



ผลกระทบของไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ในการสังเคราะห์
วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์
The Effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on Synthesizing Fe-TiC Composite

กนกอร น้อยเล็ก
Kanokon Nuilek

เลขที่ TS562 กอ 2 2551 ๓. 1
Bib Key..... 309690
..... / 6 ก.ค. 2551

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

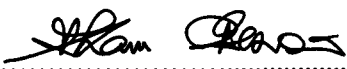
2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

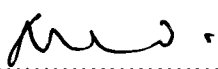
(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ในการสังเคราะห์
วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์
ผู้เขียน นางสาวกนกอร น้อยเล็ก
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

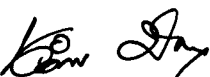
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

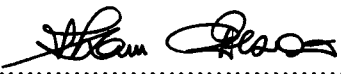

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมวาส)

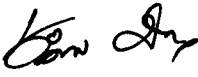
คณะกรรมการสอบ



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชชัย ปลุกผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



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


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)


..... กรรมการ
(ดร.เรืองเดช ชงศรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ


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

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ในการสังเคราะห์
วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ผู้เขียน นางสาวกนกอร น้อยเล็ก

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยมีการแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาตัวแปรไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการโบเทอรัมอลรีดิกชัน พบว่าปฏิกิริยาจะมีความสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1500°C ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และในการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารตั้งต้น เป็นการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในผลิตภัณฑ์ ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาตัวแปรเหล็กออกไซด์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์ลงไปในปฏิกิริยาจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเมทริกซ์ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้จากผลที่ได้จากกระบวนการชะละลายพบว่าเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 โมล ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์สูงสุดคือ 88.35% และมีค่าเปอร์เซ็นต์เหล็กต่ำสุดคือ 11.65% และเมื่อเติมเหล็กออกไซด์ จำนวน 6 โมล ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่ำสุดคือ 5.6% และมีค่าเปอร์เซ็นต์เหล็กสูงสุดคือ 94.4% โดยค่าที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ผลจากการทดสอบสมบัติทางกลในการทดสอบการต้านทานแรงกดพบว่า การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 โมล ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าการต้านทานแรงกดสูงสุดอยู่ที่ 54.6 MPa และค่าความแข็งสูงสุด 27 HRA จากผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นมาสเตอร์อัลลอยด์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์ หรือนำผงเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้ไปทำการพ่นเคลือบผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการทนต่อการสึกหรอและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกัน

Thesis Title The Effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on Synthesizing Fe-TiC Composite
Author Miss Kanokon Nuilek
Major Program Materials Engineering
Academic Year 2007

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on synthesizing Fe-TiC composite. The experimental study was divided into 2 parts. In part one, the effect of TiO_2 influenced on synthesizing Fe-TiC composite by carbothermal reduction was investigated. It was found at 1500°C that the reaction was steady and formed Fe-TiC products. As TiO_2 was added in the precursors, it increased percentage of TiC in the products. When added 5 mole of TiO_2 into precursors, the resulted product showed the maximum volume of TiC at 88.35% and minimum volume of Fe at 11.65%. In part two, the effect of Fe_2O_3 influenced on synthesizing Fe-TiC composite by carbothermal reduction was investigated. When Fe_2O_3 was added to the precursors, it increased the percentage of the matrix Fe in the products. When added 6 mole of Fe_2O_3 into precursors, the resulted product showed the minimum volume of TiC at 5.6% and maximum volume of Fe at 94.4%. Results of reactions are close to the theoretical calculation. Mechanical property test of the specimen added with 1 mole of TiO_2 in precursor give the maximum compressive strength of 54.6 MPa and maximum hardness of 27 HRA. The synthesized products of Fe-TiC composite could be used in many applications such as master alloys in metal casting industry and composite powder for coating application to increase property in high temperature and wear resistance.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและมีได้ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธรรม นิยมวาส ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ดูแลตลอดช่วงการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วัชชัย ปูลูกผล ดร.เรืองเดช ธงศรี ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบและแก้วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ให้คำแนะนำในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมเคมี และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ คุณสุชาติ จันทร์มณี วิศวกร ประจำภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในทุกด้าน พร้อมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณบงกช หะรารักษ์ คุณประทุมรัตน์ หนูยัง คุณจิราภรณ์ คำจันทร์ คุณนฤมล ไชยชนะ และคุณนิพนธ์ เค็นหมัด พร้อมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆน้องๆภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือคอยเป็นเพื่อนเวลาทำวิจัยและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดาเป็นอย่างสูง พี่สาว และญาติๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้ความอนุเคราะห์และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กนกอร น้อยเล็ก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการรูป	(9)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	3
1.2.1 ปฏิกริยาในสภาวะของแข็ง	4
1.2.2 วัสดุคมตัด	7
1.2.3 การผลิตชิ้นงานจากโลหะผง	10
1.2.4 ผลกระทบจากโลหะผง	16
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	31
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	31
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	31
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	32
2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	32
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	35
2.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	39
2.3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	40
2.3.2 ขั้นตอนการชะละลาย	42
2.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	43
2.3.4 การทดสอบสมบัติที่ต่างกล	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	45
3.1 ผลจากการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	45
3.1.1 ผลจากการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์	46
3.1.2 ผลจากการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	54
3.2 ผลที่ได้จากการชะละลาย	62
3.2.1 แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	62
3.2.2 แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์	63
3.3 ผลจากการทดสอบสมบัติทางกล	68
3.3.1 ผลจากการทดสอบการต้านทานแรงกด	70
3.3.2 ผลจากการทดสอบสมบัติความแข็ง	73
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	74
4.1 สรุปผล	74
4.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	79
ประวัติผู้เขียน	82

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สถิติการนำเข้าแม่พิมพ์โลหะ จากต่างประเทศในช่วงปี พ.ศ.2546-2550	2
1.2	สถิติการนำเข้าใบมีดที่ใช้ในงาน โลหะ จากต่างประเทศในช่วงปี พ.ศ.2546-2550	3
1.3	ตัวอย่างสำหรับคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันและอุณหภูมิขั้นต่ำในการเกิดปฏิกิริยา	6
1.4	การแบ่งประเภทของมีดคมตัดที่ทำจากคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO	8
1.5	อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบผืนโลหะผงชนิดต่าง ๆ	15
1.6	เปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะผสม Fe-TiC, WC-Co และ Steel	18
2.1	ปริมาณสารประกอบในแร่ฮิลเมไนต์ วิเคราะห์ด้วย X-ray fluorescence spectrometry	33
2.2	แสดงสัดส่วนของสารตั้งต้น	41
3.1	แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์)	49
3.2	แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (แปรผันปริมาณเหล็กไดออกไซด์)	57
3.3	แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่แต่ละการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	62
3.4	แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่แต่ละการแปรผันปริมาณเหล็กไดออกไซด์	63
3.5	แสดงขนาดอนุภาค จากการคำนวณค่าที่ได้จากเครื่อง XRD และ LPSA	68
3.6	แสดงค่าปริมาตรและความหนาแน่นของเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	69
ผ1	แสดงสมบัติของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์	79

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ปฏิกิริยาของสองผลึก (AและB) ที่มีผิวสัมผัสหนึ่งด้านภายหลังจากเริ่มต้นก่อรูปขึ้นของผลิตภัณฑ์ C อีออนจาก A และ B จะต้องมีการแพร่ในทิศทางทางผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์ เพื่อก่อรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ตำแหน่งผิวหน้าสัมผัสระหว่าง A/C และ B/C	5
1.2	การผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะการอัดแบบทิศทางเดียว	14
1.3	ตัวอย่างชิ้นงาน Ferro-TiC	17
1.4	แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	20
1.5	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3(s) + 4C(s)$ ที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน	25
1.6	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + TiO_2(s) + 7C (s) \rightarrow Fe (s) + 2TiC (s) + 5CO (g)$	25
1.7	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + 2TiO_2(s) + 10C (s) \rightarrow Fe (s) + 3TiC (s) + 7CO (g)$	26
1.8	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + 3TiO_2(s) + 13C (s) \rightarrow Fe (s) + 4TiC (s) + 9CO (g)$	26
1.9	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + 4TiO_2(s) + 16C (s) \rightarrow Fe (s) + 5TiC (s) + 11CO (g)$	27
1.10	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + 5TiO_2(s) + 19C (s) \rightarrow Fe (s) + 6TiC (s) + 13CO (g)$	27
1.11	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + Fe_2O_3(s) + 7C (s) \rightarrow 3Fe (s) + TiC (s) + 6CO (g)$	28
1.12	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $FeTiO_3 (s) + 2Fe_2O_3(s) + 10C (s) \rightarrow 5Fe (s) + TiC (s) + 9CO (g)$	28

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
1.13	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 3\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{s}) + 13\text{C} (\text{s}) \rightarrow 7\text{Fe} (\text{s}) + \text{TiC} (\text{s}) + 12\text{CO} (\text{g})$	29
1.14	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 4\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{s}) + 16\text{C} (\text{s}) \rightarrow 9\text{Fe} (\text{s}) + \text{TiC} (\text{s}) + 15\text{CO} (\text{g})$	29
1.15	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 5\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{s}) + 19\text{C} (\text{s}) \rightarrow 11\text{Fe} (\text{s}) + \text{TiC} (\text{s}) + 18\text{CO} (\text{g})$	30
1.16	กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ $\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 6\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{s}) + 19\text{C} (\text{s}) \rightarrow 13\text{Fe} (\text{s}) + \text{TiC} (\text{s}) + 18\text{CO} (\text{g})$	30
2.1	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงอิลเมไนต์ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท สิ้นแร่สาคร	32
2.2	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ จาก บริษัท Riedel-de Haen	33
2.3	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงเหล็กออกไซด์ จาก บริษัท Riedel-de Haen	34
2.4	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงคาร์บอน (Activated Charcoal LR) จาก บริษัท Laboratory Rasayan	34
2.5	แสดงลักษณะเตาเผาอุณหภูมิสูง	35
2.6	แสดงลักษณะการติดตั้งท่อก๊าซที่ใช้สำหรับควบคุมบรรยากาศภายในเตา	35
2.7	แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการเผาชิ้นงาน	36
2.8	แสดงเครื่องบดตัวอย่าง Planetary Ball Mill ยี่ห้อ Retsch รุ่น PM100/200	36
2.9	แสดงลักษณะเบ้าแกรไฟต์ขนาด 5.5×30×2 ซม.	37
2.10	แสดงเบ้าอัดขึ้นรูปชิ้นตัวอย่างทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม.	37
2.11	แสดงเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ยี่ห้อ Herzog	37
2.12	แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ รุ่น(Model): FR-3e	38
2.13	แสดงเครื่องทดสอบแรงกด Hounsfield Modwl H100KS, Serial No.0068	38
2.14	แสดงแผนผังขั้นตอนการวิจัยในกรณีแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	39

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.15	แสดงแผนผังขั้นตอนการวิจัยในกรณีแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์	40
2.16	ภาพแสดงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกับช่วงเวลาในการเผา	42
2.17	แสดงกระบวนการแช่กรด	43
2.18	แสดงกระบวนการล้างกรด	43
2.19	แสดงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกับช่วงเวลาในการอบผึ่ง	44
3.1	กราฟ DTA และ TGA ของ $FeTiO_3 + 4C$	45
3.2	ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1200 1300 และ 1400°C	47
3.3	ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1500°C	48
3.4	ผลวิเคราะห์สารประกอบของเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 1300-1500°C	50
3.5	แสดงภาพถ่านโครงสร้างทางจุลภาค (a) FnTC1 (b) FnTC2 (c) FnTC3, (d) FnTC4 (e) FnTC5 และ (f) FnTC6	51
3.6	ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	53
3.7	ภาพ X-ray mapping ของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้	53
3.8	ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1200 1300 และ 1400°C	55
3.9	ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1500°C	56
3.10	ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) nFTC1 (b) nFTC2 (c) nFTC3 (d) nFTC4 (e) nFTC5 และ (f) nFTC6	58
3.11	แสดงภาพถ่ายจากการทำ Point Scan	60

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นในการทำ point scan วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์	60
3.13	ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์	61
3.14	ภาพ X-ray mapping ของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้	61
3.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์	62
3.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์	63
3.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์เปรียบเทียบกับระหว่างทฤษฎีและที่เกิดขึ้นจริง	64
3.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์เปรียบเทียบกับระหว่างข้อมูลจากโปรแกรม HSC และที่เกิดขึ้นจริง	65
3.19	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ (a) TiC1 (b) TiC2 และ (c) TiC3	66
3.20	แสดงแผนภาพขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา	67
3.21	แสดงภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างไทเทเนียมคาร์ไบด์ (a) X15000 (b) X60000 และ (c) X30000	67
3.22	กราฟเปรียบเทียบ Compressive Strength ที่แต่ละอุณหภูมิในการอบผืนึก	69
3.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงาน Fe-TiC ในแต่ละสูตร	70
3.24	กราฟแสดงค่า % relative density (green density and sinter density) และ compressive strength ของ Fe-TiC แต่ละสูตร	71
3.25	แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการอัด (a) X150 (b) X1000 และ (c) X5000	72
3.26	กราฟความสัมพันธ์ของความแข็งที่แต่ละตัวเดิมไทเทเนียมไดออกไซด์	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ทนต่อการสึกหรอ มีความแข็งและทนต่ออุณหภูมิสูง ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายมากขึ้น ตัวอย่างเช่น วัสดุผสมของโลหะ (MMCs : Metal Matrix Composites) เป็นวัสดุผสมกลุ่มหนึ่งซึ่งมีโลหะเป็นเนื้อหลัก โลหะที่นิยมนำมาทำเมทริกซ์มากที่สุดคือ อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ ส่วนเสริมแรงที่ใช้ เช่น ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ คาร์บอน อะลูมินา และอื่นๆ โดยจะนำวัสดุผสมไปใช้งาน เช่น ใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนอากาศยานต่างๆ ชิ้นส่วนที่ทนต่อการสึกหรอ หรือเครื่องมือตัดเฉือนในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น กรรมวิธีในการขึ้นรูปวัสดุผสมของโลหะ จะใช้วิธีมาตรฐานที่ใช้กับโลหะเช่น การอัดฉีด การตี การหล่อร้อน การขึ้นรูปแบบซูเปอร์พลาสติก โลหะวิทยาโลหะผง การเสริมแรงวิสเกอร์ในวัสดุผสมของโลหะ จะทำให้ได้วัสดุผสมที่มีความแข็งแรงมาก เส้นใย SiC Al_2O_3 และ Si_3N_4 จะเสริมแรงของเนื้อโลหะต่างๆ เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ไทเทเนียมและทองแดง วิธีการโลหะวิทยา โลหะผงหรือวิธีการปล่อยให้ของเหลวไหลซึม (Liquid-Melt Infiltration Methods) จะใช้สำหรับขึ้นรูปผงโลหะละเอียดและวิสเกอร์ด้วยการผสม และทำให้แข็งตัวเพื่อผลิตองค์ประกอบที่มีรูปร่างใกล้เคียงกัน

ตัวอย่างของวัสดุที่มีการนิยมนำมาใช้อีกประเภทหนึ่ง คือ เซรามิกชั้นสูง ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ ซิอาลอน (Sialons ส่วนประกอบของ $\text{SiN}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$) โบรอนคาร์ไบด์ และ โบรอนไนไตรด์ และ โบโรไซด์ อื่นๆ ถูกใช้ในสัดส่วนที่น้อยกว่าปริมาณของส่วนผสมหลัก เช่นทำเป็นสารเคลือบโลหะ และวัสดุเสริมแรง ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยอะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ คาร์บอน โบรอน (บนฐานของทั้งสแตนหรือซิลิกอนคาร์ไบด์) และแก้วชนิดต่างๆ เกลียวของซิลิกอนคาร์ไบด์ และอะลูมินา และอนุภาคของอะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ เซอร์โคเนีย ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไทเทเนียมไดโบไรด์ และเซอร์โคเนียไดโบไรด์ โดยที่เซรามิกข้างต้นเหล่านี้มีการนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนที่ทนการสึกหรอ ใช้ทำเครื่องมือตัดบนฐานของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และใช้สำหรับการเคลือบ เช่น เพชรสังเคราะห์ หรือฟิล์มคล้ายเพชรที่ผลิตด้วย

วิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี ทำให้มีความแข็งที่สุด มีค่าการนำความร้อนสูง และทนต่อการผุกร่อนมาก มีความสามารถในการตัดสูงกว่าเพชรธรรมชาติ จึงถูกใช้เป็นตัวตัดและขัดอย่างคิเลิศ

วัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้มีราคาสูง ถ้ามีการผลิตขึ้นได้เองจากวัตถุดิบภายในประเทศก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนไปได้ส่วนหนึ่ง จึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้เพื่อทำการสังเคราะห์และศึกษาผลกระทบของการแปรผันปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์และเหล็กในวัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติทางกล ซึ่งมีการนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนที่ทนการสึกหรอ เครื่องมือตัดและแม่พิมพ์ต่างๆ ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมทั่วไป ส่วนใหญ่จะมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการสั่งซื้อ

จากข้อมูลการนำเข้าของกรมศุลกากรในตารางที่ 1.1 พบว่าในปี พ.ศ.2550 ประเทศไทย มีการนำเข้าแม่พิมพ์โลหะจากต่างประเทศสูงถึง 1,745,876,185 บาท เช่นเดียวกับสถิติการนำเข้าไบมีดที่ใช้ในงานโลหะ ในตารางที่ 1.2 พบว่าในปี พ.ศ.2550 ประเทศไทย มีการนำเข้าไบมีดที่ใช้ในงานโลหะ จากต่างประเทศสูงถึง 9,255,286,280 บาท และจากในปีที่ผ่านมา พบว่าแนวโน้มในการนำเข้ามีอัตราเพิ่มสูงขึ้นทุกปี

ดังนั้นถ้าเราสามารถสังเคราะห์และผลิตวัสดุเหล่านี้ขึ้นได้เองโดยอาศัยวัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศ ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูก เป็นการช่วยลดการนำเข้าและยังเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อที่จะส่งออกไปสู่ตลาดต่างประเทศได้อีกทางหนึ่งด้วย

ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าแม่พิมพ์โลหะ จากต่างประเทศในช่วงปี พ.ศ.2546-2550

(กรมศุลกากร, ข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก 2546-2550, ที่มา <http://www.customs.go.th>, 21/11/2550)

ปี พ.ศ.	มูลค่าการนำเข้า (บาท)
2546	1,294,383,724
2547	1,653,392,695
2548	1,888,272,638
2549	1,799,550,326
2550	1,745,876,185

ตารางที่ 1.2 สถิติการนำเข้าใบมีดที่ใช้ในงานโลหะ จากต่างประเทศในช่วงปี พ.ศ.2546-2550

(กรมศุลกากร, ข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก 2546-2550, ที่มา <http://www.customs.go.th>, 21/11/2550)

ปี พ.ศ.	มูลค่าการนำเข้า (บาท)
2546	8,493,796,567
2547	10,390,581,544
2548	12,701,572,364
2549	12,452,905,174
2550	9,255,286,280

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

วัสดุพื้นฐานที่นำมาทำการศึกษาในครั้งนี้ คือ แร่อิลเมนไนต์ ซึ่งเป็นสินแร่ที่ได้จากการถลุงแร่ดีบุกเป็นสินแร่ที่มีมูลค่าไม่มากนักเหมาะแก่การนำมาเพิ่มมูลค่า โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite) สูตรเคมีคือ $FeTiO_3$ มักอยู่ร่วมกับแร่ดีบุก มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เหล็ก (Fe) ไทเทเนียม (Ti) และ ออกซิเจน (O) นอกจากนี้ยังมีโลหะอื่นๆปนอยู่อีก เช่น แมงกานีส (Mn) อิตเทรียม (Y) เซอร์โคเนียม (Zr) นีโอเบียม (Nb) ทังสเตน (W) และ ดีบุก (Sn) ผลึกแร่อิลเมนไนต์เป็นรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล มักจะพบเป็นแผ่นหนาหรือชั้นๆ นอกจากนี้ยังพบเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกัน โดยทั่วไปมักรวมกันเป็นเนื้อแน่นรวมทั้งอาจพบเป็นเม็ดเล็กๆ เหมือนทรายด้วย

คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นผงสีดำคล้ายเหล็ก มีความวาวคล้ายโลหะหรือกึ่งโลหะ ทึบแสง มีความแข็งประมาณ 5.5-6.0 (เปราะ) ความถ่วงจำเพาะ 4.7

คุณสมบัติทางเคมี มีสูตรเคมี $FeTiO_3$ มี Fe 36.8 %, Ti 31.6% และ O 31.6% ซึ่งถ้าเรานำแร่อิลเมนไนต์มาทำการสกัดเอาเหล็กออก จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของแร่อิลเมนไนต์ โดยสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์มากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตเม็ดพลาสติก การทำกระดาษ การผลิตเม็ดสี ฯลฯ ธาตุไทเทเนียมเป็นโลหะสีเทาเงิน มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่น 4.5 Mg/m^3 ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความสามารถในการนำความร้อนและไฟฟ้าต่ำ ผิวขัดขึ้นเงาและมีคุณสมบัติแม่เหล็กดูดติดอ่อนๆ

ประโยชน์ของธาตุไทเทเนียมในรูปของโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องบินและยานอวกาศ เนื่องจากมีความต้านทานแรงได้สูง มีน้ำหนักเบาและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

โดยเฉพาะกรดอินทรีย์ และกรดอนินทรีย์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ด้วย เช่น อุตสาหกรรมเคลือบผิวโลหะ ใช้ในการทำสัลฟิเคชัน ใช้ทำอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ ฯลฯ

1.2.1 ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid-State Reaction)

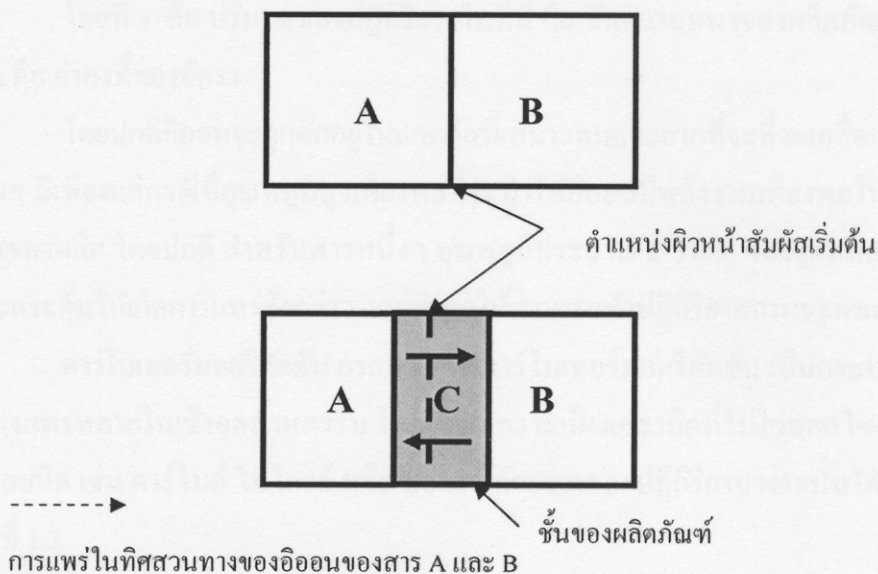
ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบของแข็ง (Reaction between Solid Compound)

เมื่อสารประกอบของแข็งทำปฏิกิริยาระหว่างกัน ที่อุณหภูมิสูง ก็ไม่ได้หมายความว่าสารประกอบทุกตัว ยังรักษาสถานะของแข็งไว้ที่อุณหภูมิที่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น เฟสของเหลว (หลอมเหลว) หรือแม้แต่เฟสก๊าซ อาจมีส่วนร่วม ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลขึ้น ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการของปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ซึ่งมักจะเรียกกันว่า วิธีการเซรามิก (Ceramic Method) คาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน (Carbothermal Reduction) การสังเคราะห์โดยการสันดาป (Combustion Synthesis) และ กระบวนการพื้นฐานระหว่างการเผาอบผง

วิธีการเซรามิก วิธีการนี้ถือเป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุด แต่ก็ยังเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ในการเตรียมวัสดุของแข็งหลายสารประกอบ โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบของแข็ง โดยตรงที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากของแข็งไม่ทำปฏิกิริยาระหว่างกัน ณ อุณหภูมิห้อง ถึงแม้จะมีความเป็นไปได้ทางอุณหพลศาสตร์ในการก่อรูปก็ตาม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นจนเพียงพอ ข้อดีของปฏิกิริยาสถานะของแข็งคือ ผงสารตั้งต้นหาได้ง่ายและราคาถูก เหมาะสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ลักษณะทั่วไปของปฏิกิริยาของแข็ง

ในการที่จะทำความเข้าใจความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาในสารละลายและในสถานะของแข็ง รวมทั้งปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของแข็ง จะใช้การพิจารณาปฏิกิริยาทางความร้อนของผลึกสารประกอบ A และ B ที่สัมผัสกันอย่างแนบสนิท ตลอดที่ผิวหน้าด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ในกรณีที่ไม่มีกรหลอมเหลวเกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยา จะต้องเกิดขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่าง A และ B เป็นจุดเริ่มต้น แล้วต่อมาปฏิกิริยาจะดำเนินไปโดยการแพร่เข้าสู่เนื้อของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยาของสองผลึก (A และ B) ที่มีผิวสัมผัสหนึ่งด้านภายหลังการเริ่มต้นก่อรูปชั้นของผลิตภัณฑ์ C อีออนจาก A และ B จะต้องมีการแพร่ในทิศสวนทางผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์ เพื่อก่อรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ตำแหน่งผิวหน้าสัมผัสระหว่าง A/C และ B/C

ในขั้นตอนแรกของปฏิกิริยา คือ การก่อเกิดของ นิวคลีโอไอของเนื้อผลิตภัณฑ์ C ที่พื้นผิวหน้าสัมผัสระหว่างสาร A และ B ซึ่งอาจพบกับอุปสรรค ถ้าหากการก่อเกิดสารใหม่นี้ต้องการ การจัดระเบียบโครงสร้างใหม่อย่างสูง ซึ่งภายหลังกระบวนการ นิวคลีโอไอของผลิตภัณฑ์ C เกิดขึ้น ชั้นของผลิตภัณฑ์ได้ถูกก่อตัวขึ้น ในขั้นตอนนี้ผิวหน้าสัมผัสเพิ่มเป็นสองตำแหน่ง นั่นคือ ผิวหน้าสัมผัสระหว่างสาร A กับสาร C และสาร B กับสาร C ในการที่จะสามารถทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ การแพร่ในทิศสวนทางของไอออนจากสาร A และสาร B จะต้องเคลื่อนที่ผ่านชั้นของสาร C เพื่อไปสู่ผิวหน้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใหม่

เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ชั้นของผลิตภัณฑ์ก็หนาขึ้น ส่งผลทำให้การแพร่ของไอออนสาร A และ B เพื่อไปทำปฏิกิริยายากขึ้น และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง เนื่องจากชั้นของผลิตภัณฑ์ทำหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวป้องกัน ในกรณีอย่างง่ายที่ปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยการแพร่แบบแลตติสผ่านชั้นระนาบ กฎของอัตราการแพร่ จะอยู่ในรูปของสมการพาราโบลา ดังแสดงในสมการที่ 1.1

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot x^{-1} \tag{1.1}$$

โดยที่ x คือ ปริมาณของปฏิกิริยา (ในที่นี้ คือ ชั้นความหนาของผลิตภัณฑ์), t คือ เวลา, และ k คือ ค่าคงที่ของอัตรา

โดยปกติอ็อกซิเจนจะถูกคักอยู่ในแลตติสที่เหมาะสมและยากที่จะที่จะเคลื่อนย้ายไปสู่ตำแหน่งอื่นๆ มีเพียงแต่กรณีที่อุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะทำให้อ็อกซิเจนมีพลังงานเพียงพอในการแพร่ผ่านแลตติสของผลึก โดยปกติ สำหรับสารหนึ่งๆ อุณหภูมิประมาณ 2 ใน 3 ของจุดหลอมเหลว ก็เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดการแพร่ดังกล่าว และส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้

คาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน กระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน เป็นกระบวนการที่มีการใช้ของแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรม ในการสังเคราะห์ผงเซรามิกที่ไม่ใช่ออกไซด์เซรามิกจำนวนหลายชนิด เช่น คาร์ไบด์ ไนไตรด์ หรือ โบไรด์ ตัวอย่างของปฏิกิริยาบางระบบได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ตัวอย่างสำหรับคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน และอุณหภูมิขั้นต่ำในการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยา	อุณหภูมิขั้นต่ำ ($^{\circ}\text{C}$) ที่ความดันบรรยากาศ
คาร์ไบด์	
$2\text{Al}_2\text{O}_3 + 9\text{C} \rightarrow \text{Al}_4\text{C}_3 + 6\text{CO}$	1950
$2\text{B}_2\text{O}_3 + 7\text{C} \rightarrow \text{B}_4\text{C} + 6\text{CO}$	1550
$\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}$	1500
$\text{TiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{TiC} + 2\text{CO}$	1300
$\text{WO}_3 + 4\text{C} \rightarrow \text{WC} + 3\text{CO}$	700
$2\text{MoO}_3 + 7\text{C} \rightarrow \text{Mo}_2\text{C} + 6\text{CO}$	500
โบไรด์	
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 12\text{B}_2\text{O}_3 + 39\text{C} \rightarrow 2\text{AlB}_{12} + 39\text{CO}$	1550
$\text{V}_2\text{O}_5 + \text{B}_2\text{O}_3 + 8\text{C} \rightarrow 2\text{VB} + 8\text{CO}$	950
$\text{V}_2\text{O}_3 + 2\text{B}_2\text{O}_3 + 9\text{C} \rightarrow 2\text{VB}_2 + 9\text{CO}$	1300
$\text{TiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + 5\text{C} \rightarrow \text{TiB}_2 + 5\text{CO}$	1300
$2\text{TiO}_2 + \text{B}_4\text{C} + 3\text{C} \rightarrow 2\text{TiB}_2 + 4\text{CO}$	1000

ตารางที่ 1.3 ตัวอย่างสำหรับคาร์ไบด์มอลรีดีคชัน และอุณหภูมิขั้นต่ำในการเกิดปฏิกิริยา (ต่อ)

ปฏิกิริยา	อุณหภูมิขั้นต่ำ (°C) ที่ความดันบรรยากาศ
ไนไตรต์	
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{AlN} + 3\text{CO}$	1700
$\text{B}_2\text{O}_3 + 3\text{C} + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{BN} + 3\text{CO}$	1000
$3\text{SiO}_2 + 6\text{C} + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{CO}$	1550
$2\text{TiO}_2 + 4\text{C} + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{TiN} + 4\text{CO}$	1200
$\text{V}_2\text{O}_5 + 5\text{C} + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{VN} + 5\text{CO}$	600

1.2.2 วัสดุคมตัด (Cutting-Tool Materials)

ในระหว่างการใช้งาน มีคมตัด ต้องเผชิญกับสภาพเลวร้ายต่างๆ หลายประการ ได้แก่ สภาพอุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเสียดสี ความเค้นสัมผัสที่เกิดจากมีคมตัดคดขัดกับชิ้นงาน และการเสียดสีกับชิ้นงานส่งผลให้มีคมตัดเกิดการสึกหรอ นอกจากนี้ในระหว่างการใช้งานยังเกิดการกระแทก หรือการสะดุด ซึ่งจะก่อให้เกิดการบิ่นหรือแตกหักได้ ดังนั้น วัสดุที่นำมาใช้ทำมีคมตัดจะต้องมีสมบัติทนทานต่อสภาพเลวร้ายต่างๆ เหล่านี้ได้ สมบัติที่ต้องพิจารณาในการเลือกวัสดุมาใช้ทำมีคมตัด มีดังนี้

1. ความแข็ง (Hardness) วัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีความแข็งสูง และรักษาความแข็งเมื่อร้อนได้ดี ความแข็งจะต้องไม่ลดลงมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
2. ความเหนียว (Toughness) วัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีความเหนียวสูง ต้องรักษาสภาพอยู่ได้โดยไม่เกิดการบิ่นหรือบิดเบี้ยวเสียรูป เมื่อเกิดการสะดุด หรือกระแทกกับชิ้นงาน
3. ความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) วัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีความต้านทานการสึกหรอสูง รักษาความคมได้นานไม่ต้องลับหรือเปลี่ยนบ่อย
4. ความเป็นกลาง (Inertness) วัสดุที่นำมาใช้ จะต้องมีความเป็นกลางไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับชิ้นงานหรือ สารหล่อเย็น

ตัวอย่างวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำมีคมตัด มีดังนี้

คาร์ไบด์ (Carbides)

คาร์ไบด์พัฒนาขึ้นมาใช้งานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง ช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง นำความร้อนได้ดี การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ คาร์ไบด์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide, WC) ใช้ทำมีดคมตัดสำหรับงานแต่งผิวโลหะนอกกลุ่มเหล็กและเหล็กหล่อ ผลิตออกมาในรูปของวัสดุผสม กล่าวคือ นำผงทังสเทนคาร์ไบด์ไปบดรวมกับโคบอลต์ จะทำหน้าที่เป็นสารยึดและยึดผงของทังสเทนคาร์ไบด์ให้ติดกัน จึงมีชื่อสามัญอีกชื่อหนึ่งว่า ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cement Carbide)

ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide, TiC) มีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าทังสเทนคาร์ไบด์ ในการขึ้นรูปนั้นจะใช้นิกเกิลเจือด้วยธาตุโมลิบดีนัม เป็นสารยึดทำหน้าที่ยึดผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ให้ติดกัน คาร์ไบด์กลุ่มนี้ใช้ในการทำมีดคมตัด เพื่อแต่งผิวโลหะที่มีความแข็งมากๆ เช่น เหล็กกล้าเจือ ไชงานได้ที่ความเร็วสูงกว่าทังสเทนคาร์ไบด์ในตารางที่ 1.4 แสดงการแบ่งประเภทของมีดคมตัด ที่ทำมาจากคาร์ไบด์ ตามมาตรฐาน ISO

ตารางที่ 1.4 การแบ่งประเภทของมีดคมตัดที่ทำจากคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO (ที่มา: สมเกียรติ, 2544)

Symbol	Workpiece Material	Color	Designation in increasing order of wear resistance and decreasing order of toughness in each category
P	Ferrous metals with long chips	Blue	P01, P10, P20, P30, P40, P50
M	Ferrous metals with long or short chips; nonferrous metals	Yellow	M10, M20, M30, M40
K	Ferrous metals with short chips; nonferrous metals, nonmetallic materials	Red	K01, K10, K20, K30, K40

มีดคมตัดเคลือบ (Coated Tools)

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 เป็นต้นมา ได้มีการคิดค้นและพัฒนาโลหะเจือพิเศษต่างๆ และวัสดุใหม่ๆ ทางวิศวกรรม ขึ้นมากมาย วัสดุที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ส่วนใหญ่จะมีค่าความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการขัดสีสูงและบางชนิดยังทำปฏิกิริยากับมีดคมตัดด้วย กระบวนการแต่งผิววัสดุจำพวกนี้จึงมีความยุ่งยากขึ้น ทางออกที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางหนึ่งคือ การนำมีดคมตัดหรือเครื่องมือที่มีอยู่ไปเคลือบด้วยวัสดุบางชนิด วัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบบนผิวของมีดตัด คือ

ไทเทเนียมไนไตรด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และ เซรามิก ความหนาที่ใช้ในการเคลือบ คือ 5-10 ไมครอน

การเคลือบมีดคมตัดด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride Coated Tools)
ในการนี้จะนำมีดคมตัดที่ทำจากเหล็กเครื่องมือรอบสูง (HSS) หรือ มีดคมตัดที่ทำจากคาร์ไบด์ มาเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ จะทำให้ได้มีดคมตัดที่มีผิวแข็งเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานลดลง ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น เพิ่มความเร็วในการทำงานได้สูงขึ้น มีดคมตัดหรือเครื่องมือที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ จะมีผิวสีทอง

การเคลือบทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ วิธีนี้ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากไทเทเนียมคาร์ไบด์มีราคาสูง มีดคมตัดที่ได้จะมีความทนทานต่อการขัดสีสูงขึ้น ใช้งานที่แต่งผิววัสดุที่มีอำนาจการขัดสีสูง

การเคลือบมีดคมตัดด้วยเซรามิก เซรามิกในที่นี้ คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide, Al_2O_3) เมื่อเคลือบลงไปบนผิวของมีดคมตัดแล้วจะทำให้ได้มีดคมตัดที่ทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง และมีความเป็นกลางดีขึ้น

เซรามิก (Ceramics)

เซรามิก หมายถึง สารอนินทรีย์ที่ไม่ใช่โลหะ เช่น ออกไซด์ โบไรด์ ไนไตรด์ คาร์ไบด์ และสารประกอบของสารเหล่านี้ อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่มีความบริสุทธิ์สูง พัฒนาขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 วิธีการขึ้นรูปเป็นมีดคมตัดนั้นจะนำอะลูมิเนียมออกไซด์มาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วนำไปอัดขึ้นรูป มีดคมตัดที่ทำจากเซรามิกมีอยู่ 2 ชนิด คือ

เซรามิกขาว (White Ceramics) มีดคมตัดชนิดนี้ได้จากการนำผง อะลูมิเนียมออกไซด์ไปอัดขึ้นรูปในสภาพเย็นภายใต้ความดันสูง จากนั้นนำไปอบผืนที่อุณหภูมิสูง ในกระบวนการดังกล่าวถ้าผสมผงไทเทเนียมคาร์ไบด์และผงเซอร์โคเนียมออกไซด์เข้าไปด้วย จะทำให้ได้มีดคมตัดที่มีความเหนียวดีขึ้น มีดคมตัดที่ทำจากเซรามิกขาว มีความต้านทานการขัดสีได้ดีมาก มีค่าความแข็งเมื่อร้อนสูง มีเสถียรภาพทางเคมีดีกว่าเหล็กเครื่องมือรอบสูง (HSS) และคาร์ไบด์ แต่มีค่าความเหนียวต่ำ ถ้ามีการกระแทกหรือเกิดการสะดุดจะแตกหักหรือบิ่นได้ง่าย นำมาใช้งานในลักษณะเป็น มีดคมสอดเช่นเดียวกับคาร์ไบด์

เซรามิกดำ (Black Ceramics) มีดคมตัดชนิดนี้ได้จากการนำผงอะลูมิเนียมออกไซด์ 70 เปอร์เซ็นต์ มาผสมรวมกับผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปอัดขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง จะได้เซรามิกที่มีเนื้อสีดำ และมีราคาแพงกว่าเซรามิกขาว

ซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon Nitride)

ซิลิกอนไนไตรด์ เป็นวัสดุคมตัดที่พัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1970 โดยการนำซิลิกอนไนไตรด์มาผสมกับวัสดุอื่นๆ อีกหลายอย่าง ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ อิทเทรียมออกไซด์ และไทเทเนียมคาร์ไบด์ มีคมตัดที่ได้จะมีจุดเด่น คือ มีความเหนียว และความแข็งเมื่อร้อนสูง ด้านทานความร้อนกระแทกดี เหมาะสำหรับใช้ในการแต่งผิว นิกเกิลเจือพิเศษ และเหล็กหล่อ เนื่องจากเหตุผลทางเคมีบางประการ จึงไม่แนะนำให้ใช้มีคมตัดที่ทำจาก ซิลิกอนไนไตรด์ในการแต่งผิวเหล็กกล้า

1.2.3 การผลิตชิ้นงานจากโลหะผง (Powder Metallurgy)

การผลิตชิ้นงานจากโลหะผงนับเป็นศิลปะอย่างหนึ่งในการผลิต ผลิตภัณฑ์สมัยใหม่ การนำโลหะผงมาผลิตเป็นชิ้นงานนั้น จะอาศัยความร้อนและแรงอัด เพื่อให้ผงโลหะประสานติดกัน ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการไม่ทำให้อุณหภูมิของโลหะผงสูงจนเกิดการหลอมละลายแต่ใช้เพียงแต่ทำให้โลหะผงกลายเป็นสะเก็ด ต่อจากนั้นจะใช้แรงอัดจนกระทั่งโลหะผงประสานติดกัน เป็นเนื้อเดียว ผงโลหะที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานชนิดหนึ่งนั้น จะประกอบด้วยโลหะผงหลายชนิด บางครั้งอาจต้องเพิ่มผงของวัสดุที่อยู่นอกกลุ่มโลหะลงไปด้วยเพื่อใช้เป็นสารยึด ทำให้ผงโลหะยึดติดกันดียิ่งขึ้น เช่น ใช้ผงโคบอลต์เป็นสารยึดผงทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ การผสมผงแกรไฟต์ลงไปโลหะผงที่ใช้ทำแบร็งเพื่อเพิ่มสมบัติในการหล่อลื่น เป็นต้น

โลหะผงจะมีราคาสูงกว่าโลหะแท่ง ทั้งนี้เพราะโลหะผงต้องผ่านกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนกว่า ประกอบกับการนำโลหะผงมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานนั้นต้องใช้เครื่องจักรและแบบคายที่มีราคาแพง ดังนั้น ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นด้วยวิธีนี้มักมีราคาแพง จึงเหมาะที่จะใช้เฉพาะในกรณีที่การผลิต มีปริมาณมาก และใช้วิธีอื่นไม่ได้จริงๆ

คุณลักษณะที่สำคัญของผงโลหะ (Important Characteristics of Metal Powders)

ข้อดีที่เด่นชัดที่สุดของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นจากโลหะผงมีอยู่ 2 ประการ คือ มีความแข็งแรงสูง และได้ผิวงานที่เรียบโดยไม่จำเป็นต้องนำไปแต่งผิวด้วยเครื่องมือกลอีก ยกเว้นในบางกรณีซึ่งมีอยู่จำนวนไม่มากนักที่อาจต้องนำไปทำเกลียว หรือทำรายละเอียดปลีกย่อยอื่นๆ บนชิ้นงาน

คุณลักษณะต่าง ๆ ของผงโลหะ ที่จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานนั้น ประกอบด้วยรูปร่าง ความละเอียด การกระจายขนาด ความไหลได้ สมบัติทางเคมี ความอัดได้ และสมบัติในการอบผนึก

รูปร่าง ผงโลหะที่ผลิต ออกมาอาจมีรูปร่างได้หลากหลาย เช่น กลม แบน หลายเหลี่ยม หลายคม หรือมีรูปร่างใด ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตผงโลหะที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะเกาะตัวกัน ได้แข็งแรงที่สุด จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นงาน

ความละเอียด ในการนำผงโลหะมาผลิตเป็นชิ้นงานนั้นขนาดของผงอาจทำให้เกิดปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าขนาดของผงไม่เท่ากัน จะทำให้ความไหลได้ของผงไม่ดีซึ่งจะทำให้การผลิตสะดุดและติดขัด ดังนั้นการจัดการให้ผงมีขนาดเท่ากันก่อนนำไปใช้จึงถือเป็นเรื่องสำคัญ ขนาดของผงที่เหมาะสมจะนำไปใช้ควรจะมีขนาดอยู่ในช่วง 45 – 150 ไมครอน ซึ่งในการร่อนด้วยตะแกรงจะใช้ตะแกรง เบอร์ 100 - 325 ขนาดของผงที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานที่สุด คือ ขนาด 100 ไมครอน

การกระจายขนาด ถ้าผงโลหะที่นำมาใช้มีการกระจายขนาดสูงจะมีผลกระทบต่อความไหลได้ของผง ความอัดได้ของผง รวมไปถึงความหนาแน่นและสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ได้ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ผงโลหะที่มีการกระจายขนาดสูง นั่นคือ มีผงขนาดต่าง ๆ ปะปนคลุกเคล้ากันอยู่มากเกินไป ควรเลือกใช้ผงที่มีขนาดใกล้เคียงกันการกระจายขนาดมีไม่มาก

ความไหลได้ ผงโลหะที่มีการไหลตัวดีจะสามารถไหลเข้าสู่โพรงที่เป็นช่องว่างของแบบโมลดีดีและรวดเร็ว สามารถชอกซอนไปตามชอกตามมุม ต่าง ๆ ของโพรงแบบนี้ได้ดีซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานออกมาเต็มแบบประณีตทุกชอกทุกมุม

สมบัติทางเคมี ที่เกี่ยวข้องกับก็ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของโลหะ ปริมาณของออกไซด์ที่ยอมให้ปะปนอยู่ได้ และปริมาณธาตุอื่นที่ปะปนอยู่โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ได้

ความอัดได้ หมายถึงปริมาตรของผงก่อนถูกอัดหารด้วยปริมาตรของผงที่ถูกอัดจนได้เป็นชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับ การกระจายขนาด และรูปร่างของผง ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับ การอัดตัวได้ของผง ผงที่ดีเมื่ออัดเป็นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจะมี ปริมาตรเป็น 2 ใน 3 ของปริมาตรก่อนอัด

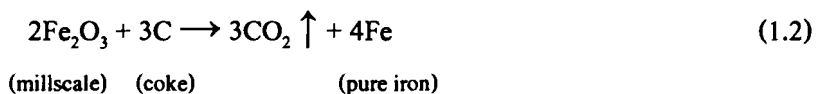
การอบผนึก เป็นการทำให้ผงโลหะประสานติดกันด้วยความร้อน การกระจายอุณหภูมิกายในผงโลหะเป็นเรื่องที่สำคัญ ดังนั้น โลหะผงที่กระจายอุณหภูมิดีดีเมื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ ความแข็งและความแข็งแรงสุดท้ายของชิ้นงานอาจได้จากการนำชิ้นงาน ไปปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน เช่น การชุบ และการอบคืนตัว เป็นต้น

วิธีการผลิตผงโลหะ (Methods of Producing Powders)

ถึงแม้ว่าโลหะทุกชนิดจะสามารถทำให้อยู่ในรูปของโลหะผงได้แต่ก็มีอยู่ไม่กี่ชนิดเท่านั้น ที่นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน โลหะผงที่นิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นงานด้วยวิธีนี้มีอยู่ 2 กลุ่ม คือ โลหะในกลุ่มเหล็ก และโลหะในกลุ่มทองแดง ผงทองบรอนซ์ส่วนใหญ่จะนำมาขึ้นรูปเป็นแบร็ง ส่วนผงทองเหลือง และผงเหล็กนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กของเครื่องจักร ผงโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น นิกเกิล เงิน ทังสแตน และอะลูมิเนียม ถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานเช่นเดียวกันแต่อยู่ในวงจำกัดถึงแม้ว่าจะถูกใช้งานอยู่ในวงจำกัด แต่ก็มีความสำคัญในวงการโลหะกรรมชนิดผงอยู่มากทีเดียว

การผลิตโลหะผงแต่ละชนิด อาจใช้กรรมวิธีที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีคุณลักษณะทางเคมีและฟิสิกส์ไม่เหมือนกัน กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตโลหะผงมีให้เลือกใช้อยู่หลายวิธี ได้แก่ การผลิตผงโลหะด้วยเครื่องมือกล วิธีนี้จะได้ผงโลหะที่ค่อนข้างหยาบ ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการผลิตผงแมกนีเซียม การบด โดยใช้เครื่องบดแบบต่าง ๆ ก็เป็นวิธีการที่ใช้ในการผลิตผงโลหะซึ่งเครื่องบดที่ใช้มีอยู่หลายแบบ เช่น เครื่องบดแบบหมุน เครื่องบดแบบกระเดื่อง ซึ่งใช้ได้กับโลหะที่มีเนื้อเปราะ การฉีกพัน เป็นวิธีการผลิตผงโลหะอีกวิธีหนึ่งซึ่งนิยมใช้กับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่ว ดีบุก สังกะสีและอะลูมิเนียม นอกจากนั้นวิธีการพ่นนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตผงเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณสูงได้ด้วย

วิธีการลดทอน (Reduction Method) เป็นกระบวนการทางเคมีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตโลหะผงได้ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ต้องการให้โลหะผงที่ได้เป็นโลหะบริสุทธิ์ วิธีการลดทอนนั้นทำได้โดยการนำออกไซด์ของโลหะมาทำปฏิกิริยากับก๊าซร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะได้โลหะบริสุทธิ์ที่มีเนื้อพรุนออกมา เช่น การผลิตผงเหล็ก จากเหล็กออกไซด์ จะนำเหล็กออกไซด์เข้าไปเผาในเตาหมุน ร่วมกับผงถ่าน ไม้ก๊อกที่อุณหภูมิประมาณ 1050°C คาร์บอนจะดึง เอาออกซิเจนที่อยู่ในเหล็กออกไซด์ออกมารวมตัวกันกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะถูกปล่อยออกไปทางปล่องไอเสียของเตาเผา จะเหลือเหล็กบริสุทธิ์อยู่ภายในเตา เหล็กที่ได้นี้จะมีเนื้อพรุน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตาเป็นไปตามสมการเคมีที่ 1.2



โลหะอื่นที่ผลิตขึ้นด้วยกรรมวิธีนี้ได้ ประกอบด้วย ทังสแตน โมลิบดีนัม นิกเกิล และโคบอลต์

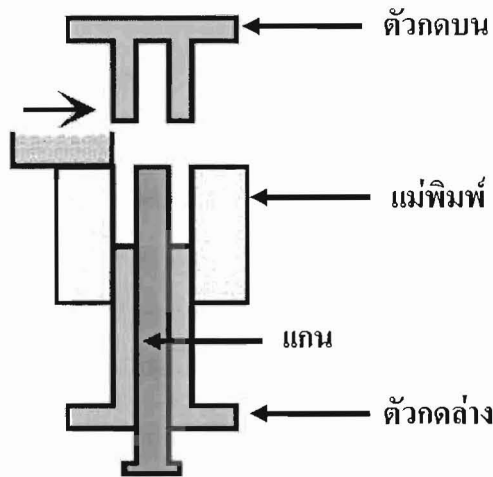
การขึ้นรูปโลหะผง (Forming to Shape)

ผงโลหะที่ใช้สำหรับทำผลิตภัณฑ์อย่างใดอย่างหนึ่งนั้นต้องพิจารณาเลือกสรรเป็นอย่างดีเพื่อให้ได้ชิ้นงานมีสมบัติตรงตามที่ต้องการและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด ถ้าสามารถเลือกใช้ผงโลหะเพียงชนิดเดียวแล้วได้คุณลักษณะต่างๆ ของผง เช่น การกระจายขนาดและอื่นๆ ตามเงื่อนไขที่ต้องการทุกประการ ก็ไม่จำเป็นต้องนำผงโลหะนั้นไปผสมกับผงโลหะหรือผงวัสดุอื่นๆ อีก แต่ผงโลหะชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียวจะมีคุณลักษณะต่างๆ ไม่สอดคล้องกับความต้องการของเราทุกประการ ไม่ว่าจะเป็นความไหลได้ ความหนาแน่น การกระจายขนาด จึงจำเป็นต้องนำผงโลหะหลายชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้คุณลักษณะเหล่านี้ตรงกับความต้องการ นอกจากนั้นในบางครั้งเราอาจต้องการให้โลหะที่ได้ออกมาอยู่ในรูปโลหะเจือหรือต้องการผสมวัสดุอื่นที่อยู่นอกกลุ่มโลหะลงไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านใดด้านหนึ่งโดยเฉพาะ ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ต้องมีการผสมผงโลหะกับผงชนิดอื่น การนำผงโลหะหลายชนิด มาผสมคลุกเคล้ากันต้องทำในที่ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้ผงโลหะเกิดออกซิเดชันหรือผงโลหะเกิดการเสียหายเนื่องจากสาเหตุอื่น

ในการนำโลหะผงมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานนั้นต้องผสมผงของสารช่วยหล่อลื่นลงไป ด้วยเสมอเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับแบบคายและเพื่อให้ง่ายต่อการถอดชิ้นงานออกจากแบบคาย สารช่วยหล่อลื่นที่นิยมใช้คือ กรดสเตียริก ลิเทียมสเตียเรต และผงแกรไฟต์เมื่อเตรียมผงโลหะหรือผสมผงโลหะชนิดต่างๆ ตามสัดส่วนที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำผงนั้นมาเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปโลหะผงเป็นชิ้นงานมีอยู่ หลายวิธี ดังต่อไปนี้

การอัด ผงโลหะจะถูกนำไปอัดในแบบคายซึ่งจะทำมาจากเหล็กกล้า ภายใต้ความดันประมาณ 14-1400 เมกะพาสกาล ผงโลหะอ่อนสามารถอัดได้อย่างรวดเร็วและไม่ต้องใช้ความดันสูงมากนักแต่ถ้าเป็นผงโลหะแข็งกระบวนการจะช้าลงและต้องใช้ความดันสูง ความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ในขณะเดียวกันค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตจะสูงขึ้นตามค่าความดันที่ใช้ด้วย ความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงานที่ได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความดัน

การอัดผงโลหะให้เป็นชิ้นงานทำได้หลายวิธี เช่น การใช้หัวตอกเจาะ (Punch) และแบบคาย (Die) ในรูปที่ 1.2 แสดงการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 1.2 การผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะการอัดแบบทิศทางเดียว

(ที่มา : http://enghome.eng.psu.ac.th/mne/staff/lek_files/ceramic/u64-1.htm, 4/10/2550)

การอัดแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Compacting) การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ผงโลหะจะถูกนำมาใส่ในแบบ จากนั้นหมุนเหวี่ยงจนเกิดความดันที่กระทำต่อผงโลหะประมาณ 3 เมกะพาสคาล วิธีนี้ใช้ได้กับโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะสูง เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ นอกจากนั้นชิ้นงานจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอเท่านั้น

การอบผนึก (Sintering)

การอบผนึกเป็นกระบวนการทำให้ผงโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานมาแล้วประสานติดกันเป็นเนื้อเดียวด้วยความร้อนโดยการนำชิ้นงานไปอบในเตาอบที่มีการควบคุมบรรยากาศภายในเตา ความร้อนภายในเตาจะทำให้ผงโลหะเชื่อมเป็นสะเก็ดติดกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกสำหรับผงโลหะชนิดต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบผนึก โลหะผงชนิดต่าง ๆ (ที่มา: สมเกียรติ, 2544)

วัสดุ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
ทองแดง ทองเหลืองและบรอนซ์	780-900	10-45
เหล็กและเหล็กแกรไฟต์	1000-1150	8-45
นิกเกิล	1000-1150	30-45
เหล็กกล้าไร้สนิม	1100-1290	30-60
อัลนิโคอัลลอย (ใช้ทำแม่เหล็กถาวร)	1200-1300	120-160
เฟอร์ไรต์	1200-1500	10-600
ทังสเตนคาร์ไบด์	1430-1500	20-30
โมลิบดีนัม	2050	120
ทังสเตน	2350	480
แทนทาลัม	2400	480

จากตารางที่ 1.5 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกโลหะบางชนิดอยู่ในช่วงที่สามารถใช้เตาอบสำหรับงานอุตสาหกรรมทั่วไปที่มีขายในท้องตลาดได้ แต่โลหะบางชนิดต้องใช้ อุณหภูมิสูงมาก ส่วนในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการอบผนึกนั้นก็มิได้ตั้งแต่วิธีเวลาสั้นๆ คือใช้เวลา ประมาณ 10-45 นาที สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กและโลหะในกลุ่มทองแดง แต่การอบผนึกโลหะ บางชนิดต้องใช้เวลานานหลายชั่วโมง เช่น ทังสเตน และแทนทาลัม เป็นต้น เตาอบที่ใช้ในการอบ ผนึกชิ้นงานที่ทำจากโลหะผงนั้นมีอยู่หลายแบบ แต่ในปัจจุบันนี้ถ้าเป็นการผลิตที่มีปริมาณมาก ๆ จะนิยมใช้เตาอบแบบต่อเนื่อง

การอัดร้อน (Hot Pressing)

กระบวนการนี้จะรวมเอาการอัดขึ้นรูปและการอบผนึกมาทำไปพร้อมกันซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานที่ขนาดมีความเที่ยงตรงสูง มีความแข็งแรงดีและมีความแข็งสูง แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ ค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากแบบคายที่ใช้มีราคาแพง รวมทั้งกระบวนการให้ความร้อนและการควบคุม บรรยากาศมีความยุ่งยาก แบบคายที่ใช้ส่วนใหญ่จะทำจากแกรไฟต์ซึ่งจะมีปัญหาในเรื่องความ แข็งแรง ด้วยข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้การอัดร้อนจึงไม่เป็นที่นิยมใช้

การอบผนึกด้วยการปล่อยประจุ (Spark Sintering)

เป็นกระบวนการที่รวมเอาการอัดขึ้นรูปและการอบผนึกมากระทำไปพร้อมกัน เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปและอบผนึกให้ผงโลหะติดกันเป็นเนื้อเดียวนั้นประมาณ 12-15 วินาที การ

ทำให้ผงโลหะประสานติดกันจะอาศัยการปล่อยประจุ ของไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงซึ่งปล่อยมาจากกลุ่มตัวเก็บประจุ การปล่อยประจุจะทำให้ผิวของโลหะเย็นเป็นสะเก็ดติดกันเป็นแท่งเหมือนกับวิธีการอบผนึกที่ได้กล่าวมาแล้ว ใช้แรงจากไฮดรอลิกกดลงบนผงโลหะซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ค่าสูงถึงค่าที่ต้องการ ลักษณะการทำงานของกระบวนการ การติดตั้งหัวตอกเจาะ และแบบคาย ของเครื่องอบผนึกด้วยการปล่อยประจุ กระบวนการนี้นิยมใช้กับผงโลหะจำพวก อะลูมิเนียม ทองแดง ทองบรอนซ์ เหล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิม

1.2.4 ผลิตภัณฑ์จากโลหะผง (Metal Powder Products)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำโลหะผงไปขึ้นรูปนั้นมีมากมายซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น ชิ้นส่วนของเครื่องจักร และเครื่องใช้ต่าง ๆ จะผลิตออกมาในลักษณะชิ้นส่วนสำเร็จโดยไม่ต้องนำไปขึ้นรูปหรือแต่งผิวด้วยเครื่องมือกลอีกถึงมีก็เป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้นซึ่งประกอบด้วย

แผ่นกรอง (Filters) แผ่นกรองที่ทำจากโลหะผงจะมีความแข็งแรงและทนทานต่อการขัดสีได้สูงกว่าที่ทำจาก เซรามิก สามารถทำให้มีความพรุนได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

มีดกลึงและแบบคาย (Cutting Tools and Dies) ที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งทำได้ โดยการนำผง ทังสเตนคาร์ไบด์ มาผสมกับผงโคบอลต์ แล้วอัดขึ้นรูปตามวิธีที่กล่าวมาแล้ว

เฟืองและใบพัดของปั๊ม (Gears and Pump Rotors) ส่วนมากทำจากผงเหล็กผสมกับผงแกรไฟต์ เมื่ออัดขึ้นรูปแล้วเนื้อจะมีความพรุนประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ หลังจากทำการอบประสานแล้วนำไปแช่น้ำมันก่อนนำไปใช้งาน จะช่วยลดเสียงดังในขณะที่ใช้งานได้

แปรงถ่าน (Brushes) ที่ผลิตขึ้นมาใช้กับมอเตอร์จะใช้ผงทองแดงผสมกับผงแกรไฟต์ หรืออาจเติมผงตะกั่วและดีบุกลงไปเล็กน้อยเพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ

แบริ่ง (Bearing) ส่วนมากผลิตจากผงทองแดงผสมกับผงดีบุกและผงแกรไฟต์ หลังจากอัดขึ้นรูปและอบผนึกเรียบร้อยแล้ว จะนำไปแต่งให้ได้ขนาดจากนั้นนำไปแช่น้ำมัน ภายใต้อุณหภูมิและความพรุนของเนื้อชิ้นงานสามารถทำได้ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) ทำจากโลหะผงหลายชนิดผสมกัน ได้แก่ ผงเหล็กผสมกับ ผงอะลูมิเนียม ผงนิกเกิล และผงโคบอลต์ ในกรณีของแม่เหล็กอัลนิโก จะใช้ผงโลหะแค่ 2 ชนิด เท่านั้น คือ ผงเหล็กกับผงอะลูมิเนียม

ชิ้นส่วนสำหรับงานไฟฟ้า (Electrical Parts) งานขึ้นรูปด้วยโลหะผงเหมาะที่จะนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนสำหรับงานไฟฟ้า เนื่องจากในการผลิตสามารถนำผงโลหะชนิดต่างๆ มาผสมคลุกเคล้ากัน โดยที่ยังสามารถรักษาสมบัติที่ดีทางไฟฟ้าไว้ได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงให้มี

ความทนทานต่อการสึกหรอ ทนความร้อนไปพร้อม ๆ กับการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีผงโลหะที่นิยมใช้ทำชิ้นส่วนพวกนี้ประกอบด้วย ผงทองแดงผสมผงทั้งสแตน ผงทั้งสแตนผสมผงโคบอลต์ ผงทั้งสแตนผสมผงเงิน ผงเงินผสมผงโมลิบดีนัม และผงทองแดงผสมผงนิกเกิลกับผงทั้งสแตน เป็นต้น (สมเกียรติ, 2544)

Ferro-TiC

Ferro-TiC เป็นวัสดุผสมที่เมทริกซ์ทำจากโลหะ จะมีอนุภาคกลมของไทเทเนียมคาร์ไบด์ฟอร์มตัวอยู่บนผิววัสดุและทำให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำและมีความแข็งสูงกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ทนต่อการสึกหรอ Ferro-TiC สามารถขึ้นรูปโดยการกลึง เจาะ หรือกัด เป็นต้น ในกระบวนการ HIP และขั้นตอนการอบอ่อน และหลังจากนั้นจะทำการ heat treatment เพื่อให้ได้ความแข็ง 68-72 Rc



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างชิ้นงาน Ferro-TiC (ที่มา <http://etrade.daegu.go.kr/co/kuksung/GC01021738/CA01021759/Ferro-TiC.html>, 4/10/2548)

คุณสมบัติของโลหะผสม Fe-TiC WC-Co และ Steel ดังแสดงในตารางที่ 1.6 แสดงให้เห็นถึงค่าต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางด้านความแข็งของอนุภาค ค่าความแข็งที่อุณหภูมิห้อง และค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง ลักษณะรูปร่าง ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเปรียบ เทียบกันระหว่างโลหะผสม 3 ชนิด

ตารางที่ 1.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ โลหะผสม Fe-TiC, WC-Co และ Steel

(ที่มา <http://etrade.daegu.go.kr/co/kuksung/GC01021738/CA01021759/Ferro-TiC.html>, 4/10/2548)

Ferro-TiC Properties								
Alloys	Particle hardness HRC	Room temp. Hardness HRC	High temp. hardness (600°C) HRC	Particle shape	Coefficient of friction (10^{-7} cm ³)	Density (g/cm ³)	Traverse rupture strength (Kg/mm ²)	Thermal coefficient of expansion (10^{-4} mm/mm/°C)
Fe-TiC	92	69	69	Sphere	8	6.5	184	3.0
WC-Co	80	72	72	Square	15	15	250	3.1
Steel	-	61	45	-	-	-	150	7.3

1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Saidi, A. Chrysanthon, J.V. Wood และ J.L.F. Kellie (1997) ได้ศึกษาถึงการเตรียมวัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยทำการผสมผงไทเทเนียม ผงเหล็กและคาร์บอนแบล็ก และทำการอัดเข้าด้วยกันนำไปเผาจุดระเบิดภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาให้อยู่ในช่วง 1600-2620°C ในแต่ละการทดลอง และศึกษาถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของตัวอย่างที่ผสมกัน ผลกระทบของกระบวนการจากการแปรผ่นแลตติซพารามิเตอร์ ส่วนผสมของไทเทเนียมคาร์ไบด์ และ โครงสร้างที่เกิดขึ้น

A. Saidi (1999) ทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นในการผลิตวัสดุผสม Fe-(W, Ti)C ในการทดลองนี้จะศึกษาปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยา คือ แปรผ่นตัวเสริมแรง (Ti, W) โดยให้ตัวเมทริกซ์ (Fe) คงที่ และแปรผ่นเมทริกซ์โดยให้ตัวเสริมแรงคงที่ ดังสมการที่ 1.3-1.4

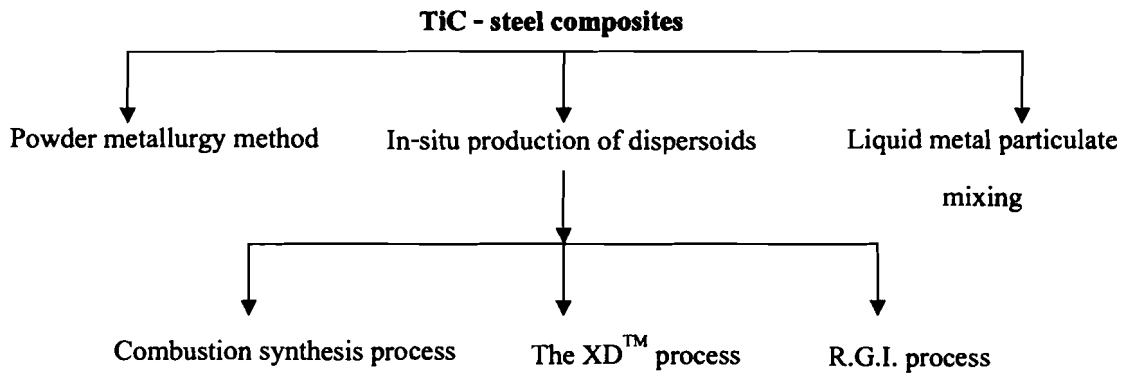


นำผงตัวอย่างที่ผสมกัน มาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทำการเผาด้วยกระบวนการ SHS ภายใต้สภาวะของก๊าซอาร์กอน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุผสม Fe-(W, Ti) C ออกมาและนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM

D.W. Lee และ B.K. Kim (2003) นำเสนอไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโน ที่สังเคราะห์โดยกระบวนการ Liquid-Magnesium Reduction ของ สารละลาย $\text{TiCl}_4 + \text{CCl}_4$ ดังสมการ $\text{TiCl}_4(\text{g}) + \text{CCl}_4(\text{g}) + 4\text{Mg}(\text{l}) = \text{TiC}(\text{s}) + 4\text{MgCl}_2(\text{l})$ อนุภาค TiC ขนาดละเอียดถูกผลิตโดยปฏิกิริยาของการปลดปล่อยอะตอม Ti และ C การทำในสภาวะสูญญากาศเพื่อไล่เฟสของ MgCl_2 และ Mg ส่วนเกินออกไป วิธีการนี้จะได้ TiC ที่มี แลตติซพารามิเตอร์ 0.43267 นาโนเมตร ใกล้เคียงกับขนาดมาตรฐาน และขนาดผลึกประมาณ 50 นาโนเมตร

G.A. Swift และ R. Koc (1999) ศึกษาเกี่ยวกับการเกิด TiC จากการเคลือบ C บน TiO_2 โดยทำการวิเคราะห์ด้วย DSC TGA XRD SEM และ TEM โดยจะมีการเตรียมตัวอย่างคือ ผสมผงและเคลือบผิวโดยการเคลือบผิวนี้ได้จากการแตกตัวของก๊าซโพโรซิลิน ที่ 600°C ซึ่งคาร์บอนจะไปเคลือบที่ผิวของ TiO_2 จนกระทั่งถึง 33.2 wt % C คาร์บอนที่เคลือบจะมีรูพรุนและรูปร่างอสัณฐาน เตรียมผสมผงโดยใช้ TiO_2 และคาร์บอนแบล็กซึ่งเดิมไปจนถึง 33.2 wt % C จากนั้นบดผสม 38 ครั้งๆ ละ 20 นาที จากนั้นนำไปสังเคราะห์ด้วยกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันเพื่อให้ได้ TiC ออกมา

K.I.Parashivamurthy และคณะ (2001) ทำการศึกษาเกี่ยวกับไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุผสมเหล็ก ซึ่งมีกระบวนการที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

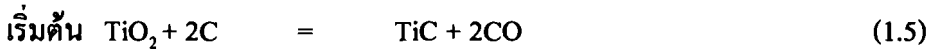
L. Tong และ R. G. Reddy (2005) นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการที่จะหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อที่จะสังเคราะห์ผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ขนาดนาโนด้วยวิธี พลาสมา งานวิจัยนี้สนใจผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอัตราการผลิตและอัตราส่วนเชิงโมล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผงไทเทเนียมคาร์ไบด์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้ และขนาดเฉลี่ยของไทเทเนียมคาร์ไบด์ มีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร โดยตัวอย่างที่ใช้จะเป็น $Ti + CH_4(g) = TiC + 2H_2(g)$

M. Razavi และคณะ (2006) ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ขนาดนาโน ซึ่งสังเคราะห์ด้วยการบดผสมเชิงกลในเนื้อเหล็กซึ่งเป็นเมทริกซ์ สำหรับการเตรียมไทเทเนียมคาร์ไบด์ ทำโดยนำไทเทเนียมที่ผ่านการบดเป็นเวลา 5 ชม.เพื่อให้ได้ขนาด < 50 เมช และคาร์บอน ขนาด < 250 เมช บดผสมภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ที่ 12 15 และ 20 ชม. หลังจากนั้นนำไปสังเคราะห์ด้วยวิธี SHS เพื่อให้ได้ไทเทเนียมคาร์ไบด์ จะได้ไทเทเนียมคาร์ไบด์ขนาดนาโน และทำการหล่อโลหะโดยเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ได้ลงในเนื้อเหล็ก ใช้อัตราส่วน 0.96 wt. % TiC ที่สังเคราะห์ได้เติมลงในเนื้อเหล็กหล่อ 4 wt. % C เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความเสียดทานที่ได้จะมีค่าลดลง

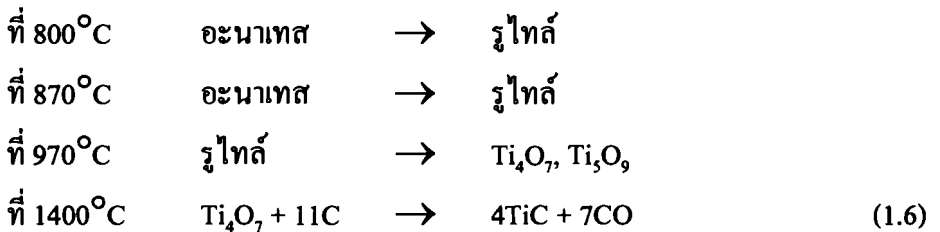
N.J. Welham (1996) ทำการศึกษาถึงผลกระทบของเวลาบดและสภาวะในการหลอม เพื่อหาแนวทางในการพัฒนากระบวนการให้ดีขึ้น โดยทำการบดผสมอลูมิเนียมและถ่านหินเป็นเวลา 2 10 50 และ 200 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเวลาที่ใช้ในการบดที่ดีที่สุดคือ 2 ชั่วโมง

ซึ่งจะได้ขนาดของอนุภาคอิทเมไนต์ d_{50} ประมาณ 0.5 ไมครอน และนำไปชะละลายเพื่อให้ได้เป็น TiO_2 ออกมา สภาพการละลาย แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการที่จะเพิ่มคุณภาพของ TiO_2 ให้สูงขึ้นกว่ากระบวนการที่ใช้อยู่ปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อน ในการทำให้เฟสเกิดการพอร์มตัว เป็นสาเหตุให้ Ti ละลายไปน้อยจึงมี Ti ที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นและความสามารถในการละลายของเหล็กลดลง

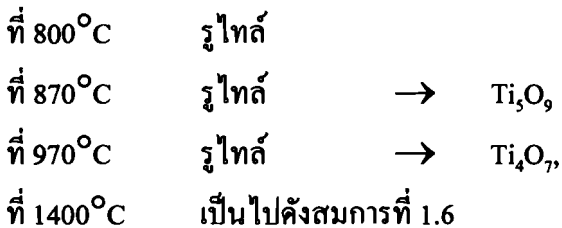
N. Setoudeh, A. Saidi และ N.J. Welham (2005) ทำการศึกษากระบวนการคาร์โบเทอร์มิก รีดักชันของอะนาเทสและรูไทล์ที่จะกลายเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ ทำการวิเคราะห์โดยใช้ Thermogravimetric และ XRD ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการบดมาแล้ว 50 ชั่วโมง และตัวอย่างที่ยังไม่ได้บดนำมาเปรียบเทียบกัน จากการทดลองให้ความร้อนกับรูไทล์อะนาเทส พบว่าจะมีขั้นตอนของการพอร์มตัวเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ ดังแสดงในสมการที่ 1.5-1.6



เมื่อนำ อะนาเทสผสมกับคาร์บอน และนำไปให้ความร้อน และผลที่ได้จาก XRD พบว่า



เมื่อนำ รูไทล์ผสมกับคาร์บอน และนำไปให้ความร้อน และผลที่ได้จาก XRD พบว่า



P. Persson, A.E.W. Jarfors และ Steven Savage (2002) ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิต MMCs โดยตัวเสริมแรงที่ทำการศึกษาในครั้งนี้คือ TiC จากงานวิจัยนี้จะมีแนวทางในการทดลอง 2 ทางคือ LPS (Liquid-Phase Sintering) และ SHS (Self-Propagating High-Temperature Synthesis) จากวิธี LPS พบว่า กระบวนการควบคุมได้ง่ายและชิ้นงานที่ได้ออกมามีความเป็นเนื้อเดียวกันดี ทั้ง LPS และ SHS จะได้วัสดุที่มีความพรุนสูงมาก โดยที่รูพรุนในวิธี LPS จะลดลงได้ถ้ามีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรบางตัว แต่สำหรับวิธี SHS เป็นไปไม่ได้เลยที่จะทำการลดรูพรุนที่เกิดขึ้น

P.V. Ananthapadmanabhan และ P.R. Taylor (1999) ได้ศึกษาการใช้วิธีพลาสมาสเปรย์ ในการทำวัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่ใช้เคลือบผิว โดยใช้ผงแร่อลูมิเนียมไนต์และก๊าซมีเทนในกระบวนการ ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของผิวเคลือบด้วยเครื่อง XRD และ SEM พบว่า โครงสร้างของผิวเคลือบเชื่อมติดกันดี และมีรูพรุนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

S. Niyomwas (2005) ทำการศึกษาถึงการสังเคราะห์วัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยวิธีคาร์โบเทอร์มิกรีดักชันภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ในช่วงอุณหภูมิ 1300-1500°C โดยอาศัยหลักการพลังงานกิบส์ต่ำสุด ในการคำนวณปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาที่อัตราส่วนผสมเชิงโมลของอลูมิเนียมไนต์ต่อคาร์บอนเท่ากับ 1:4 1:5 และ 1:6

S.-R. Wang และคณะ (2005) ทำการศึกษาคูสมบัติการสึกหรอของวัสดุผสม Al-Mg-Si₃N₄ โดยอัดน้ำโลหะเหลว (Al-Mg) ลงไปในเนื้อ Si₃N₄ พรุน ที่ผ่านการเตรียมโดยการบดผสมกับตัวเติมและอบผนึกที่ 1400°C เพื่อให้ได้วัสดุผสม Al-Mg-Si₃N₄ จากนั้นจึงนำ Al-Mg-Si₃N₄ ที่ผลิตได้ไปทดสอบการสึกหรอแบบแห้งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360 ที่แรงกด 25 50 75 100 125 และ 150 นิวตัน ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที ที่เวลา 5 10 15 และ 20 นาที ซึ่งจะได้ระยะทางในการเคลื่อนที่เท่ากับ 200 400 600 และ 800 เมตร ผลจากการทดสอบพบว่า ที่ปริมาณ Si₃N₄ ซึ่งเป็นตัวเสริมแรงเพิ่มขึ้น ทำให้การสึกหรอมีค่าน้อยลง แสดงว่าตัวเสริมแรงที่เติมลงไปส่งผลให้ความแข็งและสมบัติการต้านทานการสึกหรอดีขึ้น

W. Jing และ W. Yisan (2007) ศึกษาการผลิตวัสดุผสมไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยการเกิดปฏิกิริยาคู่ตนเอง มีวิธีการคือ ผสมผง 28 Wt.%Ti, 7.2 Wt.% C และ 64.8 Wt.% Fe บดด้วยเครื่องบดที่ 180 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำผงที่ได้มาอัดเป็นชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดทิศทางเดียวที่แรงดัน 350 เมกะพาสกาล ทำการอบผนึกที่ 1360-1440°C ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างด้วย SEM จากการศึกษาหาค่าความหนาแน่นพบว่า ความหนาแน่นชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบผนึกเพิ่มสูงขึ้นและจะเป็นเช่นนี้จนถึงที่ 1420°C อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิในการอบผนึกเพิ่มขึ้นความสามารถในการเป็ยกระหว่างเฟสที่เป็นของเหลวและ TiC ซึ่งเป็นตัวเสริมแรง ได้ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งเกิดการแน่นตัวของอนุภาค TiC ที่เกิดการหลอมตัว และจะส่งผลให้มีจำนวนเฟสของเหลวเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดการกลายเป็นไอของโลหะซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงานที่อบผนึก เมื่อชิ้นงานเกิดช่องว่างภายในจึงทำให้ความสามารถในการอัดเพิ่มขึ้นเป็นการช่วยส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Y. Wang และคณะ (2000) ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคในการหล่อที่ใช้ผลิตเป็นผิวหน้าของวัสดุผสมที่มีเหล็กเป็นตัวหลัก โดยทำการศึกษาตัวอย่างที่ใช้ทำผิววัสดุผสม 3 ชนิดคือ $FeAl_2O_3$, $Fe-ZrO_2$ และ $Fe-TiC$ ซึ่งมีความหนาของผิวหน้าประมาณ 2-3 มม. ทำการอบผืนโดยการเติมผง ZrO_2 , Al_2O_3 , TiC ที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงานและทำการอบผืน จากนั้นจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทดสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคเซรามิกมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อโลหะ ที่ผิวหน้าของ $Fe-TiC$ มีความเข้มข้นของไทเทเนียมค่อนข้างคงที่ ส่วนความเข้มข้นของโครเมียม โมลิบดีนัมและนิกเกิลมีการกระจายตัวเพียงเล็กน้อย วิธีนี้เหมาะที่จะนำไปผลิตชิ้นส่วนที่ผิวเป็นวัสดุผสมระหว่างโลหะ-เซรามิก

Y.Chen, J.S.Williams และ B. Ninham (1997) ทำการศึกษาความแตกต่างของปฏิกิริยาเชิงกลทางเคมีระหว่างอิลเมนไนต์และผงธาตุ ในระหว่างการบดพลังงานสูง ในขณะที่อิลเมนไนต์ถูกลดรูปกลายเป็นผลึกของเหล็ก ผลึกของออกไซด์ขนาดนาโน และเฟสอสัญฐานที่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และวิเคราะห์ความแตกต่างทางอุณหภูมิ ด้วยเครื่อง DTA

Y.-C. Woo, H.-J. Kang และ D. J. Kim (2007) ทำการศึกษาการผลิตอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดิกชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ถูกทำการศึกษาขึ้น โดยการผสมกันของ TiO_2 และคาร์บอนเรซิน ทำปฏิกิริยาที่ $1500^{\circ}C$ เป็นเวลา 0-45 นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊ซอาร์กอน โดยผลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM พบว่ามีการหลอมและรวมตัวกันอยู่ในช่วง 500-1000 นาโนเมตร หลังจากทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ระหว่าง Ti ซึ่งถูกลดรูปและ C จะมีการกระจายตัวของ TiC เป็นเนื้อเดียวกัน ที่ขนาดประมาณ 80 นาโนเมตร

MMCs เป็นวัสดุผสมที่มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการสึกหรอได้ดี เหมาะในการนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องมือที่ต้องทนต่อการสึกหรอ หรือในงานอากาศยานเป็นต้น วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์เนื่องจากเหล็กสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานได้ดี และนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและไทเทเนียมมีความแข็งแรงและทนต่อการสึกหรอได้ดีเหมาะที่จะนำไปใช้งาน

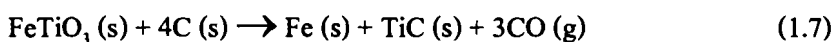
จากการศึกษาพบว่า โคบอลต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์จะถูกผลิตขึ้นโดยวิธีการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์กับแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงถึง $1900-2900^{\circ}C$ ในการผลิตวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่นำผงไทเทเนียมคาร์ไบด์มา จากวิธี การผลิตข้างต้น มีกรรมวิธีในการผลิตอยู่หลายวิธี เช่น การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการคาร์

โบเทอรัมมิกรีคักชัน หรือวิธีการผสมผงเหล็ก ผงไทเทเนียมและคาร์บอนแบล็กเข้าด้วยกัน นำไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานและเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนการหล่อ และกระบวนการ SHS และ LPS พบว่าข้อดีของวิธีเหล่านี้คือ วัสดุที่ใช้มีราคาสูงเนื่องจากต้องใช้สารตั้งต้นเป็นสารบริสุทธิ์ จึงทำให้มีการศึกษาวิธีใหม่ๆขึ้นมา เช่น การใช้วิธีพลาสมาความร้อนในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จากสินแร่โอลิเมนไนต์ วิธีนี้ชิ้นงานที่ได้ออกมาดีแต่มีต้นทุนในการดำเนินงานสูง

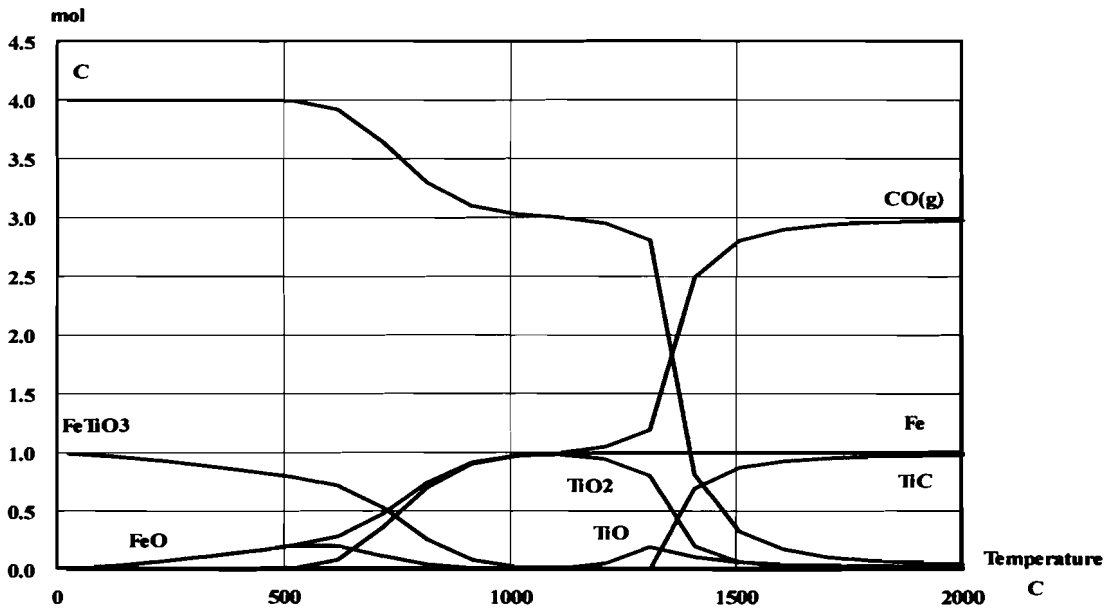
ซึ่งเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยจะทำการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จากสินแร่โอลิเมนไนต์ โดยวิธีคาร์โบเทอรัมมิกรีคักชัน เนื่องจากสารตั้งต้นของกระบวนการสามารถผลิตได้เองในประเทศและมีราคาถูกช่วยลดต้นทุนในการผลิต สามารถผลิตเพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

หลักการ

เมื่อโอลิเมนไนต์ถูกผสมรวมกับคาร์บอนแล้วนำไปให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ในช่วงอุณหภูมิ 1200-1500°C ผงโลหะผสมของ Fe-TiC จะถูกสังเคราะห์โดยวิธีคาร์โบเทอรัมมิกรีคักชัน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปฏิกิริยาเคมีรวมว่า



ในลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอรัมมอล โอลิเมนไนต์จะแตกตัวเป็น FeO และ TiO₂ ที่อุณหภูมิต่ำ แล้วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น FeO ทำปฏิกิริยากับ C ได้เป็น Fe ส่วน TiO₂ จะผ่านขั้นตอนของปฏิกิริยาการลดรูปของออกไซด์ เป็น Ti₃O₅ และ Ti₂O₃ แล้วปรากฏเป็นเฟสสุดท้ายคือ TiC ในการศึกษาปฏิกิริยาและสารเสถียรที่อุณหภูมิต่างๆสามารถวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ โดยอาศัยหลักการของพลังงานกิบส์ต่ำสุด ซึ่งจะได้ว่าปฏิกิริยาที่มีพลังงานกิบส์ต่ำสุดจากปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเกิดก่อน และผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานั้นๆ จะมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์สูงที่สุด ซึ่งผลจากการคำนวณที่ได้รับมาแสดงในรูปกราฟความสมดุลของส่วนผสมในระบบที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 พบว่าที่ อุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ 1000°C FeO ทำปฏิกิริยากับ C เกิดเป็น Fe และที่ประมาณ 950-1300°C TiO₂ ลดรูปเป็น Ti₃O₅ และ Ti₂O₃ ซึ่งต่อมาทำปฏิกิริยากับ C และก่อรูปเป็น TiC ที่ 1300-1500°C ทำให้สามารถสังเคราะห์ Fe-TiC ที่อุณหภูมิประมาณ 1500°C และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนก็จะได้วัสดุผสม Fe-TiC ตามต้องการ ซึ่งสมการและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของส่วนผสมภายในระบบต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ 1.5-1.18 และรูปที่ 1.6-1.16

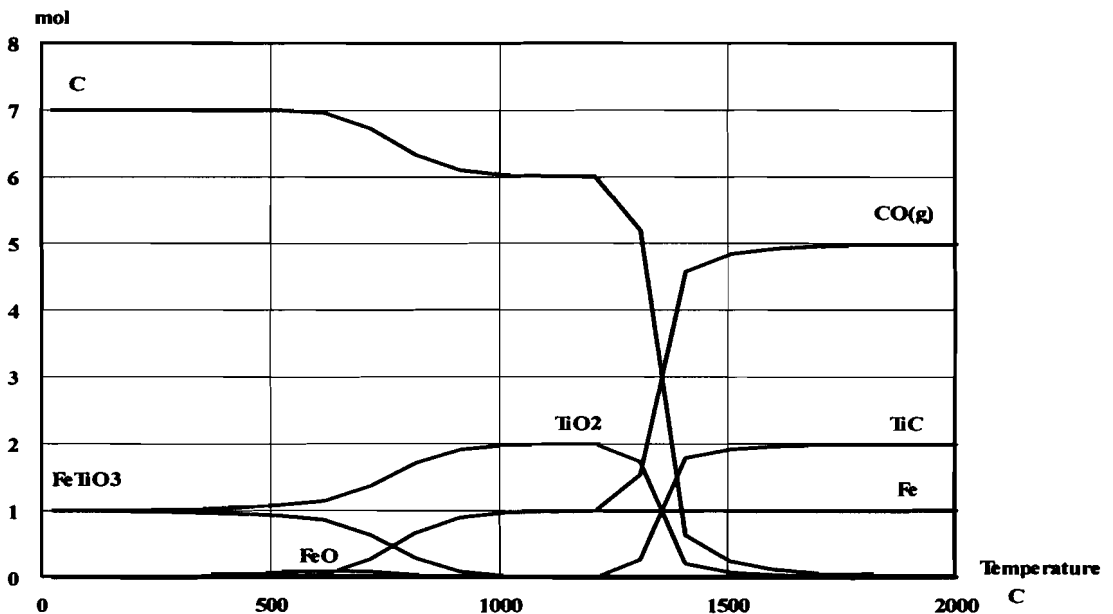


รูปที่ 1.5 กราฟความสมดุลของส่วนผสม

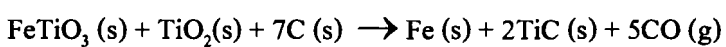
ภายในระบบ $\text{FeTiO}_3(\text{s}) + 4\text{C}(\text{s})$ ที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน

สมการและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของส่วนผสมภายในระบบต่างๆ

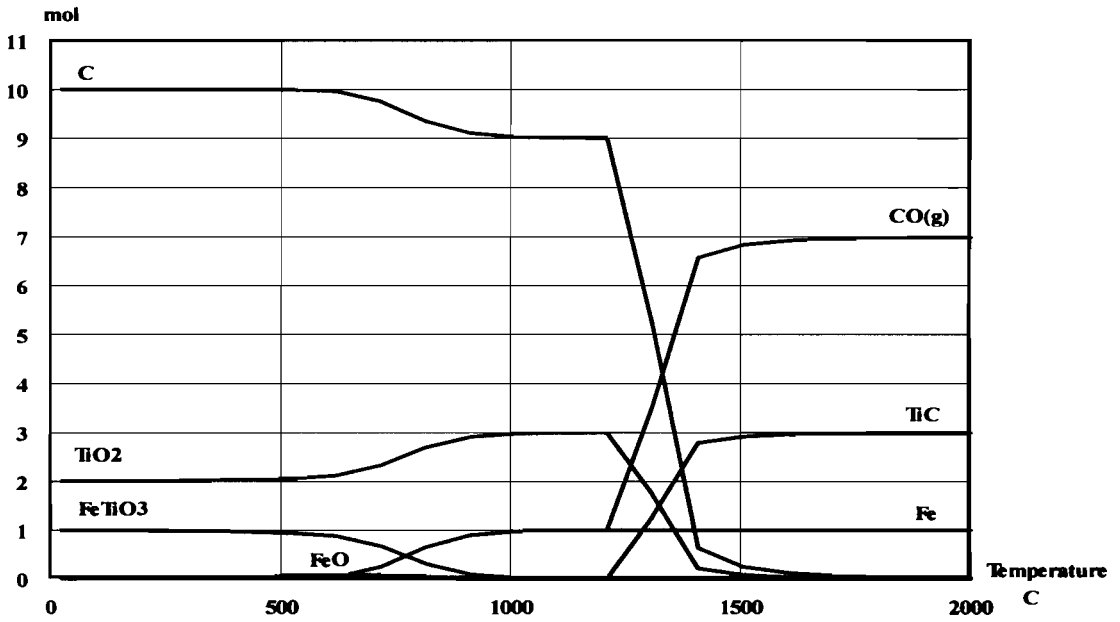
แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์



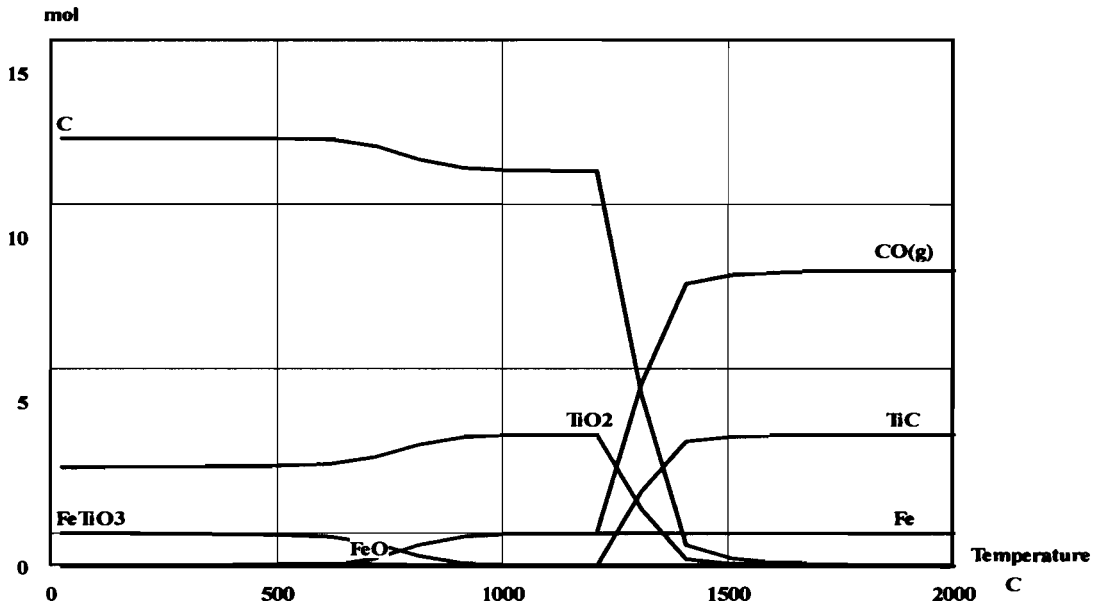
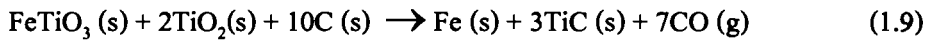
รูปที่ 1.6 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ



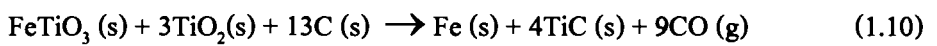
(1.8)

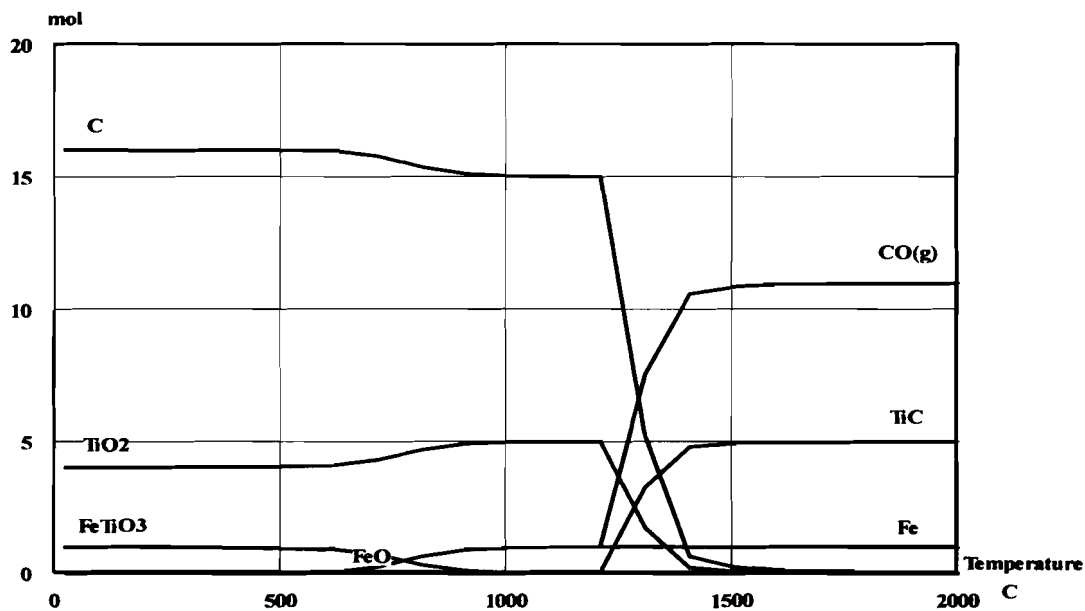


รูปที่ 1.7 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ

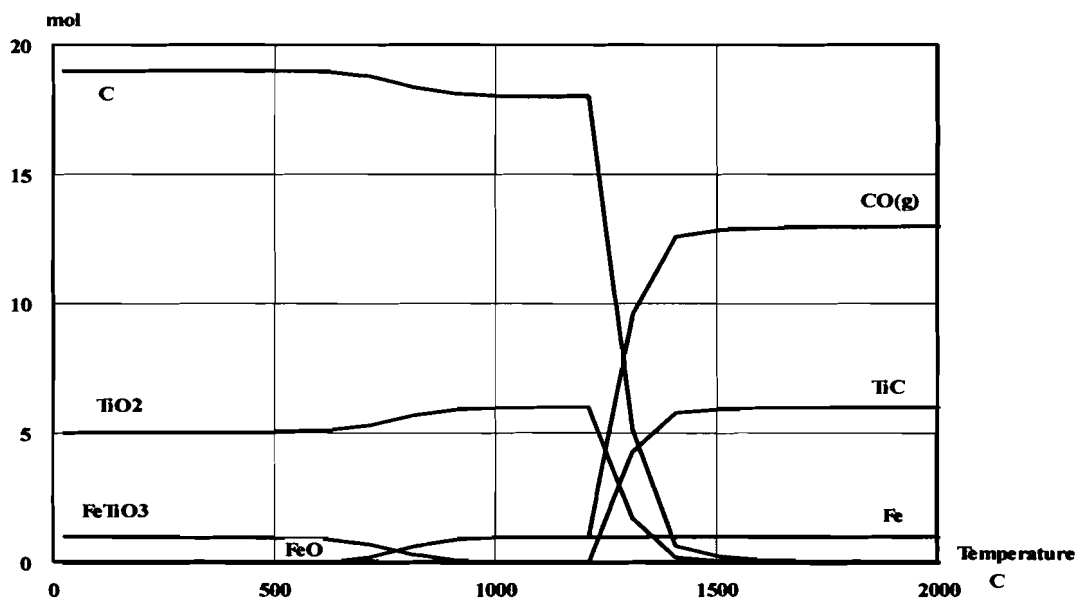
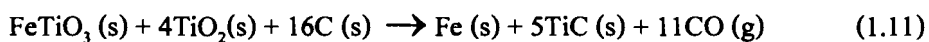


รูปที่ 1.8 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ

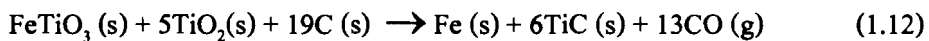




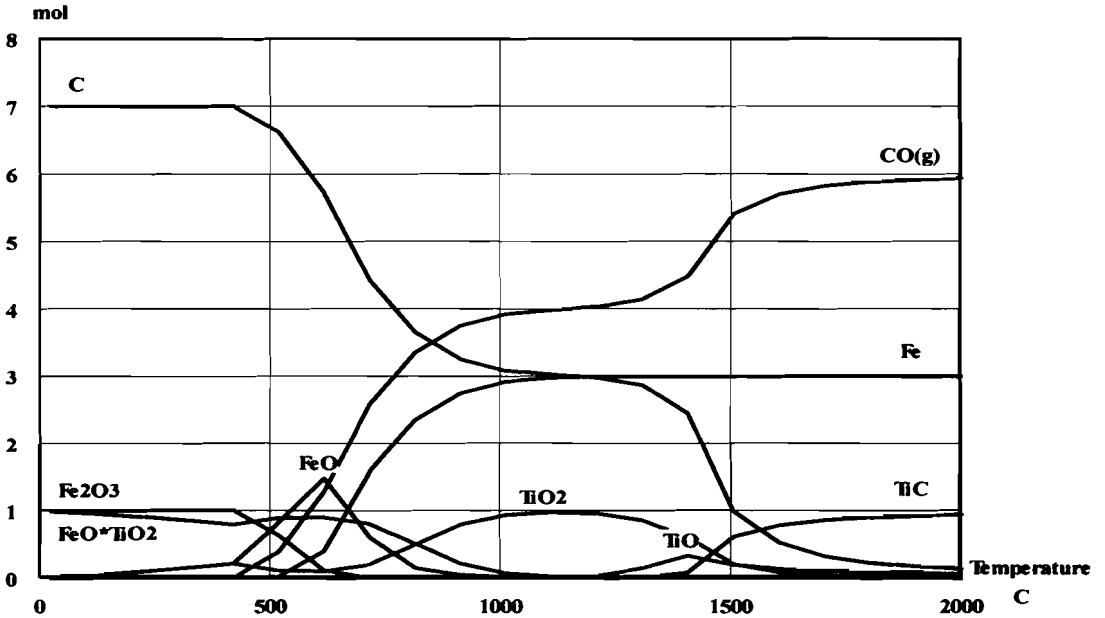
รูปที่ 1.9 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ



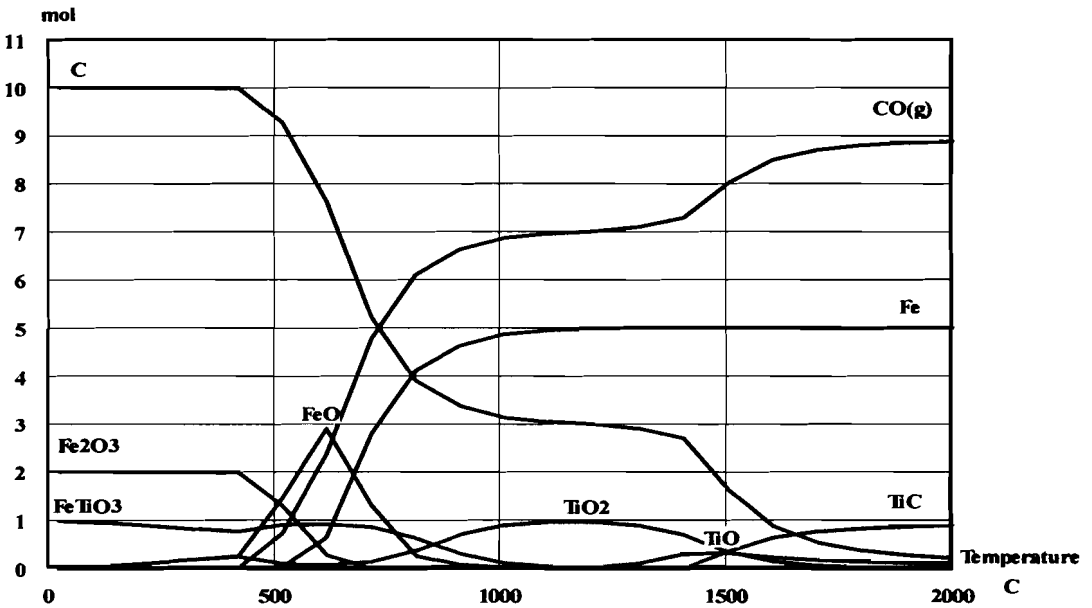
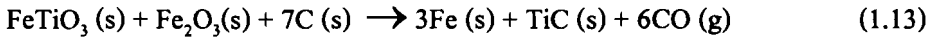
รูปที่ 1.10 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ



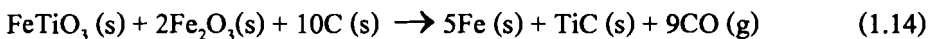
แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์

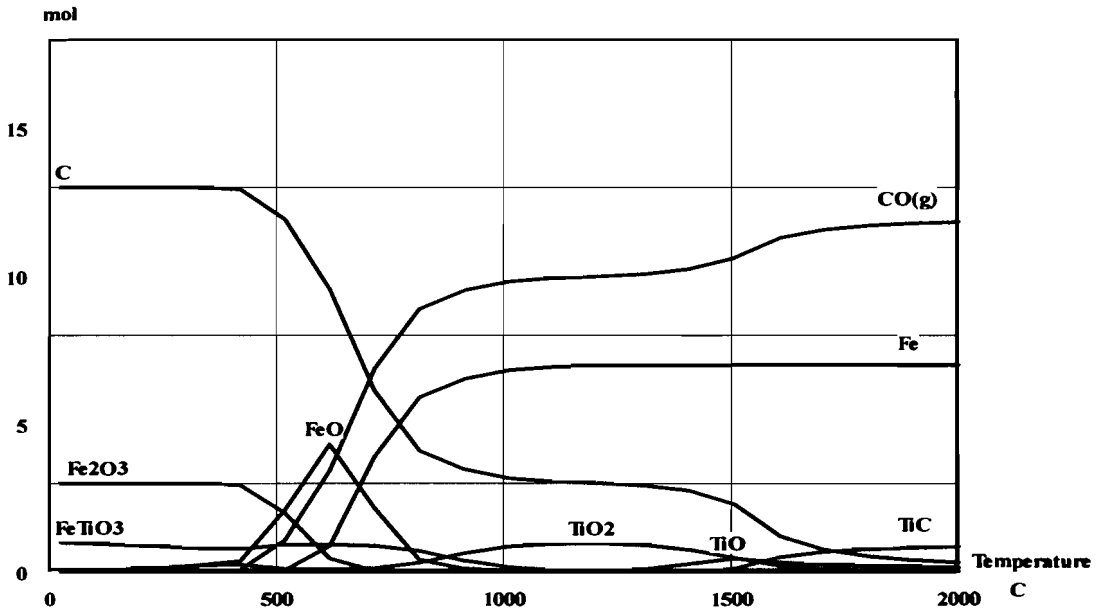


รูปที่ 1.11 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ

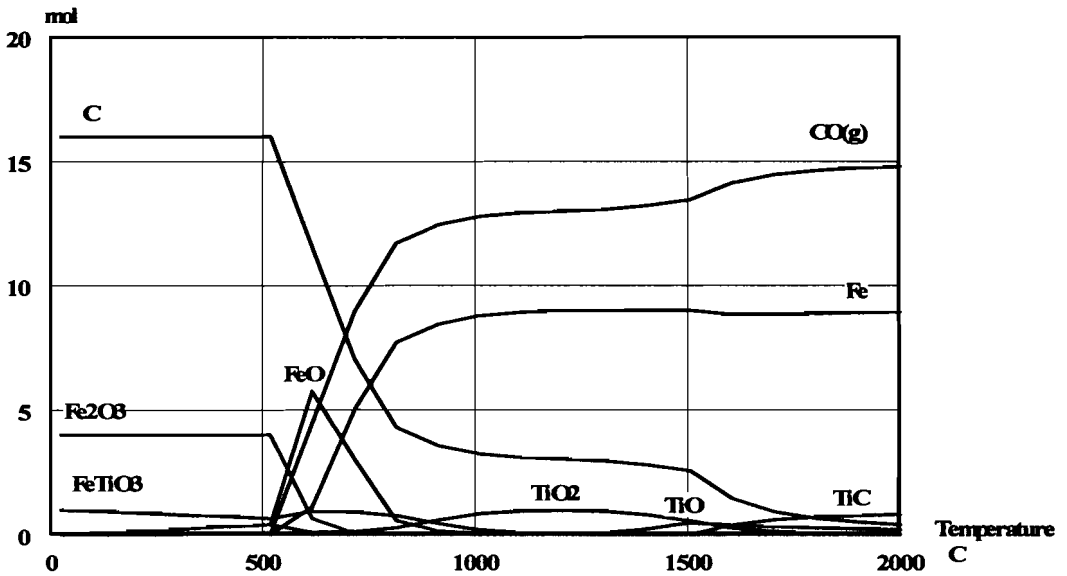
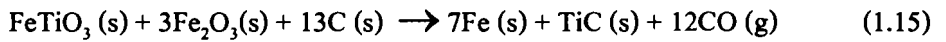


รูปที่ 1.12 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ

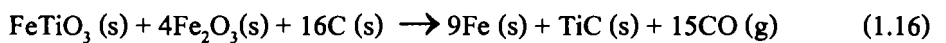


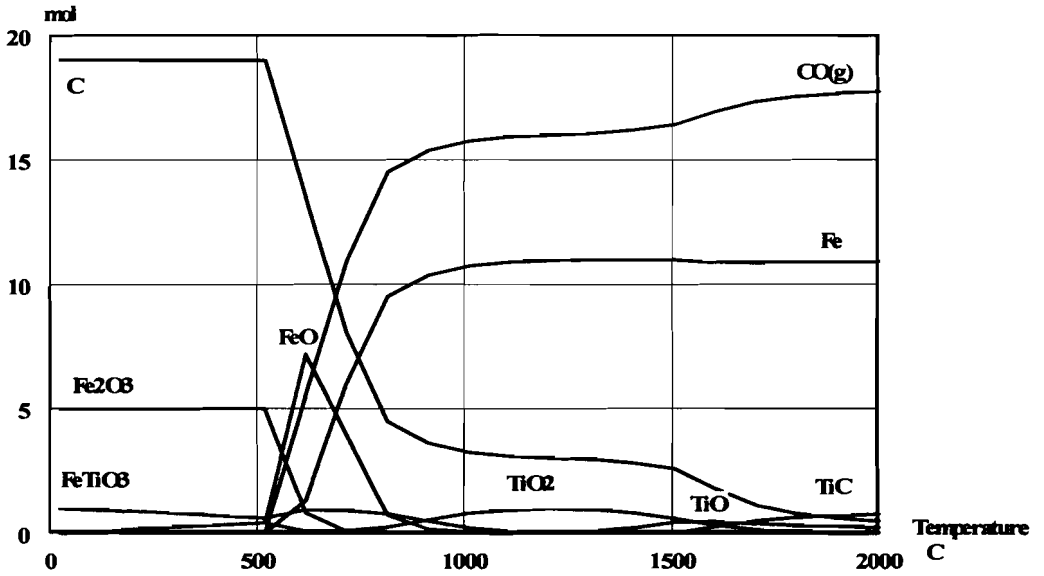


รูปที่ 1.13 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ

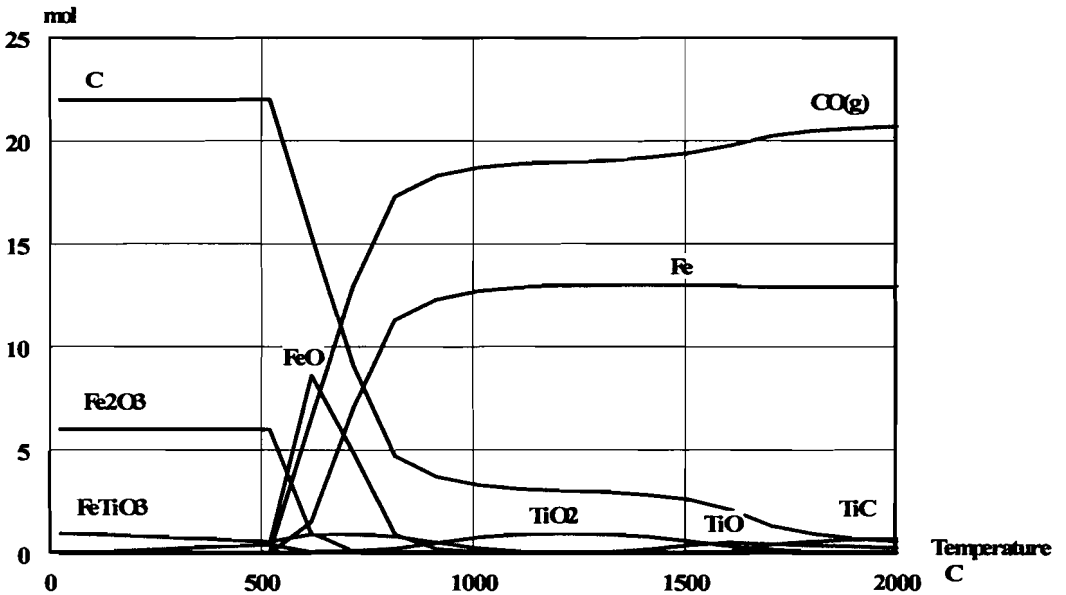
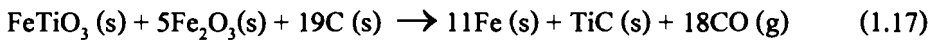


รูปที่ 1.14 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ

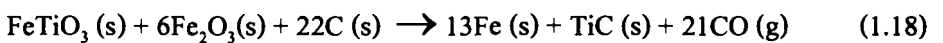




รูปที่ 1.15 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ



รูปที่ 1.16 กราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบ



1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.4.1 สังเคราะห์วัสดุผสม Fe-TiC ด้วยวิธีคาร์โบเทอร์มอลของ อิลเมไนต์ เหล็กออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.4.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์วัสดุผสม Fe-TiC
- 1.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม Fe-TiC ที่สังเคราะห์ได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยในการศึกษานี้ได้ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1.5.1 ปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เติมลงไปในปฏิกิริยา ที่ 1-6 โมล
- 1.5.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปในปฏิกิริยา ที่ 1-5 โมล
- 1.5.3 อุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ที่ 1200 1300 1400 และ 1500°C

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำวัสดุผสม Fe-TiC ที่เราทำการศึกษาวิจัย และทำการทดสอบสมบัติทางกลไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการทนต่อการสึกหรอ หรือในเครื่องมือตัดเฉือน ซึ่งเป็นการผลิตขึ้นภายในประเทศ และทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

บทที่ 2

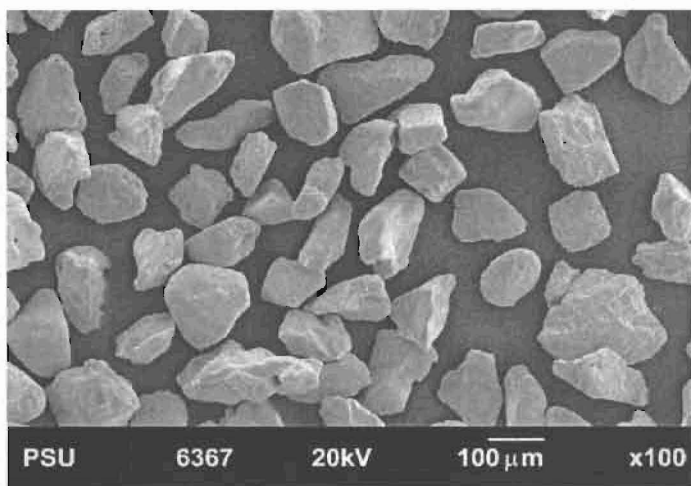
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเตรียม เพื่อที่จะสังเคราะห์วัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ ขั้นตอนและ วิธีการเตรียมวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ พร้อมทั้งกระบวนการชะละลาย การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ และการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ สมบัติการต้านทานแรงกด การทดสอบความแข็งและการ ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้

2. วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีการใช้แร่และสารเคมีเป็นสารตั้งต้นในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย แร่โอลิเมนไนต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และคาร์บอน โดยทำการสังเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง SEM ดังจะแสดงผลดังรูปที่ 2.1-2.4 และทำการวิเคราะห์ ปริมาณสารประกอบของแร่โอลิเมนไนต์ด้วยเครื่อง XRF ดังจะแสดงได้ในตารางที่ 2.1

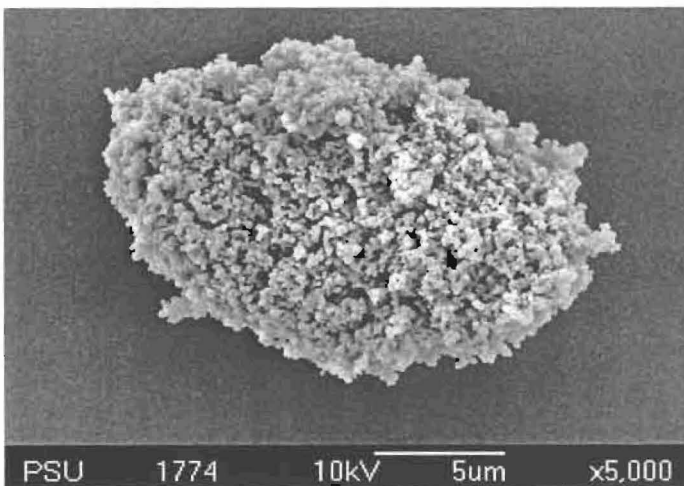


รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงโอลิเมนไนต์ ได้รับความอนุเคราะห์

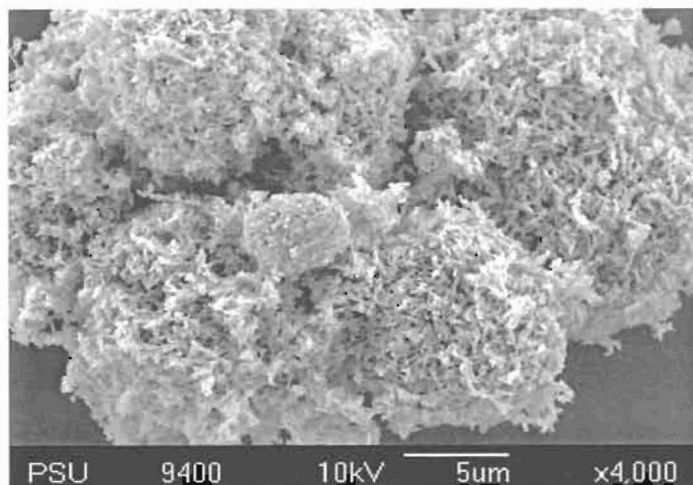
จากบริษัท สิ้นแร่สาคร

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบในแร่โอลิเมนิต์ วิเคราะห์ด้วย X-ray fluorescence spectrometry (XRF, PHILIPS PW2400)

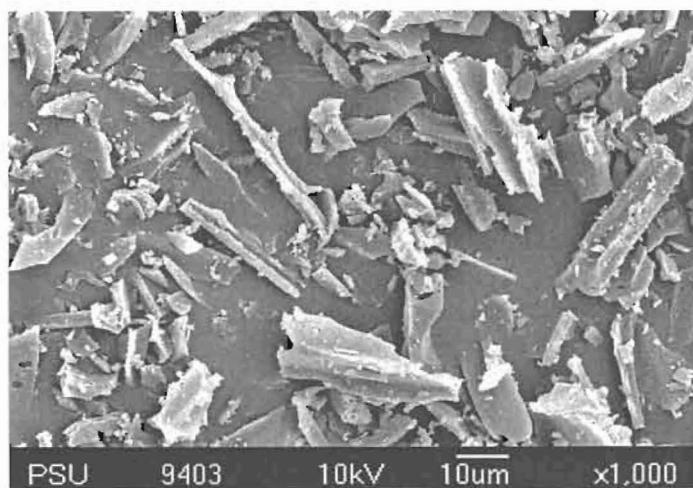
ลำดับที่	สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)
1	Al_2O_3	0.42
2	SiO_2	0.82
3	CaO	0.24
4	TiO_2	56.22
5	Cr_2O_3	0.20
6	MnO_2	4.32
7	Fe_2O_3	37.31
8	Nb_2O_5	0.47



รูปที่ 2.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ จาก บริษัท Riedel-de Haen



รูปที่ 2.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงเหล็กออกไซด์ จากบริษัท Riedel-de Haen

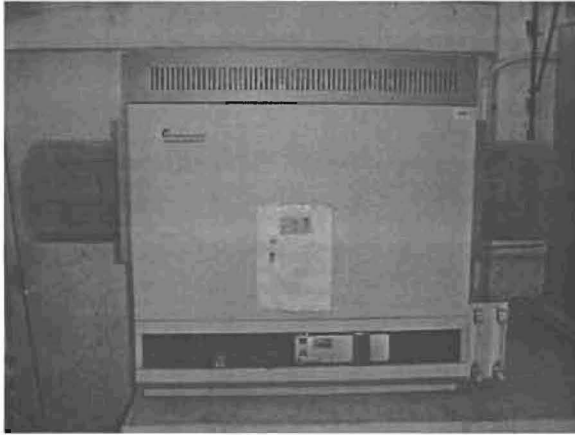


รูปที่ 2.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของผงคาร์บอน (Activated Charcoal LR)
จากบริษัท Laboratory Rasayan

กระบวนการชะละลายมีการใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นหลักในการชะละลาย โดยใช้ไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37% จากบริษัท Merch และนำไปล้างกรดโดยผ่านกระดาษกรองยี่ห้อ Whatman เบอร์ 5 และกรวยกรอง

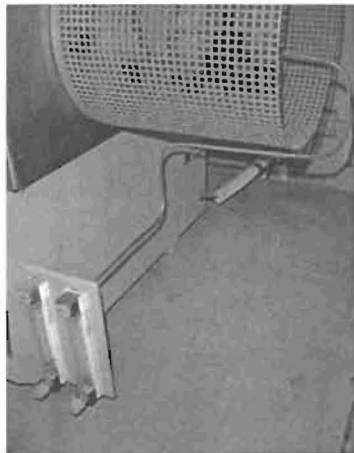
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Tube Furnace, CARBOLITE, CTF 18/75/600)



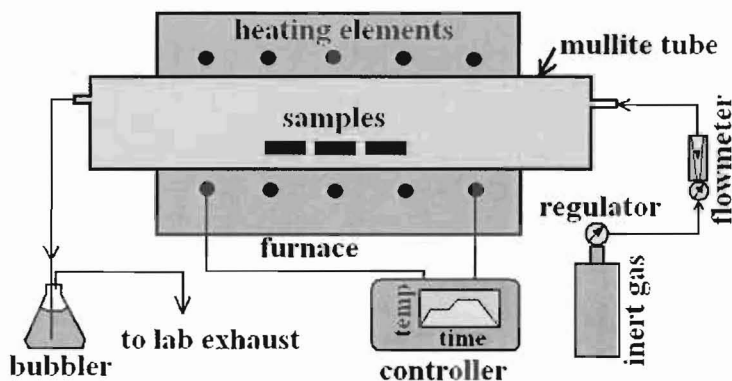
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะเตาเผาอุณหภูมิสูง

ซึ่งได้ติดตั้งท่อก๊าซที่ใช้สำหรับควบคุมบรรยากาศภายในเตาเพิ่มเติมเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการติดตั้งท่อก๊าซที่ใช้สำหรับควบคุมบรรยากาศภายในเตา

ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการเผาชิ้นงาน โดยการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไป เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะก๊าซอาร์กอน โดยจะมีตัวควบคุม/ปรับอุณหภูมิภายในเตาให้เป็นไปตามที่ตั้งไว้ ดังรูปที่ 2.7

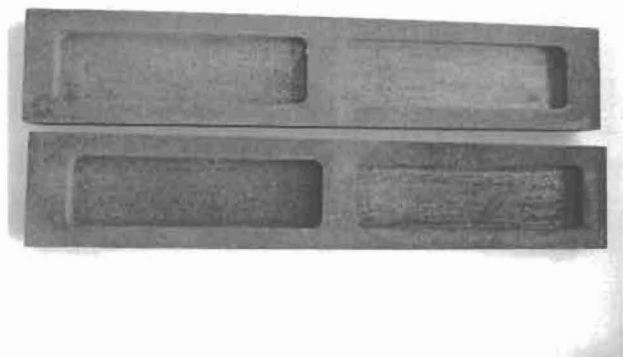


รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการเผาชิ้นงาน (Niyomwas, S. (2005))

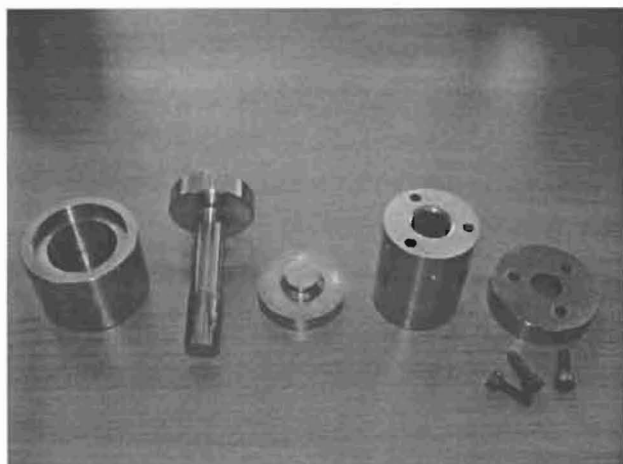
เครื่องบดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Planetary Ball Mill แสดงดังรูปที่ 2.8 และอุปกรณ์และเครื่องมืออื่นๆที่ใช้ประกอบการวิจัย แสดงดังรูปที่ 2.9-2.13



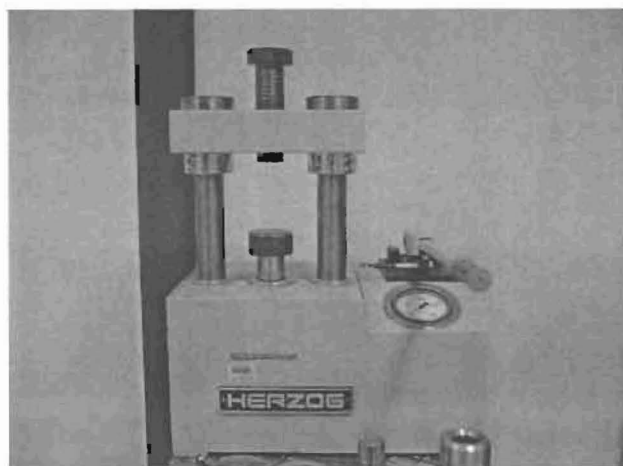
รูปที่ 2.8 เครื่องบดตัวอย่าง Planetary Ball Mill ยี่ห้อ Retsch รุ่น PM100/200



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะเบ้าแกรไฟต์ขนาด $5.5 \times 30 \times 2$ ซม.



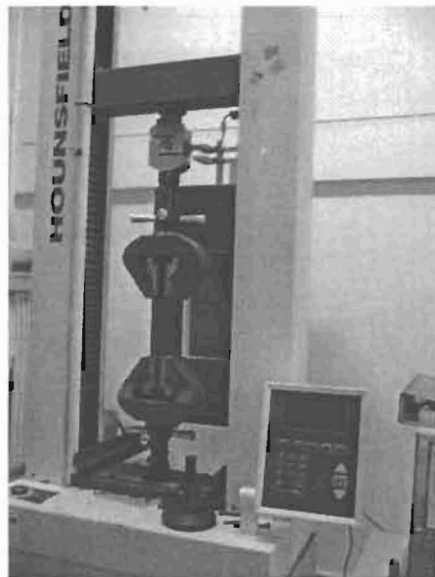
รูปที่ 2.10 แสดงเบ้าอัดขึ้นรูปชิ้นตัวอย่าง ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม.



รูปที่ 2.11 แสดงเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ยี่ห้อ Herzog



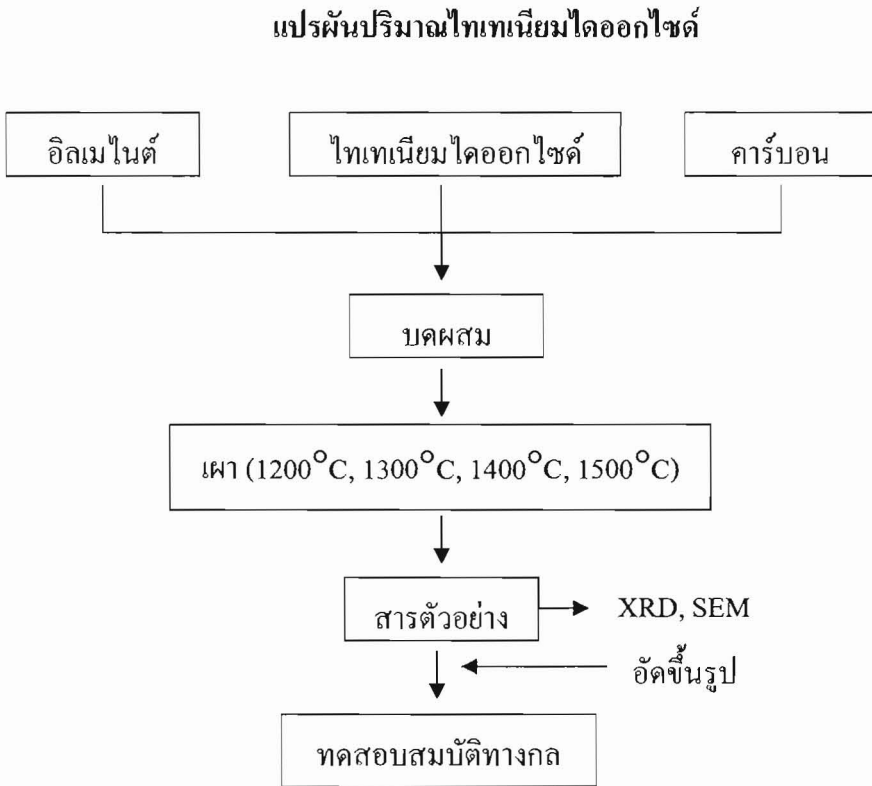
รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ รุ่น(Model): FR-3e



รูปที่ 2.13 แสดงเครื่องทดสอบแรงกด Hounsfield Model H100KS, Serial No. 0068

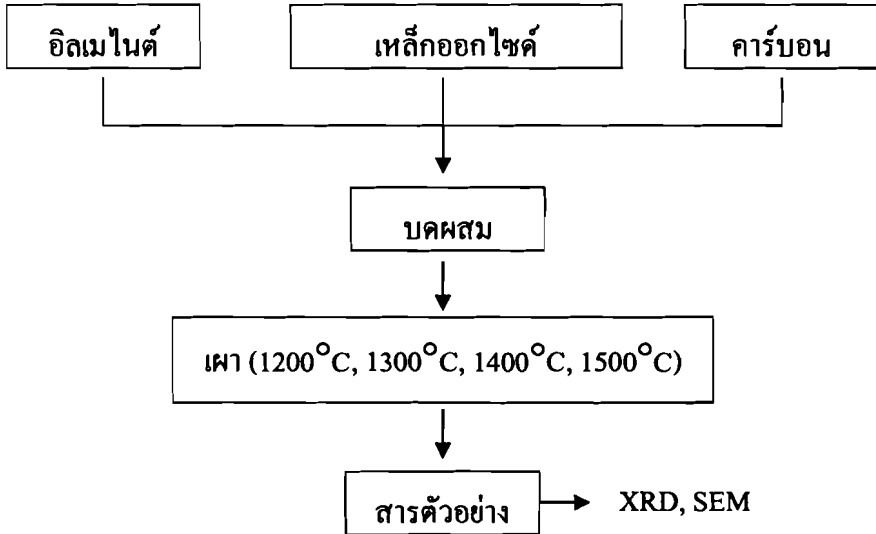
2.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

แผนผังขั้นตอนในการวิจัย โดยจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และแปรผันเหล็กออกไซด์ ในวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14-2.15



รูปที่ 2.14 แสดงแผนผังขั้นตอนการวิจัยในกรณีแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์



รูปที่ 2.15 แสดงแผนผังขั้นตอนการวิจัยในกรณีแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์

ในส่วนของการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบ่งเป็น 2 กรณีศึกษาคือ ศึกษาการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ที่มีผลต่อวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

2.3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์เคราะห์เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

2.3.1.1 การแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

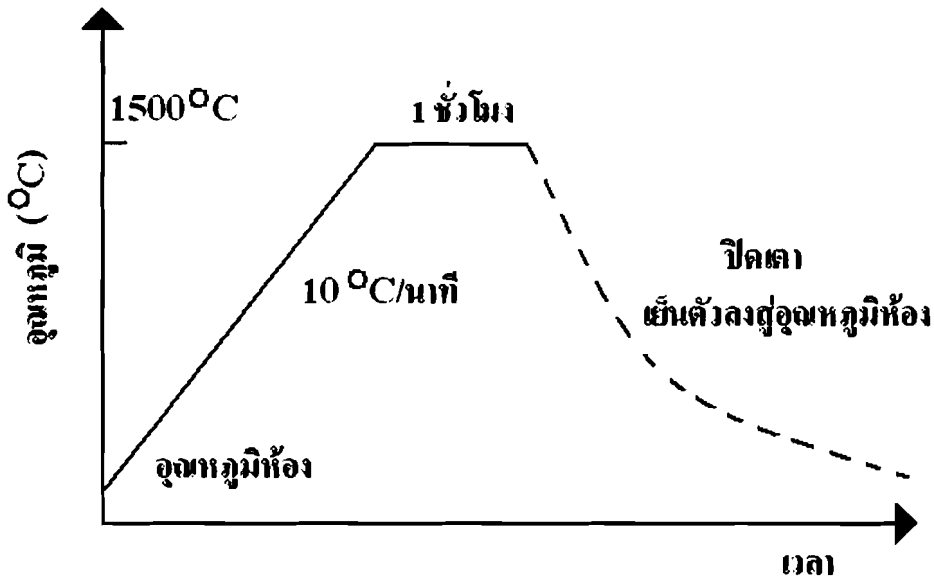
ทำการเผา อิลเมไนต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์และคาร์บอนที่บดเตรียมไว้ในสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ที่อุณหภูมิ 1500°C โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องด้วยอัตรา 10°C ต่อนาที ตามอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิดังรูป 2.16 และด้วยอัตราการไหลผ่านของก๊าซอาร์กอน 3 ลิตรต่อนาที สำหรับการเผาในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน

ตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของสารตั้งต้น

การทดลอง	สัดส่วน (mole)			
	FeTiO ₃	C	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
FnTC 1	1	4	0	0
FnTC 2	1	7	1	0
FnTC 3	1	10	2	0
FnTC 4	1	13	3	0
FnTC 5	1	16	4	0
FnTC 6	1	19	5	0
nFTC 1	1	7	0	1
nFTC 2	1	10	0	2
nFTC 3	1	13	0	3
nFTC 4	1	16	0	4
nFTC 5	1	19	0	5
nFTC 6	1	22	0	6

2.3.1.1 การแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์

ทำการเผาผง อิลเมไนด์ เหล็กออกไซด์และคาร์บอนที่บดเตรียมไว้ในสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ที่อุณหภูมิ 1500°C โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องด้วยอัตรา 10°C ต่อนาที ตามอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิดังรูป 2.16 และด้วยอัตราการไหลผ่านของก๊าซอาร์กอน 3 ลิตรต่อ นาที สำหรับการเผาในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน



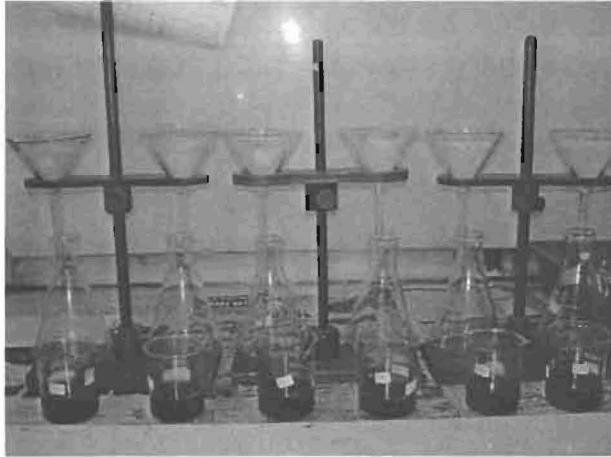
รูปที่ 2.16 ภาพแสดงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกับช่วงเวลาในการเผา

2.3.2 ขั้นตอนการ ชะละลาย

1. นำผงเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีข้างต้น มาทำการ ชะละลาย เอาเนื้อเหล็กออก โดยแช่ ในสารละลาย 10% HCl ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็น เวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.17
2. ทำการกรองสารละลายที่ได้ และนำสารที่ค้างอยู่บนกระดาษกรอง ทำการล้างกรด ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ นำไปอบให้แห้ง
3. นำตัวอย่างที่ค้างกระดาษกรอง ส่งวิเคราะห์สารประกอบด้วยเครื่อง XRD และ ดูโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM



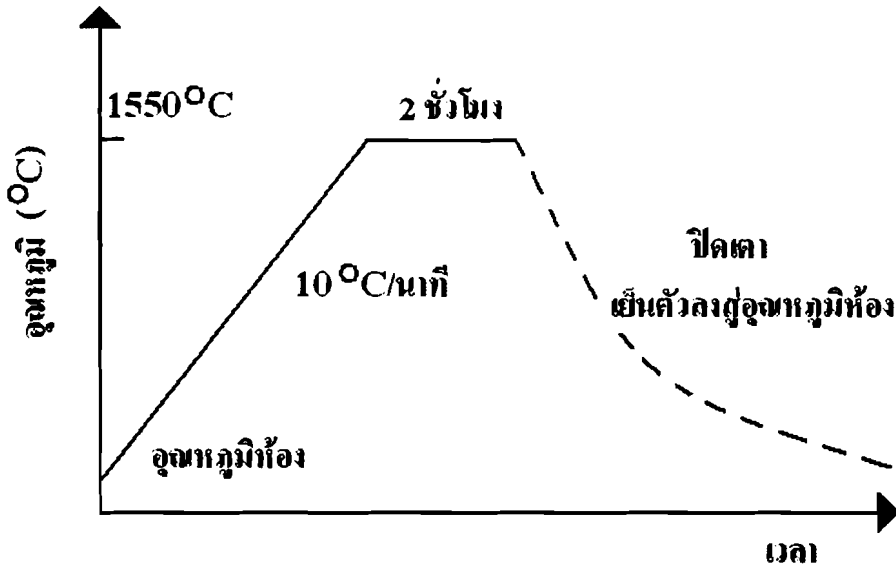
รูปที่ 2.17 แสดงกระบวนการแช่กรด



รูปที่ 2.18 แสดงกระบวนการล้างกรด

2.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

นำผงเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 1550°C พักไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องตามอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิดังรูปที่ 2.19 เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป



รูปที่ 2.19 แสดงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกับช่วงเวลาในการอบผึ่ง

2.3.4 การทดสอบสมบัติทางกล

2.3.4.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกด

การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกด โดยการทดสอบด้วยเครื่อง HOUNFIELD TEST EQUIPMENT Model H100KS, Serial No. 0068 ตัวอย่างชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความเร็วในการกดเท่ากับ 1.14 มม./วินาที ใช้โปรแกรม Qmat ในการบันทึกข้อมูล ได้ค่า แรงกด (Force) และค่าระยะยืด (Extension) จากนั้นจึงนำไปแปลงเป็นค่า ความแข็งแรงในการกด (Compressive Strength) เพื่อพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างจำนวนโมลของสารที่เติมลงไปกับค่าความแข็งแรงในการกด

2.3.4.2 การทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็งของวัสดุผสมเหล็ก โทเทเนียมคาร์ไบด์ ใช้วิธีการวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์ ยี่ห้อ Hollywood รุ่น FR-3e โดยใช้น้ำหนักกด 60 kilos. สเกล A

บทที่ 3

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

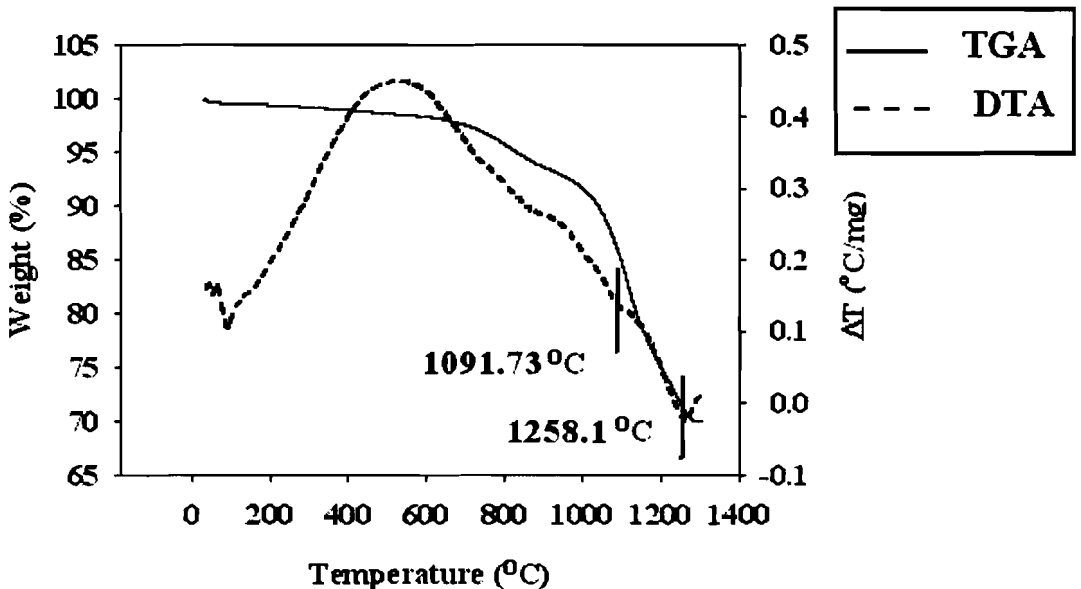
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลจากการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ผลที่ได้จากการแปรผันปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ และ ผลที่ได้จากการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ โดยสัดส่วนของสารตั้งต้นในการทดลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ผลกระทบของอุณหภูมิการสังเคราะห์ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์

ทำการวิเคราะห์ผงตัวอย่าง $\text{FeTiO}_3 + 4\text{C}$ ด้วย DTA, TGA เพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยา ว่าเป็นเช่นเดียวกับทางทฤษฎีหรือไม่ ผลที่ได้จะแสดงดังรูปกราฟที่ 3.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่หายไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิเมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 900°C สันนิษฐานว่าน่าจะเกิดการสลายพันธะของฮีมาไนต์เกิดเป็นเหล็กออกไซด์และไทเทเนียมออกไซด์ และที่อุณหภูมิประมาณ 1091.73°C เหล็กออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยคาร์บอนได้เป็นเหล็กออกมา ส่วนที่อุณหภูมิประมาณ 1258.1°C ไทเทเนียมไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนซึ่งอาจทำให้เกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ขึ้นมาได้ที่อุณหภูมินี้



รูปที่ 3.1 กราฟ DTA และ TGA ของ $\text{FeTiO}_3 + 4\text{C}$

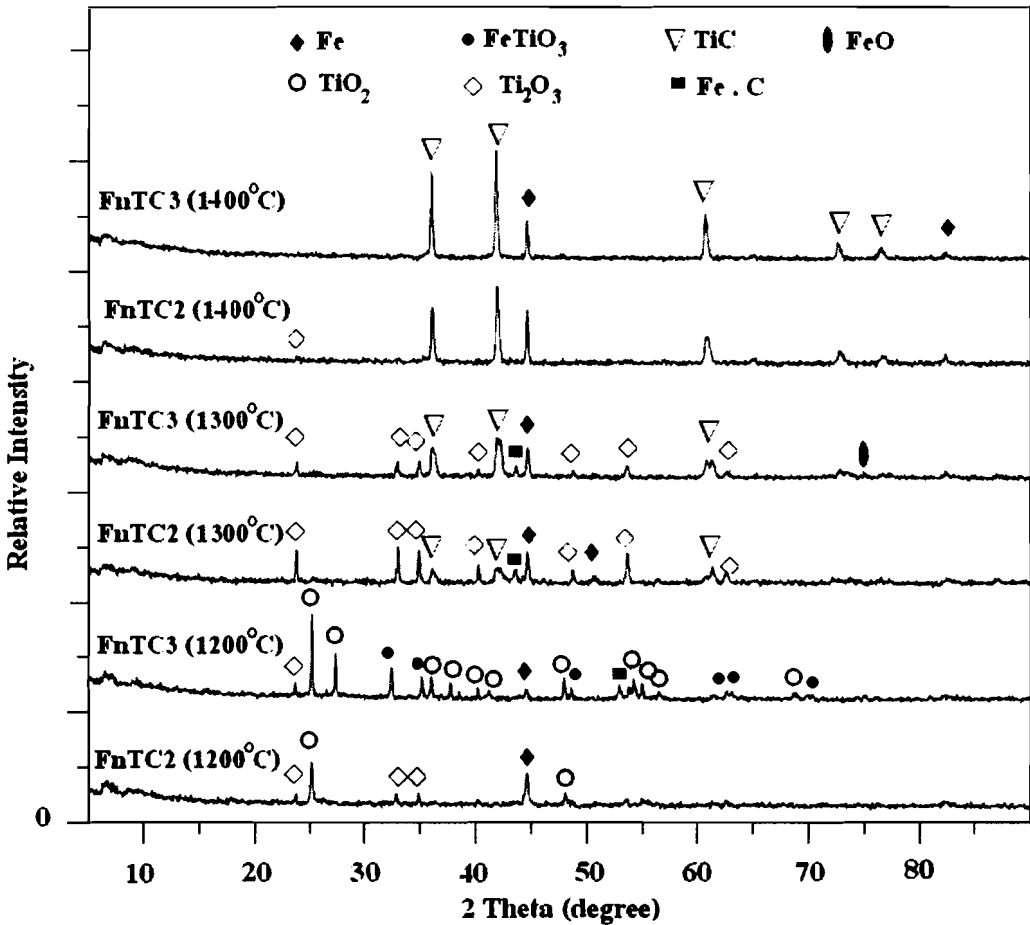
3.1.1 ผลจากการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสังเคราะห์วัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ทำการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1200 1300 1400 และ 1500 °C และวิเคราะห์ ด้วย XRD ได้ผลดังรูปที่ 3.2 เป็นผลที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1200 °C และ 1300 °C พบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เกิดอินเตอร์มีเดียลเฟสขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังจะเห็นได้จาก

ในกรณีที่มีการแปรผันตัวเดิม ที่อุณหภูมิ 1200 °C ในการทดลองที่ 2 (เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป 1 โมล) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และ เหล็ก และในการทดลองที่ 3 (เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป 2 โมล) พบว่าเฟสของเหล็กจะมีสัดส่วนลดลงและจะปรากฏเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เห็นมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในการทดลองที่ 3 มีเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่มากกว่าการทดลองที่ 2 จึงปรากฏให้เห็นได้ชัดเจนมากกว่าซึ่งเป็นเฟสของสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 1300 °C ในการทดลองที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของ เหล็ก ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และไทเทเนียมคาร์ไบด์ และในการทดลองที่ 3 จะปรากฏเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ชัดเจนขึ้นเนื่องจากสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปเป็นสารตั้งต้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นการเกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์จึงมีมากขึ้นเช่นกัน ที่อุณหภูมิ 1400 °C ในการทดลองที่ 2 และ 3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของ เหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ แต่จะพบว่าในการทดลองที่ 3 จะปรากฏเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ชัดเจนกว่าการทดลองที่ 2 เนื่องมาจากสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปเป็นสารตั้งต้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นการเกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์จึงมีมากขึ้นเช่นกัน

ในกรณีที่มีการแปรผันอุณหภูมิ ในการทดลองที่ 2 (เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป 1 โมล) ที่อุณหภูมิ 1200 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของเหล็ก ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมคาร์ไบด์ และยังไม่มีเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ปรากฏขึ้นมาให้เห็น ที่อุณหภูมิ 1300 °C พบเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์เกิดขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมินี้สูงพอที่จะทำให้มีพลังงานมากพอทำให้เกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ขึ้นมาได้ และที่อุณหภูมิ 1400 °C ปรากฏแต่เฉพาะเฟสของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ เนื่องจากอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์มีความสมบูรณ์ ในการทดลองที่ 3 (เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป 2 โมล) ที่อุณหภูมิ 1200 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของ เหล็ก ไทเทเนียมไดออกไซด์ และอิลเมไนด์ซึ่งได้มาจากสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 1300 °C พบว่ามีไทเทเนียมคาร์ไบด์ออกมาเป็นจำนวนหนึ่ง เนื่องจากที่อุณหภูมินี้สูงพอที่จะทำให้มีพลังงานมากพอทำให้เกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ขึ้นมาได้ และเฟสที่เป็นสารตั้งต้นของระบบก็จะค่อยๆ ลดลงไป และที่อุณหภูมิ 1400 °C ปรากฏแต่เฉพาะเฟสของ

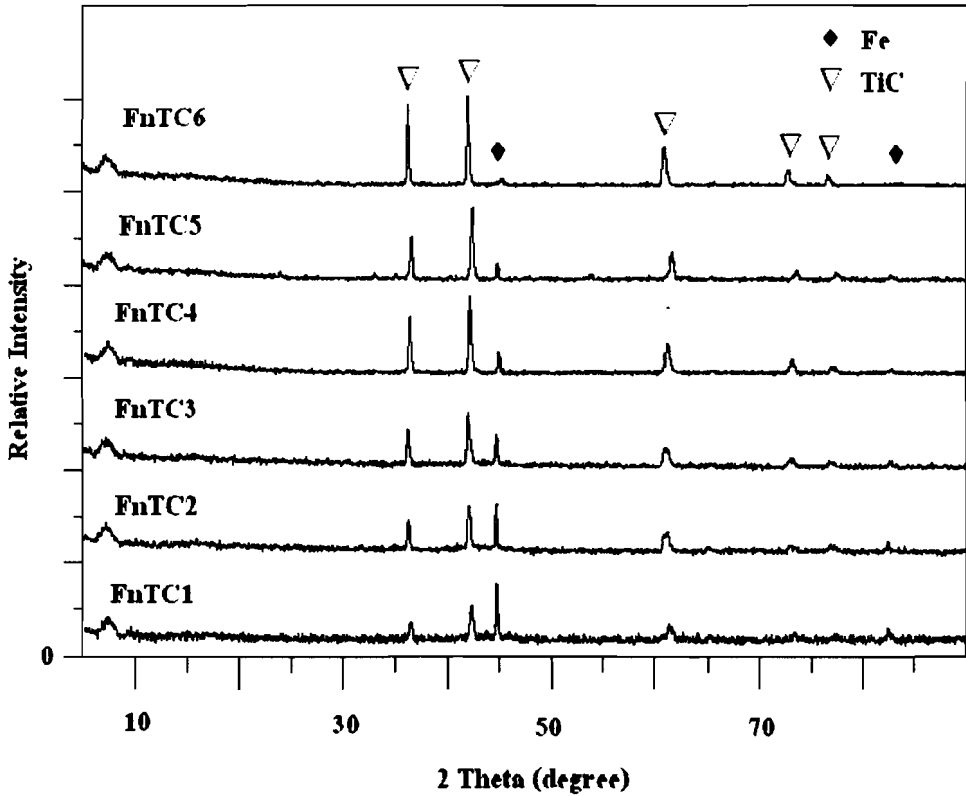
เหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งจะมีอินเตอร์มีเดียที่อยู่เป็นสัดส่วนน้อยมาก เนื่องจากอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์และค่อนข้างมีความสมบูรณ์ ซึ่งเป็นไปตามกราฟความสมดุลของส่วนผสมภายในระบบดังแสดงในรูปที่ 1.5-1.10



รูปที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1200 1300 และ 1400°C

เมื่อคาร์บอนทำปฏิกิริยากับ อิลเมไนต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์และคาร์บอน จึงจะเกิดปฏิกิริยาการลดรูปไปเป็น เหล็ก และไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1500°C ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยวิธี XRD ดังแสดงในรูปที่ 3.3 พบว่าในทุกอัตราส่วนเชิงโมลของสารตั้งต้น FeTiO₃/TiO₂/C ปฏิกิริยาเกิดโดยสมบูรณ์และให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอนุภาควัสดุผสมเหล็ก ไทเทเนียมคาร์ไบด์ จากการวิเคราะห์ ทางอุณหพลศาสตร์ สามารถอธิบายได้ว่าอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่ก่อรูปขึ้นจะมีความเสถียรสูงที่อุณหภูมิ 1500°C ในขณะที่เดียวกันที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ เหล็กอยู่ในสภาวะหลอมละลาย เมื่อผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง สู่อุณหภูมิห้อง เหล็กที่หลอมละลายก็จะทำหน้าที่

เสมือนตัวประสานให้กับอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์และเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1500°C

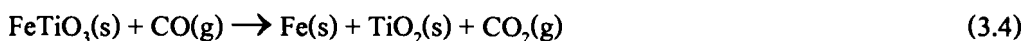
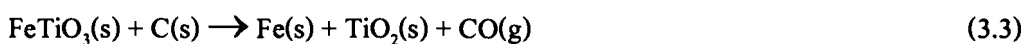
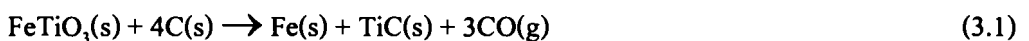
เมื่อทำการสังเคราะห์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200°C พบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ผลของ XRD แสดงให้เห็นว่ามีเฟสของอิตเมไนต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เหล็ก และ อินเดอรัมมีเดียทเฟสเกิดขึ้นมาที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 1300°C ปฏิกิริยาก็ยังเกิดไม่สมบูรณ์เช่นกันทำให้เกิดเฟสของเหล็ก ไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นมาและกลุ่มเฟสที่เป็นสารตั้งต้นจะเริ่มหายไป และอินเดอรัมมีเดียทเฟสก็ยังมีปรากฏขึ้นมาอีกเป็นบางส่วน ที่อุณหภูมิ 1400°C ปฏิกิริยาเริ่มมีความสมบูรณ์ทำให้เกิดเฉพาะเฟสของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ และจะมีอินเดอรัมมีเดียทเฟสอยู่บ้างแต่ปรากฏไม่ชัดเจน และที่อุณหภูมิ 1500°C พบว่าการทำปฏิกิริยากันมีความสมบูรณ์ทำให้เกิดเฉพาะเฟสของ เหล็ก และไทเทเนียมคาร์ไบด์เท่านั้นที่เหลือเป็นเฟสเสถียรภายในระบบ โดยที่ไม่มีเฟสของสารอื่นมาเจือปน จึงแสดงว่าที่อุณหภูมินี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

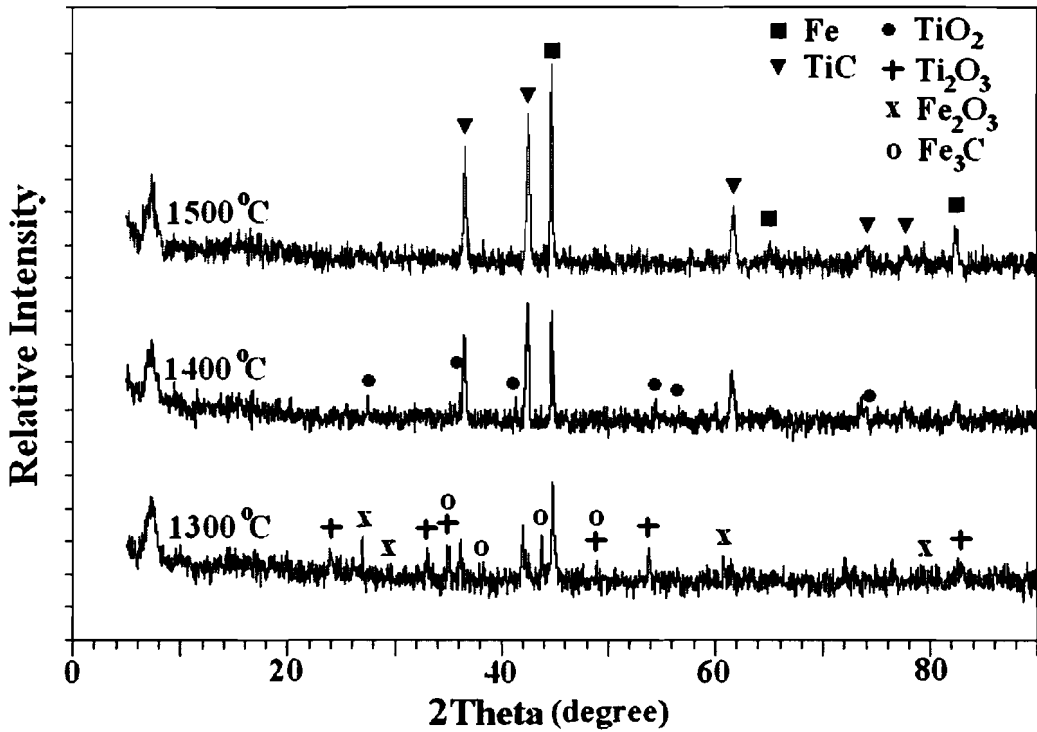
ตารางที่ 3.1 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์)

TiO ₂ (mole)	Product phases 1200°C	Product phases 1300°C	Product phases 1400°C	Product phases 1500°C
0	-	-	-	Fe, TiC
1	Fe, Ti ₂ O ₃ , TiO ₂	Fe, TiC, Ti ₂ O ₃ , (Fe,C)	Fe, TiC	Fe, TiC
2	FeTiO ₃ , TiO ₂ , Fe	Fe, TiC, Ti ₂ O ₃ , (Fe,C), FeO	Fe, TiC	Fe, TiC
3	-	-	-	Fe, TiC
4	-	-	-	Fe, TiC
5	-	-	-	Fe, TiC

สาเหตุของปรากฏการณ์นี้อาจสามารถอธิบายได้จากขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ประมาณ 500 – 1000°C อิลเมนไนต์ แดกตัวด้วยความร้อนและถูกลดรูปด้วยคาร์บอน จาก ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 3.2 ถึง 3.4 ที่อุณหภูมิ 1300°C TiO₂ ทำปฏิกิริยากับ CO เพื่อก่อรูปเป็น ออกไซด์ที่ซับซ้อนมากขึ้นคือ Ti₂O₃ (ปฏิกิริยาที่ 3.6) ซึ่งต่อมากจะถูกลดรูปด้วยคาร์บอน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400°C เพื่อก่อรูปเป็น TiC (ปฏิกิริยาที่ 3.7) และในขณะเดียวกันที่ 1400°C TiO₂ บางส่วนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเพื่อก่อรูปเป็น TiC (ปฏิกิริยาที่ 3.8) และเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ที่ 1500°C

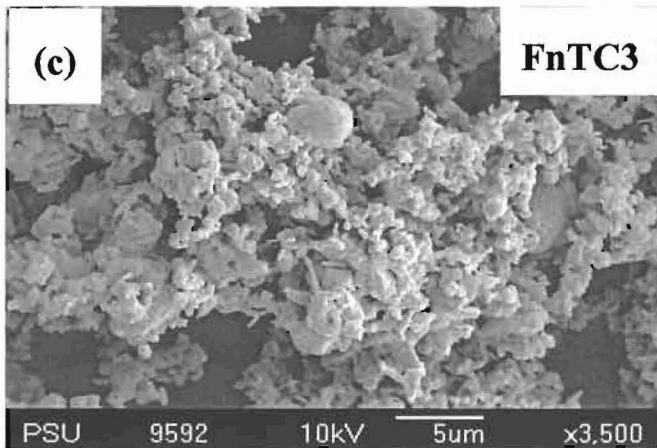
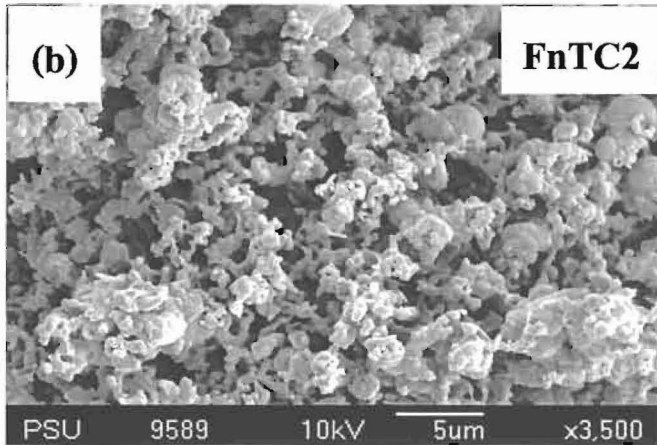
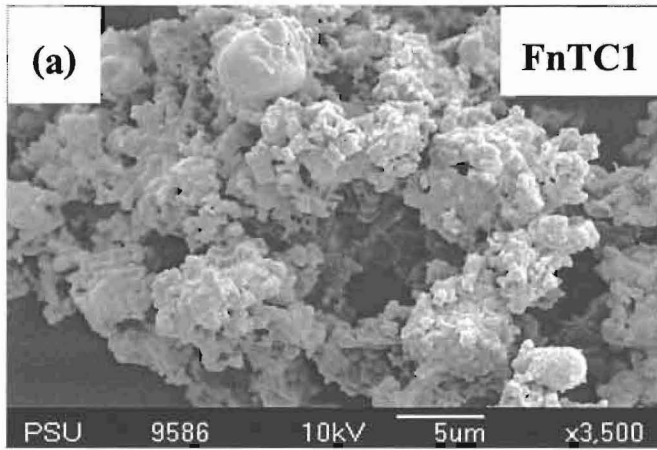
คำอธิบายเหล่านี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับการศึกษาทางอุณหพลศาสตร์และสารประกอบที่วิเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ โดยวิธี XRD ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับรายละเอียดขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการลดรูปอาจเขียนได้ดังนี้



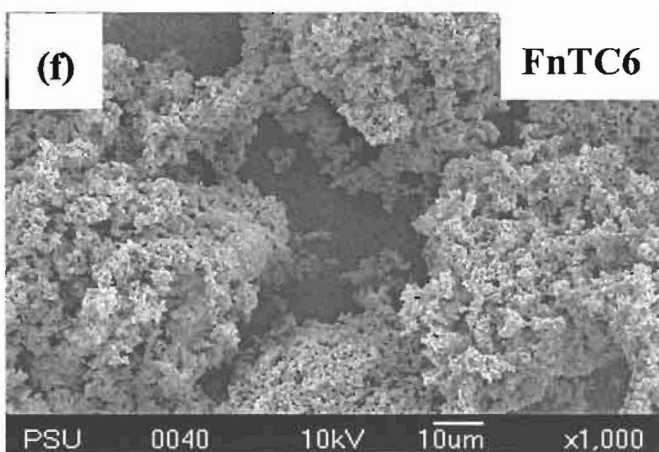
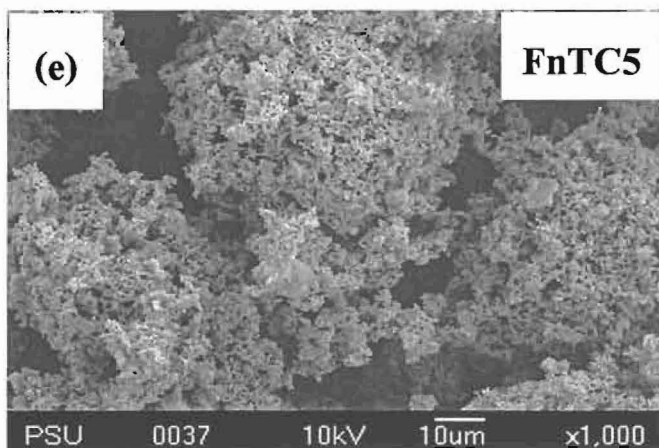
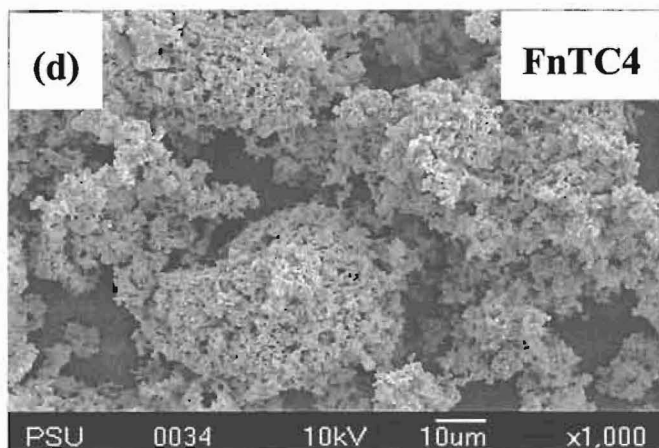


รูปที่ 3.4 ผลวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์
ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 1300-1500 °C

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการสังเคราะห์โดยวิธีคาร์โบเทอมอลรีดิกชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะได้ผงตัวอย่างในลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีพื้นผิวที่ขรุขระจากการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีการยึดเกาะกันของอนุภาค

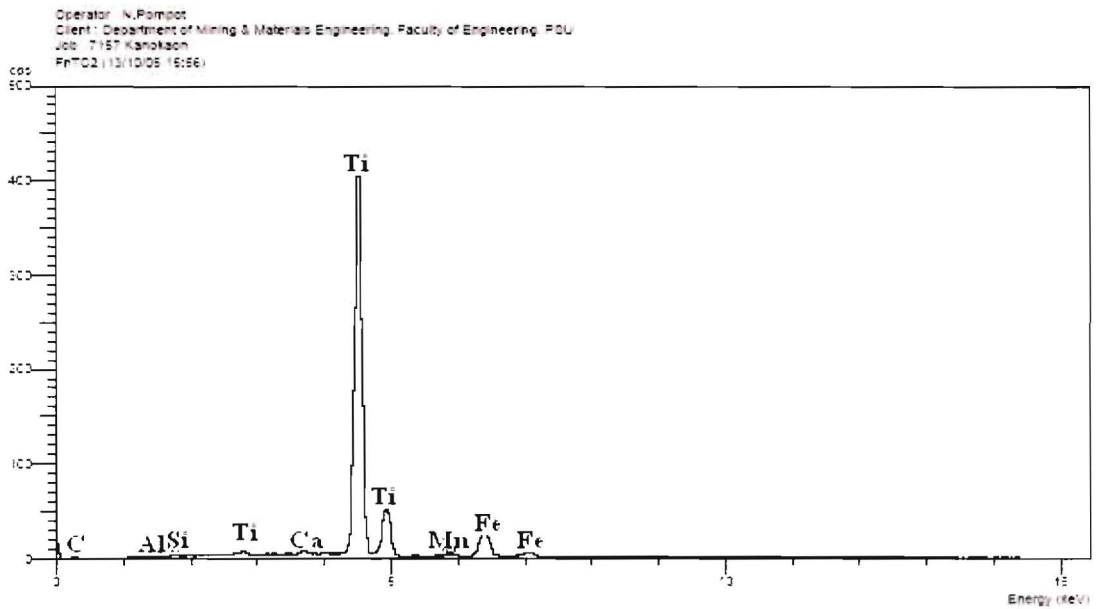


รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) FnTC1 (b) FnTC2 (c) FnTC3
(d) FnTC4 (e) FnTC5 และ (f) FnTC6

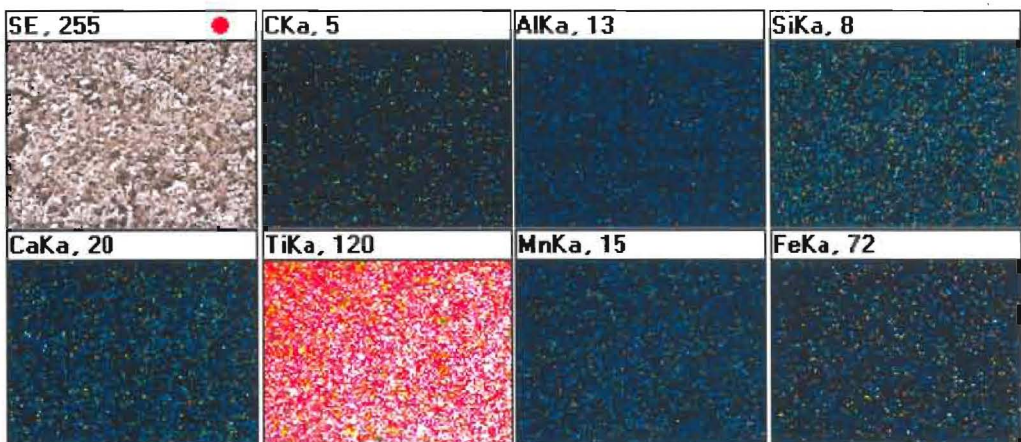


รูปที่ 3.5 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) FnTC1 (b) FnTC2 (c) FnTC3 (d) FnTC4 (e) FnTC5 และ (f) FnTC6

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของชนิดธาตุใน โครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี X-ray mapping ดังแสดงในรูปที่ 3.6-3.7 จากตัวอย่างการทดลอง FnTC2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray mapping จะแสดงถึงการกระจายตัวของชนิดธาตุแต่ละธาตุที่อยู่ใน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ พบว่าเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน ปริมาณเล็กน้อยของธาตุสังกะสีได้จากความเข้มของภาพ ในที่นี้สีขาวหมายถึงปริมาณธาตุมีความเข้มมากในบริเวณนั้น สีดำหมายถึงไม่มีธาตุในบริเวณนั้นเลย โดยเทียบกับตำแหน่งของเฟสต่างๆซึ่งปรากฏในภาพถ่าย SEM



รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์



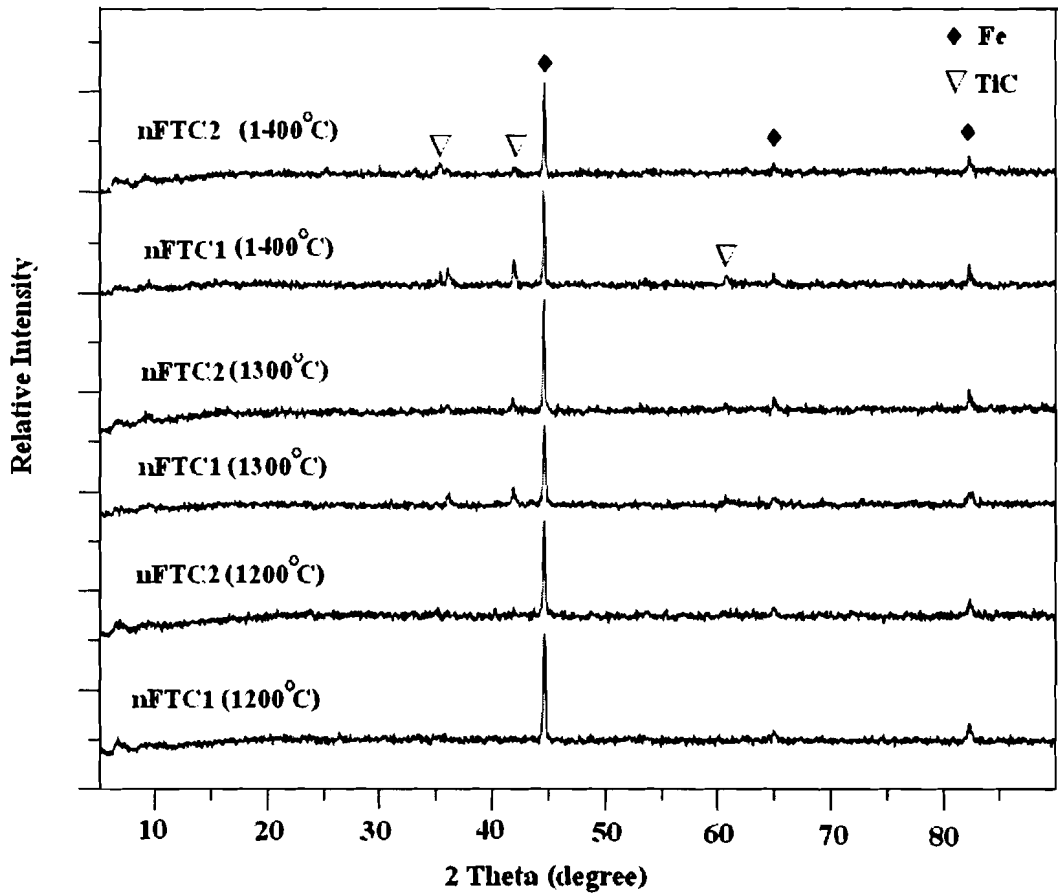
รูปที่ 3.7 ภาพ X-ray mapping ของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้

3.1.2 ผลจากการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ทำการสังเคราะห์เหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1200 1300 1400 และ 1500°C ทำการส่งวิเคราะห์ XRD ได้ผลดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 พบว่าที่ 1200°C และ 1300°C ปฏิกริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เกิดอินเตอร์มีเดียเฟสขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังจะเห็นได้จาก

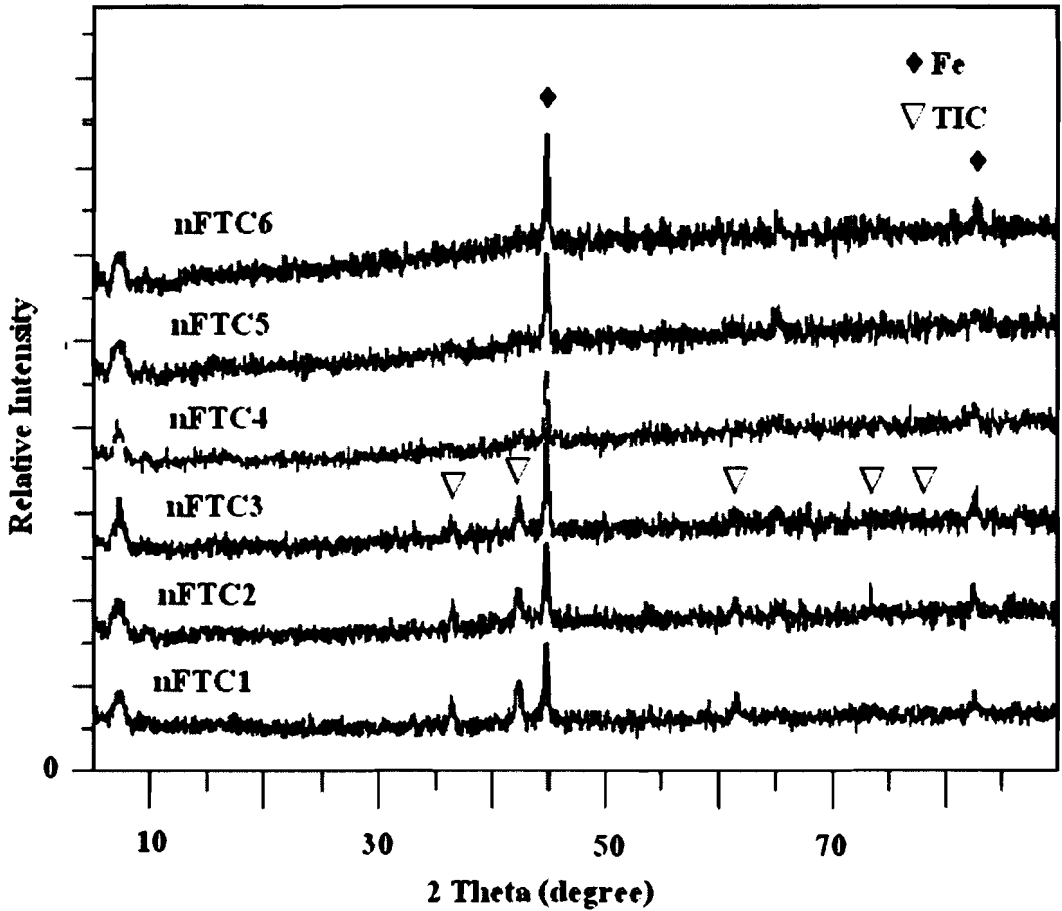
ในกรณีที่มีการแปรผันตัวเดิม ที่อุณหภูมิ 1200°C ในการทดลองที่ 1 (เดิมเหล็กออกไซด์ลงไป 1 โมล) และในการทดลองที่ 2 (เดิมเหล็กออกไซด์ลงไป 2 โมล) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของเหล็ก ที่อุณหภูมิ 1300°C ในการทดลองที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของ เหล็ก และมีเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ปรากฏขึ้นมาให้เห็นเป็นบางส่วน ส่วนในการทดลองที่ 2 จะปรากฏเฟสของเหล็กชัดเจนขึ้นเนื่องจากสัดส่วนของเหล็กออกไซด์ที่เดิมลงไปเป็นสารตั้งต้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ปรากฏให้เห็นชัดเจนน้อยกว่าเดิม เนื่องจากสัดส่วนของสารตั้งต้นที่จะทำให้เกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์มีน้อยลงเมื่อเทียบกับสัดส่วนของเหล็กที่มีเพิ่มสูงขึ้น และเป็นไปในลักษณะเดียวกันที่อุณหภูมิ 1400°C

ในกรณีที่มีการแปรผันอุณหภูมิ ในการทดลองที่ 1 (เดิมเหล็กออกไซด์ลงไป 1 โมล) ที่อุณหภูมิ 1200°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของเหล็ก และยังไม่มีการเกิดของไทเทเนียมคาร์ไบด์ปรากฏขึ้นมาให้เห็น ที่อุณหภูมิ 1300°C พบเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นบางส่วน เนื่องจากที่อุณหภูมินี้สูงพอที่จะทำให้มีพลังงานมากพอทำให้เกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ขึ้นมาได้ และที่อุณหภูมิ 1400°C จะปรากฏเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ให้เห็นได้ชัดเจนมากขึ้นกว่าเดิม ในการทดลองที่ 2 (เดิมเหล็กออกไซด์ลงไป 2 โมล) ที่อุณหภูมิ 1200°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาอยู่ในรูปของ เหล็ก ที่อุณหภูมิ 1300°C พบว่ามีไทเทเนียมคาร์ไบด์ออกมาเป็นจำนวนหนึ่ง เนื่องจากที่อุณหภูมินี้สูงพอที่จะทำให้มีพลังงานมากพอทำให้เกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ขึ้นมาได้ และที่อุณหภูมิ 1400°C จะปรากฏเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ให้เห็นได้ชัดเจนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 1.11 – 1.16



รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1200 1300 และ 1400°C

ที่อุณหภูมิ 1500°C ปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD มีพีคของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ชัดเจนกว่าในการทดลองที่ 1-3 และในการทดลองที่ 4-6 จะมีแค่เฟสของเหล็กเท่านั้นเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณสารตั้งต้น คือ อิมเมไนต์ที่จะทำให้เกิดเป็นเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์นั้นมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับแบคกราวนด์ฟีก ซึ่งอาจมีบางส่วน โคนบั้งทำให้ไม่พบเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ แต่จะพบได้ว่าความจริงแล้วยังมีไทเทเนียมคาร์ไบด์เหลืออยู่ โดยพิสูจน์ได้จากไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เหลืออยู่ภายหลังทำการชะละลาย ดังแสดงในตารางที่ 3.4



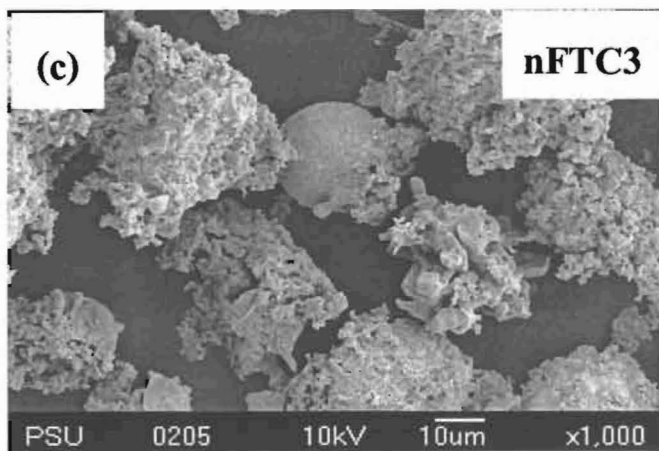
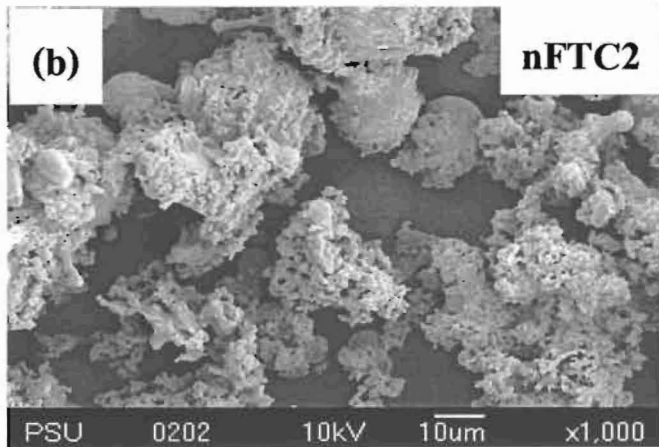
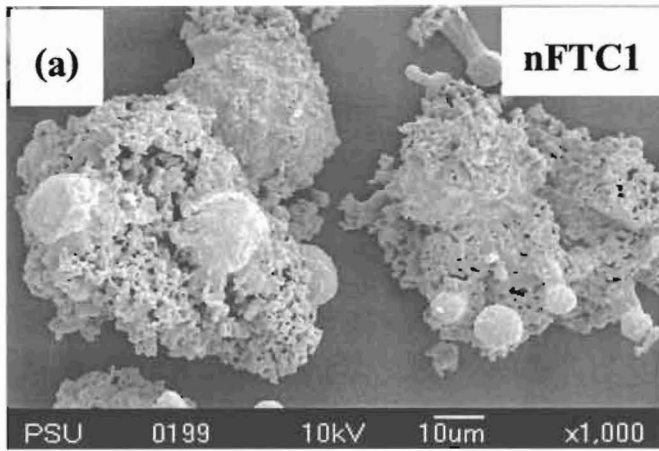
รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ที่ 1500°C

เมื่อทำการสังเคราะห์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200°C เฟสที่ได้จะมีเฉพาะเฟสของเหล็กเกิดขึ้น ซึ่งจะไม่พบเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นเลย เป็นเพราะที่อุณหภูมินี้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดเฟสของไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1300° และ 1400° พบเฟสของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นแต่ลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นใน XRD ค่อนข้างเจนนานัก และที่อุณหภูมิ 1500°C ปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD มีพีคของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ชัดเจนกว่าในการทดลองที่ 1-3 และในการทดลองที่ 4-6 จะมีแค่เฟสของเหล็กเกิดขึ้นเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3.2

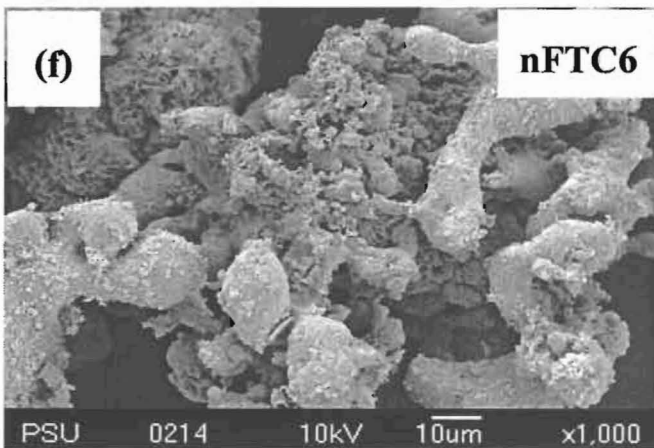
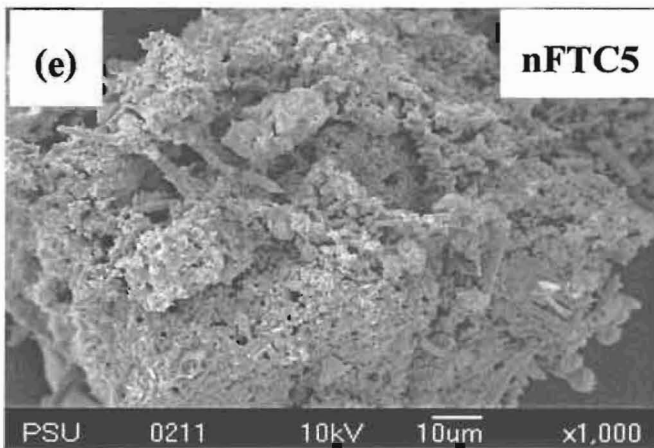
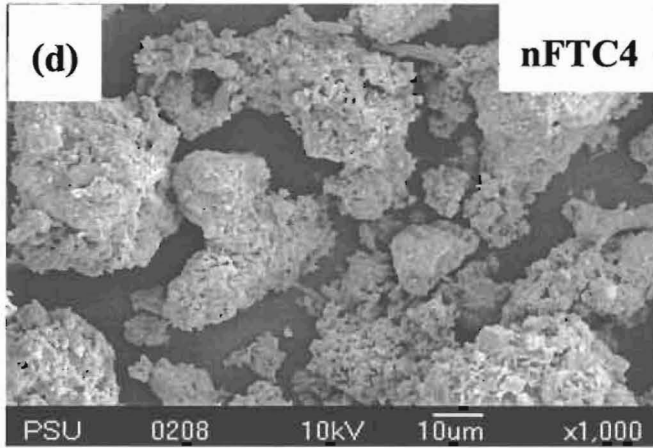
ตารางที่ 3.2 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์)

Fe₂O₃(mole)	Product phases 1200°C	Product phases 1300°C	Product phases 1400°C	Product phases 1500°C
1	Fe	Fe, TiC	Fe, TiC	Fe, TiC
2	Fe	Fe, TiC	Fe, TiC	Fe, TiC
3	-	-		Fe, TiC
4	-	-		Fe
5	-	-		Fe
6	-	-		Fe

ภาพถ่าย โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์โดยการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีคาร์โบเทอมอลรีดิกชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 พบว่าอนุภาคผงตัวอย่างมีลักษณะเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนและมีก้อนกลมเล็กๆ กระจายอยู่ ซึ่งคาดว่าก้อนกลมเล็กๆ นี้จะเป็นอนุภาคของเหล็กที่เกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนและยึดต่อกับอนุภาคของไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนมีลักษณะเหมือนแขน เกาะเกี่ยวและจับยึดต่อเนื่องกันไป

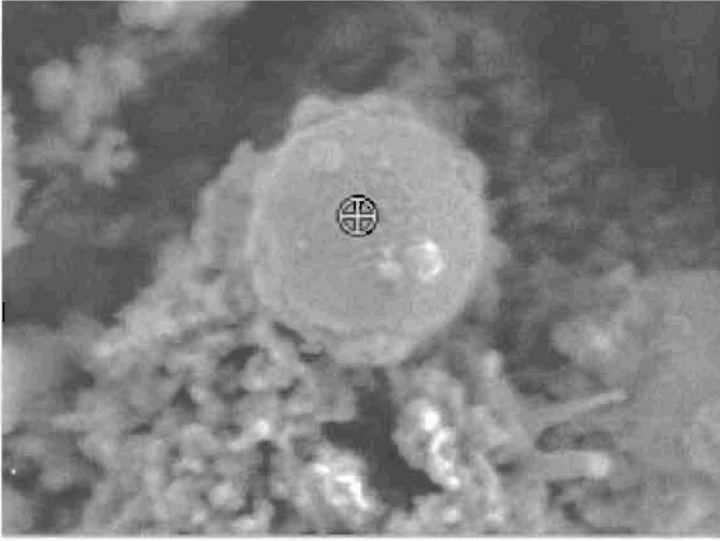


รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) nFTC1 (b) nFTC2 (c) nFTC3
(d) nFTC4 (e) nFTC5 และ (f) nFTC6

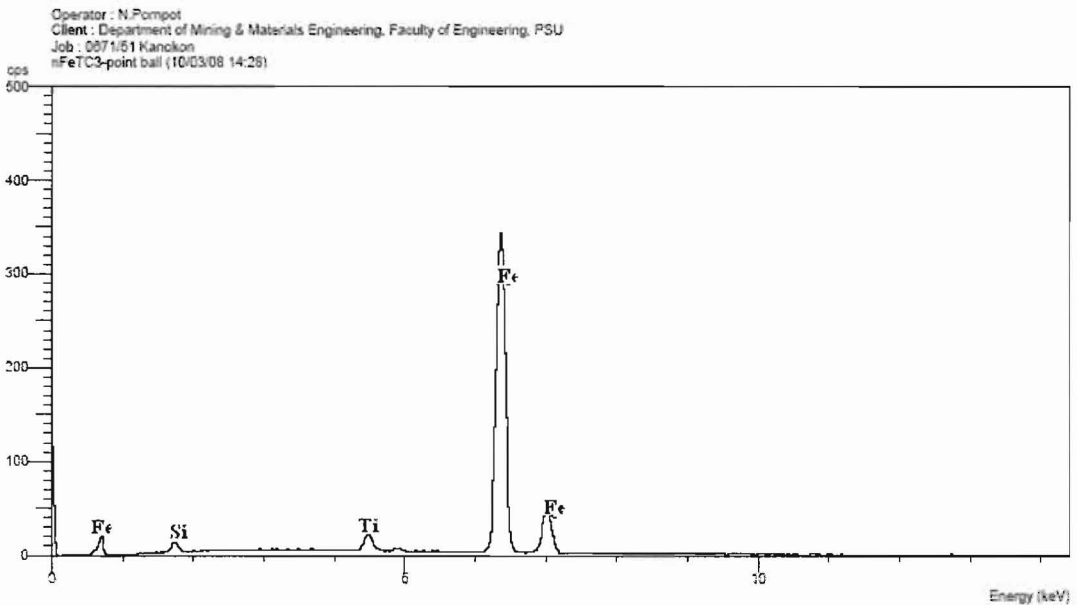


รูปที่ 3.10 (ต่อ) ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (a) nFTC1 (b) nFTC2 (c) nFTC3
(d) nFTC4 (e) nFTC5 และ (f) nFTC6

ภายหลังการทำ Point Scan ที่บริเวณที่เป็นเม็ดกลมของผลิตภัณฑ์เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าเม็ดกลมที่เกิดขึ้นนี้เป็นเม็ดของเหล็ก ซึ่งเกิดการหลอมตัวเป็นก้อนกลมที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.11-3.12

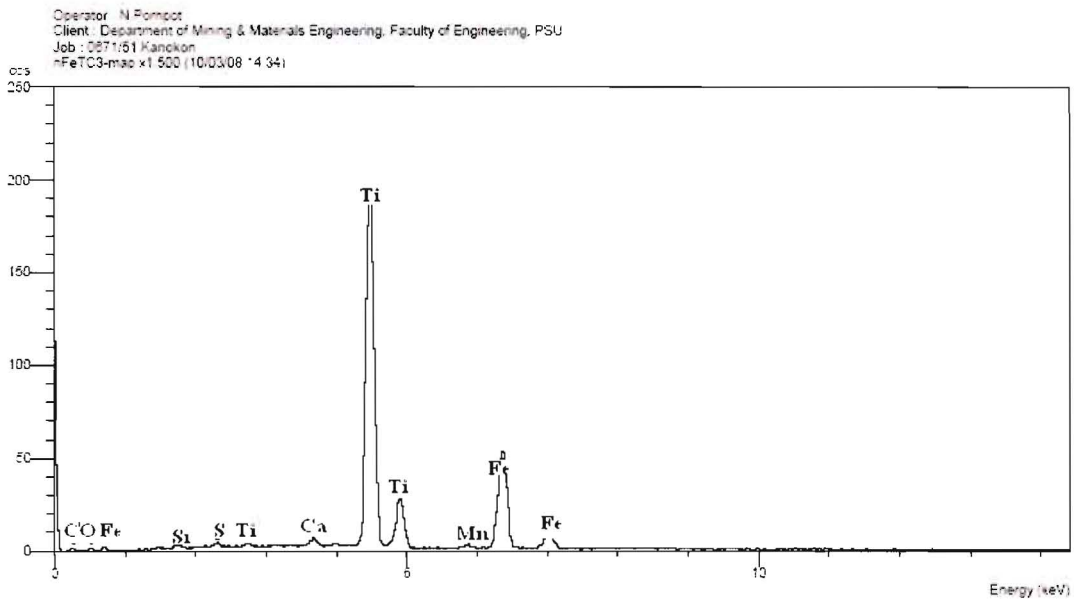


รูปที่ 3.11 แสดงภาพถ่ายจากการทำ Point Scan

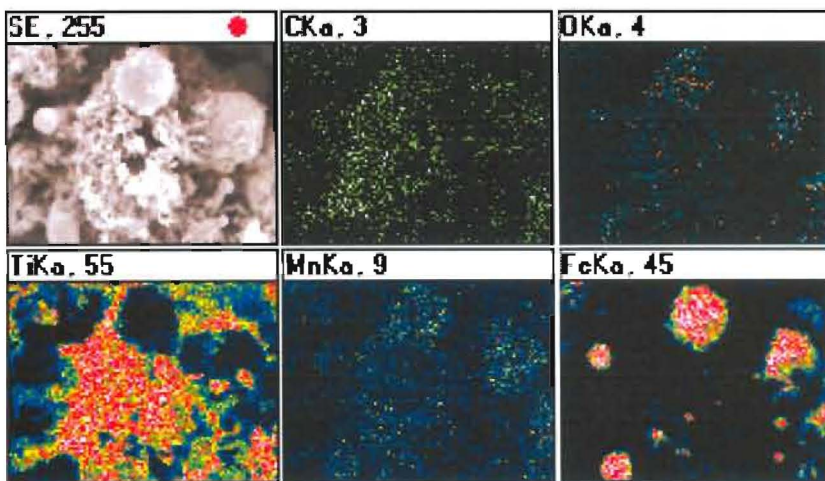


รูปที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นในการทำ Point Scan วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของชนิดธาตุใน โครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี X-ray mapping ดังแสดงในรูปที่ 3.13-3.14 ของตัวอย่างการทดลอง nFTC3 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray mapping จะแสดงถึงการกระจายตัวของชนิดธาตุแต่ละธาตุที่อยู่ใน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ปริมาณเล็กน้อยของธาตุสังเกตุได้จากความเข้มของภาพ ในที่นี้สีขาวหมายถึงปริมาณธาตุมีความเข้มมากในบริเวณนั้น สีดำหมายถึงไม่มีธาตุในบริเวณนั้นเลย โดยเทียบกับตำแหน่งของเฟสต่างๆซึ่งปรากฏในภาพถ่าย SEM จะพบการกระจายตัวของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยอนุภาคของเหล็กจะมีลักษณะเป็นก้อนกลมกระจายตัวอยู่ทั่วไปในไทเทเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์



รูปที่ 3.14 ภาพ X-ray mapping ของวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้

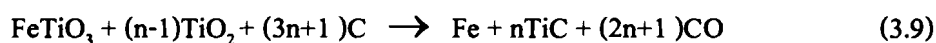
3.2 ผลที่ได้จากการชะละลาย

3.2.1 แปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

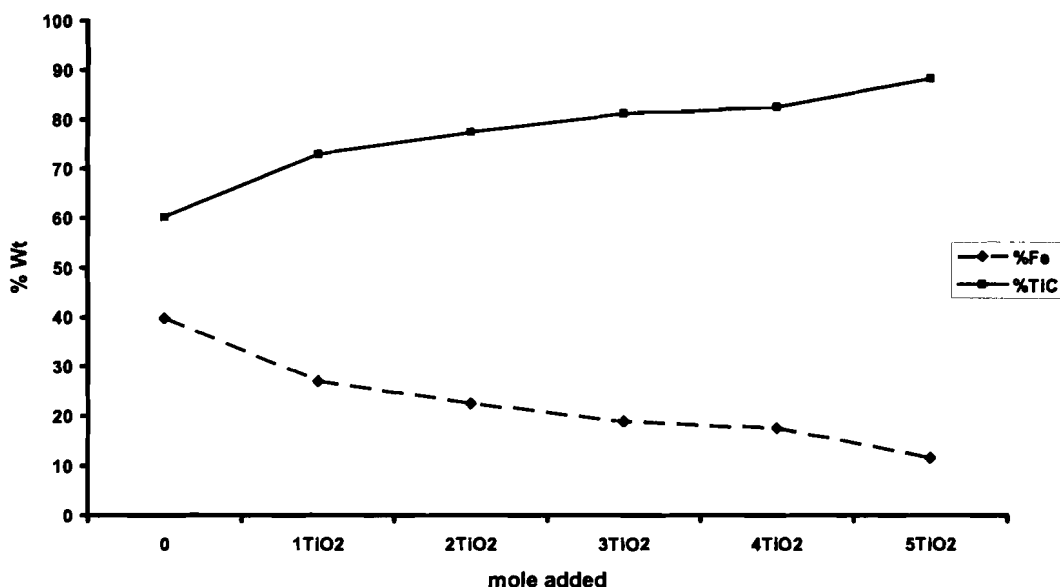
หลังจากทำการชะละลาย ตัวอย่างด้วยกรด HCl เข้มข้น 10% ได้ผล ดังตารางที่ 3.3 ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แต่ละการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อน ชะละลาย (g)	น้ำหนักหลัง ชะละลาย (g)	% TiC
FnTC1	2	1.204	60.20
FnTC2	2	1.460	73.00
FnTC3	2	1.549	77.45
FnTC4	2	1.622	81.10
FnTC5	2	1.650	82.50
FnTC6	2	1.767	88.35

จะพบว่าเมื่อทำการเติมจำนวน โมลของไทเทเนียม ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ สัดส่วนของไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ตามสมการที่ 3.9 ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.15



Analysis of reaction products



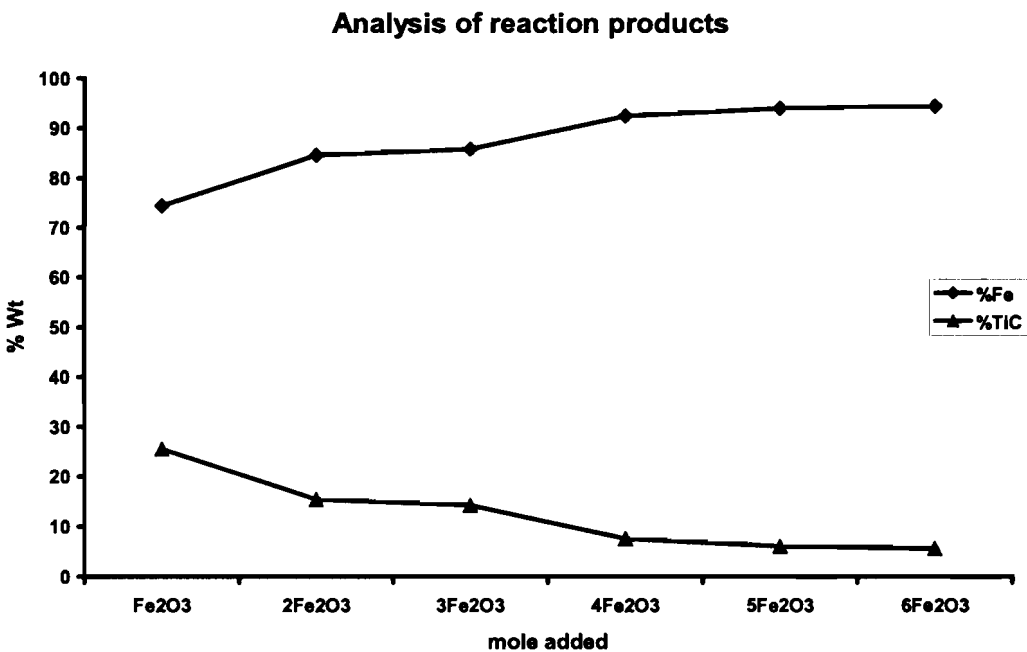
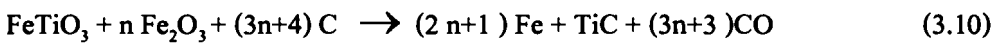
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์

3.2.2 แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์

หลังจากทำการ ชะละลายตัวอย่างด้วยกรด HCl เข้มข้น 10% ได้ผล ดังตารางที่ 3.4 ตารางที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่แต่ละการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์

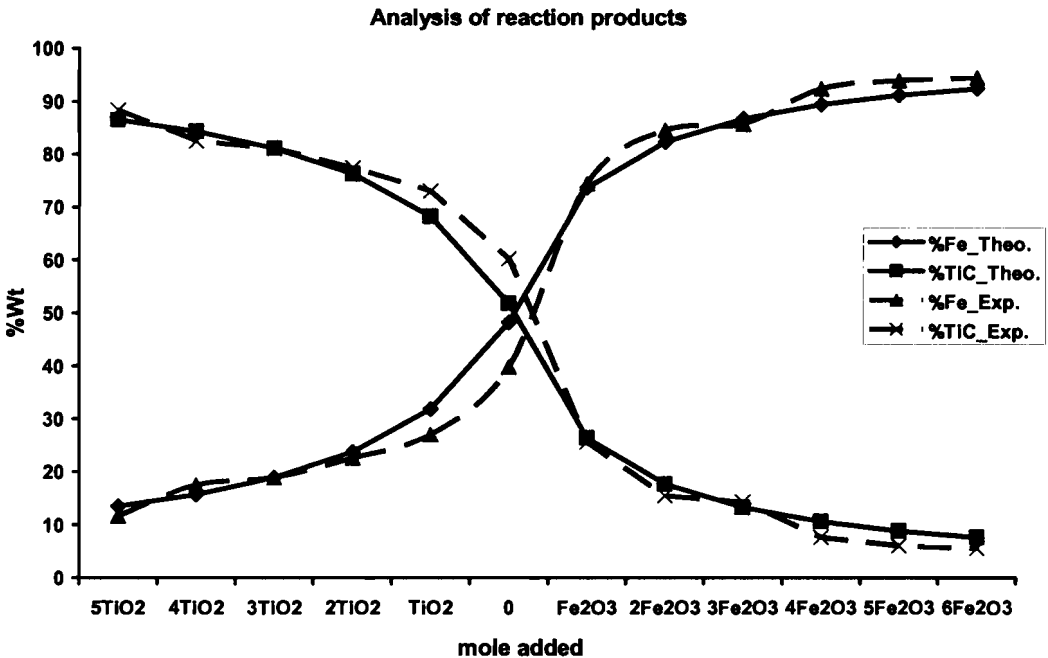
ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อน ชะละลาย (g)	น้ำหนักหลัง ชะละลาย(g)	% TIC
nFTC1	2	0.511	25.55
nFTC2	2	0.309	15.45
nFTC3	2	0.285	14.25
nFTC4	2	0.152	7.6
nFTC5	2	0.122	6.1
nFTC6	2	0.112	5.6

จะพบว่าเมื่อทำการเติมจำนวนโมลของเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของไทเทเนียมคาร์ไบด์ลดลง ตามสมการที่ 3.10 ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์

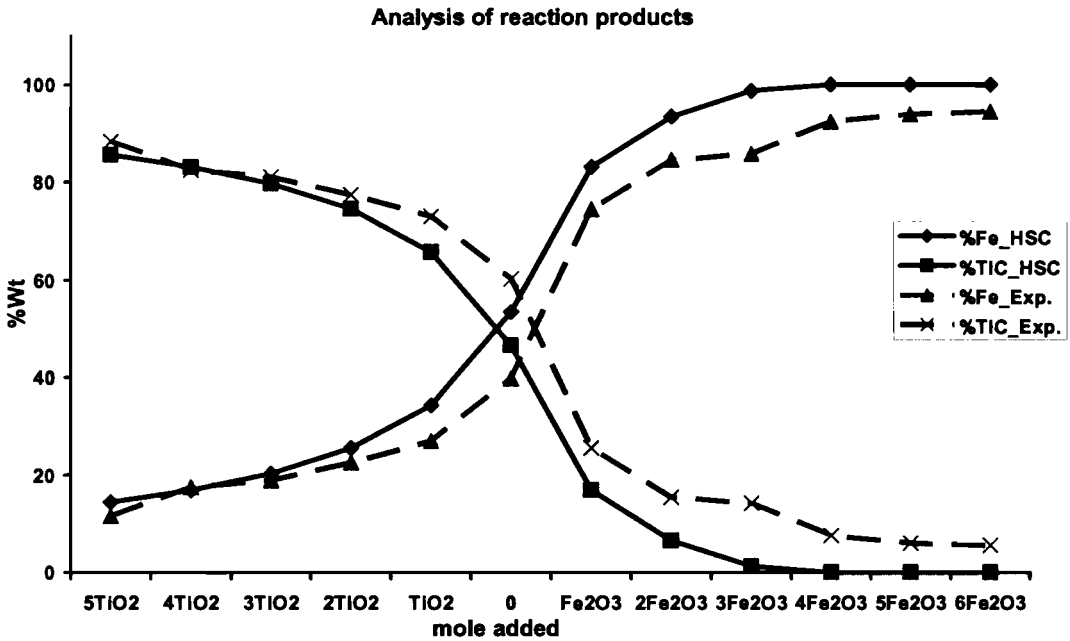
เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะได้อัตราหนักที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับทางทฤษฎี ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.17 โดยกราฟในช่วงแรกจะแสดงผลของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่จะเกิดขึ้นหลังจากทำการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์มากจะทำให้มีปริมาณของไทเทเนียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยกว่าส่วนปริมาณเหล็กก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้นแปรผกผันกับปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น ในช่วงหลังจะแสดงผลของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่จะเกิดขึ้นหลังจากทำการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ ที่การเติมเหล็กออกไซด์มากขึ้นจะทำให้ปริมาณของเหล็กเกิดขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะแปรผกผันกับปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่จะลดลงตามลำดับเมื่อเติมปริมาณเหล็กออกไซด์ลงไปในปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์เปรียบเทียบระหว่างทางทฤษฎีและที่เกิดขึ้นจริง

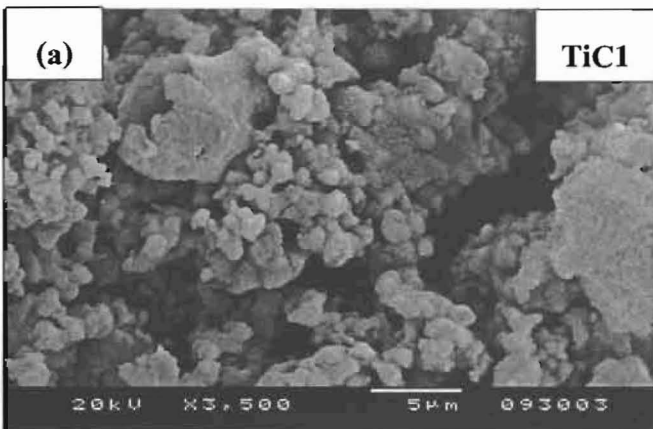
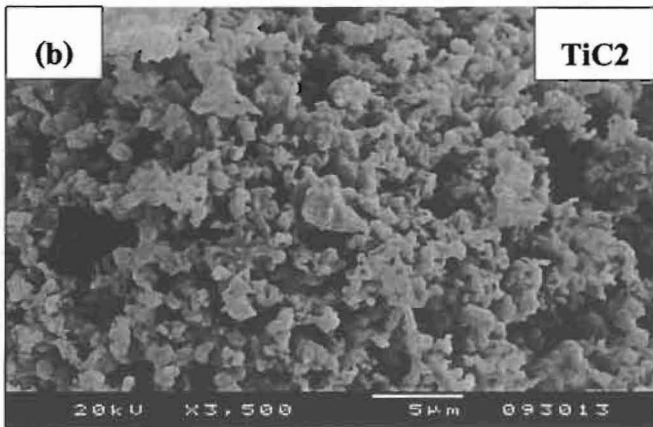
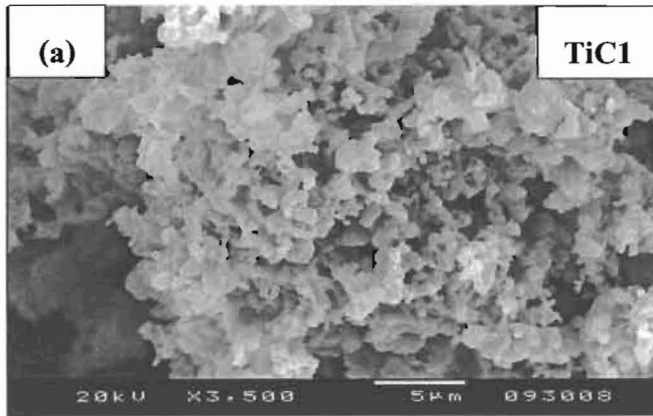
เมื่อนำข้อมูลสัดส่วนของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองไปทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม HSC เพื่อดูความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงได้รูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อทำการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์สัดส่วนของเหล็กจะลดลงและสัดส่วนของไทเทเนียมคาร์ไบด์จะเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์พบว่าสัดส่วนของเหล็กจะเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของไทเทเนียมคาร์ไบด์จะลดลงตามลำดับ

โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าที่ได้จากโปรแกรม HSC และมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน



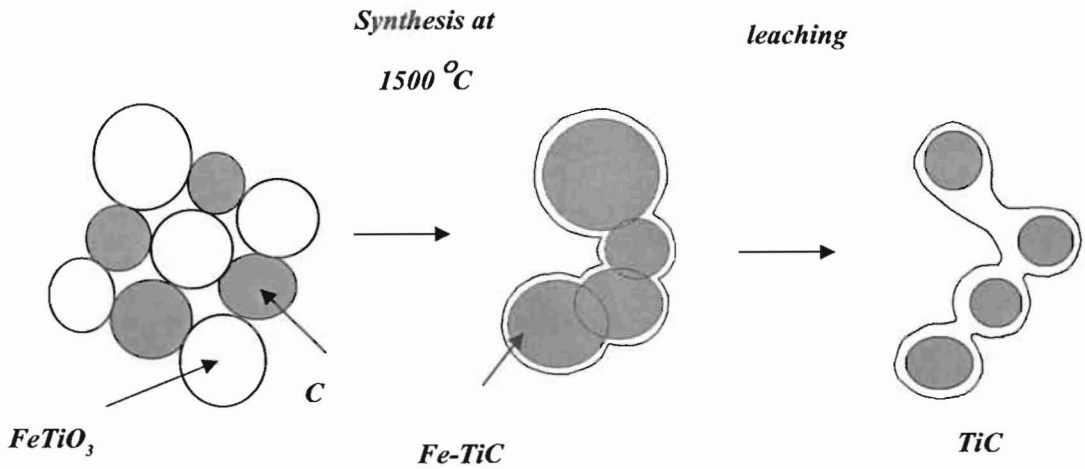
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และเหล็กออกไซด์กับปริมาณเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์เปรียบเทียบระหว่าง ข้อมูลจากโปรแกรม HSC และที่เกิดขึ้นจริง

โครงสร้างทางจุลภาคของไทเทเนียมคาร์ไบด์จะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนเป็นอนุภาคเม็ดเล็กๆเกาะรวมตัวกัน ดังรูปที่ 3.19 และภาพถ่าย TEM ในรูป 3.21 แสดงให้เห็นถึงเม็ดเล็กๆ ของอนุภาคที่เกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันไป โดยจะสังเกตเห็นมีรอยหยาบและขรุขระบริเวณผิวของผงไทเทเนียมคาร์ไบด์

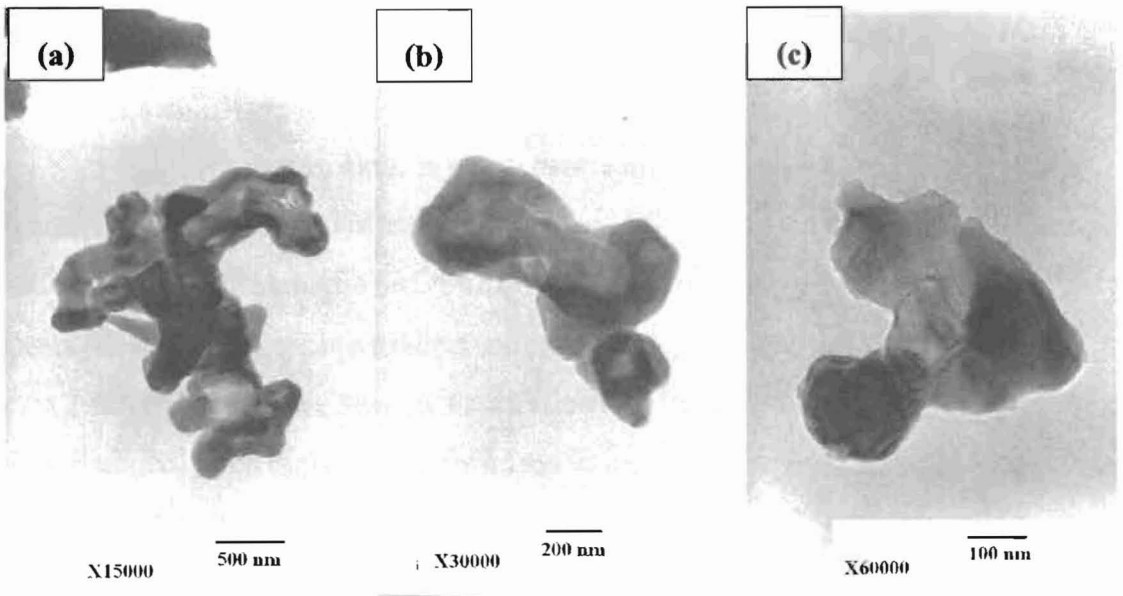


รูปที่ 3.19 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ (a) TiC1 (b) TiC2 และ (c) TiC3

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจสันนิษฐานเป็นแผนภาพของขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์วัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และไทเทเนียมคาร์ไบด์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.21 แสดงภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างไทเทเนียมคาร์ไบด์

(a) X15000 (b) X30000 และ (c) X60000

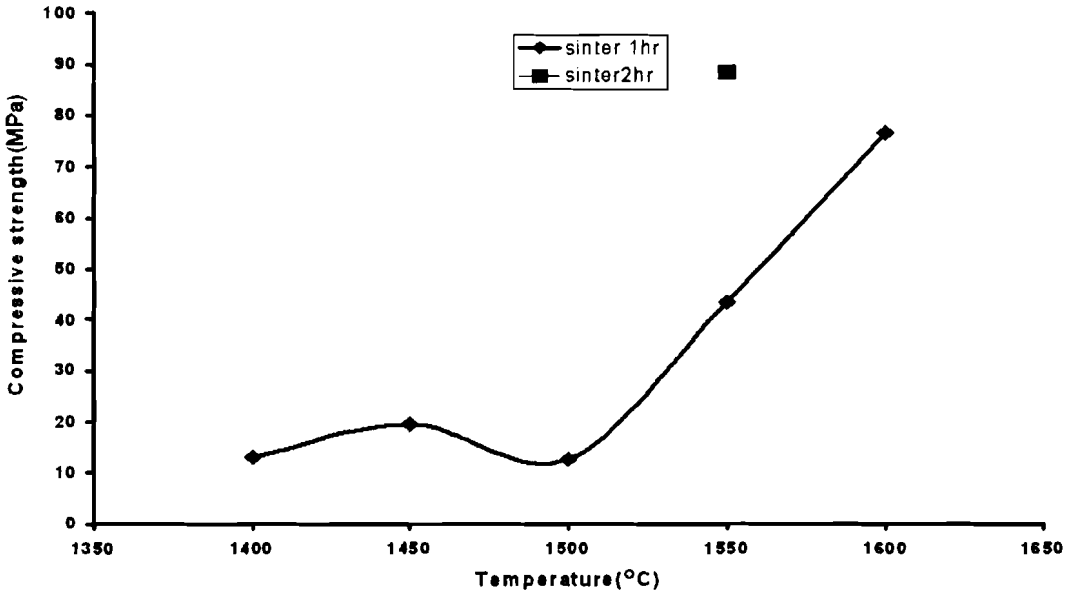
เมื่อนำผงตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปตรวจวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง LPSA จะได้ค่าของขนาดอนุภาคออกมาในหน่วยไมครอนซึ่งค่าที่ได้อาจมีความไม่แน่นอนเนื่องมาจากตัวอย่างที่ได้เป็นผงซึ่งมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่เกาะและจับรวมตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นขนาดที่ได้ออกมาอาจเป็นขนาดของอนุภาคโดยรวมทั้งก้อนอาจไม่ใช่ค่าขนาดของแต่ละเม็ดอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ ค่าที่ได้ออกมาดังตารางที่ 3.5 และเมื่อเราทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้ค่าที่ได้จาก XRD มาคำนวณหาขนาดผลึกของอนุภาคจะพบว่าค่าที่ได้ลดลงในการทดลองที่ 2 และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นในการทดลองถัดไป

ตารางที่ 3.5 แสดงขนาดอนุภาค จากการคำนวณค่าที่ได้จากเครื่อง XRD และ LPSA

Sample	Crystal size (nm.)	Particle size ($\mu\text{m.}$)
TiC1	28.8	12.8
TiC2	21.6	33.3
TiC3	21.6	33.5
TiC4	28.8	16.1
TiC5	34.6	10.3
TiC6	43.2	23.2

3.3 ทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบทำการอัดชิ้นงาน F_nTiC1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบผนีก ดังแสดงในรูปที่ 3.22 พบว่าถ้าทำการอบผนีกโดยแช่ไว้เป็นเวลา 1 ชม. ค่า Compressive Strength จะมีการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบผนีก และที่ 1600°C จะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่า Compressive Strength สูงที่สุด แต่เมื่อเราทดลองทำการอบผนีกที่อุณหภูมิ 1550°C แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชม. ค่า Compressive Strength จะเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็นเท่าตัวเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นจึงตัดสินใจเลือกใช้อุณหภูมิอบผนีกที่ 1550°C และแช่ทิ้งไว้ 2 ชม. สำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.22 กราฟเปรียบเทียบ Compressive Strength ที่แต่ละอุณหภูมิในการอบผงึก

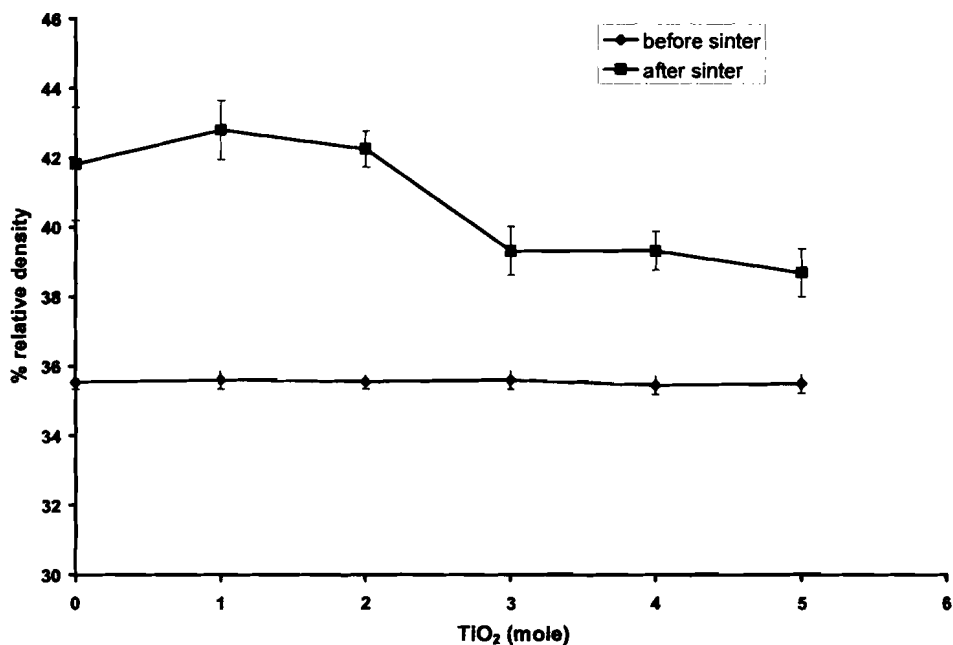
ทำการศึกษาค่าความหนาแน่นและปริมาตรของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์ เพื่อที่จะนำค่าเหล่านี้ไปใช้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบต่อไป ซึ่งจะแสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก โดยจะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าปริมาตรและความหนาแน่นของเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

การทดลอง	% ปริมาตรเหล็ก	% ปริมาตรไทเทเนียมคาร์ไบด์	ปริมาตรทางทฤษฎี (ml)	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/ml)
FnTC1	36.90	63.10	19.26	6.01
FnTC2	22.62	77.38	31.41	5.59
FnTC3	16.31	83.69	43.56	5.41
FnTC4	12.75	87.25	55.71	5.30
FnTC5	10.47	89.53	67.87	5.24
FnTC6	9.74	91.12	80.02	5.19

เมื่อได้ค่าอุณหภูมิ และช่วงเวลาการอบผงึกที่เหมาะสมจึงทำการ ชัดและเผาอบผงึกขึ้นตัวอย่างทั้ง 6 การทดลอง เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งได้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเป็นไปดังกราฟรูปที่ 3.23 พบว่าเมื่อเราทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ความหนาแน่นเริ่มต้น

อยู่ที่ประมาณ 35.5% Relative Density ในแต่ละการทดลอง หลังจากเราทำการเผาอบผนึกชิ้นงาน จะทำให้ได้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม อยู่ในช่วงประมาณ 38-43% Relative Density และพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จะมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นในการทดลองที่ 2 และค่อยๆลดลงตามลำดับ ซึ่งการทดลองที่ 2 จะมีค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ 42.8% Relative Density และการทดลองที่มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือ การทดลองที่ 6 มี 38.7% Relative Density สาเหตุที่ทำให้ตัวอย่างชิ้นงานในการทดลองที่ 3-5 มีค่าความหนาแน่นหลังอบผนึกเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มากนักอาจเนื่องมาจากปริมาณของเนื้อเหล็กที่มีอยู่น้อย เมื่อเทียบกับปริมาณของไทเทเนียมคาร์ไบด์จึงเกิดการหลอม/แน่นตัวของเหล็ก ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ การทดลองที่มีปริมาณเหล็กมากกว่า

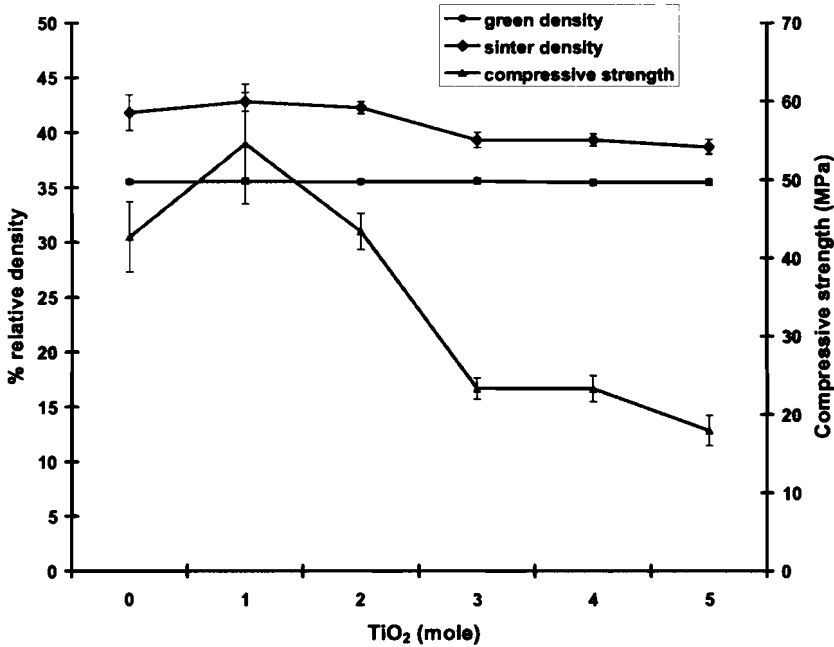


รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงาน Fe-TiC ในแต่ละการทดลอง

3.3.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกด Compressive Strength

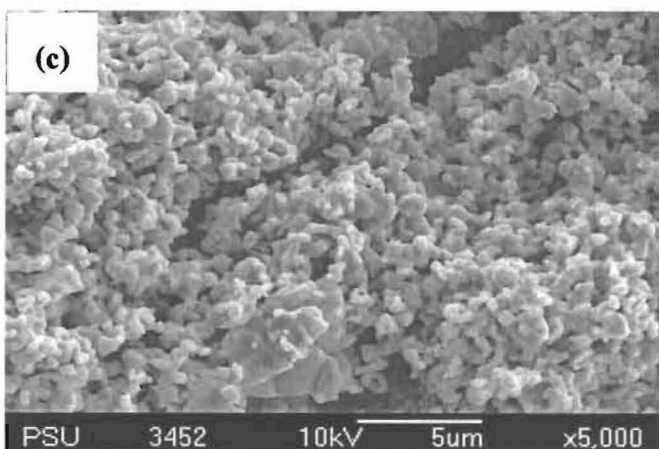
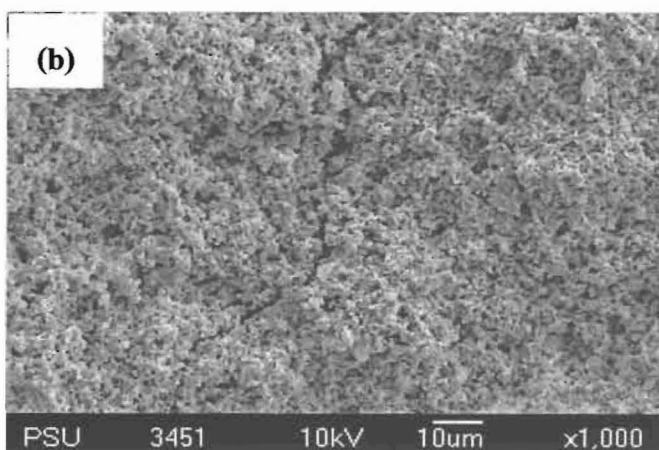
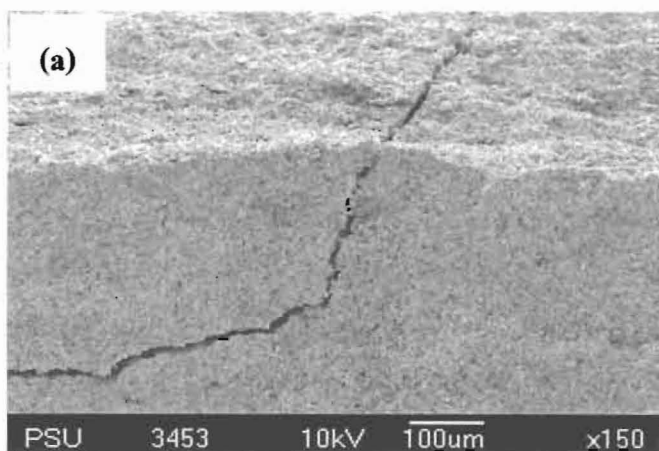
นำชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปและอบผนึกแล้ว ไปทำการทดสอบหาค่า Compressive Strength เปรียบเทียบกันในแต่ละการทดลอง ดังแสดงดังกราฟรูปที่ 3.24 พบว่าค่า Compressive Strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นในการทดลองที่ 2 และลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับความสัมพันธ์ของความหนาแน่น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเหล็กซึ่งทำ

หน้าที่เป็นตัวจับยึดในวัสดุผสมนี้ มีปริมาณน้อยเกินไปที่จะแทรกตัวเข้าไปในไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งมีลักษณะเป็รูพรุน จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการจับยึดกันไม่ดีเท่าที่ควร ไม่ทนต่อแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงานทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่า % Relative Density (green density and sinter density) และ Compressive Strength ของ Fe-TiC แต่ละการทดลอง

นำตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการทดสอบการกด ไปวิเคราะห์โครงสร้างรอยแตกออกมา ดังรูปที่ 3.25 พบว่าเมื่อชิ้นงานรับแรงกดจนถึงค่าๆหนึ่งที่ชิ้นงานไม่สามารถจะต้านทานอยู่ได้ก็จะเกิดการแตกหักซึ่งลักษณะการแตกในชิ้นตัวอย่างนี้จะเป็นการแตกระหว่างอนุภาคของผงเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการเกาะเกี่ยวเชื่อมยึดติดกันเป็นชิ้นเดียว รูปที่ 3.25(a) แสดงให้เห็นรอยแตกบริเวณผิวขอบของชิ้นงาน รูป 3.25(b) ที่กำลังขยายเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะรอยแตกภายในชิ้นงาน รูปที่ 3.25(c) จะสังเกตเห็นลักษณะการยึดเกาะกันของอนุภาคภายในชิ้นงานและมีรอยแตกเกิดขึ้นอยู่ภายในทำให้อนุภาคที่ยึดติดกันเกิดการแยกตัวออกจากกัน

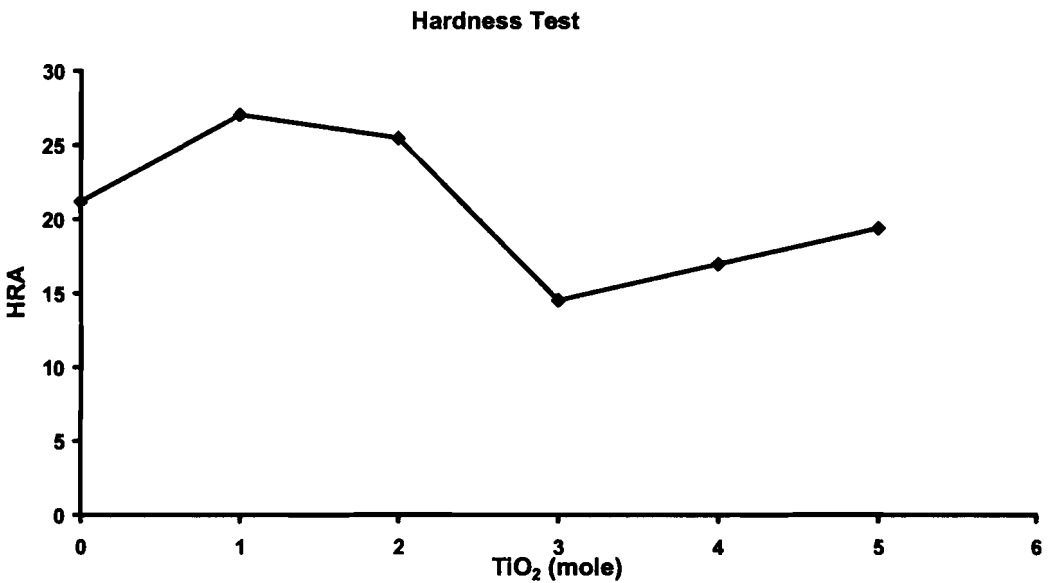


รูปที่ 3.25 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการอัด

(a) X150 (b) X1000 และ (c) X5000

3.3.2 การทดสอบสมบัติความแข็ง Hardness Test

นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอัดและเผาอบผืนึกขึ้นรูปไปทำการทดสอบวัดความแข็ง พบว่าในการทดลองที่ 2 ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดและจะมีค่าลดลงในการทดลองถัดไปและจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกในการทดลองที่ 5 และการทดลองที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก ในการทดลองที่ 3-6 เหล็กที่เกิดการหลอมละลายซึ่งทำหน้าที่เสมือนตัวประสานให้กับอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในการทดลองมีปริมาณน้อยลงไม่เพียงพอในการที่จะเติมลงไปในทุกที่ของรูพรุนไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก การที่จะทำให้อนุภาคเกิดการยึดตัวกันจึงมีน้อยกว่าในการทดลองแรกๆ ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 3.26 กราฟความสัมพันธ์ของความแข็งที่แต่ละตัวเติมไทเทเนียมไดออกไซด์

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

จากการทดลองพบว่า สามารถทำการสังเคราะห์เหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยวิธีการโบเทอรัมอลรีดิกชัน โดยการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็กออกไซด์ได้ ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาที่ได้จะค่อนข้างสมบูรณ์เกิดเป็นเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1400°C และปฏิกิริยามีความเสถียรภาพในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1500°C โดยเมื่อเราทำการแปรผันปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นไปด้วยตามลำดับ และเมื่อเราทำการแปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ จะพบว่าค่าของปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากข้อมูล XRD และพิสูจน์ได้จากการทำการชะละลาย

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและอบผืนิก มาทำการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยในที่นี้จะทำการทดสอบด้วยกัน 2 วิธี คือ การทดสอบความต้านทานในการกด (Compressive Strength) และ การทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness Test) พบว่าค่าความต้านทานในการกดและค่าความแข็งค่อนข้างจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ จะมีค่าสูงสุดในการทดลองที่ 2 และค่อยๆ ลดลงในการทดลองถัดมา ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงทำให้สัดส่วนของเหล็กที่จะเข้าไปเติมในรูพรุนของไทเทเนียมคาร์ไบด์มีน้อยลง การทำหน้าที่เป็นตัวจับยึดในผลิตภัณฑ์จึงทำหน้าที่ได้เพียงเล็กน้อย ทำให้คุณสมบัติลดลงในช่วงการทดลองที่ 3-6 ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการทดลองที่ 2 มีความเหมาะสมที่สุดในสภาพการทดลองครั้งนี้ สำหรับตัวอย่างที่แปรผันปริมาณเหล็กออกไซด์ไม่ได้นำมาทดสอบสมบัติทางกลเนื่องจาก เมื่อทำการสังเคราะห์ให้ได้เป็นวัสดุผสมเหล็กไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1500°C พบว่าผลิตภัณฑ์มีปริมาณเหล็กเป็นส่วนประกอบอยู่มากส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะหลอมจับตัวกันเป็นก้อนของสารที่เป็นเหล็กทำให้มีความยากต่อการนำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

4.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยที่ศึกษามาพบว่า การขึ้นรูปวัสดุผสม เหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการศึกษามา ส่วนใหญ่ จะใช้วิธี Hot Press หรือ HIP ในการขึ้นรูป เนื่องจากวิธีการนี้จะมีการให้รวมเอาการอัดขึ้นรูปและอบผนึกมาทำไปพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง มีความแข็งแรงดีและความแข็งสูง ซึ่งจะมีความเหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์ศึกษาสมบัติทางกล แต่ในการทดลองครั้งนี้ ใช้วิธีอัดขึ้นรูปแบบบดทิศทางเดียวด้วยเครื่องไฮดรอลิกแล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปอบผนึก ชิ้นงานที่ได้ อาจมีความแน่นตัวและจับยึดตัวกันของอนุภาคไม่เพียงพอ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ อาจทำให้ชิ้นงานที่ได้ออกมา ไม่มีความเหมาะสมเท่าที่ควรในการนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล และอาจมีการเติมโลหะบางตัวลงไปในผลิตภัณฑ์เช่น นิกเกิล เพื่อเป็นการช่วยในการจับยึด ไทเทเนียมคาร์ไบด์ภายในชิ้นงานให้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม และในขั้นตอนของการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1400°C ปฏิกริยาที่ได้ค่อนข้างสมบูรณ์ ถ้าทำการเพิ่มเวลาในการบดผสมให้นานขึ้นกว่าเดิม อาจเป็นแนวทางที่จะทำให้เกิดวัสดุผสมเหล็ก-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ สมบูรณ์ขึ้นในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมินี้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นมาสเตอร์อัลลอยด์ ใส่เติมลงไป ในโลหะเหลวเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติ หรืออาจนำผงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ไปทำการพ่นเคลือบแบบสเปรย์บนชิ้นงาน เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติได้อีกทางหนึ่ง

บรรณานุกรม

- สัมพันธ์ วงศ์นาวา และผดุง บุญสิน. (2541). รายงานโครงการวิจัยเรื่องการผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์จากแร่อิลเมนไนต์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมเกียรติ นาคกุล. (2544). กระบวนการผลิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หน่วยโสตทัศนศึกษา
- Ananthapadmanabhan, P.V. and Taylor, P.R. (1999). "Titanium carbide-iron composite coating by reactive plasma spraying of ilmenite." *Journal of Alloys and Compounds*, 287, 121-125.
- Brown, I.W.M. and Owers, W.R. (2004). "Fabrication, microstructure and properties of Fe-TiC ceramic-metal composites." *Current Applied Physics*, 4, 171-174.
- Farid, A., Guo, S., Yang, X. and Lian, Y. (2006). "Stainless steel binder for the development of novel TiC-reinforced steel cermets." *Journal of University of Science and Technolog Beijing*, 13(6), 546.
- Lee, D.W., Alexandrovskii, S. and Kim, B.K. (2004). "Mg-thermal reduction of $TiCl_4 + C_xCl_4$ solution for producing ultrafine titanium carbide." *Materials Chemistry and Physics*, 88(1), 23-26.
- Niyomwas, S. (2006). "Effect of Temperature and Precursors on Preparation of Fe-TiC Composite from ilmenite." EPD Congress 2006, The 2006 Annual Meeting of The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), San Antonio, TX, USA, p 857-864.
- Niyomwas, S. (2005). "Synthesis of Fe-TiC Composite by Carbothermic Reduction of Ilmenite." Proceedind of PSU-UNS Inter. Conf. on Eng. & Envir., Novisad, Serbia-Montenegro. May 18-20, 2005, paper No.T11-22, p.1-4.
- Nuilek, K., Memongkol, N., and Niyomwas, S. (2006). "The Effect of TiO_2 on Synthesizing Fe-TiC Composites." Proceeding of 4th Thailand Material Science and Technology Conference, Bangkok, March 2006

- Nuilek, K., Memongkol, N., and Niyomwas, S. (2007). "Production of Titanium Carbide from Ilmenite." International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering, The Frontiers of Technology (ICFT 2007Phuket Graceland and Spa, Phuket, Thailand), May 10-12, 2007
- Parashivamurthy, K.I., Kumar, R.K., Seeharamu, S. and Chandrasekharaiah, M.N. (2001). "Review on TiC reinforced steel composites." *Journal of Materials Science*, 36, 4519-4530.
- Persson, P., Jarfors, A.E.W. and Savage, S. (2002). "Self-propagating high-temperature synthesis and liquid-phase sintering of TiC/Fe composites." *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 131-139.
- Saidi, A.. (1999). "Reaction synthesis of Fe-(W,Ti)C composites." *Journal of Materials Processing Technology*, (89-90), 141-144.
- Saidi, A., Chrysanthou, A., Wood, J. V. and Kellie, J. L. F. (1997). "Preparation of Fe-TiC composites by the thermal-explosion mode of combustion synthesis." *Ceramics International*. 23(2), 185-189.
- Setoudeh, N., Saidi, A. and Welham, N.J. (2005). "Carbothermic reduction of anatase and rutile." *Journal of Alloys and Compounds*, 390, 138-143.
- Swift, G.A. and Koc, R. (1999). "Formation studies of TiC from carbon coated TiO₂." *Journal of Materials Science*, 34(13), 3083-3093.
- Tong, L. and Reddy, R.G. (2005). "Synthesis of titanium carbide nano-powders by thermal plasma." *Scripta Materialia*, 52(12), 1253-1258.
- Wang, Y., Zhang, X., Zeng, G. and Li, F. (2000). "Cast sinter technique for producing iron base surface composites." *Materials and Design*, 21, 447-452.
- Wattanawichit, W. (2004). "Upgrading Ilmenite Ore by Hydrochloric A Leaching." Master of Science Thesis in Inorganic Chemistry, Prince of Songkla University, 1-5
- Welham, N.J. (1996). "A parametric study of the mechanically activated carbothermic reduction of ilmenite." *Minerals Engineering*, 9(12), 1189-1200.
- Woo, Y-C., Kang, H-J. and Kim, D.J. (2007). "Formation of TiC particle during carbothermal reduction of TiO₂." *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 719-722.

Zhang, S. and Lu, G.Q. (1995). "Effect of green state on sintering of Ti(C,N)-based cermets."

Journal of Materials Processing Technology, 54, 29-33.

[http://www.customs.go.th\(21/11/2550\)](http://www.customs.go.th(21/11/2550))

[http://etrade.daegu.go.kr/co/kuksung/GC01021738/CA01021759/Ferro-TiC.html\(4/10/2548\)](http://etrade.daegu.go.kr/co/kuksung/GC01021738/CA01021759/Ferro-TiC.html(4/10/2548))

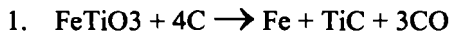
ภาคผนวก

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์และปริมาณทางทฤษฎี

ตารางที่ ผ1 แสดงสมบัติของเหล็กและไทเทเนียมคาร์ไบด์

	ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	จุดหลอมเหลว	น้ำหนักโมเลกุล
Fe	7.86	1535	55.847
TiC	4.93	3170	59.911

$$D=M/V, V=M/D$$



ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe คือ $(55.847/7.86) = 7.105$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ TiC คือ $(59.911/4.93) = 12.152$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $7.105+12.152 = 19.258$ มล.

% ปริมาตร Fe ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(7.105/19.258)*100 = 36.896$

% ปริมาตร TiC ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(12.152/19.258)*100 = 63.104$

ความหนาแน่นทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $(55.847+59.911)/19.258 = 6.011$ กรัม/มล.



ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe คือ $(55.847/7.86) = 7.105$ มล.

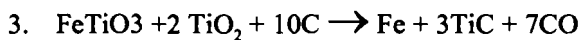
ปริมาณทางทฤษฎี ของ TiC คือ $((2*59.911)/4.93) = 24.305$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $7.105+24.305 = 31.410$ มล.

% ปริมาตร Fe ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(7.105/31.410)*100 = 22.620$

% ปริมาตร TiC ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(24.305/31.410)*100 = 77.380$

ความหนาแน่นทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $(55.847+(2*59.911))/31.410 = 5.593$ กรัม/มล.



ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe คือ $(55.847/7.86) = 7.105$ มล.

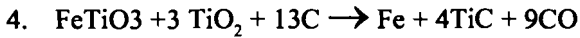
ปริมาณทางทฤษฎี ของ TiC คือ $((3*59.911)/4.93) = 36.457$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $7.105+36.457 = 43.562$ มล.

% ปริมาตร Fe ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(7.105/43.562)*100 = 16.310$

% ปริมาตร TiC ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(36.457/43.562)*100 = 83.690$

ความหนาแน่นทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $(55.847+(3*59.911))/43.562 = 5.408$ กรัม/มล.



ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe คือ $(55.847/7.86) = 7.105$ มล.

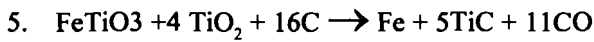
ปริมาณทางทฤษฎี ของ TiC คือ $((4*59.911)/4.93) = 48.609$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $7.105+48.609= 55.714$ มล.

% ปริมาตร Fe ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(7.105/55.714)*100 = 12.753$

% ปริมาตร TiC ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(48.609/55.714)*100 = 87.247$

ความหนาแน่นทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $(55.847+(4*59.911))/55.714 = 5.408$ กรัม/มล.



ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe คือ $(55.847/7.86) = 7.105$ มล.

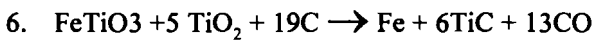
ปริมาณทางทฤษฎี ของ TiC คือ $((5*59.911)/4.93) = 60.762$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $7.105+60.762= 67.867$ มล.

% ปริมาตร Fe ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(7.105/67.867)*100 = 10.469$

% ปริมาตร TiC ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(60.762/67.867)*100 = 89.531$

ความหนาแน่นทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $(55.847+(5*59.911))/67.867 = 5.237$ กรัม/มล.



ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe คือ $(55.847/7.86) = 7.105$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ TiC คือ $((6*59.911)/4.93) = 72.914$ มล.

ปริมาณทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $7.105+72.914= 80.019$ มล.

% ปริมาตร Fe ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(7.105/80.019)*100 = 9.744$

% ปริมาตร TiC ที่มีอยู่ใน Fe-TiC คือ $(72.914/80.019)*100 = 91.121$

ความหนาแน่นทางทฤษฎี ของ Fe-TiC คือ $(55.847+(6*59.911))/80.019 = 5.190$ กรัม/มล.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวกนกอร น้อยเล็ก		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812093		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2547	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนศึกษ้งานกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ทุนผู้ช่วยสอนมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Nuilek, K., Memongkol, N., and Niyomwas, S., "The Effect of TiO_2 on Synthesizing Fe-TiC Composites." *Proceeding of 4th Thailand Material Science and Technology Conference, Bangkok, March 2006*
2. Nuilek, K., Memongkol, N., and Niyomwas, S., "Production of Titanium Carbide from Ilmenite." *International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering, The Frontiers of Technology (ICFT 2007)Phuket Graceland and Spa, Phuket, Thailand), May 10-12, 2007*