



การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในท่อเหล็กกล้า
ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัย
เทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

**Synthesis and Characterization of Composite Coating on Inner Surface Steel Pipe
by Self-Propagating High-Temperature Synthesis
Assisted Centrifugal Force Technique**

เสาวณี สิงส์โรทัย

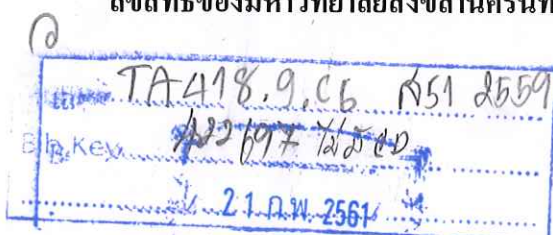
Saowanee Singsarothai

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

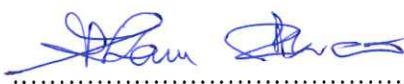


ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในท่อ
 เหล็กกล้าด้วยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัย
 เทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

ผู้เขียน นางสาวเสาวณีย์ สิงห์สโรทัย

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมवास)

คณะกรรมการสอบ



.....ประธานกรรมการ
 (ดร.เรืองเดช ธงศรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร)



.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)



.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมवास)



.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ



.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)


คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณ นิยมวาส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นางสาวเสาวณีย์ สิงห์สโรทัย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....*สาวน้อย รัตนโร หอย*.....

(นางสาวสาวน้อย รัตนโร หอย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในท่อเหล็กกล้าด้วยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยเทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
ผู้เขียน	นางสาวเสาวณีย์ สิงห์สโรทัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

เทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยเทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ถูกนำมาใช้เพื่อสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า สำหรับนำไปศึกษา ลักษณะเฉพาะและสมบัติบางประการ ได้แก่ ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี ความแข็ง จุลภาค ความเรียบผิว และความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือน ทฤษฎีพลังงานกิบส์ที่ต่ำที่สุดถูกนำมาใช้สำหรับ คำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาและสมดุลขององค์ประกอบของปฏิกิริยา ในการทดลองจะเน้นการ สังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสแตนบอร์ด (WB และ W_2B) จากแร่วุลเฟรมไมต์เป็นหลัก โดยระบบสารตั้งต้นที่ดีที่สุดคือ ระบบ $2FeWO_4/B_2O_3/7.333Al$ และ $4FeWO_4/B_2O_3/12.667Al$ จากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม ได้แก่ ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้า และชนิดของสารตั้งต้นหลัก โดยค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ดีที่สุดคือ 2250 รอบต่อนาที ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม จากการวิจัยได้เสนอว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่เติมสารตัวเติมเดี่ยว ชนิดแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ดีกว่าแคลเซียมฟลูออไรด์ และผิวเคลือบวัสดุผสมที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิดเหล็กออกไซด์กับอะลูมิเนียมเนียมดีกว่าแคลเซียมเปอร์ออกไซด์กับอะลูมิเนียม และปริมาณการเติมที่ดีที่สุดอยู่ที่ 1 โมล เมื่อทำการแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้า ควรปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้เหมาะสมกับท่อเหล็กกล้าขนาดนั้นๆ และชนิดของสารตั้งต้นส่งผลกระทบต่อผิวเคลือบวัสดุผสมน้อยมาก เมื่อเลือกใช้สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกัน ดังนั้นจากงานวิจัยจึงขอเสนอว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นทั้งสแตนบอร์ด (WB) สามารถสังเคราะห์ได้สำเร็จด้วยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยเทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และมีค่าความเรียบผิว $7.40 \mu m$ ความแข็งจุลภาคชั้น α 962.74 HV และชั้น β 1699.08 HV และความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือน 6.87 MPa

Thesis	Synthesis and Characterization of Composite Coating on Inner Surface Steel Pipe by Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Centrifugal Force Technique
Author	Miss Saowanee Singsarothai
Major	Materials Engineering
Academic Year	2016

Abstract

Self-propagating high-temperature synthesis assisted centrifugal force technique was applied to produce the composite coating for studying on its characterization and some properties such as microstructure, composition, micro-hardness, surface roughness, and compression shear strength. The stand Gibbs energy minimization route was used to calculate the adiabatic temperature and equilibrium composition of reactions. On this study, the synthesis of tungsten borides (WB and W_2B) based composite materials was the main system which used the optimized reactant system: $2FeWO_4/B_2O_3/7.333Al$ and $4FeWO_4/B_2O_3/12.667Al$. From the experimental results, there were 4 variables (the rotational speed, specie and quantity of additive, diameter size of steel pipe sample, and specie of main reactant) which affected on composite coating process. The optimized rotational speed was 2250 rpm. The specie and quantity of additive variable, it was proved that the calcium peroxide (CaO_2) was the better single additive than calcium fluoride (CaF_2), the iron oxide with aluminium (Fe_2O_3-Al) was the better couple additive than calcium peroxide with aluminium (CaO_2-Al). The variant of diameter size of steel pipe sample depended on the rotational speed. The similar specie on chemical composition of main reactant had the less effect on coating process. Also, the iron-tungsten boride (WB) based composite coating was successfully synthesized by the self-propagating high-temperature synthesis assisted centrifugal force technique and there was 962.74 (α layer) and 1699.08 (β layer) HV of micro-hardness value, 7.40 μm of surface roughness value, and 6.87 MPa of compression shear strength value.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์จากหลากหลายหน่วยงาน และบุคคลอีกหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและไม่ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพชร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และดูแลเป็นอย่างดีตลอดช่วงระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย แห่งมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจาก “ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์” ประจำปีงบประมาณ 2555 (เลขที่ ENG-550045S) และทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2555 และศูนย์ความเป็นเลิศวิศวกรรมวัสดุ (CEME) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกลุ่มวิจัยวิศวกรรมเซรามิกและวัสดุผสม (CMERG)

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง จากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ ดร.เรืองเดช ธงศรี นักวิจัยจากหน่วยวิจัยออกแบบและวิศวกรรม ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นທີ່ปรึกษาเกี่ยวกับการทำปฏิบัติการและงานด้านเอกสารต่างๆ ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัยภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดี

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ชาย และน้องชาย บุคคลซึ่งอยู่เบื้องหลังที่เป็นแรงผลักดันและกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา

เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูป	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า	
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 วัสดุผสม (Composite materials).....	4
2.1.2 การหล่อโลหะแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal casting).....	7
2.1.3 การสังเคราะห์โดยการเผาไหม้ (Combustion synthesis).....	8
2.2.4 กระบวนการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (SHS)	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.2.1 การหล่อโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal casting)	13
2.2.2 การนำกระบวนการ SHS เข้ามาใช้ควบคู่กับการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	15
2.2.3 กระบวนการ SHS-centrifugation	17
2.3 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง	27
2.3.1 US patents	27
2.3.2 CN patents	29
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	36

3.1 สารเคมี	36
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	38
3.3 หัวข้อและวิธีการวิจัย	40
3.3.1 การทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้น	40
3.3.2 การทดลองแปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นในระบบหลัก	44
3.3.3 การสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า	45
3.3.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสม	52
3.3.5 สรุปวิธีการวิจัย	57
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล	58
4.1 ผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์	58
4.1.1 ระบบสารตั้งต้นของการสังเคราะห์วัสดุผสมเบื้องต้น	58
4.1.2 ระบบการสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม	63
4.2 ผลปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้น	64
4.2.1 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรง WC	64
4.2.2 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรง WB	65
4.2.3 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่นๆ	66
4.3.4 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมที่แปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นในระบบหลัก	68
4.3 ผลการสังเคราะห์เคลือบผิววัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า	69
4.3.1 ผลการศึกษาผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	70
4.3.2 ผลการศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม	77
4.3.3 ผลการศึกษาผลกระทบของขนาดของท่อเหล็กกล้า	90
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	93
5.1 บทสรุป	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก	100
ประวัติผู้เขียน	107

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติกายภาพของวัสดุผสมชนิด SiC และ Al ₂ O ₃ ที่ฝังในโลหะ Al	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเซรามิกและเส้นใยในวัสดุผสมชนิด CMCs	6
ตารางที่ 2.3 สรุปตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเคลือบผิววัสดุผสม	35
ตารางที่ 3.1 ลักษณะเฉพาะของสารเคมี	36
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องมือและอุปกรณ์	38
ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.1)-(3.4)	41
ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.5)	41
ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.6)-(3.8)	42
ตารางที่ 3.6 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.9)-(3.12)	44
ตารางที่ 3.7 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้การทดลองแปรค่าความเร็วรอบในการหมุน เหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	46
ตารางที่ 3.8 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว	47
ตารางที่ 3.9 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมคู่ชนิด CaO ₂ -Al	49
ตารางที่ 3.10 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมคู่ชนิด Fe ₂ O ₃ -Al	49
ตารางที่ 3.11 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยวชนิด Ni	51
ตารางที่ 3.12 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของท่อเหล็กกล้า	51
ตารางที่ 3.13 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในการศึกษาผลกระทบของขนาดของท่อเหล็กกล้า	52
ตารางที่ 4.1 ค่า T _{ad} และ ΔH ^o ₂₉₈ ของระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WC	58
ตารางที่ 4.2 ค่า T _{ad} และ ΔH ^o ₂₉₈ ของระบบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่นๆ	62
ตารางที่ 4.3 ค่า T _{ad} และ ΔH ^o ₂₉₈ ของระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB เพื่อ แปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้น	63
ตารางที่ 4.4 ค่า T _{ad} ของระบบสารตั้งต้นของการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว	63
ตารางที่ 4.5 ค่า T _{ad} ของระบบสารตั้งต้นของการศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมคู่	64

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.2)-(4.4)	65
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.9)	66
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.6) – (3.8)	67
ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.9) – (3.12)	69
ตารางที่ 4.10 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหลักที่แปรค่า ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	73
ตารางที่ 4.11 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่แปรค่า ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว	82
ตารางที่ 4.12 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่แปรค่า ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมคู่ ชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$	84
ตารางที่ 4.13 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่แปรค่า ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมคู่ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$	88

รายการรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะต่างๆ ของการเสริมแรงในวัสดุผสม	5
รูปที่ 2.2 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระบบ Al/Al ₂ O ₃	5
รูปที่ 2.3 วิธีการผลิต CMC ด้วยกระบวนการทำให้อนุภาคแข็งตัว	7
รูปที่ 2.4 การหล่อโลหะแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	8
รูปที่ 2.5 แผนผังของกระบวนการวิธีการเผารูปใหม่ (เส้นทาง ก) และวิธีการเผาใหม่พร้อมกัน (เส้นทาง ข)	9
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา สำหรับปฏิกิริยา SHS	10
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง T_{ad} และ $\Delta H_{298}^0/C_p$ ของระบบสารต่างๆ ที่สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการ SHS	11
รูปที่ 2.8 ลักษณะการเผาใหม่ของสารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ SHS	12
รูปที่ 2.9 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ (ก) และความสัมพันธ์ของลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่ผลิตได้และแนวทางการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (ข)	14
รูปที่ 2.10 แผนภาพเครื่องมือสำหรับกระบวนการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของ Humberto และคณะ (2008)	14
รูปที่ 2.11 (ก) แผนภาพการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ Fe-TiC ด้วยกระบวนการหล่อโลหะที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางควบคู่กับกระบวนการ SHS และ (ข) โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสม	16
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงลักษณะการก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SHS-centrifugation	17
รูปที่ 2.13 (ก) แผนภาพระบบการทำงานของกระบวนการ SHS-centrifugation และ (ข) ผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ Fe-Al ₂ O ₃ โดยผิวเคลือบชั้น a b และ c เป็นวัสดุฐาน ชั้น Fe และ ชั้น Al ₂ O ₃ ตามลำดับ	18
รูปที่ 2.14 โครงสร้างระบบจุลภาคในโหมดเบ็คสเก็ตเตอร์อิเล็กตรอน (BSE) ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม	19
รูปที่ 2.15 แผนภาพลักษณะการทำปฏิกิริยาของผิวเคลือบตั้งต้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SHS-centrifugation ของ Zhongze et al. (2005)	20
รูปที่ 2.16 ภาคตัดขวางของท่อขึ้นงานตัวอย่าง โดย (ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพจริง ของขึ้นงานตัวอย่าง เพื่อชี้ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุ	21

รูปที่ 2.17 (ก) แผนภาพลักษณะการทำงานของกระบวนการเคลือบผิว พร้อมภาคตัดขวางของ ชิ้นงานตัวอย่าง และ (ข) ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุผสม	22
รูปที่ 2.18 ท่อชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการของ Andreev และคณะ (2011)	23
รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง (ก) ก่อนทำปฏิกิริยา (ข) หลังทำปฏิกิริยา และ (ค) ผิวเคลือบวัสดุผสม	24
รูปที่ 2.20 แผนภาพขั้นตอนการก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ TiC-Al ₂ O ₃ -Fe ตามแนวแรง หมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง 25	
รูปที่ 2.21 ผล XRD (ก) และ โครงสร้างจุลภาคที่ระบุตำแหน่งของธาตุต่างๆ ของภาคตัดขวางผิว เคลือบวัสดุผสมระบบ TiC-Fe-Al ₂ O ₃ -TiAl/Ti ₃ Al (ข)	26
รูปที่ 2.22 เครื่องหล่อแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	26
รูปที่ 2.23 โครงสร้างจุลภาคในโหมด BSE ของผิวเคลือบ	27
รูปที่ 2.24 ภาคตัดขวางตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวิธีของ Arthur และ Robert (1977)	28
รูปที่ 2.25 แผนภาพชิ้นงานลักษณะกลวงที่ผ่านการเคลือบผิวภายใน	29
รูปที่ 2.26 แบบของเครื่องเคลือบผิวภายในท่อเมื่อมองจากทางด้านหน้า	30
รูปที่ 2.27 แบบของเครื่องผลิตท่อเหล็กกล้าวัสดุผสมจากมุมมองทางด้านขวามือ	30
รูปที่ 2.28 แผนภาพท่อเหล็กกล้าวัสดุผสมแบบมัดติ	31
รูปที่ 2.29 องค์ประกอบทางเคมีและ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบเซรามิกอะลูมินาที่เสริมความ เหนียวด้วย ZrO ₂	32
รูปที่ 2.30 แบบเครื่องมือสำหรับผลิตท่อวัสดุผสม	32
รูปที่ 2.31 แผนภาพภาคตัดขวางของผิวเคลือบเซรามิกบนท่อโลหะ	33
รูปที่ 2.32 แผนภาพเครื่อง 1400 type SHS centrifugal	33
รูปที่ 3.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา (a) Fe(Mn)WO ₄ (b) FeWO ₄ (c) B ₂ O ₃ และ (d) Al	37
รูปที่ 3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา (e) CaO ₂ (f) CaF ₂ และ (g) Fe ₂ O ₃	38
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานกรีน	43
รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุผสมด้วยกระบวนการปฏิกิริยา SHS	43
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า	46
รูปที่ 3.6 การวางชิ้นงานขณะทำการวัดความเรียบผิว	54

รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดสอบแรงกดเฉือน	56
รูปที่ 3.8 แผนภาพสรุปวิธีวิจัย	57
รูปที่ 4.1 สมดุลขององค์ประกอบของระบบสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.4)	59
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกิบส์ (ΔG) กับอุณหภูมิในทางทฤษฎี สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.4)	60
รูปที่ 4.3 สมดุลขององค์ประกอบของระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.5)	61
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกิบส์ (ΔG) กับอุณหภูมิในทางทฤษฎี สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผสมในระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.9)	62
รูปที่ 4.5 ลักษณะของสารผลิตภัณฑ์หรือวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ ก. (3.2) ข. (3.3) และ ค. (3.4)	65
รูปที่ 4.6 ลักษณะของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.5)	66
รูปที่ 4.7 ลักษณะของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ ก. (3.6) ข. (3.7) และ ค. (3.8)	67
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ ก. (3.9) ข. (3.10) ค. (3.11) และ ง. (3.12)	68
รูปที่ 4.9 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ (ก) 1500 rpm (ข) 1750 (ค) 2000 และ (ง) 2250 rpm	70
รูปที่ 4.10 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ (a) 1500 rpm (b) 1750 (c) 2000 และ (d) 2250 rpm	71
รูปที่ 4.11 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมดแบ็คสแกตเตอร์อิเล็กตรอน (BSE) ของบริเวณที่รับแรงกดเฉือนของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ (a) 1500 (b) 1750 (c) 2000 และ (d) 2250 rpm	73
รูปที่ 4.12 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE และปริมาณของธาตุต่างๆ ที่กระจายตัวอยู่ในผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm	74
รูปที่ 4.13 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm ด้วยกำลังขยาย 1000x: (ก) ชั้น α (ข) ชั้น α -rich และ (ค) ชั้น β	75

- รูปที่ 4.14 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm: (ก) ชั้น α (ข) ชั้น α -rich และ (ค) ชั้น β 76
- รูปที่ 4.15 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ โดยแปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว: ชนิด CaO_2 (ก) 1 (ข) 3 (ค) 5 โมล และชนิด CaF_2 (ง) 1 (จ) 3 (ฉ) 5 โมล 77
- รูปที่ 4.16 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อแปรค่าปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว ชนิด CaO_2 : (ก) 1 โมล (ข) 3 โมล และ (ค) 5 โมล 79
- รูปที่ 4.17 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อแปรค่าปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว ชนิด CaF_2 : (ก) 1 โมล (ข) 3 โมล และ (ค) 5 โมล 80
- รูปที่ 4.18 ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหลักที่ไม่เติมสารตัวเติมและเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaO_2 จำนวน 3 โมล 81
- รูปที่ 4.19 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคในโหมด BSE ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรอง 83
- รูปที่ 4.20 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ชนิด CaO_2 -Al โดยกำหนดการเติมที่ (ก) $n=0$ (ข) $n=1$ และ (ค) $n=2$ 83
- รูปที่ 4.21 ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่เติมสารตัวเติมคู่ชนิด CaO_2 -Al ที่ $n=0$ 1 และ 2 84
- รูปที่ 4.22 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ชนิด CaO_2 -Al ที่ $n=1$ และ 2 85
- รูปที่ 4.23 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด Fe_2O_3 -Al โดยกำหนดการเติมที่ $X=1$ 3 และ 5 86
- รูปที่ 4.24 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด Fe_2O_3 -Al โดยกำหนดการเติมที่ $X=0$ 1 3 และ 5 87
- รูปที่ 4.25 ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่เติมสารตัวเติมคู่ชนิด Fe_2O_3 -Al ที่ $X=0$ 1 3 และ 5 87
- รูปที่ 4.26 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด Fe_2O_3 -Al ที่ $X=1$ 89

- รูปที่ 4.27 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบ (ก) ไม่เติมสารตัวเติม และ (ข) เติมสารตัวเติมเดี่ยว ชนิด Ni จำนวน 1 โมล 90
- รูปที่ 4.28 ลักษณะของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ท่อเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 48 mm (ข) 33 mm และ (ค) 33 mm ที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด Fe_2O_3-Al ที่ $X=1$ 91
- รูปที่ 4.29 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ท่อเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 48 mm (ข) 33 mm และ (ค) 33 mm ที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด Fe_2O_3-Al ที่ $X=1$ 92
- รูปที่ 5.1 แผนภาพกลไกการก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสแตนบอร์ด (WB) 93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันประชากรภายในประเทศมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นความต้องการใช้สิ่งอุปโภคบริโภคต้องมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ไฟฟ้าและน้ำมัน เพื่อการใช้ชีวิตประจำวันและการเดินทางที่สะดวกสบายมากขึ้น อุตสาหกรรมการขุดเจาะน้ำมันและแก๊สธรรมชาติในประเทศของเราจึงมีความแพร่หลายมากขึ้น เพื่อรองรับความต้องการที่มีปริมาณมากขึ้นเหล่านี้ ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านนี้จะต้องมีการพัฒนาให้ก้าวหน้าไป เพื่อรองรับอัตราการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ นี้ การพัฒนาระบบการขนส่งน้ำมันและแก๊สธรรมชาติจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการขนส่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการผลิตได้โดยตรง เพื่อรองรับการขนส่งที่มากขึ้นนี้ การเลือกใช้ท่อสำหรับการนำส่งน้ำมันและแก๊สธรรมชาตินั้น จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีทั้งจากสารเคมีและแรงเชิงกลที่อุณหภูมิสูง ในระยะแรกการป้องกันการกัดกร่อนของท่อ ทำได้เพียงการป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมี โดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือรีดักชัน (Reduction) เท่านั้น ต่อมามีการกระบวนการเคลือบผิวเข้ามา โดยวัสดุที่นำมาเคลือบได้แก่ วัสดุจำพวกโลหะ (Metal) และโลหะผสม (Alloy) ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ทั้งจากสารเคมีและแรงเชิงกล แต่ด้วยความสามารถนี้ยังถือว่าไม่เพียงพอต่อการต้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมีและแรงเชิงกลที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการขนถ่ายน้ำมันดิบเป็นกรรมวิธีที่ความร้อนสูง จึงมีคิดค้นที่จะนำวัสดุจำพวกเซรามิกส์ (Ceramics) และวัสดุผสม (Composite) บางชนิดมาเป็นวัสดุเคลือบ แต่วัสดุจำพวกนี้มีอุณหภูมิ ณ จุดการหลอมเหลว (T_m) ค่อนข้างสูง จึงจำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและราคาค่อนข้างสูงตามไปด้วย เพื่อให้สามารถเคลือบวัสดุเหล่านี้บนผิวภายในท่อได้ดี เช่น เครื่องมือในการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา (Plasma spraying) และการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง (High velocity oxy-fuel spraying) เป็นต้น แต่เครื่องมือเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นปัจจุบันจึงเกิดการคิดค้นหาวิธีหรือกระบวนการที่จะช่วยลดต้นทุนการผลิตในส่วนนี้ลงมา คือ การศึกษาการขึ้นรูปท่อเซรามิกส์ เพื่อนำมาสวมปลอกภายในท่อโลหะ แต่กระบวนการนี้มีความยุ่งยากซับซ้อน เมื่อต้องการลดความซับซ้อนทางกระบวนการเหล่านี้ลงมา การหล่อโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal casting) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตผิวเคลือบ แต่เนื่องจากวัสดุจำพวกนี้มี T_m ค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องใช้ความ

ร้อนสูงและเวลายาวนานในการหลอมละลาย ก่อนถูกนำไปเคลือบผิว กระบวนการสังเคราะห์วัสดุผสมด้วยวิธีปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (SHS process) ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตวัสดุจำพวกเซรามิกส์ และวัสดุผสม จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับการหล่อแบบอาศัยแรงเหวี่ยง เกิดเป็นวิธีการเคลือบผิวชนิดใหม่ที่มีชื่อชื่อว่า "กระบวนการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal-SHS process)" ซึ่งสามารถตอบโจทย์ทุกข้อข้างต้นได้อย่างครบถ้วน

ดังนั้นในหัวข้องานวิจัยนี้จึงเลือกทำการศึกษาขั้นตอนการเคลือบผิววัสดุผสมลงบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้าด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS และลักษณะเฉพาะ พร้อมทั้งสมบัติบางประการของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ และเพื่อความโดดเด่นของงานวิจัย จึงนำแร่จำพวกอิลเมไนต์ (Ilmenite) และวุลเฟลมไมต์ (Wolframite) มาใช้เป็นสารตั้งต้นหลักแทนสารเคมีราคาสูงที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้าด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS
- 1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบวัสดุผสมที่เตรียมได้
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรชนิดต่างๆ และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสม
- 1.2.5 เพื่อเผยแพร่ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้เป็นประโยชน์แก่ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้าด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS
- 1.3.2 เตรียมผิวเคลือบวัสดุผสมจากเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากตัวแปรชนิดต่างๆ เช่น ระบบของสารตั้งต้น (Reaction) สัดส่วนของสารตั้งต้น (Ratio of reactants) สารตัวเติม (Additive) และค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยง (Rotational speed) เป็นต้น
- 1.3.3 อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรชนิดต่างๆ และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสม

1.3.4 ตรวจสอบลักษณะเฉพาะ เช่น โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และ องค์ประกอบทางเคมี (Phase) รวมถึงการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล เช่น ความหยาบของผิวเคลือบ (Surface roughness) ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบ (Adhesion strength)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงกระบวนการทำงานของกระบวนการกระบวนการ Centrifugal-SHS

1.4.2 ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสม

1.4.3 ทราบถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสม

1.4.4 นำความรู้พื้นฐานที่ได้จากงานวิจัยถ่ายทอดให้แก่ภาคอุตสาหกรรมที่มีความสนใจ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

1.4.5 นำความรู้พื้นฐานที่ได้จากงานวิจัยไปเผยแพร่ทั้งในรูปแบบของวารสารวิชาการและนำเสนอในที่ประชุมวิชาการทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.5.2 ห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยวิศวกรรมเซรามิกส์และวัสดุผสม สถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.5.3 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.5.4 ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีวิชัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

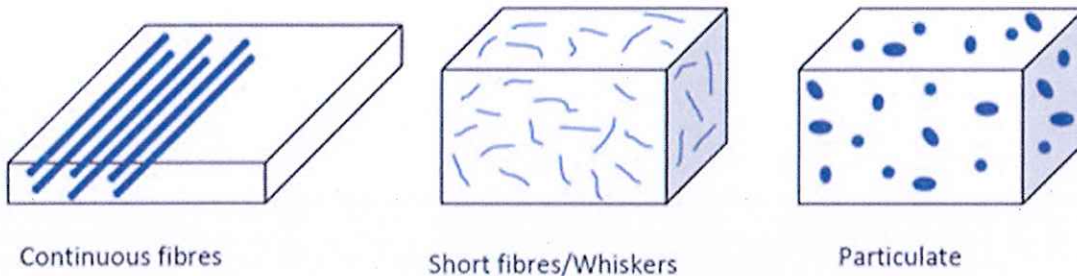
เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ผสมผสานกันระหว่างกระบวนการหล่อโลหะแบบบอาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal casting) และปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Self-propagating High-temperature Synthesis process; SHS) เข้าด้วยกันเพื่อเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสม (Composite materials) บนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจึงมีดังต่อไปนี้

2.1.1 วัสดุผสม (Composite materials)

วัสดุผสมเป็นของแข็งเชิงซ้อน ซึ่งประกอบด้วยวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าในระดับมหภาค วัสดุผสมจะถูกออกแบบเพื่อให้มีสมบัติที่ดีที่สุดหรือมีคุณภาพดีที่สุด การผสมวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าสังเคราะห์ทางกายภาพ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีเนื้อเดียว วัสดุผสมที่แท้จริงจะต้องมีเนื้อพื้น (Matrix) ล้อมรอบวัสดุเสริมแรง (Reinforcing materials) ซึ่งเป็นที่ที่ภาคสองภาคกระทำต่อกัน เพื่อให้มีสมบัติใหม่ที่แตกต่างกับสมบัติของสารแต่ละสาร ส่วนผสมหลักในวัสดุผสมจะไม่สูญเสียสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ไป การนิยามวัสดุผสมอย่างกว้างๆ ประกอบด้วยธรรมชาติในการเกิดวัสดุผสม เช่น ไม้ เช่นเดียวกับวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้น จุดประสงค์ของการผลิตวัสดุผสมขึ้นมาด้วยเหตุผลต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง หรือเพิ่มการรักษารูปทรง เพิ่มความเหนียวแน่น (ความแข็งแรงกระแทก) ทนอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพิ่มการทนต่อการสั่น ลดการซึมซับของก๊าซและของเหลว ปรับสมบัติทางไฟฟ้า (เช่น เพิ่มความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น) ลดราคา ลดการดูดซึมน้ำ ลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน เพิ่มการทนต่อสารเคมีและการกัดกร่อน ลดน้ำหนักของ รักษาความแข็งแรง/ความแข็งที่อุณหภูมิสูงในขณะที่อยู่ภายใต้ความเครียดในสิ่งแวดล้อมที่ผุกร่อน เพิ่มการใช้ครั้งที่สองและการนำกลับมาใช้ใหม่ ลดการทำลายสิ่งแวดล้อม และปรับปรุงแบบของการออกแบบให้หลากหลาย

การเสริมแรงในวัสดุผสมมีลักษณะต่างๆ กัน (รูปที่ 2.1) เช่น เส้นใยทออย่างต่อเนื่อง (Fiber) เส้นใยสั้น (Short fibers) /เป็นเกล็ด (Whiskers) และอนุภาค (Particulate) เป็นต้น

การจัดแบ่งชนิดสามารถจัดเป็นกลุ่มใหญ่ โดยจัดแบ่งตามชนิดของเนื้อพื้น กล่าวคือ เนื้อพื้นชนิดพอลิเมอร์ (Polymer) โลหะ (Metal) และเซรามิก (Ceramic) (เล็ก, 2540)

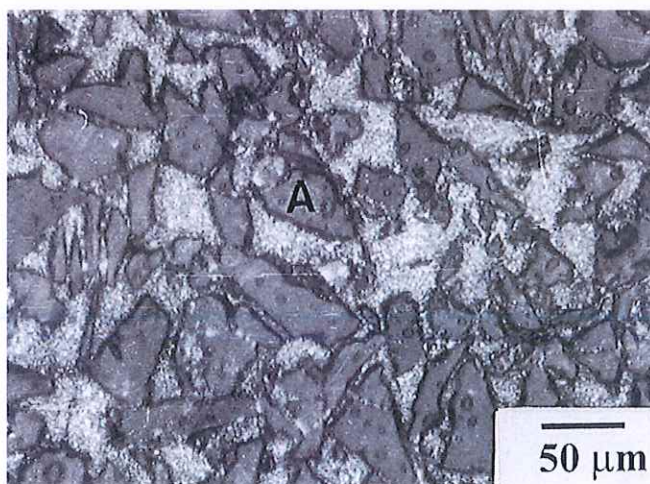


รูปที่ 2.1 ลักษณะต่างๆ ของการเสริมแรงในวัสดุผสม

(http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture1/1_2.htm)

วัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อพื้น (Metal matrix composites; MMCs)

วัสดุผสมชนิดนี้มีเนื้อพื้นเป็นโลหะ ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียม/อะลูมินา (Al/Al₂O₃) (รูปที่ 2.2) และอะลูมิเนียม/ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Al/SiC) (ตารางที่ 2.1) ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องหรือเส้นใยไม่ต่อเนื่องในรูปของอนุภาค จึงทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมาก เส้นใย SiC, Al₂O₃ และ Si₃N₄ จะเสริมแรงให้แก่เนื้อพื้นโลหะชนิดต่างๆ เช่น อะลูมิเนียม (Al) แมกนีเซียม (Mg) ไททาเนียม (Ti) และทองแดง (Cu) วิธีการโลหะวิทยา โลหะผง หรือวิธีการหล่อให้ของเหลวไหลซึม (Liquid-melt infiltration methods) จะใช้สำหรับสังเคราะห์ผงโลหะอนุภาคละเอียดและเกิดด้วยการผสม และทำให้แข็งตัวเพื่อผลิตองค์ประกอบที่มีรูปร่างใกล้เคียงกัน (เล็ก, 2540)



รูปที่ 2.2 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระบบ Al/Al₂O₃ (Nagendra et al., 1999)

ตารางที่ 2.1 สมบัติกายภาพของวัสดุผสมชนิด SiC และ Al₂O₃ ที่ฝังในโลหะ Al (เล็ก, 2540)

สมบัติ	Al/Al ₂ O ₃	Al/SiC
ปริมาณอนุภาคที่เติม (%)	50	55
ความหนาแน่น (g/cm ³)	3.2	2.9
ความแข็งแรงดึง (MPa)	530	250
โมดูลัส (GPa)	160	200
ความยืด (%)	0.6	0.3
ความแข็งแรงอัด		
ความแข็งแรงสูงสุด	520	460
ความเหนียวแน่นแตกหัก (MPa.m ^{1/2})	900	490
ส.ป.ส. การขยายตัว (ppm/°C)	18.5	12
สภาพการนำความร้อน (W/m.K)	13.5	8.5

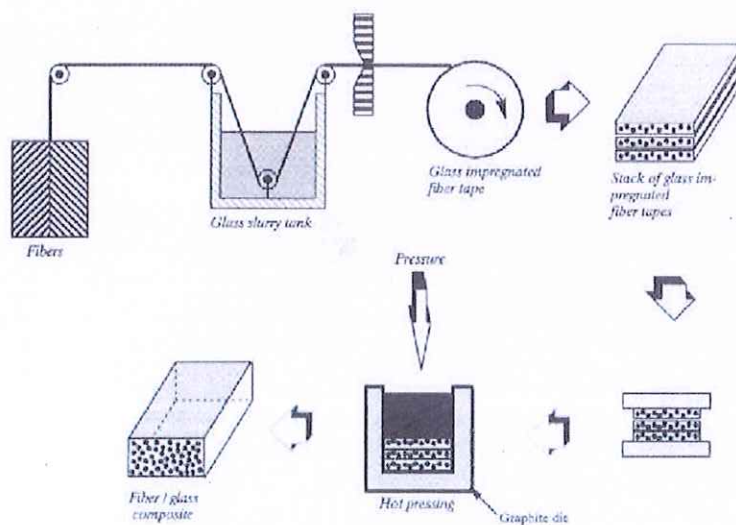
วัสดุผสมที่มีเซรามิกเป็นเนื้อพื้น (Ceramic matrix composites; CMCs)

วัสดุผสมชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายกับ MMCs เพียงแต่มีเนื้อพื้นเป็นวัสดุเซรามิก และวัสดุเสริมจำพวกแอลฟาอะลูมินา (α -Al₂O₃) แก้ว โบโรซิลิเกต SiC Si₃N₄ หรือ ZrO₂ เป็นต้น สมบัติของเซรามิกและเส้นใยเซรามิกที่ใช้ในระบบ CMCs แสดงดังตารางที่ 2.2 (เล็ก, 2540)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเซรามิกและเส้นใยในวัสดุผสมชนิด CMCs (เล็ก, 2540)

วัสดุ	ถ.พ.	โมดูลัส (GPa)	ความแข็งแรง (MPa)	CTE (10 ⁻⁶ /°C)	จุดหลอมเหลว (°C)
α -Al ₂ O ₃	3.95	380	200-310	8.5	2050
SiC	3.17	414	-	4.8	230-2500
Si ₃ N ₄	3.19	304	350-580	2.87	1750-1900
ZrO ₂	5.80	138	-	7.6	2500-2600
เส้นใย					
SiC (นิกาลอน)	2.55	182-210	2520-3290	-	-
SiC (SCS-6)	3.0	406	2100	-	-
Al ₂ O ₃ (Nextel-440)	3.05	189		-	-

ในการผลิต CMCs มีอยู่ 2 กลุ่ม คือ การทำให้อนุภาคผงแข็งตัว และกระบวนการทางเคมี ในกลุ่มแรกจะมีการทำขึ้นงานดิบ 2 ขั้นตอนและจะตามด้วยการอัดความร้อน เพื่อให้ได้รูปร่างในขั้นสุดท้าย (รูปที่ 2.3) การอัดร้อนจะกระทำที่อุณหภูมิ 1200-1600 °C ทำให้ขึ้นงานดิบมีความหนาแน่นมากขึ้น มีวิธีการหลายวิธีในการทำให้ขึ้นงานดิบ เช่น สำหรับเส้นใยต่อเนื่อง จะเตรียมโดยให้เส้นใยผ่านลงไปในของผสมเนื้อพื้นหรือคอลลอยด์ (Colloid) ของเนื้อพื้น เพื่ออบด้วยเรซิน จากนั้นก็ทำการตัดเป็นกลุ่มๆ และนำเข้าอัดความร้อนในบรรยากาศของความดัน ซึ่งอาจใช้ HIP (Hot isostatic pressing) หรือ VHP (Vacuum hot pressing) ก็ได้ อีกกลุ่มหนึ่งจะใช้กระบวนการทางเคมีในการเตรียม ได้แก่ วิธี CVI (Chemical vapor infiltration) และการเผาพอลิเมอร์ การทำ CVI จะกระทำที่อุณหภูมิที่ 1000-1200 °C ซึ่งจะต่ำกว่าวิธีการอัดร้อน SiC สามารถตกตะกอนบนเส้นใย SiC โดยการผ่านเมทิลไตรคลอโรไซเลน (Cl_3SiCH_3) บนเส้นใยในบรรยากาศของไฮโดรเจน (H_2) ที่ 1200 °C สำหรับวิธีการเผาพอลิเมอร์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกใช้พอลิเมอร์อินทรีย์ผลิตเซรามิก และขั้นตอนที่สอง จะเผาพอลิเมอร์ที่เหลือออกก็จะได้อเนกประสงค์เซรามิก (เล็ก, 2540)



รูปที่ 2.3 วิธีการผลิต CMC ด้วยกระบวนการทำให้อนุภาคแข็งตัว

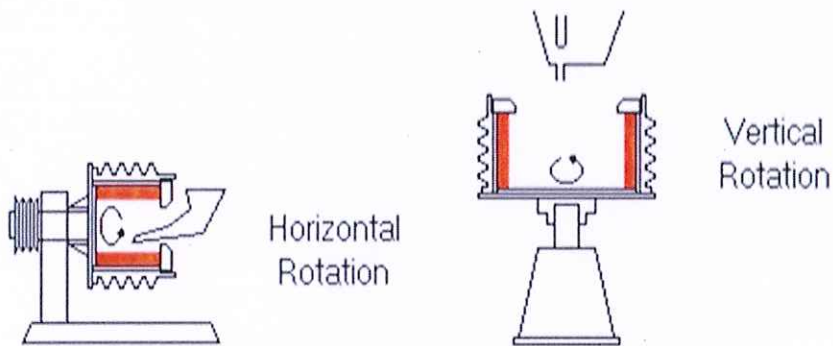
(<http://kansu.tripod.com/me451/2.html>)

2.1.2 การหล่อโลหะแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal casting)

หลักการของวิธีการหล่อโลหะแบบนี้ คือ การเทโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold) ที่กำลังหมุนด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ซึ่งอาจจะหมุนทั้งในแนวแกนนอน

และแกนตั้ง เมื่อโลหะเหลวได้ตามแม่พิมพ์ที่ต้องการแล้ว จะปล่อยให้แม่พิมพ์หมุนต่อไปจนกระทั่งโลหะเหลวเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูป 2.4 ความหนาของชิ้นงานที่หล่อได้ขึ้นอยู่กับอัตราการเทโลหะเหลว ชิ้นงานที่หล่อได้แยกตัวหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ผิวของชิ้นงานค่อนข้างหยาบ แต่ไม่ใช่ข้อเสีย เพราะหลังจากหล่อได้แล้วสามารถเคลือบตกแต่งผิวได้ ข้อดีของการหล่อแบบนี้ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้แกนกลาง (Core) เหมือนกับการหล่อโลหะแบบอื่นๆ ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นสูง จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี และความหนาของชิ้นงานสามารถควบคุมได้ง่ายๆ โดยการควบคุมปริมาณของโลหะเหลวที่เท (เสน่ห์, 2538)

ด้วยข้อดีของวิธีการหล่อโลหะแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้จึงถูกเลือกมาผสมผสานกับวิธีการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Self-propagating High-temperature Synthesis; SHS) เพื่อเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในท่อเหล็กกล้า ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 การหล่อโลหะแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

(<http://www.southwestcustom.com/centcast.html>)

2.1.3 การสังเคราะห์โดยการเผาไหม้ (Combustion synthesis)

แนวทางการสังเคราะห์วัสดุโดยการเผาไหม้ที่อาศัยปฏิกิริยาคายความร้อนสูง ปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีพลังงานแอกติเวชัน (Activation energy) สูง และสามารถสร้างความร้อนจากปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงด้วย เมื่อปฏิกิริยาได้ถูกเริ่มต้นขึ้น โดยการป้อนพลังงานจากภายนอกอย่างรวดเร็ว ความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกจากปฏิกิริยามีเพียงพอที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ด้วยตัวเอง ตัวทำปฏิกิริยาจึงถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว (10^3 ถึง 10^6 K/s) ไปสู่อุณหภูมิที่สูงมาก ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนอยู่ในสถานะเสมือนของปฏิกิริยาแอดิเยเบติก (Pseudo-

adiabatic) นั่นคือ พลังงานที่ปลดปล่อยออกจากปฏิกิริยาคายความร้อนทั้งหมดถูกใช้ไปกับการทำ ความความร้อนให้กับตัวอย่าง

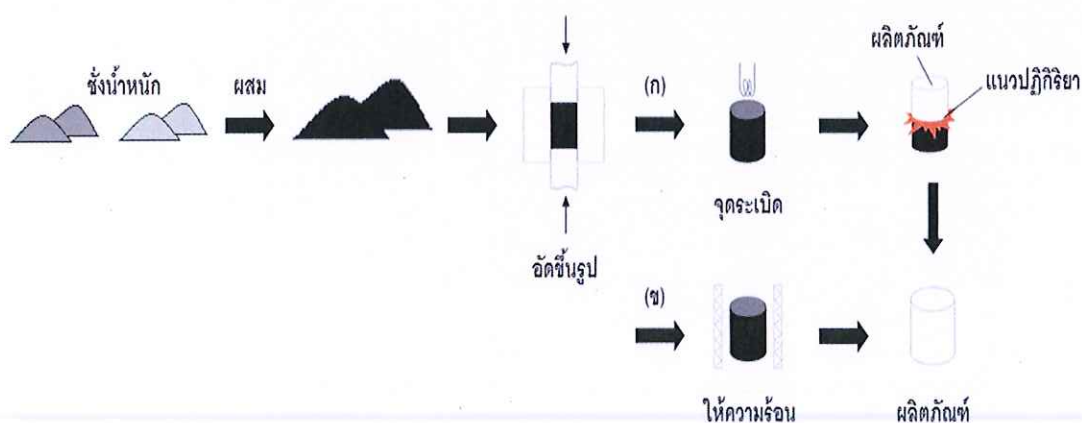
การสังเคราะห์โดยการเผาไหม้สามารถทำได้ 2 วิธี นั่นคือ โดยวิธีการก้ำวหน้าด้วยตัวเอง (Self-propagating mode) และวิธีการเผาไหม้พร้อมกัน (Simultaneous combustion mode) โดยที่ในสถานะความเป็นจริงแล้ว ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์โดยการเผาไหม้จะอยู่ระหว่างวิธีทั้งสอง

วิธีการก้ำวหน้าด้วยตัวเอง

วิธีการก้ำวหน้าด้วยตัวเองหรือที่นิยมเรียกว่า "กระบวนการปฏิกิริยาก้ำวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Self-propagating High-temperature Synthesis; SHS)" ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเริ่มต้นที่ปลายด้านหนึ่ง แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาก้ำวหน้าไปด้วยตัวเองผ่านส่วนผสมของตัวทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในรูปของคลื่นของการเผาไหม้ (Combustion wave) (รูปที่ 2.5 เส้นทาง ก) ในวิธีนี้ความร้อนของปฏิกิริยาที่ป้อนให้ถึงประมาณร้อยละ 90 ของความต้องการพลังงานในการสังเคราะห์

วิธีการเผาไหม้พร้อมกัน

วิธีการเผาไหม้พร้อมกันหรือสามารถเรียกได้ว่า "การระเบิดทางความร้อน (Thermal explosion)" หลังจากขึ้นงานตัวอย่างทั้งชิ้นถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิจุดระเบิด (Ignition temperature; T_{ig}) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันผ่านส่วนผสมของตัวทำปฏิกิริยา (รูปที่ 2.5 เส้นทาง ข) (สุธรรม, 2552)



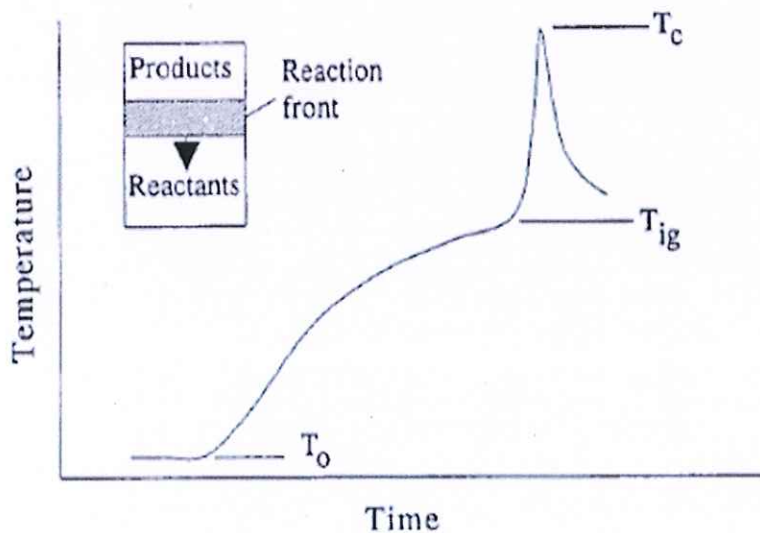
รูปที่ 2.5 แผนผังของกระบวนการวิธีการเผาไหม้ (เส้นทาง ก) และวิธีการเผาไหม้พร้อมกัน (เส้นทาง ข) (สุธรรม, 2552)

2.2.4 กระบวนการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Self-propagating

High-temperature Synthesis; SHS)

กระบวนการ SHS เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อผลิตวัสดุอุณหภูมิสูง เช่น วัสดุทนไฟ (Refractory) สารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) และวัสดุผสมเนื้อพื้น เซรามิก (Cermet) เนื่องจากมีข้อดีทางด้าน การประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม (Reza et al., 2013 และ An et al., 2015)

ปฏิกิริยา SHS เริ่มต้นเมื่อสารตั้งต้นถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_0) จนถึงอุณหภูมิการจุดระเบิด (T_{ig}) หรือจุดที่ปฏิกิริยาไม่ต้องการพลังงานเพิ่มเติมในการทำปฏิกิริยาแต่การเคลื่อนไหวของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยอุณหภูมิสูงสุดทางทฤษฎีของปฏิกิริยาหรือที่เรียกว่า "อุณหภูมิแอดิเบติก (T_{ad})" ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สมมติฐานที่ว่า ไม่มีการสูญเสียความร้อนของปฏิกิริยาไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยา (T_c) จะมีค่าต่ำกว่า T_{ad} เสมอ โดยปกติการเตรียมผงอัดของสารตั้งต้นจะกระทำภายใต้ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า T_0 ดังนั้นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่างๆ นี้กับเวลาจึงถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 (Moore และ Feng, 1995)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา สำหรับปฏิกิริยา SHS (Moore and Feng, 1995)

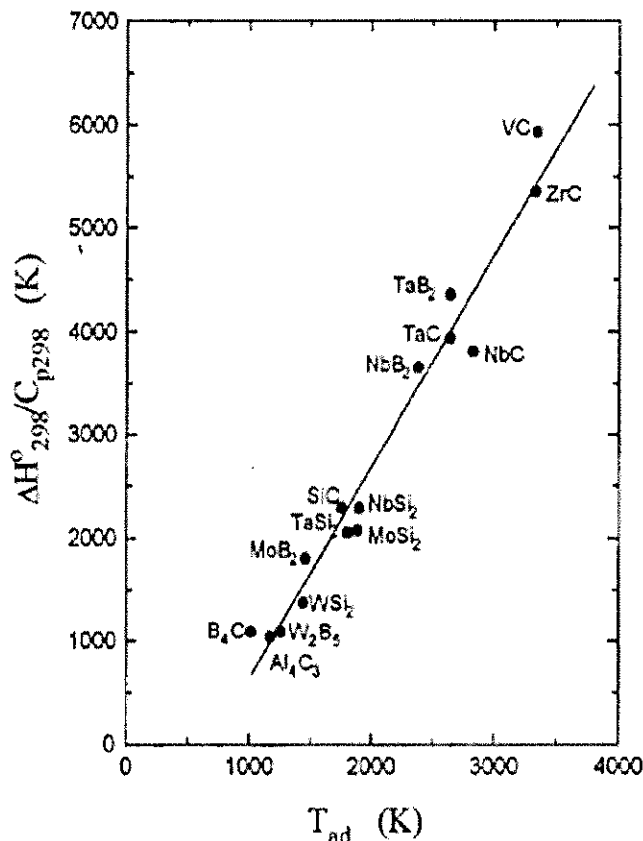
การคำนวณค่า T_{ad} ภายใต้สภาวะแอดิเบติก สามารถคำนวณได้จากสมการ ความสัมพันธ์ของเอนทาลปีของการก่อรูป (Enthalpy of formation, ΔH_f^0) ของสารประกอบ เป็นไปตามสมการที่ 2.1 (Moore และ Feng, 1995)

$$-\Delta H_T^0 = H_{T_{ad}} - H_T = \int_T^{T_{ad}} n C_p dT \quad (2.1)$$

โดยที่

- n คือ จำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้
 C_p คือ ค่าความจุความร้อน

โดยปกติค่า T_{ad} จากปฏิกิริยาของระบบสารต่างๆ จะมีค่าอยู่ที่ 1000-6000 K และ
 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_{ad} และ $\Delta H_{298}^0/C_p$ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง T_{ad} และ $\Delta H_{298}^0/C_p$ ของระบบสารต่างๆ ที่สามารถผลิตได้ด้วย
 กระบวนการ SHS (Moore and Feng, 1995)

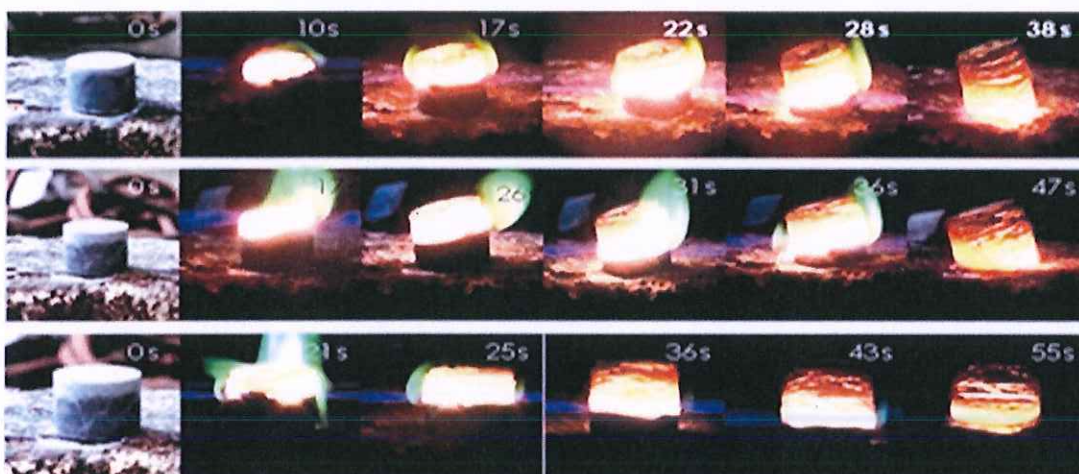
ในกรณีที่มีการเปลี่ยนเฟสในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นก่อนที่ชิ้นงานจะมีอุณหภูมิสูงถึง
 อุณหภูมิแอเดียแบติก (T_{ad}) ของสมการที่ 2.1 จะมีการเพิ่มเทอมของความร้อนแฝงของการเปลี่ยน
 เฟสลงไปด้วยดังแสดงในสมการที่ 2.2 (Moore and Feng, 1995)

$$\Delta H_T^0 + \int_T^{T_{ad}} \sum n C_p dT + \sum n L = 0 \quad (2.2)$$

โดยที่

n	คือ จำนวน โมลของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้
C_p	คือ ค่าความจุความร้อน
L	คือ ค่าเอนทาลปีของการเปลี่ยนเฟส
ΔH_T^0	คือ ค่าความร้อนของการก่อรูปที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งปกติค่าความร้อนของการก่อรูปมักจะใช้ที่อุณหภูมิห้อง ($T = 298 \text{ K}$) แต่สามารถคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ตามต้องการ ดังนั้นการคำนวณจากสมการที่ 2.2 สามารถบอกค่า T_{ad} ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ตามต้องการ ถึงแม้ว่าค่า T_{ad} ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจริงของปฏิกิริยา แต่ผลการคำนวณสามารถใช้เป็นครรชนีเพื่อบอกค่าอุณหภูมิของระบบที่จะทำการศึกษา และเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ ทั้งนี้ระบบที่มีค่า $T_{ad} > 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ จะสามารถเกิดปฏิกิริยา SHS ที่สามารถดำเนินไปจนตลอดทั้งชิ้นงานภายหลังการจุดระเบิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แต่ถ้าหากค่า $T_{ad} < 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ ชิ้นงานจะต้องได้รับการอุ่นจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการจุดระเบิดให้แก่ชิ้นงาน เพื่อเริ่มปฏิกิริยา SHS (Moore and และ Feng, 1995 และสุธรรม, 2552)



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเผาไหม้ของสารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ SHS (ธวัช, 2552)

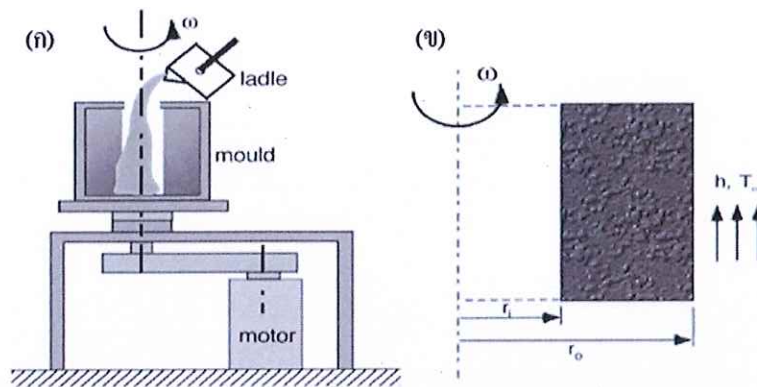
จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่า วัสดุผสมทั้งสองชนิด (MMCs และ CMCs) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ท่อเหล็กกล้าได้ดี แต่วิธีการผลิตแบบดั้งเดิมทำได้ค่อนข้างยากและมีต้นทุนการผลิตสูง ถ้าสามารถผสมผสานวิธีการหล่อโลหะแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและกระบวนการ SHS เข้าด้วยกันได้จริง ท่อเหล็กกล้าที่ผลิตได้นี้จะสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น เนื่องจากมีความแข็ง ความแข็งแรง และทนทานต่อการสึกกร่อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการดังกล่าวได้ในหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเริ่มจากการศึกษาหลักการทำงาน และตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะ โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหล่อ โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การนำกระบวนการ SHS เข้ามาใช้ควบคู่กับการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และกระบวนการ SHS ที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (SHS-centrifugation) ตามลำดับ

2.2.1 การหล่อโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal casting)

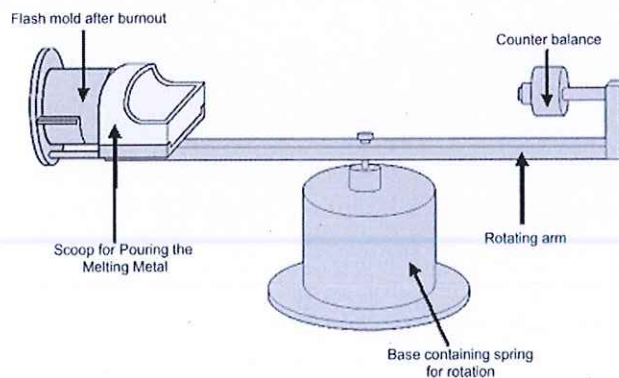
การนำโลหะผสมมาหลอมให้โลหะเหล่านั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันและอยู่ในสภาวะหลอมเหลว ก่อนถูกปล่อยให้เข้าสู่แบบหล่อ (Mold) ที่กำลังหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอยู่ เพื่อผลิตเป็นท่อชิ้นงานที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีและการสึกกร่อนจากแรงเชิงกลของผิวภายในของท่อโลหะ ดังเช่นในงานวิจัยของ Gao และ Wang ที่ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุชนิดที่มีความจำเพาะในการนำไปใช้งาน (Functionally graded materials, FGMs) ด้วยกระบวนการหล่อที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งมีแผนภาพการทำงานของกระบวนการและความสัมพันธ์ของลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่ผลิตได้และแนวทางการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.9 (ก) และ (ข) ตามลำดับ (Gao and Wang, 2000)



รูปที่ 2.9 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ (ก) และความสัมพันธ์ของลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่ผลิตได้และแนวทางการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (ข) (Gao และ Wang, 2000)

จากการศึกษาของ Gao และ Wang พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตผิวเคลือบวัสดุผสม คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (Initial particle concentration) ขนาดของอนุภาค SiC ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) และอุณหภูมิสำหรับการหลอมสารตั้งต้น (Superheat) (Gao and Wang, 2000)

งานวิจัยของ Humberto และคณะ (2008) ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผสม MMC ชนิดที่มีความจำเพาะในการนำไปใช้งานระบบ Al-Mg / อะลูมิเนียมไดโบไรด์ (AlB_2) โดยศึกษาผลกระทบของสัดส่วนของ โบรอน (B) ต่อค่าความแข็ง (Hardness) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) เริ่มจากการสร้างแบบหล่อ (Mold) เซรามิกในแบบหล่อขี้ผึ้งให้มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ เมื่อแบบหล่อเซรามิกแข็งตัวสมบูรณ์ดีแล้ว จึงทำการละลายขี้ผึ้งออกโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลานาน 30 นาที หลังจากนั้นนำแบบหล่อนี้ไปใช้ในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องมือที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพเครื่องมือสำหรับกระบวนการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของ Humberto และคณะ (2008)

การหล่อขึ้นงานตัวอย่างเริ่มจากการเทสารตั้งต้นตามการแปรค่าปริมาตรของ B ที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวลงไปแบบหล่อที่อุณหภูมิ 850 °C เมื่อได้ขึ้นงานตัวอย่างออกมาแล้วจึงนำไปทดสอบความแข็งที่ผิวและทดสอบความต้านทานการสึกหรอ จากการศึกษพบว่าปริมาณของโบรอนมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยปริมาตรของ AlB_2 และการกระจายตัวของอนุภาคบอไรด์ (Borides) เป็นไปตามแนวรัศมีของแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุผสมนี้จึงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือการกระจายตัวของอนุภาคบอไรด์นั่นเอง

จากงานวิจัยข้างต้นทั้งสองจะเห็นได้ว่า ขั้นตอนการผลิตค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างนาน เนื่องจากวัสดุผสมชนิด MMCs และ CMCs มีจุดหลอมเหลว (T_m) ที่ค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องมีการให้ความร้อนสูงเป็นเวลานาน เพื่อหลอมเหลววัตถุดิบเหล่านี้ให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปเข้ากระบวนการขึ้นรูปได้ ซึ่งเมื่อต้องเตรียมวัตถุดิบและขึ้นรูปขึ้นงานที่อุณหภูมิสูง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จึงต้องมีประสิทธิภาพที่ดีและสามารถทนทานอุณหภูมิที่สูงนี้ได้ ซึ่งหมายถึงต้นทุนการผลิตจะต้องมีค่าสูงขึ้นไปด้วย จึงมีการพัฒนากระบวนการดังกล่าวนี้โดยการนำกระบวนการ SHS เข้ามาใช้ร่วมด้วย

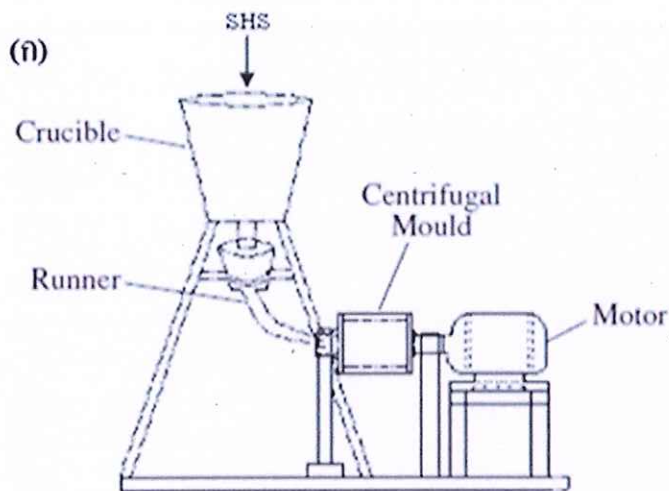
2.2.2 การนำกระบวนการ SHS เข้ามาใช้ควบคู่กับการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนี

ศูนย์กลาง

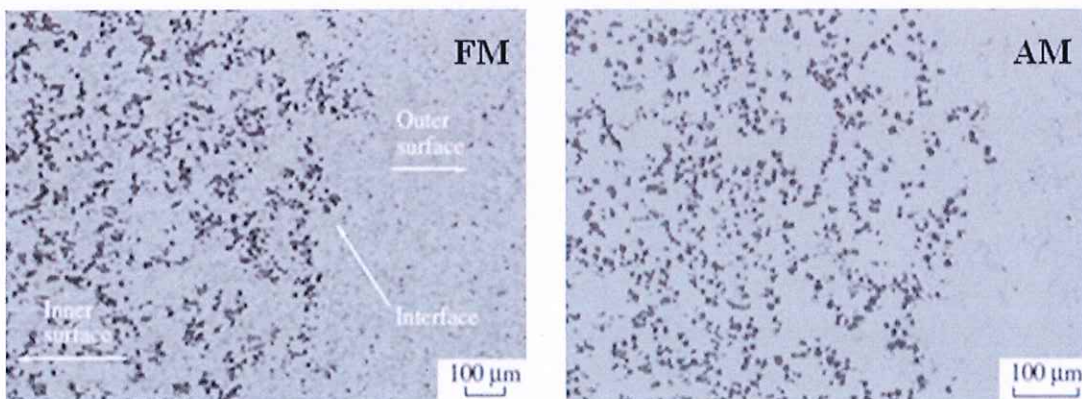
จากข้อเสียเปรียบของวิธีการข้างต้นจึงมีการนำกระบวนการ SHS เข้ามาประยุกต์ใช้ควบคู่กับการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแบบดั้งเดิมดังงานวิจัยของ Gowtam และคณะ (2008) ซึ่งทำการศึกษการสังเคราะห์และขึ้นรูปวัสดุผสมชนิดที่มีความจำเพาะในการนำไปใช้งานระบบที่มีเนื้อพื้นเป็น Fe และวัสดุเสริมแรงเป็น TiC สารตั้งต้นที่นำมาใช้ ได้แก่ Fe_2O_3 , TiO_2 , C และ Al โดยเริ่มการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยการอุ่นสารตั้งต้นที่ผ่านการผสมมาแล้วด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง และจุดระเบิดเพื่อเริ่มปฏิกิริยา SHS เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นลง สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ วัสดุผสมระบบ Fe-TiC- Al_2O_3 หลังจากนั้นสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้นี้จะถูกแบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนด้วยถ้วยเซรามิก (Crucible) เพื่อกรอกเอาส่วนของ Al_2O_3 ไว้ และปล่อยให้เฉพาะส่วนของวัสดุผสม Fe-TiC ไหลเข้าสู่แบบหล่อเหล็กกล้า (Centrifugal steel mold) ที่กำลังหมุนอยู่ เพื่อหล่อเป็นผิวเคลือบภายในท่อดังแผนภาพในรูปที่ 2.11 (ก)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองระบบ โดยระบบแรก คือ ระบบที่มีเหล็กเฟสเฟอร์ริติก (Ferritic) เป็นเนื้อพื้น โดยให้ชื่อว่า "FM"

และระบบที่สองที่ชื่อว่า "AM" เนื่องจากมีเหล็กเฟสออสทิไนต์ (Austenitic) เป็นเนื้อพื้น พบว่า โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมทั้งสองระบบมีลักษณะดังรูปที่ 2.11 (ข) และผลการ ทดสอบความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอพบว่า ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอ ของผิวเคลือบวัสดุผสมทั้งสองระบบดีกว่าผิวเคลือบดั้งเดิมที่ไม่มีการเสริมแรงด้วย TiC โดยผิว เคลือบวัสดุผสมระบบ FM จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ AM แต่ผลกลับ ตรงกันข้ามกันในศึกษาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ



(ข)



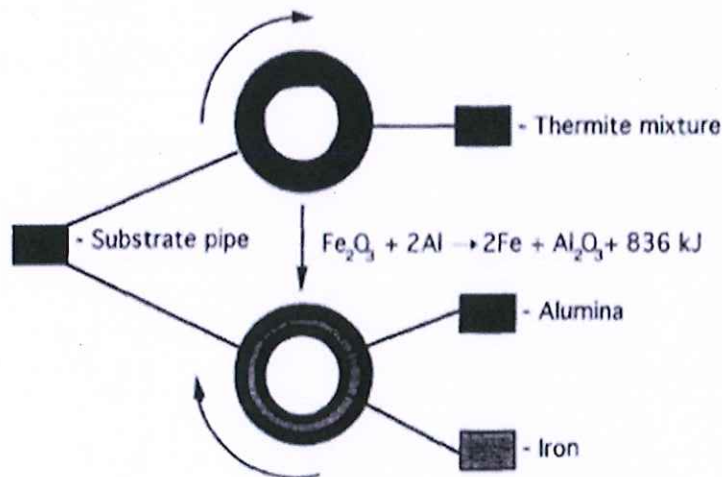
รูปที่ 2.11 (ก) แผนภาพการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ Fe-TiC ด้วยกระบวนการหล่อ โลหะที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางควบคู่กับกระบวนการ SHS และ (ข) โครงสร้างจุลภาค ของผิวเคลือบวัสดุผสม (Gowtam et al., 2008)

จากการนำกระบวนการ SHS มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยง หนีศูนย์กลางข้างต้นแสดงให้เห็นชัดเจนว่า กระบวนการเคลือบผิววัสดุผสมนี้ยังคงมีความซับซ้อน อยู่ ต่อมาจึงมีการนำกระบวนการทั้งสองบูรรวมกันเป็นกระบวนการปฏิริยาค้าวหน้าด้วยตัวเองที่

อุณหภูมิสูงที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (SHS-centrifugation) เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานท่อที่มีผิวภายในเป็นวัสดุผสมเสร็จสิ้นได้ในขั้นตอนเดียว

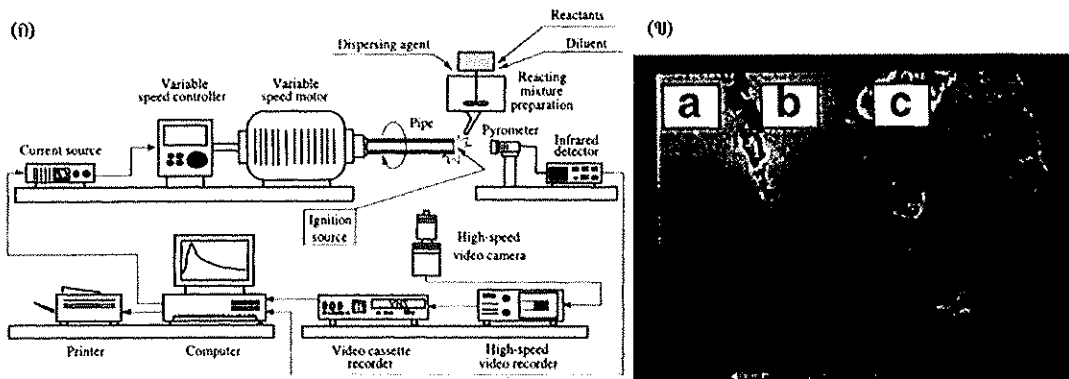
2.2.3 กระบวนการ SHS-centrifugation

เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนลงมาจึงมีพยายามคิดค้นกระบวนการเคลือบผิววัสดุผสมชนิดใหม่ขึ้นมา โดยการบูรรวมกันของกระบวนการ SHS และการหล่อที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังในงานวิจัยของ Roberto และคณะ (1996) ซึ่งเขาเรียกกระบวนการนี้ว่า "กระบวนการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (SHS-centrifugation)" และคาดหวังว่าผิวเคลือบวัสดุผสม Fe และ Al_2O_3 จะมีลักษณะการก่อรูปดังแผนภาพในรูปที่ 2.12 ด้วยความแตกต่างในความหนาแน่นของสารผลิตภัณฑ์แต่ละเฟสจะได้ผิวเคลือบวัสดุผสมที่แบ่งเป็นสองชั้น โดยชั้นแรกเป็น Al_2O_3 และชั้นที่สองเป็น Fe



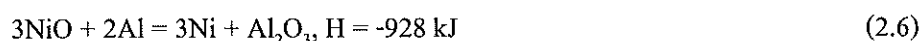
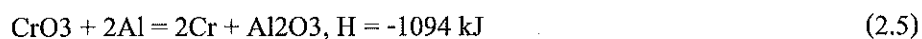
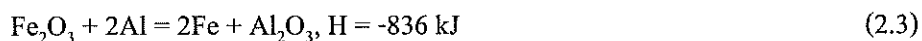
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงลักษณะการก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SHS-centrifugation (Roberto et al., 1996)

โดยกระบวนการ SHS-centrifugation มีลักษณะการทำงานของเครื่องมือต่างๆ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.13 (ก) จากการทดลองทั้งหมด พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะค่อนข้างดี (รูปที่ 2.13 (ข)) และตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อ การสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม คือ ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่คงที่และใช้เวลาในการหมุนเหวี่ยงที่นานขึ้น เฟสโลหะ (M) จะมีปริมาณมาก นั่นคือ ชั้นของผิวเคลือบจะสามารถแยกกันได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

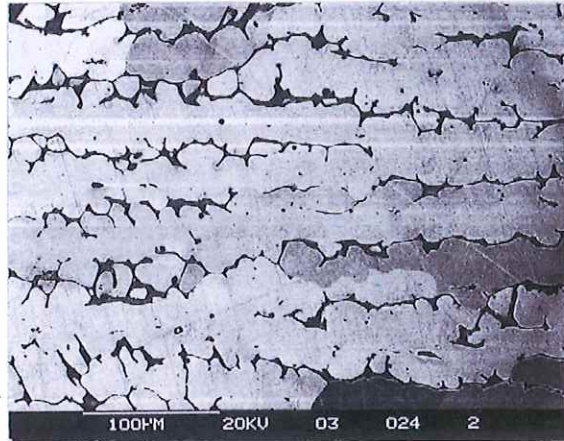


รูปที่ 2.13 (ก) แผนภาพระบบการทำงานของกระบวนการ SHS-centrifugation และ (ข) ภาพกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุผสมระบบ Fe-Al₂O₃ โดยภาพกล้องจุลทรรศน์ a b และ c เป็นวัสดุฐาน ชั้น Fe และ ชั้น Al₂O₃ ตามลำดับ (Roberto et al., 1996)

งานวิจัยของ Wenjun และคณะ (2003) ศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตด้วยกระบวนการ SHS-Centrifugation ขึ้นตอนการศึกษาเริ่มจากการชั่งตวงผง Al Fe₂O₃ โครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) โครเมียมไตรออกไซด์ (CrO₃) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ตามสัดส่วนดังสมการที่ 2.3-2.6 บดผสมให้เข้ากัน นำผงสารตั้งต้นนั้นเทลงในท่อแม่พิมพ์ (Pipe mold) และติดตั้งท่อแม่พิมพ์บนเครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และจุดระเบิดเพื่อเริ่มปฏิกิริยา SHS ด้วยขดลวดทังสเตน (W) ในขณะที่ท่อแม่พิมพ์ถูกหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดไว้ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างสมบูรณ์และเย็นตัวลง จึงนำท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่สังเคราะห์ได้ออกมาจากท่อแม่พิมพ์ และนำไปอบละลาย (Solution treatment) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °C เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ได้ทดลองแปรค่าการเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) ลงไปในระบบสารตั้งต้นด้วย เพื่อเพิ่มสมบัติการไหลตัวของเฟสผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว



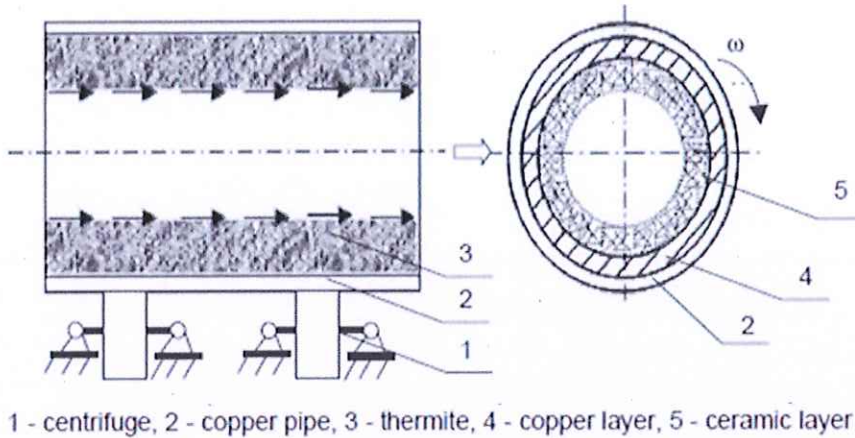
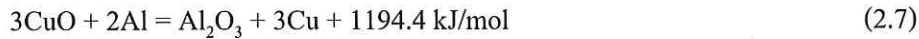
จากการศึกษาข้างต้น พบว่า ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการ SHS-centrifugation (รูปที่ 2.14) และการอบละลายสามารถเพิ่มความแข็งแรงดึงและความเหนียวให้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมได้จริง



รูปที่ 2.14 โครงสร้างระบบจุลภาคในโหมดแบ็กสแกตเตอร์อิเล็กตรอน (BSE) ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Wenjun et al., 2003)

งานวิจัยของ Zhongze และคณะ (2005) ศึกษาการเคลือบวัสดุผสมเซรามิกสับบนผิวภายในของท่อทองแดง (Cu) ด้วยกระบวนการ SHS-centrifugation และศึกษาผลกระทบของชนิดสารตัวเติมเหล่านี้ ได้แก่ SiO_2 , CrO_3 , $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$, และ ZrO_2 ที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่น (Density) ความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Toughness) ของผิวเคลือบ

การศึกษาเริ่มจากการชั่งตวงสารตั้งต้นตามสัดส่วนในสมการที่ 2.7 และผสมสารตั้งต้นทั้งหมดเข้ากันก่อนบรรจุลงไปในท่อทองแดง หลังจากนั้นนำท่อทองแดงติดตั้งบนเครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ขณะที่ท่อทองแดงถูกหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอยู่ด้วยความเร็วที่กำหนด สารตั้งต้นที่อยู่ภายในจะถูกอัดแน่นและเกาะบนผิวภายในของท่อทองแดงด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) จนกลายเป็นชั้นของผิวเคลือบตั้งต้น ต่อจากนั้นจึงทำการจุดระเบิดด้วยเปลวไฟออกซิ-อะเซทิลีน (Oxy-acetylene flame) ที่ปลายด้านหนึ่งของท่อทองแดง เพื่อให้ผิวเคลือบตั้งต้นเริ่มเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนและเผาไหม้ตัวเองจากปลายด้านที่จุดระเบิด และลุกลามด้วยตัวเองต่อไปตลอดทั้งผิวเคลือบตั้งต้น ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดของปฏิกิริยาที่เรียกกันว่า "ปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (SHS)" ซึ่งลักษณะการเกิดปฏิกิริยา SHS ของผิวเคลือบตั้งต้นที่กล่าวมาข้างต้นมีเส้นทางดังรูปที่ 2.15

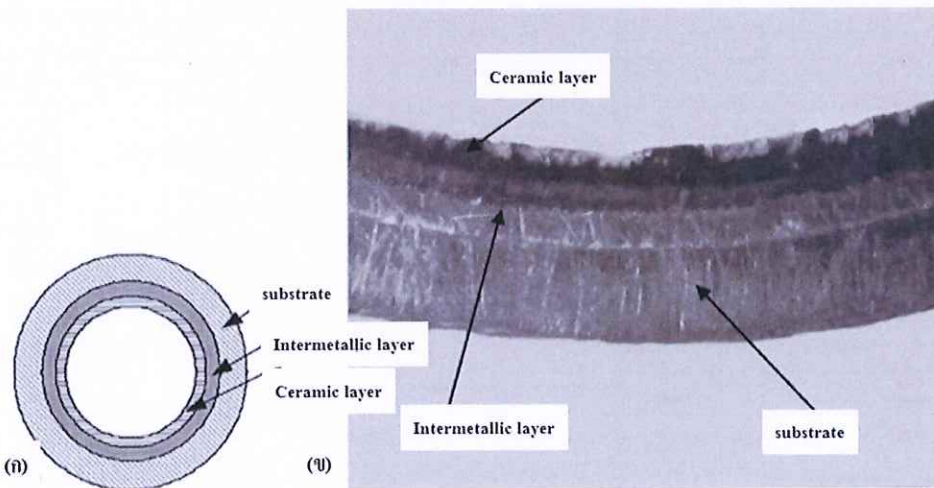


รูปที่ 2.15 แผนภาพลักษณะการทำปฏิกิริยาของผิวเคลือบตั้งต้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SHS-centrifugation ของ Zhongze et al. (2005)

จากการศึกษา พบว่า ปฏิกิริยาของระบบสารตั้งต้นที่เกิดขึ้นคายความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงมากจนทำให้สารผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ได้อยู่ในสภาวะหลอมเหลว ซึ่งส่งผลดีต่อความหนาแน่น ความต้านทานการกัดกร่อน และความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบเซรามิก แต่จะต้องควบคุมความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้มีความเหมาะสมกันด้วย และสำหรับการแปรค่าการเติมสารตัวเติม SiO_2 และ CrO_3 ช่วยลดปริมาณและขนาดของรูพรุนบนผิวเคลือบ นั่นคือ สารตัวเติมทั้งสองนี้ช่วยเพิ่มความหนาแน่น (Density) ให้แก่ผิวเคลือบ การเติม $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงกดแบบแรงเฉือน (Shear-compressive strength) ให้ผิวเคลือบ แต่เมื่อเติมในสัดส่วนที่มากกว่าร้อยละ 4 จะทำให้ความแข็งแรงนี้มีค่าลดลง และการเติม ZrO_2 ช่วยเพิ่มความเหนียว (Toughness) ให้แก่ผิวเคลือบ สุดท้ายจากการศึกษานี้ พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมเซรามิกส์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพที่ดีและสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับท่อทองแดงแบบดั้งเดิม

งานวิจัยของ Meng และคณะ (2007) ศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบวัสดุผสมหลายชั้นที่เตรียมจากกระบวนการ SHS-centrifugation เพื่อผลิตผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 82 mm ความหนา 5 mm และความยาว 200 mm ซึ่งจะต้องทำการกำจัดสนิมและคราบน้ำมันออกเสียบนผิวภายในของท่อชิ้นงานตัวอย่างก่อนนำไปใช้ในการทดลอง จากนั้นปิดหัวและท้ายของท่อด้วยแท่งแกรไฟต์ เพื่อป้องกันการไหลออกของสารผลิตภัณฑ์ขณะอยู่ในสภาวะหลอมเหลว ทำการเจาะรูด้านหนึ่งของท่อชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อ

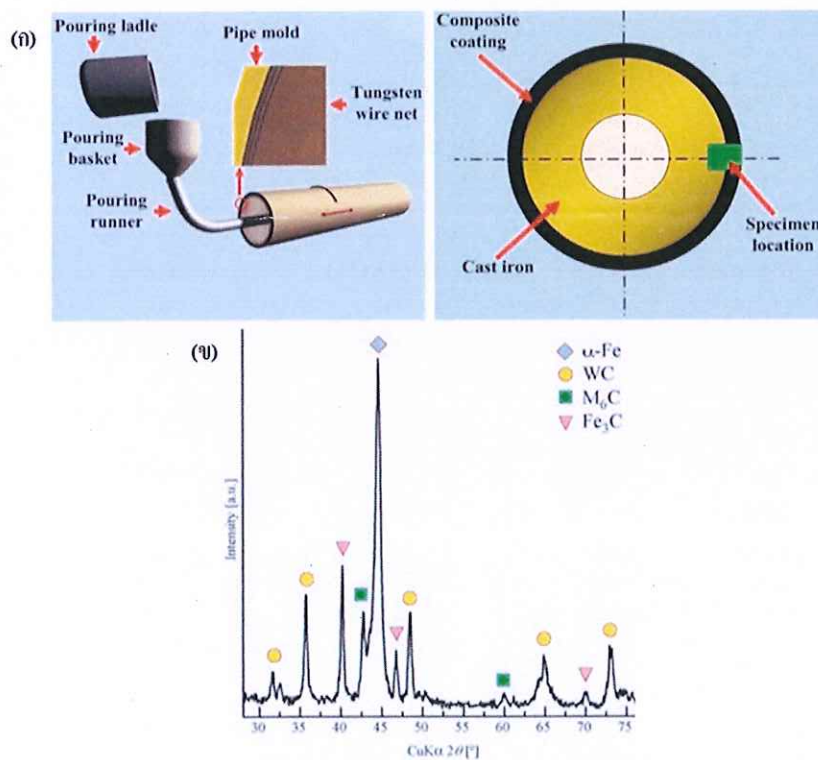
ใช้วัสดุอนุหุมิของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อ และเป็นช่องทางสำหรับปล่อยแก๊สบางส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยากันของระบบสารตั้งต้นเดินทางออกไป สารตั้งต้นที่ใช้ ได้แก่ Al , Fe_2O_3 , CrO_3 และสารตัวเติมที่ใช้ ได้แก่ Ni , Ti และ B_4C นอกจากนี้มีการเติม $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ สำหรับใช้เป็นฟลักซ์ (Flux) ดักจับตะกอนที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นด้วย และหลังการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมได้โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 1,960 รอบต่อนาที (rpm) พบว่า ผิว คือ ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic layer) ที่ประกอบด้วย อะลูมิเนียมเหล็ก (AlFe) / อะลูมิเนียมโครเมียมเหล็ก (AlCrFe) / นิกเกิลเหล็ก (NiFe) และชั้นบน คือ ชั้นที่มีเฟสเซรามิกหลายชนิด (Multiphase ceramic layer) ซึ่งประกอบด้วย Al_2O_3 , TiO_2 และ TiC และผลกระทบจากการเติม Ni , Ti และ B_4C คือ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกด (Compressive strength) ของผิวเคลือบวัสดุผสมดีขึ้นและสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จากกระบวนการ SHS ที่อาศัยการแยกเฟสด้วยแรงโน้มถ่วง (SHS gravitational separation process, SHS G-S process)



รูปที่ 2.16 ภาคตัดขวางของท่อชิ้นงานตัวอย่างโดย (ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพจริง ของชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อชี้ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุ (Meng et al., 2007)

งานวิจัยของ Libin และคณะ (2010) ศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) /เหล็ก (Fe) บนผิวภายในของท่อเหล็กหล่อเทาด้วยกระบวนการ SHS-centrifugation โดยวัตถุดิบที่ใช้ คือ ลวดทังสเตน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 mm) และเหล็กหล่อเทา ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของธาตุทังสเตน (W) เหล็ก (Fe) และคาร์บอน (C) ตามลำดับ การทดลองที่เกิดขึ้นมีขั้นตอน ดังนี้ 1. สานลวดทังสเตนให้เป็นตาข่ายและม้วนให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กหล่อเทาตัวอย่าง 2. สอดลวดทังสเตน

ที่เตรียมไว้นี้เข้าไปในท่อเหล็กหล่อเทาตัวอย่าง โดยจัดให้ตาข่ายทั้งสแตนเลสกับผนังของท่อเหล็กหล่อเทาให้ได้มากที่สุด 3. ติดตั้งท่อขึ้นงานตัวอย่างบนเครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและใช้ค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 1,340 rpm และ 4. เทเหล็กหล่อเทาที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวเข้าสู่ท่อเหล็กหล่อเทาตัวอย่างที่กำลังถูกหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยความเร็วคงที่อยู่ ดังรูปที่ 2.17 (ก) และจากการศึกษา พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยเหล็กเฟสแอลฟา (α -Fe) ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) สารประกอบของคาร์ไบด์ (M_6C) และเหล็กไตรคาร์ไบด์ (Fe_3C) ดังผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ในรูปที่ 2.17 (ข) และจากผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีพินออนดิสก์ (Pin on disk) พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่าความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าผิวเคลือบวัสดุผสมที่ไม่มีการเสริมแรงด้วย WC (Libin et al., 2010)



รูปที่ 2.17 (ก) แผนภาพลักษณะการทำงานของกระบวนการเคลือบผิว พร้อมภาคตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง และ (ข) ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุผสม (Libin et al., 2010)

งานวิจัยของ Andreev และคณะ (2011) ศึกษาการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่ออะลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่ในการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมเหล็กและเซรามิกส์

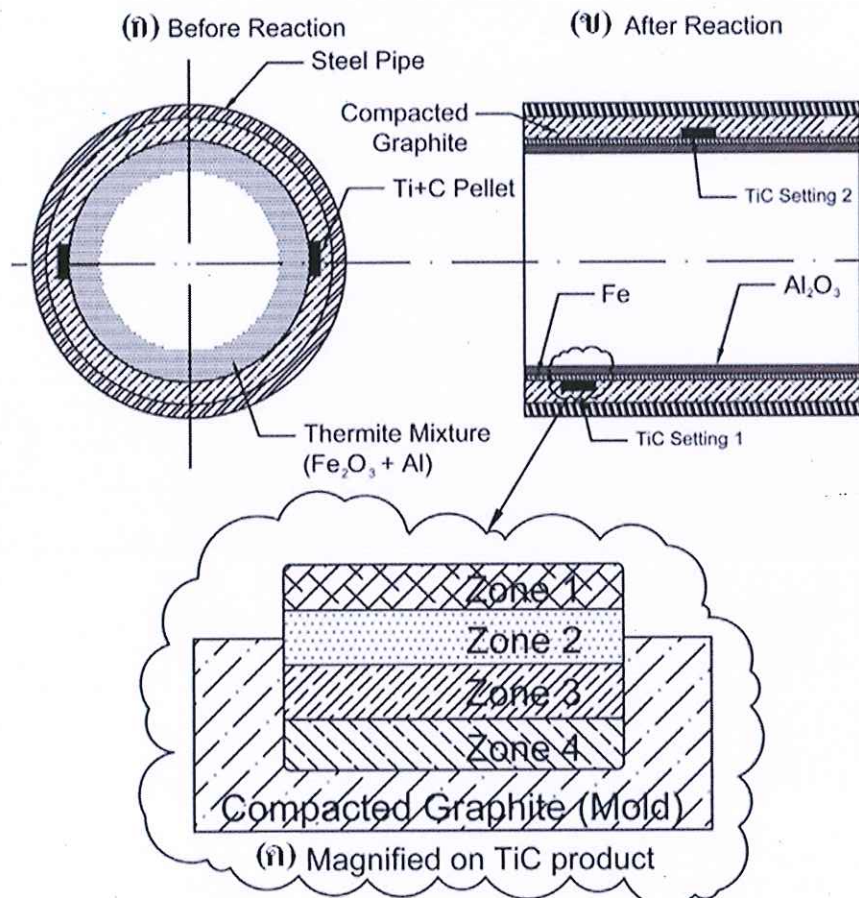
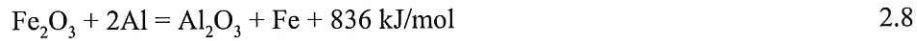
(Cermet) ด้วยกระบวนการ SHS-centrifugation โดยนำผงเหล็กออกไซด์ (Fe_xO_y) มาผสมกับผง Al ที่ได้มาจากกากของเสียข้างต้น เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการเคลือบผิวเป็นผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการเตรียมอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยการกำจัดน้ำมันและพาราฟินออกจากกากของเสียที่นำมาใช้ และนำไปให้ความร้อนด้วยวิธีการแคลไซน์ (Calcine) โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300-350 °C เป็นเวลานาน 2-3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผงอะลูมิเนียมที่ได้ไปคัดขนาดและเลือกเอาอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 400 μm มาใช้เป็นผงสารตั้งต้นในกระบวนการเคลือบผิววัสดุผสม โดยการศึกษาทำการแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ 20-3,000 rpm ปริมาณของสารตั้งต้นตั้งแต่ 3-3,000 กรัม และชนิดของสารเติม (Cr_2O_3 , SiO_2 , CaO , CaO_2 , MgO และแกรไฟต์ (graphite) จากการศึกษาค้นคว้าได้ข้อสังเกตอย่างลักษณะดังรูปที่ 2.18 ค่าความเร็วที่เหมาะสมอยู่ที่ 80 ± 5 g (g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก) และสารตัวเติมชนิด CaO , CaO_2 และ MgO ไม่เหมาะกับระบบการสังเคราะห์นี้ และผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี สุดท้ายจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า กระบวนการ SHS-centrifugation นี้สามารถนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมการหล่ออะลูมิเนียมกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีกครั้ง ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิตผิวเคลือบวัสดุผสมลงไปได้มาก



รูปที่ 2.18 ท่อชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการของ Andreev และคณะ (2011)

งานวิจัยของ Reza และคณะ (2013) ศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมจำเพาะการใช้งานชนิด $TiC-Al_2O_3-Fe$ ด้วยกระบวนการ SHS-centrifugation เช่นกันแต่เขาให้ชื่อว่า "Centrifugal SHS" การศึกษาเริ่มจากการเตรียมสารตั้งต้นตามสัดส่วนในสมการที่ 2.8 และบดผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องบดเพลเนทารี (Planetary ball mill) เป็นเวลา 4 ชม. เตรียมสารตั้งต้นอีกชุดหนึ่งตามสัดส่วนในสมการที่ 2.9 โดยการอบแห้งเป็นเวลา 8 ชม. ที่อุณหภูมิ 150 °C ก่อนบดผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องบดเพลเนทารี เตรียมชิ้นงานตัวอย่างโดยการอัดแกรไฟต์เข้าไปในท่อเหล็กกล้า

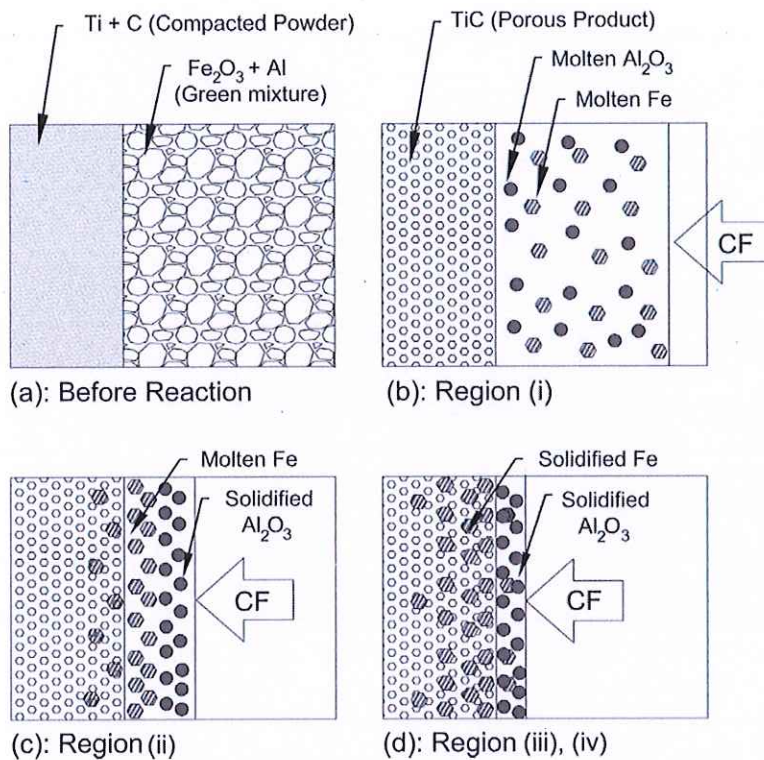
คาร์บอน ก่อนเติมสารตั้งต้นทั้งสองชุดเข้าไปให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.19(ก) และติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างบนแม่พิมพ์ในเครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ก่อนจุดระเบิดเริ่มปฏิกิริยา SHS ด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากเครื่องเชื่อม TIG ในขณะที่ชิ้นงานตัวอย่างหมุนด้วยความเร็วที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง (ก) ก่อนทำปฏิกิริยา (ข) หลังทำปฏิกิริยา และ (ค) ผิวเคลือบวัสดุผสม (Reza et al., 2013)

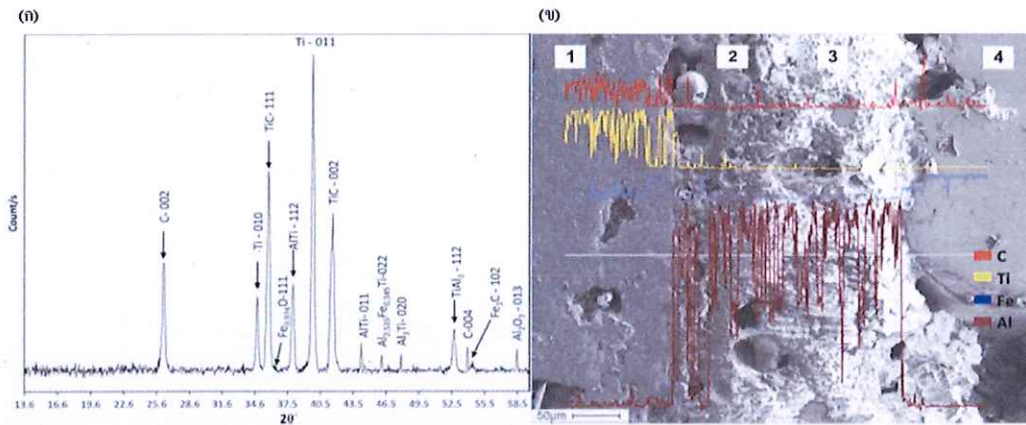
จากการศึกษาของเขา พบว่า การก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}$ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 เมื่อปฏิกิริยาของส่วนผสมตั้งต้นชุดแรกเริ่มเกิดขึ้น จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็น Fe และ Al_2O_3 ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งต่อไปให้ส่วนผสมตั้งต้นชุดที่สองเกิดผลิตภัณฑ์เป็น TiC ที่มีรูพรุน (รูปที่ 2.20(b)) ขั้นตอนที่ 2 ด้วยแรงเหวี่ยงหนี

ศูนย์กลางจึงส่งผลให้เกิดการแยกชั้นของ Fe และ Al_2O_3 โดย Al_2O_3 ถูกผลักให้ลอยตัวขึ้นสู่ชั้นบนก่อน และค่อยๆ เริ่มแข็งตัว ชั้นตอนที่ 3 เมื่อความร้อนของระบบค่อยๆ ลดลง การแข็งตัวก็ค่อยๆ สมบูรณ์ขึ้น ผลลัพธ์ที่ถูกดูให้ไหลเข้าหาศูนย์กลางของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจึงค่อยๆ หยุดค้างอยู่ในบริเวณที่ไหลไปถึง (รูปที่ 2.20(c)) และชั้นตอนสุดท้ายผลิตภัณฑ์ทั้งหมดแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 2.20(d))



รูปที่ 2.20 แผนภาพขั้นตอนการก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ $TiC-Al_2O_3-Fe$ ตามแนวแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Reza et al., 2013)

ในปีถัดมา (2014) เขาได้พัฒนามาสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ $TiC-Fe-Al_2O_3$ -ไททาเนียมอะลูมิเนียม (TiAl/Ti₃Al) ด้วยวิธีการเดิม ซึ่งผิวเคลือบวัสดุผสมมีองค์ประกอบทางเคมีตรงตามเฟสผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (รูปที่ 2.21(ก)) มีลักษณะ โครงสร้างจุลภาคที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจน 3 ชั้น คือ ชั้น TiC ชั้น Al และ Fe ตามลำดับ (รูปที่ 2.21(ข)) และค่าความหนาผิวประมาณ $3.12 \mu m$



รูปที่ 2.21 ผล XRD (ก) และโครงสร้างจุดภาคที่ระบุตำแหน่งของธาตุต่างๆ ของภาคตัดขวางผิวเคลือบวัสดุผสมระบบ TiC-Fe-Al₂O₃-TiAl/Ti₃Al (ข) (Reza et al., 2014)

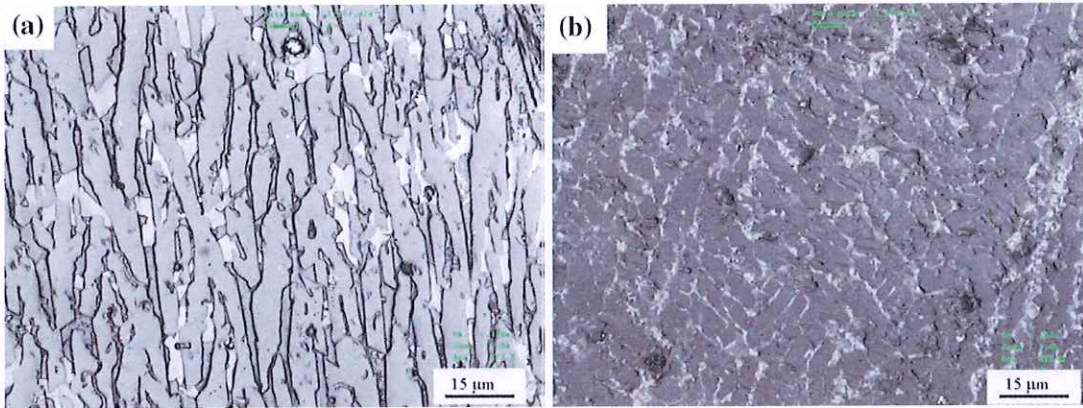
งานวิจัยของ An และคณะ (2015) ศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมระบบเซอร์โคเนียฟอสเฟตลูมินา (ZTA) ด้วยวิธีการที่เขาเรียกเรียกว่า "Centrifugal-SHS" และใช้ส่วนผสมตั้งต้นหลักตามสมการที่ 2.8 เช่นเดียวกับ Reza และคณะ(2014-2015) จากส่วนผสมตั้งต้นหลักเขาทำการเติม ZrO₂ ประมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของส่วนผสมตั้งต้นหลัก เพื่อให้ก่อรูปผลิตภัณฑ์เป็น ZTA เมื่อเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเสร็จแล้ว นำไปติดตั้งบนเครื่องหล่อแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เครื่องหล่อแบบอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (An et al., 2015)

ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะ โครงสร้างจุดภาคที่แตกต่างกันชัดเจนในทั้งสองชั้นของผิวเคลือบดังรูปที่ 2.23 เนื่องจากชั้น (a) ประกอบด้วยเดนไดรต์สายยาวของ Al₂O₃ แต่

ชั้น (b) เป็นชั้นของ ZTA ที่ประกอบด้วยเดนไดรต์ของ Al_2O_3 สายสั้นๆ และทั้งสองชั้นจะมีเหล็กอะลูมิไนต์ (FeAl_2O_4) ที่มีโครงสร้างสปีเนลเกาะอยู่ตามขอบของเส้นสานเดนไดรต์



รูปที่ 2.23 โครงสร้างจุลภาคในโหมด BSE ของผิวเคลือบ (An et al., 2015)

2.3 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

สำหรับสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องจะขอกกล่าวถึงเพียงแค่การขอจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ Centrifugal-SHS และระบบสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผิวเคลือบบนผิวภายในท่อเท่านั้น โดยศึกษาสิทธิบัตรที่จดทั้งในระบบของสหรัฐอเมริกา (US patent) และจีน (CN patent)

2.3.1 US patents

Arthur และ Robert (1977) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการผลิตผิวเคลือบทนไฟ ด้านทานกรด ด้านทานการกัดกร่อน หรือด้านทานการสึกหรอภายในถัง ครอบ ท่อและหลอด โลหะด้วยการเริ่มปฏิกิริยาการลดรูป (Exothermic reduction reaction) เช่น ปฏิกิริยาการลดรูปโลหะ ออกไซด์ด้วยอะลูมิเนียม (Aluminothermic reduction) การผลิตผิวเคลือบเริ่มจากการเติมส่วนผสมลงในท่อโลหะที่กำลังหมุนเหวี่ยง เริ่มเกิดปฏิกิริยาการลดรูป และท่อถูกหมุนเหวี่ยงไปจนกว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเกิดการแข็งตัว แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางส่งผลให้เกิดการแยกเฟสโลหะออกจากตะกรัน (Slag) เฟสโลหะถูกดึงเข้าผิวท่อและยึดเกาะกันด้วยพันธะโลหะ (Metal bond) ของเหลวที่เบากว่าหรือตะกรันถูกผลักเข้าหาใจกลางแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือจุดศูนย์กลางของท่อ ทั้งสองชั้นยึดเกาะกันเป็นอย่างดี ปฏิกิริยาที่อุกกล่าวถึงในสิทธิบัตรนี้จะรวมถึงปฏิกิริยาการ

ลดรูปด้วย Al Mg Si และ Ca-Si โดยทั่วไปปฏิกิริยานี้มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาการลดรูปโลหะออกไซด์ด้วย Al ดังสมการที่ 2.10



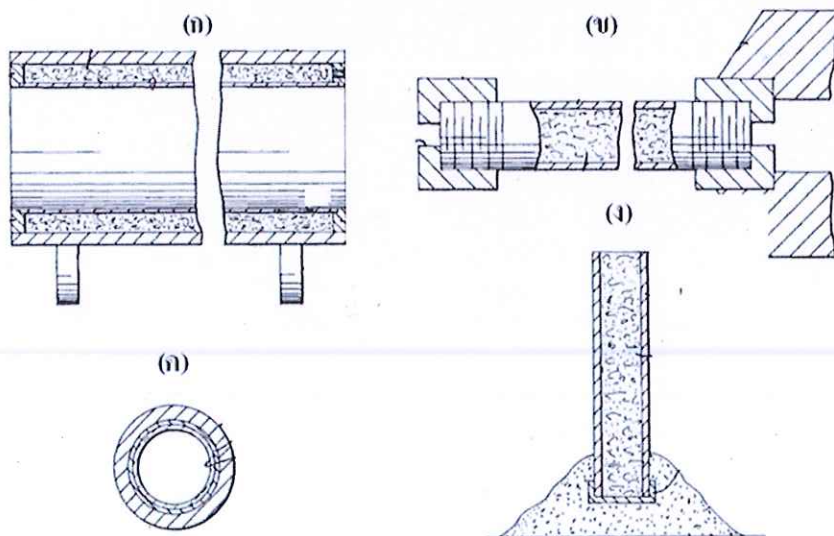
โดย

ΔH คือ ค่าความร้อนของปฏิกิริยา (kJ/mol)

MeO คือ โลหะออกไซด์ที่มีราคาถูกและไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Al Mg Si หรือ

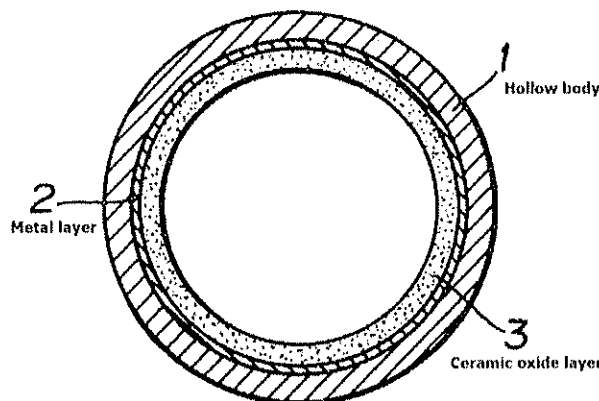
SiCa

สำหรับรูปที่ 2.24 เป็นการแสดงกรรมสิทธิ์ที่ครอบคลุมของสิทธิบัตรฉบับนี้ โดย (ก) แสดงภาคตัดขวางของตัวอย่างการผลิตผิวเคลือบภายในถึงขนาดใหญ่ (ข) แสดงภาคตัดขวางของตัวอย่างการผลิตผิวเคลือบทนไฟภายในที่ขนาดเล็กๆ (ค) แสดงภาคตัดขวางของตัวอย่างการผลิตผิวเคลือบภายในด้วยวิธีการนี้ และ (ง) แสดงภาคตัดขวางของตัวอย่างการผลิตผิวเคลือบภายในด้วยวิธีอื่น ในปีถัดมา Arthur และคณะ ได้ขอจดสิทธิบัตรเพิ่มเติมเพื่อชี้ชัดถึงการผลิตผิวเคลือบภายในท่อเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และผิวเคลือบที่ผลิตเป็นผิวเคลือบที่ถูกแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นใน (Shell) เป็นโลหะที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก (Ferrous metal) และชั้นที่สองเป็นวัสดุที่มี Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากยึดปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 2.10 เป็นระบบหลักในการผลิตผิวเคลือบ



รูปที่ 2.24 ภาคตัดขวางตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวิธีของ Arthur และ Robert (1977)

Osamu (1982) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการสำหรับผลิตผิวเคลือบเซรามิกบนผิวภายในชิ้นงานที่มีลักษณะกลวง เช่น ท่อ เป็นต้น และครอบคลุมไปจนถึงส่วนผสมสำหรับการจุดระเบิด (Thermit mixture) ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมของผงอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ถูกบรรจุลงไปในห้องว่างของชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงที่กำลังหมุนด้วยความเร็ว จนทำให้ส่วนผสมถูกกดลงไปเกาะบนผนังภายในชิ้นงานด้วยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และส่วนผสมจึงถูกจุดระเบิดด้วยเปลวไฟอะเซทิลีน (Acetylene flame) ปฏิกิริยาของส่วนผสมลุกลามก้าวหน้าภายใต้การแปรผันของแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หลังจากนั้นโลหะหลอมเหลวที่เกิดขึ้นจากการลดรูปของโลหะออกไซด์และเซรามิกออกไซด์เกิดขึ้นจากธาตุที่เกิดการลดรูปอย่างรุนแรงถูกแยกชั้นด้วยความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยเซรามิกออกไซด์จะอยู่ชั้นในและโลหะอยู่ชั้นระหว่างกลางของชั้นเซรามิกออกไซด์และผนังภายในชิ้นงานกลวงด้วยพันธะที่แข็งแรง (รูปที่ 2.25) ซึ่งขึ้นอยู่กับการแข็งตัวเมื่อเกิดการเย็นตัวลง

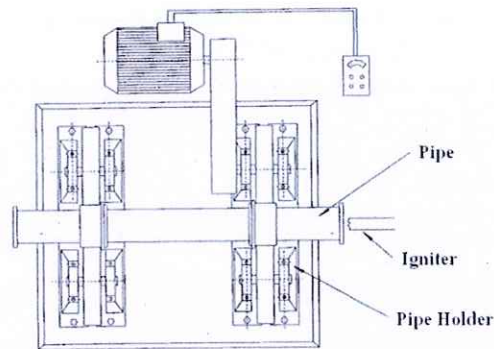


รูปที่ 2.25 แผนภาพชิ้นงานลักษณะกลวงที่ผ่านการเคลือบผิวภายใน (Osamu, 1982)

2.3.2 CN patents

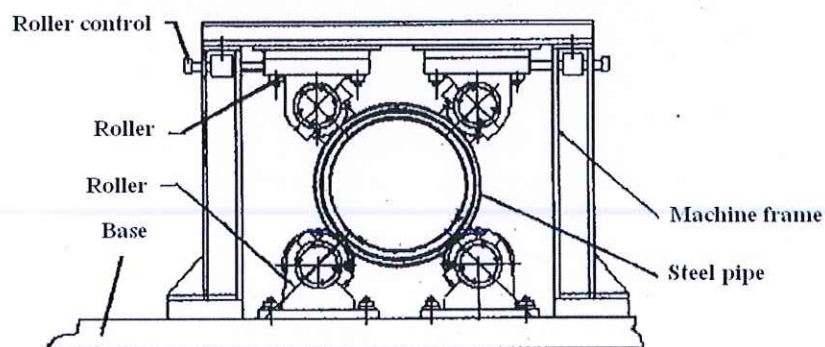
Zhu Zhaohui และคณะ (2000) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการเคลือบผิวภายในท่อด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่อาศัยปฏิกิริยา SHS โดยครอบคลุมถึงการจุดระเบิดสารตั้งต้นที่อัดแน่นด้วยแหล่งให้ความร้อนที่เกิดจากสองขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ที่ต่อเชื่อมถึงกัน ซึ่งจะวางมันไกลจากจุดศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้ามาทางด้านหน้าประมาณ 10-50 mm หน้าและหลังของท่อปากเปิดนี้ถูกปิดไว้ด้วยวงแหวนที่ทำมาจากทองเหลือง เมื่อส่งผ่านไฟฟ้าไปยังขั้วทั้งสองจะเกิดความร้อนขึ้น สารตั้งต้นที่ถูกอัดแน่นเกิดปฏิกิริยาและเกิดการหลอมเหลว การจุดระเบิดภายใต้ผลของความโน้มถ่วงนี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่หลอมเหลวตกลงมาบนผิวท่อได้ดี ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ

Journal of Guangxi และ Mei Tong (2002) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับเครื่องมือสำหรับการเคลือบผิวภายในท่อด้วยปฏิกิริยา SHS ที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยออกแบบเครื่องมือให้สามารถเคลือบภายในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดที่หลากหลาย แต่กำหนดค่าความยาวที่ค่าหนึ่ง (รูปที่ 2.26) และเน้นการสังเคราะห์ผิวเคลือบที่เกิดจากปฏิกิริยาการลดรูปจากอะลูมิเนียม



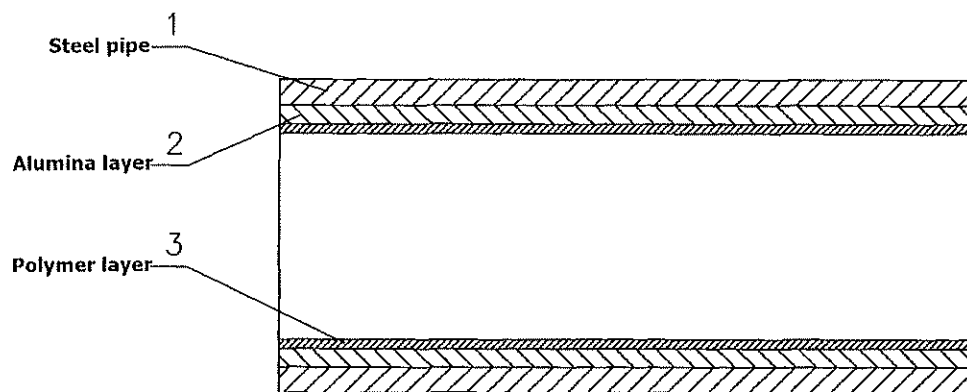
รูปที่ 2.26 แบบของเครื่องเคลือบผิวภายในท่อเมื่อมองจากทางด้านหน้า (Journal of Guangxi และ Mei Tong, 2002)

Hip Sing Shi และ Yang Jinsheng (2005) ออกแบบเครื่องมือสำหรับผลิตท่อเหล็กกล้าวัสดุผสม (Composite steel pipe) ที่มีเซรามิกอยู่ภายใน เนื่องจากต้องการปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดจากนำชิ้นงานออกจากเครื่องมือยากจากเครื่องมือรูปแบบเดิม และต้องการให้เซรามิกเคลือบได้ง่าย โดยเครื่องมือจะประกอบด้วย โครงของเครื่อง (Machine frame) ท่อเหล็กกล้า (Steel pipe) เข็มขัดรัดลูกขนาดเล็กลง (Small belt pulley) เครื่องไฟฟ้า (Electric machine) และเข็มขัด (Belt) เป็นต้น เครื่องที่ออกแบบได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.27 การออกแบบเครื่องมือได้ออกแบบให้ท่อที่ถูกผลิตขึ้นขับเคลื่อนด้วยความสมมาตรตลอดการผลิต



รูปที่ 2.27 แบบของเครื่องผลิตท่อเหล็กกล้าวัสดุผสมจากมุมมองทางด้านขวามือ (Hip Sing Shi และ Yang Jinsheng, 2005)

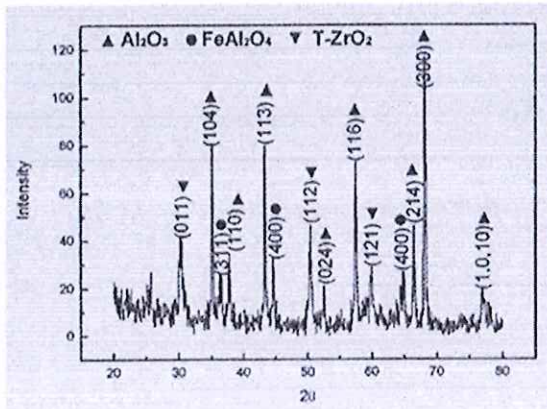
Zhuhai Xiang และคณะ (2010) ออกแบบท่อเหล็กกล้าวัสดุผสมแบบมัลติ (Multi-composite pipe) ที่ผิวภายในเกิดจากปฏิกิริยา SHS ภายใต้แรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยท่อเหล็กกล้านี้ภายในจะประกอบด้วยชั้นของอะลูมินาและพอลิเมอร์ตามลำดับ (รูปที่ 2.28) เพื่อให้ท่อชนิดนี้ทนต่อการกัดกร่อน สึกหรือ สภาวะแวดล้อม และรังสี ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดีในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า โลหะ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และเคมีภัณฑ์ เป็นต้น



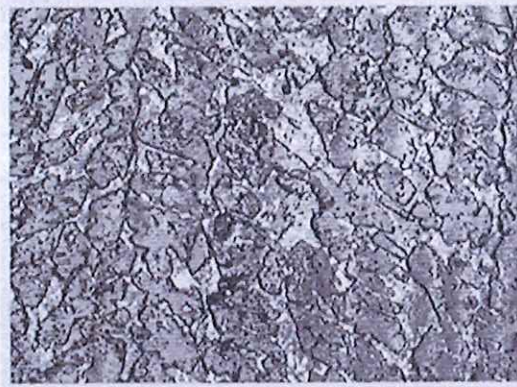
รูปที่ 2.28 แผนภาพท่อเหล็กกล้าวัสดุผสมแบบมัลติ (Zhuhai Xiang et al., 2010)

Zhong Guangzhe และคณะ (2012) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการปฏิกิริยา SHS ที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง สำหรับสังเคราะห์ผิวเคลือบเซรามิกที่มีความเหนียวบริเวณตอนปลายท่อขนส่งน้ำมัน ศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยขั้นตอนดังนี้ 1. เตรียมร้อยละ 5-6 ของร้อยละ 3 โดยโมล อิตเทรียสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (Yttria-stabilized zirconia) ด้วยขนาดอนุภาค 0.4-0.6 μm และร้อยละ 94-95 ของผงผสมระหว่าง Al และ Fe_2O_3 ในช่วง 20 cm ของท่อปลายทั้งสองด้านของท่อส่งน้ำมัน และเตรียมผงผสมระหว่าง Al และ Fe_2O_3 ทั่วไปในท่ออื่นๆ ของท่อส่งน้ำมัน 2. หลังจากกระบวนการปฏิกิริยา SHS ที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ผิวเคลือบเซรามิกอะลูมินาที่เสริมความเหนียวด้วยเซอร์โคเนียก่อรูปขึ้นในช่วง 20 cm ของท่อปลายทั้งสองด้านของท่อส่งน้ำมัน และผิวเคลือบแอลฟาอะลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ในท่ออื่นๆ ของท่อส่งน้ำมัน ผิวเคลือบท่อปลายทั้งสองด้านสามารถต้านทานแรงเชิงกลแบบฉับพลันได้ดี โครงสร้างของผิวเคลือบเซรามิกอะลูมินาที่เสริมความเหนียวด้วยเซอร์โคเนียประกอบด้วยอนุภาคของอะลูมินาและเซอร์โคเนียที่ชอบ มีความแข็ง 1150-1200 HV ความหนา 1.7-2.0 mm และรอยแตกขนาดไมโครและรอยหลุดลอกเริ่มเกิดขึ้นเมื่อผิวเคลือบนี้ได้รับแรงกระแทก 20-22 ครั้งจากก้อนเบอร์ 25J

(ก)

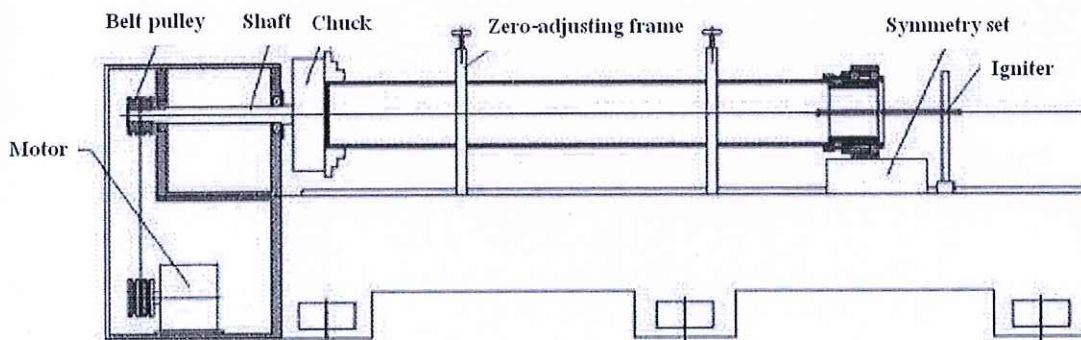


(ข)



รูปที่ 2.29 องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบเซรามิกอะลูมินาที่เสริมความเหนียวด้วย ZrO_2 (Zhong Guangzhe et al., 2012)

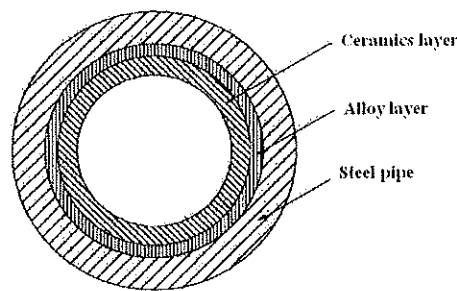
และปีเดียวกันนี้ Qiao Guangli และคณะ (2012) ได้จดสิทธิบัตรเครื่องมือสำหรับผลิตท่อวัสดุผสม โดยมอเตอร์ที่หมุนในแนวแกนเดียวและต่อกับเพลาคานสายพานลูกรอก ท่อจะถูกติดตั้งไปในหัวจับ แล้วปรับศูนย์ เพื่อให้ท่อมีความสมมาตร และตัวจับยึดถูกใช้เพื่อเป็นตัวนำสมมาตรอีกตัวหนึ่ง สำหรับอุปกรณ์จุดระเบิดและมอเตอร์ถูกต่อไว้กับตู้ควบคุม เครื่องมือที่ออกแบบนี้จะช่วยให้ผลิตท่อวัสดุผสมได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้ดีและมีระบบจุดระเบิดที่ดี



รูปที่ 2.30 แบบเครื่องมือสำหรับผลิตท่อวัสดุผสม Qiao Guangli et al., 2012)

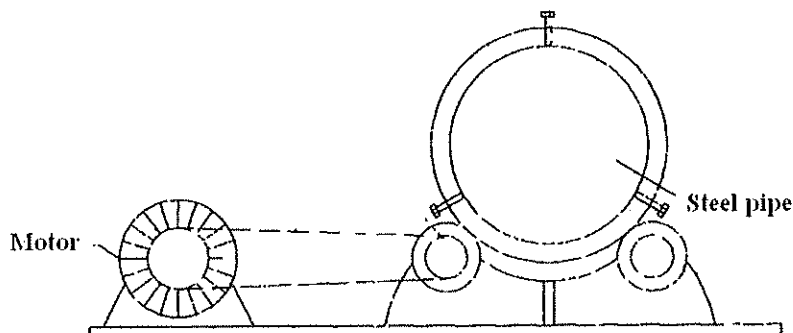
ในปีถัดมา (2013) Chen Wei และคณะ ได้จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการเตรียมท่อโลหะที่เคลือบภายในด้วยเซรามิกจากขยะที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักด้วยปฏิกิริยา SHS เพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนและสึกหรอ ขยะที่ผ่านการปรับแต่งผสมกับผงอะลูมิเนียมตาม

สกัดส่วนและเผาอบผนึก (Sinter) ด้วยปฏิกิริยา SHS ท่อที่เตรียมได้นี้เป็นแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ ผิวเคลือบสารประกอบเชิงโลหะของเหล็ก และผิวเคลือบเซรามิก ซึ่งผิวเคลือบทั้งสองนี้ก่อรูปขึ้นบนผนังภายในของท่อภายใต้ผลของแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (รูปที่ 2.31) ท่อที่เตรียมได้นี้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การขนส่งผง สลอรี่ (Slurry) และตะกรันในงานโลหะ เหมือนแร่พลังงานไฟฟ้า ถ่านหิน และอื่นๆ



รูปที่ 2.31 แผนภาพภาคตัดขวางของผิวเคลือบเซรามิกบนท่อโลหะ (Chen Wei et al., 2013)

และในปีเดียวกันนี้ (2013) Li Jianping และ Li Haotian ได้จดสิทธิบัตรคุ้มครองเครื่องมือที่ออกแบบเพื่อใช้ในกระบวนการปฏิกิริยา SHS ที่อาศัยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยตั้งชื่อเครื่องมือนี้ว่า "1400 type SHS (Static Headspace Extraction) centrifugal machine" ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ที่ควบคุมความถี่ได้ สายพาน เพลาสำหรับส่งผ่าน ล้อสำหรับขับเคลื่อน ลูกกลิ้ง จุกปิดปลาย สปริง สลักยึด น็อต และท่อเหล็กกล้า มอเตอร์หมุนส่งผ่านแรงไปยังเพลาและล้อ เพื่อให้สายพานหมุน ทำให้ลูกกลิ้งหมุนด้วยความเร็วสูง จุกปิดปลาย สปริงและน็อตถูกใช้เป็นตัวจับยึดท่อไว้กับลูกกลิ้ง เครื่องมือนี้มีความยาว 5000 mm ความกว้าง 2500 mm ความสูง 2500 mm และลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1400 mm ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แผนภาพเครื่อง 1400 type SHS centrifugal (Li Jianping และ Li Haotian, 2013)

จากการทบทวนวรรณกรรมในทุกๆ หัวข้อข้างต้น พบว่า กระบวนการปฏิกิริยา ก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษแตกต่างกันอยู่ ในงานวิจัยนี้ขอเรียกว่า "Centrifugal-SHS process" กระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับวิธีการเคลือบผิววัสดุผสมแบบดั้งเดิม ได้แก่ กระบวนการไม่มีความซับซ้อน ใช้เวลาในการผลิตน้อย ต้นทุนในการผลิตต่ำ และผิวเคลือบวัสดุผสมที่ผลิตได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี และตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม ได้แก่ ระบบสารตั้งต้น (Reactant system) สัดส่วนของสารตั้งต้นแต่ละชนิดในส่วนผสมตั้งต้น (Ratio of reactants) ชนิด และปริมาณของสารตัวเติม (Additive) และค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rotational speed) โดยระบบของส่วนผสมตั้งต้นหลักที่นิยมศึกษากัน คือ Fe_2O_3 และ Al ซึ่งมี สัดส่วนของสารตั้งต้นดังแสดงในสมการเคมีที่ (2.11)



สารตัวเติมที่ศึกษา ได้แก่ MnO_2 , TiO_2 , CrO_3 , NiO , CaO , CaO_2 , CaF_2 , B_4C และ C ท่อ ขึ้นงานตัวอย่างมักใช้ท่อเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 57-110 mm และค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แปรค่าอยู่ในช่วง 20-3,000 rpm ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาการสังเคราะห์ ลักษณะเฉพาะ และสมบัติ บางประการของผิวเคลือบวัสดุผสมที่มี Fe เป็นเนื้อพื้น และ WB จากแร่วูลเฟรมไมต์ ($Wolframite$, $FeWO_4$) ด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS โดยเน้นการศึกษาผลกระทบของตัวแปร 4 ชนิด ได้แก่ ระบบของส่วนผสมตั้งต้น (Reactant system) สัดส่วนของสารตั้งต้นแต่ละชนิดในส่วนผสมตั้งต้น (Ratio of reactants) ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rotational speed) และชนิด และปริมาณของสารตัวเติม (Types and amount of additive)

ตารางที่ 2.3 สรุปตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเคลือบผิววัสดุผสม

ลำดับ	ระบบ		ตัวแปร								
	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์	G	rpm	ขนาดท่อ (mm)			ประเภทท่อ			สารตัวเติม
					Ø	t	l	Fe	Cu	SS	
1	Fe ₂ O ₃ , MnO ₂ , TiO ₂ , Mn, C and Al	1. Fe-TiC-Al ₂ O ₃ 2. Fe-TiC-Mn-Al ₂ O ₃	125	-	100	8	300	✓			CaF ₂
2	Fe ₂ O ₃ , CrO ₃ , B ₄ C, Ni, Ti and Al	1. AlFe-AlCrFe-NiFe-TiB ₂ -TiC-Al ₂ O ₃	-	1960	87	5	200	✓			Na ₂ B ₄ O ₇
3	Fe ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , CrO ₃ , NiO and Al	1. FeCrNi-Al ₂ O ₃	-	-	76	4	100	✓			CaF ₂
4	CuO and Al	1. Cu-Al ₂ O ₃	-	800 - 2500	110	20	150		✓		Na ₂ B ₄ O ₇
5	Tungsten wires and gray cast iron	1. Fe-WC	-	1340	-	-	-	✓			-
6	Fe ₂ O ₃ and recycled Al	1. Fe-Al ₂ O ₃	-	20 - 3000	57, 76, 108	-	300	✓			Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO, CaO ₂ , MgO, and C (graphite)
7	Fe ₂ O ₃ and Al	1. Fe-Al ₂ O ₃	110	-	57	3	300	✓			SiO ₂
8	Ni and Al ingot	1. NiAl	30, 50, 80	-	90	20	-	✓			-

หมายเหตุ: G = แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง n = ความเร็วในการหมุน (rpm)
 Ø = รัศมีของท่อ (mm) t = ความหนาของท่อ (mm)
 l = ความยาวของท่อ (mm)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

สำหรับการดำเนินการของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้น เพื่อให้ได้ระบบสารตั้งต้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ฟิวเคลือบวัสดุผสมที่มี Fe เป็นเนื้อพื้นบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้าด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS และส่วนที่สองเป็นการสังเคราะห์ฟิวเคลือบ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ พร้อมทั้งศึกษาลักษณะเฉพาะ (Characterization) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) และสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของฟิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้

3.1 สารเคมี

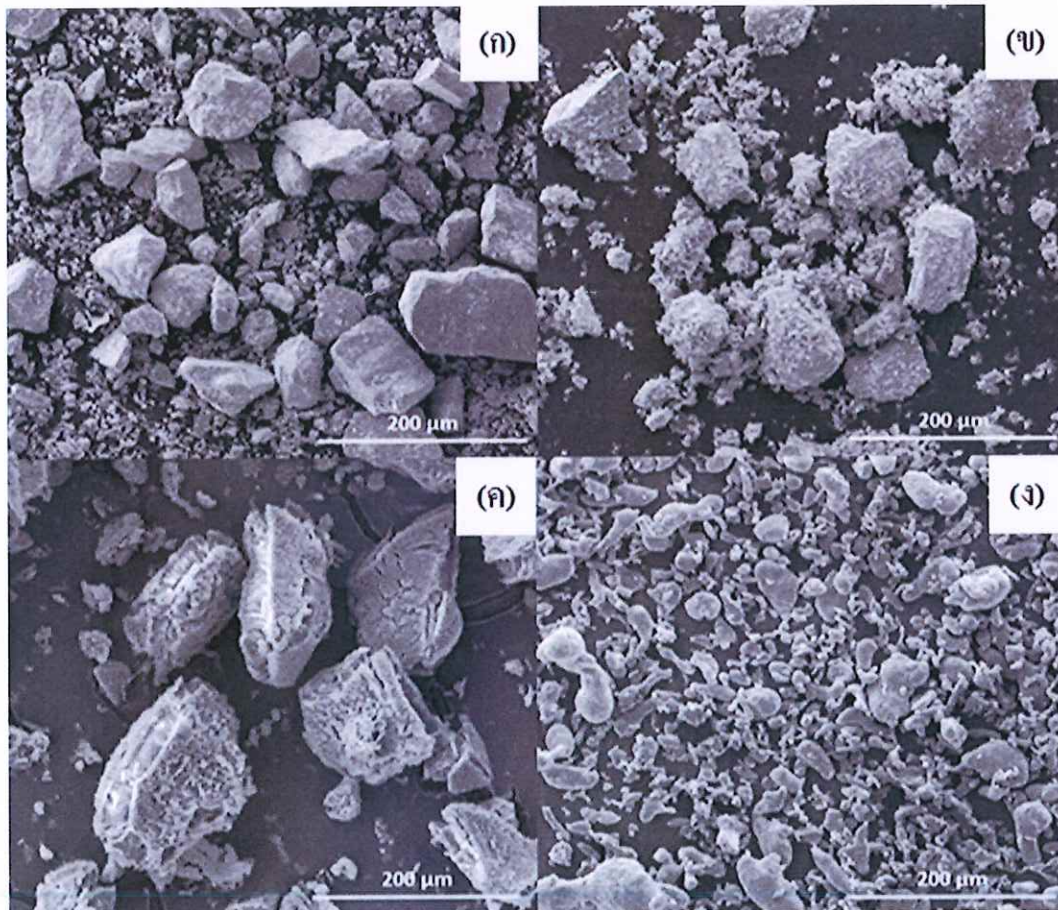
ลักษณะเฉพาะ (Specification) ของสารเคมีที่ใช้ในการทำการศึกษานี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของผงสารตั้งต้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะเฉพาะของสารเคมี

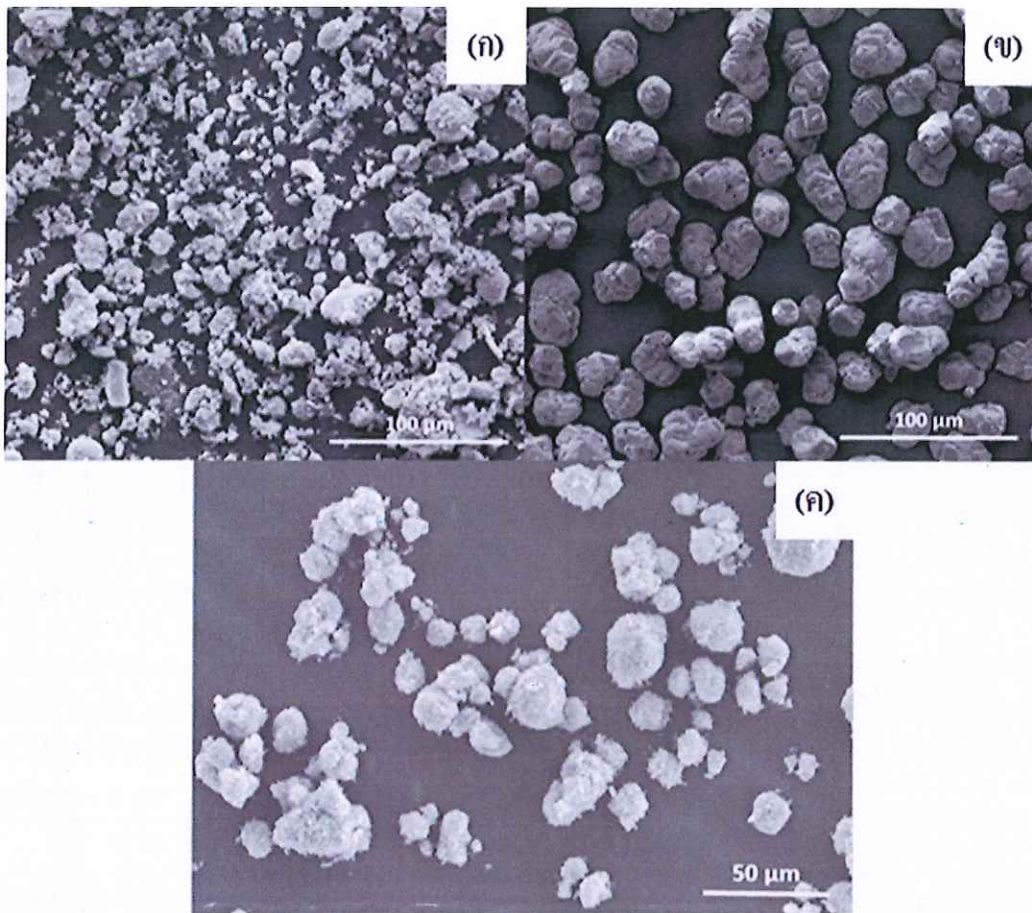
สารเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	ขนาดอนุภาค (μm)	หมายเลข CAS	ผู้ผลิต
Wolframite: $\text{Fe}(\text{Mn})\text{WO}_4$	52	<45	-	Sakorn minerals Co.,Ltd, Thailand
Ferberite: FeWO_4	62	<45	-	Sakorn minerals Co.,Ltd, Thailand
Boron trioxide: B_2O_3	99	~100	1303-86-2	Sigma-aldrich, USA
Aluminium: Al	93	~50	7429-90-5	Himedia laboratories, India
Calcium oxide: CaO_2	75	~5-10	78403-22-2	Sigma-aldrich, USA

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ลักษณะเฉพาะของสารเคมี

สารเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	ขนาดอนุภาค (μm)	หมายเลข CAS	ผู้ผลิต
Calcium fluoride: CaF_2	98	-	7789-75-5	Carlo erba reagents company, Italy
Iron (III) oxide: Fe_2O_3	97	-	1309-37-1	Sigma-aldrich, USA
Nickel: Ni	99.99	<149	7440-02-0	Sigma-aldrich, USA
Acetone	99.5	-	67-64-1	RCI labscan, Thailand



รูปที่ 3.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา (ก) Fe(Mn)WO_4 (ข) FeWO_4
(ค) B_2O_3 และ (ง) Al



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา (ก) CaO , (ข) CaF_2 และ (ค) Fe_2O_3

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทำการศึกษการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS สำหรับตรวจสอบลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือ/อุปกรณ์	ยี่ห้อ	รุ่น/ชนิด
สำหรับการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยกระบวนการ Centrifugal-SHS		
เครื่องชั่งไฟฟ้า	Pioneer	P4214
เครื่องอัดสารแบบไฮดรอลิก	Herzog	TP 20 P

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือ/อุปกรณ์	ยี่ห้อ	รุ่น/ชนิด
เครื่องทดสอบเนกประสงค์: Universal testing machine	เครื่องทดสอบเนกประสงค์: Universal testing machine	เครื่องทดสอบ เนกประสงค์: Universal testing machine

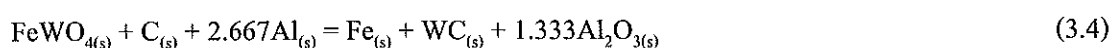
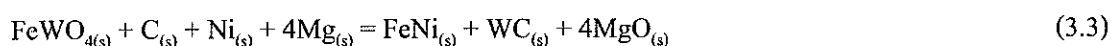
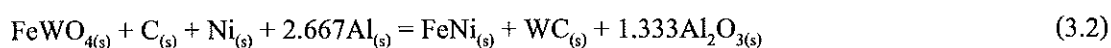
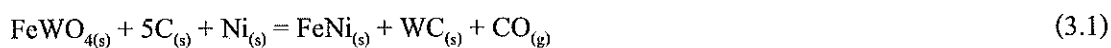
3.3 หัวข้อและวิธีการวิจัย

3.3.1 การทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้น

การทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้น เป็นกระบวนการสังเคราะห์เบื้องต้นด้วยวิธีการ SHS เพื่อคัดเลือกระบบสารตั้งต้นที่สามารถนำมาผลิตเป็นผิวเคลือบวัสดุผสมที่มี Fe เป็นเนื้อพื้นและสารเสริมแรงที่มี W และ Ti เป็นองค์ประกอบของหลัก เนื่องจากในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ต้องการนำแร่ที่เหลือทิ้งจากเหมืองแร่ดีบุกในประเทศไทยมาประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นหลักในระบบการสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ แร่ wolframite (Wolframite, $\text{Fe}(\text{Mn})\text{WO}_4$) และแร่ ilmenite (Ilmenite, FeTiO_3) สำหรับการพิจารณาเลือกระบบสารตั้งต้นสำหรับการนำไปสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมนั้น จะพิจารณาเลือกเอาระบบสารตั้งต้นที่สามารถสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะการหลอมเหลวที่ดี และมีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ในสมการเคมี โดยระบบสารตั้งต้นที่ศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WC WB

3.3.1.1 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WC

ผงสารตั้งต้นจะถูกชั่งและตวงตามสัดส่วนในสมการเคมีที่ (3.1)-(3.4) และปริมาณสารสัมพันธ์ในตารางที่ 3.3

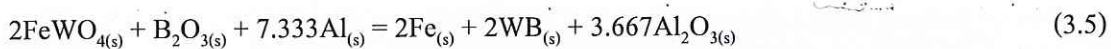


ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.1)-(3.4)

สารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.1)		FeWO ₄	C	Ni	
อัตราส่วนโดยโมล		1.0000	5.0000	1.0000	
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		5.1736	1.0230	1.0000	
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		21.5668	4.1686	4.1686	
สารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.2)		FeWO ₄	C	Ni	Al
อัตราส่วนโดยโมล		1.0000	1.0000	1.0000	2.6667
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		4.2210	0.8346	0.8159	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		18.4283	3.6439	3.5620	4.3659
สารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.3)		FeWO ₄	C	Ni	Mg
อัตราส่วนโดยโมล		1.0000	1.0000	1.0000	4.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		4.2210	0.8346	0.8159	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		18.4283	3.6439	3.5620	4.3659
สารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.4)		FeWO ₄	C	Ni	
อัตราส่วนโดยโมล		1.0000	5.0000	1.0000	
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		5.1736	1.0230	1.0000	
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		21.5668	4.1686	4.1686	

3.3.1.2 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB

ผงสารตั้งต้นจะถูกชั่งและตวงตามสัดส่วนในสมการเคมีที่ (3.5) และปริมาณสารสัมพันธ์ในตารางที่ 3.4 โดยตัวอย่างแสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก



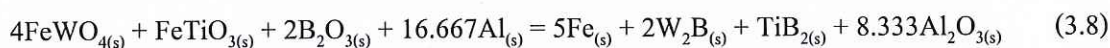
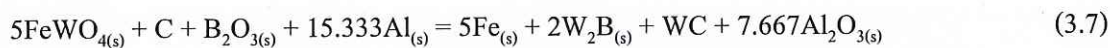
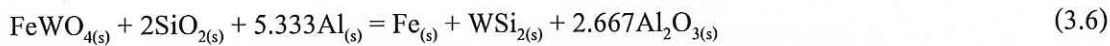
ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.5)

สารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.5)		FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล		2.0000	1.0000	7.3333
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		3.0699	0.3519	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 (g)		20.8280	2.3874	6.7847

3.3.1.3 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิง

โลหะชนิดอื่นๆ

ผงสารตั้งต้นจะถูกชั่งและตวงตามสัดส่วนในสมการเคมีที่ (3.6)-(3.8) และปริมาณสารสัมพัทธ์ในตารางที่ 3.5



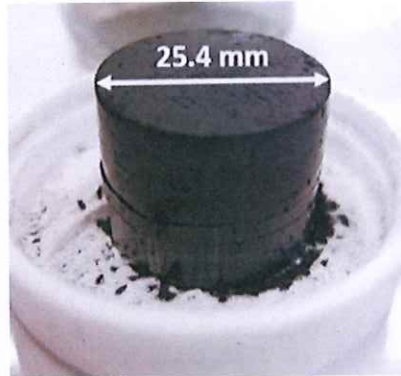
ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.6)-(3.8)

สารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.6)		FeWO ₄	SiO ₂	Al	
อัตราส่วนโดยโมล		1.0000	2.0000	5.3333	
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		2.1105	0.8351	1.0000	
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		17.0472	6.3494	7.6034	
สารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.7)		FeWO ₄	C	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล		5.0000	1.0000	1.0000	15.3333
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		3.6705	1.6491	0.1683	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		16.9723	7.6255	0.7782	4.6240
สารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.8)		FeWO ₄	FeTiO ₃	B ₂ O ₃	Mg
อัตราส่วนโดยโมล		4.0000	1.0000	2.0000	16.6667
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		2.7015	0.3375	0.3097	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม		18.6368	2.3281	2.1362	6.8988

ขั้นตอนการทดลอง

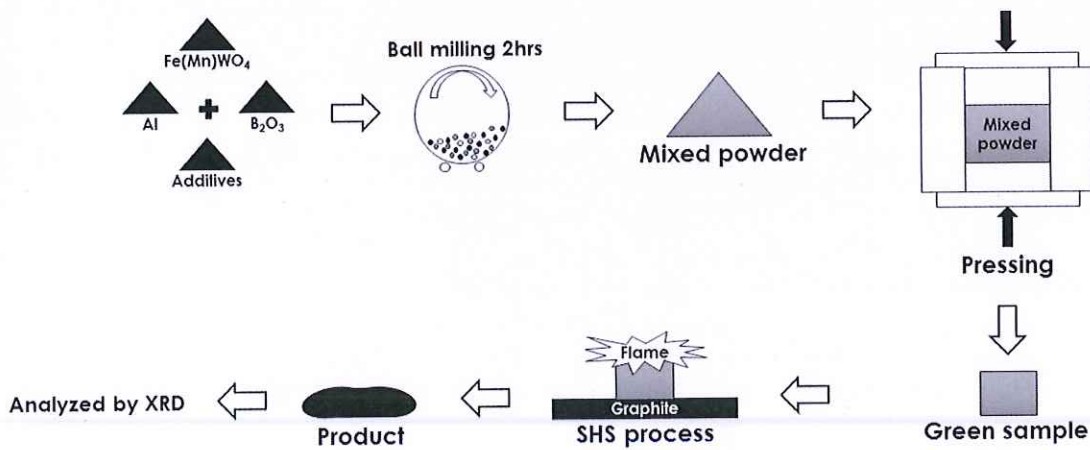
เตรียมชิ้นงานตัวอย่างเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอก จากชั่งตวงผงสารตั้งต้นตามสัดส่วนและปริมาณสารสัมพัทธ์ในแต่ละสมการเคมีข้างต้น เพื่อให้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักสุทธิประมาณ 30 กรัม บดผสมผงสารตั้งต้นทุกตัวด้วยการบดผสมสารที่ใช้ลูกบอล (Ball milling) โดยทำการบดผสมแบบแห้งด้วยลูกบอล Al₂O₃ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง นำผงผสมตั้งต้นไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างที่มีรูปร่างแท่งทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25.4 mm ด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกชนิดแนวแกนเดียว (Uni-axial) เพื่อให้ชิ้นได้งานตัวอย่างแท่งทรงกระบอกที่มี

ความหนาแน่นกรีน (Green density) ร้อยละ 50-60 เมื่อเทียบกับความหนาแน่นเชิงทฤษฎี (Theoretical density) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานกรีน

เมื่อได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.3 แล้ว นำชิ้นงานวางบนแผ่นแกรไฟต์และจุดระเบิดเริ่มปฏิกิริยา SHS ด้วยเปลวไฟออกซิ-อะเซทิลีน ชั้นบนสุดของชิ้นงานที่ได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และคายความร้อนส่งต่อๆ เป็นชั้นๆ จนปฏิกิริยาการเผาไหม้ดำเนินไปจนทั่วทั้งชิ้นงาน ถือว่าปฏิกิริยานี้จบสิ้นลง หลังจากนั้นปล่อยผลิตภัณฑ์ให้เย็นตัวลงในอากาศ ผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงแล้วจะถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะเฉพาะทางกายภาพ ซึ่งขั้นตอนการทดลองที่กล่าวมานี้ถูกสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.4

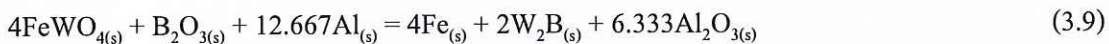


รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุผสมด้วยกระบวนการปฏิกิริยา SHS

สุดท้ายเมื่อเสร็จสิ้นจากการทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้นข้างต้นนี้ จะได้ระบบสารตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการนำไปสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมที่ต้องการ และให้ชื่อว่า “ระบบหลัก”

3.3.2 การทดลองแปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นในระบบหลัก

จากการทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้นข้างต้นนี้ ระบบสารตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการนำไปสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมที่ต้องการ ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB ถือเป็นระบบที่เหมาะสมที่สุด แต่เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นนี้ให้สารประกอบบอร์ไรต์ที่ไม่ตรงตามเฟสที่ต้องการ จึงทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของสารตั้งต้นให้มีความเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า WB สามารถก่อรูปเป็นโครงสร้างต่างๆ ได้ถึง 5 รูปแบบ ได้แก่ WB W_2B WB_2 W_2B_4 (แปลงมาจาก W_2B_5) และ WB_4 (Kayhan et al., 2012) และโครงสร้างที่นิยมสังเคราะห์กันเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ โครงสร้าง W_2B และ W_2B_5 จึงทำการแปรค่าสัดส่วนสารตั้งต้นดังสมการเคมีที่ (3.9)-(3.12) และปริมาณสารสัมพัทธ์ดังตารางที่ 3.6



ตารางที่ 3.6 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.9)-(3.12)

สารตั้งต้นที่ใช้ในสมการที่ (3.9)	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล	4.0000	1.0000	12.6667
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.5546	0.2037	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม	22.4108	1.2844	6.3048
สารตั้งต้นที่ใช้ในสมการที่ (3.10)	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	2.5000	10.3333
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	2.1786	0.6243	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม	17.1864	4.9249	7.8887

ตารางที่ 3.6 (ต่อ) ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.9)-(3.12)

สารตั้งต้นที่ใช้ในสมการที่ (3.11)	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล	3.0000	1.5000	12.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	2.8104	0.3226	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม	20.4084	2.3393	7.2524
สารตั้งต้นที่ใช้ในสมการที่ (3.12)	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล	4.0000	1.0000	14.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.2160	0.1843	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 กรัม	21.9258	1.2566	6.8176

ขั้นตอนการดำเนินการ

ทดลองตามขั้นตอนในรูปที่ 3.4

สุดท้ายเมื่อเสร็จสิ้นจากการทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้นข้างต้นนี้ จะได้ระบบสารตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการนำไปสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมที่ต้องการมาอีกหนึ่งระบบ และให้ชื่อว่า “ระบบรอง”

3.3.3 การสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า

ระบบสารตั้งต้นที่ผ่านการคัดเลือกจากหัวข้อการทดลองที่ 3.3.1 และ 3.3.2 ถูกนำมาสังเคราะห์เป็นผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในท่อเหล็กกล้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 48 mm ซึ่งหัวข้อการทดลองถูกแบ่งพิจารณาตามผลกระทบของตัวแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ซึ่งแบ่งพิจารณาดังหัวข้อต่อไปนี้

3.3.3.1 การทดลองแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

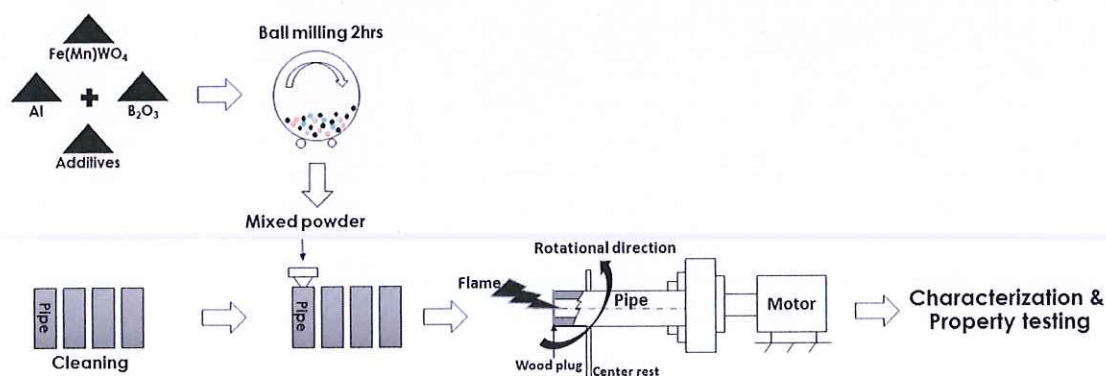
ในการศึกษาผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำการแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 1500 1750 2000 และ 2250 rpm ตามลำดับ และชั่งตวงสารตั้งต้นตามปริมาณสารสัมพัทธ์ที่คำนวณได้จากระบบหลักดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้การทดลองแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วน โดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 150 กรัม	104.1398	11.9369	33.9233

ขั้นตอนการดำเนินการ

เริ่มจากการเตรียมผงผสมตั้งต้น โดยการชั่งตวงผงสารตั้งต้นทุกชนิดตามสัดส่วนในตารางที่ 3.7 จากนั้นนำผงสารตั้งต้นบดด้วยวิธีการ Ball milling แบบแห้ง เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ในขณะที่ทำการบดผสมสารตั้งต้นนั้นให้ทำการเตรียมผิวภายในท่อเหล็กกล้า โดยการเช็ดด้วยผ้าสะอาด ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถ้างด้วยอะซิโตน และปิดปลายด้านหนึ่งด้วยแท่งไม้ตามลำดับ จากนั้นนำผงผสมตั้งต้นที่ผ่านการบดผสมมาแล้วบรรจุลงในท่อเหล็กกล้า ปิดปลายอีกด้านหนึ่งด้วยแหวนไม้ที่เจาะรูเพื่อใช้เป็นช่องว่าง สำหรับการจ่อเปลวไฟออกซิ-อะเซทิลีนที่ปลายด้านหนึ่งของผิวเคลือบตั้งต้น เพื่อจุดระเบิดและเริ่มปฏิกิริยา SHS หลังจากนั้นนำท่อชิ้นงานตัวอย่างติดตั้งบนเครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal machine) ปรับความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตามค่าที่ต้องการแปร เมื่อความเร็วของเครื่องคงที่ตามที่ได้ตั้งค่าไว้แล้ว จึงใช้เปลวไฟออกซิ-อะเซทิลีนจ่อที่ปลายของท่อด้านที่เตรียมช่องว่างไว้ สุดท้ายเมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้วท่อชิ้นงานตัวอย่างจะถูกปล่อยให้เย็นตัวลงในอากาศ และนำไปศึกษาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งดังกล่าวนี้อาจเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า

จากผลการศึกษาผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จะได้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เหมาะสมต่อการเคลือบผิววัสดุผสม และจะนำค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ได้นี้ไปใช้ในทุกๆ ระบบการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม

3.3.3.2 การทดลองแปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

สำหรับการศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสารตัวเติมเดี่ยว และกลุ่มสารตัวเติมคู่ ซึ่งมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

3.3.3.2.1 กลุ่มสารตัวเติมเดี่ยว

เป็นการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยวที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมจากระบบหลัก สารตัวเติมที่สนใจศึกษา คือ CaO_2 และ CaF_2 เนื่องจากงานเกี่ยวข้องของ Andreev และคณะ (2009) และปาจรีย์ และสุธรรม (2012) ระบุว่า สารตัวเติมทั้งสองชนิดนี้ เป็นสารตัวเติมที่ช่วยดึงสารผลิตภัณฑ์จำพวกวัสดุเซรามิกส์และฟองแก๊สให้ลอยตัวสู่ผิวด้านบนได้ดี โดยทดลองเติมที่จำนวน 1 3 และ 5 โมล ตามลำดับ น้ำหนักสุทธิที่ใช้คำนวณตามปริมาณสารสัมพันธ์ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว

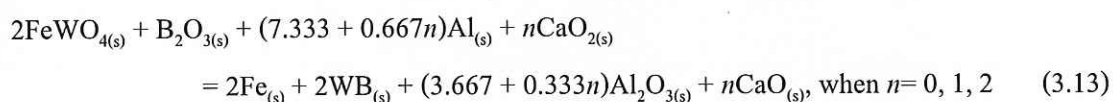
สารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaO_2				
	FeWO_4	B_2O_3	Al	CaO_2
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	1.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	0.3643
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	96.2128	11.0282	31.3411	11.4179
	FeWO_4	B_2O_3	Al	CaO_2
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	3.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	1.0929
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	83.5007	9.5711	27.2001	29.7280
	FeWO_4	B_2O_3	Al	CaO_2
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	5.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	1.8216
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	73.7558	8.4541	24.0257	43.7643

ตารางที่ 3.8 (ต่อ) ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว

สารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaF ₂				
	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	CaF ₂
อัตราส่วน โดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	1.0000
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	0.3946
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	95.6070	10.9588	31.1437	12.2905
	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	CaF ₂
อัตราส่วน โดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	3.0000
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	1.1839
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	82.1455	9.4158	26.7587	31.6800
	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	CaF ₂
อัตราส่วน โดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	5.0000
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	1.8216
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	72.0070	8.2537	23.4561	46.2833

3.3.3.2.2 กลุ่มสารตัวเติมคู่

สำหรับการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมคู่ที่มีผลกระทบต่อการใช้งานสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมจากระบบบรอน ซึ่งสารตัวเติมคู่ตัวแรกที่น่าสนใจศึกษา คือ CaO₂-Al เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.2.1 แสดงให้เห็นว่า CaO₂ สามารถช่วยปรับปรุงค่าความขรุขระของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ โดยปริมาณและสัดส่วนการเติมเป็นไปตามสมการเคมีที่ (3.13) และน้ำหนักสุทธิที่ใช้คำนวณตามปริมาณสารสัมพันธ์ในตารางที่ 3.9

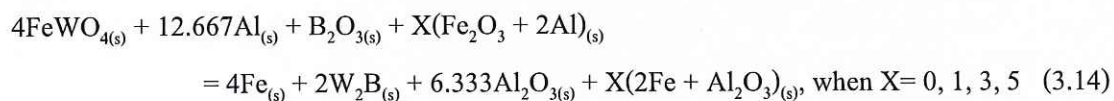


ตารางที่ 3.9 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมกลุ่มนิก

CaO₂-Al

n= 0	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	104.1398	11.9369	33.9233	
n= 1	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	CaO ₂
อัตราส่วนโดยโมล	4.0000	1.0000	12.6667	9.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.5546	0.2037	1.0000	1.8982
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	74.7782	4.2857	21.0373	11.2051
n= 2	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	CaO ₂
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	8.6667	2.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	2.5976	0.2977	1.0000	0.6165
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	86.3584	9.8987	33.2460	20.4969

สารตัวเติมคู่ตัวที่สองที่สนใจศึกษา คือ Fe₂O₃-Al เนื่องจากสารตัวเติมชนิดนี้ช่วยเพิ่มความร้อนให้แก่ระบบ และช่วยเพิ่มปริมาณของสารผลิตภัณฑ์เฟสที่เป็นวัสดุจำพวกโลหะผสม ดังสมการเคมีที่ (3.14) น้ำหนักสุทธิที่ใช้สามารถคำนวณได้ตามตามปริมาณสารสัมพันธ์ในตารางที่ 3.10



ตารางที่ 3.10 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมกลุ่มนิก

Fe₂O₃-Al

X= 0	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 30 (g)	104.1398	11.9369	33.9233

ตารางที่ 3.10 (ต่อ) ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมกลุ่มชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$

X= 1	FeWO_4	B_2O_3	Al	Fe_2O_3	Al
อัตราส่วนโดยโมล	4.0000	1.0000	12.6667	1.0000	2.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.5546	0.2037	1.0000	0.4673	0.1579
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	99.0413	5.6762	27.8632	13.0198	4.3994
X= 3	FeWO_4	B_2O_3	Al	Fe_2O_3	Al
อัตราส่วนโดยโมล	4.0000	1.0000	12.6667	3.0000	6.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.5546	0.2037	1.0000	1.4018	0.4737
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	80.3740	4.6064	22.6115	31.6974	10.7107
X= 5	FeWO_4	B_2O_3	Al	Fe_2O_3	Al
อัตราส่วนโดยโมล	4.0000	1.0000	12.6667	5.0000	10.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.5546	0.2037	1.0000	2.3364	0.7895
น้ำหนักสารสุทธิ 150 (g)	67.6275	3.8758	19.0256	44.4509	15.0202

ขั้นตอนการดำเนินการ

ทดลองตามขั้นตอนในรูปที่ 3.4 โดยใช้ค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.1

3.3.3.3 การแปรค่าสารตัวเติมกลุ่มเดียวชนิด Ni

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมกลุ่มเดียว อีกชนิดหนึ่ง นั่นคือ Ni เนื่องจากงานวิจัยของ X. Cao และคณะ (2013) ระบุว่า Ni เป็นสารตัวเติมที่จะเข้าไปช่วยให้เฟสผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวเกิดการไหลตัวที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดที่กีดกันในระบบสามารถเคลื่อนตัวสู่ภายนอกได้ดีขึ้นตามไปด้วย ทำให้ไม่เกิดรูพรุนขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงแล้ว โดยการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมชนิดนี้ต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม จะศึกษากับการสังเคราะห์จากสารตั้งต้นในระบบหลักที่ใช้แร่เฟอร์เบอร์ไรต์ เป็นแหล่งให้ธาตุ Fe W และ O แทนแร่วุลแฟลมไมต์ ซึ่งชั่งน้ำหนักสุทธิตามปริมาณสารสัมพันธ์ในตารางที่ 3.12 และแปรค่าการเติมที่ 1 และ 5 โมล ตามลำดับ

ตารางที่ 3.11 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยวชนิด Ni

	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	Ni
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	1.0000
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	0.2967
น้ำหนักสารสุทธิ 150 g	97.5917	11.1863	31.7902	9.4317
	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al	Ni
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	5.0000
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	1.4835
น้ำหนักสารสุทธิ 150 g	77.9796	8.9383	25.4006	37.6815

ขั้นตอนการดำเนินการ

ทดลองตามขั้นตอนในรูปที่ 3.4 โดยใช้ค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3.1

3.3.3.4 การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้า

หัวข้อสุดท้ายเป็นการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้านี้ โดยใช้แร่เฟอร์เบอร์ไรต์แทนแร่ลูปเฟลมไมต์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.3.3.3 เพื่อให้ทราบว่า เมื่อทำการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้าแล้วนั้น ตัวแปรใดบ้างที่ต้องทำการควบคุม เพื่อให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีสภาพที่ดีเช่นเคย โดยจะปรับลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้าจาก 48 mm เป็น 33 mm เท่านั้น และค่าตัวแปรอื่นๆ จะถูกควบคุมไว้ได้แก่ ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตามค่าที่ได้จากหัวข้อการทดลองที่ 3.3.3.1 และสัดส่วนของสารตั้งต้นตามปริมาณสารสัมพัทธ์ของระบบหลัก โดยชั่งน้ำหนักสุทธิของสารตั้งต้นตามค่าในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.12 ปริมาณสารสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นในการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้า

	FeWO ₄	B ₂ O ₃	Al
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333
อัตราส่วน โดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000
น้ำหนักสารสุทธิ 75 กรัม	52.0699	5.9684	16.9616

นอกจากนี้ได้ทำการเติมสารตัวเติมกลุ่มคูชชนิด Fe_2O_3 -Al โดยแปรค่าการเติมที่ $x=1$ และ 3 ตามลำดับ และชั่งน้ำหนักสุทธิของสารตั้งต้นตามค่าในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.13 ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นในการศึกษาผลกระทบของขนาดของท่อเหล็กกล้า

X=1	FeWO_4	B_2O_3	Al	Fe_2O_3	Al
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	1.0000	2.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	0.8071	0.2727
น้ำหนักสารสุทธิ 75 กรัม	41.8497	4.7970	13.6324	11.0030	3.7180
X=3	FeWO_4	B_2O_3	Al	Fe_2O_3	Al
อัตราส่วนโดยโมล	2.0000	1.0000	7.3333	3.0000	6.0000
อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	3.0699	0.3519	1.0000	2.4214	0.8182
น้ำหนักสารสุทธิ 75 กรัม	30.0524	3.4447	9.7895	23.7038	8.0096

ขั้นตอนการดำเนินการ

ทดลองตามขั้นตอนในรูปที่ 3.4

3.3.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสม

3.3.4.1 การวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์

การวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์จะอาศัยหลักการของพลังงานกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Gibb energy minimization) ในการคำนวณความเข้มข้นที่จุดสมดุล (Equilibrium concentration) ของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการถลุงด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Gokcen and Reddy, 1996)

พัฒนาการของการก่อรูปของสาร จะถูกคำนวณจากการลดลงของบรรยากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 3,000 °C และในการคำนวณสมมติให้เป็นสภาวะแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) และการผสมของแก๊สในอุดมคติ และเฟสควบแน่น (Condense phase) เป็นเฟสบริสุทธิ์ พลังงานรวมของกิบส์ของระบบ ดังแสดงในสมการที่ (3.15)

$$G = \sum_{\text{gas}} n_i (g_i^0 + RT \ln P_i) + \sum_{\text{condensed}} n_i g_i^0 + \sum_{\text{solution}} n_i (g_i^0 + RT \ln x_i + RT \ln \gamma_i) \quad (3.15)$$

โดยที่

G = พลังงานกิบส์รวมของระบบ

g_i^0 = โมลาร์มาตรฐานของพลังงานกิบส์ของสาร i ที่ค่าความดันและอุณหภูมิ

n_i = จำนวนโมลของสาร i

x_i = สัดส่วนโมลของสาร i

γ_i = สัมประสิทธิ์แอกติวิตี้ของสาร i

สำหรับค่า T_{sd} สามารถคำนวณหาได้โดยการอาศัยพื้นฐานการคำนวณจากโปรแกรม HSC Chemistry[®] และการอาศัยการอ้างอิงผลการศึกษาที่เป็นมาตรฐานที่ระบุไว้ว่าปฏิกิริยาจะสามารถเกิดขึ้นด้วยตัวเองเนื่องจากปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อค่า T_{sd} ของปฏิกิริยาสูงกว่า 1800°C (สุธรรม, 2552)

3.3.4.2 การหาปริมาณของสารประกอบโดยวิธีเชิงกึ่งปริมาณ (Semi-quantitative)

การหาปริมาณของสารประกอบโดยวิธีเชิงกึ่งปริมาณ (Semi-quantitative) อาศัยพื้นฐานการคำนวณจากค่าที่ได้จากข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของสารประกอบแต่ละชนิด โดยคำนวณได้จากสมการที่ (3.16)

$$R_x = \frac{A_x}{A_x + A_y + A_z} \times 100\% \quad (3.16)$$

โดยที่

R_x = ปริมาณของสารประกอบ x

R_y = ปริมาณของสารประกอบ y

R_z = ปริมาณของสารประกอบ z

A_x = พื้นที่ใต้กราฟของสารประกอบ x

A_y = พื้นที่ใต้กราฟของสารประกอบ y

A_z = พื้นที่ใต้กราฟของสารประกอบ z

3.3.4.3 การทดสอบความขรุขระของผิวเคลือบ (Surface roughness test)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

นำชิ้นงานตัวอย่างวางบนแท่นวัดความเรียบให้ได้ระนาบดังแสดงรูปที่ 3.5 และใช้เครื่องวัดความเรียบผิววัดความเรียบในบริเวณที่กำหนดบนผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่าง จำนวน 3 บริเวณ โดยค่าความเรียบผิวที่วัดได้จะมีหน่วยเป็นไมครอน (μm)



รูปที่ 3.6 การวางชิ้นงานขณะทำการวัดความเรียบผิว

3.3.4.4 การทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Vicker micro-hardness test)

ขั้นตอนการดำเนินการ

ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกเตรียมผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างทางโลหะวิทยา (Metallurgical preparation) ซึ่งชิ้นงานจากการเตรียมนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ได้

กระดาษขัดซิลิกินคาร์ไบด์ (SiC) จะถูกนำมาขัดผิวหน้าชิ้นงานแบบหยาบ โดยเรียงลำดับจากเบอร์หยาบไปยังเบอร์ละเอียดตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดแบบจานหมุนด้วยความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที (rpm) และชิ้นงานที่ผ่านการขัดหยาบแล้วจะถูกนำไปขัดละเอียดบนผ้าสักหลาดอีกครั้งด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุนด้วยความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที (rpm) โดยใช้ผงขัดสารแขวนลอยเพชร (Diamond suspension) ขนาด $1 \mu\text{m}$ หลังจากนั้นทำความสะอาดโดยการสั่นในอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องสั่นสะเทือนคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) และเป่าให้แห้งก่อนนำไปทดสอบ

เงื่อนไขและสภาวะที่ใช้ทดสอบ

น้ำหนักกด = 0.5 kgf (4.905 N) และ 1.0 kgf (9.81 N)

เวลาทดสอบ = 10 วินาที

กำลังขยายในการวัดรอยกด = 100 เท่า

จำนวนจุดกด = 10 จุด

หัวกดเป็นเพชรรูปทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดมีมุมปลายแหลม 136°

การคำนวณหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) อาศัยการคำนวณจากสมการที่ (3.17)

$$\text{Vicker hardness} = \frac{0.1891F}{d^2} \text{ MPa} \quad (3.17)$$

โดยที่

d = เส้นทแยงมุมของรอยกด หน่วยเป็น mm = $(d_1 + d_2)/2$

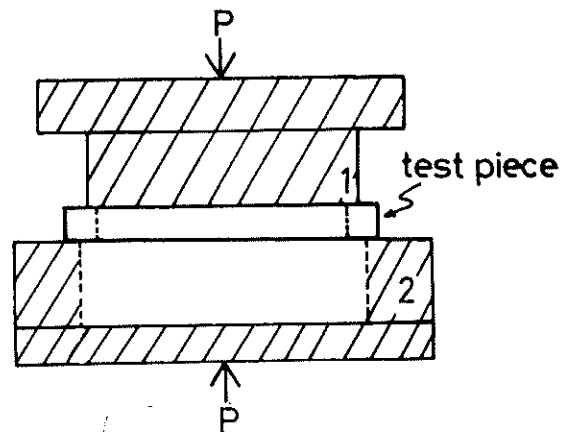
F = แรงที่ใช้กด หน่วยเป็นนิวตัน (N)

3.3.4.5 การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือน (Compression-shear strength test)

การทดสอบแรงกดเฉือน (Compression-shear test) ของชิ้นงานตัวอย่างจะดำเนินการตามวิธีการของ Odawar และ Ikeuchi (1981) เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของบริเวณรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับผิววัสดุฐาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นวงแหวนที่มีความหนา 10 mm และวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบเนกประสงค์ตามแผนภาพดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดสอบแรงกดเฉือน (Odawar and Ikeuchi, 1981)

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความแข็งแรงในการต้านทานแรงกดเฉือน (σ_s) เป็นไปตามสมการที่ (3.18)

$$\sigma_s = \frac{P_{\max}}{\pi L D_{in}} \quad (3.18)$$

โดยที่

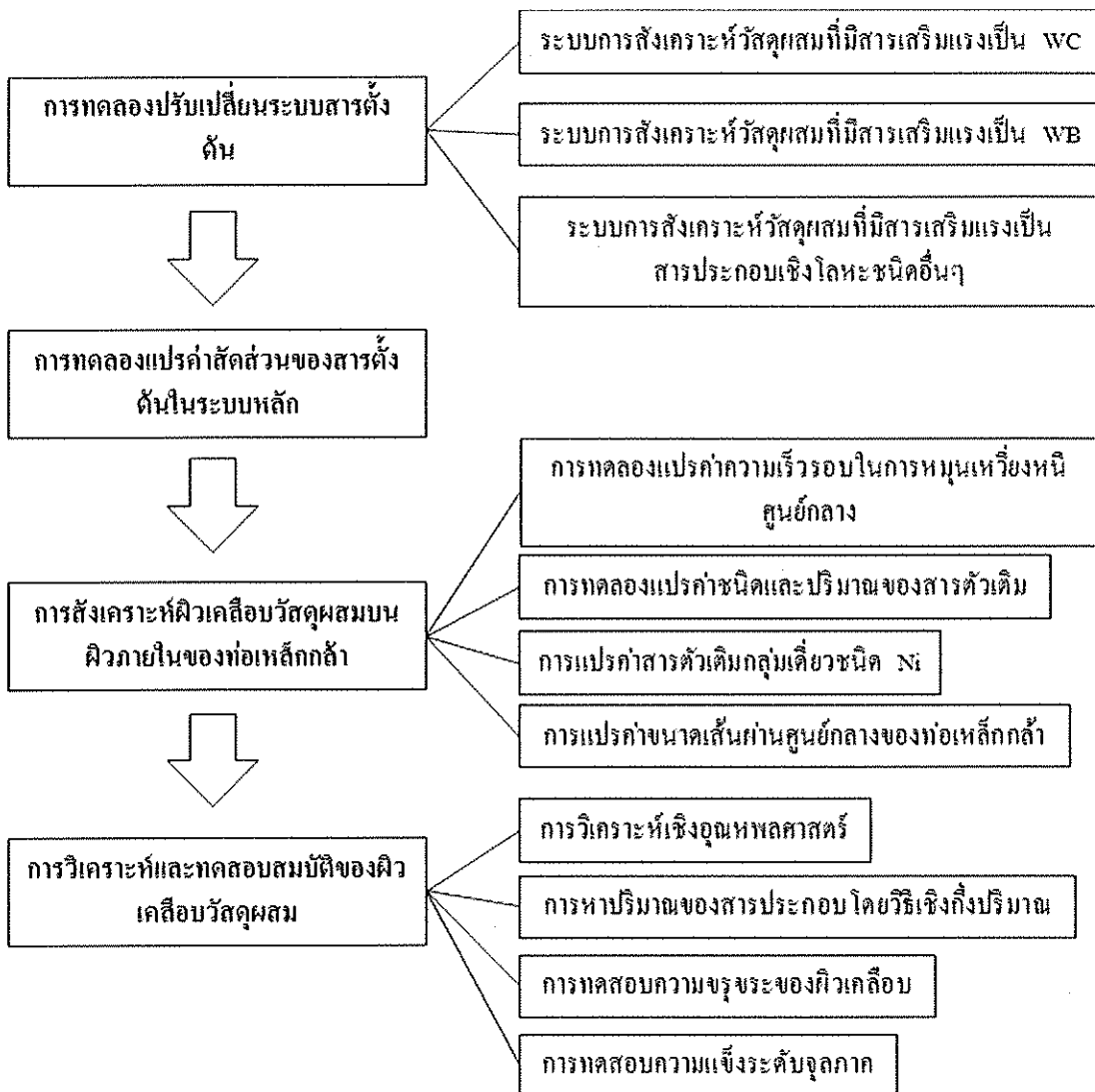
P_{\max} = ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ผิวเคลือบหลุดจากวัสดุฐาน (N)

σ_s = ค่าความแข็งแรงในการต้านแรงกดเฉือน (MPa)

L = ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

D_{in} = ขนาดเส้นศูนย์กลางวงในของผิวเคลือบ (mm)

3.3.5 สรุปวิธีการวิจัย



รูปที่ 3.8 แผนภาพสรุปวิธีวิจัย

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์

4.1.1 ระบบสารตั้งต้นของการสังเคราะห์วัสดุผสมเบื้องต้น

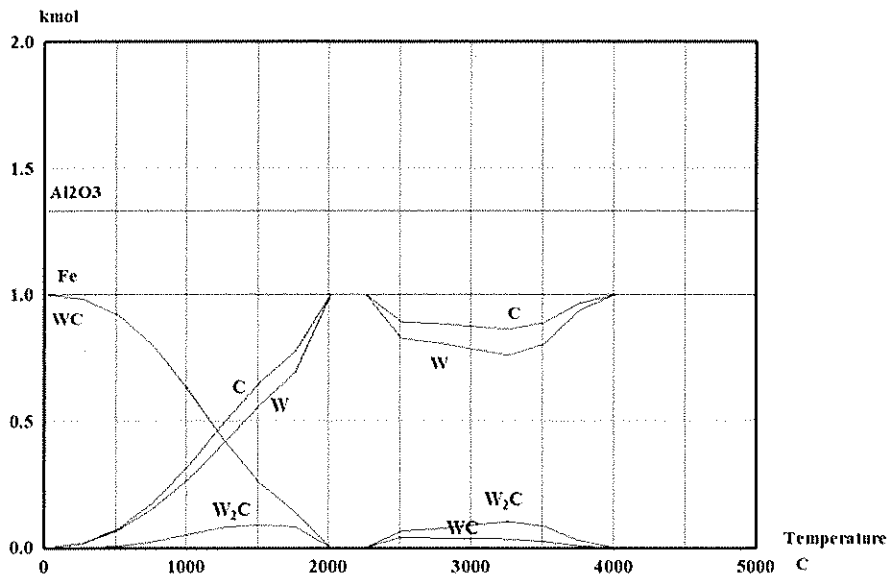
4.1.1.1 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WC

จากผลการศึกษาในเชิงอุณหพลศาสตร์ พบว่า ระบบสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WC ตามสมการเคมีที่ (3.1) – (3.4) ค่า T_{ad} และ ΔH_{298}° ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและสามารถเกิดปฏิกิริยา SHS ได้ทั้งหมด ยกเว้นระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.1) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เนื่องจากสารตั้งต้นในระบบนี้ใช้ตัวจุดระเบิดเป็น Ni ซึ่งมีจุดหลอมที่สูงมาก (1450°C) เมื่อเทียบกับตัวจุดระเบิดชนิดอื่นๆ (Al 660°C และ Mg 650°C) จึงทำให้สารตั้งต้นในระบบมีความร้อนไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา SHS

ตารางที่ 4.1 ค่า T_{ad} และ ΔH_{298}° ของระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WC

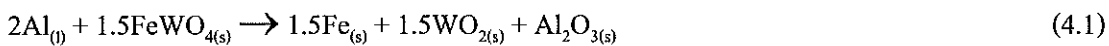
สมการเคมีที่	T_{ad} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_{298}° (kJ/mol)
(3.1)	-	+707.68
(3.2)	2807.6	-1083.85
(3.3)	2826.8	-1256.56
(3.4)	3148.1	-1083.85

จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.4) เมื่อศึกษาสมดุลขององค์ประกอบ (Equilibrium composition) ของระบบสารตั้งต้นภายใต้หลักการของพลังงานกิบส์ที่ต่ำที่สุดที่อาจเกิดขึ้น ในขณะที่ทำปฏิกิริยา SHS ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่า WC เริ่มมีการก่อรูปได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 2000°C โดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของเส้นกราฟของ WC เมื่ออุณหภูมिन้อยกว่า 2000°C

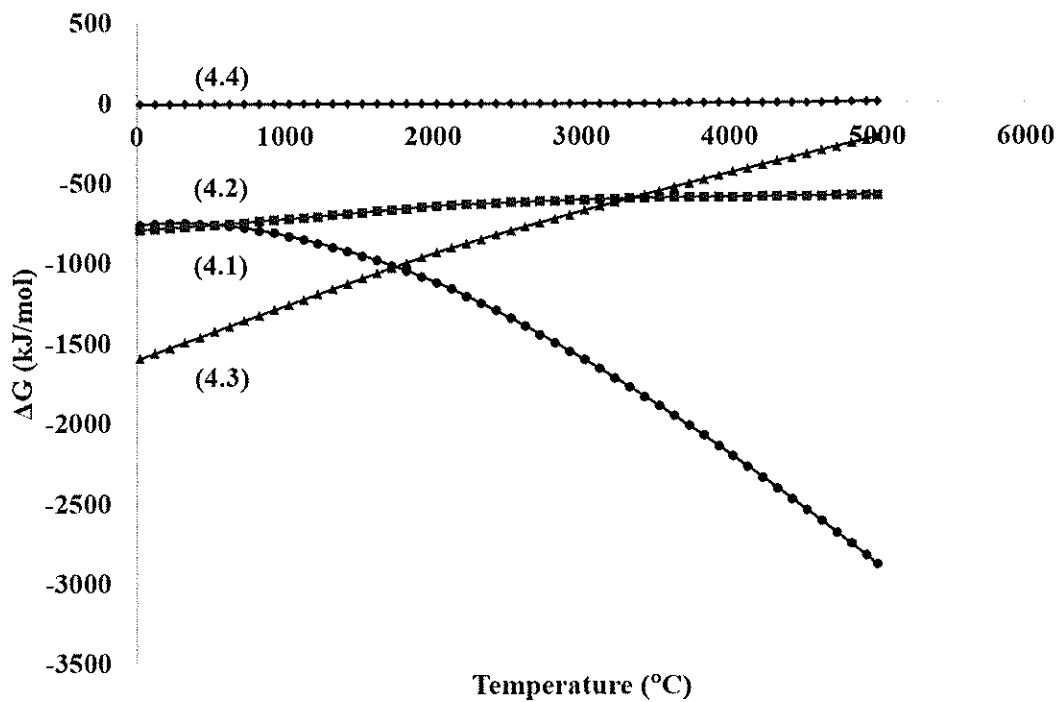


รูปที่ 4.1 สมดุลขององค์ประกอบของระบบสารตั้งต้นในสมการเคมีที่ (3.4)

จากกราฟข้างต้น พบว่า ในระหว่างเกิดปฏิกิริยา SHS อะตอมของสารตั้งต้น $\text{Fe(Mn)WO}_4\text{C}$ และ Al ตามสมการเคมีที่ (3.4) จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน เพื่อก่อรูปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ดังสมการเคมีที่ (4.1) - (4.4) ตามลำดับ



การจุดระเบิดปฏิกิริยา SHS จะเริ่มต้นขึ้นที่อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวของ Al โดยปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ (4.1) เริ่มเกิดขึ้นก่อน ตามมาด้วยปฏิกิริยาในสมการเคมีที่ (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ เพื่อสลายอะตอมของ O ออกจาก WO_2 ก่อนไปจับตัวกับอะตอมของ Al ที่หลอมเหลวอยู่และกลายเป็น Al_2O_3 และสุดท้ายอะตอมของ W และคาร์บอนจะจับตัวกันแล้วเกิดเป็น WC ดังสมการเคมีที่ (4.4) ซึ่งผลการคำนวณทางทฤษฎีของพลังงานกิบส์ (ΔG) ของปฏิกิริยาจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.2

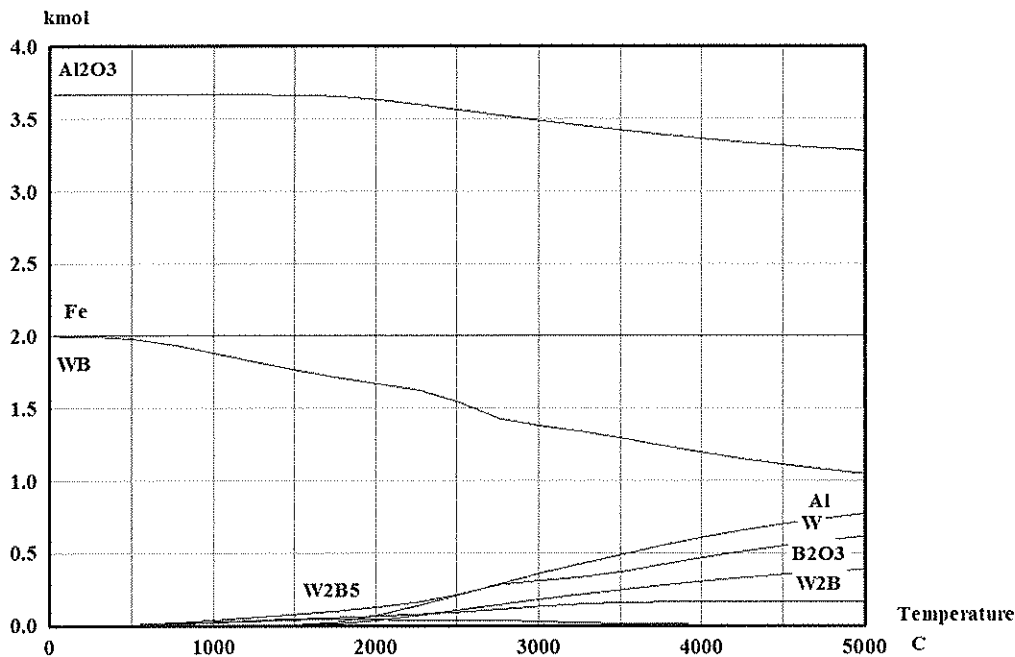


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกิบส์ (ΔG) กับอุณหภูมิในทางทฤษฎี สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.4)

4.1.1.2 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB

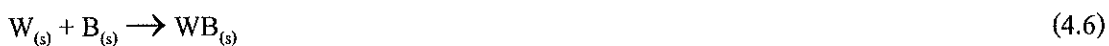
จากผลการศึกษาในเชิงอุณหพลศาสตร์ พบว่า ระบบสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB ตามสมการเคมีที่ (3.5) มีค่า T_{ad} เท่ากับ 2826.2°C และ ΔH_{298}° เท่ากับ -2623.94 kJ/mol ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและสามารถเกิดปฏิกิริยา SHS ได้

สำหรับการศึกษาสมดุลขององค์ประกอบของระบบสารตั้งต้นภายใต้หลักการของพลังงานกิบส์ที่ต่ำที่สุดที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่ทำปฏิกิริยา SHS ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่า WB เริ่มมีการก่อรูปที่อุณหภูมิประมาณ 660°C โดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของเส้นกราฟของสารตั้งต้น Al และ B_2O_3 เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 660°C

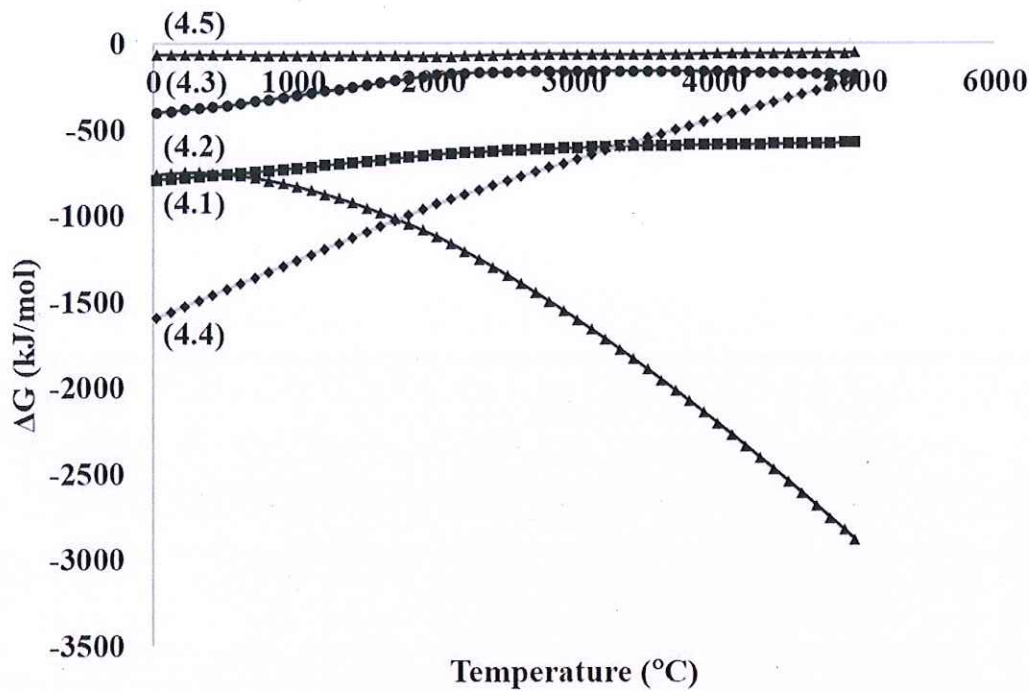


รูปที่ 4.3 สมดุลขององค์ประกอบของระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.5)

ระหว่างเกิดปฏิกิริยา SHS อะตอมของสารตั้งต้น Fe(Mn)WO₄ B₂O₃ และตัวจุดระเบิด Al ตามสมการเคมีที่ (3.5) จะมีอันตรกิริยาระหว่างกันและก่อรูปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ดังสมการเคมีที่ (4.1) (4.2) (4.3) (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ



การจุดระเบิดปฏิกิริยา SHS จะเริ่มต้นขึ้น ณ จุดหลอมเหลวของ Al โดยปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ (4.1) จะเกิดขึ้นก่อน ตามมาด้วยปฏิกิริยาตามสมการเคมีที่ (4.2) (4.3) และ (4.5) ตามลำดับ เพื่อสลายอะตอมของ O WO₂ และ B₂O₃ ก่อนจะไปจับตัวกับอะตอมของ Al ที่หลอมเหลวอยู่กลายเป็น Al₂O₃ และสุดท้ายอะตอมของ W และ B จะจับตัวกันและเกิดเป็น WB ดังแสดงในสมการเคมีที่ (4.6) ซึ่งผลการคำนวณทางทฤษฎีของพลังงานกิบส์ของปฏิกิริยาจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกิบส์ (ΔG) กับอุณหภูมิในทางทฤษฎี สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผสมในระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.9)

4.1.1.3 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิง

โลหะชนิดอื่นๆ

จากผลการศึกษาในเชิงอุณหพลศาสตร์พบว่า ระบบสารตั้งต้นใช้สังเคราะห์วัสดุผสมระบบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่นๆ ตามสมการเคมีที่ (3.6) - (3.8) มีค่า T_{ad} และ ΔH_{298}^0 ดังตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และสามารถเกิดปฏิกิริยา SHS ได้ทั้งสิ้น

ตารางที่ 4.2 ค่า T_{ad} และ ΔH_{298}^0 ของระบบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่นๆ

สมการเคมีที่	T_{ad} (°C)	ΔH_{298}^0 (kJ/mol)
(3.6)	2533.2	-1550.24
(3.7)	2992.3	-5798.34
(3.8)	2792.3	-5823.79

4.1.1.4 ระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB เพื่อแปรค่า สัดส่วนของสารตั้งต้น

จากผลการศึกษาในเชิงอุณหพลศาสตร์ พบว่า ระบบสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์ วัสดุผสมระบบที่มีสารเสริมแรงเป็น WB เพื่อศึกษาการแปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นหลักตาม สมการเคมีที่ (3.9) – (3.12) ตามลำดับ มีค่า T_{ad} และ ΔH^0_{1298} ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและสามารถเกิดปฏิกิริยา SHS ได้ทั้งสิ้น

ตารางที่ 4.3 ค่า T_{ad} และ ΔH^0_{1298} ของระบบการสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็น WB เพื่อแปร ค่าสัดส่วนของสารตั้งต้น

สมการเคมีที่	T_{ad} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH^0_{1298} (kJ/mol)
(3.9)	2960.1	-4712.81
(3.10)	2739.8	-3761.12
(3.11)	2799.8	-3934.32
(3.12)	2876.8	-4712.81

4.1.2 ระบบการสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

4.1.2.1 การศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว

จากหัวข้อการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยวชนิดต่างๆ ที่กล่าวไปแล้ว ในบทที่ 3 สำหรับผลการศึกษาในเชิงอุณหพลศาสตร์ พบว่า ค่า T_{ad} ของระบบสารตั้งต้นของการ สังเคราะห์วัสดุผสมในระบบหลักมีค่าลดลง เมื่อแปรค่าการเติมสารตัวเติมเดี่ยวทั้งสามชนิดใน ปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งคาดว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยส่งผลดีต่อ กระบวนการเคลือบผิววัสดุผสม

ตารางที่ 4.4 ค่า T_{ad} ของระบบสารตั้งต้นของการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว

จำนวนของสารตัวเติม	T_{ad} ($^{\circ}\text{C}$)		
	CaO_2	CaF_2	Ni
1	2757.0	2678.6	2799.9
3	2369.2	2194.5	-
5	2076.2	2053.8	2421.9

4.1.2.5 การศึกษาผลกระทบของสารตัวเติม

สำหรับการศึกษาในเชิงอุณหพลศาสตร์ของระบบที่ศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมคู่ทั้งสองชนิด พบว่า ค่า T_{ad} ของระบบสารตั้งต้นของการสังเคราะห์วัสดุผสมในระบบรองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแปรค่าการเติมสารตัวเติมคู่ทั้งสองชนิดในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ และสารตัวเติมคู่ชนิด CaO_2-Al ให้ค่า T_{ad} สูงกว่าสารตัวเติมคู่ชนิด Fe_2O_3-Al ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า T_{ad} ของระบบสารตั้งต้นของการศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

จำนวนของสารตัวเติม		T_{ad} (°C)
CaO ₂ -Al	n= 0	2827.1
	n= 1	2954.1
	n= 2	3049.3
Fe ₂ O ₃ -Al	X= 0	2827.1
	X= 1	2978.5
	X= 3	3002.9
	X= 5	3017.6

4.2 ผลปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้น

การทดลองปรับเปลี่ยนระบบสารตั้งต้นเป็นการสังเคราะห์วัสดุผสมเบื้องต้นด้วยวิธีการ SHS ซึ่งจะศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมในระบบต่างๆ ซึ่งผลการศึกษาเป็นดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรง WC

การสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรงเป็น WC ด้วยระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.1) - (3.4) พบว่า ระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.2) (3.3) และ (3.4) ปฏิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ ต่างจากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.1) เนื่องจากลักษณะการลุกลามของปฏิริยานี้ไม่มีความต่อเนื่อง จึงต้องทำการเติมเชื้อเพลิงจากเปลวไฟออกซิ-อะเซทิลีนอยู่ตลอดจนจบการทำปฏิริยา SHS ของส่วนผสมตั้งต้น โดยสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ดังกล่าว มีลักษณะทางกายภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะการหลอมเหลวและการจับตัวกันที่ไม่ดีดังรูปที่ 4.5(ก - ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ลักษณะของสารผลิตภัณฑ์หรือวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่

ก. (3.2) ข. (3.3) และ ค. (3.4)

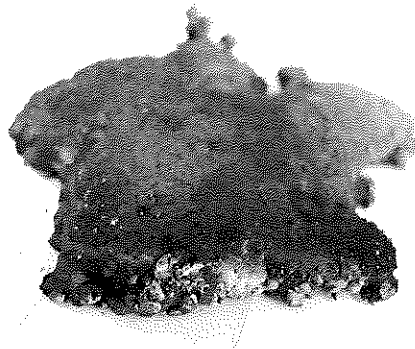
จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD พบว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้ประกอบด้วยเฟสต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.3) ประกอบด้วยสารเสริมแรงเฟสทังสเตนไดคาร์ไบด์ (W_2C) และเฟสเหล็กทังสเตนคาร์ไบด์ (Fe_2W_2C) ปริมาณสูงที่สุด รองลงมาเป็นวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.4) และ (3.2) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.2)-(4.4)

ชนิดของเฟส	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	สมการเคมีที่ (3.2)	สมการเคมีที่ (3.3)	สมการเคมีที่ (3.4)
W_2C/WC	5.69	21.51	17.42
Fe_3W_3C/Fe_2W_2C	-	8.91	6.17
$Fe_xAl_yO_z$	20.61	-	1.88
Al_2O_3	63.47	-	48.80
MgO	-	21.74	-
Others	10.23	47.84	25.73

4.2.2 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรง WB

การสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรง WB ด้วยระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.5) พบว่า ปฏิกิริยา SHS สามารถเกิดขึ้นได้ และมีลักษณะการเผาไหม้และลุกลามด้วยตัวเองของปฏิกิริยาที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทางกายภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะการหลอมเหลวและการจับตัวกันที่ดีดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.5)

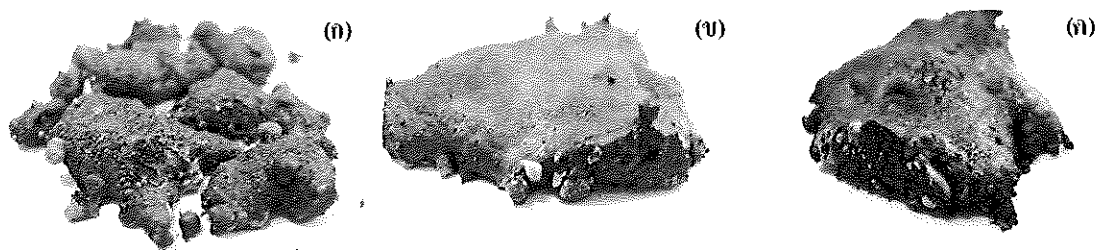
จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD พบว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้ประกอบด้วยเฟสต่างๆ ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีสารเสริมแรงเป็นเฟสทังสเตนไดโบไรด์ (W_2B) ปริมาณสูงถึงร้อยละ 45.57

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (4.9)

ชนิดของเฟส	ปริมาณ (ร้อยละ)
W_2B	45.57
Al_2O_3	46.90
Others	7.53

4.2.3 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่นๆ

การสังเคราะห์วัสดุผสมของระบบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่นๆ ได้แก่ WSi_2 , W_2B กับ WC และ W_2B กับ TiB_2 ด้วยระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.6) (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ พบว่า ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้และมีลักษณะการดูกลามของปฏิกิริยาที่ดีในทุกุระบบการสังเคราะห์ และวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.7) และ (3.8) มีลักษณะทางภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะการหลอมเหลวและการจับตัวกันที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการที่ (4.12) ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ ก. (3.6) ข. (3.7) และ ค. (3.8)

จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD พบว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้ประกอบด้วยเฟสต่างๆ ดังตารางที่ 4.8 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีองค์ประกอบของสารเสริมแรงปริมาณน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหัวข้อทั้งสองข้างต้น

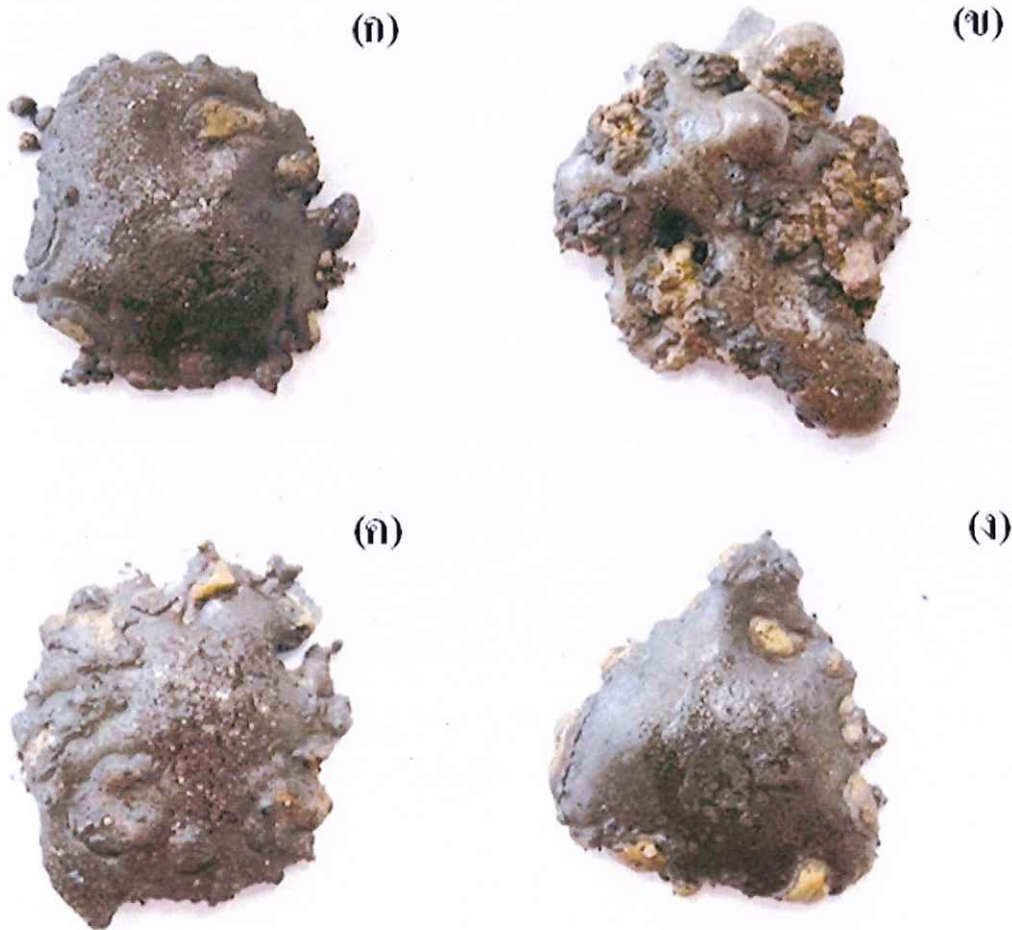
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.6) – (3.8)

ชนิดของเฟส	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	สมการเคมีที่ (3.6)	สมการเคมีที่ (3.7)	สมการเคมีที่ (3.8)
W_5Si_3	23.00	-	-
W_2B	-	14.88	10.32
Al_2O_3	64.20	47.44	63.19
Ti_2O_3	-	-	17.47
Others	12.80	34.28	20.94

จากผลการสังเคราะห์วัสดุผสมเบื้องต้นนี้ พบว่า ระบบสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์วัสดุผสมตามสมการเคมีที่ (3.5) สามารถนำไปเป็นระบบหลักในการศึกษา เพื่อสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้าต่อไปได้ เนื่องจากเป็นระบบสารตั้งต้นมีค่า T_{sd} มากกว่า $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถเกิดปฏิกิริยา SHS ได้จริง และสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทางกายภาพที่บ่งชี้ถึงลักษณะการหลอมเหลวและการจับตัวกันที่ดี จึงมีความเหมาะสมแก่การนำไปสังเคราะห์เป็นผิวเคลือบวัสดุผสม

4.3.4 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสมที่แปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นในระบบหลัก

จากการสังเคราะห์วัสดุผสมที่แปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นในระบบหลัก เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและปริมาณของสารเสริมแรง จึงทำการแปรค่าสัดส่วนสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.9)-(3.12) พบว่า ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้และมีลักษณะการลุกลามของปฏิกิริยาที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นดังกล่าวมีลักษณะการหลอมเหลวที่ดีขึ้น และการจับตัวกันของเฟสที่มีลักษณะใกล้เคียงกันมีความชัดเจนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการสังเคราะห์วัสดุผสมโดยการแปรค่าสัดส่วนของสารตั้งต้นในระบบหลัก WB ในเบื้องต้น ดังลักษณะทางกายภาพของสารผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่

ก. (3.9) ข. (3.10) ค. (3.11) และ ง. (3.12)

จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD พบว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้ประกอบด้วยเฟสต่างๆ ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ และมีเฟสของสารเสริมแรง W_2B ปริมาณสูงที่สุด คือ ระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.11) และ รองลงมาคือ ระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.12) และ (3.9) ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD กับสารผลิตภัณฑ์ที่ควรสังเคราะห์ได้จากการคำนวณตามปฏิกิริยาเคมีทั้งสาม พบว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.9) มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้ามากที่สุด เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีความคล้ายคลึงกับสารผลิตภัณฑ์ที่คาดการณ์ไว้จากการคำนวณ และมีลักษณะการหลอมเหลวและการจับตัวกันดีที่สุด ดังนั้นระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.9) จึงถูกเลือกให้เป็นระบบที่ใช้สำหรับการศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมอีกระบบหนึ่ง และให้ชื่อว่า “ระบบรอง”

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นตามสมการเคมีที่ (3.9) – (3.12)

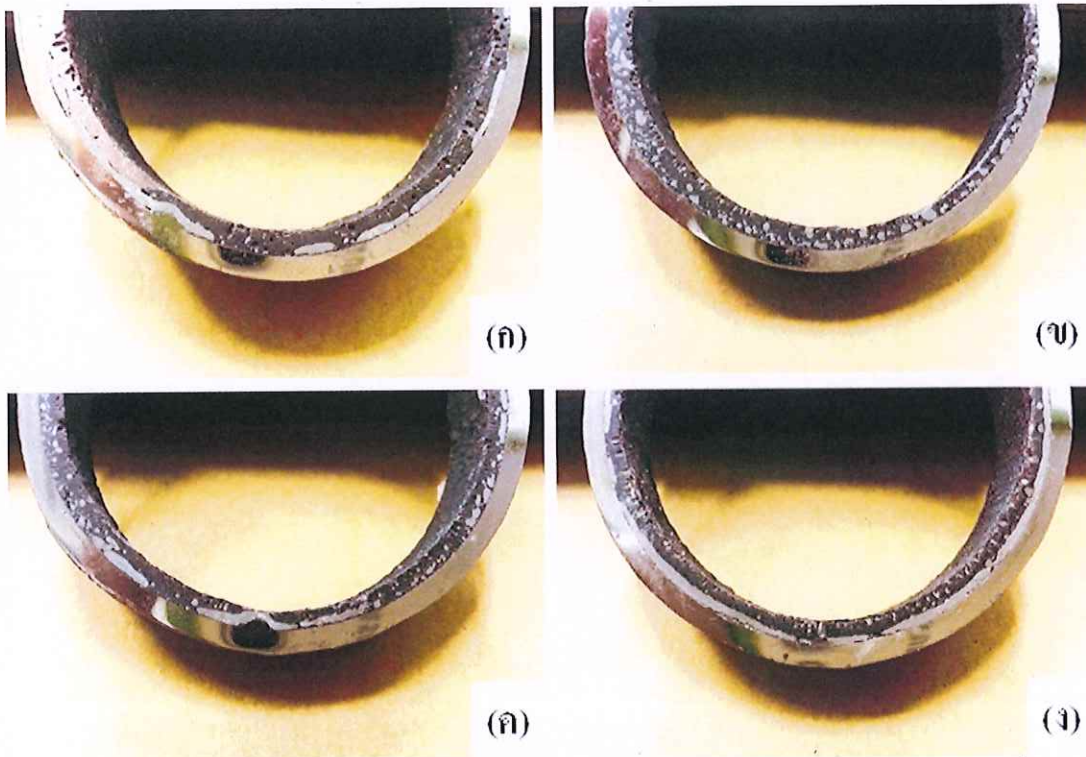
ชนิดของเฟส	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	สมการเคมีที่ (3.9)	สมการเคมีที่ (3.10)	สมการเคมีที่ (3.11)	สมการเคมีที่ (3.12)
W_2B	27.89	-	50.41	32.34
$Fe_xAl_yO_z$	0.93	3.34	-	2.40
Al_2O_3	50.81	91.19	39.36	59.66
Others	20.37	5.47	10.23	5.63

4.3 ผลการสังเคราะห์เคลือบผิววัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า

การศึกษาการสังเคราะห์เคลือบผิววัสดุผสมบนผิวภายในของท่อเหล็กกล้า จะแบ่งการศึกษาไปตามตัวแปรที่สนใจออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ ผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rotational speed) ผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (Additive) และผลกระทบของขนาดของท่อเหล็กกล้า ซึ่งผลการศึกษาเป็นดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการศึกษาผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

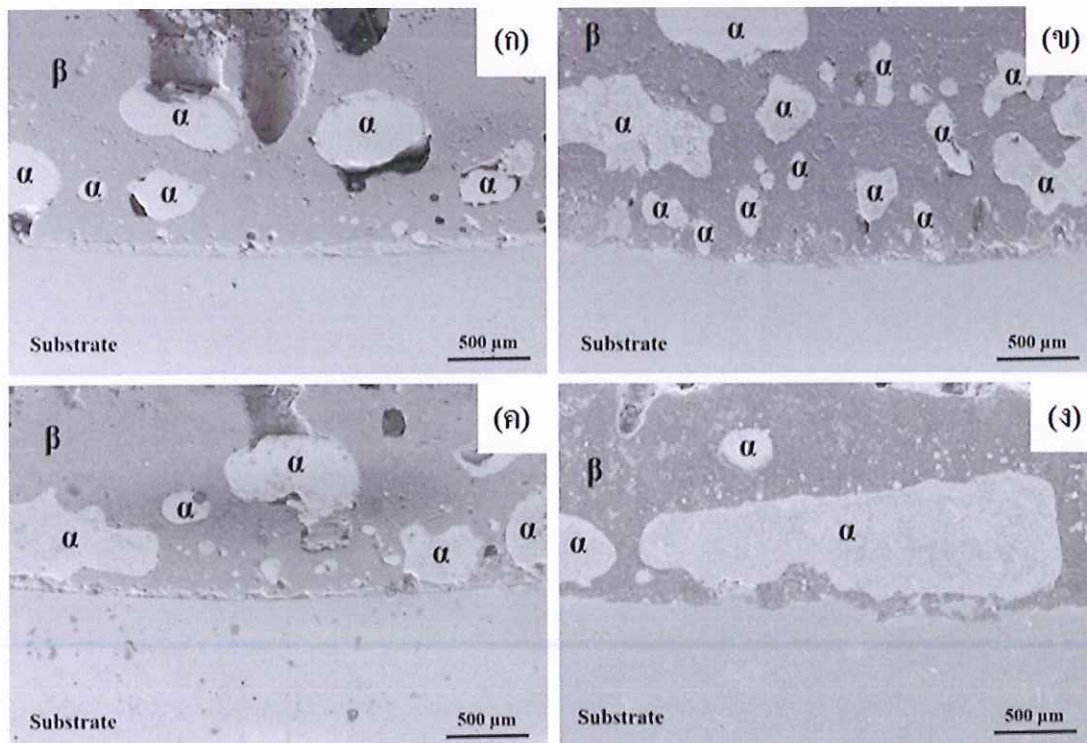
การศึกษาผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จะแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 1500 1750 2000 และ 2250 rpm ตามลำดับ และสังเคราะห์ผิวเคลือบจากระบบสารตั้งต้นตามระบบหลัก ซึ่งลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้เป็นดังรูปที่ 4.9 และจากรูปพบว่า เมื่อแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้มีค่าสูงขึ้น รูพรุนที่ปรากฏบนผิวเคลือบวัสดุผสมมีขนาดเล็กลงและปริมาณลดน้อยลงตามลำดับ นอกจากนี้ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะสามารถเกาะกลุ่มและเคลื่อนตัวมาเกาะบนผิวของวัสดุฐาน (Substrate) หรือผิวภายในของท่อเหล็กกล้าได้ดีขึ้นตามลำดับอีกด้วย



รูปที่ 4.9 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ (ก) 1500 rpm (ข) 1750 (ค) 2000 และ (ง) 2250 rpm

เมื่อศึกษาผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยกล้อง SEM (รูปที่ 4.10) พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณรูพรุนลดน้อยลงจริง เมื่อแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่า รูพรุนถูกกำจัดได้ดีขึ้นจริง เมื่อความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางถูกปรับให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนเหล่านี้เป็นผลมาจากฟองแก๊สที่เกิดขึ้นขณะที่

สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากัน โดยฟองแก๊สขนาดใหญ่จะถูกผลัดออกไปได้ก่อน เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางค่าน้อย และฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก่อน และถูกผลัดออกไปได้ เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ค่าสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลโดยตรงต่อแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีค่าสูงขึ้น แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้สารผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบาถูกผลัดออกไปนอกระบบการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้ก่อน ในที่นี้คือ ฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่นั่นเองนอกจากนี้ การแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ยังส่งผลต่อการเกาะกลุ่มกันของสารประกอบเชิงโลหะ (ให้ชื่อสมมุติว่า “เฟส α ”) เนื่องจากเฟสนี้หนักกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ (ให้ชื่อสมมุติว่า “เฟส β ”) เมื่อเกิดการเกาะกลุ่มกันจะสามารถเคลื่อนตัวไปเกาะบนผิววัสดุฐานหรือผิวภายในของท่อเหล็กกล้าได้ง่ายกว่า และเมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีค่าสูงขึ้น ก็จะช่วยให้ถูกดึงมาเกาะบนผิววัสดุฐานได้เร็วขึ้นและเกิดการอัดแน่นมากขึ้น ผิวเคลือบจึงมีความหนาแน่นมากขึ้นตามไปด้วยดังในงานวิจัยของ Odawara และ Ikeuchi (1981) และ Lin และคณะ (2013)



รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อแปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ (a) 1500 rpm (b) 1750 (c) 2000 และ (d) 2250 rpm

จากผลการวัดค่าความเรียบผิวของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ผิวหน้าของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีความขรุขระน้อยลง และมีค่าเข้าใกล้ค่าความเรียบผิวของผิววัสดุฐาน ($1.464 \mu\text{m}$) มากขึ้น เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีค่าสูงขึ้น ดังค่าในตารางที่ 4.10

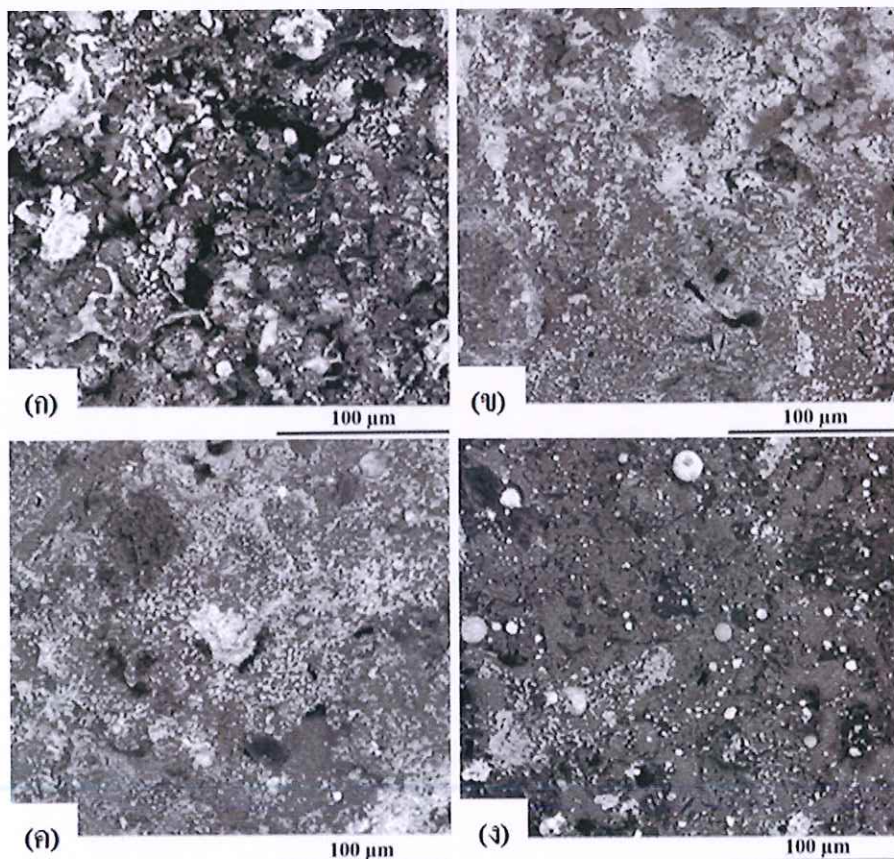
จากผลการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคด้วยวิธีของ Vicker ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.11 พบว่า เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งระดับจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมทั้งสองชั้นและวัสดุฐานสูงขึ้น เนื่องจากค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแปรผันตามแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นเมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ใช้สูงขึ้น แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจึงสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวถูกผลักเข้าหาผิววัสดุฐานได้ง่ายขึ้น และฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของสารตั้งต้นถูกผลักออกไปจากระบบการเคลือบผิววัสดุผสมได้ง่ายขึ้น ทำให้ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีความแน่นตัวมากขึ้น และถูกแบ่งชั้นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นตามไปด้วย

และจากผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือนของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าความแข็งแรงในการต้านทานแรงกดเฉือน (σ_s) มีเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 1750 rpm และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่สูงขึ้นเป็น 2000 และ 2250 rpm เนื่องจากลักษณะการยึดเกาะที่ค่อนข้างดีของผิวเคลือบวัสดุผสมชั้น α ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดว่า ระบบที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 1750 rpm มีการกระจายตัวที่ดีของเฟส α (เฟสสีขาว) บนผิววัสดุฐานดังรูปที่ 4.12(ข) จึงทำให้มีค่า σ_s ที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือนของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหลักนี้กับผิวเคลือบวัสดุผสมจากงานวิจัยของ Odawara และ Ikeuchi (1981) พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือนน้อยกว่ามาก เนื่องจากสารตั้งต้นที่เลือกนำมาใช้นั้นไม่ใช่สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูงดังในงานวิจัยข้างต้น ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จึงมีเฟสระหว่างกลางเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือนมีค่าน้อยได้ แต่นี่ก็ถือเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการพัฒนาระบบเพื่อนำสารตั้งต้นชนิดนี้มาใช้เพื่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรง WB ได้ต่อไปในอนาคต เนื่องจากผิวเคลือบวัสดุผสมชนิดนี้ให้ค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ค่อนข้างสูง (1700 HV)

ตารางที่ 4.10 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหลักที่แปรค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (rpm)	ค่าความเรียบผิวของผิวเคลือบวัสดุ (μm)	ค่าความแข็งระดับจุลภาค (HV)			σ_s (MPa)
		วัสดุฐาน	ชั้น α	ชั้น β	
1500	9.90	126.17	634.83	1069.66	2.03
1750	8.65	138.14	699.63	1384.24	9.38
2000	7.59	163.08	813.55	1501.40	8.06
2250	7.40	193.72	962.74	1699.08	6.87
1535 (Odawara, 1981)		1500			20.00

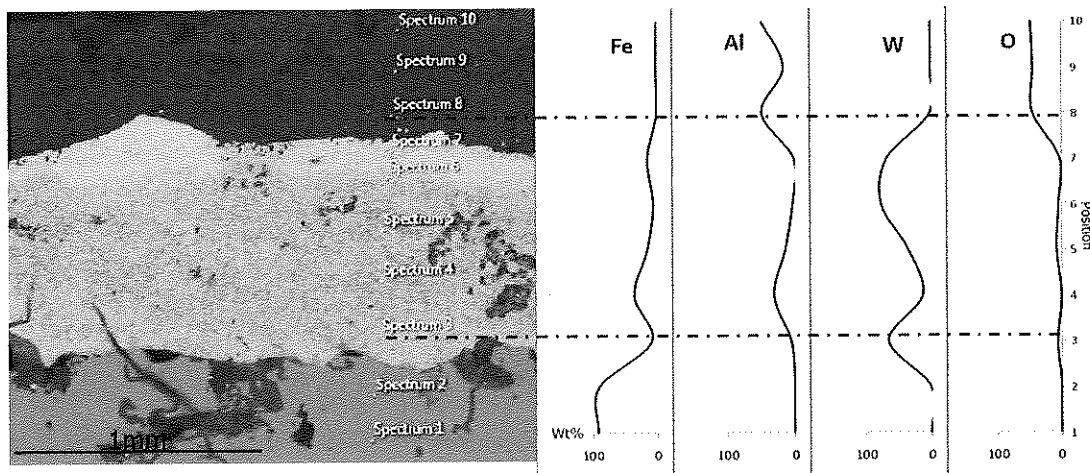
*ค่าความแข็งระดับจุลภาคของท่อขึ้นงานตัวอย่างเดิม 161.91 HV



รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมดแบ็กสแกตเตอร์อิเล็กตรอน (BSE) ของบริเวณที่รับแรงกดเฉือนของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ (a) 1500 (b) 1750 (c) 2000 และ (d) 2250 rpm

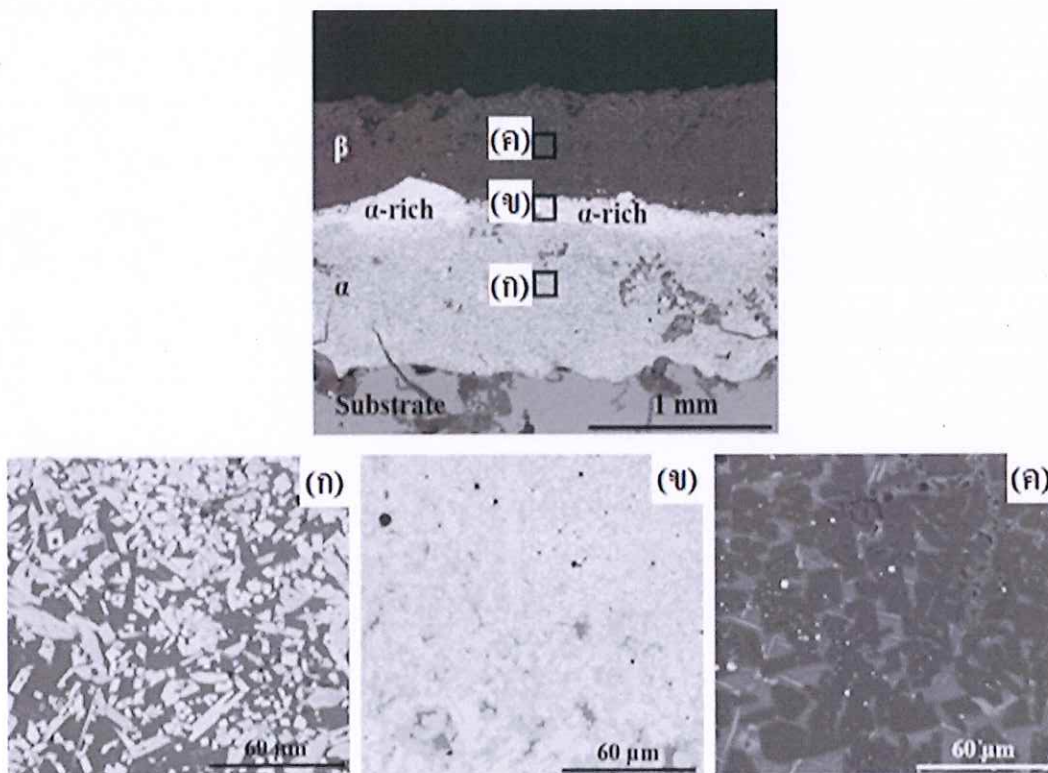
ดังนั้นจากการศึกษาผลกระทบของค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางข้างต้น พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นระบบหลักและเลือกใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm เป็นผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสมบัติที่ดีที่สุด ค่าความเรียบผิวเท่ากับ $7.40 \mu\text{m}$ ค่าความแข็งระดับจุลภาคเท่ากับ 962.74 HV ในชั้น α และ 1699.08 HV ในชั้น β และค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเลื่อนเท่ากับ 6.87 MPa ด้วยเหตุนี้จึงเลือกให้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm เหมาะสมสำหรับการศึกษาการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมในหัวข้อถัดๆ ไป

เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบนี้ อีกครั้งด้วยกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค EDX พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมถูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้นที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.12 โดยชั้นแรก คือ ชั้น α เป็นชั้นที่มีธาตุ Fe Al และ W ปริมาณสูงกระจายตัวอยู่ ชั้นที่สอง คือ ชั้น α -rich เป็นบริเวณที่มีการกระจายตัวของธาตุ Fe Al และ W ปริมาณสูงคล้ายกับชั้นแรก แต่บริเวณนี้มีปริมาณของธาตุ W สูงกว่าชั้น α ปกติ ดังค่าร้อยละโดยน้ำหนัก (Wt%) ของธาตุชนิดต่างๆ ที่กระจายตัวอยู่บนตำแหน่งการวิเคราะห์ที่ 6 และ 7 ในภาพกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละ โดยน้ำหนักของธาตุชนิดต่างๆ ที่กระจายตัวอยู่บนตำแหน่งการวิเคราะห์ที่ตำแหน่งนั้นๆ บนท่อนิงงานตัวอย่าง และชั้นที่สาม คือ ชั้นเฟส β เป็นชั้นที่มีธาตุ Al และ O ปริมาณสูงกระจายตัวอยู่



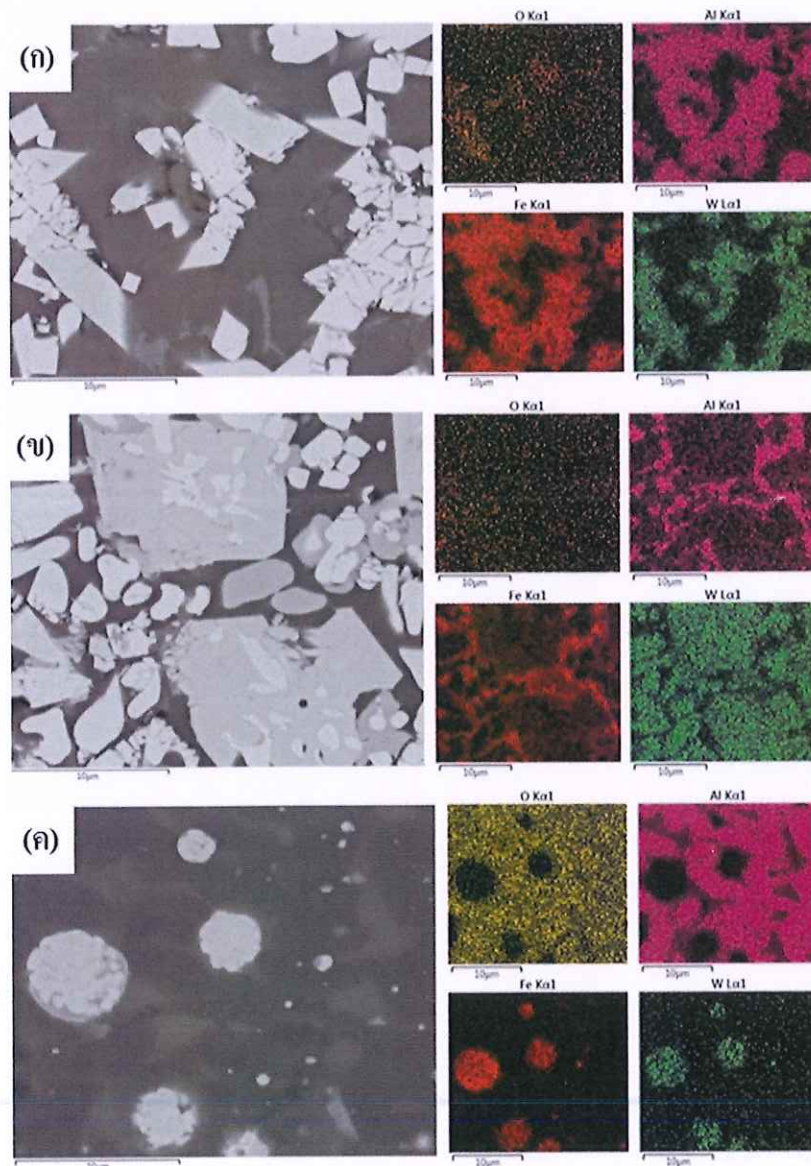
รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE และปริมาณของธาตุต่างๆ ที่กระจายตัวอยู่ในผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm

และเมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ที่กำลังขยายสูงขึ้น (1000x) ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลัก พบว่า ชั้น α ประกอบด้วยเฟสสีขาวที่มีลักษณะแท่งทรงสี่เหลี่ยมกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นสีเทา (รูปที่ 4.13(ก)) ชั้น α -rich ประกอบด้วยเฟสสีขาวและสีขาวสว่างที่มีลักษณะคล้ายแท่งทรงสี่เหลี่ยมกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นสีเทา (รูปที่ 4.13(ข)) และชั้น β ประกอบด้วยเฟสสีเทาเข้มที่มีลักษณะคล้ายทรงสี่เหลี่ยมและถูกแทรกกระหว่างกันด้วยเฟสสีเทา (รูปที่ 4.13(ค)) และเมื่อพิจารณาผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคนี้อีกพร้อมกับผล XRD ของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหลัก จึงคาดได้ว่า ชั้น α เป็นวัสดุผสมที่มีเนื้อพื้นเป็น $Fe_xAl_yO_z$ และสารเสริมแรงเป็น W_2B ชั้น β เป็น Al_2O_3 และสำหรับชั้น α -rich ที่มีเฟสสีขาวและสีขาวสว่างสลับกันอยู่นั้นคาดว่า เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้นี้ อาจจะประกอบด้วยทั้งสแตนนอร์ไรด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน คือ WB และ W_2B โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจพบนั้นจึงมีลักษณะต่างกันดังในงานวิจัยของ Chanadee และคณะ (2014)



รูปที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm ด้วยกำลังขยาย 1000x: (ก) ชั้น α (ข) ชั้น α -rich และ (ค) ชั้น β

เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค EDX โหมดของการวิเคราะห์กระจายของธาตุองค์ประกอบบนพื้นที่ (Mapping) พบว่า เฟสสีขาวและเฟสสีเทาในชั้น α และชั้น α -rich คือ W_2B และ $Fe_xAl_yO_z$ ตามลำดับ ส่วนเฟสสีเทาและเทาเข้มในชั้น β คือ $Fe_xAl_yO_z$ และ Al_2O_3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และสำหรับส่วนของเฟสสีขาวและขาวสว่างในชั้น α -rich นั้น คือ เฟส W_2B ที่มีธาตุ B ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์นี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sugiyama และ Taimatsu (2002)

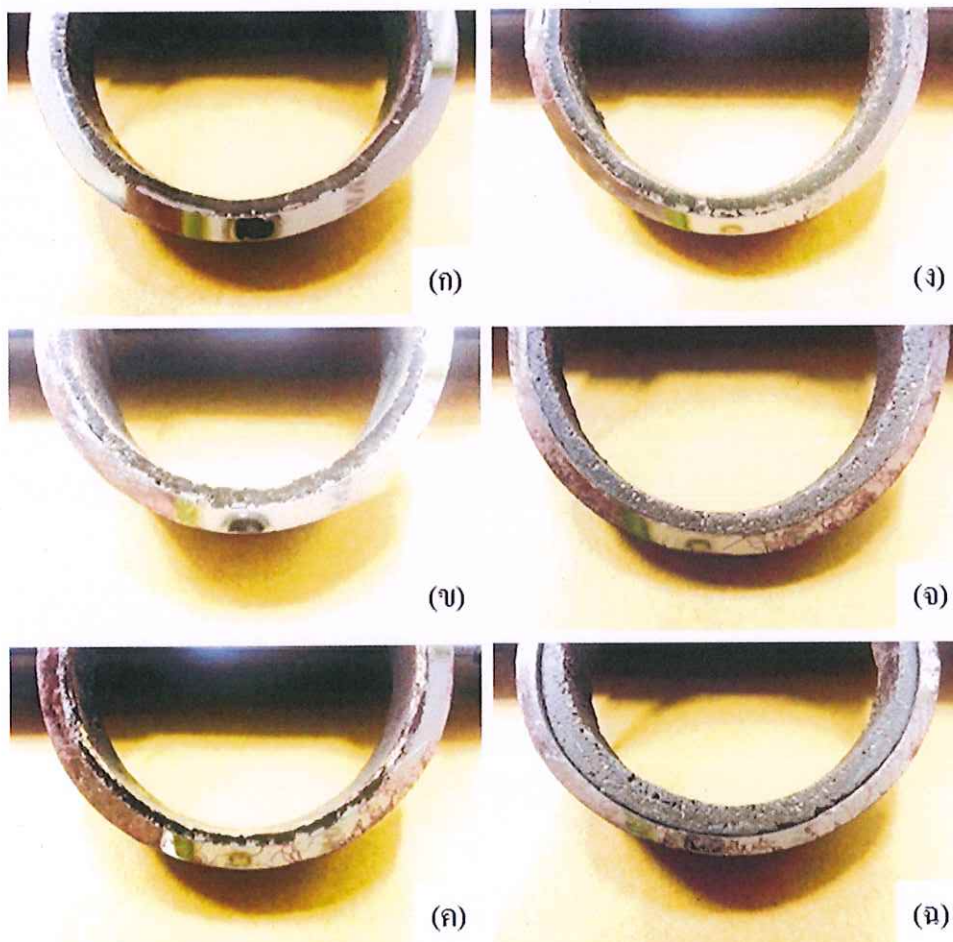


รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm: (ก) ชั้น α (ข) ชั้น α -rich และ (ค) ชั้น β

4.3.2 ผลการศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

4.3.2.1 ผลการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว

การศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยว จะสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมจากสารตั้งต้นตามระบบหลัก และกำหนดค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อที่ 4.3.1 (2250 rpm) โดยสารตัวเติมเดี่ยวที่สนใจศึกษามี 2 ชนิด คือ CaO_2 และ CaF_2 และแปรค่าปริมาณการเติมที่ 1 3 และ 5 โมล ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ โดยแปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว: ชนิด CaO_2 (ก) 1 (ข) 3 (ค) 5 โมล และชนิด CaF_2 (ง) 1 (จ) 3 (ฉ) 5 โมล

จากลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เมื่อเติมสารตัวเติมเดี่ยวทั้งสองชนิดในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ผิวเคลือบวัสดุผสมยึดเกาะบนวัสดุฐานได้น้อยลง

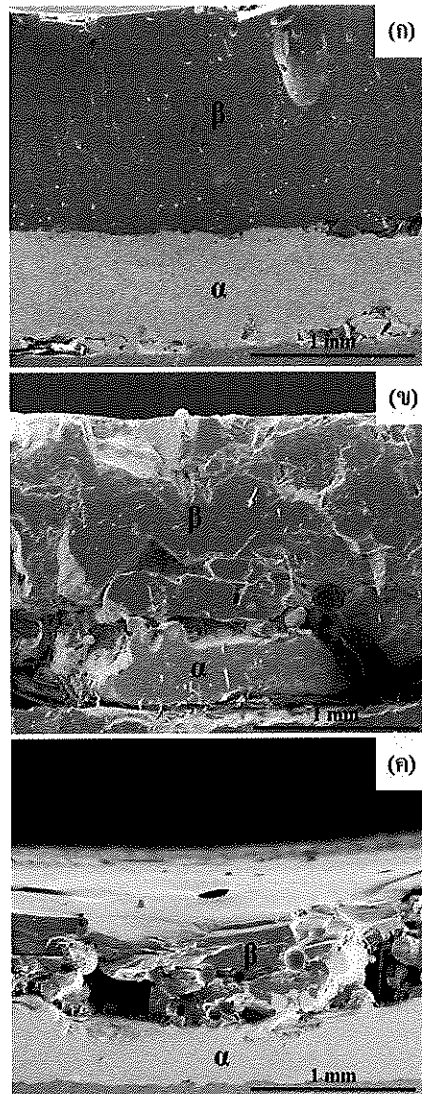
ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารตัวเติมเดี่ยวทั้งสองชนิดนี้ ทำให้ค่า T_{sd} ของระบบสารตั้งต้นลดต่ำลง จึงส่งผลให้ค่าความร้อนในระบบไม่เพียงพอต่อการทำให้การแยกเฟส การเกาะกลุ่มกัน และการเคลื่อนตัวไปเกาะลงบนผิววัสดุฐานของสารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวเกิดขึ้นทันเวลา ก่อนการแข็งตัวจะเกิดขึ้น ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนสำหรับระบบที่เติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaF_2 โดยเฉพาะระบบที่เติมปริมาณมากที่สุดดังรูปที่ 4.15(ฉ) ที่ผิวเคลือบวัสดุผสมเกาะบนผิววัสดุฐานได้ไม่ดี

เมื่อศึกษาผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้อง SEM พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ทำการเติมสารตัวเติมเดี่ยวทั้งสองชนิดยึดเกาะบนผิววัสดุฐานได้น้อยลงจริง เมื่อทำการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่มากขึ้นดังลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ในรูปที่ 4.16 และ 4.17

สำหรับระบบที่ทำการเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaO_2 เมื่อแปรค่าการเติมที่จำนวน 5 โมล (รูปที่ 4.16(ค)) เฟส α สามารถเกาะติดบนผิววัสดุฐานได้ดีที่สุด ซึ่งต่างไปจากสมมุติฐานที่วางไว้จากลักษณะทางกายภาพที่ดูด้วยตาเปล่าดังรูปที่ 4.15(ค) แต่ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่นน้อยกว่าผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ทำการเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิดนี้จำนวน 1 โมล (รูปที่ 4.16(ก)) ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาของสารตั้งต้นมีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของ CaO_2 ทำให้เกิดแก๊สออกซิเจน (O_2) ดังปฏิกิริยาเคมีที่ (4.7) จากงานวิจัยของ Zhao และคณะ (2014)



ดังนั้นเมื่อแปรค่าการเติม CaO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น แก๊สจึงมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันในท่อขึ้นงานตัวอย่างจึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และมากจนทำให้บางส่วนของสารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวพุ่งกระเด็นออกไปจากท่อขึ้นงานตัวอย่าง สารผลิตภัณฑ์ที่เหลืออยู่จึงมีปริมาณน้อยที่ เมื่อเกิดการแข็งตัว ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จึงมีความหนาแน่นเอง

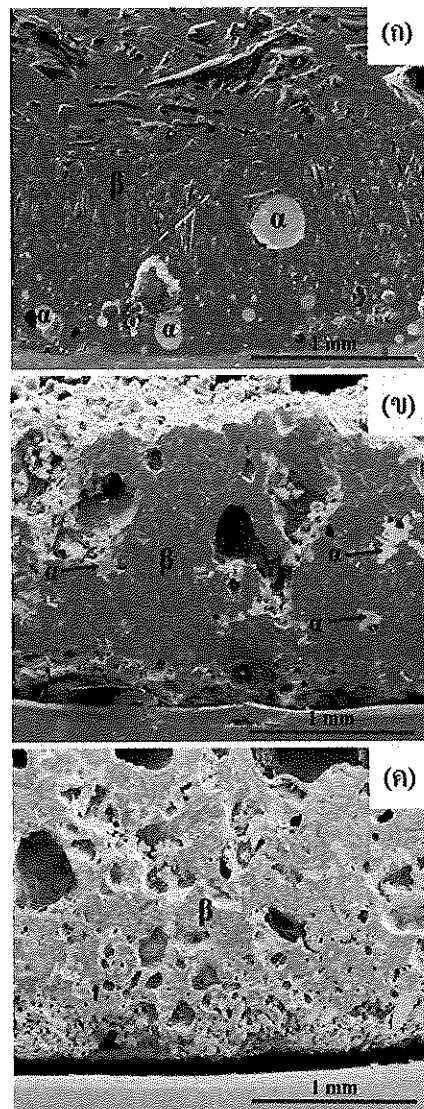


รูปที่ 4.16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อแปรค่าปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว ชนิด CaO_2 : (ก) 1 โมล (ข) 3 โมล และ (ค) 5 โมล

สำหรับระบบที่เติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaF_2 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้เกาะติดบนผิววัสดุฐานได้น้อยลงจริง เมื่อสารตัวเติมถูกเติมในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจาก CaF_2 เป็นสารประกอบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับอะตอมของ O ในอากาศเมื่อได้รับความร้อน (Sakalak et al., 2005) โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนี้เป็นดังสมการเคมีที่ (4.8)

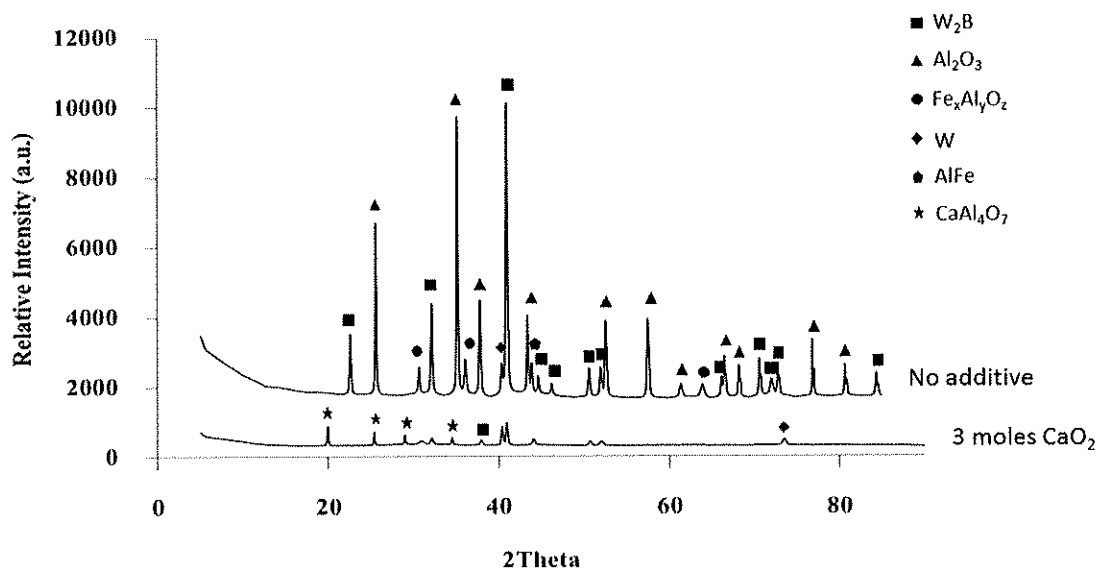


จากการคำนวณค่าพลังงานกิบส์ (ΔG) ของปฏิกิริยาข้างต้น พบว่า ปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เนื่องจากค่า ΔG มีค่าเป็นบวก นั่นคือเมื่อเติม CaF_2 ในปริมาณที่สูงขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมีของระบบสารตั้งต้นก็จะถูกดูดออกไปใช้จำนวนมากขึ้นเช่นกัน จึงส่งผลให้ความร้อนของระบบสารตั้งต้นเดิมมีปริมาณน้อยลง ทำให้การแข็งตัวของสารผลิตภัณฑ์จึงเกิดได้เร็วกว่าเดิม ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จึงมีการแยกเฟสและเกาะติดบนผิววัสดุฐานได้น้อยลงดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ เมื่อแปรค่าปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว ชนิด CaF_2 : (ก) 1 โมล (ข) 3 โมล และ (ค) 5 โมล

เมื่อวัดค่าความเรียบผิวของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เมื่อทำการเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaO_2 ค่าความเรียบผิวมีค่าที่ดีกว่าระบบที่ทำการเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaF_2 ดังตารางที่ 4.11 เนื่องจากผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ในระบบนี้มีผิวหน้าที่มีลักษณะคล้ายแก้วมากขึ้น เพราะ CaAl_4O_7 เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่มักถูกพบในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุจำพวกแก้วเซรามิกส์ (Glass ceramics) และซีเมนต์ (Cement) ดังในงานวิจัยของ Rodríguez และคณะ (2012) นั่นคือ การเติม CaO_2 ในปริมาณที่มากขึ้นจะก่อให้เกิดเฟส CaAl_4O_7 ปรากฏขึ้นดังผลการวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบวัสดุด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.18 ทั้งนี้การที่ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่เติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaF_2 มีจำนวนรูพรุนมากขึ้นเมื่อแปรค่าการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจาก CaF_2 มีผลให้ปฏิกิริยาของสารตั้งต้นมีการคายแก๊สออกจากรวมในปริมาณมาก จึงยากต่อการผลักดันออกไปจากผิวเคลือบได้หมดก่อนการแข็งตัวจะเกิดขึ้น



รูปที่ 4.18 ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นหลักที่ไม่เติมสารตัวเติมและเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิด CaO_2 จำนวน 3 โมล

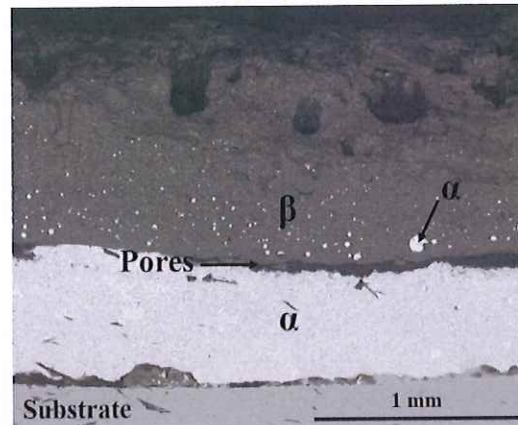
ตารางที่ 4.11 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่แปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยว

ระบบสารตั้งต้นที่ใช้	ค่าความเรียบผิวของผิวเคลือบ (μm)
ไม่เติมสารตัวเติม	7.40
1 โมล CaO_2	3.79
3 โมล CaO_2	2.83
5 โมล CaO_2	2.27
1 โมล CaF_2	6.10
3 โมล CaF_2	15.03
5 โมล CaF_2	12.24

ดังนั้นจากผลการศึกษการแปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมเดี่ยวทั้งสองชนิดข้างต้น พบว่า CaO_2 ถือเป็นสารตัวเติมเดี่ยวที่ดีกว่า CaF_2 และปริมาณการเติมที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยระบบสารตั้งต้นจากระบบหลักอยู่ที่จำนวน 1 โมล เนื่องจากให้ค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุดที่ $2.27 \mu\text{m}$

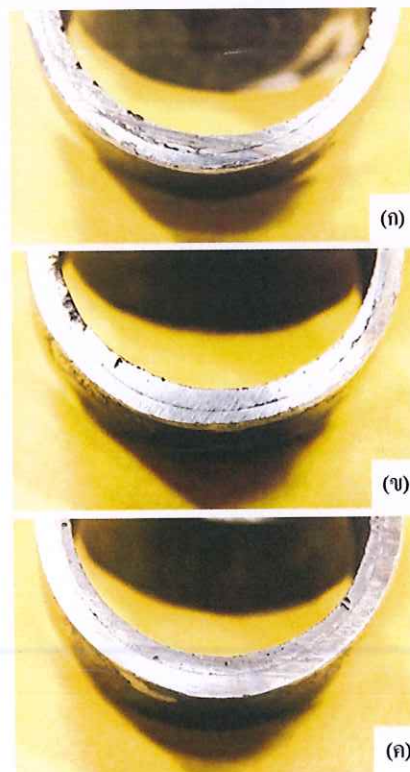
4.3.2.2 ผลการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมคู่

ในการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมคู่เป็นการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมที่มีผลกระทบต่อ การสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมจากระบบรอง ดังนั้นจึงทำการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมจากระบบรองก่อน พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองมีรูพรุนจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักดังรูปที่ 4.9(ง) และพบได้ชัดเจนบนทั้งสองชั้นของผิวเคลือบ นอกจากนี้ยังพบด้วยว่า บริเวณรอยต่อระหว่างผิววัสดุฐานกับชั้น α และระหว่างชั้น α กับ β เชื่อมต่อกันได้ไม่ดีเท่ากับผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลัก (พื้นที่ที่มีสีดำสนิท คือ รูพรุน เนื่องจากเป็นภาพแสดงลักษณะ โครงสร้างของชิ้นงานในโหมด BSE) ดังรูปที่ 4.19



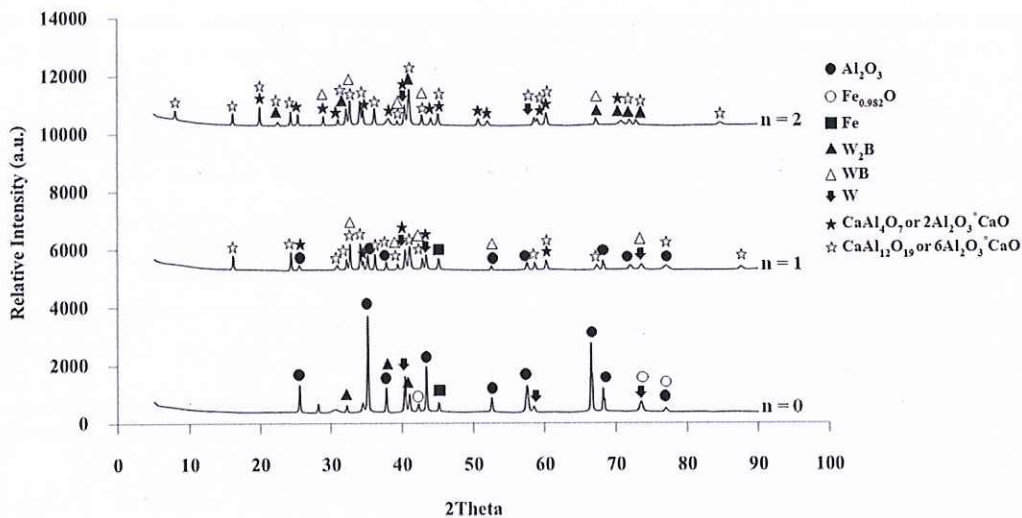
รูปที่ 4.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในโหมด BSE ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรอง

สารตัวเติมกลุ่มตัวแรกที่น่าสนใจคือ $\text{CaO}_2\text{-Al}$ เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2.1 แสดงให้เห็นแล้วว่า CaO_2 สามารถช่วยปรับปรุงค่าความขรุขระของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จริง ซึ่งจากผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$ ตามสมการเคมีที่ 3.13 ที่ $n=0, 1$ และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$ โดยกำหนดการเติมที่ (ก) $n=0$ (ข) $n=1$ และ (ค) $n=2$

พบว่า เมื่อ n มีค่าสูงขึ้นผิวเคลือบที่ได้สามารถเกาะบนผิววัสดุฐาน ได้ดีขึ้น และมีปริมาณรูพรุนน้อย จึงนำผิวเคลือบที่ได้ไปตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.21 พบว่า เมื่อเติมสารตัวเติมชนิดนี้ในปริมาณที่มากขึ้น ผิวเคลือบวัสดุผสมมีองค์ประกอบที่เป็นเฟส CaAl_4O_7 และ $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ มากขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.2.1 ที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้น



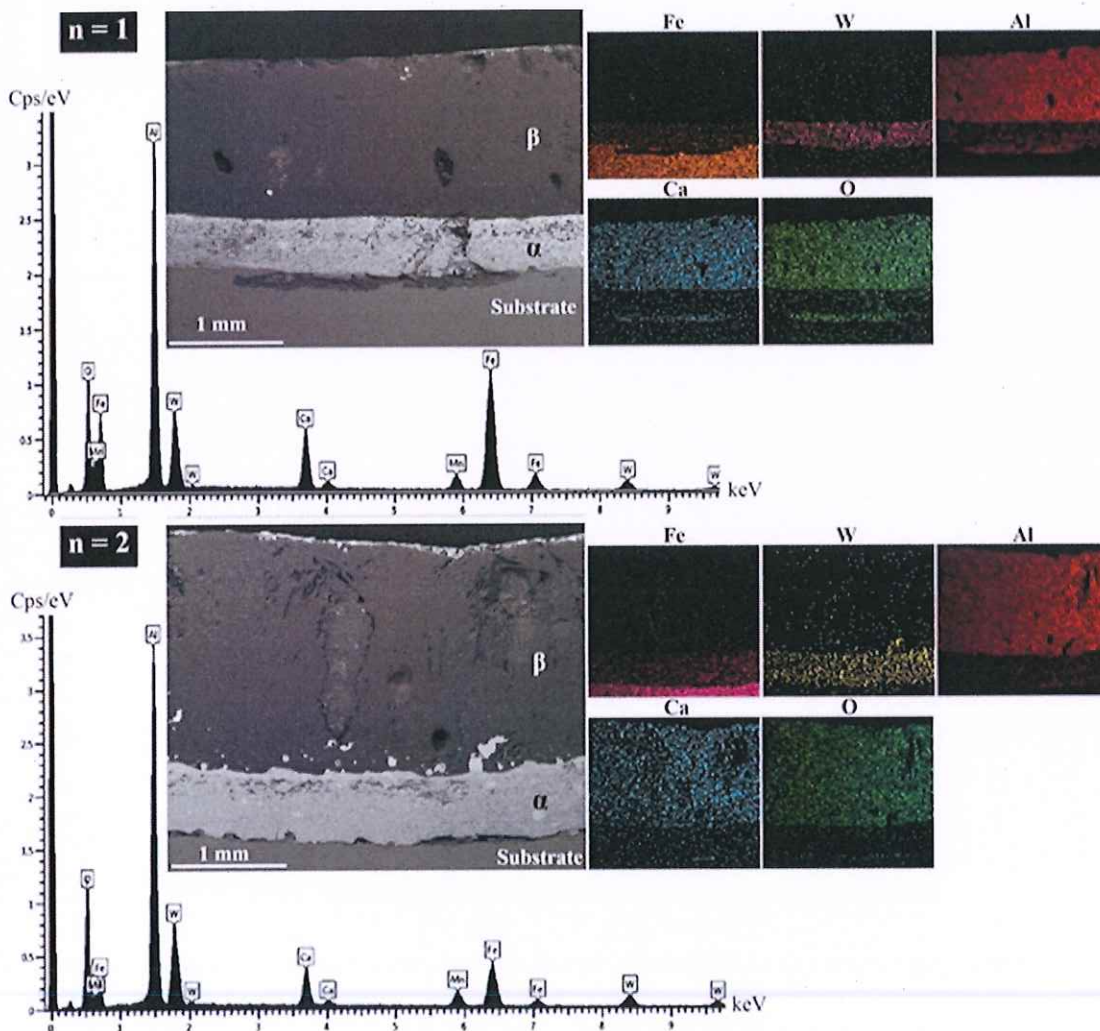
รูปที่ 4.21 ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่เติมสารตัวเติมชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$ ที่ $n = 0, 1$ และ 2

เมื่อวัดสมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ผิวเคลือบมีผิวหน้าที่เรียบขึ้น และรอยต่อระหว่างชั้นผิวเคลือบกับวัสดุฐานมีความต้านทานแรงกดเหนือนที่ดีขึ้น เมื่อเติมสารตัวเติมนี้ในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งตรงตามที่คาดการณ์ไว้ แต่ค่าความแข็งระดับจุลภาคของผิวเคลือบในแต่ละชั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่แปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$

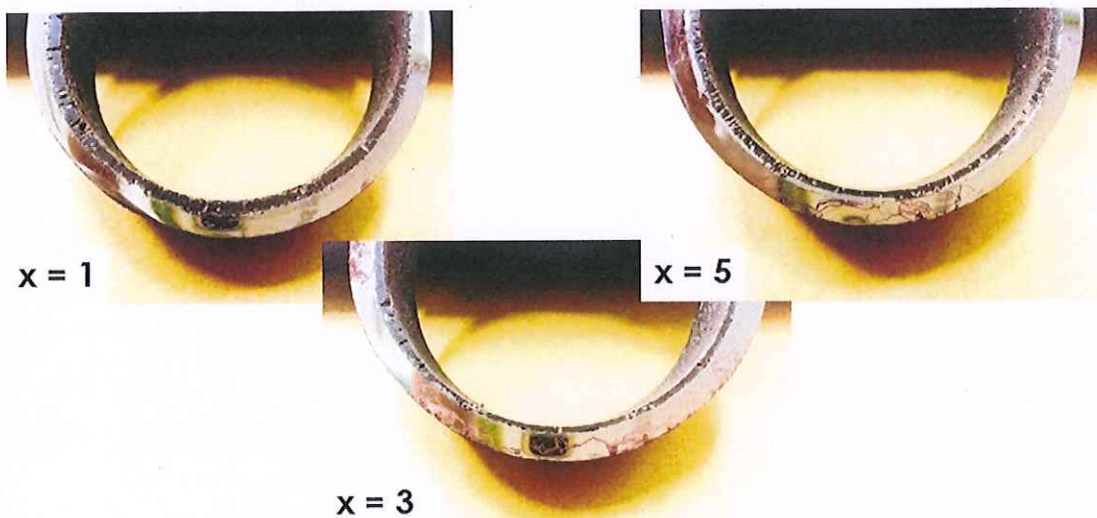
n	ค่าความเรียบผิว (μm)	ค่าความแข็งระดับจุลภาค (HV)		σ_s (MPa)
		ชั้น α	ชั้น β	
0	6.32	935.08	1067.52	2.68
1	6.18	897.90	778.24	2.88
2	5.39	862.06	903.60	3.85

ดังนั้นผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมกลุ่มชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$ ที่ $n=2$ เป็นผิวเคลือบที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบวัสดุผสมที่เคยสังเคราะห์ได้ก่อนหน้านี้ เพราะผิวเคลือบมีรูพรุนน้อย มีค่าความเรียบผิวที่ดี มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเหนือนที่ดี และมีค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคที่พอรับได้ เมื่อนำไปศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping (รูปที่ 4.22) พบว่า ผิวเคลือบสามารถแยกชั้นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อเติมสารตัวเติมกลุ่มชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$ ที่ n มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเฟส CaO ที่เพิ่มขึ้นในระบบเข้าไปช่วยจับให้เฟส Al_2O_3 ให้ลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนได้ง่ายขึ้น และกลายเป็นเฟส CaAl_4O_7 และ $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ ดังผล XRD ในรูปที่ 4.21 ข้างต้น



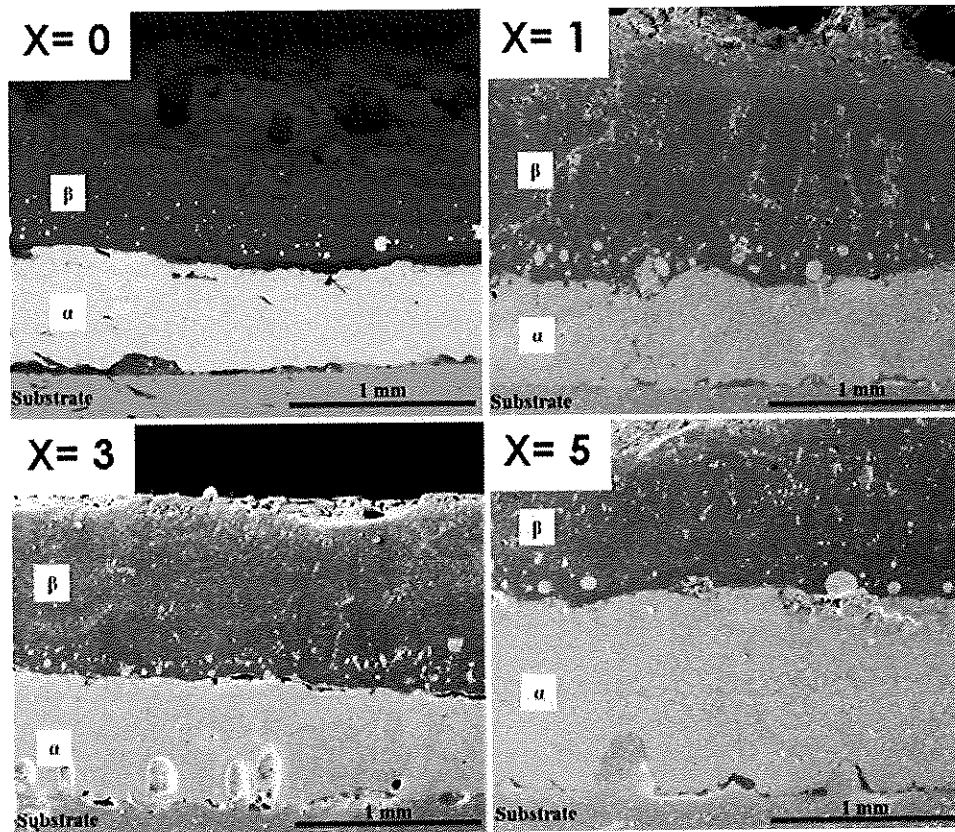
รูปที่ 4.22 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมกลุ่มชนิด $\text{CaO}_2\text{-Al}$ ที่ $n=1$ และ 2

และสารตัวเติมคู่ตัวที่สองที่สนใจศึกษา คือ $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ เนื่องจากต้องการเพิ่มความร้อนไปพร้อมกับการเพิ่มเฟสของเหลวของโลหะผสมให้แก่ระบบ เพื่อให้เฟสที่มีความหนาแน่นสูงตกลงสู่ชั้นล่างได้ง่ายและนานขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ผิวเคลือบแยกชั้นกันได้ชัดเจน และมีความแน่นตัวมากขึ้น ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้สามารถยึดเกาะบนวัสดุฐานได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเติมสารตัวเติมคู่ชนิดนี้ทำให้ค่า T_{sd} ของระบบสารตั้งต้นเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณความร้อนในระบบการเคลือบผิวมีค่าสูงขึ้นและมีปริมาณเพียงพอให้การแยกเฟส การเกาะกลุ่มกัน และการเคลื่อนตัวไปเกาะบนผิววัสดุฐานของสารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวเกิดขึ้นได้อย่างดีก่อนการแข็งตัวจะเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.23 ตามที่ได้คาดการณ์ไว้

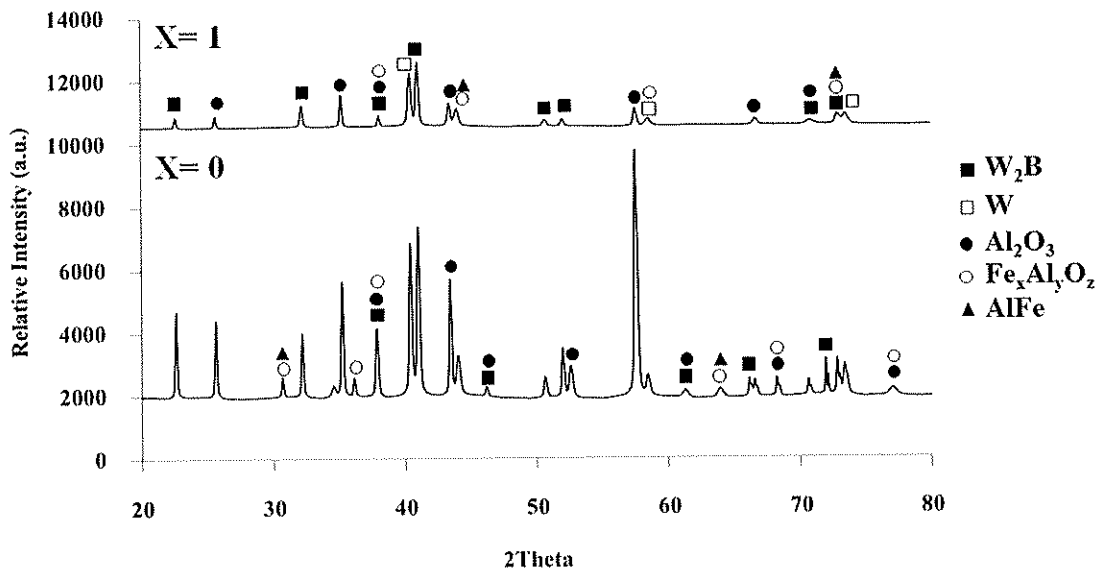


รูปที่ 4.23 ลักษณะของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ โดยกำหนดการเติมที่ $X=1, 3$ และ 5

เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้เกาะติดบนผิววัสดุฐาน และมีปริมาณรูพรุนลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.24 สอดคล้องกับสมมุติฐานที่คาดไว้ข้างต้น นอกจากนี้จากรูปจะเห็นว่า ผิวเคลือบชั้น α มีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเฟสของเหลวที่เพิ่มให้แก่ระบบ จะปรากฏเป็นชั้น α ของผิวเคลือบวัสดุผสมเมื่อเกิดการแข็งตัวขึ้น โดยเฟสเหล่านี้นั้นมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมเหล็ก (AlFe) และเหล็กอะลูมินด์ ($\text{Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z$) ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ โดยกำหนดการเติมที่ $X=0$ 1 3 และ 5



รูปที่ 4.25 ผล XRD ของผิวเคลือบวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ที่ $X=0$ 1 3 และ 5

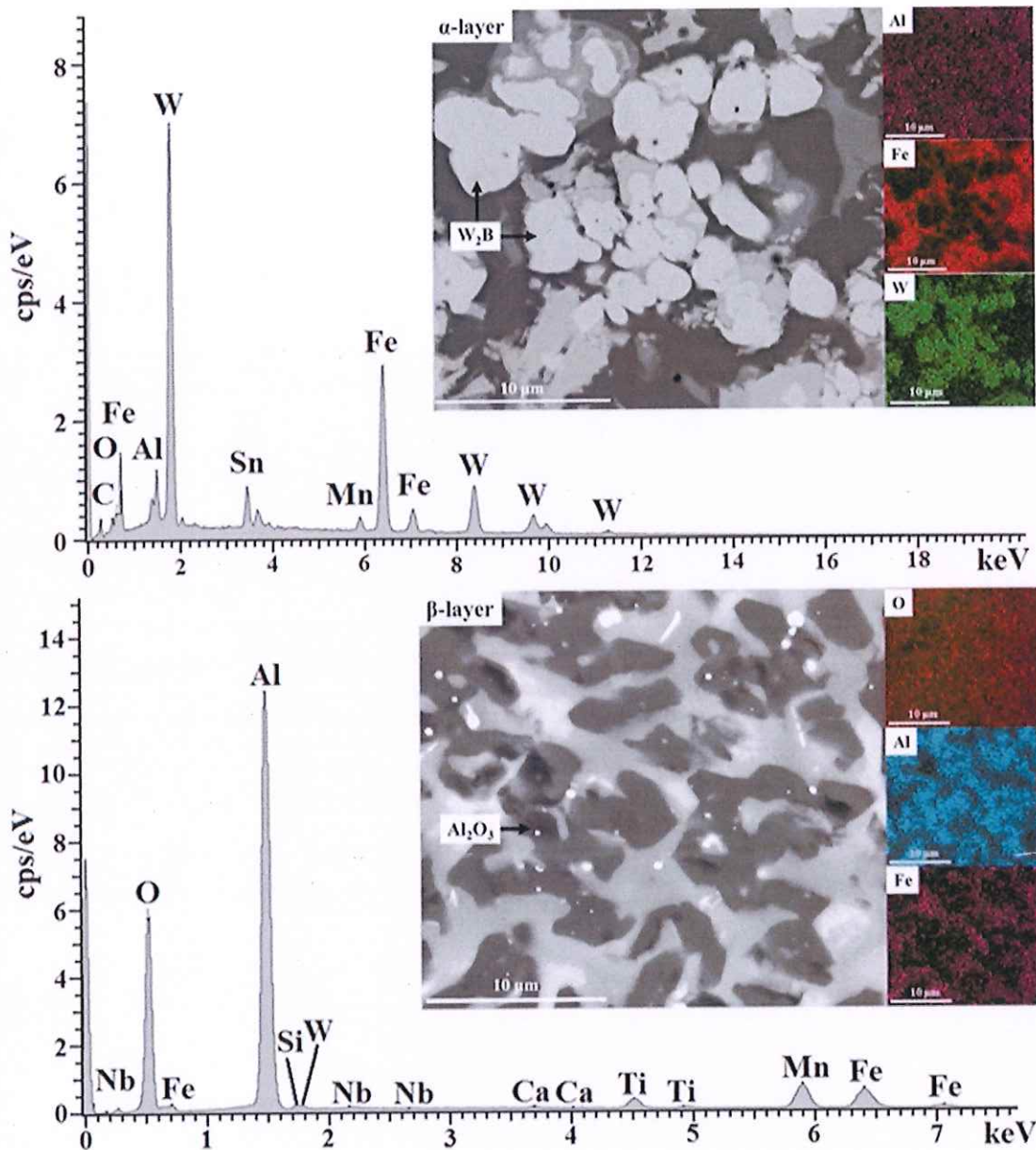
ต่อไปจึงนำผิวเคลือบไปวัดสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เมื่อเติมสารตัวเติมกลุ่มชนิด Fe_2O_3 -Al ปริมาณมากเกินไป ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จะมีความขรุขระเพิ่มสูงขึ้นมากดังผลการเติมที่ $X=5$ เนื่องจากปฏิกิริยามีความรุนแรงมากขึ้น เมื่อค่า T_{add} เพิ่มสูงขึ้น ความรุนแรงของปฏิกิริยา SHS จะส่งผลให้มีแก๊สเกิดขึ้นในระบบปริมาณมาก ฟองแก๊สจึงไม่สามารถถูกผลักให้หลุดพ้นออกไปจากผิวหน้าของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ง่าย จึงทำให้เกิดเป็นความขรุขระที่มากขึ้น แต่สำหรับค่าความแข็งระดับจุลภาคของผิวเคลือบมีความแตกต่างกัน โดยชั้น α มีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณที่มากขึ้น และในชั้น β ค่าความแข็งระดับจุลภาคค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นเฟสของเหลวที่เพิ่มให้แก่ระบบนั้น มีผลกระทบเพียงแก่ความแข็งระดับจุลภาคในชั้น α เท่านั้น

ตารางที่ 4.13 สมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นรองที่แปรค่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมกลุ่มชนิด Fe_2O_3 -Al

X	ค่าความเรียบผิว (μm)	ค่าความแข็งระดับจุลภาค (HV)	
		ชั้น α	ชั้น β
0	6.32	935.08	1067.52
1	6.53	727.90	1170.71
3	4.05	592.51	1105.50
5	9.83	595.10	1095.20

ดังนั้นผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองมีสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อเติมสารตัวเติมกลุ่มชนิด Fe_2O_3 -Al ที่ $X= 1$ ซึ่งมีค่าความเรียบผิวเท่ากับ $6.53 \mu m$ และค่าความแข็งระดับจุลภาคเท่ากับ $727.90 HV$ ในชั้น α และ $1170.71 HV$ ในชั้น β

เมื่อศึกษาผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้ด้วยกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping (รูปที่ 4.26) พบว่า เฟสสีขาวและเทาในชั้น α คือ W_2B และ $Fe_xAl_yO_z$ และเฟสสีเทาและเทาเข้มในชั้น β คือ $Fe_xAl_yO_z$ และ Al_2O_3 ซึ่งโครงสร้างของทั้งสองชั้นมีลักษณะแตกต่างไปจากผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ไม่เติมสารตัวเติมในข้างต้น โดยเฟส W_2B ในชั้น α มีรูปร่างค่อนข้างกลมคล้ายกับเฟส WB และ W_2B ในงานวิจัยของ Sugiyama และ Taimatsu (2002) และเฟส Al_2O_3 ในชั้น β มีรูปร่างบิดเบี้ยวไปจากเดิมอีกด้วย

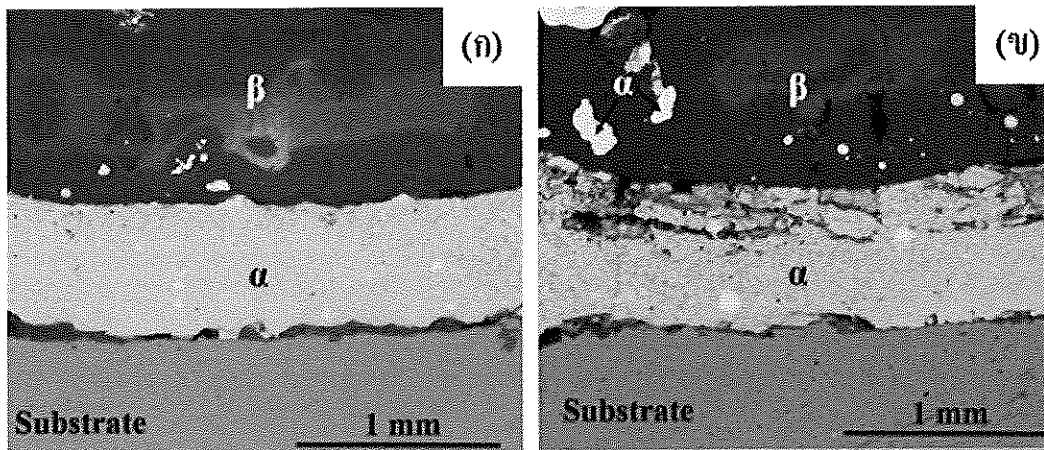


รูปที่ 4.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ร่วมกับเทคนิค Mapping ของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบรองที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ที่ $X=1$

4.3.2.3 ผลการศึกษาผลกระทบของสารตัวเติมเดี่ยวชนิด Ni

จากสมมุติฐานข้างต้นที่กล่าวไว้ว่า Ni เป็นสารตัวเติมที่จะเข้าไปช่วยให้เฟสผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวเกิดการไหลตัวที่ดีขึ้น จึงทดลองแปรค่าการเติมที่ 1 และ 5 โมล ตามลำดับ พบว่า ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่เติมสารตัวเติมชนิดนี้ จำนวน 5 โมล ไม่สามารถสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมได้ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาของระบบ

สารตั้งต้นมีปริมาณมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา SHS จึงสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมได้เพียงระบบเดียว คือ ระบบที่เติมสารตัวเติม จำนวน 1 โมล ซึ่งผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4.27(ข) โดยชั้นเฟส α สามารถเกาะแนบบนผิววัสดุฐานได้ดีกว่า แต่มีรูพรุนปรากฏบนผิวเคลือบวัสดุผสมมากกว่า เมื่อเทียบเปรียบกับผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ไม่เติมสารตัวเติมในรูปที่ 4.27(ก)



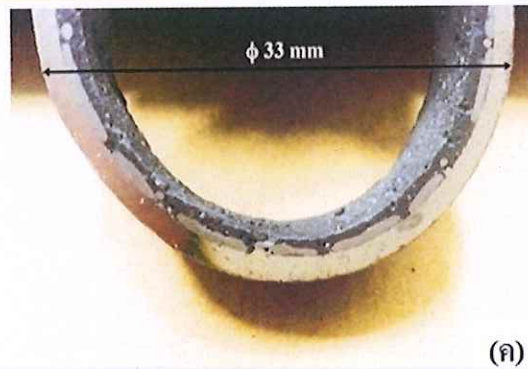
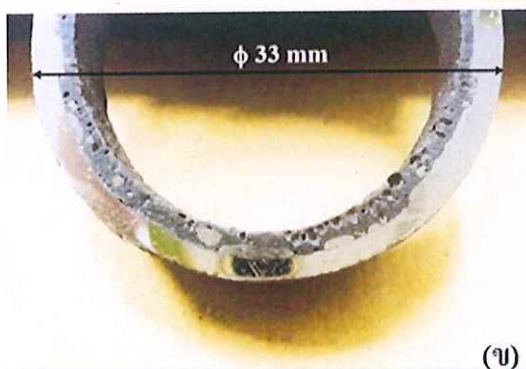
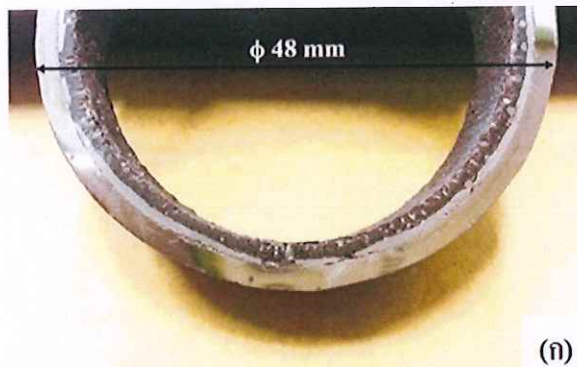
รูปที่ 4.27 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากกล้อง SEM ในโหมด BSE ของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบ (ก) ไม่เติมสารตัวเติม และ (ข) เติมสารตัวเติมเดี่ยว ชนิด Ni จำนวน 1 โมล

ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงพบว่า Ni ไม่สามารถช่วยให้เฟส α เคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้นจริง เนื่องจาก Ni ทำให้ค่า T_{sd} ของระบบลดลง จึงส่งผลให้การแข็งตัวเกิดได้เร็วขึ้น รูพรุนจึงไม่สามารถถูกกำจัดไปได้ด้วยการเติมสารตัวเติมเดี่ยวชนิดนี้

4.3.3 ผลการศึกษาผลกระทบของขนาดของท่อเหล็กกล้า

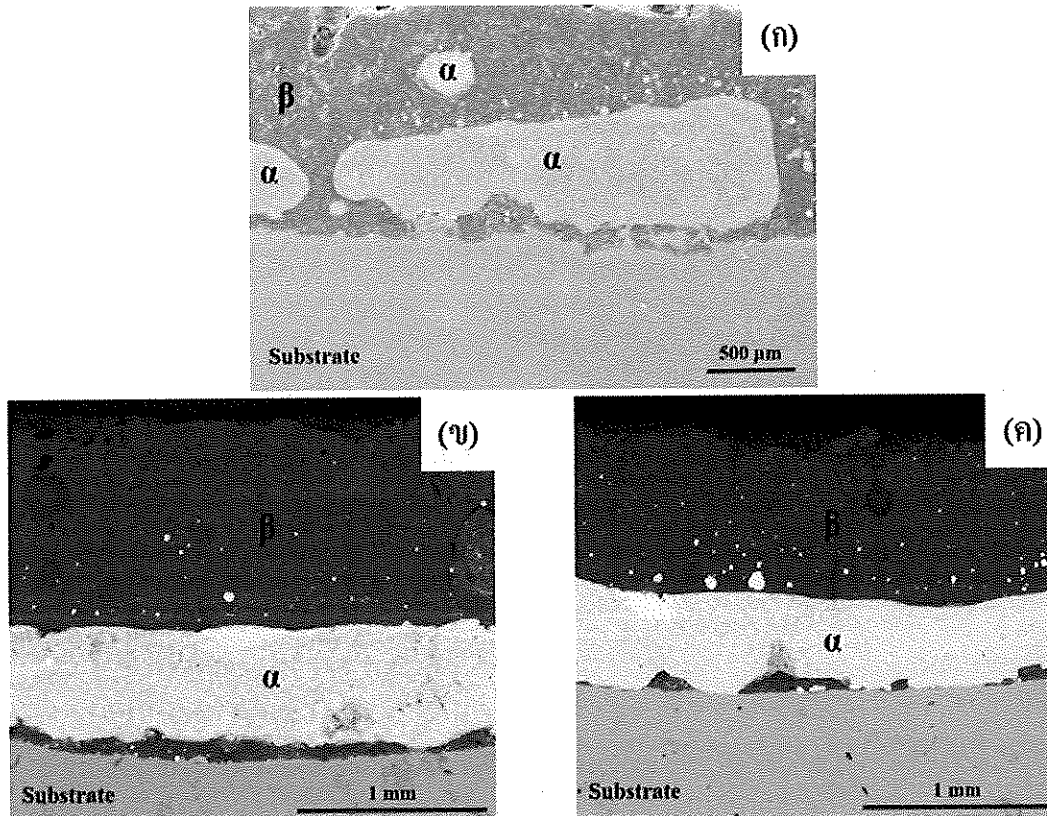
สุดท้ายเป็นผลการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้า โดยใช้แร่เฟอร์เบอร์ไรต์แทนแร่วูลเฟลมไมต์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.3.3.3 เพื่อให้ทราบว่า เมื่อทำการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้าแล้วนั้น ตัวแปรใดบ้างที่ต้องทำการควบคุม เพื่อให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีสภาพที่ดีเช่นเคย ตัวแปรอื่นๆ ที่ถูกควบคุมไว้ ได้แก่ ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm และสัดส่วนของสารตั้งต้นเป็นไปตามระบบหลักที่น้ำหนักสุทธิ 75 กรัม ซึ่งปรับลดลงมาหนึ่งเท่าตัว เนื่องจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนี้ถือเป็นการลดปริมาตรของท่อลงไปถึงหนึ่งเช่นกัน จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเท่าเดิมที่ 2250 rpm ไม่สามารถสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมได้

เนื่องจากการปรับลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเป็นการเพิ่มค่าของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้สูงขึ้น เครื่องมือจึงไม่สามารถจับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเล็กลงได้ เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเท่าเดิม ต่อมาจึงทำการปรับลดค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางลงมาที่ 2000 rpm ปรากฏว่า สามารถสังเคราะห์ผิวเคลือบได้ และมีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับผิวเคลือบวัสดุผสมเดิมที่เคยสังเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.28(ก) และ (ข) แต่ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้มีรูพรุนปรากฏในผิวเคลือบมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยา SHS มีความรุนแรงมากขึ้น เมื่อมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาน้อยลง ทั้งนี้จึงทำการแปรค่าการเติมสารตัวเติมคู่ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ที่ $X=1$ และ 3 ตามลำดับ พบว่า ระบบที่เติมสารตัวเติม $X=3$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นรุนแรงมากเกินไปจนทำให้ท่อชิ้นงานตัวอย่างเกิดการยุบตัวขึ้นขณะทำการเคลือบผิว ดังนั้นท่อชิ้นงานตัวอย่างในระบบการแปรค่าการเติมตัวเติมจึงสามารถบันทึกผลได้เพียงแค่ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่เติมสารตัวเติม $X=1$ เท่านั้น ดังรูปที่ 4.28(ก) ซึ่งผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้มีปรากฏปริมาณรูพรุนน้อยลงจริง



รูปที่ 4.28 ลักษณะของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ท่อเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 48 mm (ข) 33 mm และ (ค) 33 mm ที่เติมสารตัวเติมคู่ ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ที่ $X=1$

เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นี้ด้วยกล้อง SEM ในโหมด BSE พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้นเช่นกัน คือ ชั้น α และ ชั้น β โดยแต่ละชั้นมีลักษณะการแยกที่ชัดเจน และชั้น α สามารถเกาะบนผิววัสดุฐานได้อย่างทั่วถึงมากกว่าระบบที่เคลือบผิวบนท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 48 mm ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบหลักที่ใช้ท่อเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 48 mm (ข) 33 mm และ (ค) 33 mm ที่เติมสารตัวเติมหมู่ ชนิด $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ที่ $X=1$

ดังนั้นจากการศึกษาผลกระทบของขนาดของท่อเหล็กกล้าข้างต้น พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้าถูกปรับเปลี่ยนไป น้ำหนักสุทธิของส่วนผสมตั้งต้น และค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขณะทำการเคลือบผิวควรถูกปรับเปลี่ยนไปให้มีความเหมาะสมกันด้วย เพื่อรักษาระดับคุณภาพของผิวเคลือบวัสดุผสมไว้ดังเช่นผลการศึกษาข้างต้น เจื่อนใจที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิววัสดุผสมลงบนผิวภายในท่อเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 mm คือ ใช้ส่วนผสมตั้งต้นที่มีน้ำหนักสุทธิที่ 75 กรัม และค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2000 rpm

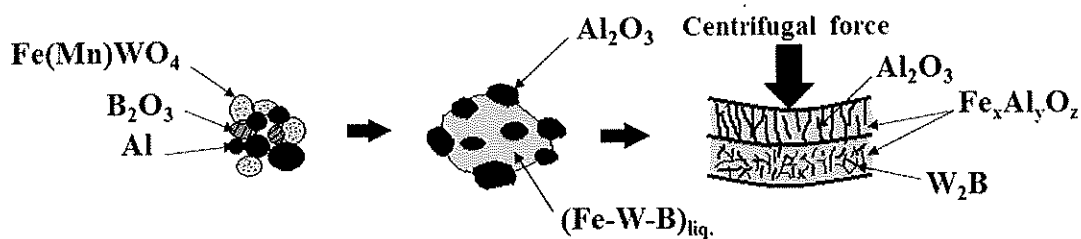
บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

5.1.1 สามารถสังเคราะห์ฟิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสแตนบอร์ไรต์ (WB) จากแร่วูลเฟรมไมต์ ($\text{Fe}(\text{Mn})\text{WO}_4$) บนผิวภายในท่อเหล็กกล้าประสพได้สำเร็จด้วยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยเทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงที่อาศัยเทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Self-propagating high-temperature synthesis assisted centrifugal force technique; Centrifugal-SHS) โดยใช้ระบบสารตั้งต้น $2\text{FeWO}_4/\text{B}_2\text{O}_3/7.333\text{Al}$ และ $2\text{FeWO}_4/2.5\text{B}_2\text{O}_3/10.333\text{Al}$

5.1.2 กลไกการก่อรูปของฟิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสแตนบอร์ไรต์ (WB) จากแร่วูลเฟรมไมต์ ($\text{Fe}(\text{Mn})\text{WO}_4$) บนผิวภายในท่อเหล็กกล้าประสพได้ด้วยเทคนิค Centrifugal-SHS มีลักษณะดังแผนภาพในรูปที่ 5.1 โดยเริ่มต้นขึ้นเมื่อผสมตั้งต้นเริ่มทำปฏิกิริยา SHS จนอยู่สภาวะหลอมเหลว ขณะเดียวกันนั้นเมื่อถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากกระทำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูงถูกผลักลงสู่ด้านล่าง หรือเข้าหาวัสดุฐาน และผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำๆ จะลอยตัวสู่ด้านบน หรือเข้าหาจุดศูนย์กลางของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จึงเกิดเป็นฟิวเคลือบวัสดุผสมที่ประกอบเข้าด้วยกัน ได้แก่ ชั้นที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นทั้งสแตนบอร์ไรต์ (W_2B) ในเนื้อพื้นโลหะผสมเหล็กอะลูมิเนียม ($\text{Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z$) และชั้นที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นอะลูมินา (Al_2O_3) ในเนื้อพื้นโลหะผสมเหล็กอะลูมิเนียม ($\text{Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z$)



รูปที่ 5.1 แผนภาพกลไกการก่อรูปของฟิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสแตนบอร์ไรต์ (WB)

5.1.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยเทคนิค Centrifugal-SHS ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้า น้ำหนักสุทธิของสารผสมตั้งต้น ค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ยกตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการเคลือบผิวภายในท่อเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm ควรใช้น้ำหนักสุทธิของสารผสมตั้งต้นที่ 150 กรัม ค่าความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ 2250 rpm และสารตัวเติมกลุ่ม $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ที่ $X=1$ ผิวเคลือบวัสดุผสมที่ได้จึงจะมีสมบัติที่ดีทั้งความเรียบผิว ความแข็ง และความแข็งแรงต่อแรงกดเฉือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 แร่ที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสเตนบอร์ไรต์ (WB) ควรมีเหล็ก (Fe) และทั้งสเตน (W) เป็นองค์ประกอบหลักที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 50 ถึงจะสามารถผลิตผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีสารเสริมแรงเป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสเตนบอร์ไรต์ (WB) ให้มีคุณภาพที่ดีได้

5.2.2 ควรทำการเตรียมผิวท่อเหล็กกล้ามาเป็นอย่างดีทุกครั้ง ก่อนทำการเคลือบผิวด้วยเทคนิค Centrifugal-SHS

5.2.3 เพื่อให้ผิวเคลือบวัสดุผสมมีประสิทธิภาพที่ดี เหมาะกับการนำไปใช้งานได้จริง ควรออกแบบให้เครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วที่สูงกว่านี้ เพื่อให้เกิดแรงหมุนเหวี่ยงที่มีค่าสูงขึ้น ผิวเคลือบวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้จะมีผิวหน้าที่เรียบและมีความหนาแน่นสูง

บรรณานุกรม

<http://engineeringman.blogspot.com/search/label/casting>

<http://pirun.ku.ac.th/~g5064018/support.html>

<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrochem04.htm>

<http://www.themetalcasting.com/centrifugal-casting.html>

ธวัช ชนะดี (2552), การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-มัลไลต์ โดยกระบวนการ SHS, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

เล็ก สีคง (2540), วัสดุวิศวกรรม, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

สุธรรม นียมवास. (2552). การสังเคราะห์วัสดุอินทรีย์, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

เสน่ห์ ธัญชาติลักษณ์ (2538), วิศวกรรมหล่อโลหะ, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

An, J., Zhao, J., Su, Z.G., Wen, Z., and Xu, D.S. (2015), "Microstructure and mechanical properties of ZTA ceramic-lined", *Arabian Journal for Science and Engineering*, DOI: 10.1007/s13369-015-1747-1.

Andreev, D.E., Sanin, V.N., Sachkova, N.V., and Yukhvid, V. I. (2011), "Cermets-Lined Tubes from Industrial Wastes by Centrifugal SHS", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 20(1), 27–32.

Chanadee, T., Wannasin, J., and Niyomwas, S. (2014), "Synthesis of WSi_2 and W_2B intermetallic compound by in-situ self propagating high-temperature synthesis reaction", *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 122(6), 496-501.

Gao, J.W., and Wang, C.Y. (2000), "Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting", *Materials Science and Engineering*, A292, 207–215.

Gowtam, D.S., Rao, A.G., Mohape, M., Khatkar, V., Deshmukh, V.P., and Shah, A.K. (2008). "Synthesis and Characterization of In-Situ Reinforced Fe-TiC Steel FGMs", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 17(4), 227-2323.

Humberto, M.Z., Marcelo S.O., and Kumar, S. (2008), "Microstructure and properties of functionally graded Al-Mg-B composites fabricated by centrifugal casting", *Composites: Part A*, 39, 1150–1158.

Jaeryeong, L., Le, M.T., and Chung, H.S. (2007), "Physical Properties of Ceramic Layer Prepared by SHS in Centrifugal Field", *Materials Transactions*, 48(11), 2960-2963.

Libin, N., Mirabbos, H., and Yunhua, X. (2010), "Preparation of in situ-formed WC/Fe composite on gray cast iron substrate by a centrifugal casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1986–1990.

Mahmoodian, R., Rahbari, R.G., Hamdi, M., Hassan, M.A., and Sparham, M. (2013), "The Effects of an Unexpected Ceramic Coating Phase at the Head of a Pipe on Joining and Postprocessing of a Ceramic-Lined Composite Pipe", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 65(1), 80-85.

Mahmoodian, R., Hassan, M.A., Rahbari, R.G., Yaya, R., and Hamdi, M. (2013), "A novel fabrication method for TiC-Al₂O₃-Fe functional material under centrifugal acceleration", *Composites: Part B*, 50, 187-192.

Mahmoodian, R., Hassan, M.A., Yaya, R., and Rahbari, R.G. (2014), "In situ TiC-Fe-Al₂O₃-TiAl/Ti₃Al composite coating processing using centrifugal assisted combustion synthesis", *Composites: Part B*, 59, 279-284.

Meng, Q.S., Chen, S.P., Zhao, J.F., Zhang, H., Zhang, H.X., and Munir Z.A. (2007). "Microstructure and mechanical properties of multilayer-lined composite pipes prepared by SHS centrifugal-thermic process", *Materials Science and Engineering*, A456, 332-336.

Moore, J. and Feng, H. (1995), "Combustion synthesis of advanced materials: Part I Reaction parameters", *Prog. In Mater. Sci.*, 39, 243-273.

Osamu, O. and Jun, I. (1981), "Study on Composite Materials with a Centrifugal-Thermite Process", *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 45(3), 316-321.

Osamu, O. (1985), "Ceramic Lined Pipes Produced by a Centrifugal-Thermit Process", *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 26(8), 578-586.

- Osamu, O. and Jun, I. (1986), "Vacuum Centrifugal-Thermite Process for Producing Ceramic-Lined Pipes", *Journal of the American Ceramic Society*, 69(4), C85-C86.
- Roberto, O., Barbara, S., Pier, F.V., and Giacomo, C. (1996), "Computer-aided manufacturing of centrifugal SHS coatings", *Computers chem. Engng*, 20, S1185-S1190.
- Rodríguez, M.A., Aguilar, C.L., and Aghayan, M.A. (2012), "Solution combustion synthesis and sintering behavior of CaAl_2O_4 ", *Ceramics International*, 38, 395-399.
- Sřalak, A., Danninger, H., and Selecká, M. (2005), "Machinability of powder metallurgy steels", *Cambridge International Science Publ., CISP*.
- Seungwon, K., Moonhee, L., Taeyong N., and Chul, L. (1996), "Preparation of barium titanate by homogeneous precipitation", *Journal of Materials Science*, 31, 3643-3645.
- Shigeaki, S. and Hitoshi, T. (2002), "Preparation of WC-WB- W_2B Composites from B_4C -W-WC Powders and their Mechanical Properties", *Materials Transactions*, 43(5), 1197-1201.
- Sugiyama, S. and Taimatsu, H. (2002), "Preparation of WC-WB- W_2B composites from B_4C -W-WC powders and their mechanical properties", *Materials Transactions*, 43(5), 1197-1201.
- Wenjun, X., Sheng, Y., and Hoyi, L. (2003), "Microstructure and mechanical properties of stainless steel produced by centrifugal-SHS process", *Journal of Materials Processing Technology*, 137, 1-4.
- Xiaozhou, C., Chao, W., Lihan, S., He, Y., Xianxin, X., and Haitao, L. (2013), "Effect of Ni addition on pressureless sintering of tungsten diboride", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41, 597-602.
- Yoshimi, W., Satoru, W. and Kiyotaka, M. (2003), "Nickel-Aluminides/Steel Clad Pipe Fabricated by Reactive Centrifugal Casting Method from Liquid Aluminium and Solid Nickel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35A, 1517-1524.
- Zhao, L., Li, Y., Zhou, Y., and Cang, D., (2014), "Preparation of novel ceramics with high CaO content from steel slag", *Materials & Design*, 64, 608-613.
- Zhongze, D., Hanguang, F., Hanfeng, F., and Qiang, X. (2005), "A study of ceramic-lined compound copper pipe produced by SHS-centrifugal casting", *Materials Letters*, 59, 1853-1858.

Odawara, O., "Method for providing ceramic lining to a hollow body by thermite reaction", U.S. Patent 4 363832, December 14, 1982.

Pignocco, A.J. and Kachik, R.H., "Method of producing a refractory lining in a cylinder or tube", U.S. Patent 4 048 352, September 12, 1977.

Hongjun, N., Dan, Z., Gang, S., Ping, L., Yu, Z., Yang, L., Xingxing, W., Wei, G., and Mingyu, H., "Reactive material for preparing ceramic composite steel pipe by adopting self-propagating high-temperature synthesis", C.N. Patent CN101774801 A, July 14, 2010.

Jianping, L., and Haotian, S., "1400-type SHS (Static headspace extraction) centrifugal machine", C.N. Patent CN202925088 U, May 8, 2013.

Journal of Guangxi, and Tong, M., "Fixture type centrifugal machine structure for self-propagating high-temp synthesis technique", C.N. Patent CN2507565 Y, August 28, 2002.

Li, Q., Yuxi, L., Quansheng, M., Yongwei, W., Guobin, L., Kang, L., Jinfu, J., Guan, D., Ming, Y., Xiaoming, M., Bin, Z., and Ju, G., "Composite installing and clamping self-diffuse combustion centrifugal machine", C.N. Patent CN202356622 U, August 1, 2012.

Shi, H.S., and Jinsheng, Y., "Manufacturing method of ceramic lining composite copper pipe", C.N. Patent 1200140 C, May 4, 2005.

Wei, C., Dazhi, C., Tan, L., Xiang, G., Da, D.B., Yue, H., and Yidong, H., "Method of preparing metal coating on inner surface of steel pipe through SHS (Self-propagation High-temperature Synthesis) centrifugal method", C.N. Patent CN102899663 A, January 30, 2013.

Yu, N.H.Z., Feng, H., Xingxing, H., Mingyu, H., Zhiyang, L., and Woo-suk, G., "Nano-additive-added reaction material for preparing ceramic lining composite steel tube", C.N. Patent CN102815950 A, December 12, 2012.

Zhaohui, Z., Baosheng, Z., and Zhihua, X., "Ignition method for making ceramic lining-tube by centrifugal self-spreading", C.N. Patent CN1058692 C, November 22, 2000.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Fe-W(B, C) based Composite

Saowanee Singarothai^{1, 3, a} and Sutham Niyomwas^{2, 3, b}

¹Department of Mining and Materials Engineering

²Department of Mechanical Engineering

³Ceramic and Composite Materials Engineering Research Group (CMERG), Materials Engineering Research Center (MERC), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand

^as.singarothai@gmail.com, ^bsutham.n@psu.ac.th

Keywords: Fe-based composite; self-propagating high-temperature synthesis; steel pipe line coating

Abstract. Fe-W based composite have successfully been prepared using natural resource. The ferberite (Fe(Mn, Sn)WO₄) tailings mixed with aluminum, carbon and boron oxide powder were used as reactants. The reactants were pressed and followed by oxy-acetylene flame ignition. The products from the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) reaction were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) couple with dispersive X-ray (EDS).

Introduction

Metal matrix composites (MMC) have many advantages over monolithic metals including higher specific modulus, higher specific strength, and better wear resistance. Because of these attributes MMC are under consideration for a wide range of applications such as wear parts and cutting tools [1].

The prominent MMCs widely used by industries are WC-Fe, WC-Fe alloy [1], WC-Co [2] and WC-WB-W₂B composites [3] systems. These systems produced by direct mix of pure element powders or lab grade powders, are relatively expensive. Moreover, there are some difficulties to disperse reinforced particles in the matrix. From these reasons many synthesis routes to produce Fe-W composites were studied and proposed such as the self-propagating high temperature synthesis (SHS)

More over, some research showed that self-propagating high-temperature synthesis (SHS) has been recently reported to prepare ceramic particulate reinforced MMCs. With this method it is possible to obtain various products both inorganic and organic nature with unusual properties, for example TiB₂ powder, Si-SiC composite material, and TiB₂-Al₂O₃-Fe_xAl_y composite material [4]. SHS is a method for producing substances, materials and items via exothermic autowave reaction. This combustion process is ignited by point heating of a small part of the prepared sample. The heat should be enough for initial burning of surrounding material, which in turn, generates heat that burns the following part of the material, and in this way a wave of exothermic reaction is generated that covers the rest of material.

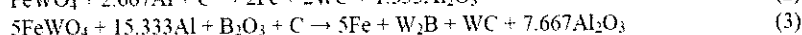
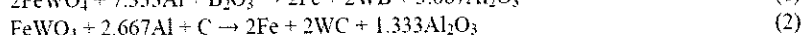
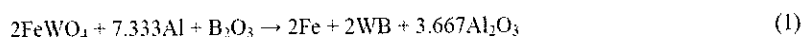
However, the SHS method does not need complex equipment, shows the advantage of low energy consumption, high time efficiency and good interfacial bonding. With the advantages of this method, it was developed combine with the centrifugal casting that was the centrifugal-SHS process. This method can be used to coat thick ceramic layers in the inner surface of metallic pipe or cylindrical vessels, make them better performance of high resistance to corrosion abrasion, erosion and heat. The centrifugal-SHS process has characteristics of low energy consumption, short production time, high product purity, and no environmental pollution [5].

So, in this work, Fe-W based composite was prepared via the SHS method and studied on the chemical compositions and microstructures.

Experimental

Raw Materials. The raw powders used in a green sample were commercially available Al (HiMedia), B₂O₃ (Sigma-Aldrich) and C (SD fine-chem limited). Ferberite tailings (Sakorn Minerals Co., Ltd., Thailand) were used as the source of iron and tungsten.

The Synthesis Process. In order to proved the feasibility and studied characteristic of the SHS reactions are display as three chemical equations as followed:



The raw powders were weighted according to the reactions and dry mixed by grinding machine for 2 hrs. The mixed powders were pressed for preparing the green samples. And then the green samples were ignited by oxy-acetylene flame for beginning the SHS reaction. The reaction propagated completely and formed the SHS-product.

The SHS-product were characterized in term of phase compositions and surface morphology by X-ray diffraction: XRD (X'Pert MPD, PHILIPS) and scanning electron microscope: SEM (JSM-5800LV, JEOL) couple with energy dispersive X-Ray Spectrometer: EDS (ISIS 300, Oxford), respectively.

Results and Discussion

Thermodynamic Analysis. The adiabatic temperature of the SHS method can be calculated from the enthalpy of reaction. This is the maximum theoretical temperature that the reactants reach, and determined from Eq. 4. This equation applies to a phase change occurring between initial temperature and adiabatic temperature.

$$\Delta H = \int_{298}^{T_{ad}} C_{p, \text{solid}} dT + \Delta H_f + \int_{T_m}^{T_{ad}} C_{p, \text{liquid}} dT \quad (4)$$

where, ΔH is the enthalpy of reaction, ΔH_f is the enthalpy of transformati. on, C_p is the specific heat capacity, T_m is the melting temperature and T_{ad} is the adiabatic temperature. The calculated results of adiabatic temperature from Eq. 4 are showed the Table 1

Table 1. The adiabatic temperature of selected reactions

Reactions	T _{ad} , °C
2FeWO ₄ + 7.333Al + B ₂ O ₃ → 2Fe + 2WB + 3.667Al ₂ O ₃	3063.4
FeWO ₄ + 2.667Al + C → 2Fe + 2WC + 1.333Al ₂ O ₃	3308.5
5FeWO ₄ + 15.333Al + B ₂ O ₃ + C → 5Fe + W ₂ B + WC + 7.667Al ₂ O ₃	3181.5

There have been accepted that the reaction can be a self-sustained combustion when the adiabatic temperature of the reactions are higher than 1800°C [6]. Then, these three reactions are thermodynamically feasible to fabricate an iron matrix composite reinforced with tungsten boride, tungsten carbide and alumina by using SHS method.

The equilibrium compositions of these reactions at different temperatures were performed using a computer program based on Gibbs energy minimization method [7] and the results are showed in Fig. 1. The product from each reactions consisted of Fe-W-WB-W₂B-Al₂O₃, Fe-W-WC-W₂C-Al₂O₃ and Fe-W-WB-W₂B-Al₂O₃, respectively.

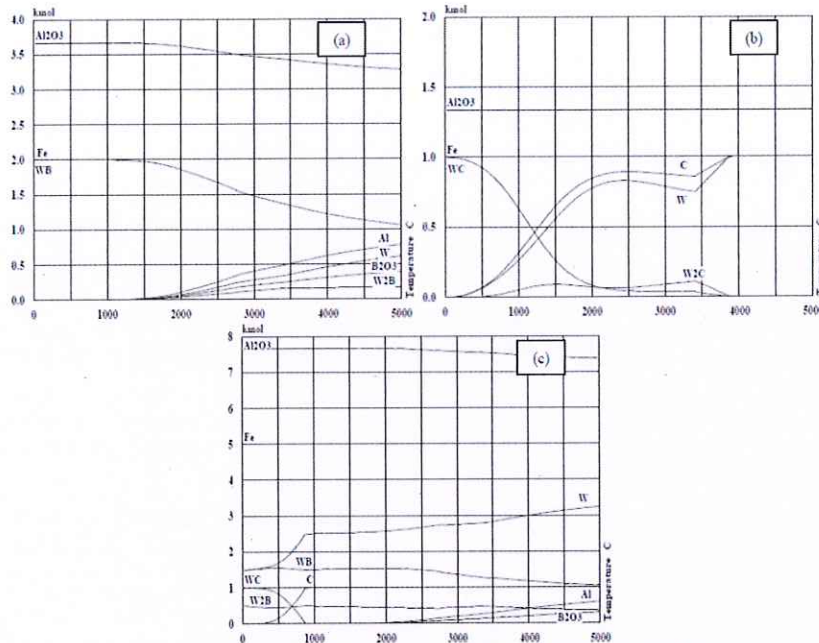


Fig. 1. Equilibrium Composition of (a) Eq.1 (b) Eq.2 and (c) Eq.3

The SHS-product of each Eq. which identified by XRD was found in complexing phase: $\text{AlFe-Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z\text{-W-W}_2\text{B-Al}_2\text{O}_3$ composite, $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C-Fe}_n\text{O}_v\text{-Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z\text{-W-WC-W}_2\text{C-Al}_2\text{O}_3$ composite and $\text{Fe-Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z\text{-W-W}_2\text{B-Al}_2\text{O}_3$ composite, respectively. From the product of Eq. 3, we found that the tungsten carbide phases were not nucleated due to the ΔG for the formation of this phase higher than that of tungsten boride. So this results proved that the calculated compositions were true. The Fe_nO_v and $\text{Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z$ phases were the intermediate phase that remain in the result product due to the insufficient heat of reaction that cause from heat loss during the reaction. Even though, the majority phases of the product coating were $\text{Fe}_x\text{Al}_y\text{O}_z$, W, W_2B , WC, W_2C and Al_2O_3 .

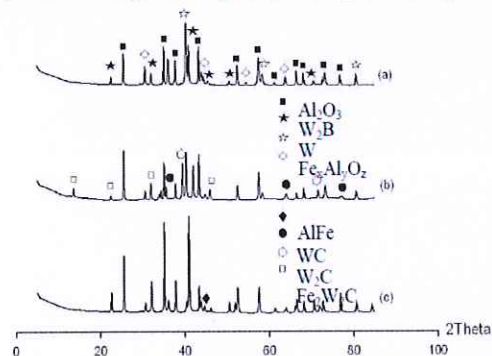


Fig. 2. XRD pattern of SHS-product (a) Eq. 1, (b) Eq. 2 and (c) Eq. 3.

The morphology of SHS-product obtained by SEM was showed in Fig. 3. The porous microstructure display a good inter-particles cohesion within agglomeration. Fig. 4 shows elemental mapping of SHS-product in cross section by EDS. It is shows that well mixed of Fe, W and Al major element presence in the same location. In addition, it is found that, some trace element of Sn, Mn and

Ti are composed in the matrix product because of their existent in ferberite minerals. Therefore, when considering the morphology and assisted with EDS results, it was found that each SHS-product consisted of the matrix phases and the reinforcement phases as followed: Fig. 3(a) the Fe based composite reinforced with W, WB, W_2B and Al_2O_3 according to Fig. 4(a) Fe-Al-O and W-B presence in the same location with surrounded by Al_2O_3 ; Fig. 3(b) the Fe based composite reinforced with W, WC, W_2C and Al_2O_3 according to Fig. 4(b) Fe-Al-O, W-C presence in the same location with surrounded by Al_2O_3 and Fig. 3(c) the Fe based composite reinforced with W, WB, W_2B and Al_2O_3 according to Fig. 4(c) Fe-Al-O and W-B presence in the same location with surrounded by Al_2O_3 .

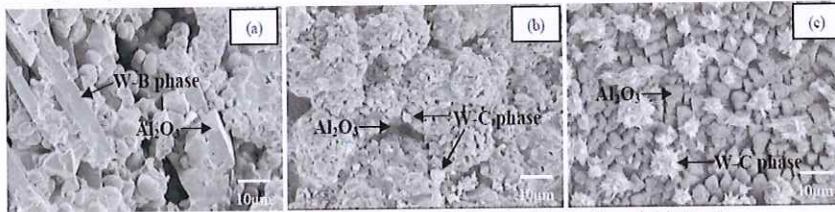


Fig. 3. SEM image of SHS-product (a) Eq. 1, (b) Eq. 2 and (c) Eq. 3.

Conclusions

The Fe-(W-B)- Al_2O_3 and Fe-(W-C)- Al_2O_3 composites were successfully synthesised by self-propagating high temperature synthesis. But, the Fe-W(B, C)- Al_2O_3 composite could not synthesised by these method due to heat of the reaction was insufficient for producing WC phases. Although, the intermediate phases (W_2C and WB) were evidenced and promising, so, these system need to be studied in more details.

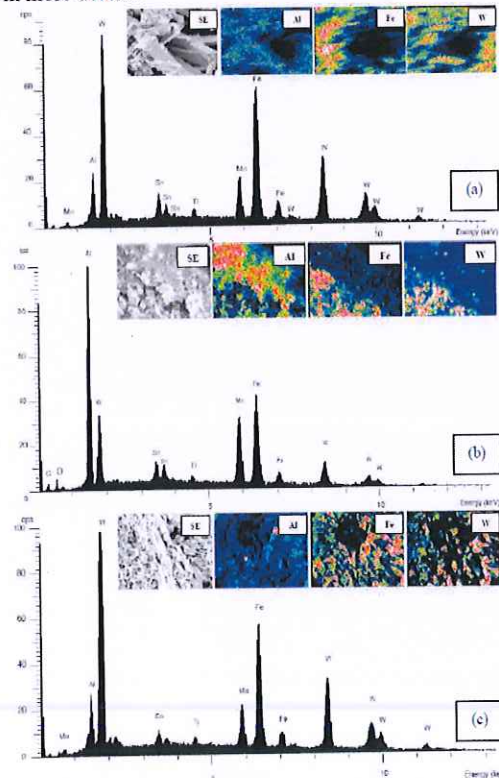


Fig. 4. EDS patterns of SHS-product (a) Eq. 1, (b) Eq. 2 and (c) Eq. 3.

Acknowledgements

The authors are pleased to acknowledge the financial supported by Prince of Songkla University (Funding No. ENG550045S) and Ceramic and Composite Materials Engineering Research Group (CMERG), Materials Engineering Research Center (MERC), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand.

References

- [1] S. Niyomwas, N. Memongkol, P. Punsawas and P. Bunnaul: Songklanakarin J. Sci. Technol. Vol. 31(1), (2010), p.51-54
- [2] C. Verdon, A. Karimi and J. L. Martin: Mater. Sci. Eng., A Vol. 246, (1998), p.11-24
- [3] S. Sugiyama and H. Taimatsu: J. Eur. Ceram. Soc. Vol. 24, (2004), p.871-876
- [4] S. Singsarothai, V. Rachpech and S. Niyomwas: Adv. Mater. Res. Vol. 626, (2013), p.138-142
- [5] P. Kerdkool and S. Niyomwas: Adv. Mater. Res. Vol. 488-489, (2012), p.468-472
- [6] Y. Xuanyi, L. Guanghua, J. Haiho and C. Kexin: J. Alloys Compd. Vol. 509 (2011), p. L301-L303
- [7] N.A. Gokcen and R.G. Reddy: *Thermodynamics*, Plenum Press, New York, U.S.A. (1996)

Material and Manufacturing Technology IV

10.4028/www.scientific.net/AMR.748

Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Fe-W(B, C) Based Composite

10.4028/www.scientific.net/AMR.748.46

DOI References

[7] N.A. Gokcen and R.G. Reddy: Thermodynamics, Plenum Press, New York, U.S.A. (1996).
<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-1373-9>

