการหนึ่งความหนาแน่นในการบรรจุ ผงถั่วชนิดผงพืชที่โด้กจะสูงกว่าประเภทผงเทอร์มอลแบลค หรือผงถั่วแห้งซึ่งเป็นสารคาร์บอนกว่า 2 เท่า ดังนั้นพลังงานสะสมในผงถั่วชนิดผงพืชที่โด้กจะมากกว่าแบบสารคาร์บอนจนจบกระบวนการมากกว่า 2-4 เท่า ทั้งนี้เพราะนอกจากน้ำหนักของผงถั่วจะมากกว่าในการจุความร้อนแล้วอุณหภูมิที่แผ่กระจายออกจนถึงผิวนอกสุดจะสูงมากจนปริมาณที่ได้รับความร้อนสูงกว่าด้วย

การทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เมื่อใช้ผงถั่วเป็นผงพืชที่โด้กจะพบว่าเมื่อปล่อยให้เย็นลงภายในวันที่ 2 ของการหยุดการให้พลังงานไฟฟ้า จะปรากฏว่ามีสภาพของผงถั่วบนสุดกลายเป็นเถ้าทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุใหญ่ๆ หรือสภาพการนำความร้อนเพิ่มมากขึ้นหลังจากที่ผ่านการใช้งานแล้ว เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะได้ลดต่ำลง จากการที่ผลึกโครงสร้างอะตอมโตขึ้นในการที่ได้รับความร้อนสูงขึ้นบางส่วนก็ได้กลายเป็นโอเลดโตรกราไฟต์แล้ว ซึ่งปรากฏว่าครั้งที่ 2 ได้นำผงถั่วเดิมมาใช้อีกครั้ง ผลการเผาปรากฏว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นมากจากครั้งที่ 1 ทั้งที่เงื่อนไขทุกอย่างเหมือนเดิม

การทดลองครั้งที่ 3 ลองใช้ผงถั่วเทอร์มอลแบลคซึ่งมีความโตของเม็ดละเอียดมากประมาณ 500 - 800 อังสตรอม จึงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า และประกอบกับเป็นสารคาร์บอนการนำกราไฟต์โทษซึ่งยากกว่า มีขนาดความหนาแน่นในการบรรจุ

ครั้งที่ 1 และ 2 และยังนำความร้อนต่ำมาก จนหลังจากทิ้งไว้ 1-2 วัน ยังไม่มีเก๊าที่ผิวชั้นบนของผงฉนวน เนื่องจากการออกซิไดซ์ซึ่งจัดว่าเป็นฉนวนที่มีคุณภาพดีแต่ราคาแพงมากซึ่งถ้าใช้ในการเทผงโรยครั้งแรก จะสิ้นค่าใช้จ่ายประมาณ 100,000 - 150,000 บาท และจากการใช้งานคาดว่า 1 ครั้ง จะต้องเทเพิ่มอีกประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ และอาจหมดสภาพการใช้งานเนื่องจากเปลี่ยนสภาพโดยค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ค่าการนำความร้อนสูงมากจน สูญเสียพลังงานมาก .

การทดลองครั้งที่ 4 เปลี่ยนผงเป็นผงถ่านปนกับผงพีซีไค้กเป็นอัตราส่วน 70 : 30 ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิปกติ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 500 โอห์ม-ซม. ซึ่งทำให้ได้ค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับเทอร์แมกซ์มาก แต่เหตุที่ไม่ได้นำผงถ่านหุงข้าวมาใช้หมด 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากผงถ่านหุงข้าวยังมีไอระเหยและสิ่งไม่บริสุทธิ์มากถึง 25 เปอร์เซ็นต์ อาจทำให้เกิดปัญหาควันขาวมาก และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูง อาจเป็นอันตรายได้ จึงได้พยายามลดอัตราส่วนดังกล่าวให้เหลือน้อยลงเหลือประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ปรากฏได้ผลการดึงพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าทุกครั้ง และราคาต่ำผงฉนวนถูกกว่าเทอร์แมกซ์ ถึง 5 เท่า ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายครั้งแรก 20,000 - 30,000 บาท เท่านั้น และยังคงใช้ได้นานเกือบ 10 ครั้ง และจากการศึกษาพบว่าฉนวนที่มีขนาด -32+170 ไทเรอร์เมซ วัสดุคล้ายแก๊ซจาก แท่งอลูมิเนียมคาร์บอนได้ดีกว่าผงเทอร์แมกซ์ และหลังจากได้ทำการทดลองเปรียบเทียบพบว่า ผงเทอร์แมกซ์ให้ผลของการออกซิไดซ์ที่แก่ด้านน้อยที่สุด ซึ่งเป็นข้อดีของอนุภาคที่ละเอียดมากทำให้อากาศแทรกตัวลงไปได้ยากมาก

บทวิจารณ์ ปัญหาคือ การควบคุมว่าความต้านทานไฟฟ้าของผงฉนวนแปรตามชนิดและความหนาแน่นในการบรรจุมาก ในความเป็นจริง ผงชั้นล่างจะแน่นกว่าด้านบนมากทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่ด้านล่างสุด และสูงไล่ขึ้นไปจนถึงผิวบนสุดแต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของความร้อนถูกปรับปรุงขึ้นมากที่อุณหภูมิ 2500 องศาเซลเซียส จาก 15 % เป็น 24.3 % โดยอาศัยผงฉนวนที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงมากที่สุด อนุกรมปกติ และยากต่อการทำกราฟไฟด์ไทซ์ซึ่ง แต่เสียค่าใช้จ่ายครั้งแรกในจำนวน 30,000 บาท แต่ถ้าเฉลี่ยประมาณ 10 ครั้ง จะเสียค่าใช้จ่ายต่อครั้งประมาณ 3,000 บาท นับว่ายังถูกกว่าฉนวนเทอร์มอลแบลค ประมาณ 5 เท่า ซึ่งวัสดุประหยัดค่าใช้จ่ายมาก แต่ถึงอย่างไรผงพีซีไค้กยังเป็นจุดสนใจในด้านค่าผงฉนวนซึ่งประหยัดที่สุด แต่ประสิทธิภาพความร้อนที่ได้ต่ำมากและจะต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเผาครั้งต่อไปจนไม่อาจนำมาใช้ได้ครั้งที่ 2 ขึ้นไปแล้ว

แต่การทดลองพบปัญหามากด้าน การอ่านอุณหภูมิจากไพโรมิเตอร์ซึ่งจะรับรังสีความร้อน จากตัวแท่งอิเล็กทรอนิกส์กราฟต์ ที่ส่องยาวถึงแท่งอุณหภูมิคาร์บอนด้านใน เพราะอากาศ ภายนอก (ออกซิเจน) ไปทำปฏิกิริยาจนไม่สามารถรับการเปล่งรังสีได้ แม้ว่าจะใช้วิธีการปรับ ค่าอิมิตซ์วิตี้ เปรียบเทียบค่าแบบลวดดีใหม่ก็ตาม ทั้งนี้เพราะเป้าหมายมีขนาดเปลี่ยนจาก การบดบึงของหมอกควัน ปัญหานี้คงต้องได้รับการแก้ไขโดยแก้ไขต่อไป



บทที่ 7

สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ช่วยแก้ปัญหาราคาพลังงานที่มีราคาแพงมาก และยังช่วยลดปัญหาพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการอย่างมาก ซึ่งถ้าปราศจากการคาดคะเนด้านความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของพลังงานและศึกษาชนิดของพลังงานก็คงจะไม่ได้มาซึ่งการลดปัญหาดังกล่าว และการที่อุตสาหกรรมคาร์บอนในประเทศสามารถพัฒนาศักยภาพจากเดิมที่ผลิต อสังฐานคาร์บอนได้เองมาเป็นการผลิตอิเล็กโตรกราไฟต์ขึ้น นับเป็นก้าวแรกและก้าวสำคัญในการหาอุตสาหกรรมนี้ไปสู่องค์ประกอบคาร์บอนกราไฟต์ ที่สูงค่าในด้านเทคโนโลยี ซึ่งประเทศอุตสาหกรรมที่เจริญแล้วต้องพึ่งพาอย่างยิ่ง

แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า เตากราไฟต์ไทยซึ่งที่ทำการทดลองได้ผล เนื่องจากได้พลังงานสำคัญ (ถ่านหุงข้าว) จนเป็นที่น่าพอใจ แต่ปัญหาของเตาชนิดนี้ยังคงมีอยู่ได้แก่ จำนวนผลิตต่อเวลาค่อนข้างต่ำอัน อาจเป็นปัญหาภายนอกถ้ามีความต้องการอิเล็กโตรกราไฟต์สูงขึ้น เตาชนิดนี้คงไม่พอรองรับปัญหาการผลิตอย่างแน่นอน ซึ่งปัญหาผลผลิตนี้อาจแก้ไขได้โดยใช้เตาชนิดต่อเนื่องให้กำลังผลิตสูงกว่าแบบนี้ ในช่วงเวลา 8 วัน ถึง 10 เท่า นับว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนในเชิงพาณิชย์อีกทั้งประหยัดค่าพลังงาน/กิโลกรัมของอสังฐานคาร์บอน เมื่อเทียบกับแบบนี้กว่า 100 % นับว่าเป็นเตาที่มีประสิทธิภาพสูง

ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนา ความรู้ความสามารถเพื่อไปผลิตวัสดุที่ประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับความเจริญของประเทศไทยในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. H.T Pinnick," Proceedings of the first and second conferences on Carbon". New York: Univ. of Buffalo, 1983.
2. C.L.Mantell, "Carbon & Graphite Hand book", Interscience Publishers, 1970.
3. O.P. Bahland B.S. Chauhan,"Letters to the editor" New delhi.
4. A.E. Goldman, "Thai-Carbon and Graphite Co.Ltd", 1991.
5. T.I. Shikawa & T.Nagaoki, "Recent Carbon Technology", JEC Press Inc. 1983.
6. Yildiz Bayazitoglu And M. Necati ozisik , "Elements of Heat Transfer", Mc Graw-Hill , 1988.
7. W. Trinks And M.H. Mawhinney , "Industrial Furnaces 5th Edition", John Wiley & Son Inc , 1961.
8. Maurice Orfeuil , "Electric Process Heating" , Battelle Press, 1987.
9. London Society of Chemical industry , "Carbon'82" , 1982.
10. L.C.F. Blackman," Modern Aspects or Graphite Technology" , Academic Press NY, 1970.
11. Erle I. Shobert,"Carbon Brushes" Chemical Publishing Company, Inc. NY, 1965.
12. Erle I Shobert , "Carbon And Graphite", Academic Press New York And London , 1964.

ภาคผนวก 1.1

ตาราง เปรียบเทียบอิเล็กทรอนิกส์โทรกราฟไฟต์ EGX กับเกรดต่างๆ ทั่วโลก

เกรด	EGX	EGO	RE54	EG34D	TD560	AY
ความหนาแน่น กรัม/ซีซี	1.716	1.55	1.60	1.58	1.63	1.60
ความต้านทาน ไฟฟ้าจำเพาะ (ไมโครโอห์ม-ซม.)	1160	1090	1900	1100	1400	1000
ความแข็ง (Shore c)	38	36	46	35	42	45
ทนการแตกหัก (กิโลกรัม/ตร.ซม.)	280	210	250	270	320	210
แหล่งผลิต	ไทยคาร์บอน แอนดักกราฟไฟต์ ไทย	มอแกนไนท์ อังกฤษ	ริงส์ดอร์ฟ เยอรมันนี	เลอคาร์บอน ฝรั่งเศส	โตโก ญี่ปุ่น	เนซัลแลนด์ อเมริกา

ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า EGX ที่ผลิตได้ มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดี เทียบกันทั่วไปค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่าความร้อนดี ความแข็งอยู่ในเกณฑ์ไม่สูงที่สำคัความหนาแน่นและค่าทนการแตกหักจะสูง ทำให้อายุการใช้งานสูงขึ้นเมื่อนำไปทำแปรงถ่านสำหรับงาน Slip Ring

ภาคผนวก 1.2

มาตรฐานทางการทหาร กองทัพอากาศอเมริกา

MIL-B-3743D

I - Allowable tolerances for
brush material properties.

Tolerance - percent, plus or minus

Property	Electrographite,	Graphite
	carbnp, carbon-graphite	Metal Graphite
Resistivity	25	40
Hardness	20	30
Transverse strength	35	35
Apparent density	7	7
Contact voltage drop	20	25

ภาคผนวก 2

แสดงเตากราไฟต์ไทยซึ่ง และอุปกรณ์



รูป ก.1 การโรยผงปูนในเตากราไฟต์ไทยซึ่ง

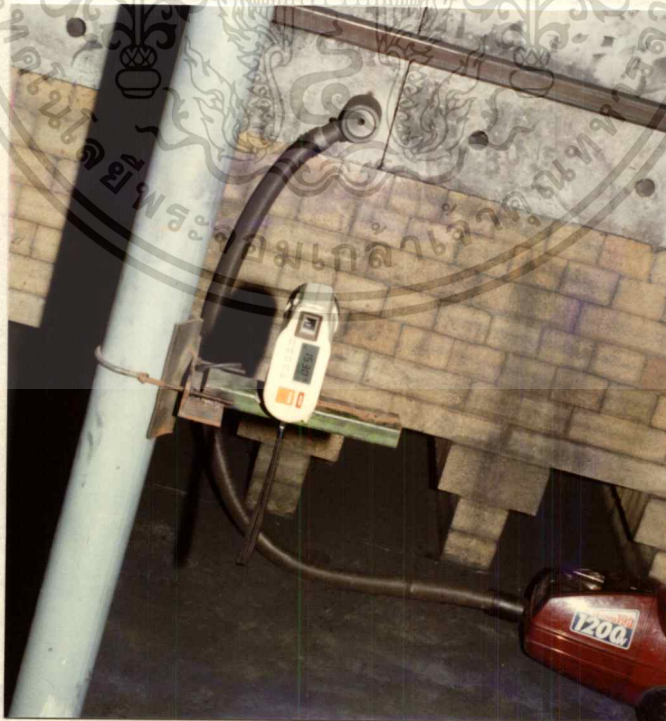


รูป ก.2 การเตรียมการป้อนด้วยผงความต้านทาน เหนือผงฉนวน

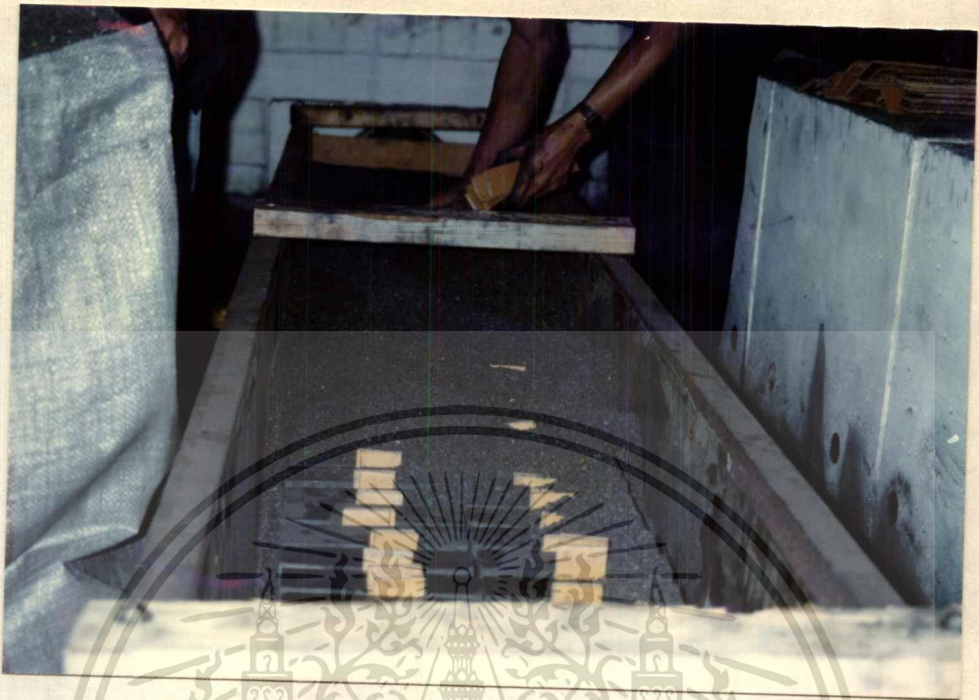
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่ควรเสกตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๑ ขั้วอิลเลคโตรดในเตากราไฟต์โทซซึ่งหลังเผา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปท.4 กำรวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้ไฟโรมิเตอร์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



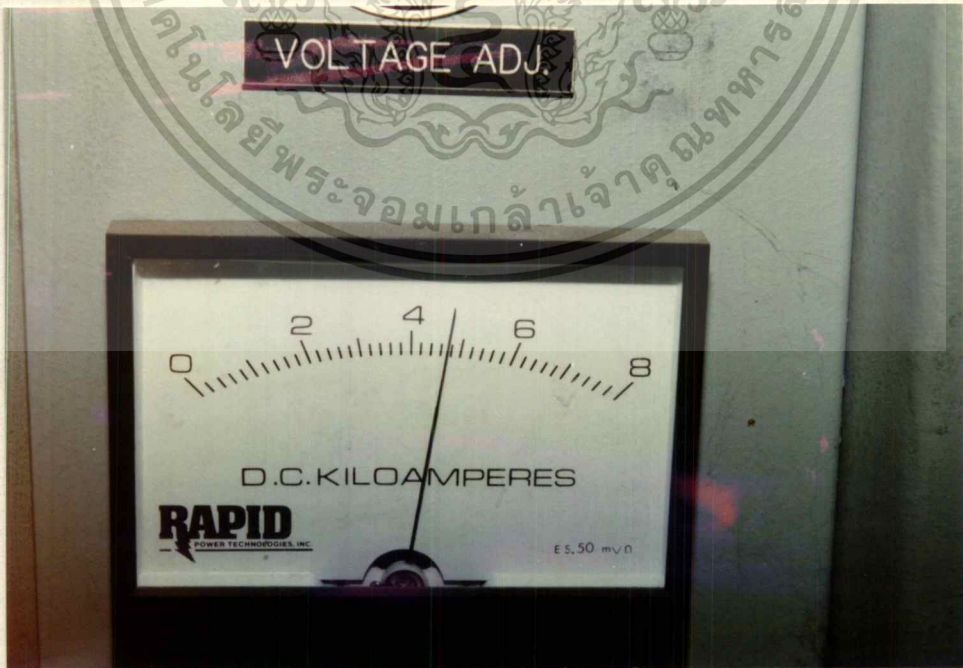
รูป ก.5 การเรียงแท่งคาร์บอนลิเทียมฐานและการโรยผงความต้านทาน



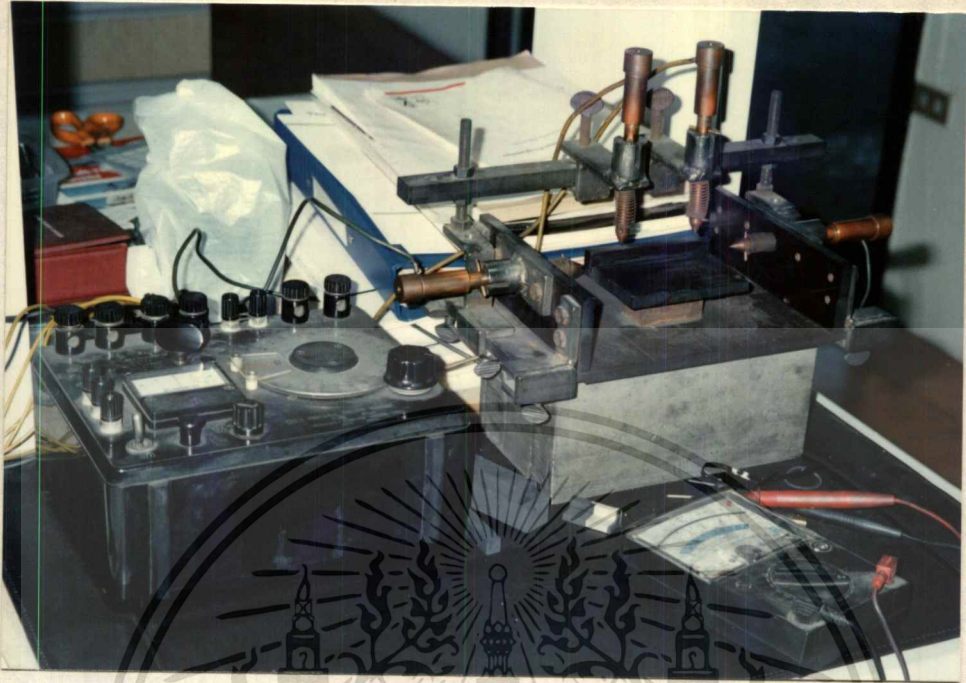
รูป ก.6 ไอร่ะเหยหลังให้ความร้อนสูงประมาณ 1800 องศาเซลเซียส
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของ ศ.ดร.เชษฐาธิราช วัชรโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ป.7 แสดงอุณหภูมิในช่วงสุดท้าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 8 แสดงกระแสไฟฟ้ที่ช่วงอุณหภูมิสุดท้าย (2500 องศาเซลเซียส) ระโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

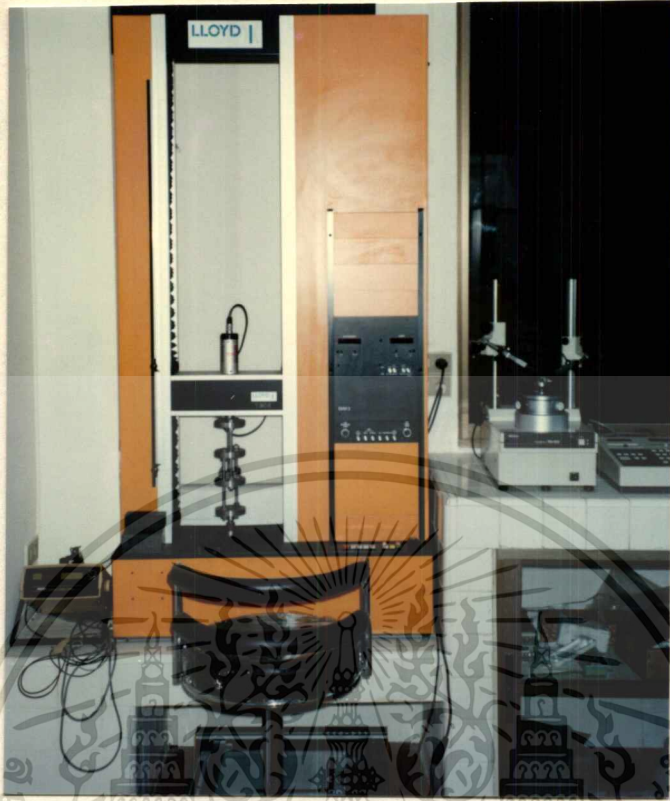


รูป ก.9 แสดงเครื่องมือวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

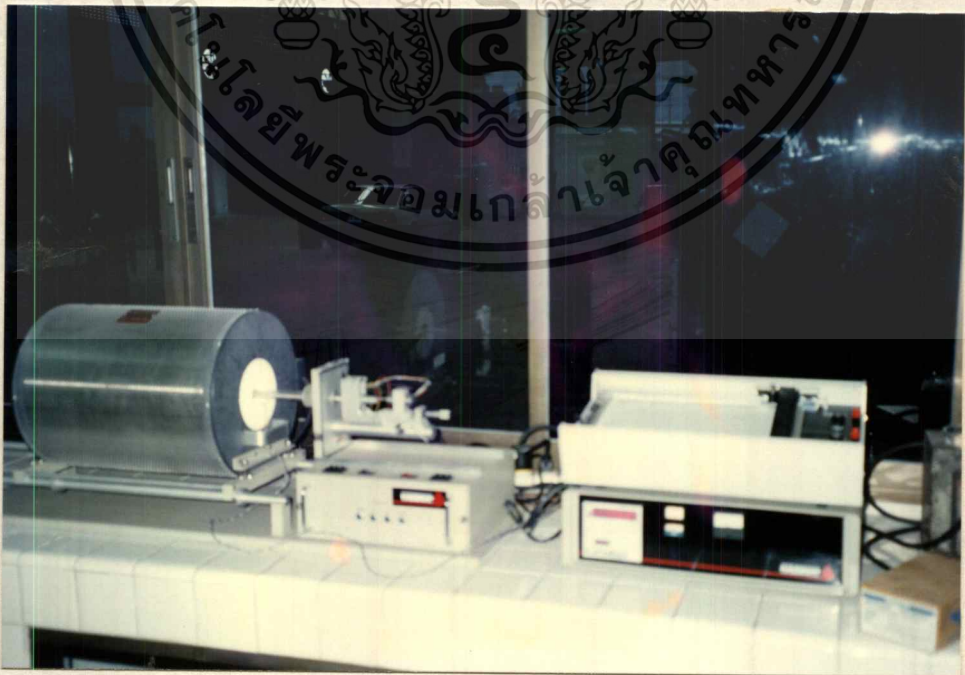


รูป ก.10 แสดงเครื่องวัดค่าความแข็ง (Shore c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

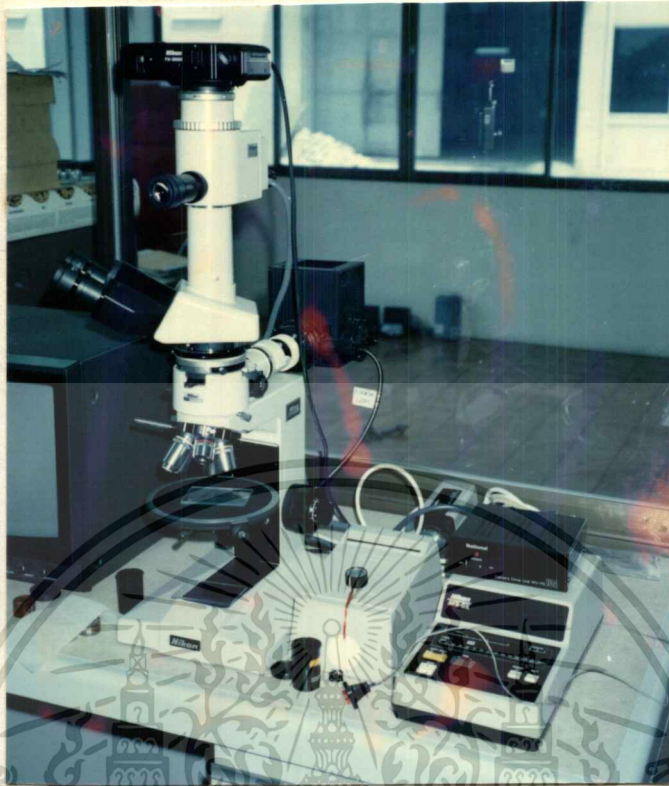


รูป ก.11 แสดงเครื่องวัดค่า Strength

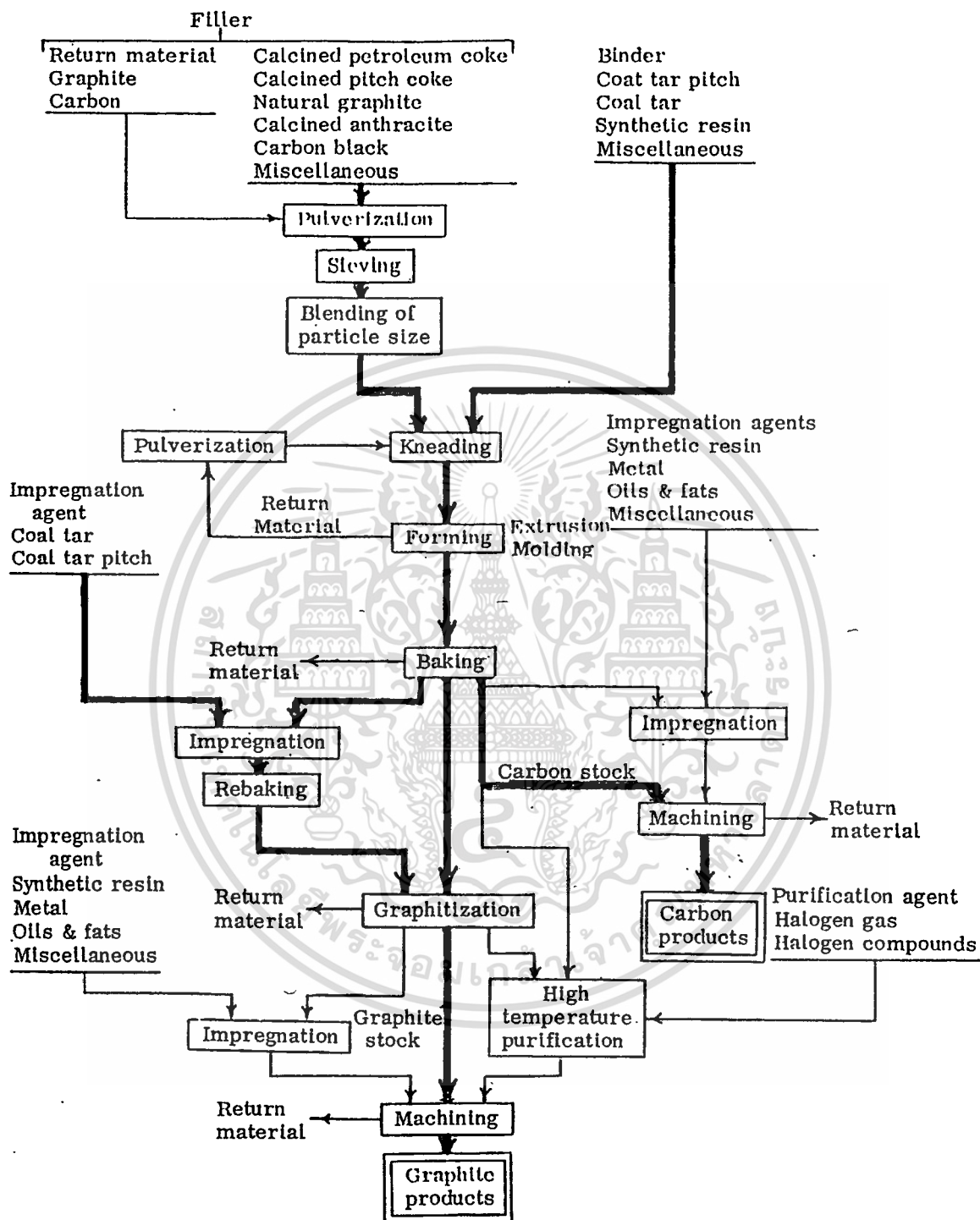


รูป ก.12 แสดงเครื่องวัดค่าการขยายตัวตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในทางวิศวกรรมเครื่องกลเท่านั้น ไม่สมควรให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก.13 แสดงกล้องส่องดูโครงสร้างขนาดเล็กของคาร์บอน



รูปที่ ก. 14 แสดงแผนภูมิการผลิตคาร์บอนอสัณฐานและอิเล็กโทรกราไฟต์

ภาคผนวกที่ 4

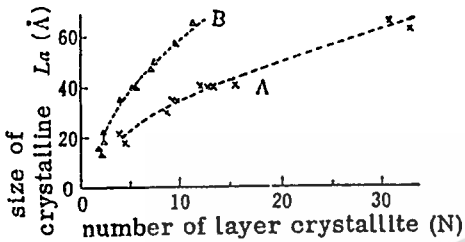
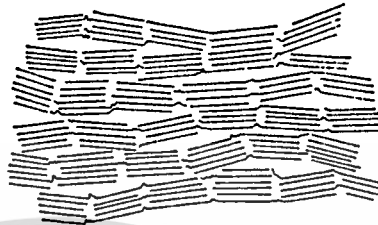
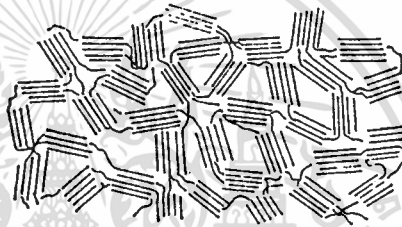


Figure 2.18 Relationship between the layer number N and the size of crystallites (La) of soft carbon and hard carbon

- A: soft carbon (graphitizing carbon) heat treatment temperature of 1000~1720°C
- B: hard carbon (non-graphitizing carbon) heat treatment of 1000~3000°C

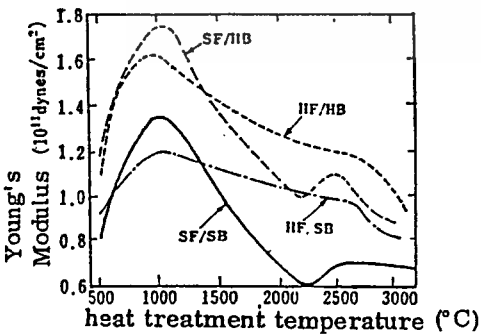
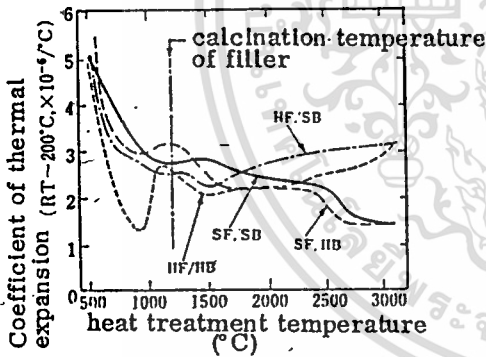


A : soft carbon (graphitizing, but non-graphitic)

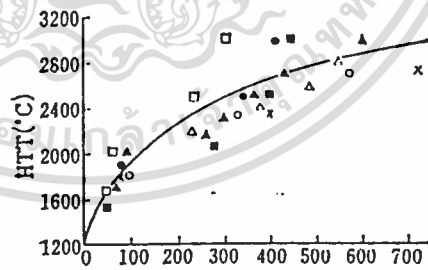


B : hard carbon (non-graphitizing)

Figure 2.19 Schematic structures of soft carbon and hard carbon



SF: soft filler SB: soft binder
HF: hard filler HB: hard binder



- pitch coke } Akamatsu et al (1956)
- petroleum coke } Mason et al (1966)
- PVC coke } Bowman (1956)
- pitch coke } Franklin (1951)
- × petroleum coke
- △ petroleum coke
- ▲ PVC coke

Figure 2.21 Relationship between La and heat treatment temperature (soft carbon)

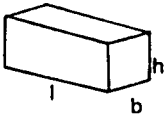
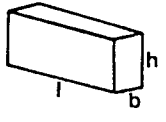
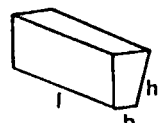
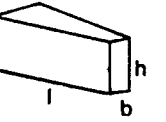
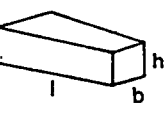
FIRECLAY BRICK

PROPERTIES	BRAND	K-30	K-35	K-4J
REFRACTORINESS P.C.E. (ORTON CONE)		30-31	32	33-34
BULK DENSITY, kg/m ³		2010-2080	2040-2120	2200-2220
APPARENT POROSITY, %		23-26	22-25	17-20
COLD CRUSHING STRENGTH, kg/cm ²		200-300	200-300	250-400
MODULUS OF RUPTURE, kg/cm ²		45-70	45-70	60-90
REHEAT TEST permanent linear change, % after heating		at 1400°C 0.0 to -0.4	at 1400°C 0.0 to -0.2	at 1600°C -0.2 to -0.9
LOAD TEST, 1.76 kg/cm ² % linear subsidence after heating at 1450°C.		—	—	2.8-4.4
CHEMICAL ANALYSIS, % APPROX.				
SILICA (SiO ₂)		64.1	58.7	53.7
ALUMINA (Al ₂ O ₃)		30.2	35.8	42.3
IRON OXIDE (Fe ₂ O ₃)		2.0	1.8	1.2
CLASSIFICATION		MEDIUM DUTY FIRECLAY	HIGH DUTY FIRECLAY	SUPER DUTY FIRECLAY

The above data are typical of the properties of commercial 9" straight brick. The data are subject to reasonable variations and, therefore, should not be used for specification purposes.

ASTM Test Methods, where applicable, used for determination of data.

STANDARD REFRACTORY BRICKS

DESCRIPTION SHAPE	BRICK NO.	DIMENSION IN MM.			
		A	B	H	L
STRAIGHT 	ST-76		76	115	230
	ST-64		64	115	230
SPLIT 	SP-50		50	115	230
	SP-38		38	115	230
	SP-32		32	115	230
	SP-25		25	115	230
SIDE ARCH 	SA-70	76	70	115	230
	SA-64	76	64	115	230
	SA-50	76	50	115	230
END ARCH 	EA-70	76	70	115	230
	EA-64	76	64	115	230
	EA-50	76	50	115	230
KEY 	KE-102	115	102	76	230
	KE-89	115	89	76	230
	KE-76	115	76	76	230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PYROMETRIC CONE EQUIVALENT
(P.C.E.)
Cone Temperature (to the nearest 5°)**

CONE NO.	END POINTS		CONE NO.	END POINTS	
	° C	° F		° C	° F
20	1565	2845	32½-33	1735	3150
23	1605	2920	33	1745	3170
26	1620	2950	33-34	1755	3185
27	1640	2985	34	1765	3205
29	1660	3020	34-35	1775	3225
29-31	1670	3040	35	1785	3245
31	1685	3060	35-36	1795	3260
31-31½	1690	3075	36	1805	3280
31½	1700	3090	36-37	1810	3295
31½-32	1710	3105	37	1820	3310
32	1715	3125	38	1850	3360
32-32½	1720	3130	39	1865	3390
32½	1725	3135	40	1885	3425

TEMPERATURE CONVERSION TABLE

F	C	F	C	F	C			
932	500	260	3182	1750	954	4982	2750	1510
1112	600	316	3272	1800	982	5072	2800	1538
1292	700	371	3362	1850	1010	5162	2850	1566
1472	800	427	3452	1900	1038	5252	2900	1593
1652	900	482	3542	1950	1066	5342	2950	1621
1832	1000	538	3632	2000	1093	5432	3000	1649
1922	1050	566	3722	2050	1121	5522	3050	1677
2012	1100	593	3812	2100	1149	5612	3100	1704
2102	1150	621	3902	2150	1177	5702	3150	1732
2192	1200	649	3992	2200	1204	5792	3200	1760
2282	1250	677	4082	2250	1232	5882	3250	1788
2372	1300	704	4172	2300	1260	5972	3300	1816
2462	1350	742	4262	2350	1288	6062	3350	1843
2552	1400	760	4352	2400	1316	6152	3400	1871
2642	1450	788	4442	2450	1343	6242	3450	1899
2732	1500	816	4532	2500	1371	6332	3500	1927
2822	1550	843	4622	2550	1399			
2912	1600	871	4712	2600	1427			
3002	1650	899	4802	2650	1454			
3092	1700	927	4892	2700	1482			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกหน่วยงานได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPERATING AIDS ALPINE
ANALYSIS SIEVE-COMPARISON TABLE

MESH/HOLE WIDTH	TYLER MESH
μm	
5	2500
10	1250
15	800
20	625
25	500
32	425
38	400
45	325
53	270
63	250
75	200
90	170
106	150
125	115
150	100
180	80
212	65
224	62
250	60
250	60
300	48
355	42
425	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายณรงค์เดช ศรีอัสวอมร
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ.2502
สถานที่เกิด	จังหวัดนนทบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2524
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการพิมพ์	การแปลงรูปอสัญฐานคาร์บอนเป็นอิเล็กทรอนิกส์กราฟต์
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, วิศวกรตรวจสอบคุณภาพ เครื่องจักรกลไฟฟ้า บริษัท ABB จำกัด ปี 2525-2529
อาชีพปัจจุบัน	ผู้จัดการทั่วไป บ.ไทยคาร์บอนแอนด์กราฟต์ จก. อาจารย์พิเศษ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง