



การผลิตและทดสอบวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พูนจากไม้ยางพารา

**Processing and Testing of Aluminum Matrix Composite Reinforced with Silicon Carbide from Rubber Wood.**

ศิวนาท ลอยกุลนันท์

**Siwanat Loykulnanta**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2553**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์            การผลิตและทดสอบวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พ่นจากไม้  
 ยางพารา  
 ผู้เขียน                    นายศิวนาท ลอยกุลนันท์  
 สาขาวิชา                วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)	.....ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ วนิดา รัตนมณี)
.....	.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)	.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมवास)	.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมवास)
.....	.....กรรมการ (ดร.อานอบ คันทะชา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
 อุตสาหการและระบบ

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตและทดสอบวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พูนจากไม้ยางพารา
ผู้เขียน	นายศิวนาท ลอยกุลนันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2552

### บทคัดย่อ

โครงการงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตและทดสอบวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พูนจากไม้ยางพารา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติกลายเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์พูน ในการศึกษาได้แบ่งการวิจัยเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ การผลิตวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงด้วยเนื้ออะลูมิเนียม สำหรับกระบวนการผลิตวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการประกอบด้วย 1) กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพจากไม้ยางพาราเป็นแท่งถ่านพูน 2) กระบวนการเคลือบผิวถ่านพูนด้วยซิลิกาที่ได้มาจากกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการอัดสารละลายของเหลว เรียกว่า โซล ซึ่งสารละลายโซลประกอบด้วยสารละลาย 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ สารละลาย Tetraethoxysilane (TEOS), Ethanol, H<sub>2</sub>O และ HCl จากนั้นใช้แรงดันสุญญากาศเพื่ออัดสารละลายโซลเข้าสู่รูพูนของแท่งถ่านพูน หลังจากนั้นอบชิ้นงานเพื่อให้สารละลายเปลี่ยนสถานะจากของเหลว เป็นของแข็ง เรียกว่า เจล ผลที่ได้จากกระบวนการนี้คือ วัสดุผสม คาร์บอน/ซิลิกา 3) กระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง 1600 องศาเซลเซียส ผลจากกระบวนการนี้ได้เป็นวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์/คาร์บอนพูน และกำหนดเงื่อนไขระยะเวลาในการเผาแช่ (Holding time) ที่แตกต่างกันที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง และ 4) กระบวนการหล่ออัด (Squeeze casting) คือกระบวนการหล่อโดยใช้แรงอัดสูงเพื่อให้อะลูมิเนียมเหลวแทรกซึมเข้าสู่รูพูน ผลที่ได้คือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์/คาร์บอน และได้กำหนดเงื่อนไขในการทดลองของทิศทางโครงสร้างชิ้นงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ ทิศทางโครงสร้างแนวรัศมี และทิศทางโครงสร้างแนวแกน ซึ่งจากกระบวนการนี้มีผลทำให้เนื้ออะลูมิเนียมแทรกซึมเข้าสู่ช่องว่างของรูพูนภายในของ SiC/C

ในส่วนที่สอง เป็นการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จากการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์/คาร์บอนโดยทำการวิเคราะห์ทางกายภาพ วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและการวิเคราะห์แยกธาตุ ทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้า การนำความร้อน ความสึกหรอ และความแข็ง ผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์/คาร์บอน มีส่วนประกอบของธาตุ คาร์บอน 49.13 เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียม 36.94 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกอน

8.21 เปอร์เซ็นต์ จากผลของการทดสอบความสึกหรอและความแข็งแรงพบว่าชิ้นงาน โครงสร้างทิสทางแนวรัศมีมีสมบัติที่ดีกว่าชิ้นงาน โครงสร้างทิสทางแนวแกน ระยะเวลาเผาแช่พบว่า ความแข็งแรงของโครงสร้างแนวแกนมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเผาแช่ สมบัติการนำความร้อนและความสึกหรอพบว่า โครงสร้างภายในของวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์มีผลต่ออัตราความสึกหรอมาก และปริมาณธาตุคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อน หลังจากนั้นนำค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ พบว่าปัจจัยทิสทาง โครงสร้างและระยะเวลาเผาแช่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงที่อย่างมีนัยสำคัญ ( $\alpha = 0.05$ )

**Thesis Title** Processing and testing of aluminum matrix composites reinforced with silicon carbide from rubber wood  
**Author** Siwanat Loykulnanta  
**Major Program** Industrial and System Engineering  
**Year** 2010

### **Abstract**

The purpose of this thesis is to study processing and testing of aluminum matrix composites reinforced with silicon carbide from rubber wood. Biomorphic SiC was synthesized from natural rubber wood. In this study it can be divided into 2 processes. Firstly (i), the process of producing the aluminum-silicon carbide composites. This process was composed of 4 steps. The first step of this process is carbonization process. The rubber wood was pyrolyzed to produce porous carbon. In the second step, porous carbon was coated with silica from sol-gel process. Silica Sol was first provided by a process in which Tetraethoxysilane (TEOS) was mixed with Ethanol, H<sub>2</sub>O and HCl. Thereafter, porous carbon was placed in an infiltration vessel by vacuum pressure in self-made equipment. After that, sample was heated until becoming a gel-like. The result of this process was C/SiO<sub>2</sub> composite material. In the third step, The reaction of carbothermal reduction was implemented at temperatures up to 1600 °C for holding time of 1, 2 and 3 hours under Ar-atmosphere respectively. The result of this process was a porous silicon carbide/carbon. In the last step, squeeze casting method was implemented by infiltrated molten aluminum with high pressure into the porosity of biomorphic Silicon carbide/carbon becoming Silicon carbide reinforced aluminum matrix composites material. For squeeze casting process, casting factor alignment as axial sample or radial samples was set to be different testing condition to the infiltration of aluminum into porous carbon.

Secondly (ii), the testing of aluminum-SiC composites was studied by physically analyzing, electrical properties, thermal conductivity properties, mechanical properties and analysis of variance (ANOVA). The result of physically analyzing microstructure using scanning electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX). The results shown that the aluminum-SiC composites contains carbon 49.13%, aluminum 36.94% and silicon 8.21% respectively. The result electrical properties and thermal conductivity properties shown that the result of electrical property and

thermal conductivity shown that the composite in radial sample evidences electrical property and thermal conductivity better than axial sample. The results of mechanical properties are comprised of wear and hardness testing indicated that the result of wear and hardness testing indicated that the composite in Radial sample exhibits better wear resistance than axial sample. The result was also found that the microstructure of synthesized natural composite relatively affects to the wear. Moreover, it can be found from holding time factor that hardness of Radial sample was decreased when increasing the holding time. Lastly, hardness testing value was analyzed by analysis of variance and found that sample direction was greatly affected to the hardness confidence level ( $\alpha = 0.05$ )

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการรูป	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	7
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ไม้ยางพารา	9
2.2 วัสดุผสม	10
2.3 อะลูมิเนียม	12
2.4 ซิลิกอนคาร์ไบด์	13
2.4.1 การเตรียมเบตา ซิลิกอนคาร์ไบด์	13
2.4.2 การเตรียมอัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์	15
2.5 กระบวนการคาร์โบโนเซชัน	15
2.6 กระบวนการโซล-เจล	16
2.7 ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชัน	18
2.8 กระบวนการหล่ออัด	20
2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง	21
3. วิธีการวิจัย	26
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	26
3.2.1 เตาเผา (อุณหภูมิสูงสุด 1,200 °C)	26
3.2.2 Magnetic Stirrer ยี่ห้อ LMS รุ่น MGS-1001	27
3.2.3 เครื่องอัดสุญญากาศ	27
3.2.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง	28
3.2.5 เครื่องอัดไฮโดรลิก	28
3.2.6 เตาหลอมอะลูมิเนียม	29
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM 5800LV, JEOL	29
3.4 วิธีการทดลอง	30
3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน	30
3.4.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน	30
3.4.3 กระบวนการโซล-เจล	31
3.4.4 กระบวนการคาร์บอนเทอร์มอลรีดักชัน	32
3.4.5 กระบวนการหล่ออัด	33
3.5 วิธีการวิเคราะห์วัสดุ	37
3.5.1 การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง	37
3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้าง	38
3.6 วิธีทดสอบสมบัติวัสดุ	38
3.6.1 การทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้า	38
3.6.2 การทดสอบการนำความร้อน	38
3.6.3 การทดสอบการสึกหรอ	39
3.6.4 การทดสอบความแข็ง	41
3.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง	42
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	43
4.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ	43



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ผลการหล่ออัดอะลูมิเนียม	44
4.1.2 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น	45
4.2 ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	46
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทิศทางวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี	46
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทิศทางวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน	47
4.3 วิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping	48
4.3.1 วิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping ทิศทางโครงสร้างแนวรัศมี	48
4.3.2 วิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping ทิศทางโครงสร้างแนวแกน	49
4.3.3 วิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping ภายในโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al ซึ่งเกิดจากการแตกหัก	50
4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Energy Dispersive X-ray Analysis	51
4.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานการนำไฟฟ้า	52
4.6 การทดสอบสมบัติการนำความร้อน	54
4.7 การทดสอบสมบัติการสึกหรอ	56
4.8 การทดสอบสมบัติความแข็ง	61
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง	63
4.9.1 ผลของ Residual Plot for yield	63
4.9.2 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง	66
4.9.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง	68
4.10 ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติต่างๆของวัสดุผสม SiC/C-Al	69
5. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ	71
5.2 สรุปผลการทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุผสม SiC/C-Al	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการนำไฟฟ้า	71
5.2.2 ผลการทดสอบสมบัติการนำความร้อน	71
5.2.3 ผลการทดสอบสมบัติความสึกหรอ	72
5.2.4 ผลการทดสอบความแข็ง	72
5.2.5 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	73
5.3 ปะโยชน์และข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	75
ภาคผนวก ก. แสดงผลค่าการนำความร้อน	77
ภาคผนวก ข. ผลการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า	80
ภาคผนวก ค. ตารางแปลงหน่วยค่าความแข็ง	83
ภาคผนวก ง. ลักษณะเฉพาะของคาร์บอน อะลูมิเนียม ซิลิกอนคาร์ไบด์	86
ง.1 แสดงสมบัติต่างๆของคาร์บอน	87
ง.2 แสดงสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม A356, T61	88
ง.3 แสดงสมบัติต่างๆของซิลิกอนคาร์ไบด์	90
ประวัติผู้เขียน	91

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติเชิงกลของไม้ยางพารา	9
2.2	สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม	13
2.3	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเซลล์ภายในเนื้อไม้ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน	15
2.4	ประโยชน์ของวัสดุผสมเนื้อ โลหะในเชิงพาณิชย์	20
2.5	ตารางชนิดการแจกแจงในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง	22
2.6	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ปัจจัย	24
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม A356	26
3.2	จำนวนชิ้นงานในแต่ละปัจจัยของการทดลอง	33
3.3	ความแข็งร็อคเวลสเกลต่างๆ	41
4.1	ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี	52
4.2	ค่าความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al	63
4.3	ตาราง ANOVA	68
4.4	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของสมบัติของวัสดุผสม SiC/C-Al	69

## รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การนำวัสดุจากธรรมชาติมาผลิตเป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกส์และวัสดุผสม	2
1.2	การสังเคราะห์ของ C/SiO <sub>2</sub> เป็น Porous SiC	3
1.3	แสดงชิ้นงานทึบทางโครงสร้างทั้ง 2 แบบ	4
1.4	ลักษณะภายในรูพรุนของไม้ธรรมชาติหลังจากทำการสังเคราะห์	5
2.1	วัสดุผสมซึ่งผลิตมาจากวัสดุหลักทั้งสามกลุ่ม	11
2.2	เฟสของวัสดุผสม	11
2.3	ลักษณะของโครงสร้างวัสดุผสม	12
2.4	กราฟความสมดุลของส่วนผสม ระบบ (SiO <sub>2</sub> +3C) ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ที่อุณหภูมิต่างๆ	19
2.5	การหล่ออัด (Squeeze casting)	21
3.1	เตาเผาอุณหภูมิสูงสุด 1200 °C	27
3.2	เครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก	27
3.3	เครื่องอัดสูญญากาศ	27
3.4	เตาเผาอุณหภูมิสูง 1800 °C	28
3.5	เครื่องอัดไฮดรอลิก	28
3.6	เตาหลอมอะลูมิเนียม	29
3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	29
3.8	ตัวอย่างของชิ้นงานไม้ยางพาราก่อนอบ	30
3.9	ไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน	31
3.10	กระบวนการโซล-เจล	32
3.11	ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสม SiC/C	33
3.12	แสดงลักษณะของวัสดุผสม SiC/C	33
4.1	ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานในการวิเคราะห์วัสดุผสม SiC/C-Al	43
4.2	วัสดุผสม SiC/C	44
4.3	ความหนาแน่นของวัสดุผสม SiC/C-Al เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด	45

## รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	การแทรกซึมของเนื้ออะลูมิเนียมในวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางแนวรัศมี	46
4.5	การแทรกซึมของเนื้ออะลูมิเนียมในวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางแนวแกน	47
4.6	ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุ ของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีที่เวลาเผาแช่แตกต่างกัน	49
4.7	ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุ ของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนที่เวลาเผาแช่แตกต่างกัน	50
4.8	ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุจากรอยแตกของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนที่เวลาเผาแช่ 2 ชั่วโมง	51
4.9	การเปรียบเทียบผลการทดลองความต้านทานการนำไฟฟ้าระหว่างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนและแนวรัศมี เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 จากการทดลอง	53
4.10	ค่าการนำความร้อนระหว่างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีเปรียบเทียบกับวัสดุในเชิงพาณิชย์	55
4.11	กราฟสีทึบของชิ้นงานวัสดุผสมแนวรัศมี	56
4.12	แสดงค่าการสีทึบของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน	57
4.13	กราฟแสดงการสีทึบโดยการเปรียบเทียบระหว่าง วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี และ วัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด	58
4.14	ภาพ SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี	59
4.15	ภาพ SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน	60
4.16	ผลการทดสอบความแข็งวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีเปรียบเทียบกับวัสดุในเชิงพาณิชย์	62
4.17	ลักษณะข้อมูลแบบสุ่ม	64
4.18	การกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)	64
4.19	กราฟแสดงลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values	65
4.20	แสดงค่าของ Test for Equal Variances	65

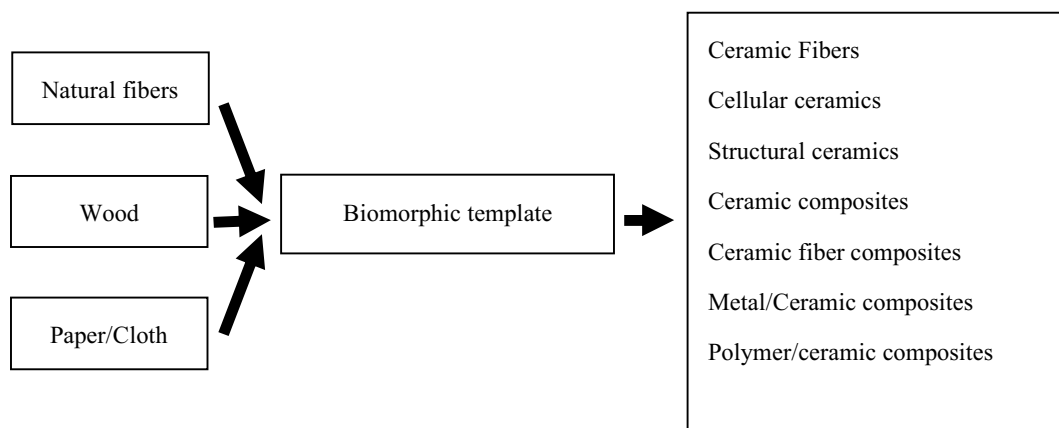
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminium Matrix Composites) เป็นวัสดุผสมที่มีอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลักและเสริมแรงด้วยเซรามิก ผลิตขึ้นมาเพื่อปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียม เช่น ความแข็ง ความเหนียว ความทนต่อการสึกหรอ การนำความร้อน มีการนำวัสดุผสม ไปใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นดิสก์เบรกเพื่อแทนเหล็กหล่อซึ่งช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงานและยืดเวลาใช้งานได้มาก หรือ ทำเป็นตัวระบายความร้อนในงานอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทดแทนทองแดงซึ่งช่วยลดน้ำหนัก และช่วยลดปัญหาการแตกหักของชิ้นงานอันเนื่องมาจากการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ในทางอุตสาหกรรมยังมีการประยุกต์ใช้งานน้อยโดยมีสาเหตุหลักมาจากต้นทุนของเซรามิกตัวเสริมแรงที่สูงมาก ซึ่งต้นทุนส่วนหนึ่งมาจากวัตถุดิบเซรามิกที่มีราคาแพง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้กระบวนการขึ้นรูปเซรามิกพอร์ซเลน นั้นยังเพิ่มต้นทุนอีกมากด้วย ฉะนั้นหากสามารถลดต้นทุนของวัสดุเสริมแรงได้ การใช้ประโยชน์ของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมก็จะมากขึ้น

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นได้สังเคราะห์วัสดุจากพืชซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน และมีโครงสร้างเป็นแบบ Anisotropic วัสดุจากธรรมชาติเหล่านี้สามารถนำมาผลิตวัสดุได้หลายประเภท และสามารถสังเคราะห์วัสดุธรรมชาติได้เป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกหรือ วัสดุผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดี เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และทนทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น วัสดุเซรามิกที่ได้จากการสังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ เรียกว่า วัสดุเซรามิกไบโอมอร์ฟิก (Biomorphic ceramic material) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากการศึกษางานวิจัยพบว่าได้มีการทดลองสังเคราะห์วัสดุเซรามิกไบโอมอร์ฟิก จากไม้หลายชนิด เช่น ไม้ไผ่ ไม้สน และ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวัสดุเซรามิกไบโอมอร์ฟิกที่สังเคราะห์จากไม้ธรรมชาติมีโครงสร้างรูพรุนแบบเซลล์ลูลาร์ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ทั้งในงานกรองน้ำ โลหะและอากาศที่อุณหภูมิสูง ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน หรือเป็นเซรามิก ตัวเสริมแรงในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



รูปที่ 1.1 การนำวัสดุจากธรรมชาติมาผลิตเป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกส์ และวัสดุผสม  
(ที่มา H.sieber, 2005)

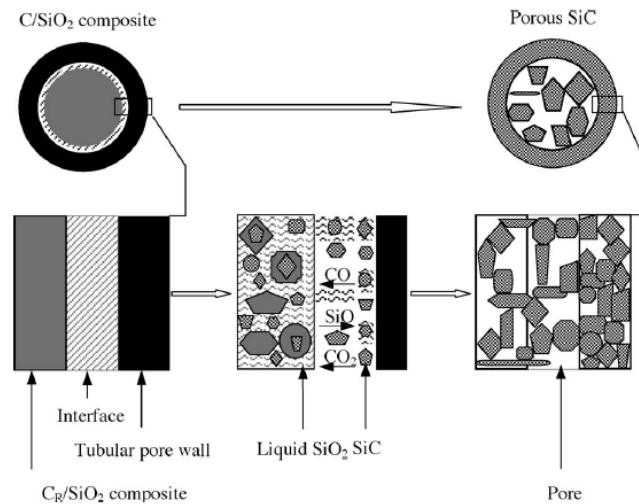
## 1.2 การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G.Qiao และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก Si/SiC ที่ผลิตจากไม้ โดยแบ่งไม้ที่ใช้ศึกษา 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สน ไม้บีช ไม้ไผ่ และไฟเบอร์บอร์ด (MDF:Medium density fiberboard) ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 °C ได้เป็นถ่านไม้ จากนั้นใช้ซิลิกอนเหลวแทรกซึมเข้าสู่รูพรุน และเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ในสุญญากาศ ใช้การวิเคราะห์แบบ XRD เพื่อดูส่วนประกอบพบว่า มีซิลิกอนคาร์ไบด์และไม่พบซิลิกอนหลงเหลืออยู่ หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าไม้บีชมีความแข็งแรงมากที่สุด สามารถรับแรงได้ 300 MPa ในส่วนไฟเบอร์บอร์ดมีความแข็งแรงน้อยที่สุดมีผลมาจากลักษณะของโครงสร้างภายใน

E. Vogli et al. (2002) ศึกษาการสังเคราะห์ SiC พรุณ จากการทำปฏิกิริยาของถ่านไม้พรุณโดยอาศัยการแทรกซึมของก๊าซซิลิกอน ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1600 °C ในเวลา 1-8 ชม. พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ทำให้สามารถเปลี่ยน C เป็น SiC ได้ 92% เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง สามารถเปลี่ยนเป็น SiC 94%

Jun-min Qian และคณะ (2004) ได้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ SiC พรุณจากไม้ธรรมชาติ เริ่มต้นด้วยการนำไม้ธรรมชาติมาทำการเผาในกระบวนการคาร์โบไนเซชันในสุญญากาศเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้เป็นแท่งถ่าน หลังจากนั้นเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในกระบวนการโซล-เจล โดยใช้สารละลาย TEOS (Tetraethoxysilane) : ethanol : H<sub>2</sub>O : HCl ผสมรวมกันเป็นสารละลายเพื่อใช้ในการอัดสารละลายเข้าสู่รูพรุน โดยใช้เครื่องอัดสุญญากาศเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ผู้ทำการวิจัยได้ศึกษาจำนวนครั้งในกระบวนการโซล-เจลที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากจำนวนครั้งในกระบวนการนี้ หลังจากนั้นเข้าสู่เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายที่อยู่ภายในรูพรุนมีสถานะเป็นของแข็ง และทำการอบอีกครั้งที่ อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายที่หลงเหลือจากการกระบวนการโซล-เจล ซึ่งในขณะนี้ชิ้นงานจะเป็นวัสดุผสม C/SiO<sub>2</sub> เข้าสู่กระบวนการคาร์โบเทอร์มอล

รีดักชัน โดยทำการเผาเซ็ที่อุณหภูมิ 1600 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงหลังจากผ่านกระบวนการนี้ ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเป็น SiC แสดงดังรูปที่ 1.2 จะได้ชิ้นงาน SiC จากไม้

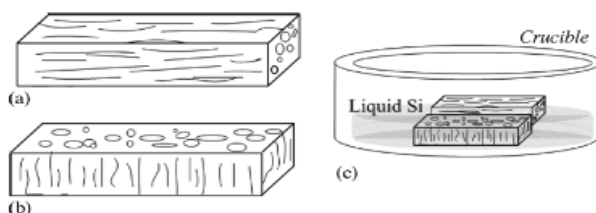


รูปที่ 1.2 การสังเคราะห์ของ C/SiO<sub>2</sub> เป็น Porous SiC  
(ที่มา: Jun-min Qian, 2005)

ผลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้วิธี SEM (scanning electron microscopy), XRD (X-ray diffraction), FTIR (fourier transform infrared spectroscopy) และ TGA (thermogravimetric analysis) และ DSC (differential scanning calorimetry) ผลที่จากการทดลองพบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่ในรูปผลึกมี  $\beta$ -SiC และมีปริมาณของ  $\alpha$ -SiC น้อยและไม่พบความแตกต่างของจำนวนครั้งที่แตกต่างกันในกระบวนการโซล-เจลโครงสร้างของ SiC เผยให้ปฏิกิริยาแบบ ของแข็ง-ของแข็ง ก๊าซ-ของแข็ง ก๊าซ-ก๊าซ ปรากฏขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากถ่านไม้เป็น SiC

G.Hou และคณะ (2007) ได้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ไบโอซิลิกอนคาร์ไบด์จากกระบวนการแทรกซึมของซิลิกอนเหลวซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ โดยการสังเคราะห์ไบโอซิลิกอนคาร์ไบด์ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น การเผาเซ็ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและขนาดของรูพรุนของไบโอโอมอร์ฟิกเซรามิก ในการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอโอมอร์ฟิกซิลิกอนคาร์ไบด์ได้กำหนดชิ้นงาน 2 แบบได้แก่ ชิ้นงานในแนวรัศมีและชิ้นงานในแนวแกน ดังรูปที่ 1.3 โดยสามารถเตรียมได้จากกระบวนการแทรกซึมของซิลิกอนเหลวเข้าสู่ถ่านไม้ปีที่อุณหภูมิ 1550 °C และที่อุณหภูมิ 1700 °C โดยทั้ง 2 อุณหภูมิได้กำหนดเวลาในการเผาเซ็ที่แตกต่างกัน





รูปที่ 1.3 แสดงชิ้นงานทิศทางโครงสร้าง 2 แบบ

(a) ชิ้นงานในแนวแกน (b) ชิ้นงานในแนวรัศมี

(ที่มา: G.Hou, 2006)

ผลที่ได้พบว่าบริเวณพื้นผิวในรูปทรงมีลักษณะหยาบเพราะปฏิกิริยาการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์ภายในรูปทรงและความแข็งแรงต่อแรงดัดและความแข็งแรงต่อการแตกมีค่ามากขึ้น สัมพันธ์กับเวลาในการเผาแช่ที่นานขึ้น และเมื่อทดลองลดปริมาณของซิลิกอนลงและเผาที่อุณหภูมิ 1550 °C และที่อุณหภูมิ 1700 °C ได้กำหนดเวลาในการเผาแช่ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่า เมื่อเปลี่ยนเวลาการเผาแช่จาก 20 นาที เป็น 60 นาที พบว่าค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงบิดของชิ้นงาน ในแนวแกนและชิ้นงานในแนวรัศมีมีค่าลดลง 41.3% และ 54.4% และค่าความความแข็งแรงต่อการแตกมีค่าลดลง 45.9% ในชิ้นงานแนวแกนและ 49.7% ในชิ้นงานแนวรัศมี ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงกล คือรูปร่างซิลิกอนคาร์ไบด์และปริมาณซิลิกอน ซึ่งมีผลต่อขนาดของรูปทรงความหนาแน่นของชิ้นงานแนวแกนและแนวรัศมีและทิศทางการแทรกซึม

M. Fujisawa และคณะ (2004) ได้ผลิตวัสดุผสม SiC/C จากการผสมผงถ่านไม้และ SiO<sub>2</sub> และอบผนึก ในช่วงอุณหภูมิ 1400-1800 °C ใช้ความเข้มข้นของ SiO<sub>2</sub> ต่างกันตามน้ำหนักของถ่านไม้ พบว่าเกิดชั้นของ β-SiC ที่ผิวถ่านไม้เมื่อตรวจสอบด้วย SEM และ EDX ความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณ SiC และพบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณ SiO<sub>2</sub> ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือได้วัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำและนำความร้อนสูง

J.W.Kim และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากชิ้นงานไม้ที่มีรูปทรงโดยทำปฏิกิริยาไอ-ของแข็ง ที่อุณหภูมิ 1450 °C ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน/ไฮโดรเจน (Ar/H<sub>2</sub> = 80/20) จากนั้นทำการสังเคราะห์ไม้เพื่อให้เป็นแท่งถ่านโดยใช้การสังเคราะห์ 2 ขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 500 และ 1000 °C สังเคราะห์จากถ่านเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์โดยใช้ก๊าซซิลิกอนแทรกซึมเข้าสู่พื้นผิวของถ่าน ซึ่งการแทรกซึมของก๊าซซิลิกอนจะเกิดรอบรูปทรงของชิ้นงานเป็นลักษณะเคลือบผิวเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 1.4 จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เพื่อให้ก๊าซซิลิกอนทำปฏิกิริยากลายเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 1.4 ลักษณะภายในรูพรุนของไม้ธรรมชาติหลังจากทำการสังเคราะห์  
(ที่มา J.W. Kim และคณะ, 2006)

Y. Sahin (2005) ได้ศึกษาวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์/กับอะลูมิเนียม มีปริมาณของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งในการทดลองได้วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบความสึกหรอแบบจานขัด (pin-on-disc) ผลที่ได้จากการทดสอบคือน้ำหนักที่สูญเสียจากการสึกหรอ เพื่อใช้วิเคราะห์ทางสถิติโดยกำหนดปัจจัยในการทดสอบดังนี้ 1) ขนาดของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ 10 $\mu\text{m}$  และ 50  $\mu\text{m}$  2) น้ำหนักที่ใช้ในการกด 5 N และ 10 N 3) ผิวขัดขนาด 100  $\mu\text{m}$  (120 mesh) และ 50  $\mu\text{m}$  (220 mesh) 4) ระยะทางในการทดสอบ 18 เมตร และ 36 เมตร ผลที่ได้จากการทดสอบปัจจัยหลักที่มีผลต่อชิ้นงาน คือ ผิวขัด ลำดับต่อมาคือขนาดของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ระยะทางในการทดสอบ ปัจจัยสุดท้ายคือน้ำหนักที่ใช้ในการกด

S.M. Seyed Reihani (2006) ได้ศึกษาวัสดุผสมอะลูมิเนียม 6061 กับผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดอนุภาค 16 และ 22  $\mu\text{m}$  โดยมีปริมาณ 30% ของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำการเสริมแรงโดยการหล่ออัด (squeeze casting) กระบวนการทดลองเริ่มด้วยการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์และกระบวนการหล่ออะลูมิเนียม 6061 โดยกำหนดระยะเวลาในการเผาแช่ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และการสึกหรอ ของวัสดุผสมผลที่ได้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เหลือช่องว่างรูพรุนเนื่องจากการหล่ออัด ชิ้นวัสดุผสมมีความแข็งแรงสูงและความสึกหรอต่ำมีสมบัติดีกว่าอะลูมิเนียม 6061 ที่ไม่เสริมแรง อย่างไรก็ตามทดสอบสมบัติการัดของวัสดุผสมมีค่าลดลงซึ่งมีผลจากการเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ จากนั้นทดลองระยะเวลาเผาแช่ ของอะลูมิเนียมมีอิทธิพลต่อวัสดุเสริมแรง เช่นวัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมีความแข็งแรงกว่าวัสดุผสมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการชุบแข็ง การแตกร้าวของพื้นผิววัสดุไม่เสริมแรงและวัสดุผสมแสดงเป็นลักษณะรอยบวมบริเวณพื้นผิวโดยมีความลึกของรอยบวมที่แตกต่างกัน

W. Tianchi และคณะ (2007) ได้ศึกษาวัสดุผสม 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุผสม C-AI และวัสดุผสม SiC/C-AI ในการสังเคราะห์ C-AI โดยใช้แท่งคาร์บอนที่มีลักษณะพรุน จากนั้นนำอะลูมิเนียมเหลวฉีดเข้าสู่รูพรุนจะได้เป็นชิ้นงานวัสดุผสม C-AI สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผสม SiC/C-AI หลังจากได้แท่งคาร์บอนที่มีลักษณะพรุนนำซิลิกอนเรซินที่เตรียมเสร็จแล้วอัดเข้าสู่แท่งคาร์บอนด้วยแรงดันสุญญากาศในอุณหภูมิ 1400 °C หลังจากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการหล่อแบบฉีด โดยใช้อะลูมิเนียมเหลวแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของถ่านไม้ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์ คือวัสดุผสม SiC/C-AI จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การนำความร้อน และการขยายตัวทางความร้อน ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติ วัสดุผสมมีการนำความร้อนได้ดีกว่าอะลูมิเนียม และมีการนำความร้อนได้ดีกว่าแท่งคาร์บอนพรุน

ฤตวรรณ (2551) ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอเมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ SiC จากถ่านไม้ธรรมชาติ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาไม้สองชนิดคือไม้ยางพาราและไม้สะเดาซึ่ง ไม้ทั้งสองชนิดนี้ของประเทศไทย โดยโครงการวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนด้วยกัน ส่วนแรกทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านไม้พรุน จากการศึกษาพบว่าสามารถสังเคราะห์ถ่านไม้พรุน ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 °C ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนเมื่อใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า จะทำให้ได้โครงสร้างถ่านไม้พรุนที่คงรูปเดิมและไม่เกิดรอยแตก และสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านไม้พรุนคืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C min<sup>-1</sup> จากอุณหภูมิ 25-70 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 °C min<sup>-1</sup> จนถึงอุณหภูมิ 500 °C และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C min<sup>-1</sup> จนถึงอุณหภูมิ 800 °C หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้องในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน อีกทั้งยังพบว่ารูปแบบการแตกหักของไม้ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งไม้สะเดาซึ่ง มีการปริแตกตามแนวเซลล์ลูลอสเนื่องมาจากลักษณะเซลล์ภายในของไม้สะเดาซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกัน ทำให้ความตึงเครียดภายในระหว่างพื้นผิวภายนอกและภายในแตกต่างกันเล็กน้อย จึงทำให้การปริแตกไม่รุนแรงแต่ในไม้ยางพารามีการแตกหักแบบผ่าตามแนวเซลล์ เนื่องจากความเครียดภายในและภายนอกมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้เกิดการปริแตกรุนแรงกว่าไม้สะเดาซึ่งในส่วนที่สองทำการศึกษาระยะเวลาและจำนวนครั้งในการเคลือบของสารละลายซิลของ SiO<sub>2</sub> พบว่าปริมาณของ SiO<sub>2</sub> ที่แทรกซึมภายใน โครงสร้างถ่านไม้พรุนแปรผันตรงกับระยะเวลาการเคลือบของสารละลายซิลของ SiO<sub>2</sub> ในส่วนของการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนครั้งการเคลือบ พบว่าถ่านไม้ยางพารามีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแปรผันตามจำนวนรอบของการเคลือบและในถ่านไม้สะเดาซึ่งพบว่า น้ำหนักของผิวเคลือบมีอัตราเพิ่มขึ้นจนถึงการเคลือบครั้งที่ 4 และในการเคลือบครั้งที่ 5 และ 6 น้ำหนักของผิวเคลือบลดลง และในส่วนที่สามทำการศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไบโอเมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในกระบวนการไพโรไลซิสจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอเมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ คืออุณหภูมิ 1600 °C ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปตามการคำนวณทางอุณหศาสตร์ ซึ่งในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 1600 °C ระยะเวลาการบ่มเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโครงสร้างของ  $\alpha$ -SiC และ  $\beta$ -SiC พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยน โครงสร้างของ  $\beta$ -SiC เป็น  $\alpha$ -SiC

จากงานวิจัยที่ได้ทบทวนข้างต้น จะเห็นได้ว่าได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ธรรมชาติ ซึ่งในขั้นตอนในการสังเคราะห์ในแต่ละงานวิจัยมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน กรรมวิธีสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์มีหลายวิธีด้วยกันเช่น กระบวนการโซล-เจล กระบวนการสังเคราะห์ด้วยก๊าซ Si กระบวนการสังเคราะห์ด้วย chemical vapor กระบวนการสังเคราะห์ด้วย  $\text{SiO}_2$  และ organosilicon ที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาทำให้ทราบว่ากระบวนการโซล-เจลเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน จากขั้นตอนในการสังเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนของค่าใช้จ่ายพบว่าในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น และการหล่ออะลูมิเนียมเพื่อใช้ในการเสริมแรง พบว่าสามารถใช้กระบวนการหล่ออัดทำให้อะลูมิเนียมเหลวแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของชิ้นงานได้ จากศึกษาพบว่าปัจจัยทิศทางของโครงสร้างชิ้นงานที่แตกต่างกันและระยะเวลาในการเผาแห้ง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล การนำความร้อน และการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ผลที่ได้การผลิตวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียมโดยวิธีการหล่ออัดสามารถปรับปรุงค่าความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอ จากไม้ยางพาราเป็นวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียม มีค่าความแข็งมากขึ้นและมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้นจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียม มีค่าใกล้เคียงค่าความแข็งของอะลูมิเนียม ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์เพื่อใช้กับงานเชิงวิศวกรรมต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ธรรมชาติ โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจลเพื่อให้ได้เป็นวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนหลังจากนั้นทำการหล่อโดยการหล่ออัด เพื่อให้ได้เป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า การนำความร้อน และเชิงกล และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับวัสดุเชิงพาณิชย์ เพื่อสามารถที่จะประยุกต์กับการใช้งานจริง อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยที่ผลต่อชิ้นงานทั้งปัจจัยด้านทิศทางโครงสร้างและระยะเวลาการเผาแห้งส่งผลต่อวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียมเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนจากไม้ยางพารา
- 1.3.2 เพื่อผลิต วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนที่สังเคราะห์จากไม้ยางพารา
- 1.3.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า และทางความร้อนของ ซิลิกอนคาร์ไบด์พรุน และวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พรุน

### 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้คือ ทำการศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางไฟฟ้า และทางความร้อนของซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ที่

สังเคราะห์จากไม้ยางพารา และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับซิลิกอนคาร์ไบด์พูนกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยวิธีอื่นๆ ที่มีการศึกษาและมีรายงานไว้ในบทความทางวิชาการทั่วไป

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับไม้ยางพารา ลดการนำเข้าวัสดุคาร์ไบด์จากต่างประเทศ
- 1.5.2 สร้างองค์ความรู้ใหม่ในการสังเคราะห์ SiC จากไม้ยางพารา ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุอื่นในอนาคต
- 1.5.3 ทราบถึงคุณสมบัติในด้านต่างๆเกี่ยวกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ยางพารา เพื่อการพัฒนาและการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ของวัสดุผสมนี้
- 1.5.4 สร้างฐานข้อมูลของวัสดุวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย ซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ยางพาราที่จะมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรม ในการนำไปใช้งานจริง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 2.1 ไม้ยางพารา

วัสดุเริ่มต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ในการทดลองนี้ ไม้ยางพารา (Pará rubber wood หรือ นิยมใช้ว่า rubberwood หรือ parawood) หรือบางครั้งเรียกอย่างย่อว่า ไม้ยาง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ที่นิยมนำมาใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ไม้คุณภาพสูง เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของไม้ยางที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ เช่น ความหนาแน่นของเนื้อไม้ สีสนที่สวยงาม การหดตัวน้อย และสามารถตกแต่งผิวได้ง่าย นอกจากนี้ไม้ยางพารายังได้ชื่อว่าเป็นไม้ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม้ยางพารานั้น ได้มีการนำส่วนต่างๆ ของต้นยางมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนประกอบทั้งหมดสามารถนำมาใช้ได้ทุกส่วน ตั้งแต่ยางของต้นไม้จนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่ตัดไม้ออกมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์

(ที่มา: [http://www.qcparawood.com/knowledge/rubber\\_wood](http://www.qcparawood.com/knowledge/rubber_wood), สืบค้นวันที่ 10 ต.ค.2552)

#### สมบัติของไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราไม่จัดเป็นไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้และสำนักงานมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม เนื้อไม้ มีสีขาวนวล ส่วนที่เป็นกระพี้ และแก่น ไม้แตกต่างกัน เนื้อไม้ค่อนข้างละเอียด เสี้ยนสนเล็กน้อยมาก ไม้ยางพาราไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นไม้ในการก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขนาดไม้ยางพาราที่จะนำมาเป็นไม้แปรรูปเป็นขนาดไม้ก่อสร้างหายาก การบิดงอและไม่คงทน เป็นสาเหตุสำคัญแต่ก็ใช้ทำเป็นไม้แบบคอนกรีตดีพอสมควร ใช้ทำลึงใส่ของดีมาก และมีแรงยึดตะปูสูง ซึ่งสมบัติเชิงกลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของไม้ยางพารา

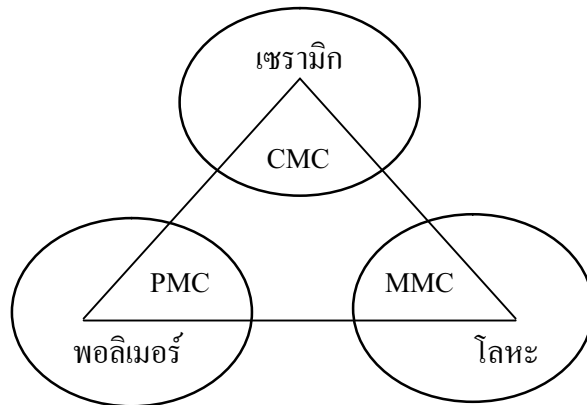
Moisture content (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	หน่วย (Kg/ cm <sup>2</sup> )			Stiffness (x 100 Kg/cm <sup>2</sup> )	Impact bending (Kg/ cm <sup>2</sup> )	Hardness (Kg.)
		Bending	Compession	Shear			
12	0.70	973	478	162	960	2.86	538

## คำอธิบายความหมายตารางที่ 2.1

1. ความสามารถทนรับแรงกระทำจากภายใน (Stiffness) หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ที่ได้จากการดัด (Static bending)
2. Compression parallel to grain หมายถึง ค่าแรงบีบ
3. Static bending หมายถึง ค่างานทั้งหมด ที่ใช้ทำให้ไม้เสียรูป จนถึงน้ำหนักที่กำหนด
4. Shear along grain หมายถึง ค่าแรงเฉื่อยสูงสุดตามแนวสัมผัส (Tangential) และแนวรัศมี (Radial)
5. Impact bending หมายถึง ค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้ไม้หัก
6. Hardness หมายถึง ค่าน้ำหนัก (หน่วย: กิโลกรัม) หรือแรงที่ต้องใช้ในการกดลูกปืนให้จมลงไปในไม้ในระดับที่กำหนด ค่าที่ให้ไว้เป็นค่าเฉลี่ยของความแข็งบนด้านรัศมี และด้านสัมผัส

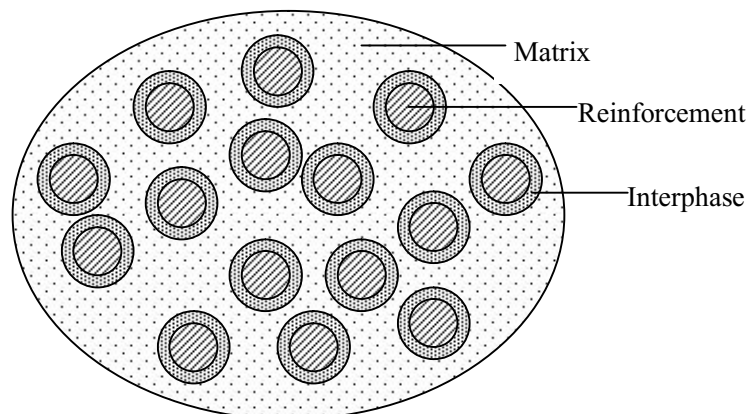
## 2.2 วัสดุผสม (Composite materials)

วัสดุผสมเป็นของแข็งเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยวัสดุ ตั้งแต่ 2 ชนิด หรือมากกว่าในระดับมหภาค วัสดุผสมจะถูกออกแบบเพื่อให้มีสมบัติที่ดีที่สุดหรือคุณภาพที่ดีที่สุด การผสมวัสดุสองชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิด อาจผสมทางกายภาพ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีเนื้อเดียว สมบัติวัสดุผสมประกอบด้วยสมบัติ ลักษณะของโครงสร้างและการกระจายตัวของเฟส เพื่อให้มีสมบัติใหม่ที่แตกต่างกับสมบัติของสารแต่ละสาร ส่วนผสมหลักในวัสดุผสมจะไม่สูญเสียสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ไป จุดประสงค์ของการผลิตวัสดุผสมขึ้นมาด้วยเหตุผลต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรง หรือเพิ่มการรักษารูปทรง เพิ่มความหนาแน่น ทนอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลดการซึมซับของก๊าซ และของเหลวปรับสมบัติทางไฟฟ้า (เช่น เพิ่มความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น) ลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ลดน้ำหนัก และลดการสึกหรอ วัสดุวิศวกรรมได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ โลหะ พอลิเมอร์ (พลาสติก) และเซรามิก วัสดุแต่ละประเภทมีสมบัติเด่นที่แตกต่างกัน จากความต้องการเทคโนโลยีใหม่ ช่วยผลักดันทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาวัสดุใหม่ดังรูปที่ 2.1 วัสดุวิศวกรรม ทั้ง 3 ประเภท เมื่อเป็นวัสดุผสมมีชื่อเรียกตามวัสดุหลัก เช่น วัสดุหลักเป็นเซรามิก วัสดุผสมเนื้อเซรามิก คือ CMC (ceramic matrix material) วัสดุหลักเป็นเนื้อโลหะ วัสดุผสมเนื้อโลหะ คือ MMC (metal matrix composite) และ วัสดุหลักเป็นเนื้อพอลิเมอร์ วัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ คือ PMC (polymer matrix composite)



รูปที่ 2.1 วัสดุผสมซึ่งผลิตมาจากวัสดุหลักทั้งสามกลุ่ม  
(ที่มา: เล็ก สีคง, 2543)

วัสดุผสมมีเนื้อหัดล้อมรอบวัสดุเสริมแรง (reinforcing materials) พื้นที่ระหว่างเนื้อหัดและวัสดุเสริมแรงซึ่งเป็นพื้นที่ที่ เฟส 2 เฟส กระทบต่อกันด้วยผลทางเคมีหรือผลจากกระบวนการผลิตเรียกว่า อินเตอร์เฟส (interphase) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เฟสของวัสดุผสม  
(ที่มา: Isaac M.Daniel, 2006)

วัสดุผสมแบ่งโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ๆได้ 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ

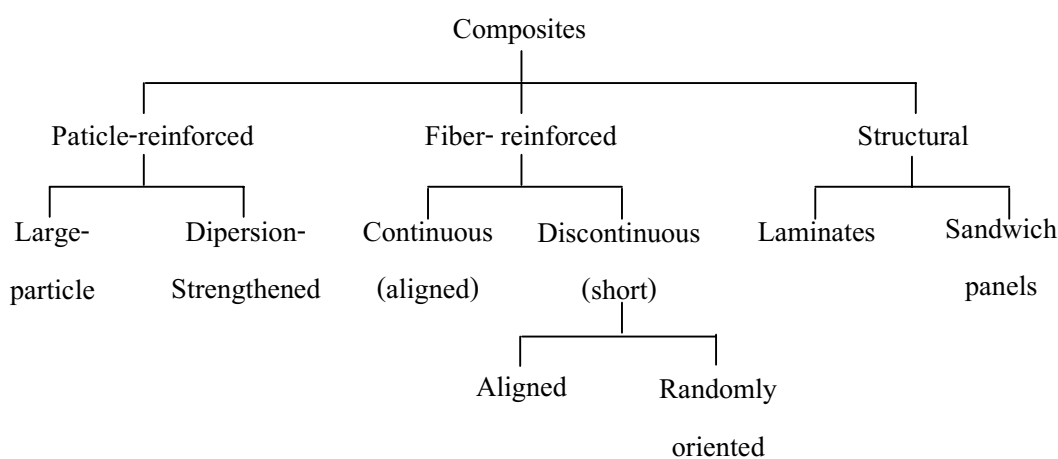
**Fiber - reinforced composites** คือ วัสดุผสมด้วยเส้นใยเสริมแรงเชื่อมอยู่กับเนื้อหัด เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาว เส้นใยเสริมแรงนี้จะมี ความแข็งแรง ความแข็งแกร่งสูงเมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงในแนวตามความยาว โดยทั่วไปแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีขนาดเล็กลงก็จะ



ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งของเส้นใยในวัสดุผสมน้อยลง ทำให้วัสดุมีเสถียรภาพ และความแข็งแรงมากขึ้นด้วย โดยที่เส้นใยเสริมแรงจะกระจายตัวทั่วไปในสารพื้นแบบเรียงสุ่ม

**Structural Composites** ประกอบด้วยเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรง และซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ สลับกันไป วัสดุผสมในกลุ่มนี้รวมถึงวัสดุผสมแบบแซนวิชและแบบรวงผึ้ง

**Particulate - reinforced** ประกอบอนุภาคเล็กกระจายอยู่ทั่วไปในสารพื้น ซึ่งรูปแบบของอนุภาคเล็กๆ นี้จะมีลักษณะเป็นเกล็ดหรือสะเก็ดที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป สมบัติจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคและเนื้อหลัก ขนาด รูปร่าง และระยะระหว่างอนุภาค



รูปที่ 2.3 ลักษณะของโครงสร้างวัสดุผสม  
(ที่มา: Isaac M.Daniel, 2006)

### 2.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม มีสมบัติที่ดี เช่น การนำความร้อน ความแข็งแรง ทนต่อการผุกร่อน น้ำหนักเบา อะลูมิเนียมเป็น โลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเง ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ ถ้าทำเป็น โลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้า และทองแดงอ่อน สามารถตัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อน อะลูมิเนียมเป็น โลหะที่ตัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็น อันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี ด้วยสมบัติที่ดีของอะลูมิเนียมจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการนำอะลูมิเนียมมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงของวัสดุเป็นจำนวนมาก

อะลูมิเนียม A356 จัดเป็นอะลูมิเนียมหล่อผสม มีส่วนผสมระหว่างอะลูมิเนียม -ซิลิกอน-แมกนีเซียม ซึ่งประกอบด้วย ส่วนผสม 6.86% ของซิลิกอน 0.38% ของแมกนีเซียม โดยซิลิกอนจะมีคุณสมบัติทางด้านการหล่อและแมกนีเซียมจะทำให้ลูมิเนียมชนิดนี้มีสมบัติทางความร้อนที่ดี สามารถชุบแข็งได้โดยผสมแมกนีเซียมในลักษณะแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) เหมาะกับงานหล่อ ทั้งแบบหล่อ

ทรายและแบบหล่อถาวร งานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน ประณีต เป็นตัวเชื่อมประสานที่ดีและ มีความแข็งแรงสูง เนื้อแน่นทนแรงอัดได้ดี สมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ อะลูมิเนียม

(<http://th.wikipedia.org/wiki> สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม พ.ศ.2552)

สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น	2.70 g./cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	933.47 K (660.32 °C)
จุดเดือด	2792 K (2519 °C)
ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) 26.50 n·Ωm
การนำความร้อน	237 W/(m·K)
อัตราส่วนปัวซอง	0.35
ความแข็งแรงกอร์ส	167 MPa

## 2.4 ซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ใช่สารที่เกิดขึ้นเองจากธรรมชาติแต่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้น โดยปกติแล้วซิลิกอนคาร์ไบด์เมื่อแบ่งตามโครงสร้างจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ อัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ ( $\alpha$ -SiC) เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูปผลึกเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งเกิดเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิมากกว่า 2100 °C และเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ ( $\beta$ -SiC) เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูปผลึกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Cubic) เกิดเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1500-1900 °C อัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงกว่าเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์จึงผลต่อสมบัติทางด้านความแข็งและทนทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่าเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์

### 2.4.1 การเตรียมเบตา ซิลิกอนคาร์ไบด์ มีการเตรียมได้ 5 วิธีดังนี้

1. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่าง ซิลิกอน กับ คาร์บอน ดังปฏิกิริยาสมการที่ 2.1



การเตรียมโดยวิธีนี้จะมีการให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่อุณหภูมิ 1000 – 1400 °C ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์มีลักษณะเป็นก้อนหยาบๆมองดูมีลักษณะคล้ายมีโลหะซิลิกอนเหลืออยู่

2. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาในบรรยากาศเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ระหว่างซิลิก้ากับคาร์บอน (Carbothermal Reduction of Silica) ดังปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 2.2



การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิกาและคาร์บอนที่มีราคาไม่แพงมากนัก เป็นสารตั้งต้นในการเตรียม โดยปกติแล้วซิลิกาที่ใช้ จะเป็นทราย หรือ หินเขี้ยวหุนมาน และคาร์บอนที่ใช้ จะเป็น เขม่าดำ (Carbon Black) ปิโตรเลียมโค้ก (Petroleum Coke) หรือผงแกรไฟต์ (Graphite Powder) โดยที่ซิลิกาและคาร์บอนจะเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1050 °C และจะเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 1500 °C เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1500 - 1900 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสมบูรณ์ ทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง และซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้ จะอยู่ในรูปของเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์

3. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาในสภาวะไอ (Vapor Phase Reaction หรือ Chemical Vapor Deposition; CVD) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon Tetrachloride;  $\text{SiCl}_4$ ) ที่อยู่ในสภาวะไอ ทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน ดังปฏิกิริยาสมการที่ 2.3



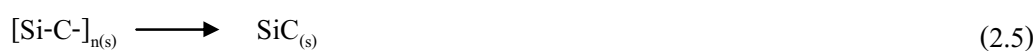
หรือเตรียมได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลซิลิกอนไตรคลอไรด์ (Methyl Silicon Trichloride) ดังปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.4



การเตรียมโดยวิธีนี้ ถ้าสารตั้งต้นในการเตรียมมีความบริสุทธิ์สูง จะทำให้ผง SiC มีความบริสุทธิ์สูงด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ผง SiC ที่ได้ อาจมีการยึดติดกันเป็นก้อน ทำให้มีการดูดซับเอาคลอรีน หรือกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) เอาไว้ได้ ดังนั้นจึงต้องนำเอาผง SiC ที่ได้ไปเผาเพื่อไล่คลอรีนออกก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป

4. การเตรียมโดยวิธีการระเหยเป็นไอ (Gas Evaporation) การเตรียมโดยวิธีนี้ จะได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอของซิลิกอน กับไอของคาร์บอน ทำให้ได้  $\beta$ -SiC ที่มีขนาดละเอียดมาก คือมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

5. เตรียมได้จากการสลายตัวของโพลิเมอร์โดยใช้ความร้อน (Thermal decomposition of Organosilinic Polymers) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (Non – Oxidizing) ทำให้ได้ผง  $\beta$ -SiC ดังปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.5



#### 2.4.2 การเตรียมอัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์

วิธีการเตรียม  $\alpha$ -SiC เตรียมได้ต่อจากปฏิกิริยาการเตรียม  $\beta$ -SiC โดยวิธีการทำปฏิกิริยาในบรรยากาศเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ระหว่างซิลิกา กับ คาร์บอน (วิธีที่2) ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$\beta$ -SiC จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดที่อุณหภูมิ 1500 - 1900 °C เมื่อถึงอุณหภูมิ 2100 °C  $\beta$ -SiC ที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็น  $\alpha$ -SiC จนกระทั่งอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นถึง 2400 °C การเปลี่ยนจาก  $\beta$ -SiC ไปเป็น  $\alpha$  SiC จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่ง  $\alpha$ -SiC นี้จะทนต่อการขัดสีได้ดีกว่า  $\beta$ -SiC (ฤตวรรณ, 2551)

#### 2.5 กระบวนการคาร์โบไนเซชัน (Carbonisation)

กระบวนการในการผลิตถ่าน โดยการเผาถ่านหินหรือไม้ภายใต้สภาวะขาดออกซิเจน ซึ่งทำให้สารระเหยถูกขับออกไปในรูปของก๊าซ ทาร์และน้ำมัน สิ่งที่เหลืออยู่ จะเป็นสารประกอบคาร์บอนคงที่และเถ้าที่หลอมละลายเป็นมวลเดียวกัน เรียกว่า ถ่าน โดยแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 2.3

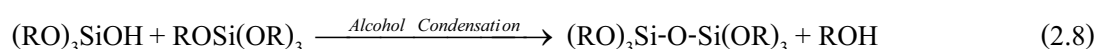
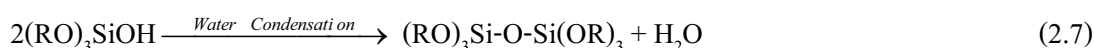
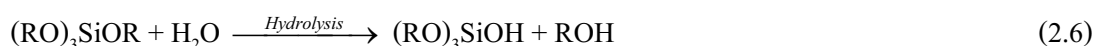
ตารางที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเซลภายในเนื้อไม้ ในกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (ที่มา: C.E. Byrne and D.C. Nagle, 1997)

ช่วงอุณหภูมิ	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
25-150 °C	กระบวนการคายน้ำ
200-260 °C	การแตกตัวของเฮมิเซลลูโลส
240-350 °C	การแตกตัวของเซลลูโลส
280-350 °C	การแตกตัวของลิกนิน
400-800 °C	ปฏิกิริยาของสารระเหย (Aromatic reaction) เกิดการดึงเอาคาร์บอนมาใช้ในปฏิกิริยา เกิดเป็นวาแคนซีในโครงสร้าง
มากกว่า 800 °C	ปฏิกิริยาทุกอย่างแทบหมดสิ้นเหลือไว้แต่ถ่านไม้

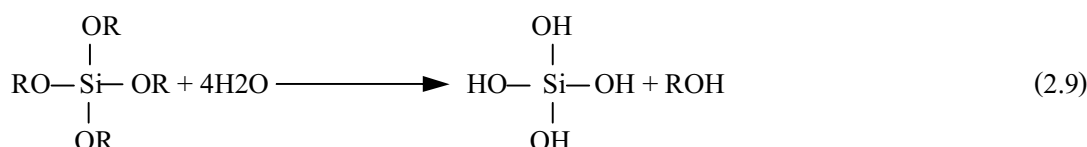
## 2.6 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Processing)

กระบวนการผลิตโดยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1  $\mu\text{m}$  เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล”

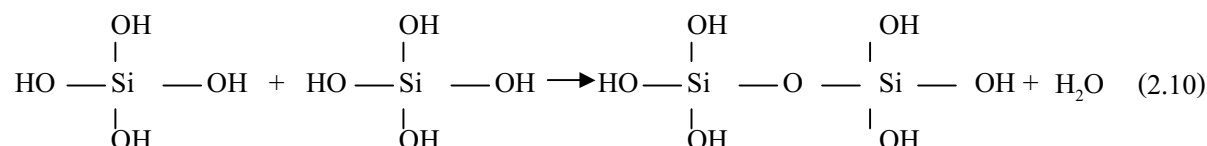
ปฏิกิริยา Hydrolysis ปฏิกิริยา Water Condensation ปฏิกิริยา Alcohol condensation ซึ่งแสดงรายละเอียดปฏิกิริยาในสมการที่ 2.6 ถึง 2.8 ตามลำดับ มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วน โมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสถานะที่ต่างกัน ทำให้โซล-เจลได้สมบัติที่ดีและโครงสร้างต่างกัน



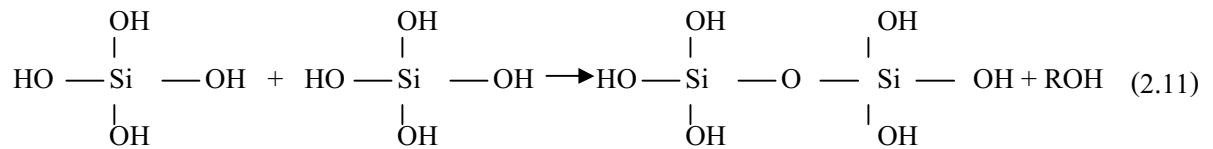
OR แทนหมู่ Alkoxyl group เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ขั้นตอนแรกของการทำโซล-เจล คือ การผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal Alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วน Alkoxide ชนิดอื่น เช่น Aluminate, Titanate และ Borate มีใช้กันอย่างแพร่หลายโดยมักจะใช้ร่วมกับ TEOS เช่น  $\text{Si}(\text{OR})_4$  ซึ่ง R คือ  $\text{CH}_3$ (TMOS),  $\text{C}_2\text{H}_5$ (TEOS) หรือ  $\text{C}_3\text{H}_7$  จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังสมการที่ 2.9



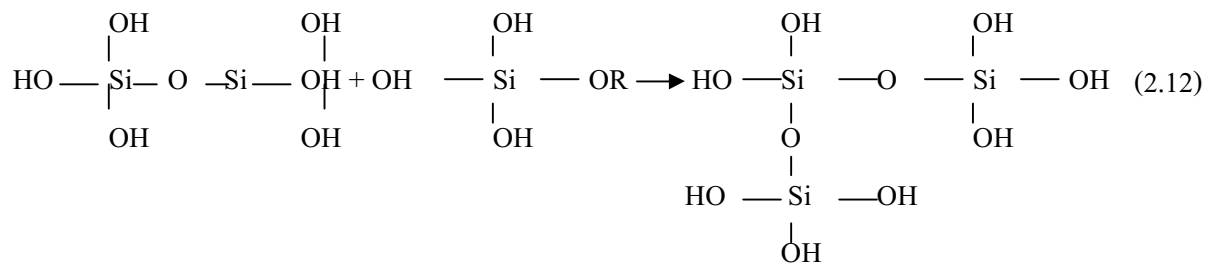
และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Water Condensation Reaction) ดังสมการที่ 2.10



หรือ Alcohol Condensation Reaction ดังสมการที่ 2.11



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาcondensationต่อไปจนกลายเป็น Silica Network อยู่ในสถานะที่เรียกว่า Gel จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าว ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Poly Condensation) ดังสมการที่ 2.12



การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พงฉะเย็ดฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ซีลิกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจล จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น ภายหลังจากที่ถ่านพูนได้ผ่านกระบวนการโซล-เจล ของสารละลายซิลของ  $\text{SiO}_2$  ทำให้ถ่านพูนมี  $\text{SiO}_2$  เคลือบอยู่ (เป็นวัสดุผสม C-SiO<sub>2</sub>) แล้วจึงนำไปเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน ซึ่งวัสดุผสม C-SiO<sub>2</sub> จะเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันขึ้น ทำให้ได้ผลปฏิกิริยาเป็นของแข็ง SiC และก๊าซ CO ดังแสดงปฏิกิริยารวมในสมการที่ (2.2)

(ฤตววรรณ, 2551)

## 2.7 ปฏิริยาการโบเทอรัมอลรีดักชัน

ปฏิริยาการโบเทอรัมอลรีดักชัน คือการเผาที่อุณหภูมิสูงและใช้คาร์บอนเป็นตัวทำปฏิริยา โดยปฏิริยานี้แบ่งออกเป็น 3 ปฏิริยา ได้แก่ ปฏิริยาระหว่างของแข็ง-ของแข็งปฏิริยาระหว่างของแข็ง-ของเหลว ปฏิริยาระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ซึ่งการเกิดปฏิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากขึ้น ปฏิริยาการโบเทอรัมอลรีดักชันจะถูกศึกษาในบรรยากาศของอาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) เพื่อป้องกันคาร์บอนทำปฏิริยากับออกซิเจนในอากาศ

ปฏิริยาเริ่มต้นกับคาร์บอนซึ่งผ่านการเคลือบผิวด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ในกระบวนการโซล-เจล ซึ่งอยู่ในลักษณะการทำปฏิริยาระหว่างของแข็ง-ของแข็ง หรือ ปฏิริยาระหว่างของเหลว-ของแข็ง ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.13 ถึงสมการที่ 2.16 ผลที่ได้จากปฏิริยาการโบเทอรัมอลรีดักชันคือไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์



ปฏิริยาในสมการที่ 2.13 แสดงให้เห็นการทำปฏิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์และคาร์บอน ผลที่ได้เป็นไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในสมการที่ 2.13 แบ่งการเกิดปฏิริยาได้ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เริ่มต้นด้วยการทำปฏิริยาระหว่าง สถานะ ของแข็ง-ของแข็ง หรือ ของแข็ง-ของเหลวเป็นการทำปฏิริยาระหว่าง คาร์บอนและซิลิกอนไดออกไซด์ เป็น ก๊าซซิลิกอนมอนอกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.14



โดยสัญลักษณ์ s แทน สถานะของแข็ง, l แทน สถานะของเหลว, g แทนสถานะก๊าซ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึง 1450 °C มีผลให้เกิด คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และซิลิกอนมอนอกไซด์ ยังคงเกิดเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ 2.15



ขณะเดียวกันได้เกิดปฏิริยาแบบ Boudouard โดยได้เปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.16

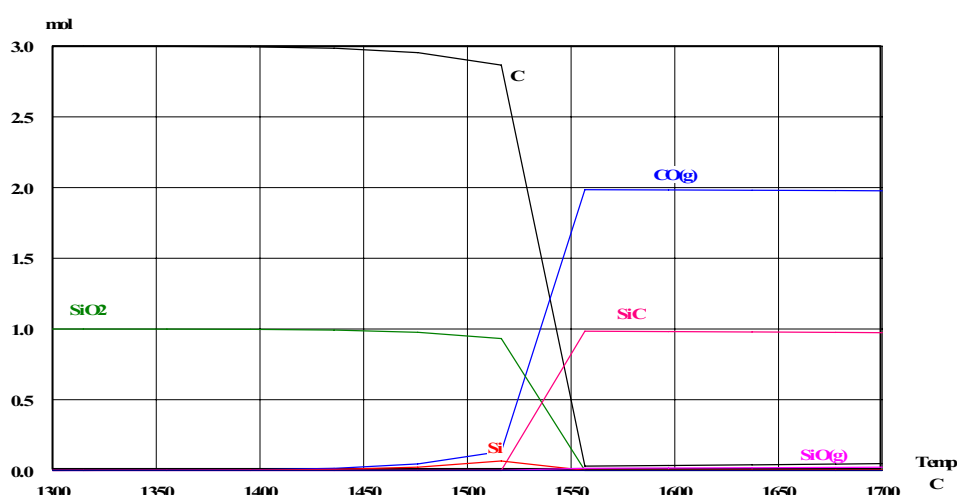


ในการเกิดปฏิกิริยาอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ มีอัตราส่วนที่ต่ำเพียงพอเพื่อให้ ซิลิกอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลง โดยทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะได้เป็น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นซิลิกอนมอนอกไซด์



ส่วนที่ 2 ซิลิกอนมอนอกไซด์ในสถานะก๊าซ ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับคาร์บอนซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่าง ก๊าซ-ของแข็ง ซิลิกอนมอนอกไซด์ในสถานะไอในสมการที่ 2.14 และ 2.15 ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ได้เป็น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ในสมการที่ 2.17

จากการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ โดยอาศัยหลักการของ พลังงานกิบส์ต่ำสุด (Gibbs energy minimization) จะมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์สูงที่สุด นำไปคำนวณเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่มีความเป็นไปได้ แล้วแสดงผลในรูปแบบของกราฟความสมดุลของส่วนผสมในระบบที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C  $\text{SiO}_2$  ทำปฏิกิริยากับ คาร์บอน กลายเป็น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้สามารถสังเคราะห์ ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ อุณหภูมิประมาณ 1500 - 1600 °C และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงก็จะได้เซรามิกไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ตามต้องการ เนื่องจากไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นสารเสถียรไม่ทำปฏิกิริยาย้อนกลับที่อุณหภูมิดังกล่าว และเนื่องจากคาร์บอนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อยู่ในรูปของถ่านพูนแบบเซลล์ูลาร์ ดังนั้น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจึงมีโครงสร้างพูนแบบเซลล์ูลาร์



รูปที่ 2.4 กราฟความสมดุลของส่วนผสม ระบบ ( $\text{SiO}_2+3\text{C}$ ) ในบรรยากาศของ  
ก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิต่างๆ  
(ที่มา: ฤตวรรณ, 2551)



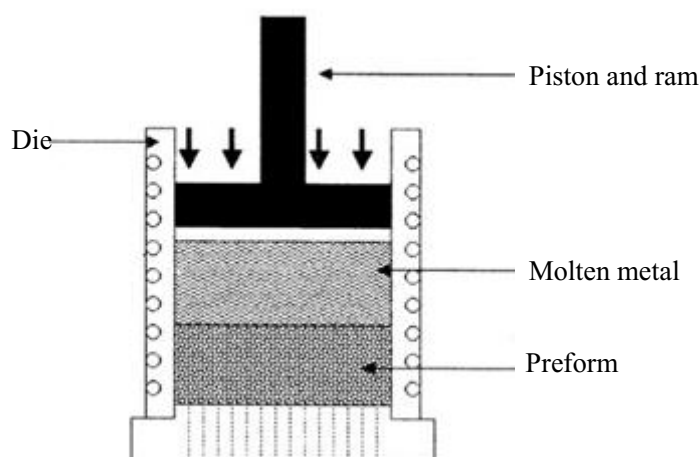
## 2.8 กระบวนการหล่ออัด (Squeeze casting)

การหล่อโลหะมีวิธีการหล่อด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ 1.การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นวิธีการหล่อที่ง่ายที่สุด เพราะจะเทน้ำโลหะลงในแบบ น้ำโลหะก็จะไหลลงในแบบเองตามแรงโน้มถ่วงของโลกจนเต็ม แบบเดียวกับการหล่อเทียนนั่นเอง 2.การหล่ออัด วัสดุที่ใช้หล่อจะถูกบีบอัดเข้าไปในแบบหล่อถาวร เช่นวัสดุหล่อแบบฉีด ใช้สำหรับวัสดุสังเคราะห์ 3.การหล่อด้วยแรงหนีศูนย์กลาง น้ำโลหะที่ถูกเทเข้าไป จะได้รับการบีบอัดเข้าไปในแบบหล่อที่หมุนด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เช่นการหล่อท่อ กระบวนการหล่ออัดได้นำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี 1976 โดยใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ต่อมาได้ประยุกต์ใช้กับวัสดุเสริมแรงชนิดอื่นๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และวัสดุเสริมแรงแบบอนุภาค ซึ่งรูปร่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่ออัดมีรูปร่างชิ้นงานใกล้เคียงกับรูปร่างชิ้นงานที่ได้ทำการออกแบบ มีผลทำให้สามารถผลิตชิ้นงานออกสู่ตลาดได้รวดเร็วยิ่งขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงาน และในวงการอุตสาหกรรมได้นำกระบวนการหล่ออัดใช้ในงานเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและส่วนประกอบของอุปกรณ์ (B.Cantor, 2004) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประโยชน์ของวัสดุผสมเนื้อโลหะในเชิงพาณิชย์ (ที่มา B.Cantor, 2004)

ผลิตภัณฑ์	วัสดุผสม	วิธีการผลิต	สมบัติของวัสดุผสม	ปีที่เริ่มผลิต (บริษัทที่ผลิต)
อุปกรณ์กอล์ฟ	SiC/Al	การหล่ออัด	น้ำหนักเบา ทนทาน ต่อการเสียดสี	1984 (Nippon Carbon)
ข้อต่อโครงสร้างยานอวกาศ	SiC/Al 7075	การหล่ออัด	แข็งแรง ค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ	1988 (Mitsubishi)
กระบอกสูบโซ่ข้อับ	SiC/Al	การหล่ออัด การรีด (Extrusion)	น้ำหนักเบา ทนทาน ต่อการสึกหรอ ค่าการนำความร้อนต่ำ	1989 (Mitsubishi Aluminum)
ลูกสูบเครื่องยนต์ดีเซล	SiC/Al	การหล่ออัด	น้ำหนักเบา ทนทาน ต่อการสึกหรอ	1989 (Niigata)
ตัวระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	SiC/Al	การหล่ออัด	ค่าการนำความร้อนสูง ค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ	1999 (Hitachi Metals)

กระบวนการหล่ออัด ดังรูปที่ 2.4 เริ่มต้นโดยใช้แรงบีบอัดกับน้ำโลหะ โดยอาศัยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ คือ การหล่อและการอัด ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการใช้แรงอัดน้ำโลหะเหลวให้แทรกซึมผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของ ชิ้นงานที่ใช้เป็นตัวเสริมแรง โดยทำการเทน้ำโลหะเหลวใส่แม่พิมพ์ตัวล่างที่วางชิ้นงานไว้แล้ว หลังจากนั้นก็ใช้แรงอัดกดแม่พิมพ์ตัวบนค้ำให้น้ำโลหะเหลวแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของชิ้นงาน ปลดปล่อยให้เย็นตัว จนกลายเป็นโลหะผสม ชิ้นงานที่ผ่านการหล่ออัดจะมีเกรนค่อนข้างเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น เนื่องจากน้ำโลหะเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างทันทีทันใด ข้อดีของการหล่ออัดคือค่าความดันที่สูงสามารถช่วยเพิ่มความเร็วของกระบวนการผลิตและควบคุมปฏิกิริยาเคมีที่มีมากได้ โครงสร้างปราศจากความสกปรกและชิ้นผลิตภัณฑ์ที่มีความลึกที่ดีสามารถลดการเกิดความล้าของชิ้นงานนั้นๆ ทำให้ยืดอายุการใช้งานให้นานยิ่งขึ้น ลดการเกิดการหลุดตัวของชิ้นงาน และสามารถลดการละลายของอากาศจากภายนอกในชิ้นงานได้ ทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศน้อย แต่ข้อเสียก็คือ ค่าเงินลงทุนและค่าการติดตั้งอุปกรณ์ที่สูง รูปร่างความเป็นเรขาคณิตมีข้อจำกัดมีโอกาสที่รูปร่างของชิ้นงานจะผิดรูปร่าง (เกษญา, 2548)



รูปที่ 2.5 การหล่ออัด (Squeeze casting)

( ที่มา: S.M.Seyed, 2006)

## 2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง

การจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปร 2 ปัจจัย เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อข้อมูล 2 ปัจจัย หรือเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนกันของระดับของข้อมูลที่แตกต่างกัน ในรูปทั่วไปถ้าต้องการวัดความแตกต่างของตัวแปร 2 ตัวหรือปัจจัย 2 ปัจจัย โดยที่ตัวแปรตัวที่ 1 มี  $k$  ระดับ และตัวแปรที่สองมี  $b$  ระดับ

ตารางที่ 2.5 ตารางชนิดแจกแจงในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง

ตัวแปรตัวที่สอง	ตัวแปรตัวที่หนึ่ง					ผลรวม	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	...	k		
1	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	...	$x_{1k}$	$B_1$	$\bar{x}_{1.}$
2	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	...	$x_{2k}$	$B_2$	$\bar{x}_{2.}$
3	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	...	$x_{3k}$	$B_3$	$\bar{x}_{3.}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
b	$x_{b1}$	$x_{b2}$	$x_{b3}$	...	$x_{bk}$	$B_b$	$\bar{x}_{b.}$
ผลรวม	$T_1$	$T_2$	$T_3$	...	$T_k$	T	
ค่าเฉลี่ย	$\bar{x}_{.1}$	$\bar{x}_{.2}$	$\bar{x}_{.3}$	...	$\bar{x}_{.k}$		$\bar{x}$

โดยที่  $x_{ij}$  = ข้อมูลที่เกิดจากระดับที่  $i$  ของตัวแปรที่สองและระดับที่  $j$  ของตัวแปรตัวที่หนึ่ง:  $i = 1, 2, \dots, b$ ;

$j = 1, 2, \dots, k$

$T_j$  = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่  $j$  ของตัวแปรที่ 1 และทุกระดับของตัวแปรที่ 2

$$= \sum_{i=1}^b x_{ij} \quad (2.18)$$

$B_i$  = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่  $i$  ของตัวแปรที่สอง และทุกระดับของตัวแปรตัวที่ 1

$$= \sum_{j=1}^k x_{ij} \quad (2.19)$$

$$\bar{x}_{.j} = \frac{T_j}{b} = \frac{\sum_{i=1}^b x_{ij}}{b} \quad \text{และ} \quad \bar{x}_{i.} = \frac{B_i}{k} = \frac{\sum_{j=1}^k x_{ij}}{k} \quad (2.20)$$

$$T = \text{ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด} = \sum \sum x_{ij} = \sum T_j = \sum B_i \quad (2.21)$$

$$n = \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด} = kb \quad (2.22)$$

$$X = \text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด} = \frac{T}{kb} = \frac{T}{n} \quad (2.23)$$

วิธีนี้จะแบ่งผลบวกกำลังสองของความผันแปร ความแตกต่างของข้อมูลทั้งหมดเป็น 3 ส่วน คือ ความผันแปรระหว่างระดับของปัจจัยที่ 1 รวมกับความผันแปรระหว่างระดับของปัจจัยที่ 2 และความคลาดเคลื่อน นั่นคือ

$$SST = SS_{tr} + SSB + SSE \quad (2.24)$$

โดยที่  $SS_{tr}$  = ผลบวกของความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่หนึ่ง

$SSB$  = ผลบวกของความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่สอง

$SSE$  = ผลบวกของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (2.25)$$

$SS_{tr} = SS(\text{ระหว่างระดับของปัจจัยที่ 1}) = SS(\text{ระหว่างทรีทเมนต์})$

$$= b \sum (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (2.26)$$

$SSB = SS(\text{ระหว่างระดับของปัจจัยที่ 2}) = SS(\text{ระหว่างบล็อก})$

$$= k \sum (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (2.27)$$

$$SSE = SST - SS_{tr} - SSB \quad (2.28)$$

สำหรับองศาอิสระจะแบ่งเป็น 3 ส่วน เช่นกัน คือ องศาอิสระทั้งหมด = องศาอิสระของปัจจัยที่หนึ่ง + องศาอิสระของปัจจัยที่สอง + องศาอิสระของความคลาดเคลื่อน

$$n-1 = (k-1) + (b-1) + (k-1)(b-1) \quad (2.29)$$

ตารางที่ 2.6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ปัจจัย

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ(DF)	SS	MS = SS/DF	F
ปัจจัยที่หนึ่ง	k-1	SSTrt	MStrt	MSTrt / MSE
ปัจจัยที่สอง	b-1	SSB	MSB	MSB / MSE
ความคลาดเคลื่อน	(k-1)(b-1)	SSE	MSE	
ผลรวม	n-1 = kb-1	SST		

ให้  $\mu_i$  = แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่  $i$  ของปัจจัยที่หนึ่ง;  $i = 1, 2, \dots, k$   
 $\mu_j$  = แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่  $j$  ของปัจจัยที่หนึ่ง;  $j = 1, 2, \dots, k$

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่มีปัจจัย 2 ปัจจัยดังนี้

#### สมมติฐานเพื่อการทดสอบ

การทดสอบสมมติฐานได้แบ่งปัจจัยในการทดสอบ 2 ปัจจัย ได้แก่ ทิศทางโครงสร้างของ  
 ชี้นงาน และ ระยะเวลาในการเผาแ่ เพื่อศึกษาปัจจัยที่แตกต่างกันส่งผลต่อความแข็งแรงของชี้นงานและได้  
 แบ่งสมมติฐานในการทดสอบ 2 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1  $H_0$ : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยทิศทางโครงสร้างของชี้นงาน หรือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$H_1$ : มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยทิศทางโครงสร้างของชี้นงาน อย่าง  
 น้อย 2 ระดับ หรือ  $H_1: \mu_i \neq \mu_j$  อย่างน้อย 1 คู่ :  $i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, k$

ชุดที่ 2  $H_0$ : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยระยะเวลาในการเผาแ่ หรือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_b$$

$H_1$ : มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยระยะเวลาในการเผาแ่ อย่างน้อย 2  
 ระดับ หรือ  $H_1: \mu_i \neq \mu_j$  อย่างน้อย 1 คู่ :  $i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, b$

#### สถิติทดสอบ

$$\text{สถิติทดสอบของปัจจัยที่ 1} \quad F = \frac{MSTrt}{MSE} \quad (2.25)$$

$$\text{สถิติทดสอบของปัจจัยที่ 2} \quad F = \frac{MSB}{MSE} \quad (2.26)$$

**เขตปฏิเสธ**

1. จะปฏิเสธสมมติฐานของปัจจัยชุดที่ 1  $H_0$  ถ้า  $F = \frac{MSTrt}{MSE}$  มากกว่า  $F_{1-\alpha}$

โดยมีองศาอิสระ  $k-1$  กับ  $(k-1)(b-1)$

2. จะปฏิเสธสมมติฐานของปัจจัยชุดที่ 2  $H_0$  ถ้า  $F = \frac{MSB}{MSE}$  มากกว่า  $F_{1-\alpha}$

โดยมีองศาอิสระ  $b-1$  กับ  $(k-1)(b-1)$

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีวิจัย ซึ่งประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ขั้นตอนการทำวิจัย การวิเคราะห์โครงสร้าง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

##### 1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Tetraethoxysilane (TEOS;  $(\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4)$ ; Fluka 98% GC) Ethanol, HCl สารเคมีดังกล่าวเป็นสารประกอบในกระบวนการเตรียม โซล-เจลของซิลิกอน ไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )

##### 2. วัสดุธรรมชาติ

ไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากโรงงานอบไม้ยางพารา นำมาตัดให้ได้ชิ้นงานขนาด 1 ลูกบาศก์นิ้ว

##### 3. โลหะอะลูมิเนียม

งานวิจัยนี้ได้ใช้อะลูมิเนียม A356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม A356

โลหะผสม (Alloy)	ส่วนผสมทางเคมี (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Sr
อะลูมิเนียม A356	6.86	0.09	0.04	0.01	0.38	0.01	0.12	0.01	0.03

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

##### 3.2.1 เตาเผา (อุณหภูมิสูงสุด $1,200^\circ\text{C}$ )

เตาเผาไฟฟ้าโดยเตาเผาในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน โดยสามารถที่จะกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาได้หลากหลายรูปแบบดังรูปที่ 3.1 โดยเตาเผาที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน



รูปที่ 3.1 เตาเผาอุณหภูมิสูงสุด 1200 °C

### 3.2.2 Magnetic Stirrer ยี่ห้อ LMS รุ่น MGS-1001

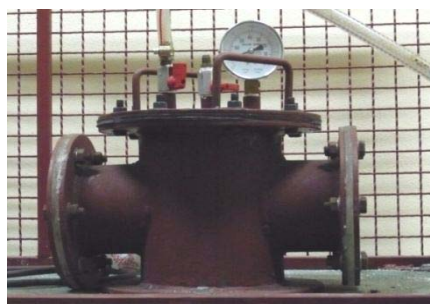
เครื่องกวนเพื่อใช้ในการผสมสารละลาย มีระดับความเร็วของการหมุน 9 ระดับ เริ่มจากช้าที่ระดับ 1 จนถึงระดับ 9 เร็วที่สุด ซึ่งในการทดลองใช้ที่ระดับ 5 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก

### 3.2.3 เครื่องอัดสุญญากาศ

เครื่องอัดนี้เป็นเครื่องอัดระบบสุญญากาศมีแรงดันสูงสุดที่ 70 cmHg โดยภายในสามารถบรรจุภาชนะปริมาตร 250 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดสุญญากาศ



### 3.2.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Tube Furnace)

เตาเผานี้มีลักษณะเป็นท่อโดยสามารถเผาได้ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 1800 °C โดยเผาในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน ในส่วนของตัวควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาได้หลายระดับ สำหรับอัตราการเพิ่มความร้อนสามารถตั้งค่าได้ โดยมีอัตราสูงสุดที่ 10 °C min<sup>-1</sup> แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง 1800 °C

### 3.2.5 เครื่องอัดไฮดรอลิก

เครื่องอัดไฮดรอลิกโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับให้ไฮดรอลิกปั๊มหมุน เพื่อที่จะดูดน้ำมันจากถังพักส่งไปยังเสื่อบีบให้เข้าสู่ระบบไฮดรอลิก ทำให้กระบอกสูบเคลื่อนที่โดยเปลี่ยนพลังงานจากพลังงานไฮดรอลิกเป็นพลังงานกล ซึ่งเคลื่อนที่ในลักษณะขึ้น-ลงในแนวตั้ง มีแรงกดสูงสุดที่ 3000 psi ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดไฮดรอลิก

### 3.2.6 เตาหลอมอะลูมิเนียม

เตาหลอมที่ใช้เป็นเตาไฟฟ้าแบบใช้ขดลวดความต้านทาน(Electric Resistance Furnace) ดังรูปที่ 3.6 โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิในการหลอมด้วยตู้ควบคุม ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 1000 °C สามารถหลอมอะลูมิเนียมได้สูงสุด 10 กิโลกรัมต่อครั้ง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุณหภูมิในการหลอมอะลูมิเนียมที่ 750 °C



รูปที่ 3.6 เตาหลอมอะลูมิเนียม

### 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด(Scanning Electro Microscope (SEM) รุ่น JSM-5800LV, JEOL)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของวัสดุผสมซึ่งใช้กำลังขยาย 2500 เท่า เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวบนชิ้นงาน วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในชิ้นงาน และแสดงแผนภาพการกระจายของธาตุชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

ในการทดลองได้ใช้ไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการอบ ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 7 วัน จากโรงงานอบไม้ยางพารา เพื่อใช้เป็นตัวตั้งต้นในการทดลอง จากนั้นนำไม้ยางพาราที่ได้ ตัดให้ได้ขนาด 1x1x1 นิ้ว<sup>3</sup> และอบที่ อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างของชิ้นงานไม้ยางพาราก่อนอบ

#### 3.4.2 กระบวนการคาร์บอนในเข้ชั้น

ในกระบวนการนี้ได้ใช้เตาเผา 2 ชนิดคือ เตาเผาอุณหภูมิ 1200 °C และเตาเผาอุณหภูมิ 1800 °C สาเหตุที่ใช้ 2 เตา เนื่องมาจากการเผาไม้ยางพาราทำให้เกิดเขม่าต่างๆ จากการเผาไหม้ ซึ่งหากเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 1800 °C อาจทำให้เตาเผาเกิดปัญหา เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้ทำการทดลองจึงทำการเผาที่เตาเผาอุณหภูมิ 1200 °C ก่อน หลังจากนั้นจึงเผาต่อด้วยเตาเผาอุณหภูมิ 1800 °C ต่อไป

เริ่มต้นโดยใช้เตาเผาอุณหภูมิ 1200 °C โดยนำไม้ขนาด 1 ลูกบาศก์นิ้ว เข้าเตาเผาเผาในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน ได้แบ่งการเผาเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

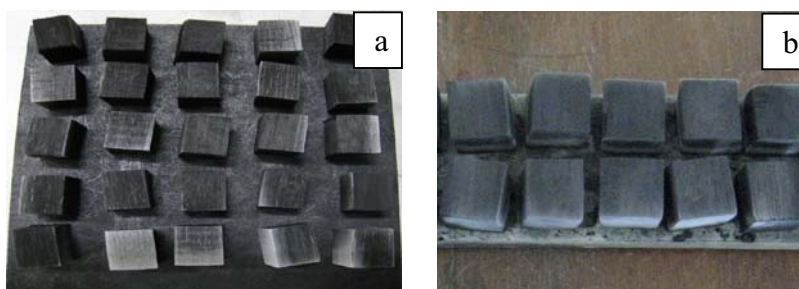
1.อบไม้ยางพาราเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ภายในชิ้นงาน โดยการอบจากอุณหภูมิห้องถึง 70 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 3 °C min<sup>-1</sup> เผาแช่ 24 ชั่วโมง

2. เพิ่มอุณหภูมิจาก 70 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนประมาณ 1.5 °C min<sup>-1</sup> จนถึง 500 °C การเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเพิ่มความร้อนที่ต่ำเพื่อป้องกันการหดตัวจนแตก เนื่องจากการคายน้ำ (P.Greil, 1998)

3. เผาจากอุณหภูมิ 500 °C อัตราการเพิ่มความร้อนประมาณ 2.5 °C min<sup>-1</sup> จนถึง 800 °C (P.Greil, 1998)

#### 4. เผาเซ้ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผาในครั้งแรก มาทำการเผาต่อที่เตาเผา อุณหภูมิสูง 1800 °C เพื่อให้ได้ชิ้นงานคาร์ไฟต์ที่มีความแข็งแรง นำชิ้นงานเข้าสู่เตาเผาโดยเผาด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 5 °C min<sup>-1</sup> จนถึงอุณหภูมิ 1200 °C เผาเซ้ 4 ชั่วโมง (J. Qian, 2004) ซึ่งผลที่ได้คือแท่ง ถ่านพรุน ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

(a) ที่อุณหภูมิ 800 °C (b) ที่อุณหภูมิ 1200 °C

#### 3.4.3 กระบวนการโซล-เจล

กระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการสังเคราะห์โดยผสมสารละลายเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ ในกระบวนการได้นำแท่งถ่านไม้พรุนที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย โซลของ SiO<sub>2</sub> คือ Tetraethoxysilane (TEOS, (Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>) Ethanol น้ำกลั่นผสมกันในอัตราส่วนเชิงโมล 1:1:3 และกรด HCl 1.25 มิลลิลิตร ต่อ สารละลาย TEOS 100 มิลลิลิตร เพื่อให้มีค่า pH ≈ 3-5 จะทำให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาในการเตรียมโซลของ SiO<sub>2</sub> ทำให้อุณหภูมิของเจลที่สังเคราะห์ได้มีอุณหภูมิขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการแทรกซึมของสารละลายโซลในโครงสร้างถ่านไม้พรุนอีกด้วย (ฤตวรรณ, 2551) โดยมีลำดับขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ทำการผสมสารละลายทั้ง 4 ชนิดในภาชนะบรรจุขนาด 250 มิลลิลิตร รูปที่ 3.11 (a)
2. ผสมด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3. ปิดเครื่องกวนทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาและตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งของเหลว จะมีลักษณะเป็นเจลใส ดังรูปที่ 3.11 (b)
4. ทำการอัดสารละลายเพื่อให้สารละลายแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนใช้เวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.11 (c) และ แสดงแรงดันสุญญากาศดังรูปที่ 3.11 (d)
5. นำชิ้นงานวางไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

6. อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 °C ด้วยอัตราเพิ่มความร้อน 3 °C min<sup>-1</sup> เป็น เวลา 20 ชั่วโมง
  7. อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยอัตราเพิ่มความร้อน 3 °C min<sup>-1</sup> เป็น เวลา 8 ชั่วโมง
- จากนั้นทำการเคลือบสารละลายจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งขั้นตอนการผสมสารละลายและการอัดด้วยแรงดันสุญญากาศ เพื่อให้สารละลายแทรกเข้าสู่รูพรุนได้มากที่สุดซึ่งจะได้ชิ้นงานเป็น วัสดุผสม C/SiO<sub>2</sub>



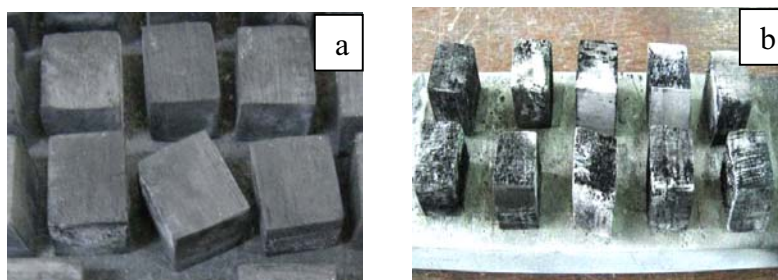
รูปที่ 3.10 กระบวนการ โชลเจด (a) ขณะผสมสารละลายทั้ง 4 ชนิด (b) การตกตะกอนของสารละลาย (c) การแทรกซึมสารละลายเข้าสู่ชิ้นงานคาร์บอน (d) แรงดันสุญญากาศ 70 cmHg ใช้ในการแทรกซึมของสารละลาย

#### 3.4.4 กระบวนการคาร์บอนเทอร์มอลรีดักชัน

กระบวนการคาร์บอนเทอร์มอลรีดักชันเป็นขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิสูงโดยเผาในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน ส่งผลทำให้สารละลายเกิดปฏิกิริยากับแท่งคาร์บอนพรุนได้เป็นชิ้นงานวัสดุผสม SiC/C ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ออกมาจะเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ โชลเจด เข้าสู่เตาเผาอุณหภูมิ 1800 °C ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

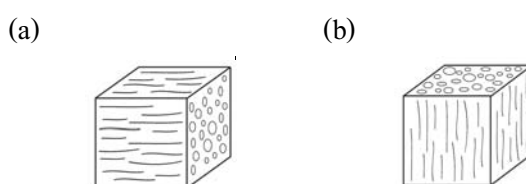
2. เผาชิ้นงานด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่  $3\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$  จนถึงอุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเพิ่มอัตราการร้อนเป็น  $5\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$  จนถึงอุณหภูมิ  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ
3. ชิ้นงานที่ได้เป็นวัสดุผสม SiC/C พรุณ แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ชิ้นตัวอย่างวัสดุผสม SiC/C (a) ก่อนเผา  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ (b) หลังเผา  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3.4.5 กระบวนการหล่ออัด (Squeeze casting)

หลังจากได้วัสดุผสม SiC/C พรุณจากกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน ซึ่งได้กำหนดระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง และมีทิศทางโครงสร้างในการหล่ออัด 2 แนว ได้แก่ 1) วัสดุผสม SiC/C แนวแกนและ 2) วัสดุผสม SiC/C พรุณแนวรัศมี แสดงดังรูปที่ 3.12 เพื่อศึกษาปัจจัยของแนวการแทรกซึมของการหล่ออัดในลักษณะที่แตกต่างกัน เริ่มต้นโดยนำวัสดุผสม SiC/C พรุณ แบ่งปัจจัยในการศึกษาดังตารางที่ 3.2



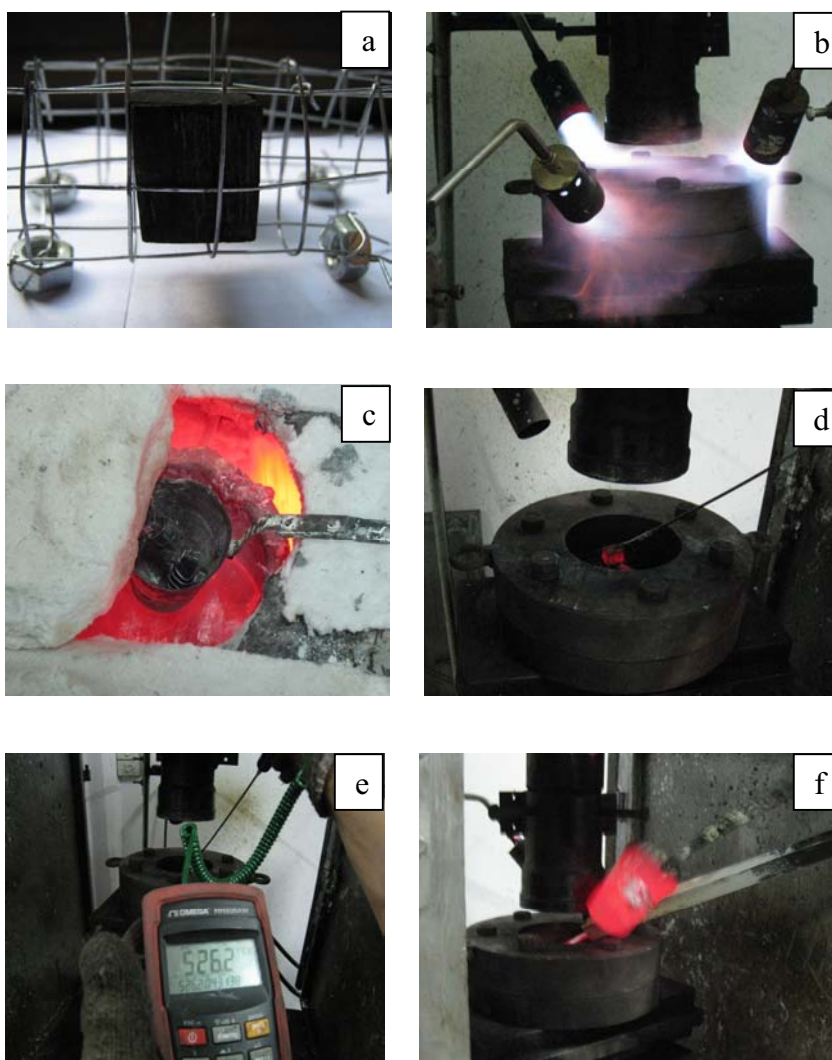
รูปที่ 3.12 ลักษณะของวัสดุผสม SiC/C

(a) แนวแกน (b) แนวรัศมี

ตารางที่ 3.2 จำนวนชิ้นงานในแต่ละปัจจัยของการทดลอง

	วัสดุผสม SiC/C พรุณ แนวแกน (จำนวนชิ้น)	วัสดุผสม SiC/C พรุณ แนวรัศมี (จำนวนชิ้น)
เผาแช่ 1 ชั่วโมง	4	4
เผาแช่ 2 ชั่วโมง	4	4
เผาแช่ 3 ชั่วโมง	4	4

จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหล่ออัด โดยนำวัสดุผสม SiC/C ที่ได้จากการสังเคราะห์หุ้มด้วย ตะแกรงถ่วงน้ำหนัก เพื่อป้องกันการลอยตัวของชิ้นงาน และหลอมอะลูมิเนียม A356 ที่อุณหภูมิ 750 °C เพื่อให้ได้อะลูมิเนียมเหลว และอุ่นแม่พิมพ์โดยใช้หัวเผาก๊าซจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 300-350 °C หลังจากนั้นทำการอุ่นวัสดุผสม SiC/C พอรุ่นให้มีอุณหภูมิประมาณ 500-550 °C เทอะลูมิเนียมเหลว แม่พิมพ์ กระบวนการหล่ออัดแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนกระบวนการหล่ออัด SiC/C ด้วยอะลูมิเนียมเหลว A356 (a) วัสดุผสม SiC/C ในแนวรัศมี (b) อุ่นแม่พิมพ์โดยใช้หัวก๊าซ (c) ซิลิกอนคาร์ไบด์ พอรุ่นขณะอุ่น (d) ซิลิกอนคาร์ไบด์พอรุ่นที่ผ่านการอุ่น 500-550 °C (e) อุณหภูมิของ ซิลิกอนคาร์ไบด์พอรุ่นที่ผ่านกระบวนการอุ่น 300-350 °C (f) การเทอะลูมิเนียมเหลว

หลังจากผ่านกระบวนการหล่ออัด ได้แผ่นอะลูมิเนียมซึ่งมีวัสดุผสม SiC/C-Al ฝังอยู่ภายในแผ่นอะลูมิเนียม จึงปาดหน้าแผ่นอะลูมิเนียม โดยเครื่องกลึง จากนั้นทำการตัดเพื่อแยกวัสดุผสม SiC/C-Al ออกจากแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งอะลูมิเนียมส่วนที่เหลือ นำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับ วัสดุผสม SiC/C-Al และวัสดุโมโครงสร้าง 2 แบบ ได้แก่ วัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน และแนวรัศมี ดังรูปที่ 3.14

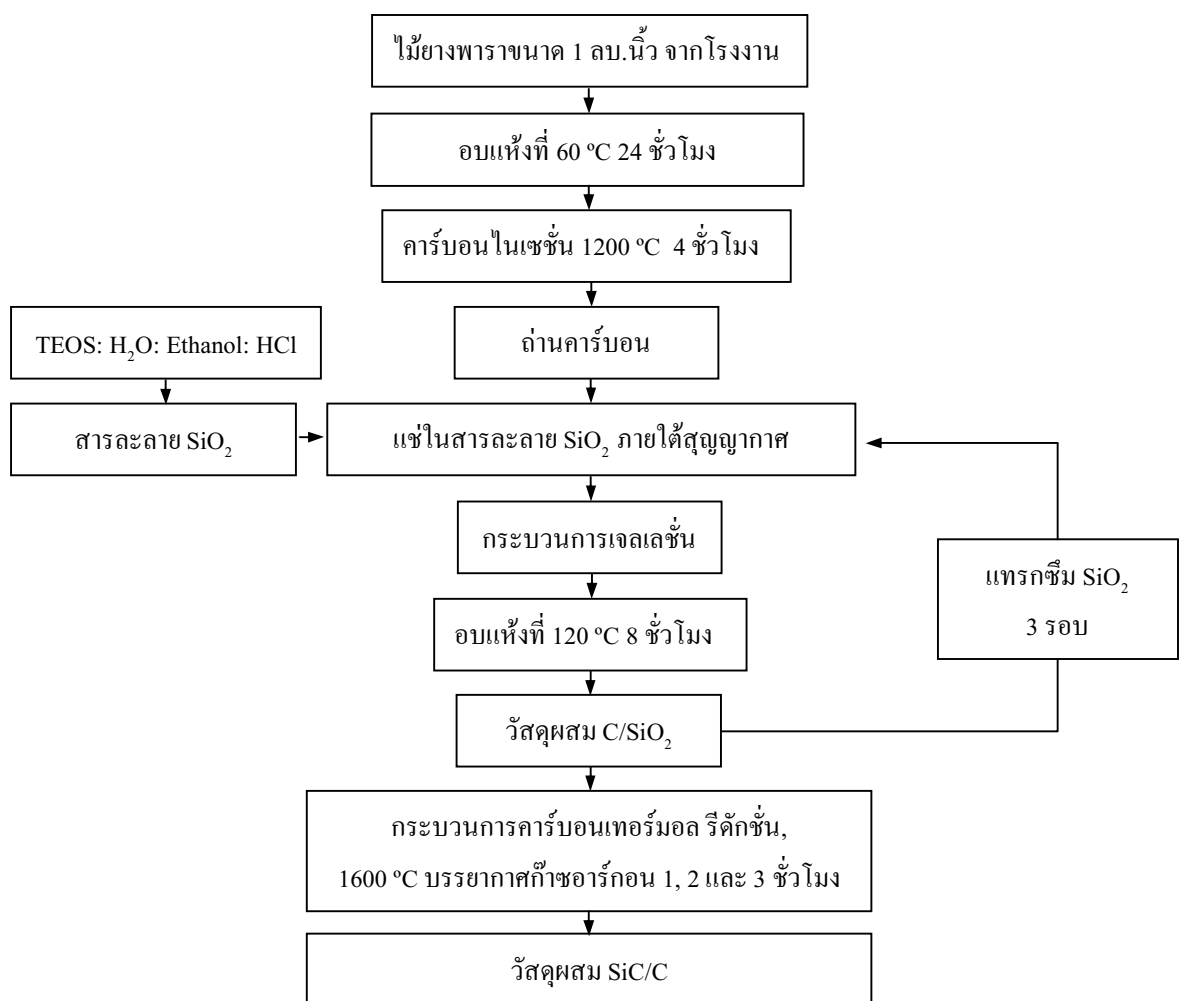


รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนกระบวนการหล่ออัด SiC/C ด้วยอะลูมิเนียมเหลว A356 (a) แผ่นอะลูมิเนียมที่ได้จากการอัด (b) วัสดุผสม SiC/C พรุนหลังจากปาดหน้าด้วยเครื่องกลึง (c) ลักษณะแผ่นอะลูมิเนียมหลังจากปาดหน้า (d) ชิ้นงานหลังจากการตัด (e) วัสดุผสม SiC/C –Al แนวแกน (f) วัสดุผสม SiC/C –Al แนวรัศมี

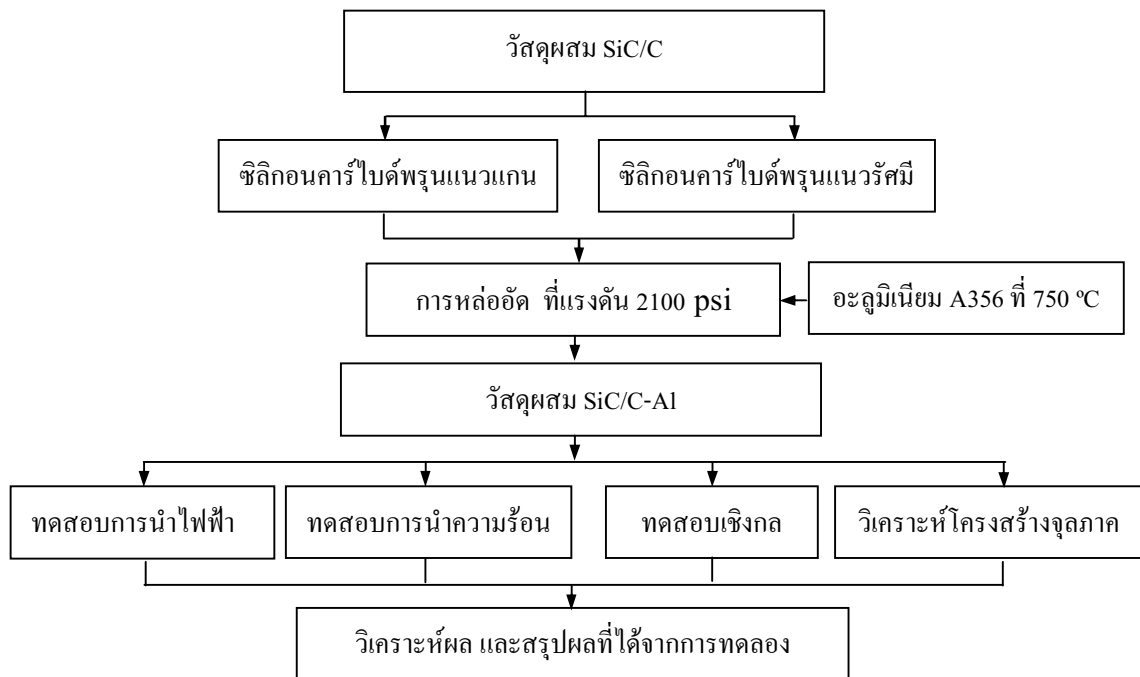


ลำดับขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์พูนจากไม้ยางพารา แสดงดังรูปที่ 3.15 และขั้นตอนของกระบวนการหล่ออัดและการทดสอบวัสดุผสมแสดงดังรูปที่ 3.16 หลังจากผ่านกระบวนการทั้ง 4 กระบวนการซึ่งได้แก่ กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน กระบวนการโซล-เจล กระบวนการคาร์บอนเทอร์มอลรีดักชัน และกระบวนการหล่ออัด ได้ชิ้นงานวัสดุผสม SiC/C-Al ซึ่งมีปัจจัยที่แตกต่างกันดังนี้

1. ชิ้นงานโครงสร้างทิศทางแนวรัศมี ที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง
2. ชิ้นงานโครงสร้างทิศทางแนวแกน ที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 3.15 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์พูนจากไม้ยางพารา



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนของกระบวนการหล่ออัดและการทดสอบวัสดุผสม SiC/C-Al

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์วัสดุ

#### 3.5.1 การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง

ความหนาแน่นของชิ้นงานจะใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Method) เพื่อหาค่าความหนาแน่น โดยสามารถหาได้จากการชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้ง (Dry mass of sample) และชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (Mass of sample suspended in water) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$\text{Bulk density} = \frac{M_D}{M_D - M_w} \quad (3.1)$$

โดย  $M_D$  คือ น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (Dry mass of sample)

$M_w$  คือ ชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (Mass of sample suspended in water)

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในเนื้อชิ้นงานตัวอย่าง (%Porosity) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ 3.2

$$\% \text{ Porosity} = \left( 1 - \frac{D_B}{D_{Re}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

โดย  $D_B$  คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง

$D_{Re}$  คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุอ้างอิง

### 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้าง

เป็นการวิเคราะห์พื้นผิวทางกายภาพของวัสดุผสม SiC/C-Al เพื่อศึกษาโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของอะลูมิเนียมภายในชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray mapping และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) เพื่อวิเคราะห์การแยกธาตุและปริมาณ บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง

## 3.6 วิธีทดสอบสมบัติวัสดุ

### 3.6.1 การทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้า

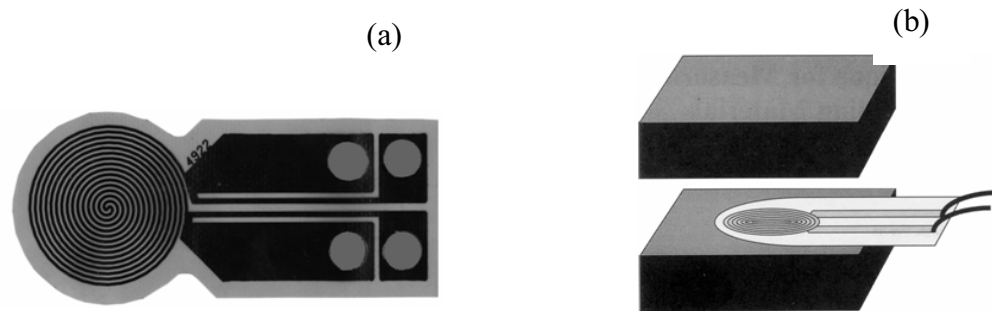
เป็นการทดสอบการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการทดสอบใช้เครื่องยี่ห้อ Keithley รุ่น 6150 ร่วมกับ Keithley รุ่น 6514 เพื่อใช้ในการอ่านค่าในการทดสอบ โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบต้องมีผิวที่เรียบ ก่อนทำการทดสอบต้องมีการปรับผิวและทำขั้วทางไฟฟ้าโดยใช้โลหะเงินทำเป็นขั้วไฟฟ้า หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาประกอบกับขั้วไฟฟ้าทั้งด้านบน-ด้านล่าง หลังจากนั้นทำการอ่านค่าที่ได้ ซึ่งเป็นค่า resistivity ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 3.3

$$\text{Volume resistivity} = \text{Avg. resistivity} \times \text{Volume sample} \quad (3.3)$$

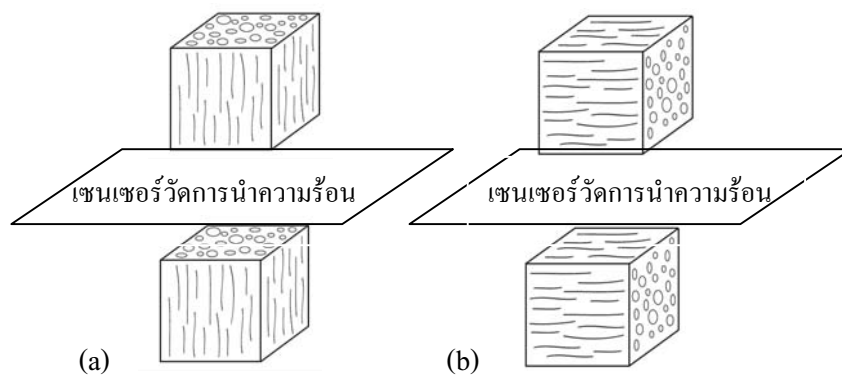
โดย Avg. resistivity คือ ค่าเฉลี่ยของค่า resistivity ซึ่งทำการวัด 5 ครั้ง

### 3.6.2 การทดสอบการนำความร้อน

เป็นการทดสอบสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ โดยใช้เทคนิคแผ่นความร้อน (hot disk) ลักษณะแผ่นความร้อนเป็นทั้งตัวให้ความร้อนและเซนเซอร์วัดความร้อนอยู่ในแผ่นเดียวกัน ดังรูปที่ 3.17 และวิธีการวัดค่าการนำความร้อนดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 เซนเซอร์ของเครื่องวัดการนำความร้อน (a) แผ่นความร้อน (b) ลักษณะการวางชิ้นงานในการทดสอบโดยใช้ชิ้นงาน 2 ชิ้น เพื่อประกบบน-ล่างของเซนเซอร์วัดความร้อน



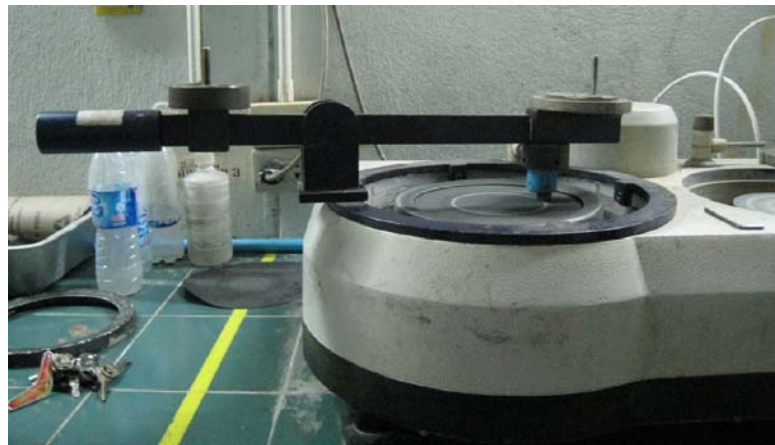
รูปที่ 3.18 ลักษณะการทดสอบการนำความร้อนของพื้นผิววัสดุผสม SiC/C-Al  
(a) โครงสร้างแนวรัศมี (b) โครงสร้างแนวแกน

ในการวัดการนำความร้อน จะต้องใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะผิวเรียบ 2 ชิ้น โดยวางประกบบน-ล่างของแผ่นความร้อน จากนั้นกระแสไฟฟ้าส่งผ่านไปยังแผ่นความร้อน เพื่อเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่แผ่นความร้อนจะกระจายรอบชิ้นทดสอบ ในเวลาเดียวกันนั้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะถูกบันทึกเทียบกับเวลา โดยมีเซนเซอร์ความร้อนตรวจจับ ข้อมูลที่ได้เครื่องทดสอบจะแปลงค่าให้อยู่ในหน่วย  $W/m-K$  การวัดการนำความร้อนสามารถวัดที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}C$  เท่านั้น

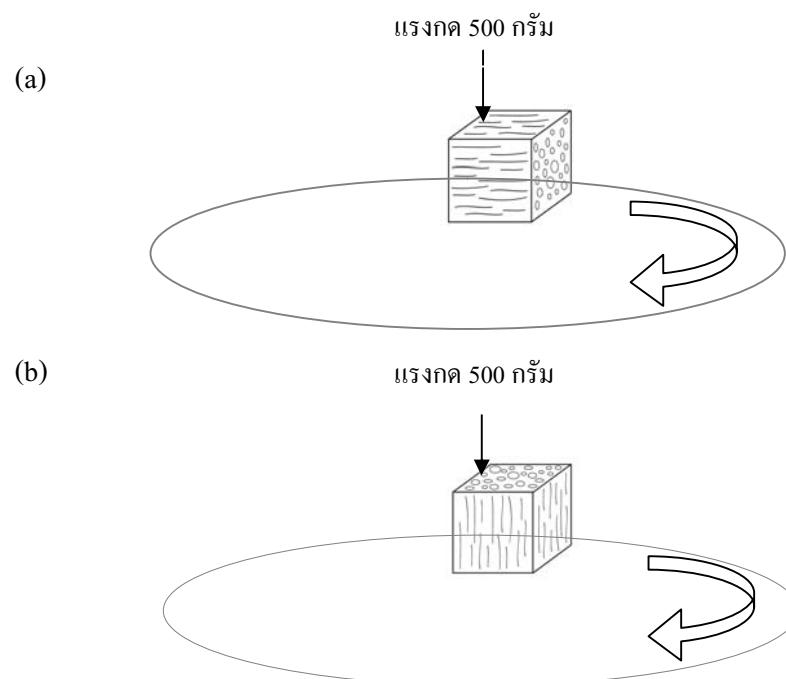
### 3.6.3 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบความสึกหรอเพื่อทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่ทนทานต่อการเสียดสี ซึ่งการทดสอบได้ใช้เครื่องทดสอบลักษณะจานหมุน (Pin on disk) แสดงดังรูปที่ 3.19

ในการทดลองจะใช้น้ำหนักกด 500 กรัม กดลงบนชิ้นงาน หลังจากนั้นเปิดเครื่องขัดทำการหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที ซึ่งกำหนดช่วงของการทดสอบ 4 ช่วง ได้แก่ 3 6 9 และ 12 นาที ตามลำดับ โดยในแต่ละช่วงเวลาหยุดเครื่องขัด เพื่อนำชิ้นงานซึ่งน้ำหนักของน้ำหนักที่สูญเสียที่เกิดจากการทดสอบและทำการเปลี่ยนกระดาษทรายขัดทุกครั้งที่ทำกรบันทึกผล โดยในการทดลองได้ใช้กระดาษทรายยี่ห้อ Buehler เบอร์ P 320 และลักษณะการวางชิ้นงานในการทดสอบแสดง ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบความสึกหรอแบบ Pin on disk



รูปที่ 3.20 ลักษณะการวางชิ้นงานวัสดุผสม SiC/C-Al ในการทดสอบการสึกหรอ

(a) โครงสร้างแนวแกน (b) โครงสร้างแนวรัศมี

### 3.6.4 การทดสอบความแข็งแรง

การทดสอบความแข็งแรงแบบรอกเวล โดยจะวัดความแข็งแรงจากความถี่ระยะกดที่ถูกหัวกด กดด้วยแรงคงที่ แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ Minor load และ Major load ซึ่ง Minor load เป็นแรงที่ยึดหัวกด ถูกบอลเหล็กชุบแข็ง Major load เป็นแรงที่มากกว่า Minor load และกดลงหลังจากให้ Minor load กับ ชิ้นงานการอ่านค่าความแข็งแรงจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง ซึ่งวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์มีส่วนประกอบ ภายใน 3 เฟสด้วยกันได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์คาร์บอน และอะลูมิเนียม จึงได้เลือกหัวกดที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้รอยกดเกิดบริเวณเฟสทั้ง 3 เฟส และเพื่อป้องกันการยุบตัวของคาร์บอนและการแตกหักของ โครงสร้างวัสดุผสมในการทดสอบความแข็งแรง ได้เลือกใช้ รอกเวลสเกล H ซึ่งใช้ในการทดสอบ อะลูมิเนียมและอ่านค่าเป็นรอกเวลสเกล B ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าของรอกเวลสเกล B จากนั้นทำการ เปรียบเทียบค่าจากตารางในภาคผนวก ค. ค่าที่ได้เป็นหน่วยบริเนล เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับงานวิจัย อื่นต่อไป ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงรอกเวลสเกลต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความแข็งแรงรอกเวลสเกลต่างๆ

สเกล	แรงกดตาม	ชนิดหัวกด	ชนิดของวัสดุที่ต้องการทดสอบ
A	60	หัวเพชร	โลหะคาร์บอนชนิดต่างๆ และวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง
B	100	1/16" หัวบอล	เหล็กกล้าคาร์บอน ทองเหลือง และวัสดุแข็งปานกลาง
C	150	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง
D	100	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิว
E	100	1/8" หัวบอล	เหล็กหล่ออะลูมิเนียมผสม และแมกนีเซียมผสม
F	60	1/16" หัวบอล	ทองเหลืองและทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน
G	150	1/16" หัวบอล	แบริเลียมผสมทองแดง บรอนซ์
H	60	1/8" หัวบอล	อะลูมิเนียม
K	150	1/8" หัวบอล	เหล็กหล่อ อะลูมิเนียมผสม
L	60	1/4" หัวบอล	ตะกั่ว พลาสติก และวัสดุอ่อนอื่นๆ

### 3.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al นำมาวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมทางสถิติ Minitab V.13 ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) มีลำดับการตีความหมายดังนี้

ก) ให้พิจารณาจาก I Chart เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่

ข) พิจารณาจาก Normal plot ซึ่งแสดงเส้นตรง 1 เส้น โดยพิจารณาจากค่า P-value โดยค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงการทดลองที่มีค่า setting ค่อนข้างดี

ค) ให้พิจารณาว่าข้อมูลแต่ละสาเหตุจากปัจจัยมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์หรือไม่

2. การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )

หลังจากวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบและแสดงผลแล้วว่าข้อมูลได้รับการเก็บรวบรวมภายใต้สภาวะควบคุมตามแผนการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ ค่า  $R^2$  ซึ่งเกิดจากความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล หากค่า  $R^2$  มีค่ามากแสดงว่าออกแบบการทดลองได้ดี และแสดงถึงค่าปัจจัยที่ควบคุมได้ในการทดลอง

3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ โดยแยกความแปรปรวนออกเป็นความแปรปรวน เนื่องจากสาเหตุที่ควบคุมในการทดลอง และความแปรปรวนเนื่องจากสาเหตุที่มีได้รับการควบคุมในการทดลอง แล้วทำการพิจารณาว่าความแปรปรวนเนื่องจากสาเหตุที่ได้รับการควบคุมดังกล่าวมีค่ามากพอจนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐาน หรือไม่ด้วยการเทียบกับความผันแปรจากสาเหตุด้านความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีการแจกแจงในรูปของ F

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการสังเคราะห์วัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พูน/อะลูมิเนียมได้แก่

1. การวิเคราะห์ทางกายภาพ (SEM)
2. การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น
3. วิเคราะห์แยกธาตุ (X-ray mapping)
4. การวิเคราะห์การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี (EDX)
5. การทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้า (Volume resistivity electrical)
6. การทดสอบการนำความร้อน (Thermal conductivity)
7. การทดสอบการสึกหรอ (Wear testing)
8. การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)
9. การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง (Two-way ANOVA)

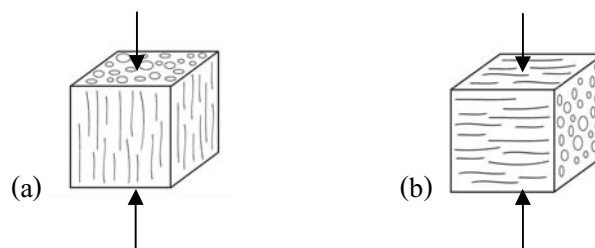
#### 4.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ในการทดลองได้กำหนดเงื่อนไขในการทดลอง ดังนี้

ก) การหล่ออัดอะลูมิเนียมในทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมี ใช้เวลาในเผาแซ่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1600 °C

ข) การหล่ออัดอะลูมิเนียมในทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน ใช้เวลาในเผาแซ่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1600 °C

ซึ่งลักษณะบริเวณของพื้นผิววัสดุผสม SiC/C-Al ที่ทำการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1



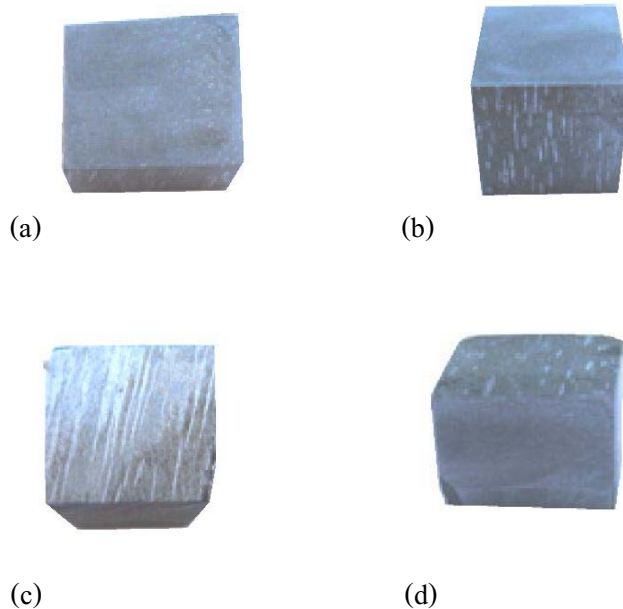
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน(บริเวณลูกศร) ในการวิเคราะห์วัสดุผสม SiC/C-Al

(a) โครงสร้างแนวรัศมี (b) โครงสร้างแนวแกน



#### 4.1.1 ผลของการหล่ออัดอะลูมิเนียม

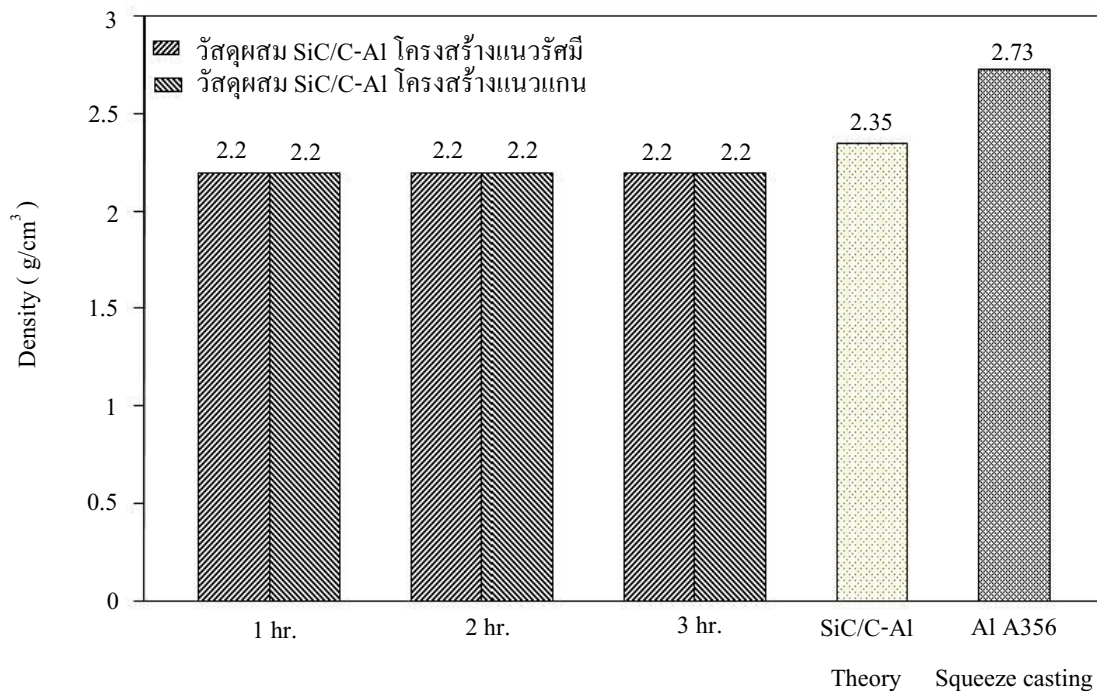
การกำหนดปัจจัยชิ้นงานทิศทางโครงสร้างของการอัดอะลูมิเนียม A356 เพื่อศึกษาผลของการแทรกซึมอะลูมิเนียมเหลวที่มีทิศทางในการวางที่แตกต่างกัน โดยกำหนดปัจจัยในกระบวนการหล่ออัดอะลูมิเนียม A356 ไว้ 2 ทิศทางได้แก่ ทิศทางแนวรัศมี ดังรูปที่ 4.2 (a) และ (b) และทิศทางแนวแกน ดังรูปที่ 4.2 (c) และ (d) จากผลการทดลองพบว่าอะลูมิเนียมเหลว A356 สามารถแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของชิ้นงานจนเต็มรูพรุน ในทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมีและทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของทั้ง 2 ทิศทางพบว่ามีความแตกต่างคือ ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมี มีพื้นผิวด้านบน (Top view) ดังรูปที่ 4.2 (a) พบว่ามีลักษณะเป็นจุดสีขาวของเนื้ออะลูมิเนียม A356 ทั่วทั้งพื้นผิว และแทรกตัวอยู่ในรูพรุน ลักษณะชิ้นงานในด้านข้าง (Side view) ดังรูปที่ 4.2 (b) พบว่ามีเส้นสีขาวของอะลูมิเนียม A356 จากด้านบนของชิ้นงาน จนถึงด้านล่างของชิ้นงาน แสดงให้เห็นเนื้ออะลูมิเนียม A356 ที่แทรกตัวมีลักษณะเป็นเส้น โดยความยาวของเส้นอะลูมิเนียมแตกต่างกันเนื่องจากความลึกของรูพรุนที่ต่างกัน ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน มีลักษณะพื้นผิวด้านบน ดังรูปที่ 4.2 (c) ซึ่งมีลักษณะเนื้ออะลูมิเนียม A356 เป็นเส้นอยู่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ลักษณะชิ้นงานด้านข้าง ดังรูปที่ 4.2 (d) มีลักษณะเนื้ออะลูมิเนียมแทรกตัวในรูพรุนทั้งทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 4.2 วัสดุผสม SiC/C-Al (a) ภาพด้านบนของชิ้นงานแนวรัศมี (b) ภาพด้านข้างของชิ้นงานแนวรัศมี (c) ภาพจากด้านบนของชิ้นงานแนวแกน (d) ภาพด้านข้างของชิ้นงานแนวแกน

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์เปรียบเทียบกับความหนาแน่นอ้างอิงของอะลูมิเนียม A356 ซึ่งได้มาจากหล่ออัด มีค่าความหนาแน่น มีค่าเท่ากับ  $2.73 \text{ g/cm}^3$  และความหนาแน่นของวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์มีค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากันทั้งหมด โดยมีค่าเท่ากับ  $2.2 (\pm 0.03) \text{ g/cm}^3$  ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี มีค่าเท่ากับ  $2.35 \text{ g/cm}^3$  โดยกำหนดให้มีสัดส่วนของธาตุประกอบทางเคมีเท่ากับ วัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการทดลอง พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์มีค่าความหนาแน่นที่น้อยกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากทฤษฎี เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์มีรูพรุนอยู่ในโครงสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากกระบวนการหล่ออัด ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของวัสดุผสม SiC/C-Al เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด

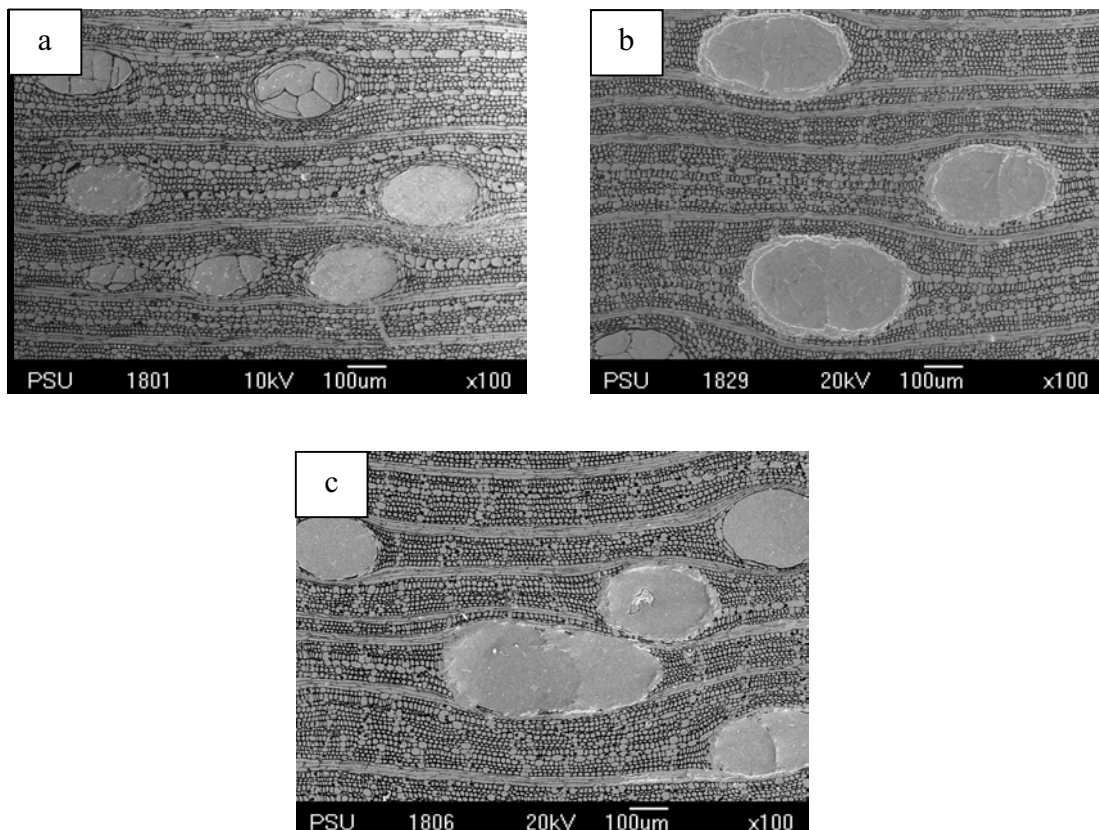
หาค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในเนื้อชิ้นงานตัวอย่างสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 3.2 จะได้ % Porosity มีค่าเท่ากับ 6.38 แสดงว่า ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในเนื้อชิ้นงานตัวอย่างมีค่า 6.38 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างมีค่ามวลความหนาแน่น 93.62 ส่วน และรูพรุน 6.38 ส่วน ใน 100 ส่วน

## 4.2 ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างและการกระจายตัวของเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของวัสดุผสม SiC/C-Al โดยในการวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงานได้ใช้ภาพถ่ายกำลังขยายที่ 100 เท่า โดยกำหนดปัจจัยของชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมี และทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน และวิเคราะห์เวลาการเผาแช่ที่แตกต่างกัน ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันมีผลต่อการแทรกซึมของเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกตัวในโครงสร้าง

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาควัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี

ผลจากการวิเคราะห์ พบว่าเนื้ออะลูมิเนียม A356 มีการกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดของรูพรุนไม่เท่ากัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากธรรมชาติของเนื้อไม้ ลักษณะของอะลูมิเนียม A356 ภายในรูพรุน ไม่เกาะเกี่ยวเป็นโครงสร้าง เมื่อพิจารณา จากรูปที่ 4.4 พบว่า ชิ้นงานที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.4 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ

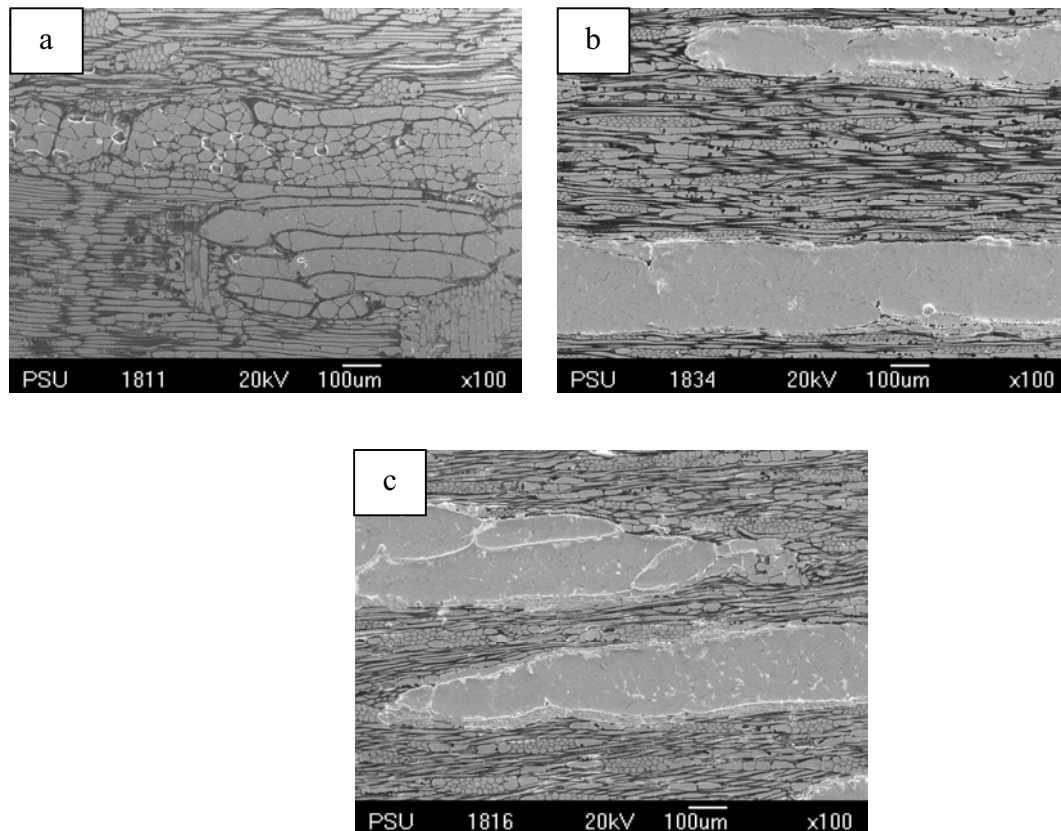


รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของเนื้ออะลูมิเนียมในวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางแนวรัศมี  
ที่ใช้เวลาเผาแช่ (a) 1 ชั่วโมง (b) 2 ชั่วโมง (c) 3 ชั่วโมง

แสดงขนาดของเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกเข้าสู่รูพรุนมีขนาดที่แตกต่างกัน ระยะเวลาเผาที่ 1 ชั่วโมง มีขนาดของอะลูมิเนียมที่เล็กที่สุด และระยะเวลาในการเผาแห้งที่ 3 ชั่วโมง พบว่า มีขนาดของอะลูมิเนียมแทรกในรูพรุนมีขนาดที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งขนาดของอะลูมิเนียม ที่แตกต่างกันคือ ท่อลำเลียงของน้ำ และอาหารของไม้ยางพาราโดย และบริเวณ โดยรอบท่อลำเลียง พบว่ามีเนื้ออะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่ในรูพรุนเช่นกัน มีขนาดเล็ก-ใหญ่ แตกต่างกัน กระจายทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งแสดงว่าที่ระยะเวลาเผาแห้งที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อการแทรกซึมของเนื้ออะลูมิเนียม

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาควัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน

ผลจากการวิเคราะห์ โดยกำหนดกำลังขยายที่ 100 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในของเนื้อไม้ มีลักษณะเนื้ออะลูมิเนียมเป็นเส้นยาวตามทิศทางของโครงสร้างไม้ยางพารา และมีลักษณะแตกต่างกับวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลม



รูปที่ 4.5 การแทรกซึมของเนื้ออะลูมิเนียมในวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางแนวแกน

(a) เวลาเผาแห้ง 1 ชั่วโมง (b) เวลาเผาแห้ง 2 ชั่วโมง (c) เวลาเผาแห้ง 3 ชั่วโมง

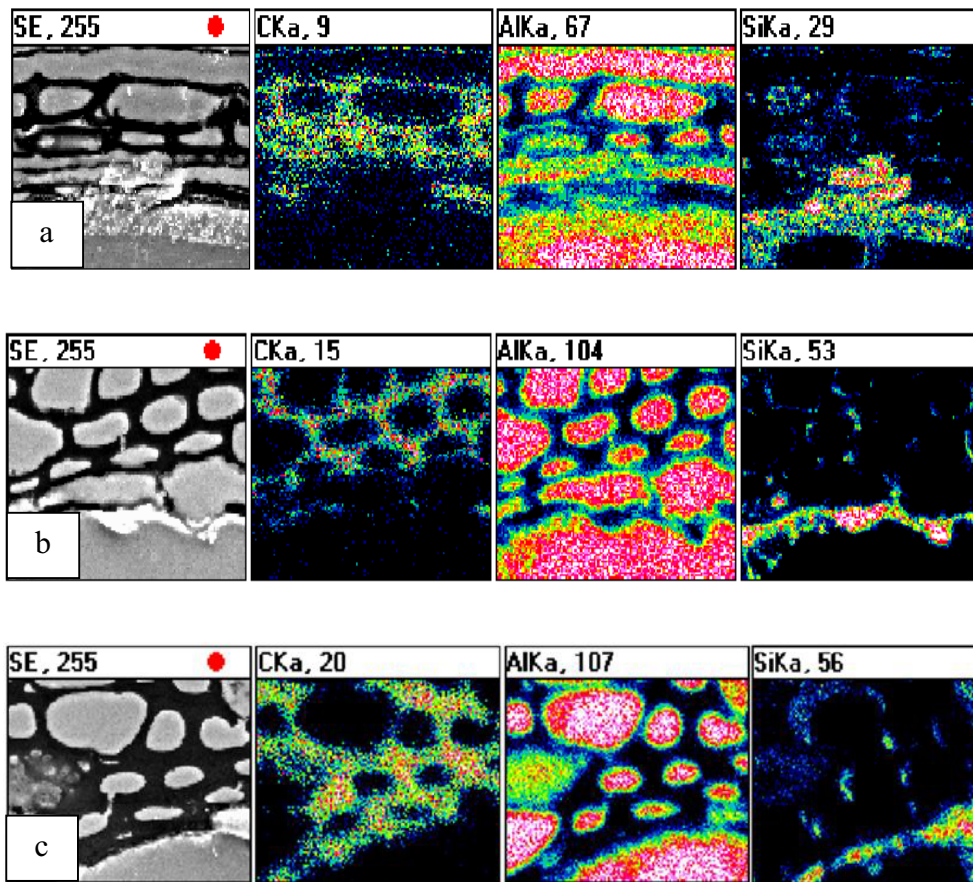
จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าทิศทางโครงสร้างที่แตกต่างกันมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน วัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางแนวแกนและแนวรัศมี พบว่า เนื้ออะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนได้ดีทั้ง 2 ทิศทางโครงสร้าง และลักษณะของเนื้ออะลูมิเนียมมีลักษณะที่แตกต่างกัน เกิดจากทิศทางของโครงสร้างของ ไม้ยางพารา จากรูปที่ 4.5 (a) แสดงชิ้นงานวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน ที่ระยะเวลาเผาที่ 1 ชั่วโมง มีเนื้ออะลูมิเนียมแทรกในรูพรุนเป็นเส้นที่สั้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ระยะเวลาการเผาที่ 2 และ 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.5 (b) และ(c) พบว่าที่ ชิ้นงานที่ระยะเวลาการเผาที่ 2 และ 3 ชั่วโมง มีลักษณะของเนื้ออะลูมิเนียมภายในรูพรุนมีลักษณะเป็นเส้นยาวและมีขนาดใหญ่กว่า ชิ้นงานที่ระยะเวลาเผาที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะของเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกภายในรูพรุนที่แตกต่างกันนั้นเกิดจากโครงสร้างของเนื้อไม้ยางพารา ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและไม่สามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างได้ จากการวิเคราะห์จุลภาค แสดงให้เห็นว่าเนื้ออะลูมิเนียมสามารถแทรกอยู่ภายในรูพรุนของชิ้นงานที่ระยะเวลาเผาที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ได้ทั่วทั้งชิ้นงาน

### 4.3 การวิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเคมีซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ เพื่อวิเคราะห์ธาตุที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งการวิเคราะห์ด้วย X-ray mapping ผลจากการวิเคราะห์แสดงชนิดของธาตุที่ปรากฏในชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดปัจจัยในการวิเคราะห์ได้แก่ วัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมีและวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน โดยมีระยะเวลาในการเผาที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง

#### 4.3.1 การวิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี

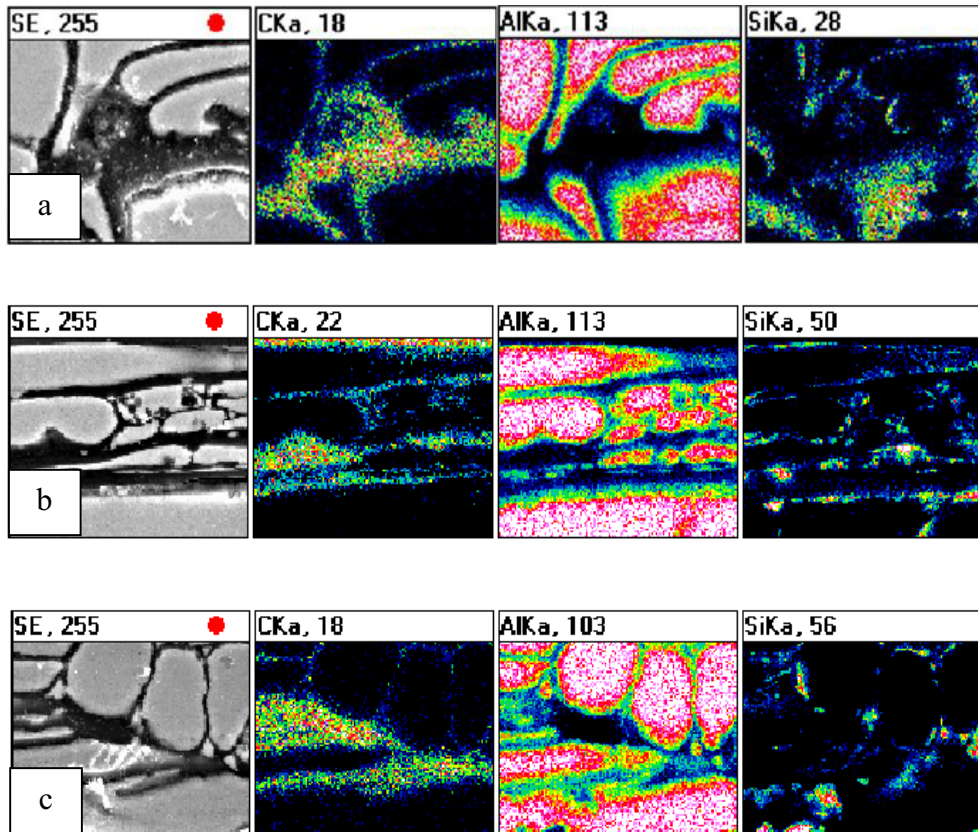
ผลจากการวิเคราะห์ พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al มีส่วนประกอบของธาตุ 3 ชนิดได้แก่ คาร์บอน อะลูมิเนียม และ ซิลิกอน ดังรูปที่ 4.6 พบว่าซึ่งพบว่าการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์มักจะเกิดบริเวณระหว่างเฟสอะลูมิเนียม A356 กับเฟสคาร์บอน โดยสังเกตจากบริเวณที่เกิดซิลิกอนและคาร์บอน หากพบในบริเวณเดียวกันมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ ผลจากระยะเวลาในการเผาที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al มีปริมาณของเนื้ออะลูมิเนียมแทรกซึมในชิ้นงานทั่วทั้งชิ้นงาน และลักษณะการเกิด SiC มีลักษณะที่เหมือนกัน คือเกิดระหว่างเฟสของเนื้ออะลูมิเนียมและเฟสของคาร์บอน และเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกซึมจนเต็มรูพรุนจึงส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.6 ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุ ของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวมาร์มี ที่เวลาเผาแห้งแตกต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง (b) 2 ชั่วโมง (c) 3 ชั่วโมง

#### 4.3.2 การวิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping วัสดุผสม SiC/C-Al แนวมแกน

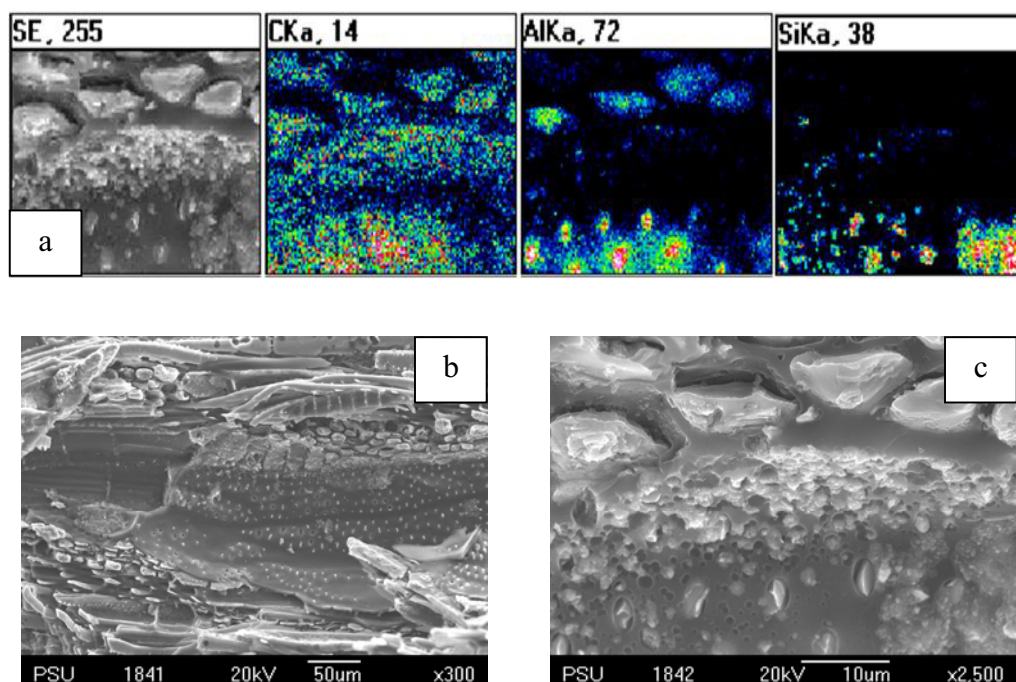
ผลจากการวิเคราะห์ แสดงธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่ได้จากการสังเคราะห์วัสดุผสม SiC/C-Al พบว่ามีธาตุอยู่ภายในชิ้นตัวอย่าง 3 ธาตุได้แก่ คาร์บอน อะลูมิเนียม และซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีลักษณะการเกิดเช่นเดียวกันกับวัสดุผสม SiC/C-Al แนวมแกน พบว่าการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์มักจะเกิดบริเวณระหว่างเฟสอะลูมิเนียม A356 กับเฟสคาร์บอนเช่นเดียวกัน และระยะเวลาเผาแห้งมีผลเช่นเดียวกับวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวมาร์มี



รูปที่ 4.7 ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุ ของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน  
ที่เวลาเผาแห้งแตกต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง (b) 2 ชั่วโมง (c) 3 ชั่วโมง

#### 4.3.3 วิเคราะห์แยกธาตุด้วย X-ray mapping ภายในโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al ซึ่ง เกิดจากการแตกหัก

การวิเคราะห์โครงสร้างที่เกิดจากการแตกหักเป็นการวิเคราะห์ภายในพื้นผิว  
โครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์ข้างต้นที่วิเคราะห์ที่บริเวณพื้นผิวภายนอกของ  
วัสดุผสม SiC/C-Al โดยการวิเคราะห์ภายในวัสดุผสม SiC/C-Al เพื่อให้ทราบองค์ประกอบของธาตุ โดย  
ทำการวิเคราะห์ธาตุพบว่ามีส่วนประกอบของ คาร์บอน อะลูมิเนียม และ ซิลิกอน อยู่ในวัสดุผสม  
SiC/C-Al จากการวิเคราะห์ที่กำลังขยายที่ 300 เท่า และ 2500 เท่า พบว่ามีอะลูมิเนียมแทรกตัวอยู่ใน  
ชิ้นงานมีลักษณะเป็นจุดอยู่ในช่องว่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุจากรอยแตกของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนที่เวลาเผาแช่ 2 ชั่วโมง  
 (a) ภาพการวิเคราะห์แยกธาตุ (b) ภาพโครงสร้างภายในที่ขยาย 300 เท่า  
 (c) ภาพโครงสร้างภายในที่ขยาย 2500 เท่า

ผลการวิเคราะห์แยกธาตุด้วยวิธี X-ray mapping พบว่าธาตุองค์ประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุผสม SiC/C-Al คือ อะลูมิเนียม และ คาร์บอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์วัสดุผสมนี้มีส่วนประกอบของธาตุ อะลูมิเนียม และ คาร์บอน เป็นส่วนใหญ่ โดยมีซิลิกอนแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสของอะลูมิเนียม และ เฟสของคาร์บอน จากรูปที่ 4.8 (a) แสดงให้เห็นว่าธาตุทั้ง 3 ชนิด ได้ คาร์บอน อะลูมิเนียม และซิลิกอน รูปที่ 4.8(b) ภาพโครงสร้างภายในที่กำลังขยาย 300 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นเนื้ออะลูมิเนียมเป็นก้อนฝังอยู่ในรูพรุนของชิ้นงาน รูปที่ 4.8(c) แสดงภาพโครงสร้างที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบก้อนอะลูมิเนียมที่ฝังตัวอยู่ในรูพรุนมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ภายในโครงสร้าง

#### 4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Energy Dispersive X-ray Analysis (EDX)

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Energy Dispersive X-ray Analysis (EDX) พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน ที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 2 ชั่วโมง จำนวน 3 ชิ้น โดยทำการวัดซ้ำชิ้นละ 10 ครั้ง ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิกอน คาร์บอน และ อะลูมิเนียม ปริมาณของคาร์บอนภายในชิ้นงานมีมากถึง 49.13 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของอะลูมิเนียม 36.94 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณซิลิกอน 8.21 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี

ชื่อตัวอย่าง	ซิลิกอนคาร์ไบด์พูนเสริมแรงด้วยอะลูมิเนียม							
	Si	C	Al	O	K	Ca	Fe	Ag
ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์)	8.209	49.13	36.94	3.376	0.309	0.378	0.765	0.884
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.492	2.146	1.375	0.465	0.048	0.042	0.093	0.073

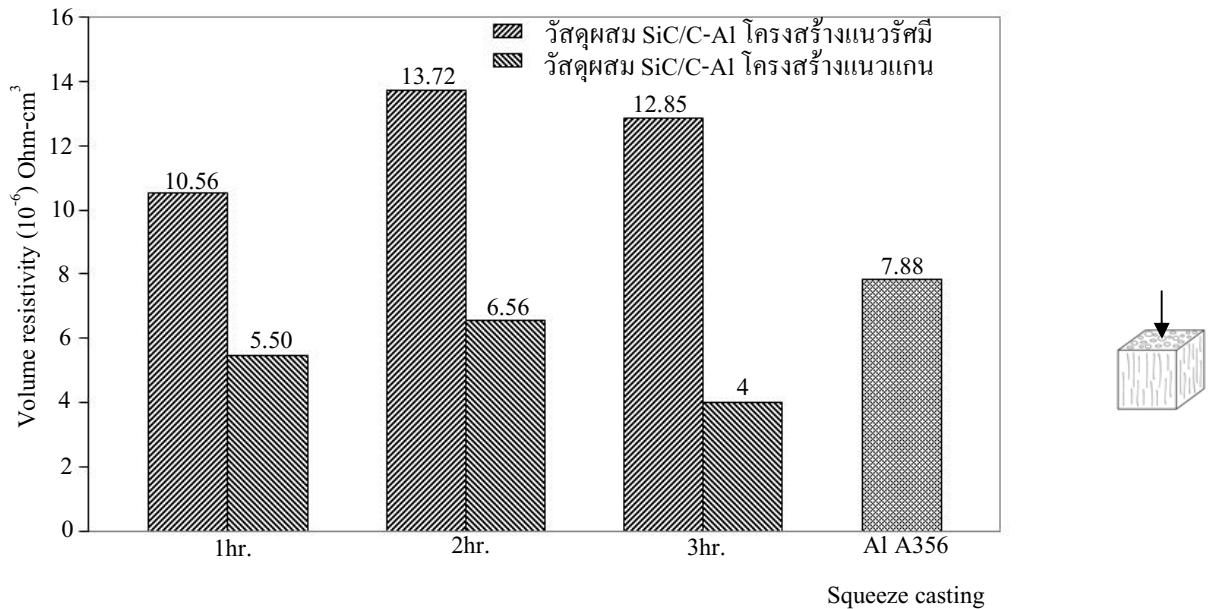
พิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี พบว่า การแทรกซึมของสารละลายที่แทรกซึมเข้าสู่รูพูนภายในชิ้นงานสามารถแทรกได้ในส่วนของรูพูน และส่วนเนื้อไม้ที่อยู่ระหว่างรูพูนสารละลายไม่สามารถแทรกซึมได้ มีผลทำให้ชิ้นงานในส่วนที่เป็นคาร์บอนไม่มีสารละลายซิลิกาเคลือบ เมื่อเข้าสู่กระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันรูพูนที่มีสารละลายซิลิกาเคลือบได้เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ และส่วนที่เหลือยังคงเป็นคาร์บอนเช่นเดิม ซึ่งลักษณะของชิ้นการเคลือบสารละลายซิลิกาและกระบวนการเกิดปฏิกิริยา แสดงก่อนหน้า ดังรูปที่ 1.4

#### 4.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานการนำไฟฟ้า

การทดสอบสมบัติความต้านทานการนำไฟฟ้าซึ่งได้เตรียมตัวอย่างวัสดุผสม SiC/C-Al ในการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าเป็นการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย คือทิศทางของโครงสร้าง และระยะเวลาเผาแซ่ โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ปัจจัยได้แก่ ทิศทางโครงสร้างของชิ้นงานในการหล่ออัด เป็นแนวรัศมีและแนวแกน โดยมีระยะเวลาในการเผาแซ่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ ในการวัดความต้านทานการนำไฟฟ้าโดยวัดเป็นแบบปริมาตร ลักษณะการทดสอบชิ้นงาน โครงสร้างทิศทางแนวแกน และแนวรัศมี

ผลที่ได้จากการทดสอบในชิ้นงานแนวแกน ที่ระยะเวลาเผาแซ่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีค่า 5.50, 6.56 และ 4  $\mu\text{ohm} \cdot \text{cm}^3$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้ง 3 ค่า จากนั้นทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้าแนวรัศมี มีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า ที่ระยะเวลาเผาแซ่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมงมีค่า 10.56, 13.72 และ 12.85  $\mu\text{ohm} \cdot \text{cm}^3$  ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุผสม SiC/C-Al ที่มีทิศทางในการวางโครงสร้างเพื่อการหล่ออัดแตกต่างกัน มีผลต่อค่าของความต้านทานการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งทิศทางโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี มีค่าต้านทานการนำไฟฟ้ามีค่าเป็น 2 เท่าของทิศทางโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน ลักษณะของความต้านทานการนำไฟฟ้าของทิศทางโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี และทิศทางโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน พบว่าที่ระยะเวลาในการเผาแซ่ส่งต่อต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อย ซึ่งค่าความต้านทานของ คาร์บอน และซิลิกอนคาร์ไบด์ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง หรือมีลักษณะเป็นฉนวน ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมนี้เกิดจากเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งแทรกอยู่ในรูพูนชิ้นงาน และการเชื่อมต่อกันของเนื้ออะลูมิเนียมภายในโครงสร้างซึ่งถูก

บังคับโดยลักษณะรูพรุนของไม้ ที่เกิดจากธรรมชาติของเนื้อไม้บางพารา จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวมีผลทำให้ค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของโครงสร้างแนวรัศมีมีค่าความต้านทานมากกว่าความต้านทานการนำไฟฟ้าแนวแกนแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้าระหว่างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนและแนวรัศมี เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 จากการทดลอง

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบการทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้าของวัสดุผสม SiC/C-Al ทิศทางโครงสร้างแนวรัศมีและทิศทางโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน โดยเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 จากการทดลอง เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ได้ค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของอะลูมิเนียม A356 มีค่า 7.88  $\mu\text{ohm-cm}^3$  เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าระหว่างอะลูมิเนียม A356 จากการหล่ออัด กับชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่า วัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน มีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าน้อยที่สุด วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี นำมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความต้านทานของการนำไฟฟ้า พบว่าเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกซึมในรูพรุนมีการวางตัวเป็นโครงสร้าง ซึ่งเนื้ออะลูมิเนียมในโครงสร้างทิศทางแนวรัศมี ไม่มีความต่อเนื่องของเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกซึมภายในรูพรุน โดยเปรียบเทียบกับโครงสร้างทิศทางแนวแกนซึ่งมีความต่อเนื่องของเนื้ออะลูมิเนียมภายในรูพรุน ผลจากการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าพบว่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุผสมแนวรัศมีได้น้อย จึงแสดงผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่ามาก สำหรับวัสดุผสมโครงสร้างแนวแกนมีค่าการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด เนื่องจากทิศทางเนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกตัวในรูพรุนมีเนื้ออะลูมิเนียมแทรกอยู่โครงสร้าง โดยมีอะลูมิเนียมจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและมีส่วนของ

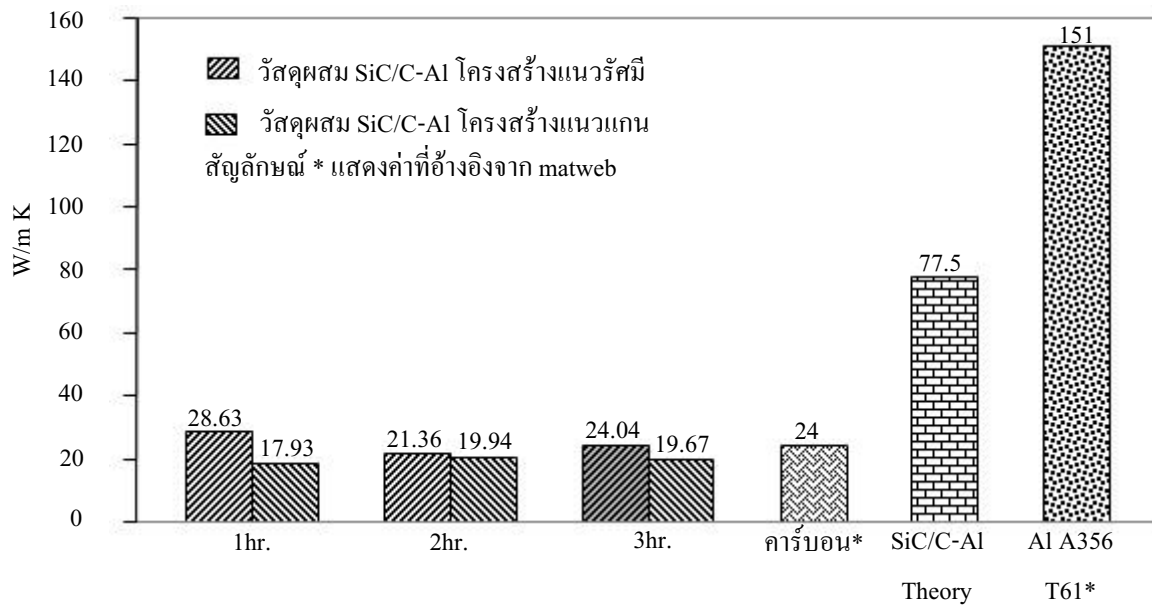
เนื้ออะลูมิเนียมที่แทรกอยู่ภายในรูพรุนมีความต่อเนื่องกันภายในโครงสร้าง ซึ่งแตกต่างจากอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด ซึ่งโครงสร้างภายในไม่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงส่งผลให้การไหลของกระแสไฟฟ้าของวัสดุผสมแนวแกนได้ดีกว่าอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด ผลจากการทดสอบการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าจึงแสดงให้เห็นค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมทิศทางแนวแกนมีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าต่ำกว่าอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด และวัสดุผสมแนวแกนมีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าต่ำที่สุด จากรูปที่ 4.9 ได้แสดงให้เห็นว่า วัสดุผสม SiC/C-Al ที่มีทิศทางในการหล่ออัดที่ต่างกัน ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า และระยะเวลาเผาแซ่ที่แตกต่างส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อย ซึ่งค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างของการนำไฟฟ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกันและผลจากขนาดรูพรุนและโครงสร้างภายในเนื้อไม้ ซึ่งไม่สามารถที่จะควบคุมได้ก่อนทำการทดลอง ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า

#### 4.6 การทดสอบสมบัติการนำความร้อน

ในการทดสอบสมบัติการนำความร้อนเพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนของวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์ ผลจากการทดลองการนำความร้อนเป็นการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย คือ ทิศทางของโครงสร้าง และระยะเวลาเผาแซ่ ซึ่งได้แก่ ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานในการหล่ออัด ทั้งวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน โดยมีระยะเวลาในการเผาแซ่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง

ในการทดสอบสมบัติการนำความร้อนของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี โดยกำหนดให้มีความแตกต่างกันของระยะเวลาในการเผาแซ่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าการนำความร้อน 28.63, 21.36 และ 24.04 W/m-K ตามลำดับ จากค่าที่ได้พบว่ามีการนำความร้อนใกล้เคียงกัน

หลังจากนั้นทำการทดสอบการนำความร้อนของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนพบว่ามีการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี วัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนมีการนำความร้อนที่ระยะเวลาเผาแซ่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมงมีการนำความร้อน 17.93 19.94 และ 19.67 W/m-K ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าในวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนมีการนำความร้อนใกล้เคียงแม้ว่าเวลาการเผาแซ่ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าการนำความร้อนระหว่างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวคาร์โบมีเปรียบเทียบกับวัสดุในเชิงพาณิชย์

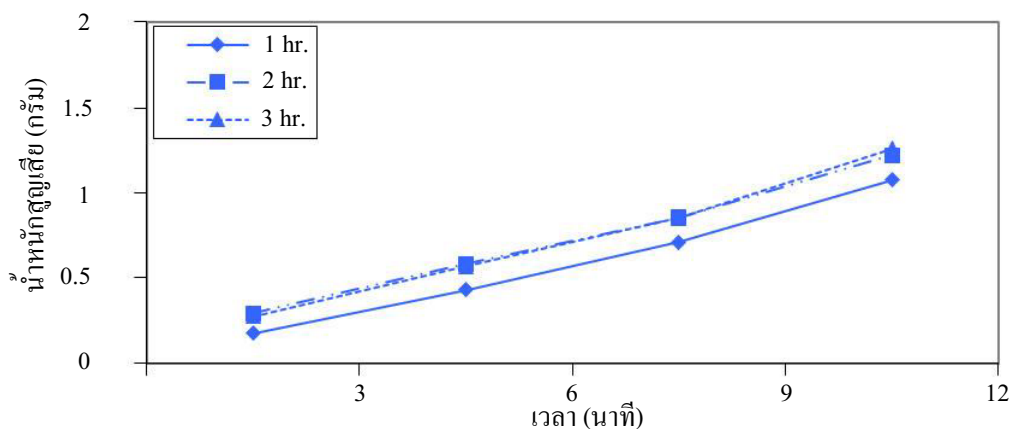
ผลจากการวิเคราะห์การนำความร้อนของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวคาร์โบมีและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน โดยนำผลค่าการนำความร้อนที่ได้เปรียบเทียบ พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวคาร์โบมีมีการนำความร้อนที่สูงกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน โดยมีสาเหตุมาจากลักษณะของโครงสร้างไม่ภายใน บริเวณพื้นผิวของโครงสร้างทิศทางแนวคาร์โบมี มีช่องว่างของรูพรุนซึ่งมีเนื้ออะลูมิเนียมและซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่ภายในส่งผลให้เกิดการนำความร้อนได้ดีกว่าลักษณะโครงสร้างทิศทางแนวแกน ซึ่งลักษณะโครงสร้างของทิศทางแนวแกน มีลักษณะการวางตัวของอะลูมิเนียมเป็นชั้นสลับกับซิลิกอนคาร์ไบด์ และคาร์บอน และคาร์บอนมีสมบัติเป็นตัวต้านทานการนำความร้อน จากการเรียงตัวของโครงสร้างในลักษณะเรียงตัวสลับกัน โดยคาร์บอนชั้นกลางระหว่างเฟสของซิลิกอนคาร์ไบด์ และอะลูมิเนียม จึงส่งผลต่อค่าการนำความร้อนมีค่าน้อย นำค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของวัสดุในเชิงพาณิชย์ (อ้างอิงจากwww.matweb.com) ค่าการนำความร้อน คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และ อะลูมิเนียม A356, T61 (Heat treatment) มีค่าการนำความร้อน 24 77.5 และ 151 W/m-K ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับค่าการนำความร้อนของคาร์บอน ที่เป็นเช่นนี้มีผลมาจากมีปริมาณของคาร์บอนในปริมาณที่สูง จากผลการวิเคราะห์แยกธาตุได้แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณคาร์บอน 49.135 เปอร์เซ็นต์ และกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน จึงส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อน

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Fujisawa, 2004 ซึ่งทำการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ธรรมชาติ โดยกำหนดปัจจัยการศึกษาอุณหภูมิที่ 1400 – 1800 °C และ %wt ของ SiO<sub>2</sub> พบว่าที่อุณหภูมิ 1600 °C โดยมี 10-30%wt SiO<sub>2</sub> มีค่าการนำความร้อนไม่เกิน 10 W/m-K และในงานวิจัยได้กำหนดเวลาเผาแช่ที่แตกต่างกัน พบว่าไม่มีความแตกต่างของค่าการนำความร้อน เมื่อระยะเวลาแตกต่างกัน ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวัสดุธรรมชาติสังเคราะห์เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ มีค่าการนำความร้อนต่ำ เมื่อเทียบค่าการนำความร้อนของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้จากซิลิกอนคาร์ไบด์บริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยทั้งสองมีผลของการศึกษาค่าการนำความร้อนไปในทิศทางเดียวกัน

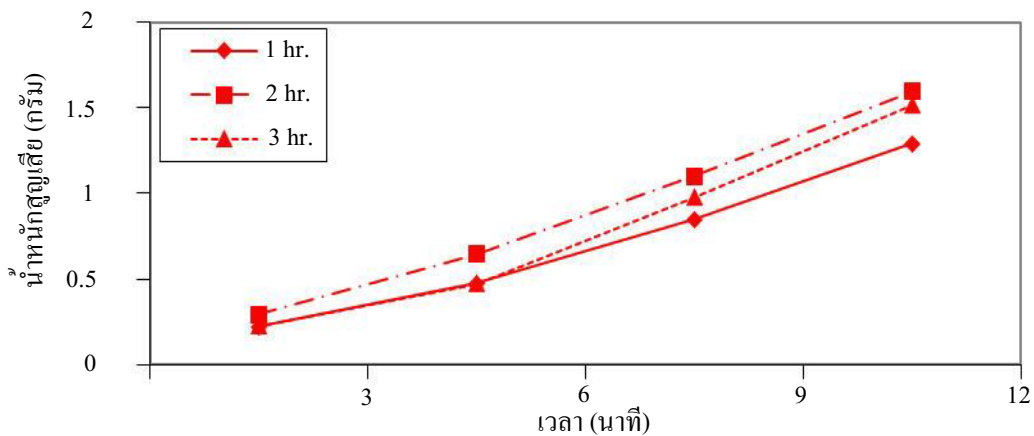
#### 4.7 การทดสอบสมบัติการสึกหรอ

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบโดยการวัดอัตราการสูญเสียน้ำหนักโดยเทียบกับเวลาโดยการแบ่งเวลาในการทดสอบเป็น 4 ช่วง ได้แก่ 3 6 9 และ 12 นาที ตามลำดับการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย คือทิศทางของโครงสร้าง และระยะเวลาเผาแช่ โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ ทิศทางโครงสร้างของชิ้นงานในการหล่ออัด ทั้งแนวรัศมี และแนวแกน โดยมีระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งการทดสอบโดยกำหนดให้พื้นที่ผิวในการทดสอบมีค่าประมาณ 1.8 (± 0.1) ตารางเซนติเมตรโดยทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง การทดลองเริ่มต้นด้วยวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 1 ชั่วโมงอัตราการสึกหรอของวัสดุผสม SiC/C-Al สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด และที่ระยะเวลาในการเผา 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่ามีค่าของการสึกหรอมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.11



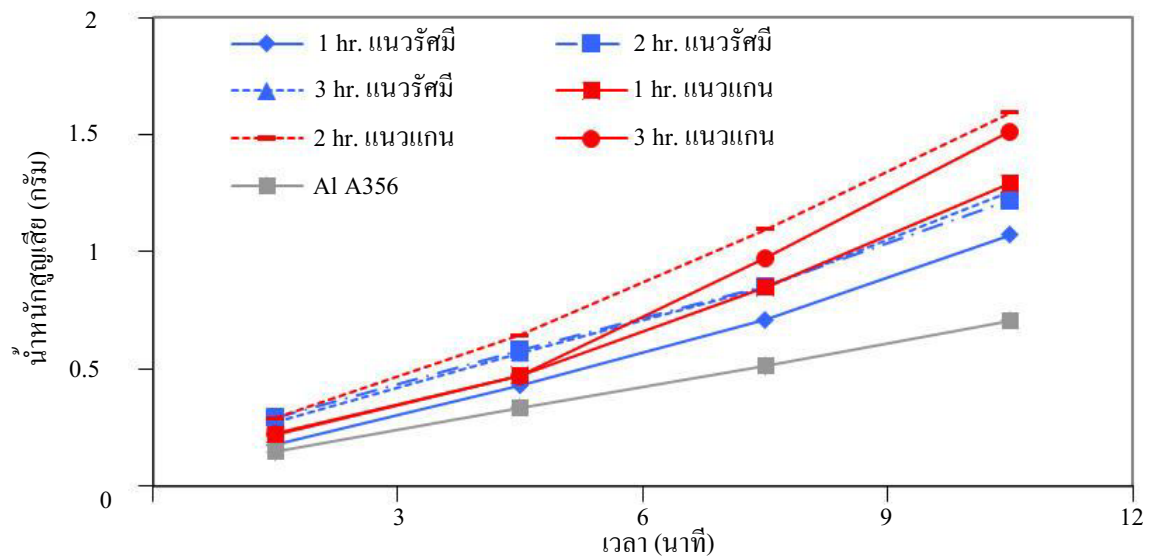
รูปที่ 4.11 กราฟการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมแนวรัศมี

จากนั้นทำการทดสอบวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนพบว่าในช่วงแรก ชิ้นงานที่ระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 1 และ 3 ชั่วโมงมีอัตราการสึกหรอใกล้เคียงกัน ที่เวลาทดสอบที่ 9 นาทีวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ระยะเวลาการเผาแช่ที่ 3 ชั่วโมง มีอัตราการสึกหรอที่มากกว่า และวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ระยะเวลาเผาที่ 2 ชั่วโมงมีอัตราการสึกหรอสูงกว่าระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 1 และ 3 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงค่าการสึกหรอของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน

จากนั้นวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน มาทำการเปรียบเทียบ พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน มีการสึกหรอมีค่าสูงกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี โดยศึกษาได้จากการทดสอบที่ระยะเวลา 3 นาที พบว่า มีอัตราการสึกหรอที่ใกล้เคียงกัน ในวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน หลังจากนั้นที่ทดสอบที่ระยะเวลา 6 นาที พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี และวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน ที่ระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 2 ชั่วโมงมีอัตราการสึกหรอมากที่สุด ทดสอบระยะเวลาที่ 9 นาที พบว่าอัตราการสึกหรอของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนที่ระยะเวลาในการเผาที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีอัตราการสึกหรอมากขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี ทดสอบระยะเวลาที่ 12 นาที พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี ที่เวลาเผาแช่ที่ 1 ชั่วโมงมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำที่สุด วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี ที่เวลาเผาแช่ที่ 3 ชั่วโมง และวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียง โดยที่วัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 2 และ 3 มีอัตราการสึกหรอมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.13

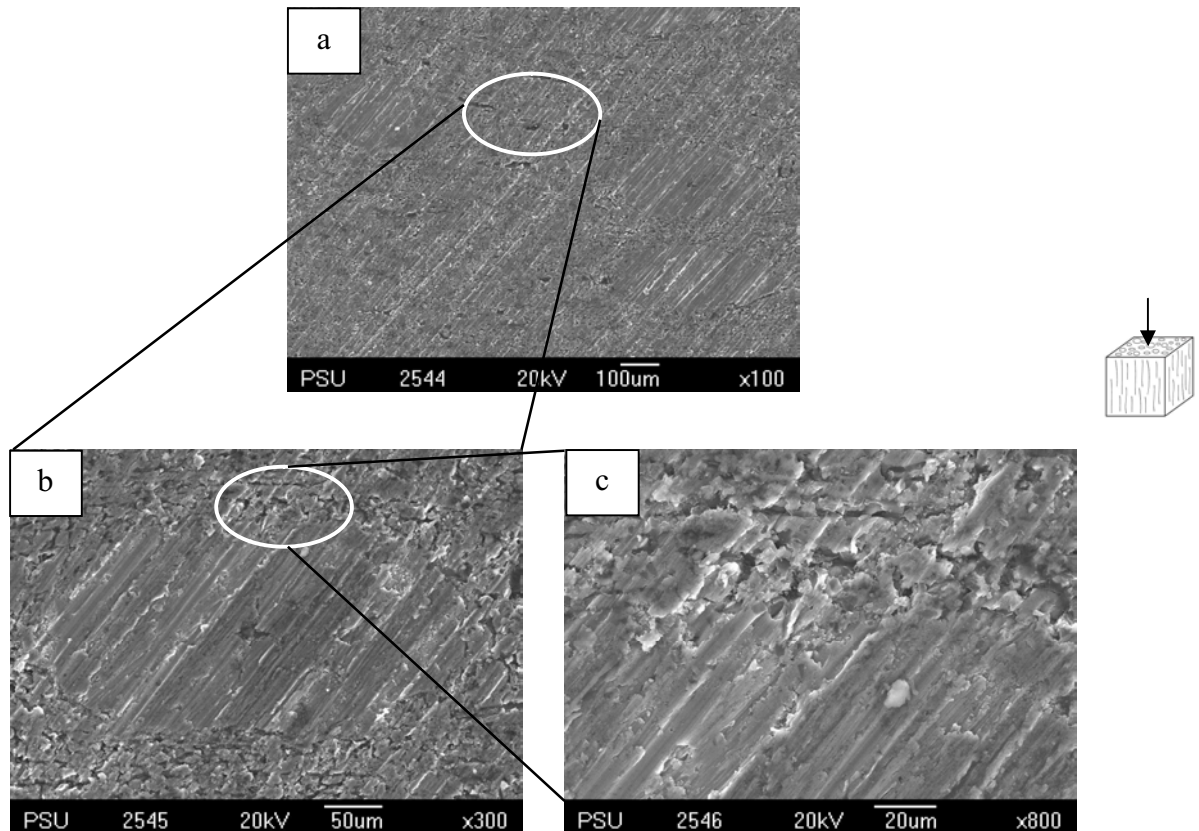


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการสึกหรอโดยการเปรียบเทียบระหว่าง วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี และวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัดซึ่งใช้เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบกับวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่าอะลูมิเนียม A356 มีอัตราการสึกหรอคงที่และมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์ในทุกปัจจัย แต่จากสมบัติของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ พบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ มีสมบัติต้านทานต่อการสึกหรอและคาร์บอนมีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่น โดยมีโครงสร้างของอะลูมิเนียมเสริมแรงอยู่ภายใน ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าการสึกหรอที่ใกล้เคียงกับอะลูมิเนียม A356 จากนั้นวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์ต่อไป

#### การวิเคราะห์ผลของการสึกหรอทางกายภาพของวัสดุผสม SiC/C-Al จากการสังเคราะห์

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงานวัสดุผสม SiC/Al หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อหาสาเหตุการสึกหรอของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี ที่กำลังขยายที่ 100 เท่า, 300 เท่า และ 800 เท่า ตามลำดับ ดังแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพ SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี

(a) ภาพโครงสร้างกำลังขยาย 100 เท่า (b) ภาพโครงสร้างกำลังขยาย 300 เท่า

(c) ภาพโครงสร้างกำลังขยาย 800 เท่า

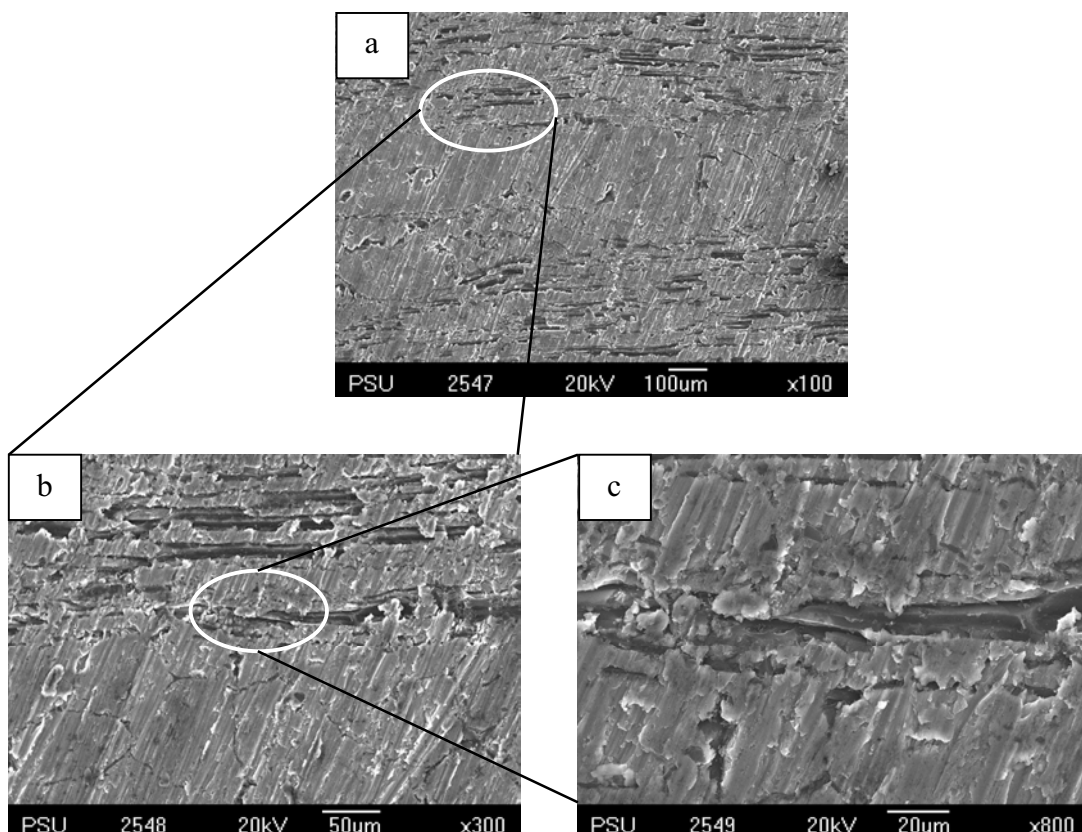
จากการวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.14 (a) พบว่า พื้นผิวมีการสึกหรอทั่วทั้งผิวทดสอบมีทิศทางการสึกหรอไปในทิศทางเดียวกันและมีเส้นรอยแยกขนาดเล็กบนพื้นผิวของวัสดุผสม SiC/C-Al จากนั้นวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 300 เท่า ดังรูปที่ 4.14 (b) ซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณโดยรอบของอะลูมิเนียมพบว่า มีรอยแยกเกิดขึ้นมากมายมีลักษณะไม่สม่ำเสมอโดยรอบชิ้นงาน จึงเพิ่มกำลังขยาย 800 เท่า ดังรูปที่ 4.14 (c) พบว่ามีรอยแยกขนาดใหญ่ระหว่างอะลูมิเนียม A356 และซิลิกอนคาร์ไบด์บริเวณโดยรอบพื้นผิวมีรอยแยกซึ่งมีทั้งขนาดใหญ่และเล็กทั่วทั้งบริเวณผิวทดสอบ

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีดังรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเกิดรอยแยกของเนื้อวัสดุผสม โดยมีสาเหตุการเกิดรอยแยก 2 สาเหตุ คือ 1) ลักษณะตามธรรมชาติของเนื้อไม้ยางพารามีรอยแยกเกิดจาก ท่อลำเลียงน้ำ-อาหาร เนื้อไม้ยางพารา เป็นต้น 2) วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี มีซิลิกอนคาร์ไบด์เกิดขึ้นบริเวณโดยรอบเนื้ออะลูมิเนียม ดังรูป 4.6 ซึ่งเป็นรูป X-ray mapping ซึ่งแสดงไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งบริเวณที่มี ซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอ มีผลทำให้ซิลิกอนคาร์ไบด์ หลุดออก มีผลต่ออัตราความต้านทานการสึกหรอและเกิดรอยแยก เนื่องจาก



ลักษณะของซิลิกอนคาร์ไบด์ แทรกตัวอยู่ในรูพรุนแต่ละรูพรุนซึ่งมีความลึกแตกต่างกัน ซิลิกอนคาร์ไบด์ แทรกอยู่ในรูพรุนโดยไม่มีโครงสร้างใดๆยึดเกาะเกี่ยวไว้ เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอจึงมีผลทำให้ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีความแข็งสูง เมื่อทดสอบการสึกหรอทำให้ ซิลิกอนคาร์ไบด์ หลุดออกของจากเนื้อไม้ จึงแสดงให้เห็นเป็นรอยแยกขนาดใหญ่บริเวณ โดยรอบเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกันกับบริเวณที่เกิด ซิลิกอนคาร์ไบด์

จากนั้นทำผลวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน ที่กำลังขยายที่ x100 เท่า x300 เท่า และ x800 เท่า ตามลำดับดังรูปที่ 4.15 a) จากการวิเคราะห์ที่ กำลังขยาย x100 เท่า พบว่า พื้นผิวมีการสึกหรอและมีรอยแยกซึ่งเป็นทิศทางตัดขวางกับทิศทางการสึกหรอและมีรอยแยกมากกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี ผลของการวิเคราะห์ที่ กำลังขยาย x300 เท่า ดังรูปที่ 4.15 b) ซึ่งแสดงให้เห็นช่องว่างขนาดใหญ่ในแนวยาวซึ่งเกิดจากรูพรุนตามธรรมชาติของไม้ ผลของการวิเคราะห์ที่ กำลังขยาย x800 เท่า ดังรูปที่ 4.15 c) พบว่ามีช่องว่างรอยแยกเป็นแนวยาวไปในทิศทางของโครงสร้างไม้ และมีทิศทางโครงสร้างตั้งฉากกับทิศทางของการทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 4.15 ภาพ SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน  
 (a) ภาพโครงสร้างกำลังขยาย 100 เท่า (b) ภาพโครงสร้างกำลังขยาย 300 เท่า  
 (c) ภาพโครงสร้างกำลังขยาย 800 เท่า

จากการวิเคราะห์ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน มีจำนวนและขนาดของช่องว่างรอยแยกที่มากกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน ซึ่งมีสาเหตุการเกิดรอยแยกภายในเนื้อวัสดุผสม เช่นเดียวกันกับวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี แต่เนื่องจากการทดสอบวัสดุผสม SiC/Al แนวแกน มีลักษณะโครงสร้างรูพรุนวางตามยาวขนานกับทิศทางการทดสอบ เมื่อทดสอบ SiC บางส่วนหลุดออกจากเนื้อชิ้นงานในทิศทางเดียวกับรูพรุนของเนื้อไม้ มีลักษณะเป็นเส้นยาว ซึ่งจากภาพที่ 4.16 (c) แสดงให้เห็นว่าเกิดรอยแยกขนาดใหญ่ จึงส่งผลต่อค่าความต้านทานการสึกหรอของวัสดุผสม SiC/Al แนวแกน

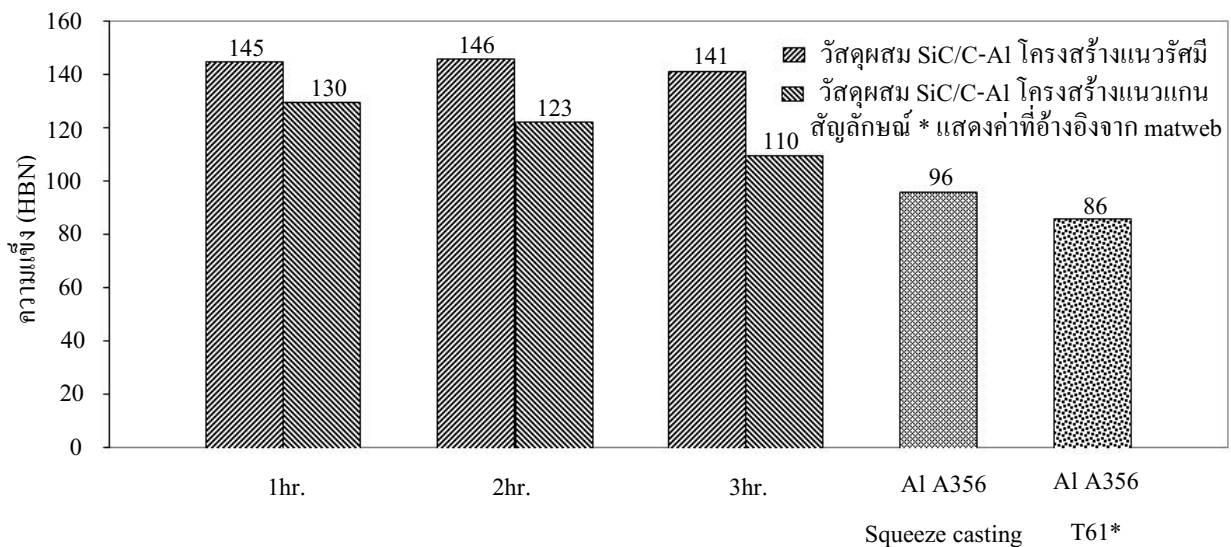
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบการสึกหรอ พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนมีอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าโดยมีสาเหตุมาจากโครงสร้างจากทิศทางของรูพรุนตามธรรมชาติ และช่องว่างระหว่างรอยต่อของพื้นผิวที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบการสึกหรอกับแท่งอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่ออัด พบว่า วัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์มีความความหนาแน่นน้อยกว่า และช่องว่างภายในเนื้อวัสดุผสมส่งผลต่ออัตราการสึกหรอ โดยแสดงให้เห็นจากอัตราการสึกหรอในแต่ละช่วงเวลามีความคงที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับแท่งอะลูมิเนียม A 356

#### 4.8 การทดสอบสมบัติความแข็ง

การทดสอบความแข็งได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแบบรอกเวล และแปลงเป็นหน่วย บริเนล ในการทดลองได้กำหนดปัจจัยในการทดสอบคือ ทิศทางโครงสร้างวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน โดยมีระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ เริ่มการทดสอบวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีโดยกำหนดให้มีระยะเวลาในการเผาแช่ที่แตกต่างกัน ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมงซึ่งค่าความแข็ง 145 146 และ 141 HBN ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้วัสดุผสม SiC/C-Al มีค่าของความแข็งในวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เนื่องจากทิศทางโครงสร้างแนวรัศมีมีลักษณะโครงสร้างแนวตั้งสามารถที่จะรับแรงกดจากการทดสอบได้ดี และปัจจัยด้านระยะเวลาเผาแช่ที่แตกต่างกันจึงส่งผลกระทบต่อค่า ความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al เพียงเล็กน้อย จากนั้นทดสอบความแข็งวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนโดยกำหนดให้มีระยะเวลาในการเผาแช่ที่แตกต่างกัน ที่ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งค่าความแข็ง 130 123 และ 110 HBN ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าระยะเวลาในการเผาที่ 1 ชั่วโมง ความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al แข็งแรงที่สุดและเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเผาแช่กลับ พบว่ามีความแข็งของชิ้นงานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16

จากผลการทดสอบความแข็งพบว่าระยะเวลาในการเผาแช่ที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็งลดลง เนื่องจากวัสดุผสม SiC/C-Al มีส่วนประกอบของ คาร์บอน เมื่อเพิ่มระยะเวลาเผาแช่ทำให้คาร์บอนส่วนหนึ่งทำปฏิกิริยากับความร้อนกลายเป็น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งการสูญเสียคาร์บอนบางส่วนได้ส่งผลต่อค่าความแข็งระยะเวลาเผาแช่ที่มากขึ้นจึงมีผลต่อค่าความแข็ง

ให้มีค่าลดลง และค่าความแข็งจากการทดสอบทิศทางโครงสร้างที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีมีค่าความแข็งมาก เนื่องจากทิศทางโครงสร้างแนวรัศมีสามารถที่จะรับแรงกดที่เกิดจากการทดสอบความแข็งได้มากกว่าทิศทางแนวแกน ซึ่งทิศทางแนวแกนมีลักษณะโครงสร้างตั้งฉากกับทิศทางทดสอบ โครงสร้างภายในของวัสดุผสม SiC/C-Al มีลักษณะการวางตัวของโครงสร้างเป็นชั้นๆสลับกัน เมื่อทำการทดสอบความแข็งจึงส่งผลให้คาร์บอนภายในโครงสร้างเกิดการยุบตัวจึงมีผลต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบความแข็งวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีเปรียบเทียบกับวัสดุในเชิงพาณิชย์

เมื่อนำค่าความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al ทั้งสองแนวมาเปรียบเทียบกันพบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี มีความแข็งมากกว่าวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกนในทุกระยะเวลาของการเผาแช่ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ อะลูมิเนียม A356 ซึ่งได้จากกระบวนการหล่ออัด และอะลูมิเนียม A356, T61 ซึ่งใช้ในเชิงพาณิชย์ (อ้างอิงจาก [www.matweb.com](http://www.matweb.com)) พบว่าค่าความแข็งของอะลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการหล่ออัดมีค่าความแข็ง 96 HBN อะลูมิเนียม A 356, T61 มีค่าความแข็ง 86 HBN ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุผสม SiC/C-Al ที่ได้จากการสังเคราะห์พบว่าวัสดุผสม SiC/C-Al จากการสังเคราะห์มีค่าความแข็งมากกว่าในทุกปัจจัยในการทดลองเกิดจากซิลิกอนคาร์ไบด์และอะลูมิเนียมที่แทรกอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ มีค่าความแข็งสูง เมื่อเป็นส่วนประกอบของวัสดุผสมนี้ทำให้วัสดุผสม SiC/C-Al มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียม A 356

#### 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง

สำหรับในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al ซึ่งได้กำหนดปัจจัยของการวิเคราะห์ได้แก่

1) ทิศทางโครงสร้างของวัสดุผสม SiC/C-Al ในกระบวนการหล่ออัดได้แก่ วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมีและวัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน

2) ระยะเวลาในการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 1,600 °C ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

เริ่มต้นการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการทดสอบค่าความแข็งของซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้ออะลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของวัสดุผสม SiC/C-Al

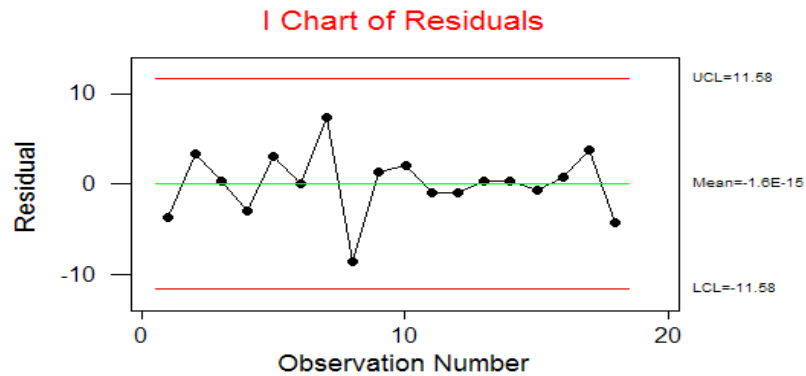
		Holding time		
		1 hr.	2 hr.	3 hr.
Direction	โครงสร้าง	126	130	110
	ชิ้นงานแนวแกน	133	114	110
	(Axial sample)	130	124	109
	โครงสร้าง	142	148	142
	ชิ้นงานแนวรัศมี	148	145	145
	(Radial sample)	145	145	137

จากข้อมูลค่าความแข็งจากการทดลอง ทำการคำนวณค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรม Minitab V.13 ได้ผลการคำนวณต่างๆ ดังนี้

##### 4.9.1 ผลของ Residual Plot for yield

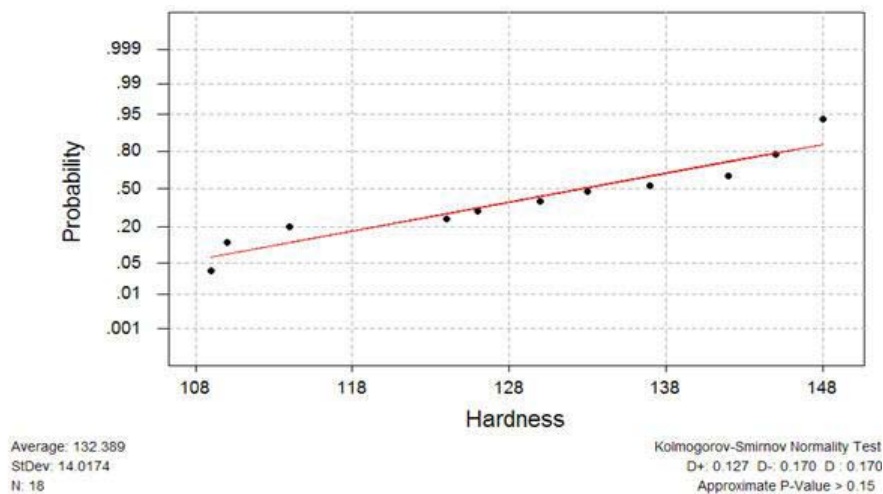
###### การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.17 เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่ จากลักษณะของจุดที่ควรให้ความสำคัญ คือ 1) มี 5 จุดติดต่อกันที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเส้นกึ่งกลาง 2) มี 5 จุดติดต่อกันที่แสดงแนวโน้มขึ้นหรือลงตลอด 3) มีจุดที่เปลี่ยนระดับอย่างรวดเร็ว 4) มีจุดที่แสดงรูปแบบเป็นวัฏจักร



รูปที่ 4.17 ลักษณะข้อมูลแบบสุ่ม

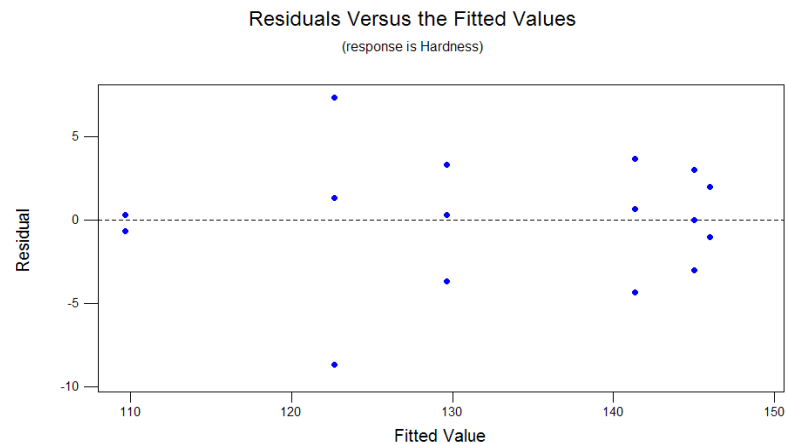
จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.17 ไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟ ที่แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม และอยู่ในช่วง UCL (Upper Control Limit) และ LCL (Lower Control Limit) เนื่องจากข้อมูลมีน้อยกว่า 30 ตัว จึงพิจารณา จากรูป Normal Probability Plot of the Residuals



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

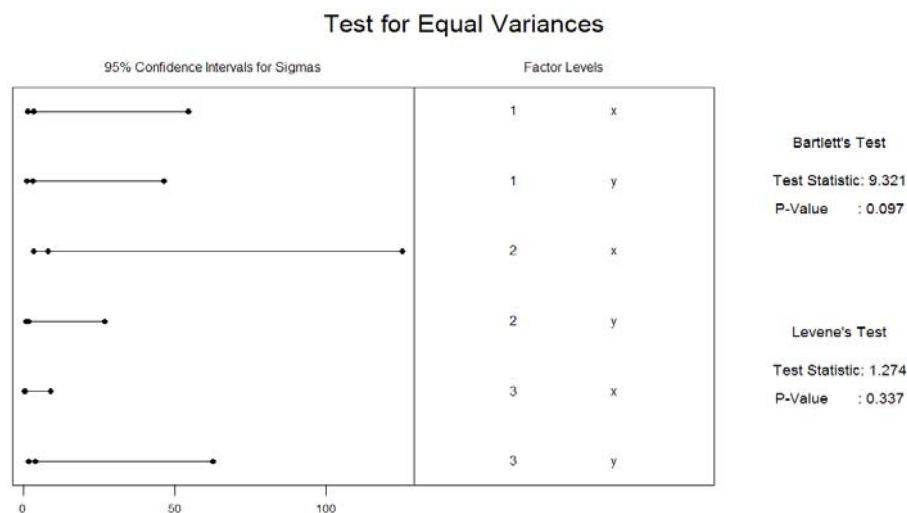
จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้น ทำให้ไม่มั่นใจในการกระจายตัวของข้อมูล จึงได้มีการทดสอบ Normal Probability

ผลจากรูปที่ 4.18 มีค่า P - Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างจากการแจกแจงปกติที่แสดงด้วยเส้น สรุปได้ว่าการแจกแจงแบบปกติ พิจารณา Residuals Vs fits ข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน มีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values

ผลที่ได้จากรูปที่ 4.19 มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่างจากจุดศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลอง จึงมีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนโดยใช้การวิเคราะห์แบบ Bartlett's Test ต่อไป



รูปที่ 4.20 แสดงค่าของ Test for Equal Variances

ผลจากการวิเคราะห์ จากดังรูปที่ 4.20 แสดงว่าช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็งแรง จากปัจจัยต่างๆ โดยกำหนดให้ สัญลักษณ์ x แทนชิ้นงานทิศทางโครงสร้างแนวแกน และสัญลักษณ์ y แทนชิ้นงานทิศทางโครงสร้างแนวรัศมี โดยเลข 1 2 และ 3 แทนจำนวนชั่วโมงที่ใช้ในการเผาแห้ง ผลจากการวิเคราะห์ แสดงค่าความแปรปรวนที่เวลาเผาแห้ง 2 ชั่วโมง ชิ้นงานทิศทางโครงสร้างแนวแกน

พบว่ามีความแปรปรวนสูงกว่าปัจจัยอื่นๆ และที่ปัจจัยการทดลองเวลาเผาแช่ 3 ชั่วโมงซึ่งงานทิศทาง โครงสร้างแนวแกน มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

ทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวน จากสมมติฐาน

$$H_0 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 \text{ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 6 เท่ากัน}$$

$$H_1 = \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \text{ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 6 ไม่เท่ากัน}$$

ที่ระดับ Error Type I (Alpha:  $\alpha$ ) = 0.05

ผลการคำนวณที่ได้ค่า P – Value (Bartlett's Test) = 0.097 มีค่ามากกว่า เทียบกับ ( $\alpha = 0.05$ ) แสดงว่าสัดส่วนของความแปรปรวนในรูป F มีค่าน้อย ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 6 แบบมีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ ) จากนั้นจึงทำ การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบ จำแนก 2 ทาง ต่อไป

#### 4.9.2 ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

##### 1.Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน ของอิทธิพลของปัจจัย ทิศทาง โครงสร้างซึ่งงาน  
(โครงสร้างซึ่งงาน แทนด้วย สัญลักษณ์  $\tau$ )

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 \quad \text{สำหรับทุกระดับอิทธิพลของทิศทาง โครงสร้างซึ่งงานในการทดลองมี}$$

ค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน

$$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \quad \text{สำหรับบางระดับอิทธิพลของทิศทาง โครงสร้างซึ่งงานในการทดลองมี}$$

ค่าความแข็งแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.4 ของ Direction ค่าของ  $F = 139.56$

**เขตปฏิเสธ** จะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ถ้า  $F > F_{0.95 ; 1, 12} = 4.75$

เนื่องจาก  $F = 139.56$  มีค่ามากกว่า 4.75 จึงปฏิเสธ  $H_0$  ซึ่งอิทธิพลของทิศทาง โครงสร้างที่ แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็ง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยเวลาของการเผาเซ้  
(เวลาของการเผาเซ้แทนด้วย สัญลักษณ์  $\beta$  )

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$  สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัยเวลาของการเผาเซ้มีค่าความ  
แข็งไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$  สำหรับบางระดับ อิทธิพลของปัจจัยเวลาของการเผาเซ้มีค่าความ  
แข็งแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.4 ของ Holding time ค่าของ  $F = 12.81$

**เขตปฏิเสธ** จะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ถ้า  $F > F_{0.95; 2, 12} = 3.89$

เนื่องจาก  $F = 12.81$  มีค่ามากกว่า 3.89 จึงปฏิเสธ  $H_0$  ซึ่งอิทธิพลของเวลาในการเผาเซ้ที่  
แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็ง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

## 2. Factor Interaction Effect

ทดสอบ Interaction ของทิศทาง โครงสร้างชิ้นงานในการทดลอง (Factor A) และปัจจัย  
เวลาของการเผาเซ้ (Factor B)

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$  for all  $i, j$  ทุกระดับ  $i, j$  ไม่มีอิทธิพลของ Interaction  
( $i = 1, 2 ; j = 1, 2, 3$ )

$H_1 : at least one (\tau\beta)_{ij} \neq 0$  มีบาง  $i, j$  มีอิทธิพลของ Interaction  
( $i = 1, 2 ; j = 1, 2, 3$ )

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.4 ของ Interaction ค่าของ  $F = 5.65$

**เขตปฏิเสธ** จะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ถ้า  $F > F_{0.95; 2, 12} = 3.89$

เนื่องจาก  $F = 5.65$  มีค่ามากกว่า 3.89 จึงปฏิเสธ  $H_0$  ซึ่งอิทธิพลของinteraction มีเงื่อนไข  
บางตัวของทิศทาง โครงสร้างและระยะเวลาเผาเซ้ ส่งผลต่อค่าความแข็ง ที่ระดับ นัยสำคัญ 0.05



### ตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA

Two-way ANOVA: Hardness versus Direction, Holding time

Analysis of Variance for Hardness						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Direction	1	2473.4	2473.4	139.56	0.000	
Holding time	2	454.1	227.1	12.81	0.001	
Interaction	2	200.1	100.1	5.65	0.019	
Error	12	212.7	17.7			
Total	17	3340.3				

S = 4.210

R-Sq = 93.63%

R-Sq (Adj) = 90.98%

#### 4.9.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง

1. จากการวิเคราะห์ความถูกต้อง พบว่า ข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติและอยู่ภายใต้พิสัยควบคุม

1.1 ในส่วน Normal Plot พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงและเมื่อวิเคราะห์ค่า

P- value มีค่ามากกว่า 0.05 พบว่าการแจกแจงเรียงตัวของข้อมูลเป็นปกติ

1.2 ส่วนของ Residual Vs fit พบว่าที่ความผันแปรของข้อมูลที่ Fit ประมาณ 148 ยังมีความแปรปรวนของข้อมูลอาจไม่คงที่

1.3 วิเคราะห์ P – Value (Bartlett’s Test) มีซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.097 (เทียบกับ  $\alpha = 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของความแปรปรวนในรูป F มีค่าน้อย ฉะนั้นแสดงว่าความแปรปรวนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2. การวิเคราะห์ Test for Equal Variances ความแปรปรวนของความแข็งแรงของชิ้นงาน ผลจากปัจจัยต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ยกเว้นที่ระยะเวลาเผาแช่ 2 ชั่วโมง ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน มีความแปรปรวนสูงกว่าการทดลองอื่นๆ และที่ระยะเวลาเผาแช่ 3 ชั่วโมงทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

3. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 93.63 %. และ R-Sq(adj) = 90.98 มีค่าสูง แสดงว่าออกแบบการทดลองดีแล้วและข้อมูลมีปริมาณเพียงพอต่อการทดลอง

4. จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.3 เมื่อกำหนดค่า  $\alpha = 0.05$  พิจารณา Interaction AB ค่า P- Value = 0.019 Main Effect ปัจจัย ทิศทางการวางตัวอย่างในการทดลอง (Factor A) P-value <0.000 และ

ปัจจัยเวลาของการเผาแซ่ (Factor B) P-value <0.002 ทำให้สรุปได้ว่าปัจจัยทั้ง 2 มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง

4.1 Main Effect (ทิศทางโครงสร้าง, ระยะเวลาในการเผาแซ่) พิจารณาค่า F จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4.45 และ 0 ถึง 3.89 ตามลำดับ (เรียกช่วงดังกล่าวว่า พื้นที่แห่งการยอมรับ) แต่จากการทดลอง ค่า F ของ ทิศทางโครงสร้าง และระยะเวลาในการเผาแซ่ มีค่าเท่ากับ 139.56 และ 12.81 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าไม่อยู่ในบริเวณยอมรับ (reject  $H_0$ ) จึงแสดงว่าความผันผวนของความแข็งเกิดจากสาเหตุของทิศทางโครงสร้าง และระยะเวลาในการเผาแซ่

4.2 Interaction Effect ซึ่งมีค่า 5.65 ซึ่งอยู่นอกช่วงการยอมรับ (ช่วงการยอมรับ 0 ถึง 3.89) ซึ่งแสดงว่าผลของ Interaction ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน

#### 4.10 ผลการทดสอบความหนาแน่นและสมบัติต่างๆของวัสดุผสม SiC/C-Al

ผลจากการทดสอบ ค่าความหนาแน่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม SiC/C-Al แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและสมบัติของวัสดุผสม SiC/C-Al

	วัสดุผสม SiC/C-Al แนวรัศมี			วัสดุผสม SiC/C-Al แนวแกน			Al A356 Squeeze casting
	ระยะเวลาเผาแซ่ (ชั่วโมง)			ระยะเวลาเผาแซ่ (ชั่วโมง)			
	1	2	3	1	2	3	
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.73
ความต้านทานการ นำไฟฟ้า ( $\mu\text{ohm} \cdot \text{cm}^3$ )	10.56	13.72	12.85	5.5	6.56	4	7.88
ค่านำความร้อน (W/m-K)	28.63	21.36	24.04	17.93	19.94	19.67	151*
ค่าความแข็ง (HBN)	145	146	141	130	123	110	96

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ \* เป็นค่าที่ได้จาก [www.matweb.com](http://www.matweb.com)

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการศึกษา สมบัติทางกล และทางความร้อนของซิลิกอนคาร์ไบด์พอร์ซัน และวัสดุผสมเนื้อ อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอน คาร์ไบด์พอร์ซัน ที่สังเคราะห์จากไม้ยางพารา โดยเป้าหมายหลักของโครงการนี้ คือการนำเอาซิลิกอนคาร์ไบด์พอร์ซันที่ได้จากการสังเคราะห์จากไม้ยางพารา มาผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยวิธีการแทรกซึมหรืออินฟิวเทรชันด้วยความดันและทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติที่สำคัญอื่นๆซึ่งจากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ

1. สามารถนำชิ้นงานคาร์บอนซิลิกอนคาร์ไบด์พอร์ซันที่มีโครงสร้างแนวแกนและแนวรัศมี มาขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้โดยกระบวนการ Squeeze Casting
2. ผลจาก X-ray mapping ของผิวชิ้นงานวัสดุผสม พบว่า ชิ้นงานวัสดุผสม มีส่วนประกอบของธาตุ 3 ชนิดได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอน และอะลูมิเนียม ผลจากการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบวัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่า ซิลิกอนในทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมีมีปริมาณของซิลิกอนมากกว่า ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างจากการแตกหักเพื่อวิเคราะห์ภายใน โครงสร้าง ซึ่งพบว่าอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่า กระบวนการ Squeeze Casting สามารถอัดเนื้ออะลูมิเนียมเข้าสู่รูพอร์ซันได้ทั่วทั้งชิ้นงาน
3. ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าชิ้นงานวัสดุผสมนี้มีส่วนประกอบของธาตุหลักๆ 3 ธาตุ ได้แก่ ซิลิกอน คาร์บอน และ อะลูมิเนียม ซึ่งสัดส่วนของเฟสต่างๆจากการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่ามีเฟสของซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่ประมาณ 9.5% เฟสของคาร์บอนจะมีอยู่ประมาณ 47.5% และเฟสของอะลูมิเนียมจะมีประมาณ 43%
4. จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นพบว่าชิ้นงานวัสดุผสมที่ผลิตได้ยังมีโพรงอากาศอยู่ประมาณ 6.38% ซึ่งแสดงว่าการแทรกซึมของอะลูมิเนียมเข้าไปในโพรงของเซรามิกยังไม่สมบูรณ์ทั้งหมด ซึ่งอาจจะเป็นเพราะในโพรงของเซรามิกซึ่งได้จากเนื้อไม้ยางพาราประกอบไปด้วยรูหลายขนาด ซึ่งก็มีรูที่เล็กมากและอาจมีรูปิดประกอบอยู่ด้วย ทำให้น้ำอะลูมิเนียมไม่สามารถแทรกซึมได้ทั้งหมด

## 5.2 สรุปผลจากทางทดสอบสมบัติ

### 5.2.1. ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการนำไฟฟ้า

การทดสอบความต้านทานการนำไฟฟ้าเพื่อให้ทราบถึงสมบัติของวัสดุผสมมีลักษณะเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือตัวต้านทาน ผลของการทดสอบนำมาเปรียบเทียบผลของกระแทกจากการเปลี่ยนปัจจัยของแต่ละชิ้นงานวัสดุผสม และได้เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง มีผลจากการทดลองดังนี้

1. ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน ระยะเวลาเผาแช่ส่งผลให้ค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ผลจากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาเผา 2 ชั่วโมง มีความต้านทานการนำไฟฟ้ามากที่สุด มีค่า  $6.56 \mu\text{Ohm-cm}^3$

2. ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมี พบว่า มีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่อเทียบกับ ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน ระยะเวลาเผาที่ 2 ชั่วโมง พบว่ามีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้ามากที่สุดเช่นกัน มีค่า  $13.72 \mu\text{ohm-cm}^3$

3. เปรียบเทียบค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของวัสดุที่ได้ จากการสังเคราะห์กับ อะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าแนวรัศมี มีค่ามากกว่า อะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอะลูมิเนียม A 356 มีค่า  $7.88 \mu\text{ohm-cm}^3$  :

4. ผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าปัจจัยระยะเวลาในการเผาแช่ที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าน้อย สำหรับปัจจัยทิศทาง โครงสร้างที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความต้านทานการนำไฟฟ้ามาก ค่าการนำไฟฟ้าของคาร์บอนและ SiC เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี ดังนั้น ค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันมีผลจากการแทรกซึมเนื้ออะลูมิเนียมเหลวในรูพรุน

### 5.2.2. ผลการทดสอบสมบัติการนำความร้อน

การทดสอบการนำความร้อน เพื่อนำค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงานวัสดุผสมเปรียบเทียบผลของตัวแปรแต่ละตัว และเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนกับวัสดุที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ มีผลการทดลองดังนี้

1. ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวแกน พบว่าที่ระยะเวลาในการเผาแช่ที่แตกต่างกัน มีผลต่อค่าการนำความร้อน จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 1 ชั่วโมงมีค่าการนำความร้อนมากที่สุด ที่  $28.63 \text{ W/m-k}$

2. ทิศทางโครงสร้างชิ้นงานแนวรัศมี พบว่ามีค่าการนำความร้อนน้อยกว่า ทิศทางโครงสร้างแนวแกน จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 2 และ 3 ชั่วโมง มีค่าการนำความร้อนมากที่สุด ที่  $19.94$  และ  $19.67 \text{ W/m-k}$  ตามลำดับ

3. เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์และวัสดุในเชิงพาณิชย์ 3 ตัวอย่าง ได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และอะลูมิเนียม A356 พบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุผสมจากการทดลองมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับค่าการนำความร้อนของคาร์บอน จากการศึกษาผลการวิเคราะห์แยกธาตุพบว่า ชิ้นงานวัสดุผสมจากการทดลองมีส่วนประกอบของธาตุ คาร์บอนอยู่ในชิ้นงานวัสดุผสมในปริมาณมาก จึงส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของวัสดุผสมนี้

### 5.2.3. ผลการทดสอบสมบัติความสึกหรอ

การทดสอบสมบัติความสึกหรอได้แบ่งระยะเวลาการทดสอบ 4 ช่วงการทดสอบ ได้แก่ 3, 6, 9 และ 12 นาที เพื่อศึกษาผลของความสึกหรอในแต่ละช่วงเวลา โดยนำค่าความสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสม เปรียบเทียบผลแต่ละปัจจัย โดยทดสอบความสึกหรออะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลองเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง ซึ่งมีผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบชิ้นงาน โครงสร้างแนวแกน พบว่าความสึกหรอของชิ้นงานที่ระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 2 และ 3 ชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงกัน และชิ้นงานที่ระยะเวลาในการเผาแช่ที่ 1 ชั่วโมง มีค่าความสึกหรอต่ำที่สุด

2. ผลการทดสอบชิ้นงาน โครงสร้างแนวรัศมี พบว่าความสึกหรอของชิ้นงานที่ระยะเวลาเผาแช่ที่ 1 ชั่วโมง มีค่าความสึกหรอต่ำที่สุด

3. เปรียบเทียบค่าความสึกหรอของวัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์กับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลองพบว่าอะลูมิเนียมมีอัตราการสึกหรอมีค่าคงที่ ทุกช่วงระยะเวลาของการทดสอบ และมีค่าความสึกหรอที่ต่ำกว่าวัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์

4. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสม พบว่าชิ้นงานวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากไม้ยางพารา มีช่องว่างที่เกิดจากธรรมชาติของไม้ มีผลทำให้เกิดความไม่แข็งแรงของโครงสร้างภายใน เมื่อทำการทดสอบความสึกหรอ จึงแสดงผลให้เห็นว่าในแต่ละช่วงเวลาไม่มีความสม่ำเสมอของอัตราการสึกหรอ เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลอง

### 5.2.4. ผลการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งโดยด้วยเครื่องทดสอบ Rockwell และนำค่าได้แปลงเป็นหน่วย Brinell เพื่อที่จะสามารถนำค่าความแข็งจากการทดลองเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงพาณิชย์อื่นๆ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

1. ผลการทดสอบชิ้นงาน โครงสร้างแนวแกน พบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งประมาณ 141-146 HNB ซึ่งระยะเวลาในการเผาส่งผลกระทบต่อความแข็ง มีผลทำให้ชิ้นงานที่ระยะเวลาการเผาแช่ที่ 2 ชั่วโมง มีค่าความแข็งมากที่สุดที่ 146 HNB

2. ผลการทดสอบชิ้นงาน โครงสร้างแนวรัศมี พบว่าชิ้นงาน โครงสร้างแนวรัศมีมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงาน โครงสร้างแนวแกน และจากผลของระยะเวลาในการเผาเซ้ที่แตกต่างกันพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผา ความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุผสมมีค่าลดลง ค่าความแข็งแรงของระยะเวลาเผาที่ 1 ชั่วโมงมีค่ามากที่สุด มีค่า 130 HBN

3.. เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่ได้จากวัสดุผสมที่ได้จากการทดลองกับอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการทดลอง และอะลูมิเนียม A356 ในเชิงพาณิชย์ พบว่า วัสดุผสมนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าอะลูมิเนียมทั้ง 2 โดยอะลูมิเนียมมีค่าความแข็งแรง ที่ 96 และ 86 HNB ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างภายในซึ่งเสริมแรงด้วยอะลูมิเนียม A356 สามารถพัฒนาศักยภาพด้านความแข็งแรงได้

#### 5.2.5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

พิจารณาผลของการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยศึกษาปัจจัย ชิ้นงานทิศทางโครงสร้างที่แตกต่างกันและระยะเวลาในการเผาเซ้ ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

1. ข้อมูลที่ใช้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติมีค่าเพียงพอ
2. ปัจจัยทิศทาง โครงสร้างและระยะเวลาเผาเซ้ที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของวัสดุ ผสมนี้ที่ระดับนัยสำคัญ( $\alpha = 0.05$ )
3. ค่าความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงเกิดขึ้นมากที่ระยะเวลาเผาเซ้ที่ 2 ชั่วโมง
4. จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) แสดงให้เห็นในการทดลองมีปัจจัยที่ควบคุมได้ 93.63% และควบคุมไม่ได้ 6.37%

ผลจากการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จากงานวิจัย สามารถประยุกต์วัสดุผสมนี้ ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวต้านทานการนำความร้อนและตัวต้านทานการนำไฟฟ้า มีส่วนประกอบของคาร์บอนซึ่งเป็นตัวหล่อลื่น จึงประยุกต์ใช้กับงานทางด้านเครื่องจักรกล เช่น ตลับลูกปืนในอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างผิวโลหะในเครื่องจักร และประยุกต์ใช้กับงานทางด้านไฟฟ้าและความร้อน เพื่อใช้เป็นฉนวนที่มีความแข็งแรงและคงรูป

#### 5.3 ประโยชน์และข้อเสนอแนะ

##### 1. ประโยชน์

สามารถสังเคราะห์วัสดุผสมจากวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งและเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากวัสดุผสมนี้หากเปรียบเทียบกับวัสดุธรรมชาติในตอนต้นพบว่าคุณสมบัติต่างๆมีการพัฒนามากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้สามารถประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมได้ ซึ่งวิธีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์ในงานวิจัยเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทางวิทยาศาสตร์อื่นๆ

## 2. ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยพบว่าวัสดุที่ได้จากธรรมชาติมีความผันผวนและลักษณะที่แตกต่างกันในโครงสร้าง ซึ่งทำให้มีผลต่อการวิจัยในการหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุผสม และควรศึกษาเพิ่มในส่วนการอัดสารละลายโซล-เจล ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณของซิลิกอนภายในวัสดุผสมนี้ให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้นด้วย

## บรรณานุกรม

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2547. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1-2 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- เล็ก สีกง. 2543. วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม ภาควิชาเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ฤตวรรณ ชีววุฒิพงศ์. 2551. งานวิจัย เรื่อง การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- Gutierrez-Mora, F., Goretta, K.C., Varela-Ferai, F.M., Arellano Lopez, A.R. and Martinez Fernandez, J. 2005. Indentation hardness of biomorphic SiC, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol 23, Issues 4-6, Pages 369-374
- Garcia-cordovilla, C., Louis, E. and Narciso, J. 1999. Pressure infiltration of packed ceramic particulates by liquid metals, P II : S1359-6454 : 00318-3
- Greil, P., Lifka, T. and Kaindl, A. 1998. Biomorphic Cellular Silicon Carbide Ceramics from wood: I. Processing and Microstructure. PII: S0955-2219: 00156-3
- Greil, P., Lifka, T. and Kaindl, A. 1998. Biomorphic Cellular Silicon Carbide Ceramics from wood: II .Mechanical Properties. PII: S0955-2219: 00155-1
- G-Romo, M.G., Yanez-Limon, J.M., Villicana, M., Perez-Robles, J.F., Zamorano-Ulloa, R. and Gonzalez-Hernandez, J. 2004. Structure evolution of sol-gel SiO<sub>2</sub> heated glasses containing silver particles, Journal of Physics and chemistry of Solids Vol. 65: 1045-1052
- Herzog A., Klingner R., Vogt U. and Graule T. 2004. Wood-Derived Porous SiC ceramics by Sol Infiltration and Carbothermal Reduction, Journal of the America Ceramic.Society. Vol. 87: 784-793
- Hou G., Jin Z. and Qian J. 2007. Effect of starting Si contents on the properties and structure of biomorphic SiC ceramics. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 182: 34-38
- Hou G., Jin Z. and Qian J., 2007. Effect of holding time on the basic properties of biomorphic SiC ceramic derived from beech wood, Materials Science and Engineering. A 452-453:278-283



- Jae-Won K., Sang-Won M., Hyeon-Cheol K., Je-Hyun L., Yeon-Gil J. and Chang-Yong J., 2006. Synthesis of SiC microtubes with radial morphology using biomorphic carbon template, *Materials Science and Engineering. A* 434: 171-177
- Qian J-M. and Jin Z-H. 2006. Preparation and characterization of porous, biomorphic SiC ceramic with hybrid pore structure, *Journal of the European Ceramic Society. Vol. 26:* 1331-1316
- Qian J-M., Wang J-P., Qiao G-J. and Jin Z-H. 2004. Preparation of porous SiC ceramic with a woodlike microstructure by sol-gel and carbonthermal reduction processing *Journal of the European Ceramic Society. Vol. 24:* 3251-3259
- Qian J-M., Wang J-P. and Jin Z-H. 2004. Preparation of biomorphic SiC ceramic by carbothermal reduction of oak wood charcoal, *Materials Science and Engineering. A* 371: 229-235
- Qiao G., Ma R., cai N., Zhang C. and Jin Z. 2002. Mechanical properties and microstructure of Si/SiC materials derived from native wood, *Materials Science and Engineering. A* 323: 301-305
- Sahin Y., 2005. Optimization of testing parameters on the wear behaviour of metal matrix composites based on the Taguchi method, *Materials Science and Engineering. A* 408: 1-8
- Seyed Reihani S.M., 2006. Processing of squeeze cast Al6061-30vol% SiC composites and their characterization, *Materials and Design. Vol. 27:* 216-222
- Tianchi W., Tongxiang F., Di Z., Guoding Z. and Dangsheng X. 2007. Preparation and thermal properties of metal matrix composites with wood-structure, *Materials and Design. Vol. 27:* 1275-1279
- Varela-Feria F.M., Martinez-Fernandez J., de Arellano-Lopez A.R. and Singh M. 2002. Low density biomorphic silicon carbide: microstructure and mechanical properties, *Journal of the European Ceramic Society. Vol. 22:* 2719-2725
- Vix-Guterl C., McEnaney B. and Ehrburger P. 1998. SiC Material Produced by Carbothermal Reduction of a Freeze Gel Silica-carbon Artefact, PII: S0955-2219 00223-4
- Wang T-C., Fan T-X., Zhang D. and Zhang G-D. 2006. Fabrication and the wear behaviors of the carbon/aluminum composites based on wood templates, *Carbon Vol. 44:* 900-906
- Wang T-C., Fan T-X., Zhang D. and Zhang G-D., 2006. The fabrication and wear properties of C/Al and (C+SiC)/Al composites based on wood template, *Materials Letters. Vol. 60:* 2695-2699

ภาคผนวก ก.  
แสดงผลค่าการนำความร้อน

## ตารางภาคผนวก ก.แสดงผลค่าการนำความร้อน

Sample	Condition Used		Thermal properties	Measurement Results	Average	S.D.
	Power Output	Measuring time (s)				
SiC 1hr. แนวแกน	0.8	1	Thermal Conductivity(W/mK)	17.9300 17.6700 18.1800	17.9270	0.2550
			Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	0.8189 0.7553 0.8606	0.8116	0.0530
			Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> /k)	21.8900 23.3900 21.1300	22.3170	1.1500
SiC 1hr. แนวรัศมี	0.85	1	Thermal Conductivity(W/mK)	28.8700 28.5600 28.4500	28.6270	0.2178
			Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	1.8880 1.6450 1.8080	1.7803	0.1238
			Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> /k)	15.2900 17.3600 15.7300	16.1270	1.0905
SiC 2 hr. แนวแกน	0.65	1	Thermal Conductivity(W/mK)	19.8500 20.0600 19.9000	19.9370	0.1097
			Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	1.5190 1.7680 1.5890	1.6253	0.1284
			Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> /k)	13.0700 11.3500 12.5200	12.3130	0.8784

ตารางภาคผนวก ก.(ต่อ) แสดงผลค่าการนำความร้อน

Sample	Condition Used		Thermal properties	Measurement Results	Average	S.D.
	Power Output	Measuring time (s)				
SiC 2 hr. แนวรัศมี	0.85	1	Thermal Conductivity(W/mK)	21.1200 21.5500 21.4000	21.3570	0.2183
			Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	1.4520 1.9300 1.5850	1.6557	0.2467
			Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> /k)	14.5400 11.1600 13.5000	13.0670	1.7312
SiC 3 hr. แนวแกน	0.80	1	Thermal Conductivity(W/mK)	19.7100 19.7100 19.5900	19.6700	0.0693
			Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	1.1320 1.2000 1.1810	1.1710	0.0351
			Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> /k)	17.4100 16.4200 16.5800	16.8030	0.5314
SiC 3 hr. แนวรัศมี	0.85	1	Thermal Conductivity(W/mK)	24.1400 23.9700 24.0100	24.0400	0.0889
			Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	1.8050 1.7280 1.6770	1.7367	0.0644
			Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> /k)	13.3700 13.8700 14.3100	13.8500	0.4703

ภาคผนวก ข.  
ผลการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า

ตารางภาคผนวก ข. ผลการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า

Sample	Resistivity properties	Measurement Results	Average	S.D.
SiC_1600c_1hr	k $\Omega$	0.006087	0.006042	0.0000218
		0.006071		
		0.006073		
		0.006061		
		0.006029		
SiC_1600c_2hr	k $\Omega$	0.005026	0.0050506	0.0000411
		0.005102		
		0.005068		
		0.005062		
		0.004995		
SiC_1600c_3hr	k $\Omega$	0.005386	0.0052938	0.000073
		0.005273		
		0.005198		
		0.005269		
		0.005343		
SiC_1600c_1hr	k $\Omega$	0.002439	0.002382	0.000044
		0.002409		
		0.002382		
		0.002353		
		0.002327		
SiC_1600c_2hr	k $\Omega$	0.002684	0.0028116	0.000073
		0.002817		
		0.002857		
		0.002839		
		0.002861		

ตารางภาคผนวก ข.(ต่อ) ผลการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า

Sample	Resistivity properties	Measuremeny Results	Average	S.D.
SiC_1600c_3hr	k $\Omega$	0.001661	0.0016486	0.0000097
		0.001656		
		0.001647		
		0.00164		
		0.001639		
Al A356 casting	k $\Omega$	0.003122	0.003096	0.000047
		0.003154		
		0.003103		
		0.003067		
		0.003034		

ภาคผนวก ค. ตารางการแปลงค่าความแข็ง  
(Equivalent Hardness Scale Conversion Table)



ภาคผนวก ค. ตารางการแปลงค่าความแข็ง

(Equivalent Hardness Scale Conversion Table)

VPN	ROCKWELL SCALES									BRINELL	
DPH HV/10	A	B	C	D	E	F	G	H	K	BHN 500kg	BHN 3000kg
254	62	100	23	42			83			201	240
248	62	99	22	42			81			195	234
243	61	98	21	41			79			189	228
238	61	97	20	40			78			184	222
234	60	97	19				77			181	218
230	59	96	18				76			179	214
226	59	96	17				75			177	210
222	58	95	16				74			175	208
217	58	95	15				73			171	205
213	58	94	14				73			169	203
208	57	93	13				71			167	200
204	57	92	12				70		100	163	195
200	56	92	11				69		100	162	193
196	56	91	10				68		100	160	190
192	56	90	9				66		99	157	185
188	55	89	8				64		98	154	180
184	54	88	7				63		97	151	176
180	54	87	6				61		97	148	172
176	53	86	5				59		96	145	169
172	53	85	4				58		95	142	165
168	52	84	3				56		94	140	162
160	51	82	1				53		92	135	156
156	50	81	0				51		91	133	153
148	49	79					48		90	128	147
144	49	78					46		89	126	144

ภาคผนวก ค. (ต่อ) ตารางการแปลงค่าความแข็ง

(Equivalent Hardness Scale Conversion Table)

VPN	ROCKWELL SCALES										BRINELL	
	DPH HV/10	A	B	C	D	E	F	G	H	K	BHN 500kg	BHN 3000kg
141	48	77					44		88	124	141	
139	47	76					43		87	122	139	
137	47	75				100	41		86	120	137	
135	46	74				99	39		85	118	135	
132	46	73				99	38		85	116	132	
130	45	72				98	36		84	114	130	
127	45	71			100	98	35		83	112	127	
125	44	70			100	97	33		82	110	125	
123	44	69			99	96	31		81	109	123	
120	43	68			98	96	30		80	107	121	
118	43	67			98	95	28		79	106	119	
116	42	66			97	95	27		78	104	117	
115	42	65			96	94	25		78	102	116	
114	42	64			96	94	24		77	101	114	
113	41	63			95	93	22		76	99	112	
112	41	62			95	92	21		75	98	110	
111	40	61			94	92	19		74	96	108	
110	40	60			93	91	18		73	95	107	

(ที่มา: [http://www.gordonengland.co.uk/hardness/hardness\\_conversion\\_1c.htm](http://www.gordonengland.co.uk/hardness/hardness_conversion_1c.htm))

ภาคผนวก ง.

ลักษณะเฉพาะของคาร์บอน อะตุนิยาม ซิลิกอนคาร์ไบด์

ตารางที่ ง.1 แสดงสมบัติต่างๆของคาร์บอน

<b>Physical Properties</b>	Metric	English
Density	2.25 g/cm <sup>3</sup>	0.0813 lb/in <sup>3</sup>
Specific Surface Area	1.00 m <sup>2</sup> /g	1.00 m <sup>2</sup> /g
Molecular Weight	12.011 g/mol	12.011 g/mol
<b>Chemical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>
Atomic Number	6	6
X-ray Absorption Edge	43.648 Å	43.648 Å
Electronegativity	2.55	2.55
Ionic Radius	0.160 Å	0.160 Å
	2.60 Å	2.60 Å
<b>Mechanical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>
Hardness, Mohs	1.00 - 2.00	1.00 - 2.00
Modulus of Elasticity	4.80 GPa	696 ksi
<b>Electrical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>
Electrical Resistivity	0.00600 ohm-cm	0.00600 ohm-cm
<b>Thermal Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>
Heat of Fusion	9741.07 J/g	4190.61 BTU/lb
CTE, linear	0.600 - 4.30 µm/m-°C @Temperature 20.0 °C	0.333 - 2.39 µin/in-°F @Temperature 68.0 °F
Specific Heat Capacity	0.70768 J/g-°C	0.16914 BTU/lb-°F
	1.73175 J/g-°C	0.413898 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	24.0 W/m-K	167 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
Melting Point	3650 °C	6600 °F
Maximum Service Temperature, Inert	3650 °C	6600 °F
	4492 °C	8118 °F
Heat of Formation	0.000 kJ/mol	0.000 kJ/mol
	716.7 kJ/mol	716.7 kJ/mol

(ที่มา : <http://www.matweb.com>)

ตารางที่ ง.2 แสดงสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม A356, T61

<b>Physical Properties</b>	Metric	English
Density	2.67 g/ cm <sup>3</sup>	0.0965 lb/in <sup>3</sup>
<b>Mechanical Properties</b>	Metric	English
Hardness, Brinell	70.0 - 100	70.0 - 100
Hardness, Knoop	109	109
Hardness, Rockwell A	36	36
Hardness, Rockwell B	53	53
Hardness, Vickers	96	96
Ultimate Tensile Strength	>= 255 MPa	>= 37.0 ksi
Tensile Yield Strength	>= 179 MPa	>= 26.0 ksi
Elongation at Break	>= 5.00 %	>= 5.00 %
Modulus of Elasticity	72.4 GPa	10500 ksi
Compressive Yield Strength	195 MPa	28300 psi
Poissons Ratio	0.330	0.330
Machinability	50 %	50 %
Shear Modulus	27.2 GPa	3950 ksi
Shear Strength	155 MPa	22500 psi
<b>Electrical Properties</b>	Metric	English
Electrical Resistivity	0.00000440 ohm-cm	0.00000440 ohm-cm
<b>Thermal Properties</b>	Metric	English
Heat of Fusion	389 J/g	167 BTU/lb
CTE, linear	21.4 μm/m-°C	11.9 μin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F
	23.2 μm/m-°C	12.9 μin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F
Specific Heat Capacity	0.963 J/g-°C	0.230 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	151 W/m-K	1040 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) แสดงสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม A356, T61

Melting Point	557.2 - 612.8 °C	1035 - 1135 °F
Solidus	557.2 °C	1035 °F
Liquidus	612.8 °C	1135 °F
<b>Processing Properties</b>	Metric	English
Melt Temperature	677 - 816 °C	1250 - 1500 °F
Solution Temperature	535 - 540.6 °C	995 - 1005 °F
Casting Temperature	677 - 788 °C	1250 - 1450 °F
<b>Component Elements</b>	Metric	English
<b>Properties</b>		
Aluminum, Al	91.1 - 93.3 %	91.1 - 93.3 %
Copper, Cu	<= 0.20 %	<= 0.20 %
Iron, Fe	<= 0.20 %	<= 0.20 %
Magnesium, Mg	0.25 - 0.45 %	0.25 - 0.45 %
Manganese, Mn	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicon, Si	6.50 - 7.50 %	6.50 - 7.50 %
Titanium, Ti	<= 0.20 %	<= 0.20 %
Zinc, Zn	<= 0.10 %	<= 0.10 %

(ที่มา : <http://www.matweb.com>)

ตารางที่ 3.3 แสดงสมบัติต่างๆ ของซิลิกอนคาร์ไบด์

<b>Physical Properties</b>	Metric	English
Density	3.10 g/ cm <sup>3</sup>	0.112 lb/in <sup>3</sup>
<b>Mechanical Properties</b>	Metric	English
Modulus of Elasticity	410 GPa	59500 ksi
Compressive Strength	4600 MPa	667000 psi
Poissons Ratio	0.140	0.140
Fracture Toughness	4.60 MPa-m <sup>1/2</sup>	4.19 ksi-in <sup>1/2</sup>
<b>Thermal Properties</b>	Metric	English
Specific Heat Capacity	0.670 J/g-°C	0.160 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	77.5 W/m-K	538 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
	@Temperature 400 °C	@Temperature 752 °F
	125.6 W/m-K	871.7 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
	@Temperature 200 °C	@Temperature 392 °F

(ที่มา : <http://www.matweb.com>)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายศิวนาท ลอยกุลนันท์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120042	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ศิวนาท ลอยกุลนันท์, เกษฎา วรรณสินธุ์, สุธรรม นิชมवास และนภิสพร มีมงคล. การผลิตและทดสอบ  
 ซิลิกอนคาร์ไบด์พูนจากไม้ยางพาราผสมเนื้ออะลูมิเนียม. ประชุมวิชาการวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
 ปี 2552. ณ. โรงแรมพูลแมนขอนแก่น ราชอาณาจักรไทย. 21-22 พฤษภาคม 2552. หน้า  
 178