



การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททาเนียมคาร์ไบด์
ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย

**Fabrication of Aluminium Matrix Composite Reinforced with Titanium
Carbide Fibers Synthesized from Cotton Fibers**

ฐาปณี ศรีชุมพวง

Thapanee Srichumpong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอทิลีนคาร์ไบด์ที่
ผลิตจากเส้นใยฝ้าย

ผู้เขียน นางสาวฐาปนี ศรีชุมพวง

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมวาส)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมวาส)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

.....กรรมการ
(ดร.เรืองเดช ธงศรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย
ผู้เขียน	นางสาวฐาปณี ศรีชุมพวง
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ จากเส้นใยฝ้าย และการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์จากเส้นใยฝ้าย ซึ่งเส้นใยฝ้ายเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกันทั่วไปในประเทศไทย เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบภายในประเทศและเป็นการลดการนำเข้าไททานเนียมคาร์ไบด์ จากต่างประเทศ โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย จากการศึกษาพบว่าสามารถสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้ายได้ดีที่อุณหภูมิ 800°C ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และที่เวลา 0.5 ชั่วโมง เป็นต้นไป ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ทั้งนี้พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และลักษณะการบิดตัวรวมทั้งรูปร่างของถ่านเส้นใยฝ้ายที่ได้

ส่วนที่สองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ โดยศึกษาความสัมพันธ์อัตราส่วนเชิงโมล ระหว่างไททานเนียมออกไซด์ต่อคาร์บอน จากระยะเวลาและจำนวนครั้งในการอัดเคลือบ พบว่าค่าอัตราส่วนเชิงโมลของ TiO_2/C ที่ต้องการจะต้องทำการอัดเคลือบเป็นจำนวน 2 รอบ โดยใช้เวลา 4 นาที ขึ้นไปโดยจะได้ค่าอัตราส่วนเชิงโมล 0.338 แต่จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์พบเฟสของ Ti_2O_3 และ TiO_2 เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ มีความเปราะและแตกหัก ซึ่งพบว่าการอัดเคลือบเพียง 1 รอบเพียงพอในการสังเคราะห์ไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สมบูรณ์แล้ว และในส่วนของสภาวะในการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นอุณหภูมิที่ได้ผลิตภัณฑ์ไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สมบูรณ์ที่สุด

ส่วนที่สามเป็นการศึกษาการผลิตและสมบัติของวัสดุผสมอะลูมิเนียมไททานเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งทำการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบอัดและทำการศึกษาสมบัติทางด้านความแข็ง และการสึกหรอ ผลคือ วัสดุผสมที่ได้มีค่าความแข็ง อยู่ที่ 110-120 HV ซึ่งสูงกว่าอะลูมิเนียมที่มีค่าความแข็งที่ 70 HV ส่วนค่าการสึกหรอคิดจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียต่อเวลานั้นสามารถต้านทานได้มากกว่าอะลูมิเนียมถึง 2 เท่า

Thesis Title Fabrication of Aluminium Matrix Composite Reinforced with Titanium Carbide Fibers Synthesized from Cotton Fibers
Author Miss Thapanee Srichumpong
Major Program Materials Engineering
Academic Year 2008

Abstract

The purpose of this study is to investigate the synthesis of biomorphic TiC from cotton fibers and investigate the fabrication of aluminium matrix composite reinforced with titanium carbide fibers. Cotton fibers which are local plants of Thailand were used as raw materials. The experimental studies were divided into 3 parts. In first part, the methods of carbonizing cotton fiber for producing carbon fibers preform were developed. The best conditions to produce charcoal was the calcinations temperature of 800°C with 0.5 hr. holding time and a heating rate of 8°C/min under flowing argon gas. The resulted carbon fibers were in the original shape. In the second part, the effect of times and cycles of TiO₂ sol infiltrated process to the relation of molar ratio between TiO₂/C were studied. The results showed that 2 cycles of TiO₂ sol infiltrated process with each cycle last more than 4 min. given the TiO₂/C molar ratio at 0.338. But after carbothermal process of these composites, the result showed incompleted reaction phases of Ti₂O₃ and TiO₂ along with TiC fiber. The product fibers have also brittle and fragile. On the other hand, a 1 cycle of TiO₂ sol infiltrated process given the result product after heat treatment at 1500°C of only TiC phase. In the third part, the fabrication and mechanical property study of metal matrix composite (MMC) with the matrix of Aluminium A356 and TiC fiber reinforcement were fabricated by squeeze casting technique. The results showed that the hardness values of MMC were 110-120 HV with higher than that of aluminium (70 HV). The ware rate of MMCs were about two time higher resistant compare to the aluminium.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ทั้งที่ได้ออกนามและไม่ได้ออกนาม ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธรรม นียมวาส ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดตลอดช่วงการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล และ ดร.เรืองเดช ชงศรี ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการสอบและแก้วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะผศ.ดร.ชัชชัย ปลุกผล ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีแรงบันดาลใจในการเรียนในครั้งนี้ รวมถึงเจ้าหน้าที่บัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความสะดวกในการดำเนินงานเอกสาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณดร.ปริญญา สิบุญเรือง นักวิชาการเกษตร ศูนย์วิจัยพืชไร่นครสวรรค์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ เส้นใยฝ้ายพันธุ์ ดากฟ้า ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะ คุณชงชัย เครือผือ และคุณสมใจ จันทร์อุดม ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำมาตลอด และเพื่อนๆ วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่คอยรับฟังและให้คำแนะนำในทุกเรื่อง โดยเฉพาะคุณวรภาพ สุวรรณพฤษ์ เพื่อนที่แสนดีที่คอยให้กำลังใจและรับฟังในทุกๆ ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณแม่สายพิณ คุณพ่อประภาร ศรีชุมพวง น้องสาวทั้งสอง คุณย่า และอาๆทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้ความอนุเคราะห์และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา ให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ฐาปณี ศรีชุมพวง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการรูป	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อวิจัย	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	4
1.2.1 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization Process)	4
1.2.2 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process)	5
1.2.3 ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน (Carbothermal Reduction)	5
1.2.4 การขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแบบอัด (Squeeze casting)	7
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	14
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	14
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	15
2 วิธีการดำเนินการวิจัย	16
2.1 วัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี	16
2.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททานเนียมคาร์ไบด์	16
2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททานเนียมคาร์ไบด์	17
2.1.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านเส้นใย	17

ฝ้าย

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโซลเจลของไททานเนียมออกไซด์	19
2.1.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอมอร์ฟิคไททานเนียมคาร์ไบด์	19
2.1.3 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย	21
2.1.3.1 อะลูมิเนียมผสม A 356 (Al Si Mg) ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่ใช้ในงานหล่อโลหะ	21
2.1.3.2 เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้าย	21
2.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย	22
2.1.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม Preform ไททานเนียมคาร์ไบด์	22
2.1.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อผสมอะลูมิเนียม	23
2.1.5 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล	24
2.1.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง	25
2.1.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล	26
2.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	29
3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	30
3.1 การสังเคราะห์ผ่านเส้นใยฝ้าย	30
3.1.1 ผลจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใยฝ้าย	30
3.1.1.1 อุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	30
3.1.1.2 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 ผลกระทบจากอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ต่อสมบัติของถ่านเส้นใยฝ้าย	34
3.1.2.1 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อลักษณะการบิดตัวและรูปร่าง	34
3.1.2.2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	35
3.1.2.3 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน	36
3.1.3 ผลกระทบจากเวลาที่ใช้ในการเผาต่อสมบัติของถ่านเส้นใยฝ้าย	36
3.1.3.1 เวลาที่ใช้ในการเผาต่อลักษณะการบิดตัวและรูปร่าง	37
3.1.3.2 เวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	38
3.1.3.3 เวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน	38
3.2 การสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้าย	39
3.2.1 ผลของสภาวะที่ใช้ในการอัดเคลือบโซล TiO_2	40
3.2.1.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งและเวลาในการอัดเคลือบโซล TiO_2 ต่ออัตราส่วนเชิงโมลของ TiO_2 ต่อ C	40
3.2.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการสังเคราะห์เส้นใย TiC	44
3.3 การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC	48
3.3.1 ลักษณะ โครงสร้างและการแทรกตัวของวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC	48
3.3.2 ผลการวิเคราะห์ทางด้านความแข็ง	52
3.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการสึกหรอ	53
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	56
4.1 สรุปผล	56
4.2 ข้อเสนอแนะ	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	63
ประวัติผู้เขียน	66

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ TiC	3
3.1	แสดงผลเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปและเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เงื่อนไขต่างๆ	39
3.2	แสดงผลการอัดเคลือบ 1 รอบต่อค่าอัตราส่วนเชิงโมลของไททานเนียมออกไซด์ต่อคาร์บอน	40
3.3	แสดงผลการอัดเคลือบ 2 รอบต่อค่าอัตราส่วนเชิงโมลของไททานเนียมออกไซด์ต่อคาร์บอน	41

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงรูปลักษณะโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายธรรมชาติ	2
1.2	แสดงรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเส้นใยฝ้าย (a) เส้นใยฝ้ายธรรมชาติ (b) ถ่านเส้นใยฝ้าย	5
1.3	แสดงรูปกระบวนการ โชล-เจล เพื่อการสังเคราะห์เซรามิก	5
1.4	แสดงรูปกราฟความสมดุลของส่วนผสมระบบ (TiO_2+3C) ในบรรยากาศของ แก๊ส Ar ที่อุณหภูมิต่างๆ	7
1.5	แสดงรูป SEM ของเส้นใย TiC จากเส้นใยฝ้ายที่เผาที่อุณหภูมิ $1500^{\circ}C$ 1 ชั่วโมง	7
1.6	แสดงรูปการอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว แบบอัด	8
2.1	แสดงรูปลักษณะของเส้นใยฝ้าย (a) โครงสร้างมหภาค (b) โครงสร้างจุลภาค	16
2.2	แสดงรูปลักษณะของถ่านเส้นใยฝ้าย (a) โครงสร้างมหภาค (b) โครงสร้าง จุลภาค	17
2.3	แสดงรูปเครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง รุ่น GF-300 ยี่ห้อ AND	17
2.4	แสดงรูปตู้อบรุ่น Precision Incubator ยี่ห้อ Memmert	18
2.5	แสดงรูปเตาเผาอุณหภูมิสูง (Tube Furnace; อุณหภูมิ $1800^{\circ}C$)	18
2.6	แสดงรูปการติดตั้งอุปกรณ์ในการเผาขึ้นงาน	18
2.7	แสดงรูปเครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer) ยี่ห้อ LMS รุ่น MGS-1001	19
2.8	แสดงรูป (a) Vacuum Chamber (b) ปุ่มความดันสูง	20
2.9	แสดงรูปการติดตั้งอุปกรณ์ Vacuum Chamber	20
2.10	แสดงรูปชิ้นงานหลังการอัดเคลือบ	20
2.11	แสดงรูปอะลูมิเนียมผสม เกรด A 356	21
2.12	แสดงรูปลักษณะเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ก่อนทำการหล่อผสม (a) แบบเส้น ใยขนาดยาว (b) แบบขึ้นรูปเป็น Preform	22
2.13	แสดงรูปแม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD 11	22
2.14	แสดงรูปเครื่องอัดไฮดรอลิก ยี่ห้อ Herzog	23
2.15	แสดงรูปเตาสำหรับหลอมละลายอะลูมิเนียม	23

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.16	แสดงรูปแม่พิมพ์เหล็ก Medium Carbon (0.35%C)	24
2.17	แสดงรูปเครื่องอัดไฮดรอลิกความดันสูง ยี่ห้อ TMC	24
2.18	แสดงรูปเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ PHILIS รุ่น X'Pert MP	25
2.19	แสดงรูปเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV และเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)	25
2.20	แสดงรูปเครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น HWDM-3 ยี่ห้อ high wood	26
2.21	แสดงรูปเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ pin on disk	26
2.22	แสดงรูปการติดตั้งเครื่องทดสอบการสึกหรอ	27
2.23	แสดงตำแหน่งในการทดสอบความแข็ง	27
2.24	แสดงขั้นตอนการผลิตเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์และกิจกรรมการดำเนินงานวิจัย	29
3.1	แสดงรูปกราฟ (DTA) และ (TGA) ของเส้นใยฝ้าย	31
3.2	แสดงรูปกราฟการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยฝ้าย	32
3.3	แสดงรูปกราฟอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน	33
3.4	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในถ่านเส้นใยฝ้าย	33
3.5	แสดงรูปลักษณะโครงสร้างและการบิดตัวของถ่านเส้นใยฝ้ายจากการเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (a) 4°C/min (b) 6°C/min (c) 8°C/min (d) 10°C/min	34
3.6	แสดงรูปกราฟอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	35
3.7	แสดงรูปอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน	36
3.8	แสดงรูปลักษณะโครงสร้างและการบิดตัวของถ่านเส้นใยฝ้ายจากการเผาที่อุณหภูมิ 800°C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 8°C/min ที่เวลาในการเผาต่างกัน (a) 0.5 ชั่วโมง, (b) 1.0 ชั่วโมง (c) 1.5 ชั่วโมง	37
3.9	แสดงรูปกราฟเวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	38
3.10	แสดงรูปกราฟเวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน	38

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ ที่ทำการอัดเคลือบ 1 รอบ	41
3.12	แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ ที่ทำการอัดเคลือบ 1 รอบ	42
3.13	แสดงกลไกการเกิด TiC	43
3.14	แสดงรูปลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเส้นใย TiC (a) ผลิตภัณฑ์ที่ทำการเคลือบ 1 รอบ (b) ผลิตภัณฑ์ที่ทำการเคลือบ 2 รอบ	43
3.15	แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	44
3.16	แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ทำการเผาที่เวลาต่างๆ	45
3.17	แสดงรูปลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 1300°C, (b) 1350°C, (c) 1400°C, (d) 1450°C และ (e) 1500°C	46
3.18	แสดงรูปลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ทำการเผาที่เวลาต่างๆ (a) 0.5 hr, (b) 1.0 hr, (c) 2.0 hr และ 3.0 hr	47
3.19	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์	47
3.20	แสดงรูป X-ray mapping ของเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์	47
3.21	แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของ Al-TiC (a) Al-356 (b) ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว (c) ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform	49
3.22	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว	50
3.23	แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว	50
3.24	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform	50
3.25	แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform	51
3.26	แสดงตำแหน่งของธาตุและสารประกอบหลังการหล่อแบบอัด	51

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.27	แสดงรูปผลการทดสอบสมบัติทางความแข็ง (Hardness) (a) แสดงตำแหน่งในการทดสอบความแข็ง (b) ผลการทดสอบความแข็งของการผสมแบบเส้นใยขนาดยาว (c) ผลการทดสอบความแข็งของการผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform	52
3.28	แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของ Al-TiC หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Wear test) (a) Al-A356 (b) ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว (c) ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform	53
3.29	แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC หลังการทดสอบการสึกหรอ ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว	54
3.30	แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC หลังการทดสอบการสึกหรอ ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform	54
3.31	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักที่หายไปในการทดสอบการสึกหรอ	55

บทที่ 1

บทนำ

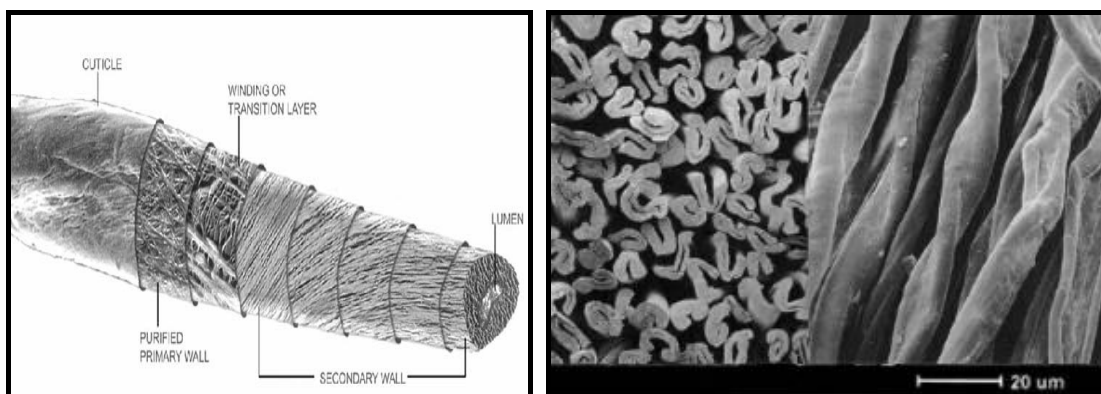
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อวิจัย

วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminium Metal Matrix Composites) เป็นวัสดุผสมที่มีอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลักและเสริมแรงด้วยวัสดุเซรามิก ผลิตขึ้นมาเพื่อเพิ่มสมบัติหลายอย่าง เช่น ความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Toughness) ความทนต่อการสึกหรอ (Wear) การนำความร้อน (Thermal conductivity) และเพื่อลดน้ำหนักของวัสดุ มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นดิสก์เบรกเพื่อแทนเหล็กหล่อซึ่งช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงานและยืดเวลาใช้งานได้มาก หรือ ทำเป็นตัวระบายความร้อนในงานอิเล็กทรอนิกส์เพื่อแทนทองแดงซึ่งช่วยลดน้ำหนักและช่วยลดปัญหาการแตกหัก (Break) ของชิ้นงานอันเนื่องมาจากการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง (Thermal expansion) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุผสมอะลูมิเนียม ในทางอุตสาหกรรมยังไม่มากนัก สาเหตุหลักมาจากต้นทุนส่วนหนึ่งมาจากวัตถุดิบเซรามิกที่มีราคาแพง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) หรือ ไททานเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ฉะนั้นหากสามารถลดต้นทุนของวัสดุเสริมแรงได้ การใช้ประโยชน์ของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมจะเพิ่มมากขึ้น

เมื่อไม่นานมานี้ มีงานวิจัยหลายชิ้น นำเสนอเกี่ยวกับถ่านไม้ซึ่งสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์เซรามิกพูนตามถ่านต้นแบบ รวมทั้งเส้นใยเซรามิกตามต้นแบบเส้นใยธรรมชาติ โดยสามารถผลิตเซรามิกคาร์ไบด์ได้หลายชนิด เช่น SiC [A. Herzog et. al (2004)], TiC [S. Niyomwas (2007)], SnO₂ [Di Zhag et. Al (2005)], และ Al₂O₃ [T. Fan et. Al (2008)] ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ทั้งในงานกรองอากาศที่อุณหภูมิสูง หรือเป็นเซรามิกตัวเสริมแรงในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยฝ้าย (Cotton fiber) มาใช้ในการสังเคราะห์เป็นTiC ซึ่งเส้นใยฝ้ายนั้นเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศชนิดหนึ่ง ปลูกกันทั่วไปในภาคกลาง และภาคเหนือของประเทศไทย สมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเส้นใยฝ้าย คือ เป็นเส้นใยที่มีขนาดยาวเมื่อเทียบกับอัตราส่วนความกว้าง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยฝ้าย ซึ่งมีขนาดความยาว 10-65 มิลลิเมตร

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11-22 ไมครอน มีความเหนียวในระดับปานกลาง ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ และเป็นทอกลวง ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงรูปลักษณะ โครงสร้างของเส้นใยฝ้ายธรรมชาติ

(http://www.ars.usda.gov/Main/site_main.htm?docid=4027&modecode=64-35-21-00&page=2

และ <http://www.swicofil.com/products/001cotton.html>

สืบค้นเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2550)

สำหรับ TiC เป็นวัสดุเซรามิก ที่สมบัติทนความร้อน และ ความแข็งสูง คล้ายกับ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ส่วนใหญ่มักนำไปผลิตทำเป็นเครื่องมือเจาะตัด (Cutting tool) และจะอยู่ใน รูปของวัสดุผง โครงสร้างของ TiC จะเป็นแบบ FCC และเนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนความร้อนจึงมัก นำไปผลิตเป็นเครื่องมือตัดที่ใช้งานที่ความเร็วรอบสูง นอกจากนี้ยังมีสมบัติต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion) และการเกิดออกซิเดชัน และหากนำมาผสมกับ WC ทำให้เพิ่ม สมบัติทนการแตกหักและการสั่นสะเทือน (Vibration) ได้ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นทางด้าน กายภาพแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ TiC
(CRC Materials Science and Engineering Handbook)

Property	Value
Molar mass(g/mol)	59.89
Density(g/cm ³)	4.93
Modulus of Rupture (GPa) at room	0.2253
Hardness HV (kg/mm/mm) at 100g	2850-3390
Poisson's Ratio	0.187-189
Thermal conductivity (W/m/K) at room	17.14-30.93
Melting point (°C)	3160

โดยทั่วไป TiC ผลิตขึ้นในรูปของอนุภาค หรือผงโดยผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง เช่นวิธีการผลิตแบบอะตอมไมเซชัน หรือการเผาที่อุณหภูมิสูงมากหรือแม้แต่วิธีการผลิตแบบใหม่ซึ่งลดต้นทุนได้มาก เช่น กระบวนการเผาไหม้ด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ [M.Kitiwan and D. Atong. (2006)] ซึ่งเป็นวิธีที่น่าสนใจในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการผลิตเหล่านี้ล้วนเป็นการผลิตขึ้นในรูปแบบผง ยังมีงานวิจัยน้อยชิ้นมากที่ทำการผลิต TiC ขึ้นในรูปของเส้นใย ซึ่งในการนำไปใช้งานโดยการนำไปผสมเป็นวัสดุเสริมแรงแล้วลักษณะโครงสร้างวัสดุที่เป็นเส้นใยสามารถที่จะรับแรงได้มากกว่าวัสดุที่มีอนุภาคเป็นผง และโดยปรกติ TiC ผลิตขึ้นโดยวิธีการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่าง ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) บริสุทธิ์ กับกราฟไฟต์ภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิสูงถึง 2900 °C การที่จะนำผง TiC จากวิธีการผลิตข้างต้น มาผสมเข้ากับอะลูมิเนียมโดยตรงจัดเป็นวิธีการที่ต้นทุนสูง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้มีการศึกษาแนวทางใหม่ๆ ในการผลิต TiC เช่น การสังเคราะห์ด้วยการบดผสมเชิงกล (Mechanical alloying) [M.Razavi et al.(2007)] การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ SHS (Self-propagating high temperature synthesis) [P.Lietal(2003)] การผลิตโดยวิธีการหล่อ (Casting) [X.C.Tong (1998);M.K. Premkumar และM.G.Chu (1995);R. Tyagi (2005)] การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการคาร์โบเทอร์มิกรีดักชัน ของ TiO₂ [N. Setoudeh et al. (2005)] ทั้งนี้ การบดผสมเชิงกลต้องใช้เวลาในการบดผสมเป็นเวลานาน กระบวนการผลิตโดยวิธีการหล่อจะต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ส่วนกระบวนการ SHS ผสมเนื้ออะลูมิเนียม มีข้อด้อยที่ต้องใช้สารตั้งต้นเป็นสารบริสุทธิ์ Ti, C และTiC ที่มีราคาแพง

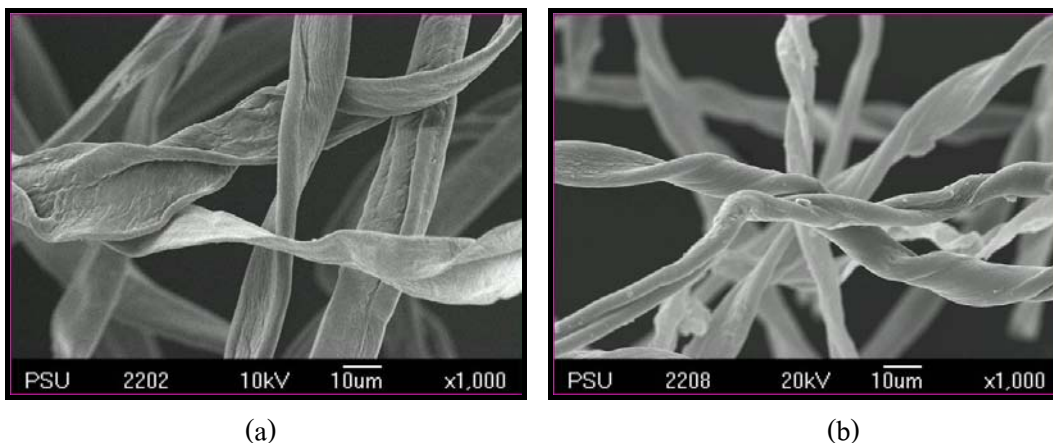
ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์วัสดุเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททาเนียมคาร์ไบด์ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย เนื่องจากสารตั้งต้นของกระบวนการคือ เส้นใยฝ้ายธรรมชาติ ที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ และมีราคาถูก ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปพัฒนาต่อไปสู่การใช้งานในชิ้นส่วนอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เพื่อเป็นการทดแทน และลดการพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

1.2.1 กระบวนการคาร์ไบไนเซชัน (Carbonization Process)

กระบวนการคาร์ไบไนเซชัน เป็นกลไกของการเปลี่ยนจากเนื้อเส้นใยธรรมชาติของเส้นใยฝ้าย ไปเป็นถ่านเส้นใยฝ้าย ตามช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ดังนี้ (C.E.Byrne and D.C.Nagle, 1997)

อุณหภูมิห้อง-150°C	กระบวนการคายน้ำ
อุณหภูมิ 200-260°C	กระบวนการแตกตัวของเฮมิเซลลูโลส
อุณหภูมิ 240-350°C	กระบวนการแตกตัวของเซลลูโลส
อุณหภูมิ 280-500°C	กระบวนการแตกตัวของลิกนิน
อุณหภูมิ 400-800°C	ปฏิกิริยาของสารระเหย (Aromatic reaction) เกิดการดึงเอาคาร์บอนมาใช้ในปฏิกิริยาเกิดเป็นวาเคนซีในโครงสร้าง
อุณหภูมิสูงกว่า 800°C	ปฏิกิริยาต่างๆ แทบสิ้นสุดเหลือไว้แต่โครงสร้างเส้นใยและยังมีการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนที่ตกค้าง และคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นผลึกเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น

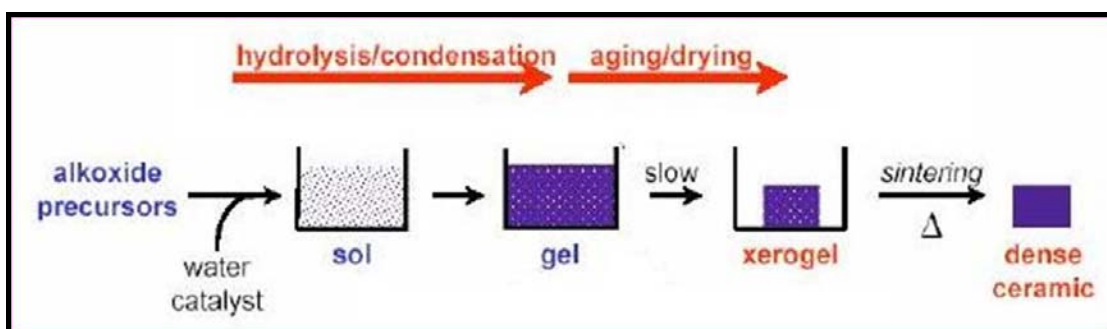


รูปที่ 1.2 เส้นใยฝ้ายแสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (a) เส้นใยฝ้าย (b) ถ่านเส้นใยฝ้าย

1.2.2 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process)

เป็นกระบวนการที่จะนำมาใช้ในการเคลือบ TiO_2 เข้ากับพื้นผิวคาร์บอนของถ่านเส้นใยฝ้าย เป็นวิธีสำหรับการเตรียมของแข็ง จากสารละลาย ซึ่งกระบวนการ โซล-เจล ประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน ดังนี้

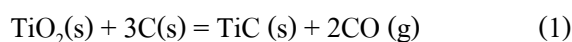
- (1) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) และการรวมตัวของโมเลกุลของสารตั้งต้น และการก่อรูปเป็นโซล
- (2) เจลเลชัน (gelation) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหลวเป็นเจล มีความหนืด (Viscosity) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มเกิดโครงตาข่าย
- (3) การบ่ม (aging)
- (4) การอบแห้ง (drying)



รูปที่ 1.3 แสดงภาพกระบวนการ โซล-เจล เพื่อการสังเคราะห์เซรามิก

(<http://phy.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/sogel.htm> สืบค้นเมื่อ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2550)

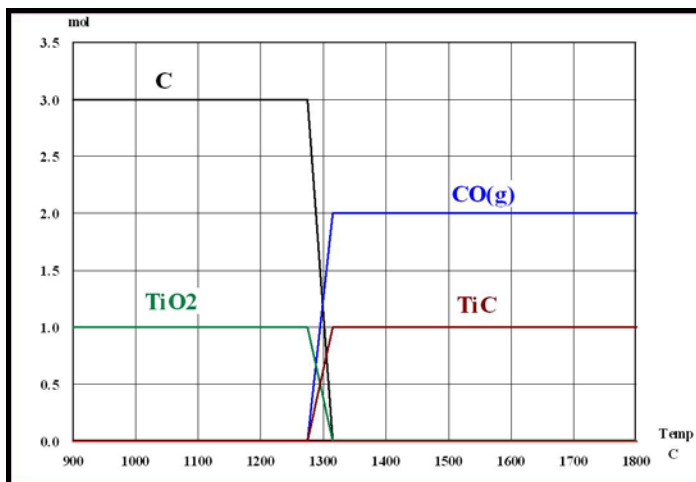
หลังจากที่ถ่านเส้นใยฝ้ายได้ผ่านกระบวนการโซล-เจล ของสารละลายโซลของ TiO_2 ทำให้ถ่านเส้นใยฝ้ายมี TiO_2 เคลือบอยู่ (เป็นวัสดุผสม C- TiO_2) แล้วจึงนำไปเผาในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน ซึ่งวัสดุผสม C- TiO_2 จะเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชันขึ้น ทำให้ได้ผลปฏิกิริยาเป็นของแข็ง TiC และแก๊ส CO ดังสมการปฏิกิริยารวม คือ



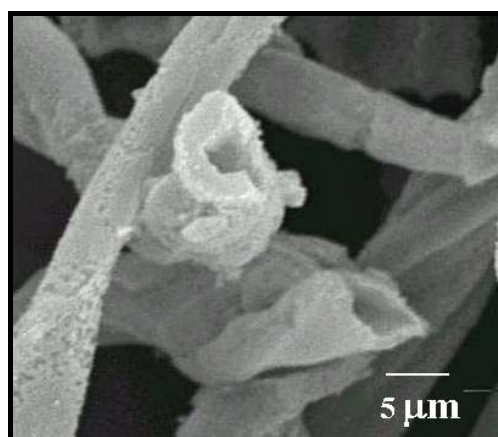
1.2.3 ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน (Carbothermal Reduction)

ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชัน คือ การเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และใช้คาร์บอนเป็นตัวทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยานี้ใช้ได้ผลดีกับการลดรูปโลหะออกไซด์หลายชนิดไปสู่โลหะบริสุทธิ์ และรวมถึงโลหะคาร์ไบด์หรือออกไซด์คาร์ไบด์ โดยปรกติปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชัน จะถูกศึกษาในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยของอาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน (N_2) เพื่อป้องกันคาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ

สำหรับปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชันของ TiO_2 จะเกิดขึ้น ที่อุณหภูมิช่วง 1400-1500 °C โดยอาศัยหลักการของ พลังงานกิบส์ต่ำสุด (Gibbs energy minimization) จะมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์สูงสุด นำไปคำนวณเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่มีความเป็นไปได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HSC[®] แสดงผลในรูปแบบของกราฟความสมดุลของส่วนผสมในระบบที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 พบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 1300°C TiO_2 ทำปฏิกิริยากับ C เป็น TiC แทบทั้งหมด ทำให้สามารถสังเคราะห์ TiC ที่อุณหภูมิประมาณ 1320-1500°C และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงก็จะได้เซรามิก TiC ตามต้องการเนื่องจาก TiC เป็นสารเสถียรไม่ทำปฏิกิริยาย้อนกลับที่อุณหภูมิดังกล่าว และเนื่องจาก C ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อยู่ในรูปของเส้นใยถ่าน ดังนั้น TiC ที่เป็นส่วนผลึกที่จากปฏิกิริยา จึงมีโครงสร้างเป็นเส้นใยด้วย แสดงตัวอย่างเส้นใย TiC ในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 กราฟความสมดุลของส่วนผสมระบบ (TiO_2+3C) ในบรรยากาศของแก๊ส Ar ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

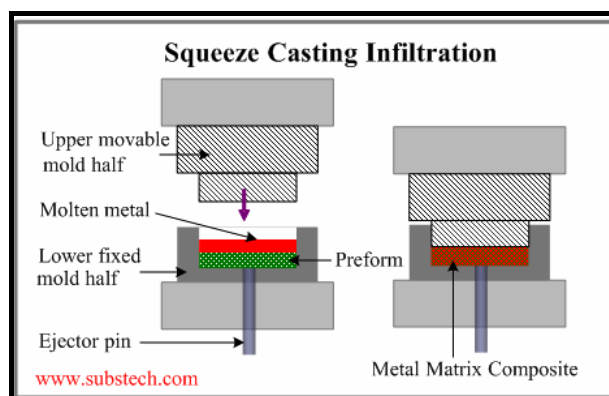


รูปที่ 1.5 แสดงภาพ SEM ของเส้นใย TiC จากถ่านเส้นใยฝ้ายที่เผาที่อุณหภูมิ 1500°C 1 ชั่วโมง
(S.Niyomwas, 2007)

1.2.4 การขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแบบอัด (Squeeze casting)

การหล่อโลหะแบบอัด หรือ Liquid metal forging เป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยอาศัยกระบวนการหล่อ และการอัด (Forging) พร้อมๆกัน ซึ่งในกระบวนการนี้จะใช้วิธี Squeeze Casting Infiltration แสดงดังรูปที่ 1.6 โดยการใช้แรงดันอัดน้ำโลหะให้แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของวัสดุเสริมแรง โดยการเทน้ำโลหะเหลวลงในแม่พิมพ์ตัวล่างซึ่งบรรจุวัสดุเสริมแรงไว้ หลังจากนั้นใช้แรงดันกดแม่พิมพ์ตัวบนลงมาเพื่อให้น้ำโลหะแทรกซึมเข้ายังช่องว่างของวัสดุเสริมแรง ตัวอย่างโลหะเหลวที่ใช้ในงานหล่อนี้ เช่น อะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม ชิ้นงานที่ผ่านการ

หล่อแบบการอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว แบบความดันสูง จะมีเกรนค่อนข้างเล็กและสม่ำเสมอ เนื่องจากน้ำโลหะเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ข้อดีของการอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว แบบความดันสูง คือ เพิ่มสมบัติทางกล เช่นลดการเกิดความล้า (Fatigue) ลดการเกิดการหดตัว (Shrinkage) และสามารถยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นๆ ได้



รูปที่ 1.6 แสดงการอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว แบบความดันสูง

(http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=liquid_state_fabrication_of_metal_matrix_composites สืบค้น เมื่อ 10 ธันวาคม 2551)

1.3 การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C.E. Byrne และ D.C. Nagle (1997) ได้ศึกษากระบวนการคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) หรือ การเผาถ่านไม้ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จนถึงอุณหภูมิ 900°C โดยมุ่งเน้นให้ถ่านไม้รักษาโครงสร้างเซลล์ลูลาร์ ไม่มีรอยแตกปริ และไม่เปลี่ยนรูปทรง ไม้ตัวอย่างที่นำมาศึกษา 7 ชนิดคือ ไม้โอ๊ค ไม้เมเปิล ไม้เบสวูด ไม้สนไพน์ ไม้สนเรดวูด ไม้ลิค่นัม และไม้บัลซาร์ พบว่าอัตราการเพิ่มความร้อนในเตาเผาามีผลต่อถ่านไม้ที่ได้ โดยถ่านไม้จะปริแตก ถ้าหากความเครียดจากการหดตัวที่ผิวไม้ เนื่องจากการคายน้ำและแตกตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เร็วกว่าเนื้อไม้ภายใน ซึ่งจะมีอัตราที่แตกต่างกันในไม้แต่ละชนิด

C.Vix-Guterl และ P.Ehrburger (1997) ศึกษาการสังเคราะห์ SiC พรุณ จากปฏิกิริยาของซิลิกา (SiO₂) ซึ่งเคลือบผิวเส้นใยคาร์บอน และกราฟไฟต์ไว้โดยวิธีโซล-เจล และเผาในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ 1400-1650°C พบว่าในกรณีของเส้นใยกราฟไฟต์ การเปลี่ยน

เฟสจาก SiO_2 เป็น SiC มีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยคาร์บอนรวมทั้งมีการเกิดของ SiC วิสเคอร์

J.M. Qian et al. (2004) ทำการสังเคราะห์ SiC พรุณโดยใช้วิธีโซล-เจล เคลือบสารละลายของ SiO_2 บนผิวภายในรูพรุณ ของถ่านไม้พรุณ (เตรียมจากการเผาไม้ทิลี และไม้โอ๊ค ในสุญญากาศ ที่ 1200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง) แล้วนำไปเผาในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนนิ่ง ที่อุณหภูมิ 1600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และได้ศึกษาผลกระทบของจำนวนครั้งของการเคลือบ SiO_2 ต่อผลการสังเคราะห์ พบว่า SiC พรุณที่ได้มีความหนาของผนังลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนการเคลือบ โดยการเคลือบ 5 ครั้งจะทำอัตราส่วนเชิงโมลของ C/SiO_2 เท่ากับ 3 ซึ่งส่งผลให้สังเคราะห์ได้ SiC ดีที่สุด

B. Sun et al. (2004) ศึกษาการสังเคราะห์ TiC/C พรุณ จากการทำปฏิกิริยาของถ่านไม้พรุณ (เตรียมจากไม้สน) และการอินฟิลเทรชันด้วย เตตระบิวทิลทานเนต (tetrabutyl titanate) ที่อุณหภูมิ $800-1400^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้สุญญากาศ พบว่า สามารถผลิต TiC/C ที่ 1400°C

C.R. Rambo et al. (2005) ศึกษาการศึกษาการสังเคราะห์ SiC/C TiC/C ZrC/C เซรามิกรูปทรงธรรมชาติ โดยการอินฟิลเทรชันด้วยสุญญากาศ ของสารละลายแขวนลอยของโลหะเจดด้วยการไฮโดรไลซิส นำไปเผาในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ 1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า สามารถสังเคราะห์ ได้ตามประสงค์และมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของเซรามิกคาร์ไบด์ต่ำกว่า 20% ในทุกกรณี

B. Sun et al. (2005) ศึกษาการสังเคราะห์ ท่อระดับไมโคร SnO_2 จากเส้นใยฝ้าย โดยเส้นใยฝ้ายจะถูก อินฟิลเทรชันด้วยสารละลายอัลคอกไซด์ของดีบุก แล้วนำไปเผาอบผนังในอากาศที่อุณหภูมิ $600-800^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชม. พบว่า สามารถผลิตท่อระดับไมโคร SnO_2 จากทุกอุณหภูมิที่เผา แต่พบว่า ที่การเผาอุณหภูมิ 700°C จะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูงที่สุด

T.Fan et al. (2005) สามารถสังเคราะห์เส้นใยอะลูมินาจากเส้นใยฝ้ายโดยการอินฟิลเทรชันเส้นใยฝ้ายด้วยสารละลาย AlCl_3 แล้วนำไปเผาอบผนังในอากาศที่อุณหภูมิ $800-1200^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชม. โดยพบว่าเส้นใย Al_2O_3 ที่เผาที่อุณหภูมิ 800°C และ 1000°C มีเฟสเป็น $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ และมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูงกว่าที่เผาที่ 1200°C ถึง 12 เท่า และมีเฟสที่ต่างไปคือเป็น $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

T.Fan et al. (2008) ทำการสังเคราะห์ เส้นใย Al_2O_3 จากไม้สนที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000°C และเส้นใยฝ้าย ที่อุณหภูมิ 800°C ได้เป็นเส้นใยถ่าน และทำการเพิ่มเงินที่มีอนุภาคนาโนเพื่อทำการควบคุมขนาดรูพรุณ โดยทำการอินฟิลเทรชัน สารละลาย AgNO_3 โดยวิธีการอัตรasonicเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยเอทานอล และกรองเอาเงินออก นำไปอบที่ 110°C

แล้วอินฟิวเทรชันสารละลาย NaOH-stabilized-NaBH₄ เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับ Al₂O₃ แล้วทำการดักจับ Ag ไอออน ที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร โดยทำการกรองภาคได้แรงดันสุญญากาศที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นอกจากนี้ทำการเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ทำการกรอง เป็น 350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลที่ได้คือ ขนาดรูพรุนของเส้นใย Al₂O₃ ที่ได้จากเส้นใยถ่านจากไม้สนมีขนาดอยู่ที่ 9-19 nm จากเส้นใยถ่านจากเส้นใยฝ้ายอยู่ที่ 4 nm และการเพิ่ม Ag เข้าไปทำปฏิกิริยากับ Al₂O₃ ทำให้สามารถควบคุมขนาดรูพรุนและสมบัติที่ต้องการได้

M.Narisawa et.al. (1995) ศึกษาการสังเคราะห์ เส้นใย TiC-C โดยเริ่มจากเส้นใย ฟิโนลิกเรซิน อินฟิวเทรชันด้วยโซลของไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ หลังจากที่ผ่านมาการไฮโดรไลซิส และ เผาที่ 1000°C ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ได้ผลเป็น TiO₂-C แล้วจึงแปรสภาพเป็นเส้นใย TiC-C โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1100-1700°C เป็นเวลา 1 ชม. ในแก๊สอาร์กอน พบว่า TiC-C เริ่มเกิดที่ 1400°C โดยการสังเคราะห์ที่ 1400°C จะทำให้ได้เส้นใยที่มีผิวพรุนตัวแต่การสังเคราะห์ที่ 1600°C จะทำให้ได้เส้นใยที่มีผิวเรียบ ซึ่งเฟส TiC ที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณผิวรอบเส้นใยที่มี คาร์บอนเป็นแกนกลาง

S.Niyomwas (2007) สามารถสังเคราะห์เส้นใย TiC จากเส้นใยฝ้าย โดยการอินฟิวเทรชันถ่านเส้นใยฝ้ายด้วยสารละลายโซลของ TiO₂ ที่เตรียมขึ้นจากไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (C₁₂H₂₈O₄Ti) แล้วนำไปเผาในแก๊สอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชม. โดยพบว่าเส้นใย TiC ที่ผลิตได้มีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยฝ้ายต้นแบบ

M.Balasubramanian (2009) สังเคราะห์ Si/SiC โดยการเตรียมขึ้นจากผ้าฝ้าย โดยการอินฟิวเทรชันสารละลาย Si เข้าไปในเส้นใยคาร์บอน เริ่มจากการ ทาสารละลาย Phenolic resin ลงไปยังผ้าฝ้าย จากนั้นนำไปอบ ที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทา Phenolic resin อีก รอบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เหมือนเดิม จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1100°C ในบรรยากาศของแก๊ส N₂ ได้เป็นคาร์บอน Preform สำหรับการอินฟิวเทรชัน ทำการอินฟิวเทรชัน สารละลาย Si ที่อุณหภูมิ 1600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้เป็น SiC เซรามิก และเมื่อนำไปทำการวิเคราะห์ผลด้วย XRD พบว่าได้เป็นเฟส ของ β-SiC, Si และ C แต่สำหรับสมบัติทางเชิงกลเมื่อเทียบกับ SiC ทัวไปยังต่ำ แต่สามารถควบคุมขนาดรูพรุนเนื่องจากกระบวนการผลิตที่ทำการทา Phenolic resin เป็นชั้นๆ

Yasou Gotoh (2001) ได้สังเคราะห์ TiC จาก TiO₂ ที่มีอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตร (5 nm) และเมทิวเซลลูโลส โดยกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน ในบรรยากาศของแก๊ส Ar และพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น ออกไซด์คาร์ไบด์ของไททาเนียมที่อุณหภูมิ 1050°C และ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาทำให้เกิดเป็นเฟสไททาเนียมออกไซด์คาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความเป็นออกไซด์จะลดลงที่อุณหภูมิ 1300°C สิ่งที่สำคัญนอกจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแล้ว คือ ขั้นตอนหรือกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน ในระหว่างการรวมตัวของ TiO₂ กับอนุภาคผง C

A.R. Kennedy et al. (2001) ได้ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง Al และ TiC (10 wt %) ที่อุณหภูมิ 600-900°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าเกิดปฏิกิริยาขึ้นสูงที่สุดที่ 700°C ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Al₃Ti และ Al₄C₃ เกิดขึ้นที่อินเตอร์เฟซ ซึ่งที่ 900°C TiC จะมีความเสถียรใน Al

A.R. Kennedy และ S.M.Wyatt (2001) ได้ตรวจวัดค่าโมดูลัสของ วัสดุผสม Al-TiC (10 wt. %) ที่ผลิตขึ้นด้วยกรรมวิธีต่างๆ คือ การหล่อที่มีฟลักซ์ช่วย การเผาอบผนึกผงวัสดุโดยวิธี HIP และการอัดขึ้นรูป (extrusion) พบว่าภายใต้ความเค้นและความเครียดที่เพิ่มขึ้น วัสดุผสมที่ได้จากการหล่อที่มีการเติมฟลักซ์ช่วยมีค่าโมดูลัสที่สูงที่สุด

X.C.Tong (1998) ผลิตวัสดุผสม Al-TiC โดยวิธีการทำก้อนโลหะ (ingot) ด้วยการหลอมผง AlTi และผงกราไฟต์ ภายใต้แก๊สอาร์กอนที่ 1100-1200°C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นถึง 1300-1400°C 10 นาทีและต่อด้วยการทำให้แข็งตัวอย่างเร็ว (rapid solidification) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น วัสดุผสม Al-TiC ที่มีโครงสร้างไม่โครละเอียดและมีการกระจายตัวของ TiC สม่ำเสมอ

M.K. Premkumar และ M.G. chu (1995) ผลิตอนุภาคขนาดเล็ก TiC ในอะลูมิเนียมเหลวในขั้นตอนเดียว โดยวิธีการผ่านแก๊สอะซิโตนลงในอะลูมิเนียมเหลวที่มีส่วนผสมของ Ti ทำให้อัตราส่วนเชิงปริมาตรของ TiC ถูกกำหนดโดย Ti เริ่มต้นที่ผสมอยู่ ได้ผลิตภัณฑ์เป็น วัสดุผสม Al-TiC ที่มีการกระจายตัวของ TiC สม่ำเสมอและมีขนาดเฉลี่ย 3 μm

A.E. Karant zalis et al (1997) ผลิตวัสดุผสม Al-TiC โดยการเติมผง TiC ขนาด 10 μm ลงสู่อะลูมิเนียมเหลว พร้อมกับฟลักซ์ ที่จะทำหน้าที่ทำความสะอาดผิวของผง TiC และกำจัดชั้นของออกไซด์จากผิวของเหลว ทำให้ได้วัสดุผสม Al-TiC ที่มีการกระจายตัวของ TiC ดี และเกรนมีขนาดละเอียดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ออัตราเชิงปริมาตรของ TiC กับวัสดุผสมในท้องตลาด Al-Al₂O₃ และ Al-SiC พบว่า วัสดุผสม Al-TiC มีค่าสูงสุด

V.H. Lopez และ A.R. Kennedy (2006) ได้ศึกษาผลของการเติมฟลักซ์ K-Al-F ลงใน Al-TiC ที่ 900°C ภายใต้แก๊สอาร์กอน และ อากาศ พบว่า ฟลักซ์ได้ช่วยให้เกิดการเปียก (wet) อย่างสมบูรณ์

R. Tyagi (2005) ทดสอบการสึกหรอของ วัสดุผสม Al-TiC ที่ผลิตจากการทำปฏิกิริยาระหว่างการหล่อ โดยการเติมผง SiC และ Ti ลงในโลหะอะลูมิเนียมเหลว ที่ 1200°C และมีการกวนเป็นช่วงๆเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเทผสมลงโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C ที่ได้เตรียมไว้ กวนเพิ่มอีก 15 นาทีจึงเทสู่เบ้าหล่อ โดยมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของ TiC เท่ากับ 0.07 และ 0.12 และ 0.18 การทดสอบการสึกหรอใช้วิธีหมุนบนจาน (pin-on-disk wear test) ที่ความเร็วการขัดคงที่ 1 m/s และภาระ 9.8-24.5 N พบว่าการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระมากขึ้น แต่การสึกหรอของวัสดุผสม Al-TiC จะมีการสึกหรอที่อัตราเร็วต่ำกว่า อะลูมิเนียมมากถึง 2-3 เท่าขึ้นอยู่กับปริมาณของ TiC โดยที่สัดส่วนเชิงปริมาตรของ TiC สูงจะทำให้วัสดุผสมมีความต้านทานการสึกหรอได้มากกว่า

A. Contreras et. al (2004) ได้ศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง โลหะอัลลอยด์เหลวของ Al-Mg กับแผ่นรอง TiC การศึกษานี้ใช้เทคนิคการหยดแบบเซสซิล (sessile drop technique) ในการทดสอบการเปียกตัว ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ที่ 750-900°C พบว่าเปียกตัวมีค่ามากขึ้นที่สัดส่วน Mg และอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อินเตอร์เฟซทำให้มีชั้นบางของสารประกอบที่เป็นผลของปฏิกิริยา คือ Al_4C_3 , $MgAl_2O_4$ และ MgO และนำไปสู่การลดลงของมุมสัมผัสและการเพิ่มขึ้นของการยึดแน่นของเฟสทั้งสองหรือ คือมีอินเตอร์เฟซที่แข็งแรงขึ้น

สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

D.C. Nagle และ C.E. Byrne (2003) ได้จดสิทธิบัตร วัสดุเซรามิกพอร์น ที่ได้มาจากการสังเคราะห์ถ่านพอร์นของไม้ต้นแบบ รวมทั้งวัสดุผสมเนื้อ โลหะและเซรามิกพอร์นเป็นตัวเสริมแรง

D.R. Behrendt และ M. Singh (1999) ได้จดสิทธิบัตรกรรมวิธีการผลิตวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยเซรามิก ในกลุ่มของ SiC Si₃N₄ และไดซิลิไซด์ โดยเส้นใยเซรามิกถูกเตรียมจากเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ถูกเผาจนกลายเป็นโครงร่างคาร์บอนพอร์น ซึ่งต่อมาถูกอัดเคลือบด้วยซิลิกอนเหลวและเผาที่อุณหภูมิสูงจนเกิดเป็น SiC-Si

F.J. Savel, III (2001) ได้จดสิทธิบัตร กรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นส่วนเซรามิกโดยการ ใช้วัสดุที่มีฐานมาจากเซลลูโลส ซึ่งรวมทั้งไม้และฝ้าย นำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์แล้วจึงขึ้นรูปขึ้นงานตามรูปร่างที่ต้องการ ก่อนที่จะถูกปิดคลุมด้วยทรายแก้ว และเผาจนกลายเป็น SiC

S.H. Gardner (2004) ได้จดสิทธิบัตร กรรมวิธีการผลิต SiC สำหรับใช้เป็นเครื่องมือ โดยมีกรรมวิธีการแปรสภาพไม้ไปเป็นต้นแบบถ่านพรุน ที่มีขนาดใหญ่ได้ โดยขั้นตอนแรก ขึ้นรูปไม้เป็นต้นแบบอย่างหยาบก่อนที่จะนำชิ้นงานไปใส่เตาสุญญากาศแล้วอบแห้งในออโตเกรฟ ภายใต้อุณหภูมิหลายชั่วโมง จนกำจัดความชื้นออกหมด โดยต้นแบบไม่เสียรูป ขึ้นต่อไปจึงนำไปขึ้นรูปให้ได้รูปร่างตามต้องการ ก่อนจะนำไปจุ่มในภาชนะที่บรรจุ ของเหลว Si หรือ อัลลอยด์ของ Si ที่อุณหภูมิ 900-1450°C ได้ผลเป็น SiC

A.H. Simpson, S.T. Fryska, M.L.L. Forrest และ N.A. Gharbieh (2005) ได้จดสิทธิบัตรการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และความเสถียรให้กับวัสดุผสม คาร์บอน-คาร์บอน ที่ใช้ในจานเบรค

T. Desaki, S. Kamiya, K. Sato, Y. Okouchai และ T. Nugami (2005) ได้จดสิทธิบัตรขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียมอัลลอยด์ Al-Sn เสริมแรงด้วย ผง TiC โดยมีสองขั้นตอนคือ ก) ผสมผงของ Al-alloy กับ TiC หรือ ผง Al-Sn และ TiC และอัดขึ้นรูปเป็นก้อน ข) หลอม Al-alloy จนเหลวแล้วใส่ผงผสมในข้อ ก) ลงไป ทำให้ TiC กระจายตัวอยู่ในของเหลวอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เมื่อเทลงเบ้า ปล่อยให้เย็นตัวก็จะได้วัสดุผสมที่มี TiC กระจายตัวดี

K. Sato, Y. Fuwa, T. Tomikawa และ S. sakamoto (2004) ได้จดสิทธิบัตร อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ที่ใช้สำหรับแบร็งแบบเลื่อน โดยอัลลอยด์ประกอบด้วย Sn (2-20 wt%) Cu (0.1-3 wt %) Ca (0.02-1.5 wt %) และอย่างน้อยอีกหนึ่งธาตุจาก Mg Cr Zr Mn V หรือ Ni โดยมีผงเซรามิก เสริมแรงอีกหนึ่งตัวจาก TiC ZrC หรือ Al₂O₃ (0.1-5 vol.%) แล้วปรับคูลด้วย Al

T. Nukami และ T. Sukanuma (1995) ได้จดสิทธิบัตรกรรมวิธีการผลิต วิสเคอร์ของ TiC และ วัสดุผสมเนื้อโลหะที่เสริมแรงด้วย วิสเคอร์ของ TiC และผงกราไฟต์ ลงในโลหะเหลวของ Al หรือ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ที่ 1100-1500°C ในขณะที่เดียวกันก็จุ่มท่อลงในเบ้าหลอมและพ่นแก๊สเฉื่อยลงผ่านโลหะเหลวทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งก็เป็นจุดที่ Ti และ C ทำปฏิกิริยาและโตออกรอบทิศในช่องว่างเหล่านั้นเป็น วิสเคอร์ของ TiC

จากงานวิจัยและสิทธิบัตรที่ได้ทบทวนมาข้างต้นพบว่า มีแนวทางการสังเคราะห์เส้นใย TiC จากถ่านเส้นใยฝ้าย คือ การทำปฏิกิริยาของ TiO₂ กับคาร์บอน (โดยใช้วิธี โซล-เจล เคลือบสารละลายของ TiO₂ บนผิวและภายในรูพรุนของถ่านเส้นใยฝ้าย) นอกจากนี้ยังพบว่า เส้นใย TiC ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับ วิธีการเตรียมถ่านเส้นใยฝ้าย อัตราส่วนเชิงโมลของ C/TiO₂ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แนวทางนี้ในการสังเคราะห์เส้นใย TiC โดยสามารถควบคุมอัตราส่วนเชิงโมลของ C/TiO₂ จาก

จำนวนครั้งการเคลือบ และใช้ถ่านเส้นใยฝ้ายที่เตรียมจากเส้นใยฝ้าย ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษาโดยนักวิจัยใดมาก่อน และจากสถิติบัตรที่ได้ทบทวนมาข้างต้นพบว่าการจดสิทธิบัตรกระบวนการเผาไม่ให้เป็นถ่านคั่นแบบ และภายหลัง สังเคราะห์เป็นเซรามิก ซึ่งทั้งหมดกล่าวถึงเซรามิกในระบบของซิลิกอน คือ SiC Si₃N₄ และโคซิลิไซด์ ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตวัสดุผสม Al-TiC มีขั้นตอนและวิธีการสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ 1) การเติมผง TiC ลงใน Al เหลว และ 2) การทำปฏิกิริยาระหว่าง Ti กับ C ใน Al เหลว ซึ่งในการวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีแรก คือ การนำเส้นใย TiC ที่ผลิตได้มาเป็นตัวเสริมแรงมาผสมกับอะลูมิเนียม โดยการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบอัด ส่วนวัสดุผสมเนื้อโลหะเสริมแรงด้วย TiC มีการจดสิทธิบัตรเป็นจำนวนมากแต่ก็จะเป็น TiC ที่เป็นผง หรือไม่ก็เป็น TiC ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการหลอมโลหะ จากทั้งหมดที่กล่าวมาพอจะสรุปในเบื้องต้นว่า วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย มีศักยภาพในการยื่นจดสิทธิบัตรได้

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.4.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ จากเส้นใยฝ้าย
- 1.4.2 ศึกษาการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการหาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ จากเส้นใยฝ้าย และการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ โดยวิธีการหล่อแบบอัด เพื่อให้ได้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM และ EDX และทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้าย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์จากเส้นใยฝ้ายและการเตรียมวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์
- 1.6.2 ได้สถานะที่เหมาะสมของการเตรียมใยถ่าน และการสังเคราะห์เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์จากเส้นใยฝ้ายด้วยกระบวนการโซล-เจล ร่วมกับกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน
- 1.6.3 เป็นแนวทางในการผลิตเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ขึ้นใช้เองภายในประเทศเพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ
- 1.6.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาการสังเคราะห์ไททานเนียมคาร์ไบด์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น และจากเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ
- 1.6.5 เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ งานที่ต้องการวัสดุที่ทนต่อความร้อนและการเสียดสี
- 1.6.6 สร้างองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุอื่นในอนาคต

1.7 สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 2

วิธีการดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากเส้นใยฝ้ายธรรมชาติรวมทั้งการผลิตเป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมไททานเนียมคาร์ไบด์ และขั้นตอนการดำเนินการ

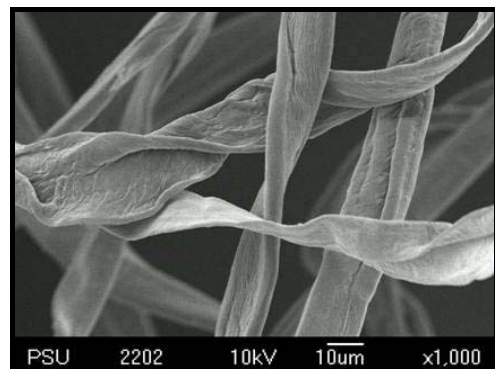
2.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

2.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททานเนียมคาร์ไบด์

ในกระบวนการเตรียม และสังเคราะห์ไททานเนียมคาร์ไบด์นั้นสารตั้งต้นประกอบด้วย เส้นใยฝ้ายธรรมชาติ, Titanium tetra-isopropoxide (TTIP: $C_{12}H_{28}O_4Ti$, 97%, Fluka), 2-propanol solution ($(CH_3)_2CHOH$, 99.7%, LabScan), กรดไฮโดรคลอริก (HCl 2 M) และแก๊สอาร์กอน (Ar) ซึ่งในขั้นตอนของการสังเคราะห์จะต้องนำเส้นใยฝ้ายธรรมชาติมาเผาผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันให้ได้เป็นเส้นใยถ่านก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ ซึ่งลักษณะโครงสร้างมหภาค และจุลภาคของเส้นใยถ่านยังคงรักษาโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายธรรมชาติไว้ได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1-2.2 และสำหรับสารเคมีดังกล่าวเป็นสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมซิลิกาไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2)

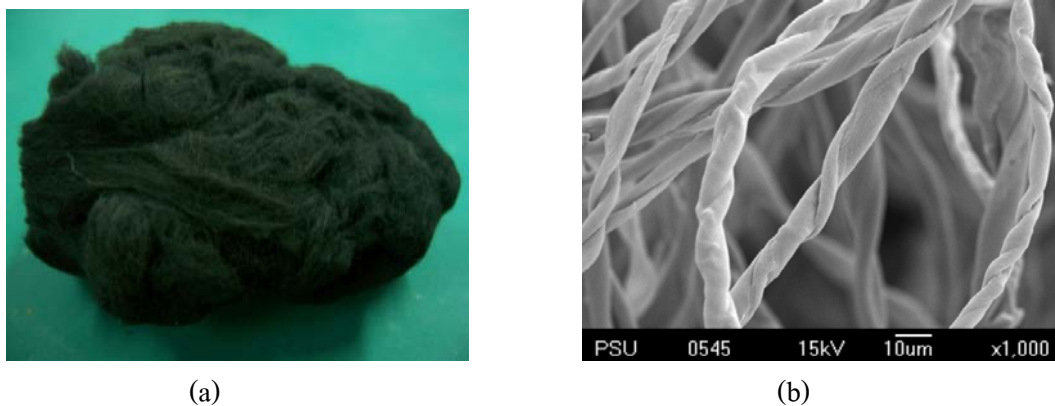


(a)



(b)

รูปที่ 2.1 แสดงรูปลักษณะของเส้นใยฝ้าย (a) โครงสร้างมหภาค (b) โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.2 แสดงรูปลักษณะของถ่านเส้นใยฝ้าย (a) โครงสร้างมหภาค (b) โครงสร้างจุลภาค

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททาเนียมคาร์ไบด์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไบโอมอร์ฟิกไททาเนียมคาร์ไบด์ (Biomorphic TiC) แบ่งออกได้ดังนี้

2.1.2.1 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย

เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย ทั้งในส่วนของการอบไล่ความชื้น และส่วนของการเผาสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.3-2.6 ประกอบด้วยเครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง ซึ่งใช้ในการชั่งเส้นใยฝ้ายก่อนอบและหลังอบ และหลังเผาเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก ตู้อบ Precision Incubator ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการอบไล่ความชื้น ก่อนที่จะนำไปทำการเผาด้วยเตาอุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน โดยทำการศึกษาอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผา เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใยฝ้าย



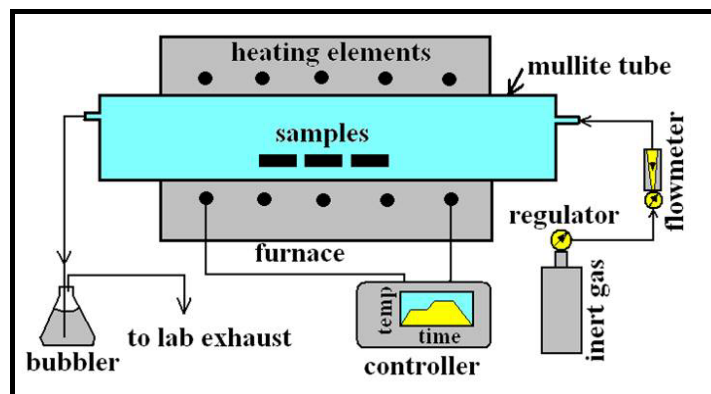
รูปที่ 2.3 แสดงรูปเครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง รุ่น GF-300 ยี่ห้อ AND



รูปที่ 2.4 แสดงรูปตู้บ่มรุ่น Precision Incubator ยี่ห้อ Memmert



รูปที่ 2.5 แสดงรูปเตาเผาอุณหภูมิสูง (Tube Furnace; อุณหภูมิสูงสุด 1800 °C)



รูปที่ 2.6 แสดงรูปการติดตั้งอุปกรณ์ในการเผาชิ้นงาน (Niyomwas, S. (2005))

2.1.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโซลของไททานเนียมออกไซด์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซลของ TiO_2 นั้นประกอบด้วย เครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer) และแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ซึ่งใช้ในการกวนผสม Titanium tetra-isopropoxide (TTIP: $\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$, 97%, Fluka), 2-propanol solution ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$, 99.7%, LabScan), HCl 2 M. แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงรูปเครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer) ยี่ห้อ LMS รุ่น MGS-1001

2.1.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอโมอร์ฟิคไททานเนียมคาร์ไบด์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอโมอร์ฟิคไททานเนียมคาร์ไบด์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การอัดสารละลายโซลของ TiO_2 และการนำไปเผาผ่านกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน ซึ่งในกระบวนการอัดโซล TiO_2 เข้าไปในช่องว่างและโครงสร้างของถ่านเส้นใยฝ้ายนั้นจะต้องใช้ ตู้สุญญากาศ (Vacuum Chamber) และ ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ดังแสดงในรูปที่ 2.8-2.9 ทั้งนี้เพื่อสร้างแรงดันคาปิลลารีให้สารละลายแทรกซึมเข้าสู่ช่องว่างและโครงสร้างถ่านเส้นใยฝ้ายได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้วางบนตะแกรงที่ไม่มีการดูดซับสารละลายและเพื่อไม่ให้มีสารละลายส่วนเกินอยู่ในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 แล้วนำชิ้นงานไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งในส่วนนี้จะทำให้ TiO_2 โซล เกิดปฏิกิริยาเจลเลชัน เป็นซีโรเจลและแข็งตัวเกาะติดโครงสร้างของถ่านเส้นใยฝ้าย หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิสูงด้วยเตาเผา (Tube Furnace) ในบรรยากาศของอาร์กอน

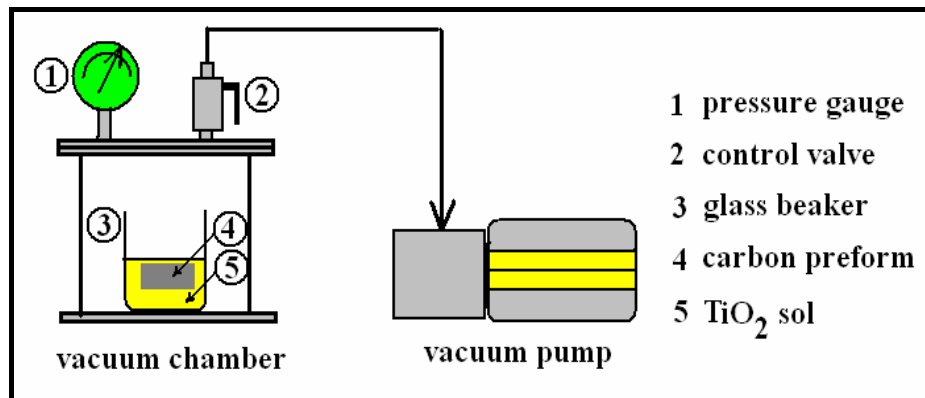


(a)



(b)

รูปที่ 2.8 แสดงรูป (a) ตู้สุญญากาศ (b) ปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 2.9 แสดงรูปการติดตั้งอุปกรณ์ Vacuum Chamber (Niyomwas, S. (2005))



รูปที่ 2.10 แสดงรูปชิ้นงานหลังการอัดเคลือบ

2.1.3 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย

วัสดุและสารเคมีในการผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ นั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

2.1.3.1 อะลูมิเนียมผสม A 356 (Al-7% Si-0.3% Mg) เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานหล่อ มีการใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเหนียวและมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงรูปอะลูมิเนียมผสม เกรด A 356

2.1.3.2 เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้าย ทั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ดังนี้

2.1.3.2.1 เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเส้นใยฝ้ายและยังคงรูปเหมือนดั่งเส้นใยฝ้ายธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (a) แล้วนำไปผสมกับอะลูมิเนียมขณะทำการหล่อแบบอัด

2.1.3.2.2 เส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเส้นใยฝ้ายและบดเป็นเส้นใยขนาดสั้นแล้วนำไปอัดเป็น Perform ด้วยแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่แรง 10 kN ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (b)



(a)

(b)

รูปที่ 2.12 แสดงรูปลักษณะเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ก่อนทำการหล่อผสม

(a) แบบเส้นใยขนาดยาว (b) แบบขึ้นรูปเป็น Preform

2.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย

2.1.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม Preform ไททานเนียมคาร์ไบด์

ประกอบด้วย แม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ทำจากเหล็ก เครื่องมือ SKD11 แสดงดังรูปที่ 2.13 และเครื่องอัดไฮดรอลิก ยี่ห้อ Herzog แสดงดังรูปที่

2.14



รูปที่ 2.13 แสดงรูปแม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11



รูปที่ 2.14 แสดงรูปเครื่องอัดไฮดรอลิก ยี่ห้อ Herzog

2.1.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อผสมอะลูมิเนียม

ในการหล่ออะลูมิเนียมนั้นจะต้องใช้เตาสำหรับหลอมละลายอะลูมิเนียม ซึ่งจะต้องให้ความร้อนเกินกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียม (658°C) ในที่นี้ทำการหลอมที่อุณหภูมิ 700°C แสดงดังรูปที่ 2.15 เพื่อให้ได้อะลูมิเนียมหลอมเหลวพร้อมสำหรับการนำไปหล่อขึ้นรูป การหล่อขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว แบบความดันสูง (Squeeze Casting) การหล่อแบบนี้จำเป็นต้องออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงทนต่อความดันสูง ซึ่งในที่นี้เราได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ที่สามารถรับแรงขนาด 10^6 นิวตัน โดยใช้เหล็ก Medium Carbon ($0.35\%C$) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 11.43 เซนติเมตร วงนอก 19.05 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และเครื่องอัดไฮดรอลิกความดันสูง ยี่ห้อ TMC แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.15 แสดงรูปเตาสำหรับหลอมละลายอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.16 แสดงรูปแม่พิมพ์เหล็ก Medium Carbon (0.35%C)



รูปที่ 2.17 แสดงรูปเครื่องอัดไฮดรอลิกความดันสูง ยี่ห้อ TMC

2.1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

ในขั้นตอนของการสังเคราะห์และผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมไททาเนียมคาร์ไบด์ นั้นจะให้ได้ผลที่สมบูรณ์จะต้องผ่านการวิเคราะห์ผล และสมบัติต่างๆของสารที่สังเคราะห์และผลิต

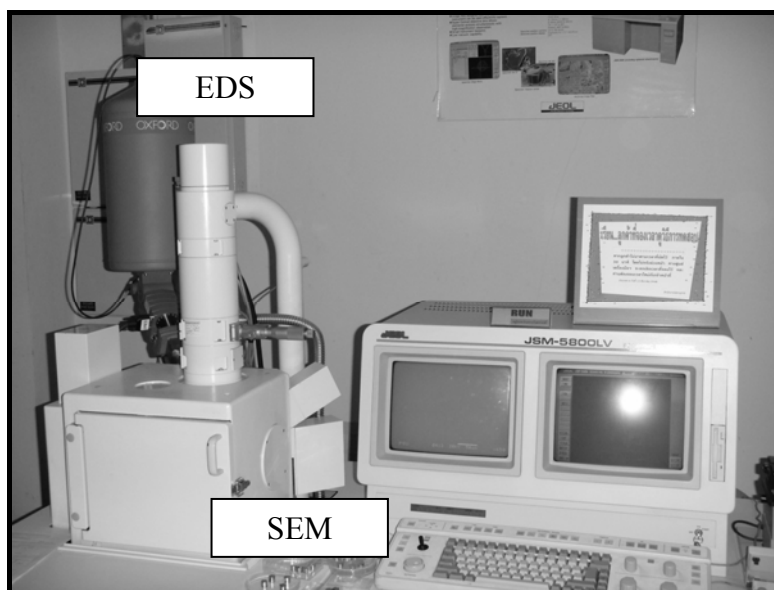
ได้เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การวิเคราะห์หาสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติทางกล

2.1.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง

ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือที่ใช้หลักการทางด้านจุลภาค (Microscopy) ซึ่งเครื่องมือที่นำมาใช้ในครั้งนี้นำมาประกอบด้วย เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD), เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ซึ่งในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่อพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 2.18-2.21



รูปที่ 2.18 แสดงรูปเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น X'Pert MP



รูปที่ 2.19 แสดงรูปเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV และ เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

2.1.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

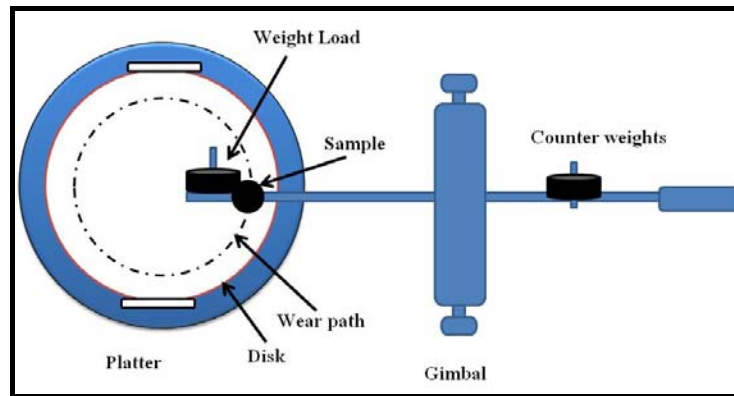
เมื่อทำการผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมไททาเนียมคาร์ไบด์ได้เป็นชิ้นงานเป็นวัสดุผสมแล้ว นอกจากจะนำไปวิเคราะห์เชิงโครงสร้างทั้งนี้ก็เพื่อประกอบกับผลสมบัติเชิงกล ซึ่งสมบัติเชิงกลนั้นได้ทำการทดสอบสมบัติทางความแข็งและสมบัติการสึกหรอ แสดงดังรูปที่ 2.20-2.22



รูปที่ 2.20 แสดงรูปเครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น HWDM-3 ยี่ห้อ high wood



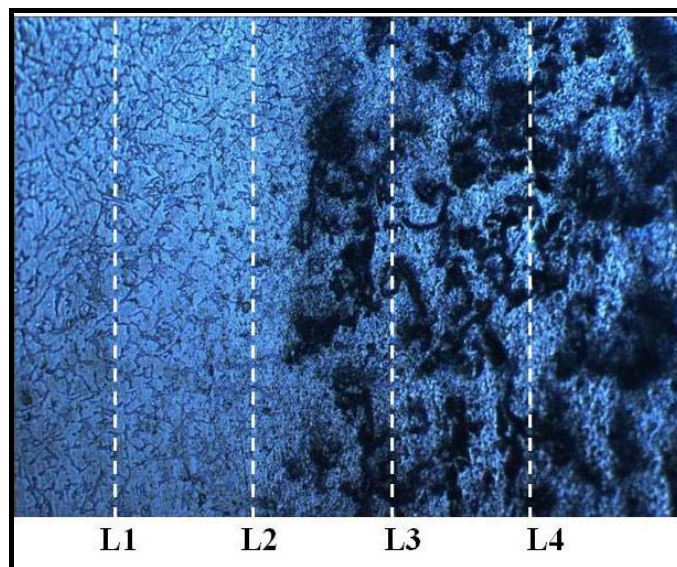
รูปที่ 2.21 แสดงรูปเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ pin on disk



รูปที่ 2.22 แสดงรูปการติดตั้ง เครื่องทดสอบการสึกหรอ

- การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง ทำโดยเตรียมชิ้นงาน โดยผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายและผงขัดเพื่อให้ผิวหน้าของตัวอย่างเรียบและได้ระนาบ ทำการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (Vicker micro hardness) รุ่น HWDM-3 ยี่ห้อ high wood โดยใช้น้ำหนักกด 500 กรัม ซึ่งในการวัดความแข็งในครั้งนี้ทำการวัดโดยแบ่งตำแหน่งของชิ้นงานออกเป็น 4 แถว และวัดความแข็งแถวละ 3 จุด โดยแถวที่ 1 และ 2 เป็นตำแหน่งของเนื้ออะลูมิเนียมบริสุทธิ์และไล่ไปเรื่อยๆ และแถวที่ 3 และ 4 เป็นบริเวณที่เป็นเนื้อวัสดุผสมซึ่งแสดงตำแหน่ง ดังรูป ที่ 2.23

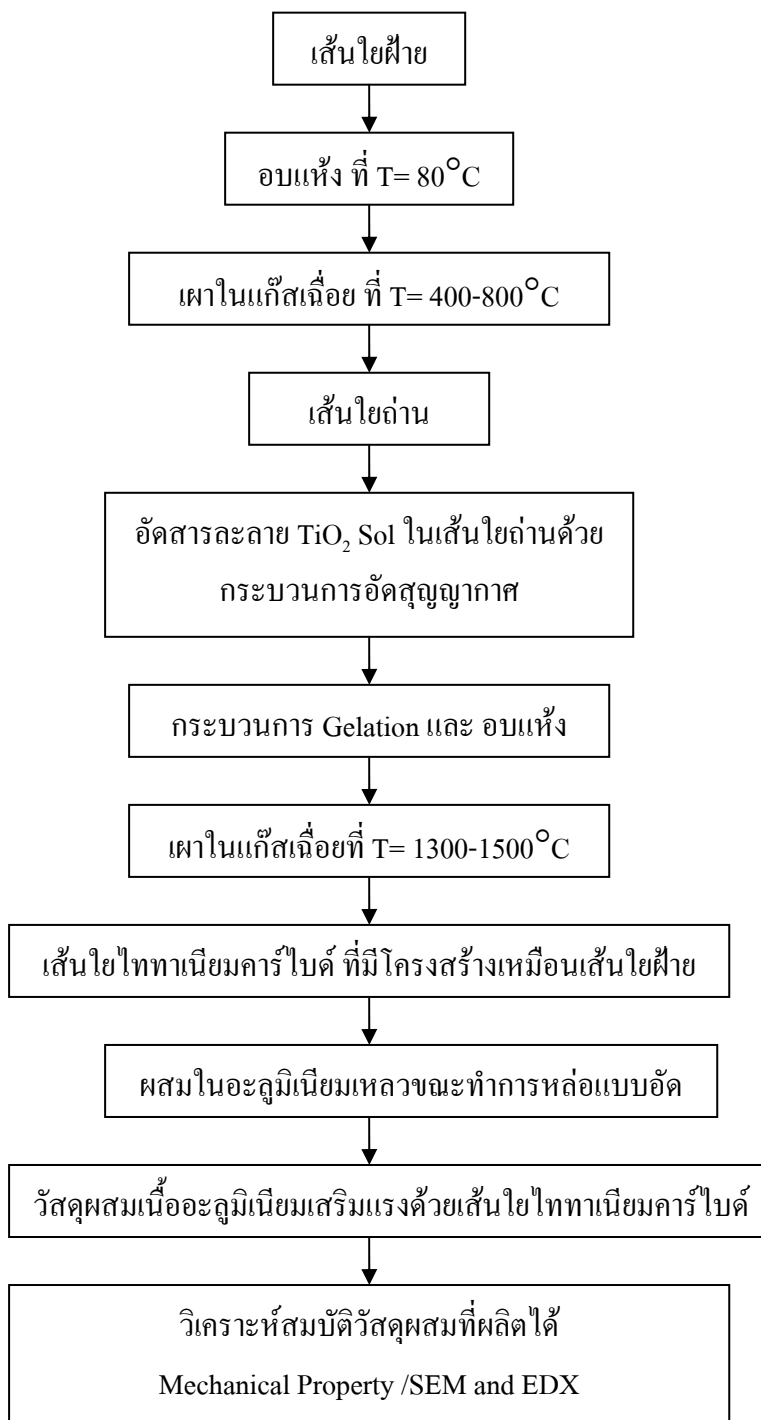


รูปที่ 2.23 แสดงรูปตำแหน่งในการทดสอบความแข็ง

- การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอนั้นต้องนำชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบไปขัดน้ำหนักรและวัดขนาดก่อน และหลังการทำการทดสอบ ในการทดสอบครั้งนี้ทำการติดตั้งเครื่อง Wear test เข้ากับเครื่องขัดตัวอย่าง (Polishing machine) และบรรจุชิ้นงานในตัวจับชิ้นงานของเครื่อง โดยใช้ อัตราเร็วในการทดสอบ 200 rpm ใช้การดาษทรายเบอร์ P320 โดยกำหนดเวลาในการทดสอบ 0, 15, 30, 45 และ 60 นาที และน้ำหนักกด (Weight Load) ที่ 0.5 และ 1.0 กิโลกรัม

2.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย



รูปที่ 2.24 แสดงรูปขั้นตอนการผลิตเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์และกิจกรรมการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 3

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ การสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย การสังเคราะห์เส้นใย TiC ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้าย และการผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC

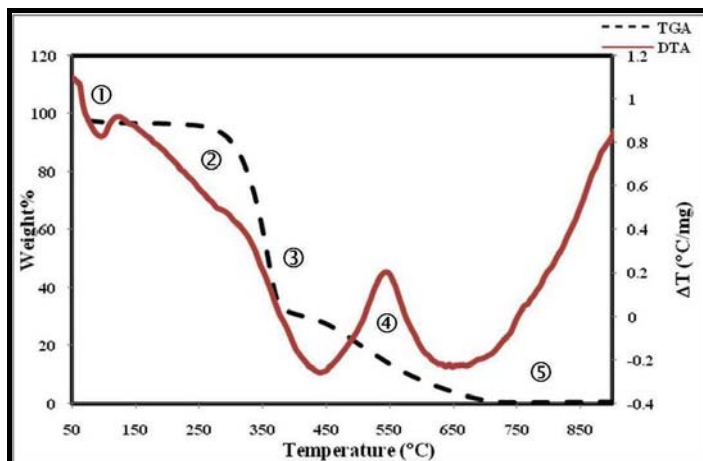
3.1 การสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย

การสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้ายจากเส้นใยฝ้ายธรรมชาติ โดยการผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันโดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซึ่งการสังเคราะห์ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผา ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้

3.1.1 ผลจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใยฝ้าย

3.1.1.1 อุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเป็นวัสดุจากธรรมชาติ เมื่อนำมาเผาโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ย่อมเกิดกลไกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในโมเลกุลและเนื้อเยื่อของเส้นใยฝ้าย จากการวิเคราะห์เส้นใยฝ้ายธรรมชาติด้วยเครื่อง Differential Thermal Analyzer (DTA) และ Thermogravimetry Analyzer (TGA) เพื่อดูการลดลงของน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อความร้อน โดยศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิ 50-900°C โดย อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน แสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 3.1

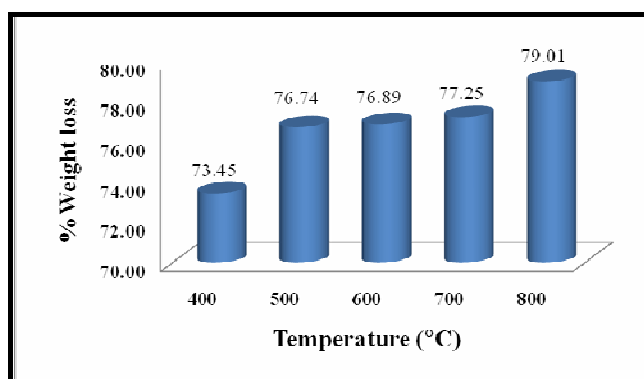


รูปที่ 3.1 แสดงรูป DTA และ TGA ของเส้นใยฝ้าย

จะเห็นว่า เส้นใยฝ้ายธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาการในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลง การลดลงของน้ำหนักต่อความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากกราฟ TGA ดังนี้

- (1) ตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิ 250°C เป็นขั้นตอนของกระบวนการคายน้ำ และการแตกตัวของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งในกระบวนการคายน้ำ น้ำหนักจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก
- (2) ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ $250-300^{\circ}\text{C}$ จะเห็นได้ว่าน้ำหนักเริ่มมีการลดลง ซึ่งช่วงนี้เป็นช่วงของการเริ่มแตกตัวของลิกนิน
- (3) ช่วงอุณหภูมิ $300-370^{\circ}\text{C}$ การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้คิดเป็น 70% ของทั้งหมดซึ่งช่วงนี้จะเป็นกระบวนการสลายตัวอย่างรวดเร็วของลิกนิน
- (4) ช่วงอุณหภูมิ $400-700^{\circ}\text{C}$ ยังเป็นการสลายตัวของลิกนินอยู่ และในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาของสารระเหย เกิดการดึงเอาคาร์บอนมาใช้ในปฏิกิริยา เกิดเป็นวาเคนซีในโครงสร้าง
- (5) ตั้งแต่อุณหภูมิ 700°C เป็นต้นไปปฏิกิริยาต่างๆแทบสิ้นสุด ลิกนินสลายตัวหมดเหลือไว้แต่โครงสร้างของเส้นใยฝ้ายที่เป็นคาร์บอนและเป็นช่วงที่เกิดการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนตกค้างและคาร์บอนจะมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกเพิ่มขึ้นหากเพิ่มอุณหภูมิการเผาไปเรื่อยๆ

และจากการทดลองเพื่อตรวจสอบสมบัติและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย ฝ้ายธรรมชาติโดยการนำมาเผาที่อุณหภูมิ 400-800°C โดยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10°C/min เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ได้ผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไป ดังรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 (ดูรายละเอียดที่ภาคผนวก)

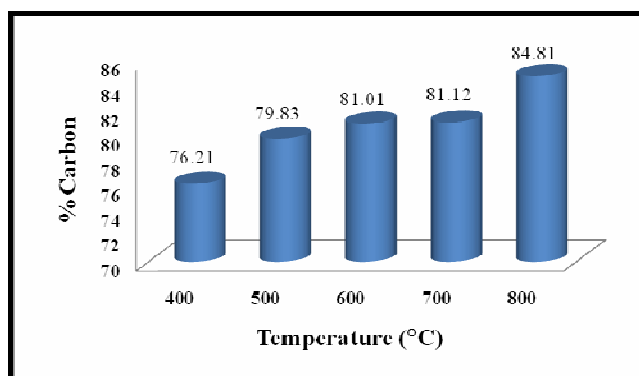


รูปที่ 3.2 แสดงรูปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 400°C ถึง 500°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการลดลงของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักอย่างเห็นได้ชัด หากพิจารณาประกอบกับรูปที่ 3.1 ก็จะพบว่าช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 400°C เป็นช่วงการของการเริ่มแตกตัวของลิกนิน ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดจะอยู่ในช่วงนี้ถึง 70% และที่อุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 500°C ขึ้นไปการเปลี่ยนแปลงต่างๆจะเริ่มคงที่ และสำหรับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปจะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 800°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่สิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด

3.1.1.2 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

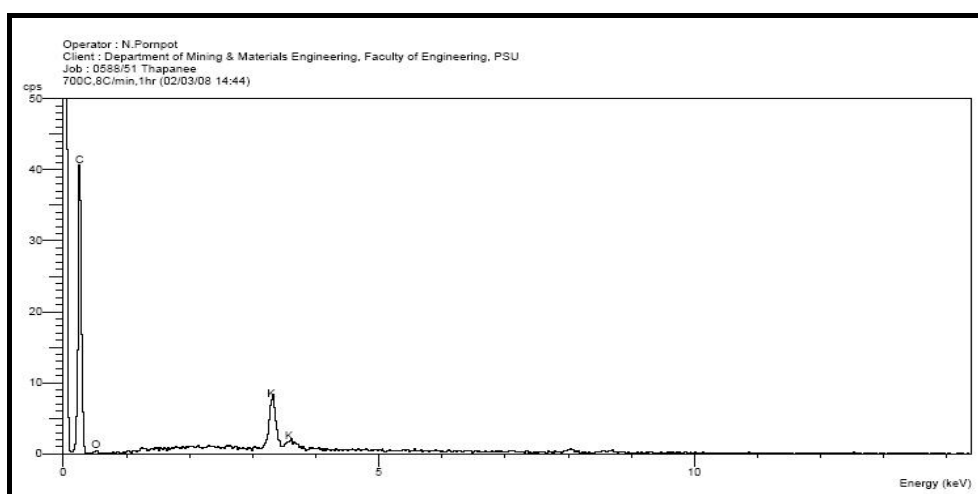
จากการพิจารณาอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปแล้ว พบว่าที่อุณหภูมิการเผาเส้นใยฝ้ายจะมีเกิดการเปลี่ยนแปลงและสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นต้นไป จากนั้นมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เงื่อนไขเดียวกันแสดงดังรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.1 ซึ่งวัดโดยใช้เครื่อง EDS ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของธาตุต่อพื้นที่ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 แสดงรูปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

จะเห็นได้ว่า เมื่อความร้อนสูงขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่า ตั้งแต่อุณหภูมิ 500°C ค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนจะเริ่มคงที่เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนจะมีปริมาณเปอร์เซ็นต์มากที่สุดที่อุณหภูมิการเผา 800°C นั้นแสดงให้เห็นว่าสำหรับเส้นใยฝ้ายธรรมชาติแล้วการเรียงตัวของคาร์บอนจะเริ่มคงที่แต่อุณหภูมิ 500°C และจะมีความเป็นผลึกของคาร์บอนที่สมบูรณ์ขึ้นเรื่อยๆเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้ายนั้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นก็จะมีผลต่อสภาพความเป็นเส้นใยคาร์บอน และจะมีความเป็นเส้นใยคาร์บอนที่สมบูรณ์ที่สุดที่อุณหภูมิ 800°C เนื่องจากมีปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่สูงและคงที่ แต่เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติจึงยังมีส่วนของธาตุอื่นประกอบอยู่หลังจากการสังเคราะห์ เช่น ธาตุโพแทสเซียม (K) และออกซิเจน (O₂) บ้างเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 3.4

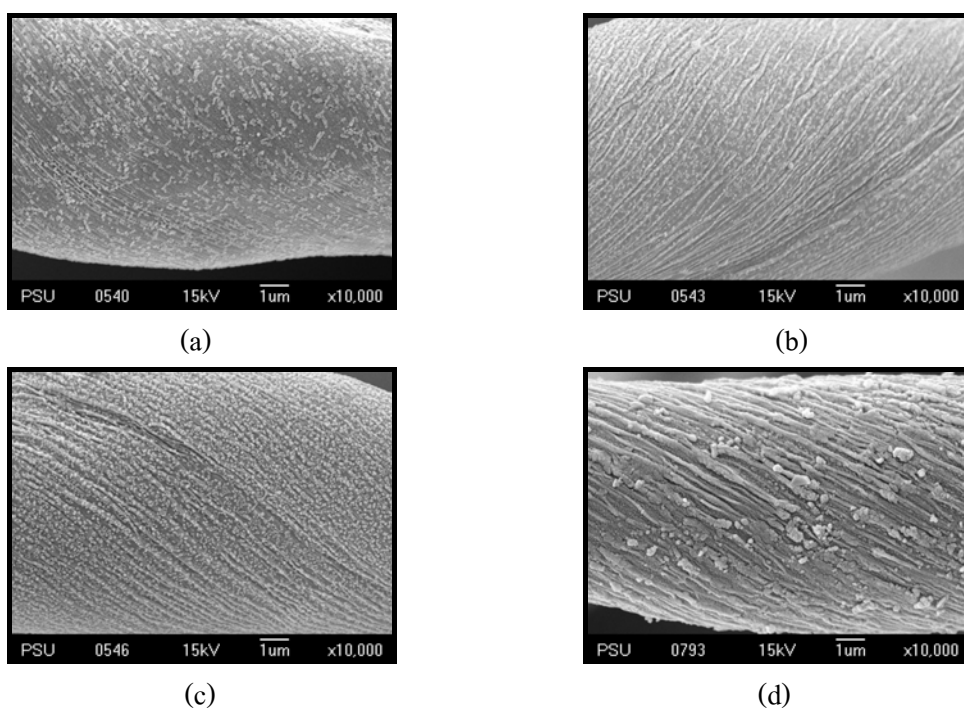


รูปที่ 3.4 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในถ่านเส้นใยฝ้าย

3.1.2 ผลกระทบจากอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ต่อสมบัติของถ่านเส้นใยฝ้าย

3.1.2.1 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อลักษณะการบิดตัวและรูปร่าง

อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิการเผา เป็นการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาซึ่งในทางโครงสร้าง และทางกลย่อมมีผลต่อสมบัติของวัสดุเสมอ และจากข้อมูลขั้นตอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเซลล์และโครงสร้างในเส้นใยฝ้ายพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อคุณภาพของถ่านเส้นใยฝ้ายที่ผลิต จึงทำการทดลองโดยศึกษาอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ 4, 6, 8 และ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิการเผา 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง รูปร่างลักษณะการบิดตัวที่เกิดขึ้นของถ่านเส้นใยฝ้ายแสดงดัง รูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.1



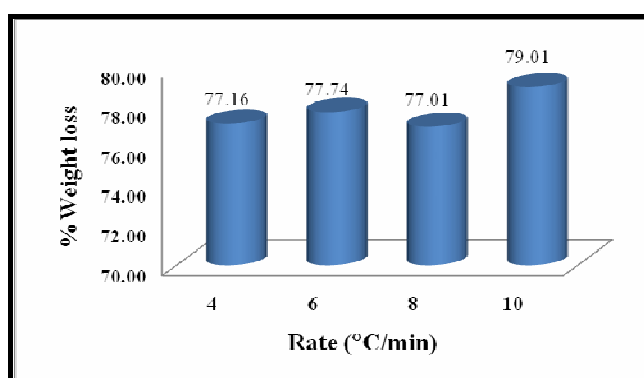
รูปที่ 3.5 แสดงรูปลักษณะโครงสร้างและการบิดตัวของถ่านเส้นใยฝ้ายจากการเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (a) $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, (b) $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$, (c) $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และ (d) $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

ซึ่งพิจารณาลักษณะ โครงสร้างการบิดตัวของถ่านเส้นใยฝ้ายที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ต่างกันนั้น พบว่าลักษณะการบิดตัวของถ่านเส้นใยฝ้ายเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการบิดตัวไปในแนวเดียวกัน และเมื่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูงขึ้นลักษณะการบิดตัวก็จะมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ ณ เวลาที่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ การบิดตัวค่อนข้างสูง และผิวของถ่านเส้นใยฝ้ายจะค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้

เป็นผลมาจากอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่สูงซึ่งในระหว่างการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนทำให้เกิดความเครียดขึ้นในเส้นใยฝ้าย เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความร้อนภายในและภายนอกของเส้นใยฝ้ายต่างกัน (C.E.Byrne and D.C.Nagle, 1997) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผาโดยผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน ในถ่านไม้ก็เช่นเดียวกันผลของอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็จะมีผลทำให้เกิดการแตกหักและปริของถ่านไม้ทั้งนี้เกิดจากความเครียดจากการหดตัวที่ผิว เนื่องจากการคายน้ำและการแตกตัวของเฮมิเซลลูโลสที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกและภายในของเนื้อไม้ สำหรับที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ 4, 6 และ 8 °C/min ฝ้ายที่ได้ออกมาค่อนข้างจะเรียบ และเป็นไปในแนวเดียวกัน ฉะนั้นจึงเหมาะที่จะนำมาทำการทดลองในขั้นต่อไป

3.1.2.2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

ในการทดลองนี้ทำการเผาถ่านเส้นใยฝ้ายด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิตามเงื่อนไขที่แยกกล่าวมาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการเปลี่ยนแปลงการทดลองของน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.1

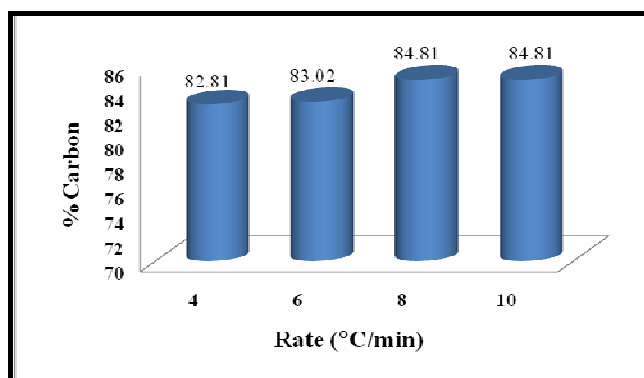


รูปที่ 3.6 แสดงรูปอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเป็นไปแบบไม่มีแนวโน้ม แต่จะเห็นว่าอยู่ในช่วง 77.16-79.01 โดยทั่วไปอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิการเผาไหม้จะส่งผลให้เห็นชัดเจนในด้านโครงสร้างจุลภาค การบิดตัวการโค้งงอของรูปร่างมากกว่าที่จะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดของน้ำหนักของวัสดุ ซึ่งจากผลการทดลองพอจะสรุปได้ว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของการเผาส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

3.1.2.3 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

แสดงค่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ดังรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 แสดงรูปอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนก็เช่นเดียวกัน คือ ไม่ว่าจะใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิช้าหรือเร็ว ค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้ค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซึ่งมากกว่าดังผลในรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.1

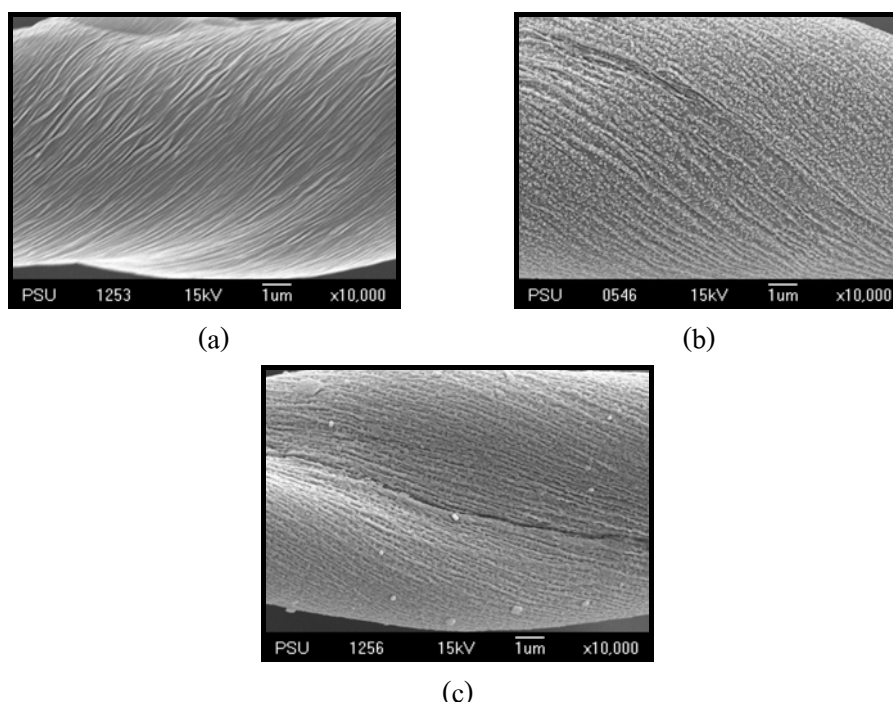
เมื่อพิจารณาจากทั้งลักษณะรูปร่าง โครงสร้างการบิดตัว เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง เปอร์เซ็นต์ C ซึ่งสองอย่างหลังไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงใดๆ พิจารณาจากโครงสร้างพบว่าที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 4, 6 และ 8 °/min เป็น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการสังเคราะห์ แต่ด้วยเหตุผลของต้นทุนในการผลิต อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ 8 °C/min เป็นอัตราที่เหมาะสมที่สุด

3.1.3 ผลกระทบจากเวลาที่ใช้ในการเผาต่อสมบัติของถ่านเส้นใยฝ้าย

เวลาในการเผาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งต่อสมบัติของถ่านเส้นใยฝ้าย จึงนำปัจจัยของเวลาในการเผามาทำการทดลอง โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 800 °C โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 8 °C/min ที่เวลา 0.5, 1.0 และ 1.5 ชั่วโมงโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง รูปร่าง ลักษณะการบิดตัวที่เกิดขึ้นของถ่านเส้นใยฝ้ายเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปและเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

3.1.3.1 เวลาที่ใช้ในการเผาต่อลักษณะการบิดตัวและรูปร่าง

เวลาในการสังเคราะห์หรือเวลาในการเผา นั้นมักมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างรูปร่างและการบิดตัวของวัสดุ เช่นเดียวกับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิการเผา เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวก็เกี่ยวข้องกับเวลาและความร้อนสะสมทำให้เกิดความเครียดขึ้นในเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในการสังเคราะห์เช่นกัน และสำหรับเส้นใยฝ้ายธรรมชาติซึ่งมีโครงสร้างที่เล็กบาง ปัจจัยในเรื่องเวลาในการเผาก็ย่อมส่งผลต่อลักษณะการบิดตัวเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3.8

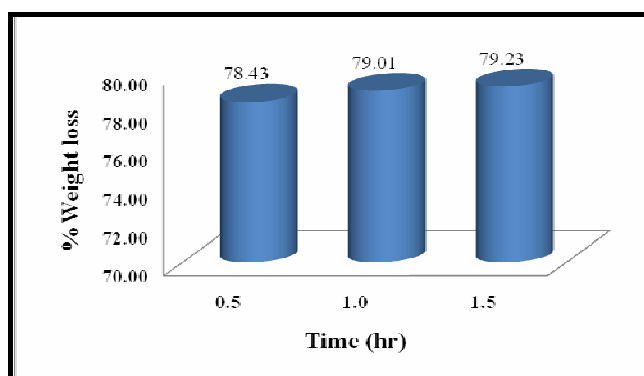


รูปที่ 3.8 แสดงรูปลักษณะ โครงสร้างและการบิดตัวของถ่านเส้นใยฝ้ายจากการเผาที่อุณหภูมิ 800°C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ที่เวลาในการเผาต่างกัน
(a) 0.5 ชั่วโมง, (b) 1.0 ชั่วโมง และ (c) 1.5 ชั่วโมง

จากรูปที่แสดงลักษณะโครงสร้างลักษณะการบิดตัวที่เวลาในการเผาที่ต่างกันจะเห็นว่า เวลาที่ใช้ในการเผานานลักษณะการบิดตัวของเส้นใยฝ้ายก็จะมากขึ้นด้วยสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่การบิดตัวของโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายที่มากขึ้นไม่ได้ส่งผลดีต่อสมบัติทางกลแต่อย่างใด เพราะการบิดตัวสูงนั้นทำให้โครงสร้างของเส้นใยฝ้ายที่ยาวเกิดการหักงอ และขาดได้ในที่สุด ซึ่งจะทำให้ลดสมบัติเชิงกลได้เมื่อนำไปผสมทำเป็นวัสดุเสริมแรง

3.1.3.2 เวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

เวลาในการเผาเป็นเงื่อนไขและปัจจัยหนึ่งในสังเคราะห์สาร เนื่องจากสารหรือวัสดุบางชนิดจะต้องให้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ สำหรับการสังเคราะห์เส้นใยคาร์บอนจากเส้นใยฝ้ายธรรมชาตินั้น เมื่อพิจารณาเวลาต่อสมบัติเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป แสดงดังรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.1

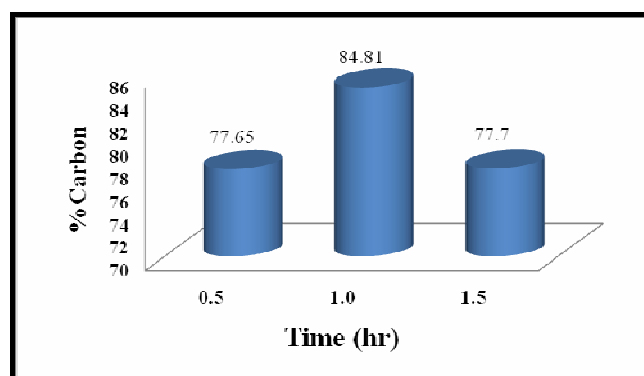


รูปที่ 3.9 แสดงรูปเวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

จะเห็นได้ว่าเวลาต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปนั้นแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปแตกต่างกันเพียงน้อยนิด ถือว่าเวลาที่ใช้ในการเผา 0.5, 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง ได้สมบัติเหมือนกัน

3.1.3.3 เวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

เวลาที่ใช้ในการเผาของการสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้าย เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนค่าที่ได้ แสดงดังรูปที่ 3.10 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.10 แสดงรูปเวลาที่ใช้ในการเผาต่อเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

และเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาจะเห็นได้ว่าเป็นแบบไม่มีแนวโน้ม ทำให้สามารถยืนยันผลได้เลยว่า การใช้เวลาในการเผาไม่ได้ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนแต่อย่างใด ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าการใช้เวลาในการเผาเพียง 0.5 ชั่วโมง ก็เพียงพอสำหรับสมบัติของถ่านเส้นใยฝ้ายที่ต้องการ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปและเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เงื่อนไขต่างๆ

Condition		% Weight loss	% Carbon
Fix	Vary		
10°C/min, 1.0hr	400°C	73.45	76.21
10°C/min, 1.0hr	500°C	76.74	79.83
10°C/min, 1.0hr	600°C	76.89	81.01
10°C/min, 1.0hr	700°C	77.25	81.12
10°C/min, 1.0hr	800°C	79.01	84.81
800°C, 1.0hr	4°C/min	77.16	82.81
800°C, 1.0hr	6°C/min	77.74	83.02
800°C, 1.0hr	8°C/min	77.01	84.81
800°C, 1hr	10°C/min	79.01	84.81
800°C, 10°C/min	0.5hr	78.43	77.65
800°C, 10°C/min	1.0hr	79.01	84.81
800°C, 10°C/min	1.5hr	79.23	77.70

3.2 การสังเคราะห์เส้น TiC ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้าย

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ เส้นใย TiC จากเส้นใยฝ้าย โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ การศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการอัดเคลือบโซล TiO₂ และผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาสังเคราะห์เส้นใย TiC

3.2.1 ผลของสถานะที่ใช้ในการอัดเคลือบโซล TiO₂

3.2.1.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งและเวลาในการอัดเคลือบโซล TiO₂ ต่ออัตราส่วนเชิงโมล ของ TiO₂ ต่อ C

จากสมการที่ (1) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง TiO₂ กับ C ในอัตราส่วนระหว่าง TiO₂ กับ C ดังนี้ TiO₂: C = 1:3 และ TiO₂/C = 0.33 เนื่องจากเส้นใยฝ้ายขนาดเล็กและบาง จึงทำการทดลองในการอัดเคลือบดังนี้

- (1) เคลือบโดยไม่ใช้ความดันเป็นเวลา 30 นาที
- (2) อัดเคลือบที่เวลา 1 นาที ที่ความดัน 70 mmHg
- (3) อัดเคลือบที่เวลา 2 นาที ที่ความดัน 70 mmHg
- (4) อัดเคลือบที่เวลา 3 นาที ที่ความดัน 70 mmHg
- (5) อัดเคลือบที่เวลา 4 นาที ที่ความดัน 70 mmHg
- (6) อัดเคลือบที่เวลา 5 นาที ที่ความดัน 70 mmHg
- (7) อัดเคลือบที่เวลา 30 นาที ที่ความดัน 70 mmHg

และเมื่อนำชิ้นงานหลังการเคลือบไปอบไล่ความชื้น ชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาเป็น อัตราส่วนเชิงโมล (molar ratio) ออกมาได้ค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการอัดเคลือบ 1 รอบ ต่อค่าอัตราส่วนเชิงโมล ของ TiO₂ ต่อคาร์บอน

Holding time	Cycle Infiltration	TiO ₂ /C (molar ratio)
30 Open Air	1	0.150
1	1	0.159
2	1	0.174
3	1	0.177
4	1	0.185
5	1	0.186
30	1	0.188

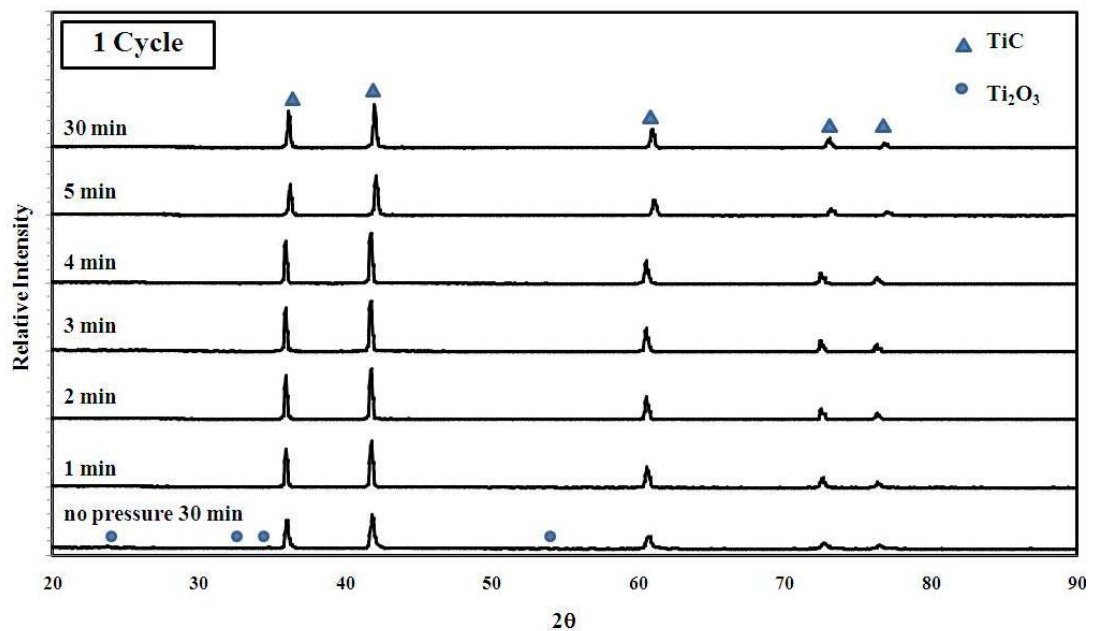
จากผลอัตราส่วนเชิงโมลที่ได้จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการอัดเคลือบเพิ่มค่าอัตราส่วนเชิงโมลที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มขึ้นมากนัก เมื่อเทียบกับค่า อัตราส่วนเชิงโมล

ที่ต้องการคือ 0.33 ดังนั้นจึงทำการ เพิ่มจำนวนครั้งในการอัดเคลือบเป็น 2 รอบ ที่เวลา 1, 2, 3 และ 4 นาทีผล อัตราส่วนเชิง โมลที่ได้ แสดงดังตารางที่ 3.3

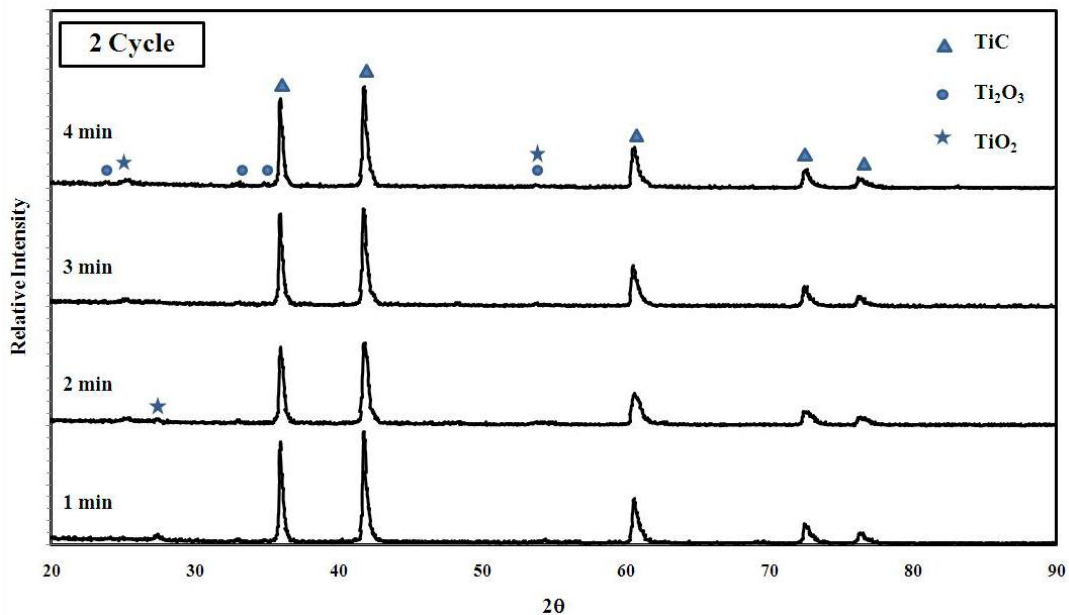
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการอัดเคลือบ 2 รอบ ต่อค่าอัตราส่วนเชิง โมลของ TiO_2 ต่อคาร์บอน

Holding time	Cycle Infiltration	TiO_2/C (molar ratio)
1	2	0.284
2	2	0.313
3	2	0.328
4	2	0.338

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำถ่านเส้นใยฝ้ายมาทำการอัดเคลือบเป็นจำนวน 2 รอบ จะได้ค่าอัตราส่วนเชิง โมลตามต้องการ จากนั้นนำชิ้นงาน ไปเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง XRD เพื่อหาสารประกอบในชิ้นงาน แสดงผลดังรูปที่ 3.11-3.12



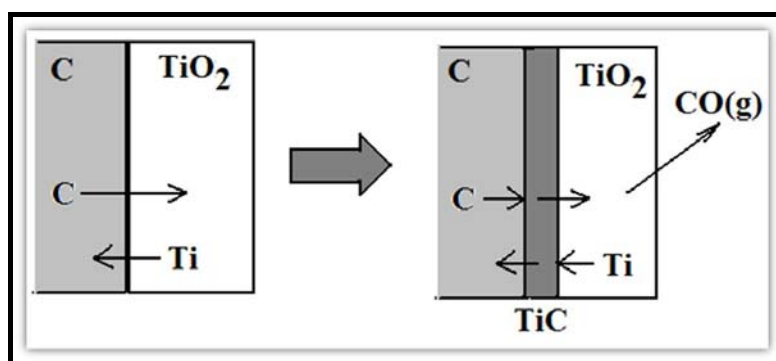
รูปที่ 3.11 แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใย TiC ที่ทำการอัดเคลือบ 1 รอบ



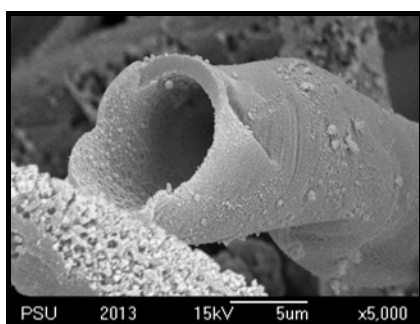
รูปที่ 3.12 แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใย TiC ที่ทำการอัดเคลือบ 2 รอบ

เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า เวลาที่ใช้ในการอัดเคลือบไม่ได้มีผลต่อผลิตภัณฑ์ TiC ที่ต้องการ คือ การเคลือบโดยใช้เวลาแค่ 1 นาที และใช้สุญญากาศก็สามารถสังเคราะห์ได้เป็น TiC ที่สมบูรณ์ แต่ก็ต้องเป็นสุญญากาศในกระบวนการเคลือบเพราะจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้ใช้สุญญากาศในกระบวนการเคลือบนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีเฟสของ Ti_2O_3 อยู่เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากดูดอากาศเป็นการเพิ่มแรงแคปิลลารีให้สารละลายโซล TiO_2 แทรกซึมไปยังโครงสร้างของถ่านเส้นใยฝ้าย ดังนั้นการดูดอากาศออกจึงจำเป็นต่อการทดลองในครั้งนี้ และสำหรับจำนวนครั้งในการเคลือบ แม้ว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการเคลือบจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนเชิงโมลตามที่ต้องการแต่เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD ผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับมีเฟสของ Ti_2O_3 และ TiO_2 เหลืออยู่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณ TiO_2 ที่ทำการเคลือบเข้าไปนั้นมีปริมาณที่มากเกินไปที่จะจับกับคาร์บอนของถ่านเส้นใยฝ้ายที่มี เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีเฟสออกไซด์ของไททาเนียมเหลืออยู่ ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากกลไกในการเกิด TiC นั้น เกิดจากกลไกการแพร่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง Ti กับ C เกิดเป็นชั้นของ TiC และเนื่องจากการแพร่ของ C จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเกิดเป็นชั้นของ TiC ขึ้นแล้ว TiC จะเป็นชั้นขัดขวาง Ti ส่วนที่เหลืออยากต่อการแพร่มาทำปฏิกิริยากับ C ซึ่งเป็นผลที่ทำให้ยังคงเหลือเฟสออกไซด์ของ Ti ส่วน C ที่เหลือก็จะทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงกลไกการเกิด TiC ดังรูปที่ 3.13 การเคลือบรอบที่ 2 ของ TiO_2 จึงเป็นเพียงการเพิ่มชั้นของ Ti อีกทั้งการอัดเคลือบโซล TiO_2 ในรอบแรกผ่านกระบวนการเจลเลชันจนแข็งตัวเคลือบติดกับผิวของถ่านเส้นใยฝ้าย การเคลือบในรอบที่ 2

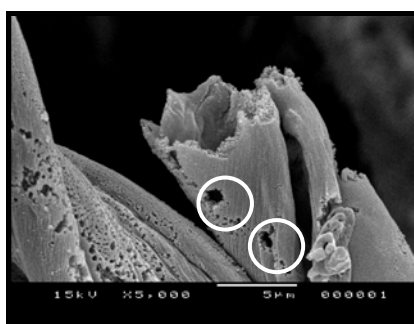
จึงไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปยังพื้นผิวของถ่านเส้นใยฝ้ายได้เมื่อนำไปเผาทำให้ยังคงเหลือเป็นเฟสออกไซด์ของ Ti ในทุกเวลาของการเคลือบ และการเคลือบเพียงรอบที่ 1 สามารถสังเคราะห์เป็น TiC ที่สมบูรณ์ได้เพราะเส้นใยมีขนาดเล็กพื้นที่ผิวสัมผัสสูง การทำกระเคลือบเพียง 1 รอบก็สามารถทำให้โซล TiO₂ แทรกซึมเข้าไปในเส้นใยฝ้ายได้ดี ข้อสังเกต อีกอย่างหลังการเผาก็คือผลิตภัณฑ์ที่ทำกระเคลือบ 2 รอบนั้น ค่อนข้างจะเปราะ อยู่นี้้อาจเป็นเพราะ TiO₂ ส่วนที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ C ได้นั้นยังคงเหลือเป็นผง TiO₂ เกาะอยู่กับเส้นใยถ่านที่มีเพียงชั้นของ TiC บางๆ ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติความเปราะสูงกว่า TiC ที่สมบูรณ์ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แสดงกลไกการเกิด TiC



(a)



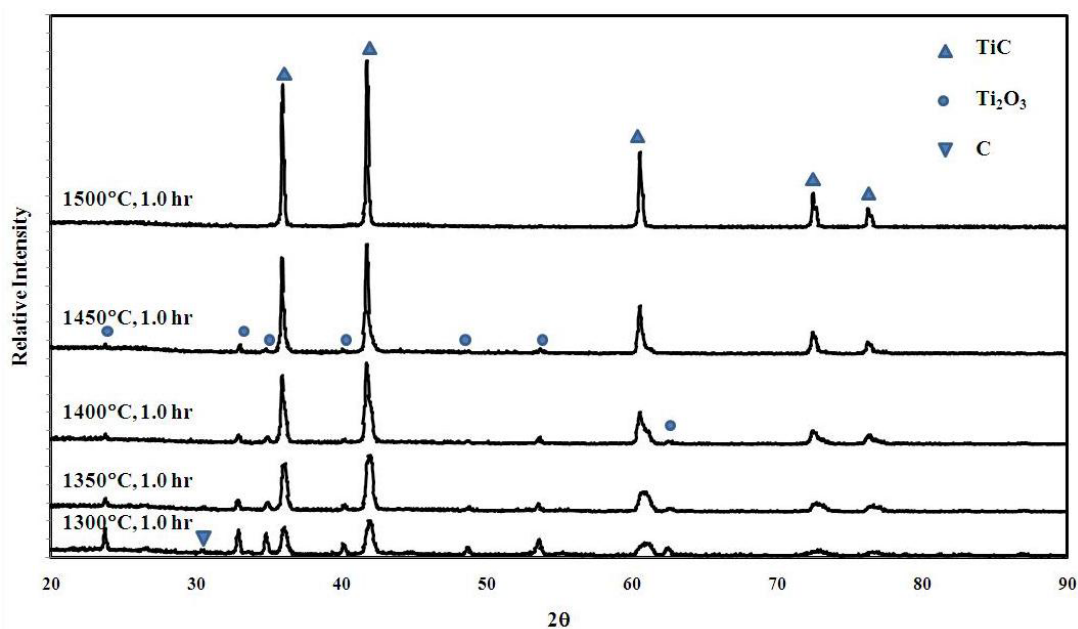
(b)

รูปที่ 3.14 แสดงรูปลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย TiC

(a) ผลิตภัณฑ์ที่ทำกระเคลือบ 1 รอบ (b) ผลิตภัณฑ์ที่ทำกระเคลือบ 2 รอบ

3.2.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการสังเคราะห์เส้นใย TiC

จากการศึกษาปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันของ TiO_2 กับ C จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$ โดยอาศัยหลักการของพลังงานกิบส์ต่ำสุด (Gibbs energy minimization) และเมื่อนำไปคำนวณเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่ความเป็นไปได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HSC[®] นั้นพบว่า ที่อุณหภูมิมากกว่า 1300°C TiO_2 ทำปฏิกิริยากับ C เป็น TiC แทบทั้งหมดจึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ ที่ $1300, 1350, 1400, 1450$ และ 1500°C เพื่อหาอุณหภูมิที่สามารถสังเคราะห์ TiC ได้สมบูรณ์ที่สุด แล้วนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารด้วยเครื่อง XRD แสดงผลดังรูปที่ 3.15

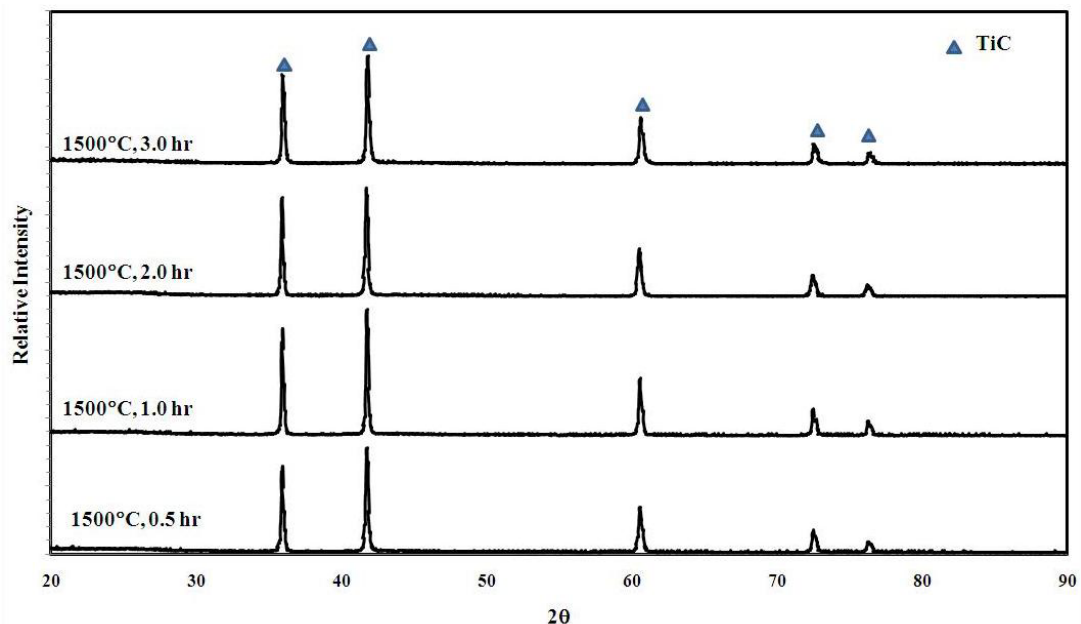


รูปที่ 3.15 แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใย TiC ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า TiO_2 และ C ของถ่านเส้นใยฝ้ายที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการเผาที่ 1300°C นั้นยังเหลือเฟสของ C อยู่ทั้งนี้ก็เป็นเพราะที่อุณหภูมิ 1300°C ปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 กับ C ยังทำปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์ และสอดคล้องกับกราฟจากโปรแกรม HSC[®] (รูปที่ 1.4) นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ $1300\text{--}1450^\circ\text{C}$ นั้นยังปรากฏเฟสของ Ti_2O_3 ทั้งนี้เป็นเพราะ ณ อุณหภูมิดังกล่าวการทำปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 กับ C ยังเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้ปรากฏเห็นเป็นเฟสของ Ti_2O_3 ซึ่งเป็นเฟสที่ถูกลดรูปของ TiO_2 โดย C จากปฏิกิริยา $2\text{TiO}_2 + \text{C} = \text{Ti}_2\text{O}_3 + \text{CO}$ นั้นเอง และเฟสของ TiC ที่สมบูรณ์ที่สุดเกิดที่อุณหภูมิ 1500°C และเป็นอุณหภูมิที่ควรนำไปใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้อุณหภูมิดังกล่าวเหมาะสำหรับการ

สังเคราะห์ TiC จากเส้นใยฝ้ายเท่านั้น ในการสังเคราะห์ TiC จากเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ อุณหภูมิที่เหมาะสมอาจไม่ใช่ 1500°C เช่น จากถ่านไม้สน (B.Sun et.al, 2004) สามารถสังเคราะห์ได้เป็น TiC สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1400°C หรือ เส้นใยอื่นๆที่ใช้เป็นสารตั้งต้น เช่น TiC ที่สังเคราะห์จากเส้นใย พิโนลิกเรซิน (M.Narisawa et.al, 1995) ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์นั้น เมื่อทำการสังเคราะห์โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1400°C จะได้เส้นใยที่สมบูรณ์แต่มีรูพรุน และถ้าเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 1600°C จะมีความสมบูรณ์และมีผิวเรียบมากขึ้น ทั้งนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นนั้นๆ

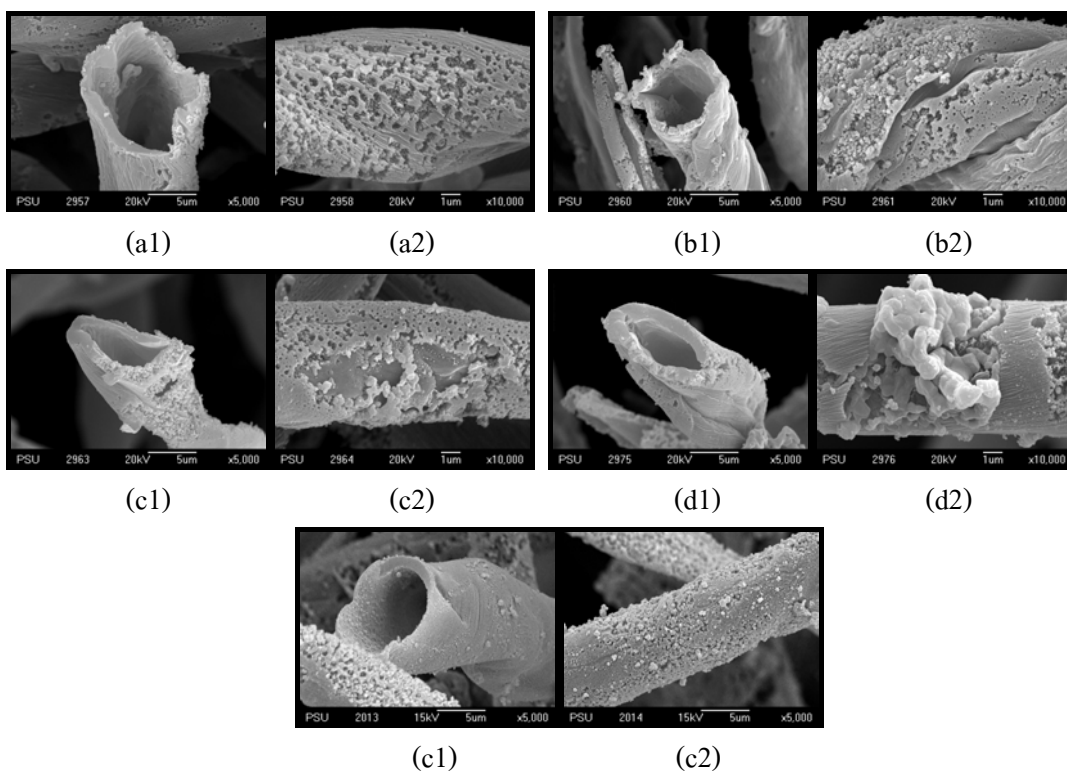
นอกจากอุณหภูมิที่ใช้แล้ว เวลาในการเผาเป็นอีกปัจจัยที่น่าสนใจและนำมาศึกษา ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เวลา 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 ชั่วโมง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง และผลของการเกิด TiC แสดงผล XRD ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงรูป XRD Patterns ของเส้นใย TiC ที่ทำการเผาที่เวลาต่างๆ

จากผล XRD จะเห็นได้ว่าการเผาหรือสังเคราะห์ TiC สามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ตั้งแต่ 0.5 ชั่วโมง ซึ่งในการนำไปผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ไม่จำเป็นต้องทำการเผาหรือสังเคราะห์เป็นเวลานานก็สามารถสังเคราะห์ได้เป็น TiC ทั้งนี้เป็นเพราะในการสังเคราะห์ TiC นั้น เมื่อทำการเผาจนถึงอุณหภูมิที่เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ก็จะได้เป็นเฟส TiC เวลาในการเผานั้น ไม่ได้มีผลมากนักแต่ก็จะช่วยให้เฟสที่ได้มีความเสถียรเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเผา

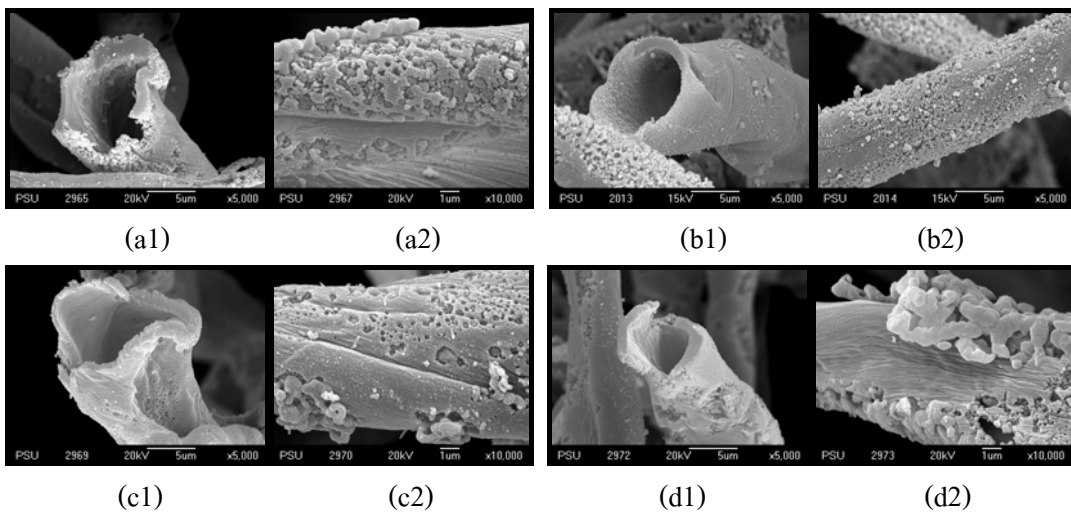
สำหรับลักษณะรูปร่างภายหลังการสังเคราะห์ถ่านเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใย TiC นั้น จากผลของโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 3.17-3.18 ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆจะเห็นได้ว่ายังสามารถรักษาโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายไว้ได้ และลักษณะของเส้นใยที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงก็ยังสามารถรักษาสภาพความเป็นท่อกลวงดั้งเดิมไว้ได้ แม้จะผ่านกระบวนการอัดเคลือบด้วยความดันผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงก็ตามทั้งนี้เป็นเพราะเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยชั้นหลายชั้นซึ่งสามารถรักษารูปร่างได้ดี และแม้จะผ่านกระบวนการอัดเคลือบและเผาสังเคราะห์ก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาสร้างเป็นชั้นของ TiC ขึ้นนั้นส่งผลต่อการรักษารูปร่างของลักษณะเส้นใยเดิมไว้ได้เช่นกัน นอกจากนี้จะเห็นลักษณะการเกาะของ TiC บนผิวของถ่านเส้นใยฝ้ายเป็นลักษณะของการเกาะเคลือบ ซึ่งด้วยพื้นผิวสัมผัสของเส้นใยฝ้ายที่มากทำให้ TiC สามารถเกาะได้ในปริมาณที่สูง



รูปที่ 3.17 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย TiC ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

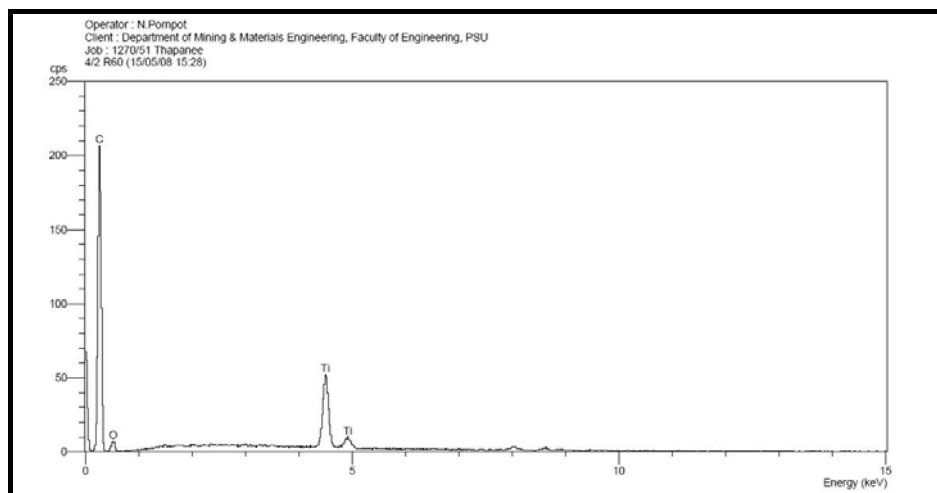
(a) อุณหภูมิ 1300°C (b) อุณหภูมิ 1350°C (c) อุณหภูมิ 1400°C

(d) อุณหภูมิ 1450°C (e) อุณหภูมิ 1500°C

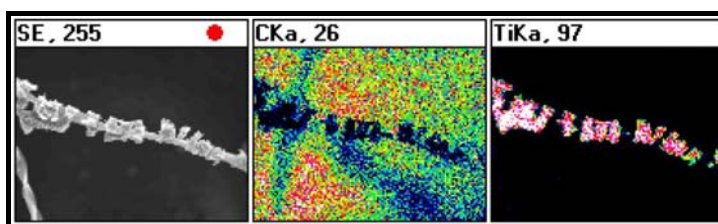


รูปที่ 3.18 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย TiC ที่ทำการเผาที่เวลาต่างๆ
 (a) 0.5 hr. (b) 1.0 hr. (c) 2.0 hr (d) 3.0 hr.

จากผลการวิเคราะห์ด้วย EDS เพื่อหาค่าประกอบปริมาณธาตุพบว่า ส่วนที่เกาะ
 อยู่บริเวณผิวของถ่านเส้นใยฝ้ายเป็นอนุภาค TiC ดังแสดงในรูปที่ 3.19-3.20



รูปที่ 3.19 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในเส้นใย TiC



รูปที่ 3.20 แสดงรูป X-ray mapping ของเส้นใย TiC

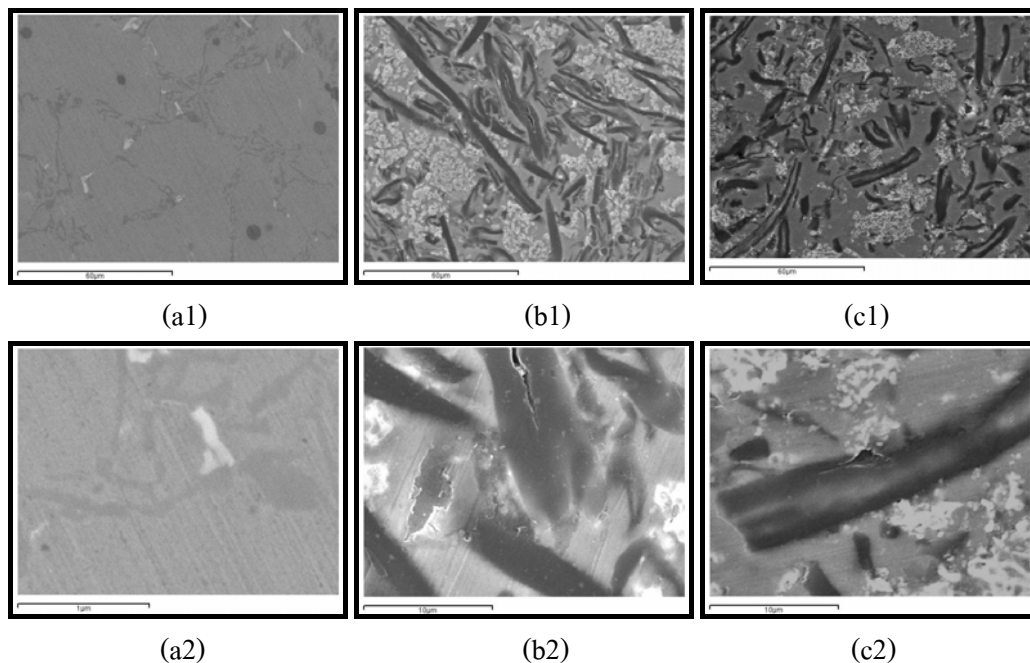
จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและการวิเคราะห์ด้วย EDS-mapping เพื่อดูตำแหน่งของธาตุต่างๆ ซึ่งก็จะเห็นได้ว่าส่วนที่เป็น ธาตุ Ti และ C เกาะอยู่บนเส้นใยคาร์บอน ลักษณะการเกาะจะเป็นลักษณะเป็นเม็ดยึดจับอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยที่ตำแหน่งเดียวกัน จากผลการวิเคราะห์เป็นไปได้ว่าส่วนดังกล่าวเป็นอนุภาค TiC และเส้นใย TiC ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เฟสด้วย XRD ในรูปที่ 3.16 ยังมีสมบัติอื่นๆอีกนอกเหนือจากนี้ เช่น สมบัติเชิงกลเพราะการที่จะนำไปใช้งานซึ่งจะต้องผสมกับโลหะอะลูมิเนียมจะต้องการทำภายใต้อุณหภูมิและแรงดันที่สูงเพราะฉะนั้นความมีสมบัติที่เสถียรทั้งด้านกายภาพและการเป็นสารประกอบที่สมบูรณ์มีความจำเป็นอย่างยิ่ง

3.3 การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC

เมื่อทำการสังเคราะห์เส้นใย TiC จากเส้นใยฝ้ายได้ผลเป็นที่น่าพอใจแล้ว จึงนำเส้นใย TiC มาเพิ่มสมบัติทางด้านวัสดุให้ได้เป็นวัสดุผสมตัวใหม่ขึ้น โดยนำมาผสมกับอะลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อให้ได้เป็นวัสดุผสมโลหะเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC และทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผลิตได้ โดยกระบวนการผลิตในครั้งนี้ทำการผสมขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโลหะหล่อแบบอัด ซึ่งอะลูมิเนียมที่เลือกใช้คือ อะลูมิเนียมผสม A 356 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่ใช้ในงานหล่อโลหะ และเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดแรกนำเส้นใย TiC ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย และยังคงรูปดั้งเดิมเส้นใยฝ้ายธรรมชาติอยู่ ผสมขึ้นรูปกับอะลูมิเนียมเหลว ชุดที่สองจากเส้นใย TiC ที่ได้นำมาบดเป็นเส้นใยขนาดสั้นและอัดขึ้นรูป Preform ก่อนที่จะนำไปผสมขึ้นรูปกับอะลูมิเนียมเหลว

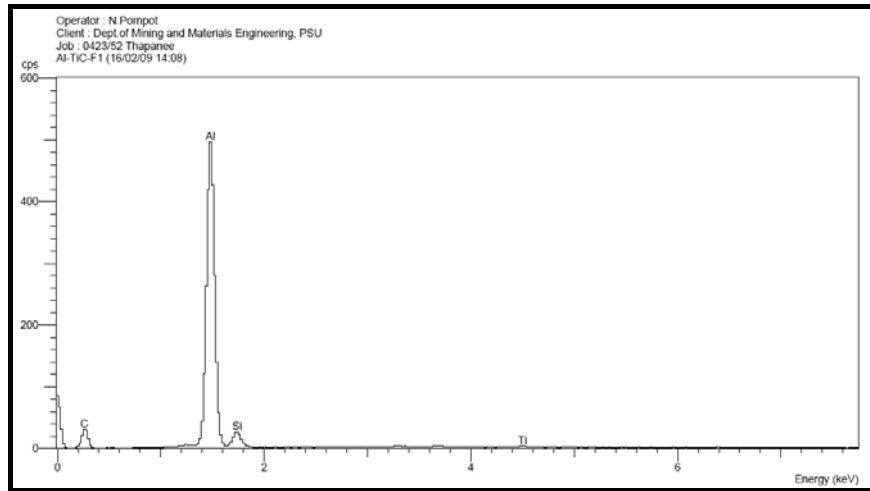
3.3.1 ลักษณะโครงสร้างและการแทรกตัวของวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC

ภายหลังจากหล่อผสมได้เป็นผลิตภัณฑ์จึงนำวิเคราะห์โครงสร้างคุณลักษณะการแทรกตัวระหว่าง Al กับ TiC แสดงดังรูปที่ 3.21 และทำการวิเคราะห์เพื่อดูธาตุประกอบด้วย EDS (Elemental mapping) แสดงดังรูปที่ 3.22-3.25 แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรง (Hardness) และสมบัติการสึกหรอ (Wear test)

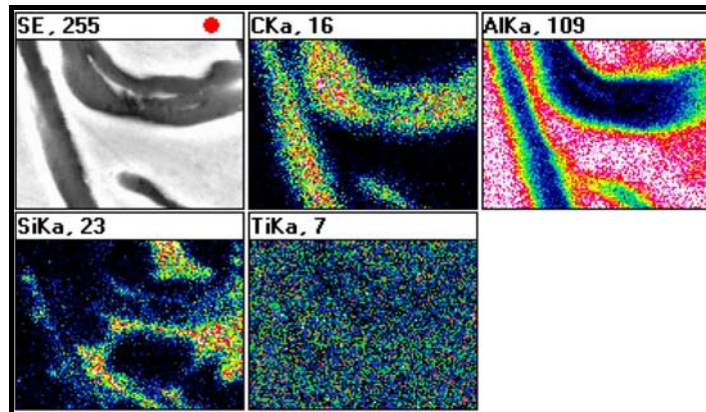


รูปที่ 3.21 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของ Al-TiC (a) Al-A356
(b) ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว (c) ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform

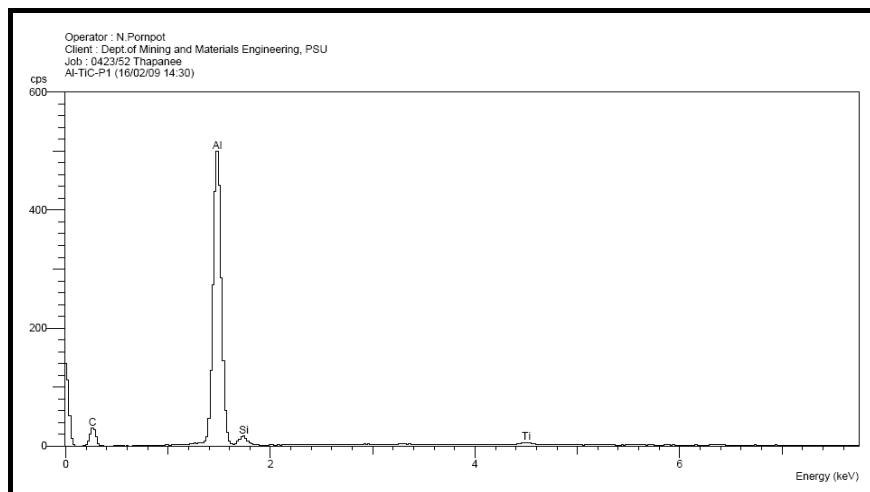
จากรูปโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม Al-TiC ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้ายจะเห็นได้ว่า แม้ผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันสูงและประกอบด้วยความร้อนจากอะลูมิเนียมเหลวลักษณะความเป็นโครงสร้างและรูปร่างของเส้นใยฝ้ายก็ยังสามารถคงรูปได้และด้วยความดันสูงในการอัดน้ำโลหะเหลวก็สามารถแทรกซึมเข้าไปยังช่องว่างและโครงสร้างของเส้นใยได้อย่างดี ทั้งนี้เป็นการเพิ่มสมบัติทางกลของ Al ยิ่งขึ้น แต่ลักษณะเส้นใย TiC ที่สังเคราะห์จากเส้นใยฝ้ายนั้นมีความเปราะเห็นได้จากรูปที่ทำการผสมแบบเส้นใยขนาดยาว การแตกเป็นทางยาวซึ่งเป็นการแตกของส่วนที่เป็นท่อกลวงของเส้นใยฝ้ายนั่นเอง สำหรับการผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform นั้นเส้นใยจะเป็นลักษณะเส้นใยขนาดสั้นที่เกาะกันจะมีความหนาแน่นสูงกว่า การกระจายตัวของ Ti ในวัสดุผสมก็จะสูงกว่าจะทำให้เพิ่มสมบัติทางกลที่ดีกว่าการผสมแบบเส้นใยขนาดยาว



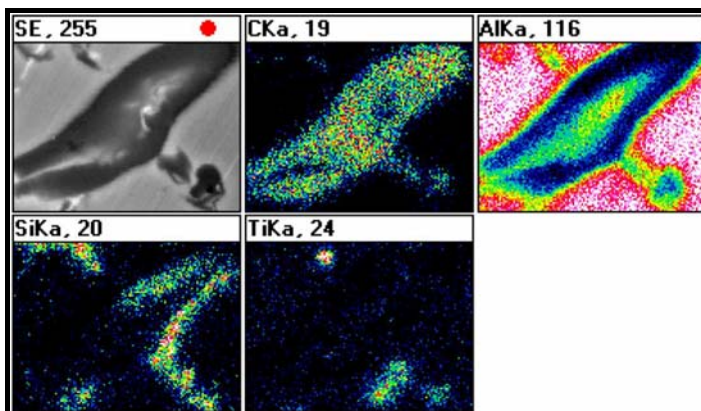
รูปที่ 3.22 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว



รูปที่ 3.23 แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว

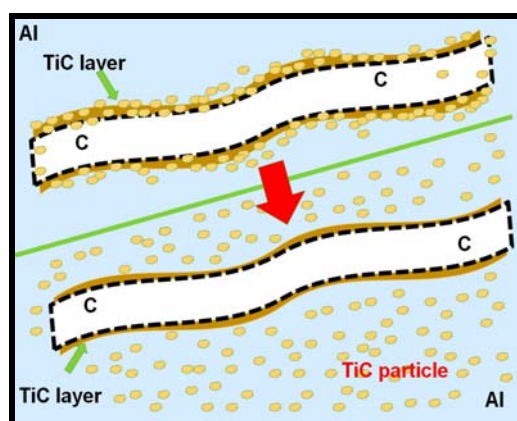


รูปที่ 3.24 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ธาตุในวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform



รูปที่ 3.25 แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform

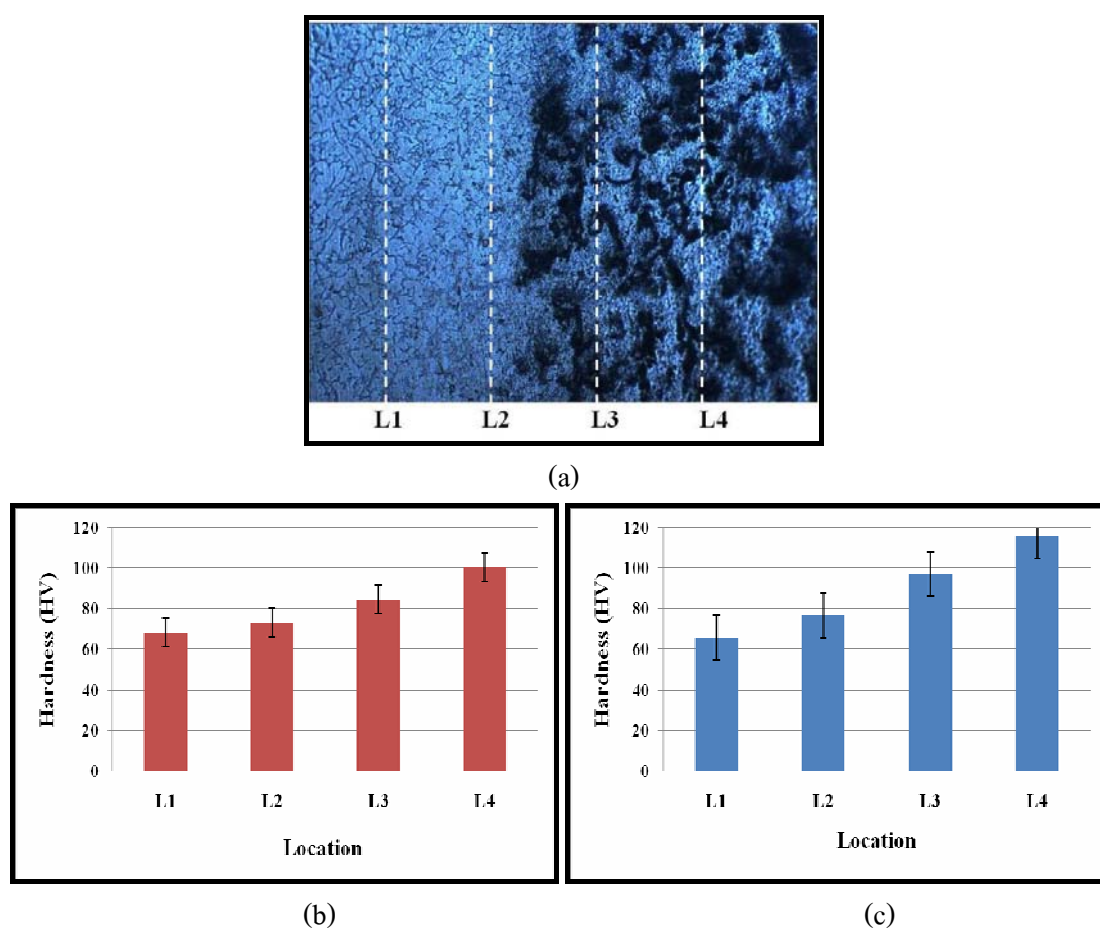
เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมที่ผลิตได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาธาตุองค์ประกอบและตำแหน่งของธาตุชนิดต่างๆในชิ้นงานด้วยเครื่อง EDS ปรากฏว่าเส้นใยไททานเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้แล้วนำมาผสมขึ้นรูปกับอะลูมิเนียมเหลวด้วยวิธีหล่อแบบอัดแล้วนั้นแม้จะยังสามารถรักษาโครงสร้างเดิมของเส้นใยฝ้ายไว้ได้แต่เส้นใย TiC ที่สังเคราะห์ได้นั้น เมื่อนำมาผสมกับอะลูมิเนียมพบว่าเส้นใยที่เห็นเป็นเส้นใยคาร์บอนที่มีชั้นบางของ TiC อยู่บริเวณผิว ส่วนที่เป็นอนุภาค TiC จะกระจายไปทั่วทั้งชิ้นงาน และยังมีปริมาณที่ต่ำอีกด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเกาะตัวอย่างหลวมๆ ของอนุภาค TiC (ดังในรูป 3.18 a2 และ d2) และชั้นของ TiC เป็นเพียงชั้นบาง และเมื่อได้รับแรงอัดจากกระบวนการหล่อแบบอัด ทำให้อนุภาค TiC ที่เกาะภายนอกเส้นใยหลุดออกมาจากส่วนที่เป็นส่วนที่เป็นชั้นบาง TiC แสดงตำแหน่งของธาตุและสารประกอบหลังการหล่อแบบอัด ดังรูปที่ 3.26 ดังนั้นในการทดลองนี้ จากที่ต้องการวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC นั้น กลับได้เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมเส้นใยคาร์บอนที่มีชั้นบางของ TiC ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุหล่อลื่นด้วยตัวเอง มากกว่าที่จะนำไปทำเป็นวัสดุเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 3.26 แสดงตำแหน่งของธาตุและสารประกอบหลังการหล่อแบบอัด

3.3.2 ผลการวิเคราะห์ทางด้านความแข็ง

เนื่องจากความแข็งเป็นสมบัติทางกลอย่างหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุผสมแบบ Metal Matrix Composite (MMC) ซึ่งในที่นี้ก็คือ อะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย TiC และโดยปกติแล้วความแข็งของอะลูมิเนียมจะอยู่ในช่วง 40-60 HV และการที่เราใส่เส้นใย TiC ที่ผลิตได้จากเส้นใยฝ้ายมาเสริมเรงนั้นก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุจากการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความแข็งของวัสดุ MMC ที่ผลิตได้ที่ตำแหน่งต่างๆ และผลของค่าความแข็งที่ตำแหน่งนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แสดงรูปผลการทดสอบสมบัติทางความแข็ง

(a) แสดงตำแหน่งในการทดสอบความแข็ง

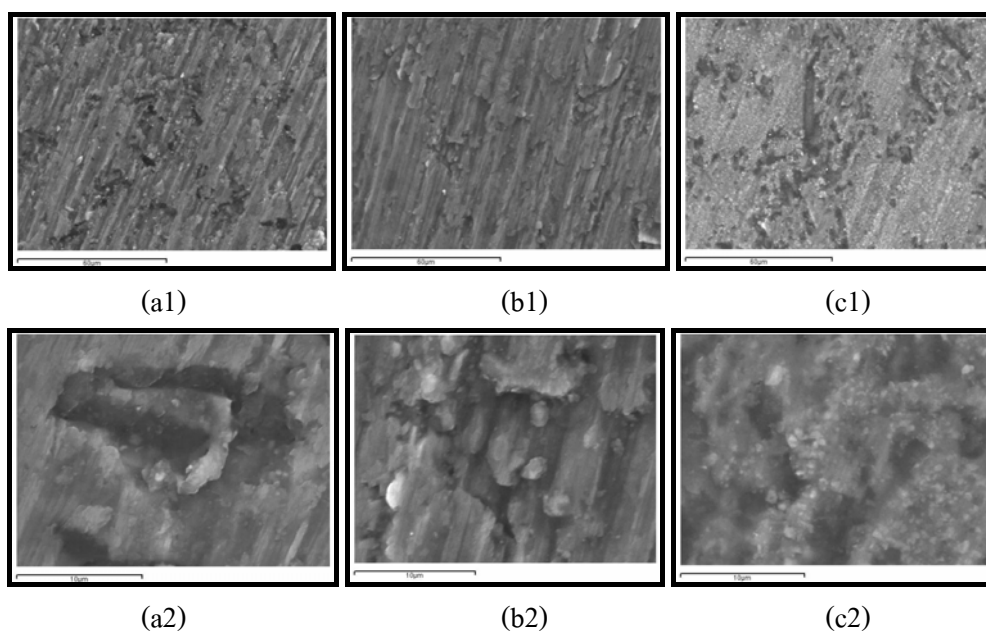
(b) ผลการทดสอบความแข็งของการผสมแบบเส้นใยขนาดยาว

(c) ผลการทดสอบความแข็งของการผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความแข็งของวัสดุอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC ที่ตำแหน่งต่างๆจะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งที่เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (L1) จะมีค่าความแข็งประมาณ 70 HV และเมื่อทำการวัดค่าความแข็งเข้าไปใกล้ตำแหน่งที่เป็นวัสดุผสม (L2) ค่าความแข็งก็มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามลำดับ ณ บริเวณที่เป็นวัสดุผสม คือ มีค่ามากถึง 100-110 HV ณ ตำแหน่ง L4 และเมื่อพิจารณา สองเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้นคือ การผสมแบบเส้นใยขนาดยาว และการผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform ค่าความแข็งที่ได้ปรากฏว่าการผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform จะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการผสมแบบเส้นใยขนาดยาว อยู่ประมาณ 10 HV ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคไททาเนียมที่กระจายไปทั่วใน Al เหลว นั้น โดยในชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปเป็น Preform มีความหนาแน่นของเส้นใย TiC มากกว่า ทำให้มีปริมาณ TiC หนาแน่นกว่า จึงส่งผลให้ค่าความแข็งสูงสุด

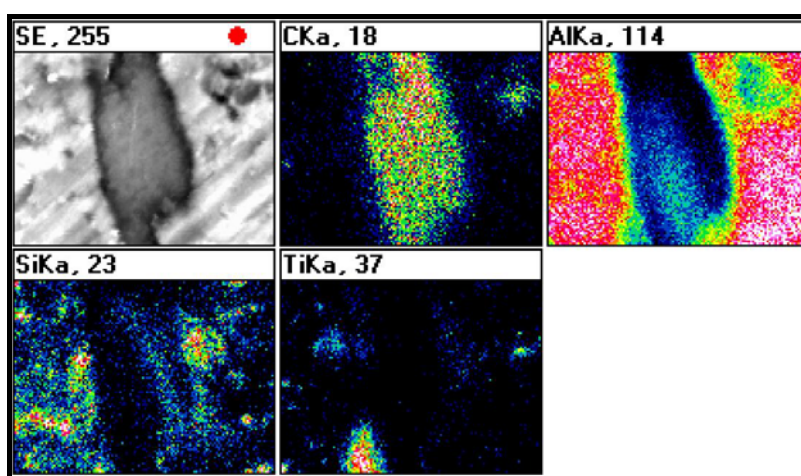
3.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการสึกหรอ

สำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานการสึกหรอ เป็นสมบัติทางกลอย่างหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งหลังจากการทดสอบการสึกหรอแล้วนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบ และทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เพื่อคุณลักษณะการสึกหรอและการถูกขัดสีของผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุผสม และวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบภายหลังการทดสอบด้วย เครื่อง EDS ดังแสดงในรูป 3.28-3.30

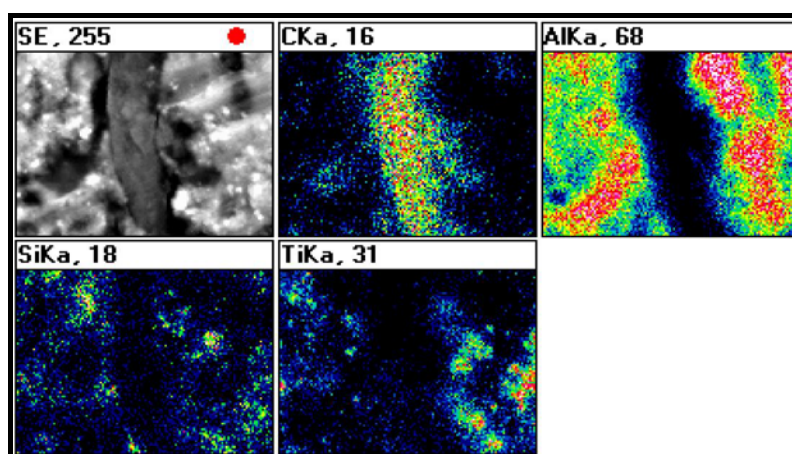


รูปที่ 3.28 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคของ Al-TiC หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Wear test) (a) Al-A356 (b) ผสมแบบเส้นใยขนาดยาว (c) ผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform

จากรูปโครงสร้างจุลภาคหลังการทดสอบการต้านทานการสึกหรอ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมจะถูกขัดออกมาเป็นชิ้นและเป็นร่องลึกทั้งนี้เนื่องจากความเนื้ออะลูมิเนียมที่มีความอ่อนนุ่ม (Soft) ทนแรงขัดสีได้น้อย และชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาดยาว การถูกขัดสีจะน้อยลงลักษณะการขัดสีเป็นแนวและมีความลึกลดลง แต่เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เสริมแรงแบบขึ้นรูปเป็น Preform จะได้สมบัติการขัดสีที่ดีที่สุดทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นและการกระจายตัวของ Ti ที่มีในปริมาณที่มากกว่าซึ่ง Ti มีสมบัติช่วยเสริมในการต้านทานการสึกหรอที่ดี

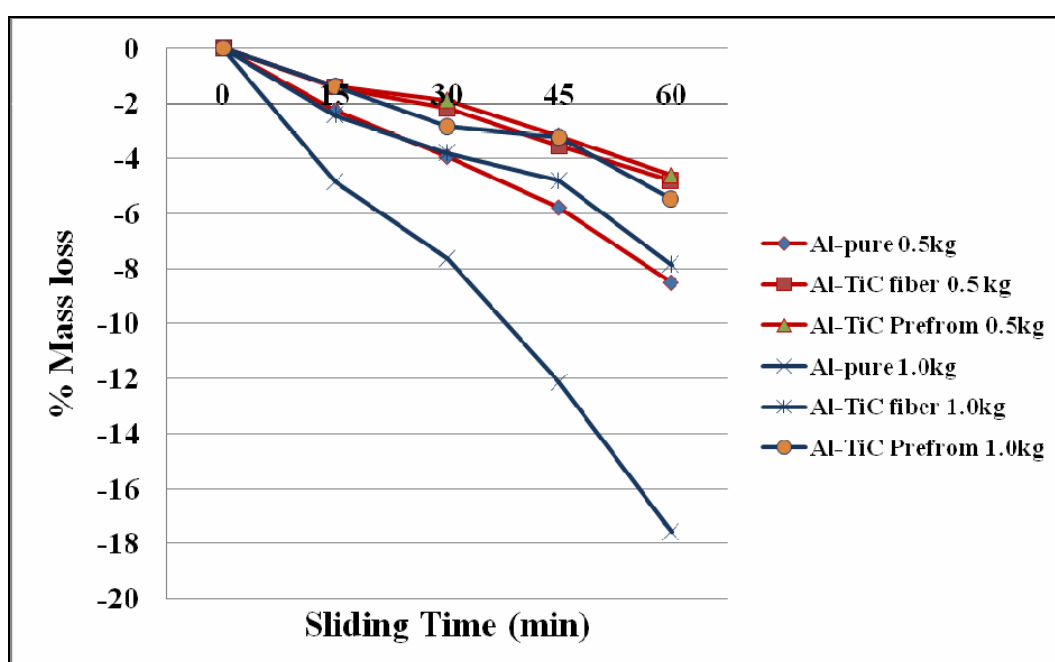


รูปที่ 3.29 แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC หลังการทดสอบการสึกหรอผสมแบบเส้นใยขนาดยาว



รูปที่ 3.30 แสดงรูป X-ray mapping ของวัสดุผสม Al-TiC หลังการทดสอบการสึกหรอผสมแบบขึ้นรูปเป็น Preform

จากรูป แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆในชิ้นงานวัสดุผสม MMC ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเส้นใยที่ยึดจับกับอะลูมิเนียมได้อย่างแน่นแต่จะเห็นได้ว่าอะลูมิเนียมแทรกตัวเข้าไปยังโครงสร้างหรือช่องว่างของเส้นใยได้ไม่มากนัก และธาตุไททาเนียมก็ยังคงแสดงให้เห็นว่ากระจายอยู่นอกบริเวณของเส้นใย C และเมื่อนำไปคำนวณหาน้ำหนักที่หายไปในการทดสอบ พบว่าวัสดุผสมสามารถต้านทานการสึกหรอได้สูงกว่าอะลูมิเนียมถึง 2 เท่า โดยชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปแบบ Preform สามารถต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่เป็นเส้นใยขนาดยาว 1-2 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักที่หายไปในการทดสอบการสึกหรอ

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาสังเคราะห์และผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้ายธรรมชาติ โดยการนำเส้นใยฝ้ายมาทำการเผาให้ได้เป็นเส้นใยถ่าน แล้วสังเคราะห์เป็นเส้นใย TiC จากนั้นนำไปผสมกับอะลูมิเนียมเหลว และทดสอบหาสมบัติต่างๆผลการศึกษารูปได้ดังนี้

1. หาสภาวะที่เหมาะสมโดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผา ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำ การเผาสังเคราะห์ให้ได้เป็นถ่านเส้นใยฝ้ายนั้นคือที่ 800°C ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และที่เวลา 0.5 ชั่วโมงเป็นต้นไป ทั้งนี้พิจารณาจากผลเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และลักษณะการบิดตัวและรูปร่างของถ่านเส้นใยฝ้ายที่ได้
2. นำเส้นใยถ่านที่ได้มาอัดเคลือบกับ โซล TiO_2 ที่สภาวะสุญญากาศ โดยศึกษาความสัมพันธ์อัตราส่วนเชิงโมล ของ TiO_2/C ซึ่งตัวแปรที่มีผลคือ จำนวนครั้งและเวลาที่ใช้ในการอัดเคลือบ โดยเมื่อคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่าง C กับ TiO_2 ให้ได้เป็น TiC ที่สมบูรณ์จะต้องมีอัตราส่วนเชิงโมล ของ TiO_2/C เท่ากับ 0.33 ได้ผลดังนี้
 - ที่การอัดเคลือบเป็นจำนวน 2 รอบ ใช้เวลา 4 นาที ขึ้นไป ได้ค่าอัตราส่วนเชิงโมลเท่ากับ 0.284-0.338 สำหรับการเคลือบเพียง 1 รอบ นั้นจะได้ค่าอัตราส่วนเชิงโมลเพียง 0.150-0.188 เท่านั้น ซึ่งคิดเป็น 50% ของอัตราส่วนเชิงโมลที่ต้องการ
 - ผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ ด้วย XRD เพื่อหาสารประกอบที่ได้ในการสังเคราะห์ พบว่าการทำการอัดเคลือบที่จำนวน 1 รอบโดยมีความดัน นั้นจะได้เฟสของ TiC ที่สมบูรณ์ทุกเวลาที่ใช้ในการทดลอง แต่ผลการวิเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการอัดเคลือบเป็นจำนวน 2 รอบนั้นกลับมีเฟสของ Ti_2O_3 และ TiO_2 ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะ โครงสร้างของเส้นใยฝ้ายที่มีขนาดเล็กลง และมีพื้นที่สัมผัสที่สูงทำให้สามารถดูดซับ TiO_2 ได้ในปริมาณที่มาก ทำให้ผลปฏิกิริยาจึงมีเหลือเฟสออกไซด์ของ Ti ที่เกินมา

- ผลทางด้านโครงสร้างจุลภาคพบว่าทำการอัดเคลือบจำนวน 2 รอบยังส่งผลให้ เส้นใย TiC ที่ได้เปราะและแตกหักอีกด้วย

ดังนั้นการอัดเคลือบเพียง 1 รอบ ก็เพียงพอในการสังเคราะห์ได้เป็นผลิตภัณฑ์ TiC

3. การเผาสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงได้ศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิและเวลา โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 1300-1500°C และผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถสังเคราะห์ ได้ TiC ที่สมบูรณ์คือ ที่อุณหภูมิ 1500°C ที่อุณหภูมิอื่นๆ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ยังคงเหลือเฟสของ Ti_2O_3 ทั้งนี้เป็นเพราะการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเผาหรือกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ส่วนเวลาที่ใช้ในการเผาสังเคราะห์นั้น แทบจะไม่มีผลใดๆ เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C ไม่ว่าจะใช้เวลาในการเผานานหรือซ้ำก็ได้เฟสของ TiC ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วย EDS เพื่อหาปริมาณและธาตุองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์ ที่ได้ประกอบด้วยธาตุ C และ Ti โดย TiC จะเกาะอยู่บริเวณผิวของเส้นใย C ดังที่ได้ตั้งสมมุติฐานไว้
4. เมื่อได้เป็นผลิตภัณฑ์ เส้นใย TiC แล้วนำไปผสมกับอะลูมิเนียม A356 เพื่อผลิตเป็นวัสดุผสม โดยใช้เส้นใย TiC เป็นตัวเสริมแรงโดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบ Squeeze Casting ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่เป็นเส้นใยทานิยมคาร์ไบด์ที่ยังคงรูปแบบเส้นใยฝ้าย และ แบบที่นำเส้นใย TiC มาอัดเป็น Preform แล้วนำไปผสมกับอะลูมิเนียม เพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุผสมที่ผลิตได้จึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็ง และการสึกหรอ
 - ค่าความแข็งในตำแหน่งที่เป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใย TiC นั้นแบบแรกในมีค่าอยู่ที่ 100HV และแบบที่สองมีค่าอยู่ที่ประมาณ 110HV ซึ่งมีค่าความแข็งที่สูงกว่าค่าความแข็งในตำแหน่งที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งได้ค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 70HV
 - การทดสอบหาค่าความต้านทานการสึกหรอแบบ pin on disk โดยใช้ Weight Load ที่ 0.5 และ 1.0 กิโลกรัม เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า % Mass lost ต่อ Siding time (min) ผลคือ วัสดุผสมที่ผลิตได้สามารถต้านทานการสึกหรอ

ได้มากกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ถึง 2 เท่า โดยค่า %Mass lost ของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ Weight Load 0.5 กิโลกรัมมีค่าอยู่ที่ 8.5 ที่ 1.0 กิโลกรัมมีค่าอยู่ที่ 17.56 เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที และวัสดุผสม MMC มีค่าอยู่ที่ % Mass lost เพียง 4.806 และ 7.854 สำหรับวัสดุผสมกับเส้นใยขนาดยาว และ 4.598 และ 5.477 สำหรับเส้นขนาดสั้นที่เตรียมเป็น Preform นั้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้สามารถต้านทานการสึกหรอได้สูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ถึงสองเท่า

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในกระบวนการอัดเคลือบถ่านเส้นใยด้วยโซล TiO_2 นั้นในการทดลองนี้ ต้องดูดอากาศออก 70 mmHg ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการลดความดันลงจากความดันบรรยากาศปกติที่ 76 mmHg ถึงประมาณ 10 นาที เพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตลงอีกอาจทำการดูดอากาศออกน้อยลง หรือทำการปล่อยให้ความดันกลับสู่ความดันบรรยากาศทันที โดยไม่ต้องรอเวลาที่ใช้ในการอัดเคลือบ

2. ขั้นตอนการผสมขึ้นรูปวัสดุผสมนั้น เนื่องจากเส้นใย TiC เป็นเส้นใยที่มีขนาดบางและเล็ก ไม่เหมาะกับการใช้แม่พิมพ์ที่มีอยู่ในการขึ้นรูป และมีความลำบากในการตัดตกแต่งชิ้นงาน จึงควรออกแบบแม่พิมพ์ให้ได้ตามขนาดที่ต้องการและไม่ต้องทำการตัดตกแต่งชิ้นงานเพิ่ม

ผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อนำมาทำการวิเคราะห์แล้วได้เป็นวัสดุผสม วัสดุผสมอะลูมิเนียม เส้นใยคาร์บอนที่มีชั้นบางของ TiC ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุหล่อลื่นด้วยตัวเองมากกว่าที่จะนำไปทำเป็นวัสดุเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ

บรรณานุกรม

- A.C. Contreras, E. Bedolla, and R. Perez, 2004, Interfacial phenomena in wettability of TiC by Al-Mg alloys, *Acta Mater.*, 52, pp. 985-994.
- A.E. Karantzalis, S. Wyatt, and A.R. Kennedy, 1997, The mechanical properties of Al-TiC metal-matrix composites fabricated by a flux-casting technique. *Mater. Sci. Eng. A.*, 237, pp. 200-266.
- A.R. Kennedy; D.P. Weston, and M.I. Jones, 2001, Reaction in Al-TiC metal matrix composites. *Mater. Sci. Eng. A.*, 316, pp. 32-38.
- A.R. Kennedy, and S.M. Wyatt, 2001, Characterising particle-matrix interfacial bonding in particulate Al-TiC MMCs produced by different methods. *Composites: Part A.*, 32, pp. 555-559.
- B. Sun, T. Fan, D. Zhang, and T. Okabe, 2004, The synthesis and microstructure of morphogenic TiC/C ceramics. *Carbon*, 42, pp. 177-182.
- B. Sun, T. Fan, J. Xu and D. Zhang, 2005, Biomorphie synthesis of SnO₂ microtubules on cotton fibers, *Mater. Lett.*, 59, pp. 2325-2328.
- C.E. Byrne and D.C. Nagle, 1997, Carbonization of wood for advanced materials applications. *Carbon*, 75(2), pp.259-266.
- C.R, Rambo, J. Cao, O. Rusina, and H. Sieber, 2005, Manufacturing of Biomorphie (Si, Ti, Zr)-carbide ceramics. *Carbon*, 43, pp. 1174-1183.
- C. Vix-Guterl and P. Ehrburger, 1997, Effect of the properties of a carbon substrate on its reaction with silica for silicon carbide formation. *Carbon*, 35(10-11), pp. 1587-1592.
- J.M. Qian, J. Wang and Z. Jin, 2004, Preparation of biomorphie SiC ceramic by carbothermal reduction of oak wood charcoal. *Mat. Sci. Eng. A*, 371, pp. 299-235.

- M. Balasubramanian, G. Amirthan, A. Udayakumar and V.V. Bhanu Prasad, Synthesis and characterization of Si/SiC ceramic prepared using cotton fabric., 2009, *Ceramics International*, 35, p.p.967-973.
- M. Narisawa, S. Kida, T. Simoo, K. Okamura, and Y. Kurachi, 1995, Synthesis of TiC-C fiber from titanium isopropoxide treated phenolic resin fiber, *J. Sol-gel Sci. & Tech.*, 4, pp. 31-35.
- M. Kitiwan and D. Atong. (2006). Synthesis and Characterization of Microwave and Conventional Combustion Synthesized Alumina-Titanium Carbide Powders. *JSME International Journal Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*, 49, 85-90.
- M.K. Premkumar, and M.G. Chu, 1995, Al-TiC particulate composite produced by a liquid state in situ process. *Mater. Sci. Eng. A.*, 202, pp. 172-178.
- M. Razavi, M.R. Rahimipor, and A.H. Rajabi-Zamani, 2007, Synthesis of nanocrystalline TiC powder from impure Ti chips via mechanical alloying, *J. Alloys Compd.*, 436, pp. 142-145.
- N. Setoudeh, A. Saidi and N.J. Welham, 2005, Carbothermic reduction of anatase and rutile, *J. Alloys & Compounds*, 390(1-2), pp. 138-143.
- P. Li, E.G. Kandalova, V.I. Nikitin, A.G. Makarenko, A.R. Luts and Z. Yanfei, 2003, Preparation of Al-TiC composites by self-propagating high temperature synthesis, *Scr. Mater.*, 49, pp. 699-703.
- R. Tyagi, 2005, Synthesis and tribological characterization of in situ cast Al-TiC composites. *Wear*, 259, pp. 569-576.
- S. Niyomwas, 2007, Synthesis of biomorphic TiC fibers using cotton as bio-templates, *EPD Congress 2007*, The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA, pp. 243-251.
- T. Fan, B. Sun, J. Gu, D. Zhang and L.W.M. Lau, 2005, Biomorphic Al₂O₃ fibers synthesized using cotton as bio-templates, *Scripta Mater.*, 53, pp. 893-897.
- T. Fan, X. Li, J. Ding, D. Zing and Q. Guo, 2008, Synthesis of biomorphic Al₂O₃ based on natural

- plant templates and assembly of Ag nanoparticle controlled within the nanopores., *Microporous and Mesoporous Materials*, 108, pp.204-212.
- U. Schubert and N. Husing, 2005, *Synthesis of inorganic materials*, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- V.H. Lopez, and A.R. Kennedy, 2006, Flux-assisted wetting and spreading of Al on TiC, *J. Colloid Interface Sci.*, 298. pp. 356-362-
- X.C. Tong, 1998, Fabrication of in situ TiC reinforced aluminum matrix composites Part I microstructural characterization, *J. Mater. Sci.*, 33, pp. 5365-5174.
- Y. Gotoh, K. Fujimura, M. Koike, Y. Ohkoshi, M. Nagura, K. Akamatsu and S. Deki, 2001, Synthesis of titanium carbide from a composite of TiO₂ nanoparticles/methyl cellulose by carbothermal reduction, *Materials Research Bulletin.*, 36, pp 2263-2275.

สิทธิบัตร

- A.H. Simpson, S.T. Fryska, M.L.L. Forrest and N.A. Gharbieh, 2005, Titanium carbide as a friction and wear modifier in friction materials. United State Patent, Pub. No. US 2005/0221051 A1.
- D.C. Nagle and C.E. Byrne, 2003, Carbonized wood and materials formed therefrom. United State Patent, Pat. No. US 6670039 B1.
- D.R. Behrendt and M. Singh, 1999, Producing fiber reinforced composites having dense ceramic matrices, United State Patent, Pat. No. US 5865922.
- F.J. Savel, III, 2001, Method of forming a ceramic article including silicon carbide. United State Patent, Pat. No. US 6613251 B2.
- K. Sato, Y. Fuwa, T. Tomikawa and S. Sakamoto, 2004, Aluminum alloy and slide bearing. United State Patent, Pat. No. US 6723184 B2.
- S.H. Gardner, 2004, Method of forming ecoceramic-based silicon-carbide tooling for composites and method for forming composites using same. United State Patent, Pat. No. US 6673279 B2.

- T. Desaki, S. Kamiya, K. Sato, Y. Okouchi and T. Nugami, 2005, Production method of aluminium alloy for sliding bearing. United State Patent, Pat. No. US 6899844 B2.
- T. Nukami and T. Suganuma, 1995, Method of producing TiC whiskers and metallic composites reinforced by TiC whisker. United State Patent, Pat- No. US 5441697.

ภาคผนวก

ตารางแสดงน้ำหนักที่หายไปตลอดการทดลอง

Condition	Sample	นน. ก่อน อบ	นน. หลัง อบ	นน. หลัง เผา	%wt loss หลังอบ	% wt loss หลังเผา	Average
400°C,10°C/min,1hr	1	0.687	0.645	0.169	6.114	73.798	
	2	0.605	0.567	0.147	6.281	74.074	
	3	0.643	0.602	0.159	6.376	73.588	
	4	0.69	0.647	0.179	6.232	72.334	73.449
500°C,10°C/min,1hr	1	0.66	0.623	0.148	5.606	76.244	
	2	0.637	0.603	0.141	5.338	76.617	
	3	0.629	0.594	0.134	5.564	77.441	
	4	0.656	0.621	0.145	5.335	76.651	76.738
600°C,10°C/min,1hr	1	0.62	0.59	0.139	4.839	76.441	
	2	0.65	0.616	0.142	5.231	76.948	
	3	0.623	0.59	0.139	5.297	76.441	
	4	0.676	0.642	0.143	5.030	77.726	76.889
700°C,10°C/min,1hr	1	0.637	0.607	0.138	4.710	77.265	
	2	0.77	0.736	0.169	4.416	77.038	
	3	0.678	0.648	0.146	4.425	77.469	
	4	0.762	0.729	0.166	4.331	77.229	77.250
800°C,10°C/min,1hr	1	0.75	0.705	0.162	6.000	77.021	
	2	0.767	0.723	0.166	5.737	77.040	
	3	0.766	0.717	0.165	6.397	76.987	
	4	0.791	0.74	0.17	6.448	77.027	77.019
800°C,4°C/min,1hr	1	0.72	0.667	0.151	7.361	77.361	
	2	0.744	0.696	0.159	6.452	77.155	
	3	0.712	0.66	0.153	7.303	76.818	
	4	0.623	0.582	0.132	6.581	77.320	77.164
800°C,6°C/min,1hr	1	0.727	0.676	0.15	7.015	77.811	

	2	0.686	0.642	0.143	6.414	77.726	
	3	0.675	0.627	0.139	7.111	77.831	
	4	0.703	0.661	0.148	5.974	77.610	77.744
800°C,8°C/min,1hr	1	0.711	0.68	0.141	4.360	79.265	
	2	0.732	0.699	0.148	4.508	78.827	
	3	0.63	0.605	0.125	3.968	79.339	
	4	0.645	0.617	0.132	4.341	78.606	79.009
800°C,10°C/min,1hr	1	0.75	0.705	0.162	6.000	77.021	
	2	0.767	0.723	0.166	5.737	77.040	
	3	0.766	0.717	0.165	6.397	76.987	
	4	0.791	0.74	0.17	6.448	77.027	77.019
800°C,10°C/min,0.5hr	1	0.747	0.72	0.148	3.614	79.444	
	2	0.637	0.608	0.131	4.553	78.454	
	3	0.652	0.624	0.138	4.294	77.885	
	4	0.674	0.644	0.142	4.451	77.950	78.433
800°C,10°C/min,1hr	1	0.75	0.705	0.162	6.000	77.021	
	2	0.767	0.723	0.166	5.737	77.040	
	3	0.766	0.717	0.165	6.397	76.987	
	4	0.791	0.74	0.17	6.448	77.027	77.019
800°C,10°C/min,1.5hr	1	0.625	0.595	0.121	4.800	79.664	
	2	0.634	0.601	0.125	5.205	79.201	
	3	0.732	0.69	0.147	5.738	78.696	
	4	0.63	0.596	0.123	5.397	79.362	79.231

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวฐาปนี ศรีชุมพวง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010120097

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษาที่ได้รับในระหว่างการศึกษา

1. ทุนยกเว้นค่าเล่าเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาส่วนต่าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. ทุนผู้ช่วยสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Srichumpong, T., Wannasin, J., and Niyomwas, S. 2008. "Synthesis of Biomorphic TiC Hollow Fibers from Cotton Fibers." *J.Met. Mater. Miner., Vol.18 (2),pp.117-120.*

Srichumpong, T., Wannasin, J., and Niyomwas, S., "Biomorphic Synthesis of TiC Hollow Fibers from Cotton Fibers." *Proceeding of 5th Thailand Material Science and Technology Conference, Bangkok, September 2008.*