

บทที่ 1

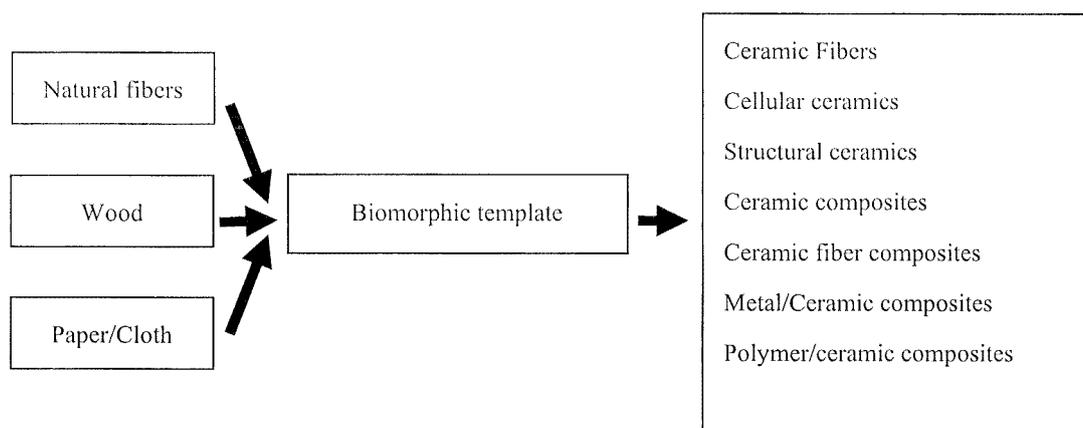
บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminium Matrix Composites) เป็นวัสดุผสมที่มีอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลักและเสริมแรงด้วยเซรามิก ผลิตขึ้นมาเพื่อปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียม เช่น ความแข็ง ความเหนียว ความทนต่อการสึกหรอ การนำความร้อน มีการนำวัสดุผสม ไปใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นดิสก์เบรกเพื่อแทนเหล็กหล่อซึ่งช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงานและยืดเวลาใช้งานได้มาก หรือ ทำเป็นตัวระบายความร้อนในงานอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทดแทนทองแดงซึ่งช่วยลดน้ำหนัก และช่วยลดปัญหาการแตกหักของชิ้นงานอันเนื่องมาจากการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ในทางอุตสาหกรรมยังมีการประยุกต์ใช้งานน้อยโดยมีสาเหตุหลักมาจากต้นทุนของเซรามิกตัวเสริมแรงที่สูงมาก ซึ่งต้นทุนส่วนหนึ่งมาจากวัตถุดิบเซรามิกที่มีราคาแพง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้กระบวนการขึ้นรูปเซรามิกพูนนั้นยังเพิ่มต้นทุนอีกมากด้วย ฉะนั้นหากสามารถลดต้นทุนของวัสดุเสริมแรงได้การใช้ประโยชน์ของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมก็จะมากขึ้น

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นได้สังเคราะห์วัสดุจากพืชซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน และมีโครงสร้างเป็นแบบ Anisotropic วัสดุจากธรรมชาติเหล่านี้ สามารถนำมาผลิตวัสดุได้หลายประเภท และสามารถสังเคราะห์วัสดุธรรมชาติได้เป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกหรือวัสดุผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดี เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และทนทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น วัสดุเซรามิกที่ได้จากการสังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ เรียกว่า วัสดุเซรามิกไบโอโมอร์ฟิค (Biomorphic ceramic material) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากการศึกษางานวิจัยพบว่า ได้มีการทดลองสังเคราะห์วัสดุเซรามิกไบโอโมอร์ฟิค จากไม้หลายชนิด เช่น ไม้ไผ่ ไม้สน และ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวัสดุเซรามิกไบโอโมอร์ฟิคที่สังเคราะห์จากไม้ธรรมชาติมีโครงสร้างพูนแบบเซลล์ูลาร์ซึ่งสามารถนำไปใช้

ประโยชน์ได้หลายอย่าง ทั้งในงานกรองน้ำโลหะและอากาศที่อุณหภูมิสูง ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน หรือเป็นเซรามิกตัวเสริมแรงในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



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

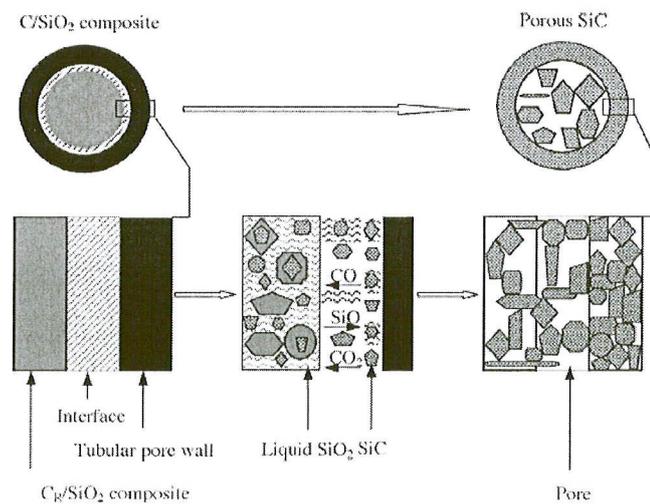
1.2 การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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



Jun-min Qian และคณะ (2004) ได้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ SiC พรุณจากไม้ธรรมชาติ เริ่มต้นด้วยการนำไม้ธรรมชาติมาทำการเผาในกระบวนการคาร์โบไนเซชันในสุญญากาศเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้เป็นแท่งถ่าน หลังจากนั้นเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในกระบวนการโซล-เจล โดยใช้สารละลาย TEOS (Tetraethoxysilane) : ethanol : H₂O : HCl ผสมรวมกันเป็นสารละลายเพื่อใช้ในการอัดสารละลายเข้าสู่รูพรุณ โดยใช้เครื่องอัดสุญญากาศเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ผู้ทำการวิจัยได้ศึกษาจำนวนครั้งในกระบวนการโซล-เจลที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากจำนวนครั้งในกระบวนการนี้ หลังจากนั้นเข้าสู่เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายที่อยู่ภายในรูพรุณมีสถานะเป็นของแข็ง และทำการอบอีกครั้งที่ อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายที่หลงเหลือจากการกระบวนการโซล-เจล ซึ่งในขณะนี้ชิ้นงานจะเป็นวัสดุผสม C/SiO₂ เข้าสู่กระบวนการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน โดยทำการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 1600 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงหลังจากผ่านกระบวนการนี้ ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเป็น SiC แสดงดังรูปที่ 1.2 จะได้ชิ้นงาน SiC จากไม้



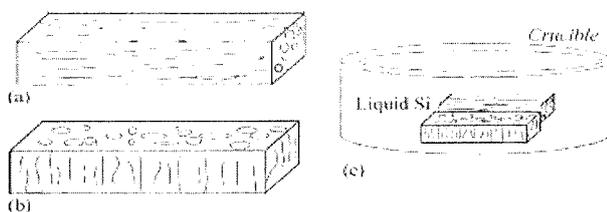
รูปที่ 1.2 การสังเคราะห์ของ C/SiO₂ เป็น Porous SiC

(ที่มา: Jun-min Qian, 2005)

ผลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้วิธี SEM (scanning electron microscopy), XRD (X-ray diffraction), FTIR (fourier transform infrared spectroscopy) และ TGA (thermogravimetric

analysis) และ DSC (differential scanning calorimetry) ผลที่จากการทดลองพบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่ในรูปพูน มี β -SiC และมีปริมาณของ α -SiC น้อยและไม่พบความแตกต่างของจำนวนครั้งที่แตกต่างกันในกระบวนการไซล-เจลโครงสร้างของ SiC เผยให้ปฏิกิริยาแบบ ของแข็ง-ของแข็ง ก๊าซ—ของแข็ง ก๊าซ-ก๊าซ ปรากฏขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากถ่านไม้เป็น SiC

G.Hou และคณะ (2007) ได้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ไบโอซิลิกอนคาร์ไบด์จากกระบวนการแทรกซึมของซิลิกอนเหลวซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ โดยการสังเคราะห์ไบโอซิลิกอนคาร์ไบด์ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น การเผาเซ้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและขนาดของรูพูนของไบโอเมอร์ฟิคเซรามิก ในการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอเมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ได้กำหนดชิ้นงาน 2 แบบได้แก่ ชิ้นงานในแนวรัศมีและชิ้นงานในแนวแกน ดังรูปที่ 1.3 โดยสามารถเตรียมได้จากกระบวนการแทรกซึมของซิลิกอนเหลวเข้าสู่ถ่านไม้บิชที่อุณหภูมิ 1550 °C และที่อุณหภูมิ 1700 °C โดยทั้ง 2 อุณหภูมิได้กำหนดเวลาในการเผาเซ้ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1.3 แสดงชิ้นงานทิศทาง โครงสร้าง 2 แบบ

(a) ชิ้นงานในแนวแกน (b) ชิ้นงานในแนวรัศมี

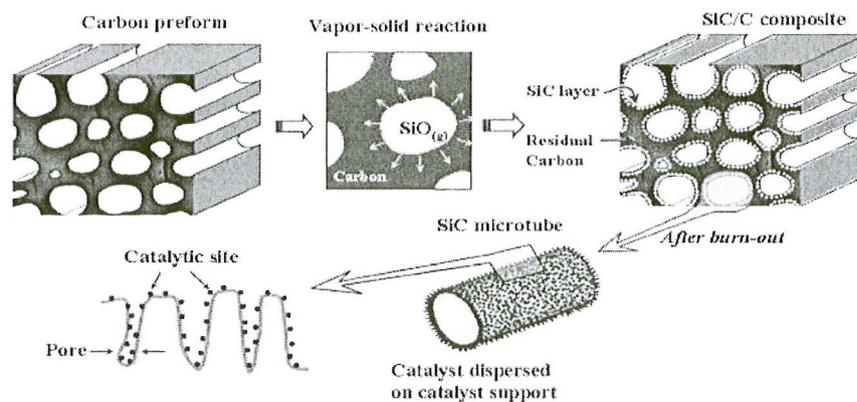
(ที่มา: G.Hou, 2006)

ผลที่ได้พบว่าบริเวณพื้นผิวในรูปพูนมีลักษณะหยาบเพราะปฏิกิริยาการเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์ภายในรูปพูนและความแข็งแรงต่อแรงคัดและความแข็งแรงต่อการแตกมีค่ามากขึ้น สัมพันธ์กับเวลาในการเผาเซ้ที่นานขึ้น และเมื่อทดลองลดปริมาณของซิลิกอนลงและเผาที่อุณหภูมิ 1550 °C และที่อุณหภูมิ 1700 °C ได้กำหนดเวลาในการเผาเซ้ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าเมื่อเปลี่ยนเวลาการเผาเซ้จาก 20 นาที เป็น 60 นาที พบว่าค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงต่อแรงบิดของชิ้นงานในแนวแกนและชิ้นงานในแนวรัศมีมีค่าลดลง 41.3% และ 54.4% และค่าความแข็งแรง

ต่อการแตกมีค่าลดลง 45.9% ในชิ้นงานแนวแกนและ 49.7% ในชิ้นงานแนวรัศมี ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อทดสอบสมบัติเชิงกล คือรูปร่างซิลิกอนคาร์ไบด์และปริมาณซิลิกอน ซึ่งมีผลต่อขนาดของรูพรุนความหนาแน่นของชิ้นงานแนวแกนและแนวรัศมีและทิศทางของการแทรกซึม

M. Fujisawa และคณะ (2004) ได้ผลิตวัสดุผสม SiC/C จากการผสมผงถ่านไม้และ SiO₂ และอบผืนิก ในช่วงอุณหภูมิ 1400-1800 °C ใช้ความเข้มข้นของ SiO₂ ต่างกันตามน้ำหนักของถ่านไม้ พบว่าเกิดชั้นของ β-SiC ที่ผิวถ่านไม้เมื่อตรวจสอบด้วย SEM และ EDX ความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณ SiC และพบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณ SiO₂ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือได้วัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำและนำความร้อนสูง

J.W.Kim และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากชิ้นงานไม้ที่มีรูพรุน โดยทำปฏิกิริยาไอ-ของแข็ง ที่อุณหภูมิ 1450 °C ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน/ไฮโดรเจน (Ar/H₂ = 80/20) จากนั้นทำการสังเคราะห์ไม้เพื่อให้เป็นแท่งถ่านโดยใช้การสังเคราะห์ 2 ขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 500 และ 1000 °C สังเคราะห์จากถ่านเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์โดยใช้ก๊าซซิลิกอนแทรกซึมเข้าสู่พื้นผิวของถ่าน ซึ่งการแทรกซึมของก๊าซซิลิกอนจะเกิดรูพรุนของชิ้นงานเป็นลักษณะเคลือบผิวเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 1.4 จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เพื่อให้ก๊าซซิลิกอนทำปฏิกิริยากลายเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์



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

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

S.M. Seyed Reihani (2006) ได้ศึกษาวัสดุผสมอะลูมิเนียม 6061 กับผงซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดอนุภาค 16 และ $22\mu\text{m}$ โดยมีปริมาณ 30% ของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำการเสริมแรงโดยการหล่ออัด (squeeze casting) กระบวนการทดลองเริ่มด้วยการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์และกระบวนการหล่ออะลูมิเนียม 6061 โดยกำหนดระยะเวลาในการเผาแซ่ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และการสึกหรอ ของวัสดุผสมผลที่ได้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เหลือช่องว่างรูพรุนเนื่องจากการหล่ออัด ชิ้นวัสดุผสมมีความแข็งแรงสูงและความสึกหรอต่ำมีสมบัติดีกว่าอะลูมิเนียม 6061 ที่ไม่เสริมแรง อย่างไรก็ตามทดสอบสมบัติการคัดของวัสดุผสมมีค่าลดลงซึ่งมีผลจากการเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ จากนั้นทดลองระยะเวลาเผาแซ่ ของอะลูมิเนียมมีอิทธิพลต่อวัสดุเสริมแรง เช่นวัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมีความแข็งแรงกว่าวัสดุผสมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการชุบแข็ง การแตกร้าวของพื้นผิววัสดุไม่เสริมแรงและวัสดุผสมแสดงเป็นลักษณะรอยบวมบริเวณพื้นผิวโดยมีความลึกของรอยบวมที่แตกต่างกัน

W. Tianchi และคณะ (2007) ได้ศึกษาวัสดุผสม 2 ชนิดได้แก่ วัสดุผสม C-Al และวัสดุผสม SiC/C-Al ในการสังเคราะห์ C-Al โดยใช้แท่งคาร์บอนที่มีลักษณะพรุน จากนั้นนำอะลูมิเนียมเหลวฉีดเข้าสู่รูพรุนจะได้เป็นชิ้นงานวัสดุผสม C-Al สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผสม SiC/C-Al หลังจากได้แท่งคาร์บอนที่มีลักษณะพรุนนำซิลิกอนเรซินที่เตรียมเสร็จแล้วอัดเข้าสู่แท่งคาร์บอนด้วยแรงดันสุญญากาศในอุณหภูมิ $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการหล่อแบบฉีด โดยใช้อะลูมิเนียมเหลวแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของถ่านไม้ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์คือวัสดุผสม SiC/C-Al จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การนำความร้อน และการขยายตัวทาง

ความร้อน ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติ วัสดุผสมมีการนำความร้อนได้ดีกว่าอะลูมิเนียม และมีการนำความร้อนได้ดีกว่าแท่งคาร์บอนพูน

ถาวรณ (2551) ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ SiC จาก ถ่านไม้ธรรมชาติ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาไม้สองชนิดคือ ไม้ยางพาราและไม้สะเดาซ่าง ซึ่งเป็นไม้ท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทย โดยโครงการงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนด้วยกัน ส่วนแรกทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านไม้พูน จากการศึกษาพบว่าสามารถสังเคราะห์ถ่านไม้พูน ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 °C ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนเมื่อใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า จะทำให้ได้โครงสร้างถ่านไม้พูนที่คงรูปเดิมและไม่เกิดการแตก และสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านไม้พูนคืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C min⁻¹ จากอุณหภูมิ 25-70 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 °C min⁻¹ จนถึงอุณหภูมิ 500 °C และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C min⁻¹ จนถึงอุณหภูมิ 800 °C หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้องในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน อีกทั้งยังพบว่ารูปแบบการแตกหักของไม้ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งไม้สะเดาซ่าง มีการปริแตกตามแนวเซลล์โลสเนื่องมาจากลักษณะเซลล์ภายในของไม้สะเดาซ่างมีขนาดใกล้เคียงกัน ทำให้ความตึงเครียดภายในระหว่างพื้นผิวภายนอกและภายในแตกต่างกันเล็กน้อย จึงทำให้การปริแตกไม่รุนแรงแต่ในไม้ยางพารามีการแตกหักแบบผ่าตามแนวเซลล์ เนื่องมาจากความเครียดภายในและภายนอกมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้เกิดการปริแตกรุนแรงกว่าไม้สะเดาซ่าง ในส่วนที่สองทำการศึกษาระยะเวลาและจำนวนครั้งในการเคลือบของสารละลายซิลของ SiO₂ พบว่าปริมาณของ SiO₂ ที่แทรกซึมภายในโครงสร้างถ่านไม้พูนแปรผันตรงกับระยะเวลาการเคลือบของสารละลายซิลของ SiO₂ ในส่วนของการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนครั้งการเคลือบ พบว่าถ่านไม้ยางพารามีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแปรผันตามจำนวนรอบของการเคลือบและในถ่านไม้สะเดาซ่างพบว่า น้ำหนักของผิวเคลือบมีอัตราเพิ่มขึ้นจนถึงการเคลือบครั้งที่ 4 และในการเคลือบครั้งที่ 5 และ 6 น้ำหนักของผิวเคลือบลดลง และในส่วนที่สามทำการศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในกระบวนการไพโรไลซิสจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ คืออุณหภูมิ 1600 °C ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปตามการคำนวณทางอุณหศาสตร์ ซึ่งในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 1600 °C ระยะเวลาการบ่มเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโครงสร้างของ α-SiC และ β-SiC พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนโครงสร้างของ β-SiC เป็น α-SiC

จากงานวิจัยที่ได้ทบทวนข้างต้น จะเห็นได้ว่าได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ธรรมชาติ ซึ่งในขั้นตอนในการสังเคราะห์ในแต่ละงานวิจัยมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน กรรมวิธีสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์มีหลายวิธีด้วยกันเช่น กระบวนการโซล-เจล กระบวนการสังเคราะห์ด้วยก๊าซ Si กระบวนการสังเคราะห์ด้วย chemical vapor กระบวนการสังเคราะห์ด้วย SiO₂ และ organosilicon ที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาทำให้ทราบว่ากระบวนการโซล-เจลเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนจากขั้นตอนในการสังเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนของค่าใช้จ่ายพบว่าในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น และการหล่ออะลูมิเนียมเพื่อใช้ในการเสริมแรง พบว่าสามารถที่จะใช้กระบวนการหล่ออัดทำให้อะลูมิเนียมเหลวแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของชิ้นงานได้ จากศึกษาพบว่าปัจจัยทิศทางของโครงสร้างชิ้นงานที่แตกต่างกันและระยะเวลาในการเผาแห้ง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล การนำความร้อน และการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ผลที่ได้การผลิตรวดคุณสมบัติซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียมโดยวิธีการหล่ออัดสามารถปรับปรุงค่าความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอ จากไม้ยางพาราเป็นวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียม มีค่าความแข็งมากขึ้นและมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้นจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียม มีค่าใกล้เคียงค่าความแข็งของอะลูมิเนียม ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์เพื่อใช้กับงานเชิงวิศวกรรมต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากไม้ธรรมชาติ โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจล เพื่อให้ได้เป็นวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนหลังจากนั้นทำการหล่อโดยการหล่ออัด เพื่อให้ได้เป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า การนำความร้อน และเชิงกล และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับวัสดุเชิงพาณิชย์ เพื่อสามารถที่จะประยุกต์กับการใช้งานจริง อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยที่ผลต่อชิ้นงานทั้งปัจจัยด้านทิศทางโครงสร้างและระยะเวลาการเผาแห้งส่งผลต่อวัสดุผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พรุนเนื้ออะลูมิเนียมเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด

1.3 ทฤษฎีและหลักการ

1.3.1 ไม้ยางพารา

วัสดุเริ่มต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ในการทดลองนี้ ไม้ยางพารา (Pará rubber wood หรือนิยมใช้ว่า rubberwood หรือ parawood) หรือบางครั้งเรียกอย่างย่อว่า ไม้ยาง มีชื่อ

วิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ที่นิยมนำมาใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ไม้คุณภาพสูง เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของไม้ยางที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ เช่น ความหนาแน่นของเนื้อไม้ สีสนที่สวยงาม การหดตัวน้อยและสามารถตกแต่งผิวได้ง่าย นอกจากนี้ไม้ยางพารายังได้ชื่อว่าเป็นไม้ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม้ยางพารานั้นได้มีการนำส่วนต่างๆ ของต้นยางมาใช้ อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนประกอบทั้งหมดสามารถนำมาใช้ได้ทุกส่วน ตั้งแต่ยางของต้นไม้จนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่ตัดไม้ออกมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์

(ที่มา: http://www.qcparawood.com/knowledge/rubber_wood, สืบค้นวันที่ 10 ต.ค.2552)

สมบัติของไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราไม่จัดเป็นไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้และสำนักงานมาตรฐาน กระทรวงอุตสาหกรรม เนื้อไม้ มีสีขาวนวล ส่วนที่เป็นกระพี้ และแก่นไม้แตกต่างกัน เนื้อไม้ค่อนข้างละเอียด เสี้ยนสนเล็กน้อยมาก ไม้ยางพาราไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นไม้ในการก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขนาดไม้ยางพาราที่จะนำมาเป็นไม้แปรรูปเป็นขนาดไม้ก่อสร้างหายาก การบิดงอและไม้คงทนเป็นสาเหตุสำคัญแต่ก็ใช้ทำเป็นไม้แบบคอนกรีตดีพอสมควร ใช้ทำถังใส่ของดีมาก และมีแรงยึดตะปูสูง ซึ่งสมบัติเชิงกลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สมบัติเชิงกลของไม้ยางพารา

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

คำอธิบายความหมายตารางที่ 1.1

1. ความสามารถทนรับแรงกระทำจากภายใน (Stiffness) หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ที่ได้จากการตัด (Static bending)

2. Compression parallel to grain หมายถึง ค่าแรงบีบ

3. Static bending หมายถึง ค่างานทั้งหมด ที่ใช้ทำให้ไม้เสียรูป จนถึงน้ำหนักที่

กำหนด

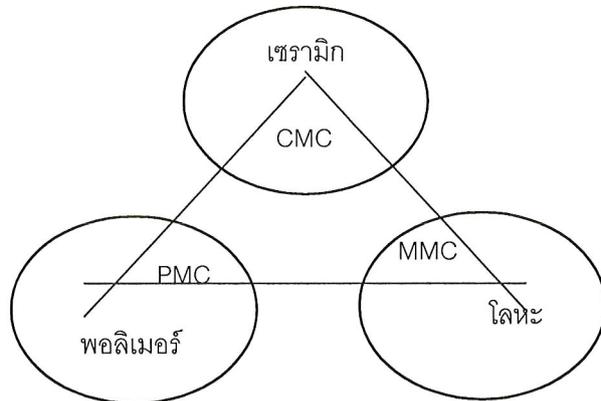
4. Shear along grain หมายถึง ค่าแรงเฉื่อยสูงสุดตามแนวสัมผัส (Tangential) และแนวรัศมี (Radial)

5. Impact bending หมายถึง ค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้ไม้หัก

6. Hardness หมายถึง ค่าน้ำหนัก (หน่วย: กิโลกรัม) หรือแรงที่ต้องใช้ในการกดลูกปืนให้จมลงไปไม้ในระดับที่กำหนด ค่าที่ให้ไว้เป็นค่าเฉลี่ยของความแข็งบนด้านรัศมี และด้านสัมผัส

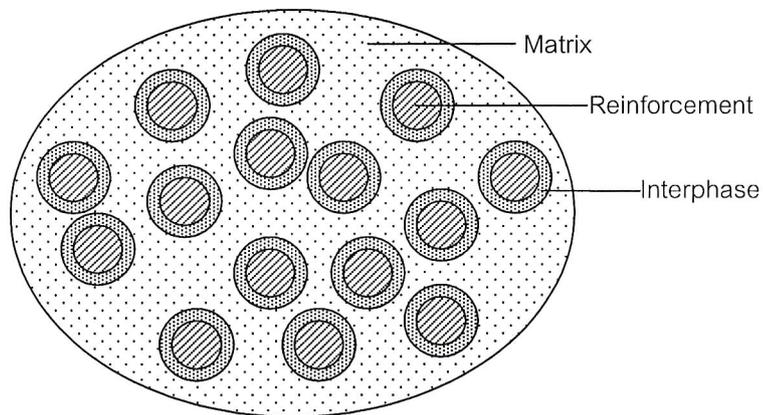
1.3.2 วัสดุผสม (Composite materials)

วัสดุผสมเป็นของแข็งเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยวัสดุ ตั้งแต่ 2 ชนิด หรือมากกว่า ในระดับมหภาค วัสดุผสมจะถูกออกแบบเพื่อให้มีสมบัติที่ดีที่สุดหรือคุณภาพที่ดีที่สุด การผสมวัสดุสองชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิด อาจผสมทางกายภาพ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีเนื้อเดียว สมบัติวัสดุผสมประกอบด้วยสมบัติ ลักษณะของโครงสร้างและการกระจายตัวของเฟส เพื่อให้มีสมบัติใหม่ที่แตกต่างกับสมบัติของสารแต่ละสาร ส่วนผสมหลักในวัสดุผสมจะไม่สูญเสียสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ไป จุดประสงค์ของการผลิตวัสดุผสมขึ้นมาด้วยเหตุผลต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรง หรือเพิ่มการรักษารูปร่าง เพิ่มความหนาแน่น ทนอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลดการซึมซับของก๊าซและของเหลวปรับสมบัติทางไฟฟ้า (เช่น เพิ่มความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น) ลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ลดน้ำหนัก และลดการสึกหรอ วัสดุวิศวกรรมได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ โลหะ พอลิเมอร์ (พลาสติก) และเซรามิก วัสดุแต่ละประเภทมีสมบัติเด่นที่แตกต่างกัน จากความต้องการเทคโนโลยีใหม่ ช่วยผลักดันทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาวัสดุใหม่ดังรูปที่ 1.5 วัสดุวิศวกรรม ทั้ง 3 ประเภท เมื่อเป็นวัสดุผสมมีชื่อเรียกตามวัสดุหลัก เช่น วัสดุหลักเป็นเซรามิก วัสดุผสมเนื้อเซรามิก คือ CMC (ceramic matrix material) วัสดุหลักเป็นเนื้อโลหะ วัสดุผสมเนื้อโลหะ คือ MMC (metal matrix composite) และ วัสดุหลักเป็นเนื้อพอลิเมอร์ วัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ คือ PMC (polymer matrix composite)



รูปที่ 1.5 วัสดุผสมซึ่งผลิตมาจากวัสดุหลักทั้งสามกลุ่ม
(ที่มา: เล็ก สีคง, 2543)

วัสดุผสมมีเนื้อหาล้อมรอบวัสดุเสริมแรง (reinforcing materials) พื้นที่ระหว่างเนื้อหาล้อมรอบวัสดุเสริมแรงซึ่งเป็นที่ที่ เฟส 2 เฟส กระทำต่อกันด้วยผลทางเคมีหรือผลจากกระบวนการผลิต เรียกว่า อินเทอร์เฟซ (interphase) แสดงดังรูปที่ 1.6



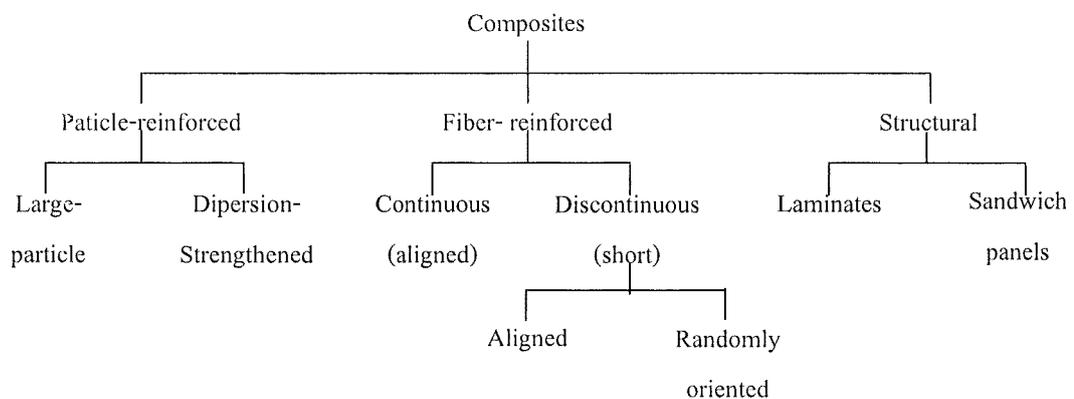
รูปที่ 1.6 เฟสของวัสดุผสม
(ที่มา: Isaac M.Daniel, 2006)

วัสดุผสมแบ่งโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ๆได้ 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 1.7 คือ

Fiber - reinforced composites คือ วัสดุผสมด้วยเส้นใยเสริมแรงเชื่อมอยู่กับเนื้อหลัก เส้นใย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาว เส้นใยเสริมแรงนี้จะมี ความแข็งแรง ความแข็งเกร็งสูง เมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงในแนวตามความยาว โดยทั่วไปแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีขนาดเล็กกลงก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งของเส้นใยใน วัสดุผสมน้อยลง ทำให้วัสดุมีเสถียรภาพ และความแข็งแรงมากขึ้นด้วย โดยที่เส้นใยเสริมแรงจะ กระจายตัวทั่วไปในสารพื้นแบบเรียงสุ่ม

Structural Composites ประกอบด้วยเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรง และซ้อนทับ กันเป็นชั้นๆสลับกันไป วัสดุผสมในกลุ่มนี้รวมถึงวัสดุผสมแบบแซนวิชและแบบรวงผึ้ง

Particulate - reinforced ประกอบด้วยอนุภาคเล็กกระจายอยู่ทั่วไปในสารพื้น ซึ่ง รูปแบบของอนุภาคเล็กๆ นี้จะมีลักษณะเป็นเกล็ดหรือสะเก็ดที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป สมบัติจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคและเนื้อหลัก ขนาด รูปร่าง และระยะระหว่างอนุภาค



รูปที่ 1.7 ลักษณะของโครงสร้างวัสดุผสม
(ที่มา: Isaac M.Daniel, 2006)

1.3.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม มีสมบัติที่ดี เช่น การนำความร้อน ความแข็งแรง ทนต่อการผุกร่อน น้ำหนักเบา อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ ถ้าทำเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้า และทองแดง

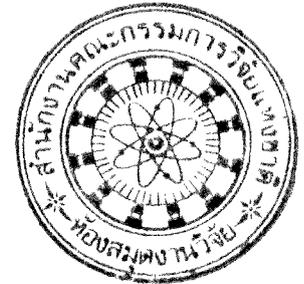
อ่อน สามารถตัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อน อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ตัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็น อันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี ด้วยสมบัติที่ดีของอะลูมิเนียมจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการนำอะลูมิเนียมมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงของวัสดุเป็นจำนวนมาก

อะลูมิเนียม A356 จัดเป็นอะลูมิเนียมหล่อผสม มีส่วนผสมระหว่างอะลูมิเนียม - ซิลิกอน-แมกนีเซียม ซึ่งประกอบด้วย ส่วนผสม 6.86% ของซิลิกอน 0.38% ของแมกนีเซียม โดยซิลิกอนจะมีคุณสมบัติทางด้านการหล่อและแมกนีเซียมจะทำให้ลูมิเนียมชนิดนี้มีสมบัติทางความร้อนที่ดี สามารถชุบแข็งได้โดยผสมแมกนีเซียมในลักษณะแมกนีเซียมซิลิไซด์(Mg_2Si) เหมาะกับงานหล่อ ทั้งแบบหล่อทรายและแบบหล่อถาวร งานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน ประสิทธิภาพเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดีและ มีความแข็งแรงสูง เนื้อแน่นทนแรงอัดได้ดี สมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ อะลูมิเนียม

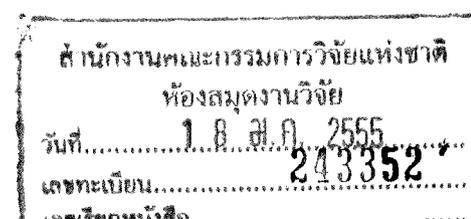
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น	2.70 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	933.47 K (660.32 °C)
จุดเดือด	2792 K (2519 °C)
ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) 26.50 n·Ωm
การนำความร้อน	237 W/(m·K)
อัตราส่วนปัวซอง	0.35
ความแข็งแรงวิกเกอร์ส	167 MPa

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



1.3.4 ซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ใช่สารที่เกิดขึ้นเองจากธรรมชาติแต่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้น โดยปกติแล้วซิลิกอนคาร์ไบด์เมื่อแบ่งตามโครงสร้างจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ อัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ (α -SiC) เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูปผลึกเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งเกิดเมื่อทำ



การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิมากกว่า 2100 °C และเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ (α -SiC) เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูปผลึกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Cubic) เกิดเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1500-1900 °C อัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงกว่าเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์จึงผลต่อสมบัติทางด้านความแข็งและทนทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่าเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์

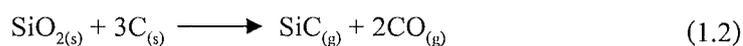
1.3.4.1 การเตรียมเบตา ซิลิกอนคาร์ไบด์ มีการเตรียมได้ 5 วิธีดังนี้

1. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่าง ซิลิกอน กับ คาร์บอน ดังปฏิกิริยาสมการที่ 1.1



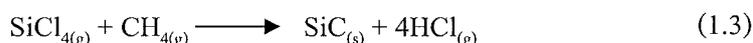
การเตรียมโดยวิธีการนี้จะมีการให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่อุณหภูมิ 1000 – 1400 °C ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จะอยู่ในรูปเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์มีลักษณะเป็นก้อนหยาบๆ มองดูมีลักษณะคล้ายมีโลหะซิลิกอนเหลืออยู่

2. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาในบรรยากาศเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ระหว่างซิลิกากับคาร์บอน (Carbothermal Reduction of Silica) ดังปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 1.2

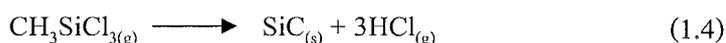


การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิกาและคาร์บอนที่มีราคาไม่แพงมากนัก เป็นสารตั้งต้นในการเตรียม โดยปกติแล้วซิลิกาที่ใช้จะเป็นทราย หรือหินเขี้ยวหนุมาน และคาร์บอนที่ใช้จะเป็นเขม่าดำ (Carbon Black) ปิโตรเลียมโค้ก (Petroleum Coke) หรือผงแกรไฟต์ (Graphite Powder) โดยที่ซิลิกาและคาร์บอนจะเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1050 °C และจะเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 1500 °C เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1500 - 1900 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสมบูรณ์ทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง และซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์

3. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาในสถานะไอ (Vapor Phase Reaction หรือ Chemical Vapor Deposition; CVD) การเตรียมโดยวิธีการนี้จะใช้ซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon Tetrachloride; SiCl_4) ที่อยู่ในสถานะไอทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน ดังปฏิกิริยาสมการที่ 1.3



หรือเตรียมได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลซิลิกอน ไตรคลอไรด์ (Methyl Silicon Trichloride) ดังปฏิกิริยาดังสมการที่ 1.4



การเตรียมโดยวิธีนี้ ถ้าสารตั้งต้นในการเตรียมมีความบริสุทธิ์สูงจะทำให้ผง SiC มีความบริสุทธิ์สูงด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ผง SiC ที่ได้ อาจมีการยึดติดกันเป็นก้อนทำให้มีการดูดซับ เอากลอรีนหรือกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) เอาไว้ได้ ดังนั้นจึงต้องนำเอาผง SiC ที่ได้ ไปเผาเพื่อไล่คลอรีนออกไปก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป

4. การเตรียมโดยวิธีการระเหยเป็นไอ (Gas Evaporation) การเตรียมโดยวิธีนี้จะ ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอของซิลิกอนกับไอของคาร์บอน ทำให้ได้ β -SiC ที่มีขนาด ละเอียดมากคือมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

5. เตรียมได้จากการสลายตัวของโพลิเมอร์โดยใช้ความร้อน (Thermal decomposition of Organosilinic Polymers) การเตรียมโดยวิธีการนี้จะใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (Non – Oxidizing) ทำให้ได้ผง β -SiC ดังปฏิกิริยาดังสมการที่ 1.5



1.3.4.2 การเตรียมอัลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์

วิธีการเตรียม α -SiC เตรียมได้ต่อจากปฏิกิริยาการเตรียม β -SiC โดยวิธีการทำปฏิกิริยาในบรรยากาศเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ระหว่างซิลิกา กับ คาร์บอน (วิธีที่2) ดังแสดงในสมการที่ (1.2)

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

1.3.5 กระบวนการคาร์โบไนเซชัน (Carbonisation)

กระบวนการในการผลิตถ่าน โดยการเผาถ่านหินหรือไม้ภายใต้สภาวะขาดออกซิเจน ซึ่งทำให้สารระเหยถูกขับออกไปในรูปของก๊าซทาร์และน้ำมัน สิ่งที่เหลืออยู่จะเป็นสารประกอบคาร์บอนคงที่และเถ้าที่หลอมละลายเป็นมวลเดียวกันเรียกว่า ถ่าน โดยแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 1.3

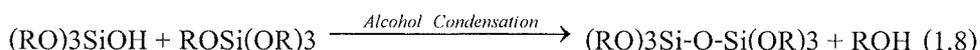
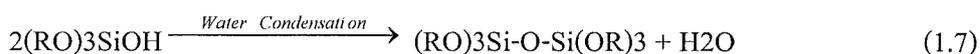
ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยากับเซลล์ภายในเนื้อไม้ในกระบวนการคาร์โบไนเซชัน
(ที่มา: C.E. Byrne and D.C. Nagle, 1997)

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

1.3.6 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Processing)

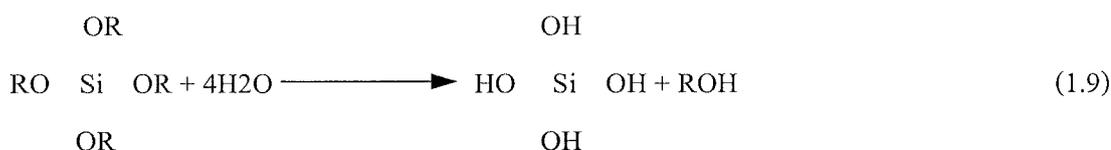
กระบวนการผลิตโดยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 μm เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล”

ปฏิกิริยา Hydrolysis ปฏิกิริยา Water Condensation ปฏิกิริยา Alcohol condensation ซึ่งแสดงรายละเอียดปฏิกิริยาในสมการที่ 1.6 ถึง 1.8 ตามลำดับ มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสถานะที่ต่างกัน ทำให้โซล-เจลได้สมบัติที่ดีและโครงสร้างต่างกัน

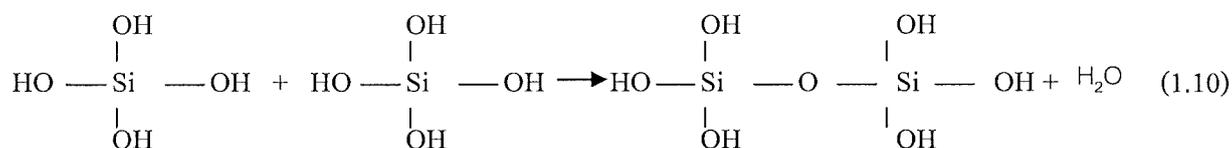


OR แทนหมู่ Alkoxy group เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ขั้นตอนแรกของการทำโซล-เจล คือ การผสมสารตั้งต้น (Precursor)

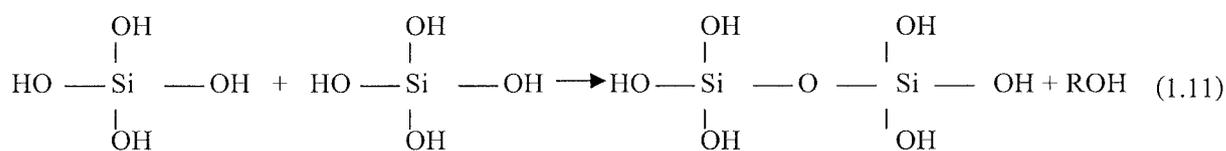
กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal Alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วน Alkoxide ชนิดอื่น เช่น Aluminate, Titanate และ Borate มีใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมักจะใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS), C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังสมการที่ 1.9



และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Water Condensation Reaction) ดังสมการที่ 1.10



หรือ Alcohol Condensation Reaction ดังสมการที่ 1.11



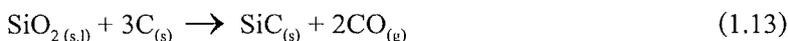
การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พงลเย็บค พิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ซีลิกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจล จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น ภายหลังจากที่ถ่านพูนได้ผ่านกระบวนการโซล-เจล ของสารละลายโซลของ SiO₂ ทำให้ถ่านพูนมี SiO₂ เคลือบอยู่ (เป็นวัสดุผสม C-SiO₂) แล้วจึงนำไปเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน ซึ่งวัสดุผสม C-SiO₂ จะเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันขึ้น ทำให้ได้ผลปฏิกิริยาเป็นของแข็ง SiC และก๊าซ CO ดังแสดงปฏิกิริยารวมในสมการที่ (1.2) (ฤตวรรณ, 2551)

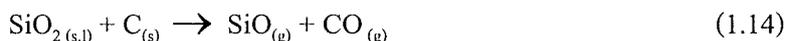
1.3.7 ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน

ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน คือการเผาที่อุณหภูมิสูงและใช้คาร์บอนเป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยานี้แบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง-ของแข็ง ปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง-ของเหลว ปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากขึ้น ปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันจะถูกศึกษาในบรรยากาศของอาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน (N₂) เพื่อป้องกันคาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ

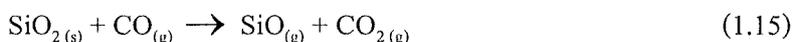
ปฏิกิริยาเริ่มต้นกับคาร์บอนซึ่งผ่านการเคลือบผิวด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ในกระบวนการโซล-เจล ซึ่งอยู่ในลักษณะการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง-ของแข็ง หรือ ปฏิกิริยาระหว่างของเหลว-ของแข็ง ซึ่งแสดงในสมการที่ 1.13 ถึงสมการที่ 1.16 ผลที่ได้จากปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน คือ ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์



ปฏิกิริยาในสมการที่ 1.13 แสดงให้เห็นการทำปฏิกิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์และคาร์บอน ผลที่ได้เป็น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในสมการที่ 1.13 แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เริ่มต้นด้วย การทำปฏิกิริยาระหว่าง สถานะของแข็ง-ของแข็ง หรือ ของแข็ง-ของเหลวเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง คาร์บอนและซิลิกอนไดออกไซด์ เป็น ก๊าซซิลิกอนมอนอกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 1.14



โดยสัญลักษณ์ s แทน สถานะของแข็ง, l แทน สถานะของเหลว, g แทนสถานะก๊าซ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึง 1450 °C มีผลให้เกิด คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และซิลิกอนมอนอกไซด์ ยังคงเกิดเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ 1.15



ขณะเดียวกันได้เกิดปฏิกิริยาแบบ Boudouard โดยได้เปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 1.16

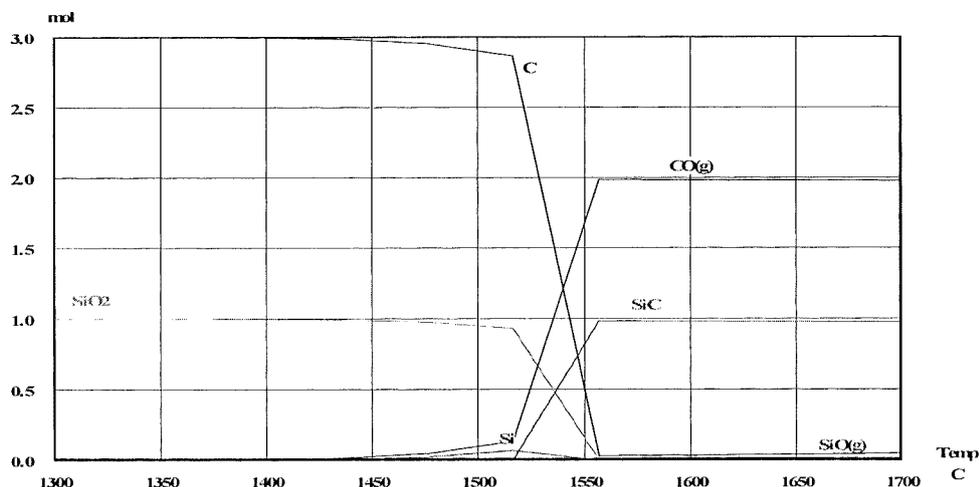


ในการเกิดปฏิกิริยาอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ มีอัตราส่วนที่ต่ำเพียงพอเพื่อให้ซิลิกอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลงโดยทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นซิลิกอนมอนอกไซด์



ส่วนที่ 2 ซิลิกอนมอนอกไซด์ในสถานะก๊าซ ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับคาร์บอนซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่าง ก๊าซ-ของแข็ง ซิลิกอนมอนอกไซด์ในสถานะไอในสมการที่ 1.14 และ 1.15 ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ได้เป็น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ในสมการที่ 1.17

จากการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ โดยอาศัยหลักการของ พลังงานกิบส์ต่ำสุด (Gibbs energy minimization) จะมีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์สูงที่สุด นำไปคำนวณเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่มีความเป็นไปได้ แล้วแสดงผลในรูปของกราฟความสมดุลของส่วนผสม ในระบบที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.8 พบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C SiO₂ ทำปฏิกิริยากับ คาร์บอน กลายเป็น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้สามารถสังเคราะห์ ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ อุณหภูมิประมาณ 1500 - 1600 °C และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงก็จะได้เซรามิกไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ตามต้องการ เนื่องจากไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นสารเสถียรไม่ทำปฏิกิริยาย้อนกลับที่อุณหภูมิดังกล่าว และเนื่องจากคาร์บอนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อยู่ในรูปของถ่านพูนแบบเซลล์ูลาร์ ดังนั้น ไบโอมอร์ฟิคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่เป็นผลลัพท์จากปฏิกิริยาจึงมีโครงสร้างพูนแบบเซลล์ูลาร์



รูปที่ 1.8 กราฟความสมดุลของส่วนผสม ระบบ (SiO_2+3C) ในบรรยากาศของ
 ก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิต่างๆ
 (ที่มา: ฤตวรรณ, 2551)

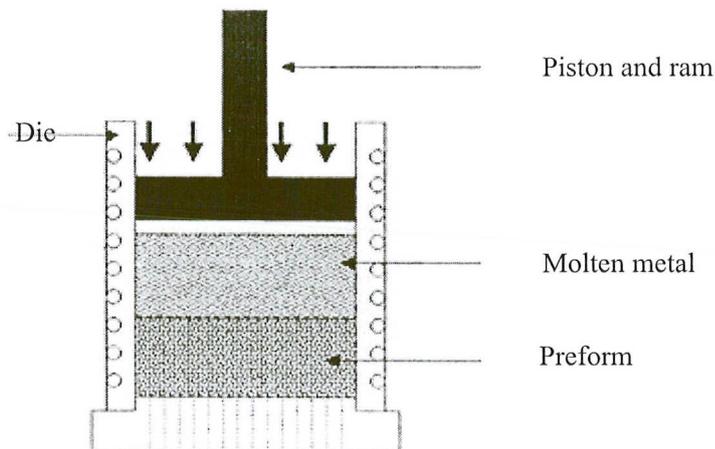
1.3.8 กระบวนการหล่ออัด (Squeeze casting)

การหล่อโลหะมีวิธีการหล่อด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ 1.การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วง เป็นวิธีการหล่อที่ง่ายที่สุด เพราะจะเทน้ำโลหะลงในแบบ น้ำโลหะก็จะไหลลงในแบบเองตามแรงโน้มถ่วงของโลกจนเต็ม แบบเดียวกับการหล่อเทียนนั่นเอง 2.การหล่ออัด วัสดุที่ใช้หล่อจะถูกบีบอัดเข้าไปในแบบหล่อถาวร เช่นวัสดุหล่อแบบฉีด ใช้สำหรับวัสดุสังเคราะห์ 3.การหล่อด้วยแรงหนีศูนย์กลาง น้ำโลหะที่ถูกเทเข้าไป จะได้รับการบีบอัดเข้าไปในแบบหล่อที่หมุนด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เช่นการหล่อท่อ กระบวนการหล่ออัดได้นำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี 1976 โดยใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ต่อมาได้ประยุกต์ใช้กับวัสดุเสริมแรงชนิดอื่นๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และวัสดุเสริมแรงแบบอนุภาค ซึ่งรูปร่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่ออัดมีรูปร่างชิ้นงานใกล้เคียงกับรูปร่างชิ้นงานที่ได้ทำการออกแบบ มีผลทำให้สามารถผลิตชิ้นงานออกสู่ตลาดได้รวดเร็วยิ่งขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงาน และในวงการอุตสาหกรรมได้นำกระบวนการหล่ออัดใช้ในงานเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและส่วนประกอบของอุปกรณ์ (B.Cantor, 2004) ดังแสดงในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 ประโยชน์ของวัสดุผสมเนื้อโลหะในเชิงพาณิชย์ (ที่มา B.Cantor, 2004)

ผลิตภัณฑ์	วัสดุผสม	วิธีการผลิต	สมบัติของวัสดุผสม	ปีที่เริ่มผลิต (บริษัทที่ผลิต)
อุปกรณ์ก่อสร้าง	SiC/Al	การหล่ออัด	น้ำหนักเบา ทนทานต่อ การเสียดสี	1984 (Nippon Carbon)
ข้อต่อโครงสร้างยาน อวกาศ	SiC/Al 7075	การหล่ออัด การม้วน (Rolling)	แข็งแรง ค่าการขยายตัว ทางความร้อนต่ำ	1988 (Mitsubishi)
กระบอกสูบใช้ค้ำ	SiC/Al	การหล่ออัด การรีด (Extrusion)	น้ำหนักเบา ทนทานต่อ การสึกหรอ ค่าการนำ ความร้อนต่ำ	1989 (Mitsubishi Aluminum)
ลูกสูบเครื่องยนต์ดีเซล	SiC/Al	การหล่ออัด	น้ำหนักเบา ทนทานต่อ การสึกหรอ	1989 (Niigata)
ตัวระบายความร้อนของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	SiC/Al	การหล่ออัด	ค่าการนำความร้อนสูง ค่าการขยายตัวทาง ความร้อนต่ำ	1999 (Hitachi Metals)

กระบวนการหล่ออัด ดังรูปที่ 1.9 เริ่มต้นโดยใช้แรงบีบอัดกับน้ำโลหะ โดยอาศัยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ คือ การหล่อและการอัด ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการใช้แรงอัดน้ำโลหะเหลวให้แทรกซึมผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของชิ้นงานที่ใช้เป็นตัวเสริมแรง โดยทำการเทน้ำโลหะเหลวใส่แม่พิมพ์ตัวล่างที่วางชิ้นงานไว้แล้ว หลังจากนั้นก็ใช้แรงอัดกดแม่พิมพ์ตัวบนดันให้น้ำโลหะเหลวแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของชิ้นงานปล่อยให้เย็นตัวจนกลายเป็นโลหะผสม ชิ้นงานที่ผ่านการหล่ออัดจะมีเกรนค่อนข้างเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น เนื่องจากน้ำโลหะเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างทันทีทันใด ข้อดีของการหล่ออัดคือค่าความดันที่สูงสามารถช่วยเพิ่มความเร็วของกระบวนการผลิตและควบคุมปฏิกิริยาเคมีที่มีมากได้ โครงสร้างปราศจากความสกปรกและชิ้นผลิตภัณฑ์มีความลึกที่ดีสามารถลดการเกิดความล้าของชิ้นงานนั้นๆ ทำให้ยืดอายุการใช้งานให้นานยิ่งขึ้น ลดการเกิดการหดตัวของชิ้นงานและสามารถลดการละลายของอากาศจากภายนอกในชิ้นงานได้ ทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศน้อย แต่ข้อเสียก็คือค่าเงินลงทุนและค่าการติดตั้งอุปกรณ์ที่สูง รูปร่างความเป็นเรขาคณิตมีข้อจำกัดมีโอกาสที่รูปร่างของชิ้นงานจะผิดรูปร่าง (เจษฎา, 2548)



รูปที่ 1.9 การหล่ออัด (Squeeze casting)
(ที่มา: S.M.Seyed, 2006)

1.3.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบจำแนก 2 ทาง

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

ตารางที่ 1.5 ตารางชนิดแจกแจงในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง

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

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

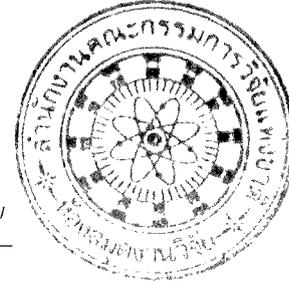
T_j = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ j ของตัวแปรที่ 1 และทุกระดับของตัวแปรที่ 2

$$= \sum_{i=1}^b x_{ij} \quad (1.18)$$

B_i = ผลรวมของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ i ของตัวแปรที่สอง และทุกระดับของตัวแปร ตัวที่ 1

$$= \sum_{j=1}^k x_{ij} \quad (1.19)$$

$$\bar{x}_{.j} = \frac{T_j}{b} = \frac{\sum_{i=1}^b x_{ij}}{b} \quad \text{และ} \quad \bar{x}_{i.} = \frac{B_i}{k} = \frac{\sum_{j=1}^k x_{ij}}{k} \quad (1.20)$$



$$T = \text{ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด} = \sum \sum x_{ij} = \sum T_j = \sum B_i \quad (1.21)$$

$$n = \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด} = kb \quad (1.22)$$

$$X = \text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด} = \frac{T}{kb} = \frac{T}{n} \quad (1.23)$$

วิธีนี้จะแบ่งผลบวกกำลังสองของความผันแปร ความแตกต่างของข้อมูลทั้งหมด เป็น 3 ส่วน คือ ความผันแปรระหว่างระดับของปัจจัยที่ 1 รวมกับความผันแปรระหว่างระดับของปัจจัยที่ 2 และความคลาดเคลื่อน นั่นคือ

$$SST = SS_{tr} + SS_B + SSE \quad (1.24)$$

โดยที่ SS_{tr} = ผลบวกของความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่หนึ่ง

SS_B = ผลบวกของความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่สอง

SSE = ผลบวกของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (1.25)$$

$$\begin{aligned} SStr &= SS(\text{ระหว่างระดับของปัจจัยที่ 1}) = SS(\text{ระหว่างทรีทเมนต์}) \\ &= b \sum (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned} SSB &= SS(\text{ระหว่างระดับของปัจจัยที่ 2}) = SS(\text{ระหว่างบล็อก}) \\ &= k \sum (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$SSE = SST - SStr - SSB \quad (1.28)$$

สำหรับองศาอิสระจะแบ่งเป็น 3 ส่วน เช่นกัน คือ

องศาอิสระทั้งหมด = องศาอิสระของปัจจัยที่หนึ่ง + องศาอิสระของปัจจัยที่สอง + องศาอิสระของความคลาดเคลื่อน

$$n-1 = (k-1) + (b-1) + (k-1)(b-1) \quad (1.29)$$

ตารางที่ 1.6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ปัจจัย

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

ให้ μ_i = แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัยที่หนึ่ง; $i = 1, 2, \dots, k$

μ_j = แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัยที่สอง; $j = 1, 2, \dots, k$

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่มีปัจจัย 2 ปัจจัยดังนี้

สมมติฐานเพื่อการทดสอบ

การทดสอบสมมติฐานได้แบ่งปัจจัยในการทดสอบ 2 ปัจจัย ได้แก่ ทิศทางโครงสร้างของชิ้นงาน และ ระยะเวลาในการเผาแห้ง เพื่อศึกษาปัจจัยที่แตกต่างส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานและได้แบ่งสมมติฐานในการทดสอบ 2 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยทิศทางโครงสร้าง
ของชิ้นงาน หรือ

$$H_0: \mu_{.1} = \mu_{.2} = \dots = \mu_{.k}$$

H_1 : มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยทิศทางโครงสร้างของชิ้นงาน
อย่าง

$$\text{น้อย 2 ระดับ หรือ } H_1: \mu_{.i} \neq \mu_{.j} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ } : i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, k$$

ชุดที่ 2 H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยระยะเวลาในการเผา
แช่ หรือ

$$H_0: \mu_{.1} = \mu_{.2} = \dots = \mu_{.b}$$

H_1 : มีความแตกต่างระหว่างระดับต่างๆของปัจจัยระยะเวลาในการเผาแช่ อย่าง
น้อย 2

$$\text{ระดับ หรือ } H_1: \mu_{.i} \neq \mu_{.j} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ } : i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, b$$

สถิติทดสอบ

$$\text{สถิติทดสอบของปัจจัยที่ 1} \quad F = \frac{MSTrt}{MSE} \quad (1.25)$$

$$\text{สถิติทดสอบของปัจจัยที่ 2} \quad F = \frac{MSB}{MSE} \quad (1.26)$$

เขตปฏิเสธ

1. จะปฏิเสธสมมติฐานของปัจจัยชุดที่ 1 H_0 ถ้า $F = \frac{MSTrt}{MSE}$ มากกว่า $F_{1-\alpha}$
โดยมีองศาอิสระ $k-1$ กับ $(k-1)(b-1)$
2. จะปฏิเสธสมมติฐานของปัจจัยชุดที่ 2 H_0 ถ้า $F = \frac{MSB}{MSE}$ มากกว่า $F_{1-\alpha}$
โดยมีองศาอิสระ $b-1$ กับ $(k-1)(b-1)$

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาสมบัติทางกลของซิลิคอนคาร์ไบด์พูนและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากไม้ยางพารา
- 1.4.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของซิลิคอนคาร์ไบด์พูนและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากไม้ยางพารา

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้คือ ทำการศึกษาสมบัติทางกล และทางความร้อนของซิลิคอนคาร์ไบด์พูนและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์จากไม้ยางพารา และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับซิลิคอนคาร์ไบด์พูนกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยวิธีอื่นๆ ที่มีการศึกษาและมีรายงานไว้ในบทความทางวิชาการทั่วไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้อุปกรณ์สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกลของเซรามิกและวัสดุผสม
- 1.6.2 ทำให้ทราบค่าสมบัติทางกลของซิลิคอนคาร์ไบด์พูนและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์