

กระบวนการผลิตวัสดุเสริมแรงชนิด

RESIN TRANSFER MOLDING (RTM)

รศ.ดร. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา

ห้องปฏิบัติการวิจัย Premier Applied Materials

ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำนำ

ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมด้าน composite materials ซึ่งส่วนมากมักจะเป็นวัสดุเสริมแรง เช่น พลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว หรือที่รู้จักกันว่า FRP นั้น ในผลิตภัณฑ์ประเภทที่อยู่ในกลุ่ม consumer products ปัจจัยหลักที่มีใช้เพื่อการตัดสินใจเลือกกระบวนการผลิต จะมองกันที่ความเร็วในการผลิต ทั้งนี้เพื่อให้ต้นทุนการผลิต ต่อขึ้นต่ำลง อันเป็นจุดที่แตกต่างกันอย่างมากกับอุตสาหกรรม ที่ใช้เทคโนโลยีสูง เช่น ด้านยานอวกาศ ซึ่งมุ่งเน้นการ ออกแบบผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นหลัก ต้นทุนการผลิตกลับเป็นเรื่องรอง การใช้งานของผลิตภัณฑ์ วัสดุเสริมแรงใน consumer products มีการขยายตัว มากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรม เครื่องกีฬา ซึ่งการผลิตในบางชนิดอาจต้องการความสวยงาม บางชนิดอาจต้องการสมบัติในการใช้งานเฉพาะด้านสูง ทั้งนี้ทั้งนั้นผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดต่างก็สามารถออกแบบ ได้อย่างหลากหลายชนิด ในลักษณะที่ส่วนมากจะมีวัสดุ โพลีเมอร์ทำหน้าที่เป็นส่วนเนื้อหลัก แล้วเสริมแรงด้วยเส้นใย ความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยแก้วในรูปแบบต่างๆ กัน ยิ่งความต้องการผลิตภัณฑ์มีมากขึ้นเท่าไร ความจำเป็น ในการควบคุมเส้นใยแก้วที่จะใช้เสริมแรงก็ยิ่งจะมีบทบาท มากขึ้นเท่านั้น กระบวนการต่างๆ ที่จะใช้ในการผลิต ซึ่งต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบก่อนการตัดสินใจ ซึ่งอาจ มีความแตกต่างกันออกไป เช่น Injection Molding, Struc-

tural Compressive Molding, Resin Transfer Molding, Rolled Tube Manufacture หรือ แม้กระทั่งกระบวนการ แก่แก่ ซึ่งต้องใช้แรงงานสูง เช่น Hand Lay-up หรือ Spray-up เป็นต้น

กระบวนการที่สำคัญที่จะกล่าวต่อไปนี้ คือกระบวนการ Resin Transfer Molding (RTM) อันเป็นกระบวนการใน ระบบแม่แบบปิด (closed-mold) และใช้ความดันต่ำ ซึ่ง สามารถทำให้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์วัสดุเสริมแรง ที่มีรูปร่าง จากสลับบีบซ้อน ไปสู่แบบเรียบง่าย ไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่ เหมาะแก่การใช้งานระดับแตกต่างกันไป รวมไปถึงความ สามารถที่ครอบคลุมขนาดผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

2. กระบวนการชนิดต่างๆ ในกลุ่มของ RTM

กระบวนการผลิตในระบบ RTM นี้สามารถแบ่งแยกใน รายละเอียดเป็นกระบวนการต่างๆ ได้อีกมากมายดังต่อไปนี้

2.1 Vacuum-Assisted Resin Injection (VARI)

เป็นกระบวนการพื้นฐานที่สุดในการอธิบายความ หมายของคำว่า RTM โดยแม่แบบที่ใช้จะทำจากวัสดุราคาถูก เช่น อีพ็อกซี แล้วเสริมแรงด้วยวิธีการของการขึ้นรูปด้วยมือ โดยทำแผ่นวัสดุเสริมแรงวางเรียงซ้อนกันแม่แบบ หลังจาก นั้นแม่แบบจะปิดสนิทเรียบร้อย ระบบสุญญากาศจะ ช่วยให้อากาศภายในถูกดูดออกหมด แล้วจึงฉีด Resin เข้าไปในแม่แบบด้วยความดันต่ำ (ปรกติจะต่ำกว่าความดัน บรรยากาศ) ในระบบนี้เนื่องจากแม่แบบทำจากวัสดุราคาถูก ใช้ความดันต่ำย่อมทำให้การผลิตเป็นไปอย่างเชื่องช้า และ

ปริมาณใยแก้วที่ผสมก็จะน้อยด้วย การที่แม่แบบไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูง และมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี จะทำให้ cure time ต้องเป็นไปอย่างช้าๆ ด้วย และมีการถ่ายความร้อนออก (exotherm) ที่ค่อนข้างต่ำ เพื่อป้องกันการถูกทำลายของ Resin ดังนั้น cycle time จึงค่อนข้างยาว ซึ่งอาจนานเป็นชั่วโมง หรือเป็นวันสำหรับผลิตภัณฑ์รูปร่าง สลับซับซ้อนชิ้นใหญ่ ข้อดีที่สุดของกระบวนการนี้ คือ ความสามารถในการขึ้นแบบขนาดใหญ่ๆ สลับซับซ้อนด้วยการแยกอีก เป็นชิ้นย่อยได้มากขึ้นที่สุดในราคาที่ค่อนข้างถูก

2.2 Preform Molding

เป็นกระบวนการที่เอกสารอ้างอิงบางฉบับเรียกแทน RTM กระบวนการนี้วัสดุเสริมแรงจะถูกนำไปขึ้นรูปให้เรียบร้อยก่อน แล้วจึงใส่เข้าไปในแม่แบบ โดยวัสดุเสริมแรงดังกล่าวจากการที่ถูกขึ้นรูปไว้ก่อน แล้วนี่เองจึงเรียกกันว่า Preform ซึ่งส่วนใหญ่มักผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการ spray up หลังจากที่ได้ preform แล้วจึงทำการฉีด Resin ตามเข้าไปด้วยน้ำหนักที่คำนวณก่อนแล้ว อุปกรณ์แม่แบบในกรณีนี้อาจทำจากโลหะ โลหะผสม หรือ อีพ็อกซี ซึ่งจะถูกทำให้ร้อนก่อนที่จะฉีด Resin เข้าไป โดยใช้ความดันประมาณ 690 kPa (100 psi) ในกรณีของชิ้นส่วนใหญ่ๆ ความหนาจะค่อนข้างสม่ำเสมอในเวลาประมาณเพียง 3 นาที หรือน้อยกว่านั้น กระบวนการนี้ค่อนข้างจะประหยัดในด้านการลงทุนอุปกรณ์แม่แบบ ใช้ความดันต่ำและมีการเสริมแรงที่สม่ำเสมอ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติดี แต่หน้าเสียดายที่จะมีการสูญเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณรอบๆ ของแม่แบบค่อนข้างมาก

2.3 Structural Reaction Injection Molding Process (SRIM)

กระบวนการนี้คล้ายกับ RTM กล่าวคือ จะมี preform ก่อน แล้วจึงฉีด Resin เข้าไปในแม่แบบ อุปกรณ์แม่แบบที่ใช้มักต้องเลือกวัสดุที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี Resin ที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน แต่ละส่วนจะถูกอัดฉีดเข้าสู่แม่แบบด้วยความดันสูง แล้วเข้าไปผสมกันภายใน ความดันที่ใช้ในการฉีด Resin แม้จะสูงแต่ความดันรวมของทั้งกระบวนการเมื่อมี Resin อยู่ในแบบแล้ว จะตกประมาณเพียง 340-690 kPa (50-100 psi) Resin ที่เข้าไปในแม่แบบจะเกิดการทำปฏิกิริยา และแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เวลาสำหรับ cycle time ในกระบวนการนี้ใช้เพียงแค่ประมาณ 1 นาที ปริมาณของวัสดุเสริมแรงแตกต่างกันไปตั้งแต่ 5% ถึง 55% โดยน้ำหนักด้วยเหตุที่ปฏิกิริยาการแข็งตัวของ Resin เป็นไปอย่าง

รวดเร็วมาก ระยะทางที่จะให้ Resin ไหลเข้าไปจะต้องมีระยะจำกัด โดยปกติถ้าหากจะต้องยาวเกิน 610 มม. (24 นิ้ว) การฉีด Resin จะต้องมีการฉีดแยกเข้าหลายๆทาง เพื่อลดระยะดังกล่าวลง

2.4 High-Speed Resin Transfer Molding (HSRTM)

เป็นการรวมเอากระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสามกระบวนการเข้าด้วยกัน ปริมาณใยแก้วที่ผสมอยู่ในช่วง 35-60% อุปกรณ์แม่แบบที่ใช้ควรทำจากโลหะที่ทนต่อความดันปานกลาง (690-3450 kPa หรือ 100-500 psi) และมีสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี cycle time อยู่ระหว่าง 1 นาที สำหรับชิ้นงานเล็กไปจนถึง 8-12 นาที สำหรับชิ้นงานใหญ่ และรูปร่างสลับซับซ้อน

กระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะต้องได้รับการพิจารณาให้เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ อุตสาหกรรมรถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา และกลุ่มประเทศยุโรป ปัจจุบันมักใช้ระบบ RTM ผลิตชิ้นส่วนต่างๆ และเนื่องจากกระบวนการนี้ยังเป็นกระบวนการที่ไม่เร็วนัก ไม่ค่อยมีระบบอัตโนมัติเข้าช่วย ดังนั้น cycle time โดยเฉลี่ยสำหรับชิ้นงานเล็กๆ จะประมาณ 3 นาที และชิ้นงานใหญ่อาจใช้ถึง 1-2 ชั่วโมง ข้อจำกัดดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากสาเหตุสองประการ คือ อุปกรณ์แม่แบบ ส่วนใหญ่จะทำจากอีพ็อกซี ทำให้ต้องใช้ความดันต่ำและขณะเดียวกันการแข็งตัวของ Resin ก็ต้องกระทำให้ช้า เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนที่ออกจากปฏิกิริยาอันจะไปผลต่อความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์แม่แบบ นอกจากนี้วัสดุเสริมแรงที่ใช้โดยมากมักใช้การขึ้นรูปด้วยมือ โดยการตัดและวางในแม่แบบในแต่ละครั้งที่จะทำการขึ้นรูปทำให้ cycle time สูงขึ้นมาก โดยเฉพาะถ้าชิ้นส่วนมีความสลับซับซ้อน ตัวอย่างเช่น บริษัทหนึ่งทำการผลิตถัง ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วบนและส่วนล่าง โดยใช้ RTM ที่มีอุปกรณ์แม่แบบทำด้วยอีพ็อกซี แล้วใช้วิธีขึ้นรูปด้วยมือซ้อนแผ่นใยแก้วจะทำให้ cycle time ต่อชิ้นถึง 24 ชม. ในขณะที่อีกบริษัทหนึ่งใช้อุปกรณ์แม่แบบชนิดเดียวกันด้วยระบบ RTM เหมือนกัน แต่ใช้วัสดุเสริมแรงในรูปของ perform ที่ทำการพันรอบไว้เรียบร้อยแล้ว ใส่เข้าไปในแม่แบบ cycle time จะลดลงเหลือแค่ 90 นาที เท่านั้นเอง

3. อุปกรณ์ที่ใช้

ในระบบการสร้างความดัน เพื่อกระบวนการผลิต มักพิจารณาดูจากระบบการควบคุมอุปกรณ์เปิด ปิด คูชานานของแท่นแม่แบบ เพื่อให้แม่แบบปิดสนิทในขณะที่ฉีด Resin

เข้าไป และเนื่องจากความดันที่ใช้ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นแรงที่ใช้ในการอัดแบบจะไม่มากนัก ความดันที่ใช้ฉีด Resin จะเป็นตัวกำหนดความดันของความดันทั้งกระบวนการ โดยมากจะกำหนดตามการกำหนดความดันเฉลี่ยของอุปกรณ์ แม่แบบอันเป็นวิธีการที่เปลืองน้อยที่สุด ปัจจุบันมีการนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยคำนวณความดันที่ต้องการ จุดที่น่าพิจารณาเพื่อการกำหนดขนาดความดันก็คือแรงที่ใช้ในการอัดวัสดุเสริมแรงที่อยู่ในรูป Preform หลวมๆ สำหรับ Preform ที่เป็นใยแก้ว 50% โดยน้ำหนักและใยแก้ว มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะต้องใช้ความดันสูงถึง 690 kPa (100 psi) เพื่อการปิดแท่นแม่แบบดังกล่าว

อุปกรณ์แม่แบบนั้น เพื่อให้ cycle time สั้น จะต้องใช้วัสดุที่มีความสามารถในการรองรับความร้อนอย่างสม่ำเสมอที่ประมาณ 90°-150° C (200°-300°F) ต้องมีความแข็งแรงที่จะทนการอัด Preform โดยไม่เกิดการเสียรูปทรงในขณะปิดแม่แบบบริเวณขอบของแม่แบบจะต้องสามารถติดส่วนเกินของ preform ที่ไหลยื่นออกมา เพื่อเป็นการประหยัดเวลาแก่การตกแต่ง และทำให้รอยต่อปิดกันได้ดีสนิท นอกจากนี้แล้วธรรมชาติของวัสดุเสริมแรงที่จะเกิดการเสียดสีซ้าๆ ซากๆ ทำให้ผิวของอุปกรณ์แม่แบบจะมีการเคลือบด้วยโครเมียม ข้อจำกัดต่างๆ ทั้งหมดที่กล่าวนี้จะต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากจะไปมีผลอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่ต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากๆ

4. วัสดุติดสำหรับ RTM

ราคาและความสามารถในการขึ้นรูป มักจะเป็นปัจจัยเบื้องต้นในการเลือกใช้ Resin ที่ผ่านมาจะพบว่าส่วนใหญ่ยังคงใช้กลุ่มของวัสดุประเภท thermoset แต่ก็เริ่มจะมีการเลือกวัสดุประเภท thermoplastic ในกระบวนการ RTM บ้าง ในบรรดา Resin ที่ใช้กันอยู่ทั้งหมด ตัวที่ใช้กันมากที่สุด

คือ โพลีเอสเตอร์ ซึ่งมีราคาถูกอีกข้อที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายที่ต้องการคุณภาพที่ดี แต่ราคาแพงกว่าไวไฟโพลีเอสเตอร์ อยู่กึ่งกลางระหว่าง โพลีเอสเตอร์และอีพ็อกซี นอกจากนั้นที่เริ่มใช้กันก็มี Resin ในตระกูลอะครีลาเมท (acrylamate) และเมทิลเมทาครีลาเต ไวนิลเอสเตอร์

Resin ที่ใช้ควรจะต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อจะได้ไหลเข้าสู่แม่แบบได้อย่างทั่วถึง ขณะเดียวกันก็ต้องสามารถแข็งตัวได้เร็ว Resin จะต้องมีแต่เพียงแข็งตัวได้เร็วเท่านั้น แต่จะต้องสามารถให้ความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดชิ้นงานออกจากแบบได้โดยไม่เสียรูปทรง ควรจะมี cycle time เพียงแค่ 1 นาที หรือสั้นกว่านั้นหากจำเป็น ซึ่งมักจะพบในกรณีที่ผลิตชิ้นส่วนเล็กๆ

Preform เป็นสิ่งสำคัญอีกจุดหนึ่งในการทำให้การผลิตโดยใช้ RTM ที่ต้องการผลิตครั้งละมากๆ ประสบความสำเร็จได้ การพัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของ preform จะต้องมีการดำเนินการก่อนออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ อยู่เสมอ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักเป็นวัสดุเสริมแรงประเภท E-glass ที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามการพิจารณาเลือกใช้ preform ที่เหมาะสมมักคำนึงถึงทั้งสมบัติและราคา ตลอดจนความยากง่ายในการขึ้นรูปด้วย โดยปรกติหากต้องการทำ preform ในลักษณะรูปแบบ 3 มิติ ที่ค่อนข้างสลับซับซ้อน วิธีการของ spray-up ยังดูจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดอยู่

5. การเลือกใช้วัสดุติด

การเลือกใช้วัสดุติดในกระบวนการ RTM นับว่ามีความสำคัญอย่างมาก ก่อนการเลือกใช้วัสดุติดตัวใดก็ตาม ผู้ผลิตควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 1 : ข้อควรคำนึงในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุติด ชนิดต่างๆ ในกระบวนการ RTM

| General question | Specific areas of concern |
|--|--|
| Mold | |
| How many parts are required from the process in a given time period? | Primarily, tooling and pumping/dispensing Secondarily, release, cleaners, resin |
| Is design life a consideration? | Tooling, pumping/dispensing, cleaners, release agents |
| What are the dimensional requirements?..... | Tooling, cleaners, release agents |
| What are the strength requirements?..... | Tooling, cleaners, release agents |
| What are the surface finish requirements?..... | Tooling, cleaners, release agents, resin system, reinforcement |
| Part | |
| What are the performance requirements of the part?..... | Reinforcement resin system |
| Production | |
| What are the shop environmental requirements?..... | Resin system, cleaners, release agents, tooling, pumping/dispensing |
| What are the capabilities of personnel?..... | All |
| What are the cost objectives?..... | All |

การออกแบบ และสร้างแม่แบบ จะเป็นอีกจุดหนึ่งที่สำคัญที่สุด ในการที่จะทำให้การใช้งานของกระบวนการ RTM ประสบความสำเร็จหรือไม่ ในตัวแม่แบบเอง อาจแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนใหญ่ๆ ได้ 5 ส่วน คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ฉีด Resin ที่ทำหน้าที่ระบายอากาศ เข็มนำช่องว่างในแม่แบบ และปะเก็น ทั้งนี้ ส่วนที่ทำหน้าที่ฉีด Resin และระบายอากาศจะทำให้เกิดการไหลของ Resin เข้าสู่แม่แบบ ขณะเดียวกันก็จะทำหน้าที่กำจัดสารระเหย และฟองอากาศ เข็มนำจะทำให้การประกบกันของแท่นแม่แบบลงในตำแหน่งที่ถูกต้องและแน่นอน ช่องว่างในแม่แบบเป็นตัวกำหนดรูปร่างของชิ้นงาน ขณะที่ปะเก็นนั้นจะเป็นตัวช่วยในการทำให้การประกบกันของแม่แบบสนิทและไม่เกิดรอยรั่วให้ Resin ไหลออกได้ นอกจากนั้นแล้ว

ยังมีจุดที่น่าสนใจอีก 2 จุด คือ ในเรื่อง ของการตกแต่งผิวภายในแม่แบบและการควบคุมอุณหภูมิ

ก่อนการเลือกวัสดุเพื่อทำเป็นแม่แบบ จะต้องคำนึงถึงประเด็นต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วในตารางที่ 1 แม่แบบจะต้องสามารถรักษาสมบัติเชิงกล ภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งด้านอุณหภูมิ สารเคมี ตลอดจนความดันที่ใช้ แม่แบบต้องสามารถรักษารูปร่างไม่เปลี่ยนแปลงไปเกินกว่าขอบเขตที่กำหนด วัสดุที่ใช้ทำอาจเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิกส์ และวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานและความทนทานที่ต้องการในการใช้ผลิตชิ้นงานที่ละมวกๆ นั้น ถ้าเป็นวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จะมีอายุการใช้งานประมาณ 3,000 ชิ้น โลหะอาจใช้ได้ถึง 20,000 ชิ้น เป็นต้น รายละเอียดและการใช้งานได้สรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : คุณลักษณะและการใช้งานของวัสดุที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์แม่แบบในกระบวนการ RTM

| Tooling material | Characteristics | Application |
|------------------|--|---|
| Metals | Excellent mechanical strength, chemical resistance. dimensional stability, durability, surface finish: difficult to handle because of weight:expensive to machine:requires durable mold | High volume, elevated temperature (50 to 600 °C or 120 to 1110 °F) |
| Ceramics | Excellent mechanical and chemical properties. dimensional stability:problems with surface finish: cracking:low thermal conductivity; manufacturing to close tolerance specifications. | Extremely high temperatures (over 1000 °C or 1830 °F) |
| Composites | Easy to manufacture tolerance specifications: low density:low processing cost:excellent mechanical and chemical properties:shorter life cycle than metals:difficult to maintain surface finish | Low to intermediate temperatures (room temperature to 180 °C or 355 °F:low to intermediate volume |

สำหรับชนิดของสารที่ช่วยในการถอดแบบ และสารที่ใช้ทำความสะอาดนั้น หลักการที่สำคัญ คือ สารทั้งสองชนิดจะต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อผิวของแม่แบบ สารช่วยในการถอดแบบมีหลายชนิดหลายแบบ เช่น ซีนี ซิลิโคน และซิลิโคน โพลีไวน์ลคลอไรด์ โพลีเอสเทอร์ หรือฟิล์มโพลีเอไมด์ การเลือกใช้ตัวใดอยู่ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับ Resin ที่ใช้ สภาวะของการผลิต ตลอดจนวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบ การเคลือบผิวด้วย gel มักจะทำให้ลักษณะของผิวดี ส่วนสารที่ใช้ทำความสะอาดแม่แบบก็เช่นกัน ส่วนมากจะต้องเป็นตัวทำละลายที่ไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาวะแวดล้อมหรือ Resin ที่ใช้ ตัวอย่างที่ใช้กันมาก คือ อะซิโตน และเมทิลลีนคลอไรด์

การเลือกชนิดของ Resin แม้ว่าจะต้องคำนึงถึงความต้องการในการใช้งานเป็นหลักก็ตาม แต่ก็ยังมีคุณลักษณะอีกหลายอย่างที่เป็นกุญแจสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้ Resin ด้วยคำว่าระบบ Resin (Resin system) มักใช้เรียกในความหมายกว้างๆ รวมกันตั้งแต่ Resin สารช่วยการแข็งตัว ตัวเร่งสารเติมแต่ง ผงสี สารช่วยปฏิกิริยา และสารหยุดปฏิกิริยา ทั้งหมดนี้ได้สรุปเอาไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งรวมไปทั้งหมดถึงกลุ่ม Resin ชนิด thermoset และ thermoplastic ครอบคลุมการใช้งานออกไปอย่างกว้างขวางโดยทั่วไป ระบบ Resin ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการ RTM จะต้องมีอายุของ

ตารางที่ 3 : การใช้งานของระบบ Resin ชนิดต่างๆ โดยแบ่งตามชื่อทาง generic
 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของการใช้งานเฉพาะด้านที่แตกต่างกันออกไป

| Resin type | Applications | typical resin properties |
|--------------------------------------|---|--|
| Polyester..... | Consumer products, tanks, pipes, pressure vessels, automotive structures | Tensile strength of 3.4 to 90 MPa (0.5 to 13 ksi) compressive strength of 90 to 210 MPa (13 to 20 ksi) up to 120 °C (250 °F) continuous use:low viscosity:fast reaction:can be catalyzed high shrinkage |
| Vinyl ester..... | Consumer products, pipes, ducts, stacks, automotive structures, flooring, linings | Tensile strength of 60 to 90 MPa (9-13 ksi) elongation of 2-6%:up to 120 °C (250 °F) continuous use:low viscosity:fast reaction can be catalyzed:intermediate shrinkage |
| Polybutadiene..... | Resin modifiers, coating, adhesives, potting compounds | Good chemical resistance:up to 120 °C (250 °F) continuous use:high viscosity:fast reaction:can be catalyzed:low moisture pick up |
| Epoxy | Adhesives, tooling, electronics, aerospace and automotive structures | Tensile strength of 55 to 130 MPa (8 to 19 ksi) excellent chemical resistance up to 175 °C (350 °F) continuous use,high viscosity:can be catalyzed intermediate reaction:low shrinkage |
| Polyimide..... | Primary and secondary aerospace structures in high-temperature areas, electronics | Tensile strength of 55 to 120 MPa (18 to 17 ksi) 315°C (600 °F) continuous use:high viscosity:can be catalyzed:slow reaction:reaction by-product: microcracking |
| Bismaleimide..... | Similar to polyimide | Similar to polyimide except that continuous use only up to 230 °C (450 °F) : no reaction by-product |
| Low-performance thermoplastic..... | Automotive panels, appliance housings, gears, bearings, fixtures, consumer products | Amorphous or semicrystalline,high toughness:up to 120 °C (250 °F) continuous use:high processing temperatures pressures:high viscosity |
| Engineering-grade thermoplastic..... | Automotive and aerospace structures | High toughness:up to 230 °C (450 °C) continuous use: high processing temperatures and pressures:high viscosity : amorphous or semicrystalline |

Resin ที่เรียกว่า pot life ค่อนข้างยาว (อย่างน้อย 2 ชม.) มีความหนืดต่ำ อนุหนุมิที่จะทำการฉีด Resin เข้าสู่แม่แบบ (1 Pa.s หรือ 1000 cp หรือน้อยกว่านี้) มี gel time สั้นที่อุณหภูมิพิมพ์ (น้อยกว่า 1 ชม.) และพองอากาศที่เกิดขึ้นต้องน้อย pot life ที่ยาวจะทำให้ Resin มีเวลาเพียงพอที่จะไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนต่างๆ ที่สลักซับซ้อนในโครงสร้างของวัสดุเสริมแรงได้อย่างทั่วถึง ก่อนจะเกิดการแข็งตัว ซึ่งเป็นข้อดีของระบบ RTM ความหนืดที่ต่ำก็เป็นสิ่งจำเป็นเพราะทำให้ Resin ไหลเข้าสู่ทุกซอกทุกมุมได้อย่างรวดเร็ว และยังทำให้เส้นใยแก้วดูดเคลือบผิวได้สะดวก การควบคุม gel time และ cure time ก็จำเป็นต่อความเร็วในการผลิต และเพื่อการลด cycle time ให้ต่ำสุด การไล่พองอากาศจะทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ไม่เกิดปัญหาของรูพรุนภายในผลิตภัณฑ์ระบบ Resin จะเป็นตัวกำหนดให้คุณลักษณะต่างๆ ที่กล่าวมานั้นนั้น ได้อย่างสมบูรณ์พร้อมๆ กับการให้สมบัติ

ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นข้อชักจูงใจในการลงทุนของกระบวนการนี้

ในการเลือกใช้วัสดุเสริมแรง ก็คล้ายคลึงกับการเลือกใช้ระบบ Resin คือ จะขึ้นอยู่กับการใช้งานและราคาของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการผลิต อย่างไรก็ตามยังมีสมบัติอื่นๆ นอกเหนือจากพื้นที่จะต้องพิจารณาด้วย เช่น สมบัติทางกล กระบวนการผลิตและคุณลักษณะของเส้นใย ซึ่งต่างก็มีผลต่อการเสริมแรงทั้งสิ้นตารางที่ 4 แสดงถึงชนิดของวัสดุเสริมแรงประเภทต่างๆ รวมทั้งข้อดีข้อเสียของวัสดุเหล่านั้น เส้นใยที่ใช้มีทั้งไบรอน, อะรามิด, เซรามิกส์, แก้ว และกราไฟต์ โดยสองชนิดหลังจะเป็นที่นิยมมากที่สุด กราไฟต์ให้สมบัติที่ดีและเหมาะสมที่สุดในน้ำหนักที่เท่าเทียมกัน และมักใช้ในอุตสาหกรรมด้านยานอวกาศซึ่งต้องการน้ำหนักเบา และมีสมบัติที่ดี แต่กราไฟต์ก็มีราคาที่แพงกว่าทั้งแก้วและอะรามิด

ตารางที่ 4 : ข้อดีและข้อเสียของเส้นใยเสริมแรงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการ RTM

| Reinforcement form | Advantages/disadvantages |
|-----------------------------------|--|
| Contintous strand mat..... | Good formability, wash resistance, high bulk factor, high part fill-out, uses glass fibers |
| Woven roving/fabric..... | High strength (biaxial), good formability |
| Unidirectional roving/fabric..... | High strength (unidirectional), high stiffness, good formability |
| Chopped-strand mat..... | Low formability, low wash resistance, low cost, high bulk factor, uses glass fibers |
| Preforms..... | Highly complex forms possible, little forms, handling necessary, high initial cost |
| Veils/surfacing mats..... | Good surface quality, wear resistance |

เส้นใยแก้วจะเหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการราคาถูก และสมบัติดี พอเหมาะต่องาน เช่น ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนในรถยนต์ ลินค้ำอุปโภค ไปถึงงานอุตสาหกรรม โบรอน มีสมบัติที่ดีเลิศยิ่งไปกว่ากราฟไฟต์ แต่ราคาก็แพงกว่ามากมาย เหมาะกับงานที่ต้องการความหนาแน่นสูง น้ำหนักมาก เซรามิกส์จะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องรับอุณหภูมิสูงมาก และยังคงมีสมบัติทางกลที่ดี

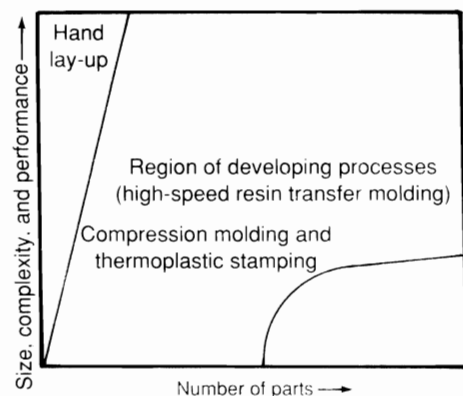
สารเคลือบผิวนับเป็นปัจจัยสำคัญมากอีกตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันมากขึ้นทุกที การพยายามพัฒนาให้ชิ้นงานใช้งานในอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะต้องพยายามทำความเข้าใจถึงผิวสัมผัสระหว่าง Resin และเส้นใยเสริมแรงให้มากขึ้นไปด้วย การเคลือบผิวจะเป็นตัวทำให้เส้นใยเกาะตัวกันดี และยังเป็นตัวกำหนดแรงเกาะกันระหว่างผิวเส้นใยกับ Resin อีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้สารเคลือบผิวให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็มี อีพ็อกซี หรือ อีพ็อกซี-ไซเลน เป็นต้น

6. ข้อดีข้อเสียของกระบวนการ RTM

รูปที่ 1 เป็นกราฟแสดงการพัฒนากระบวนการต่างๆ ในการผลิตชิ้นงานวัสดุเสริมแรง โดยยกตัวอย่างจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ มาเป็นตัวพิจารณา ซึ่งจากรูปดังกล่าวจะเห็นว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ (hand lay-up) ตกอยู่ในพื้นที่มุมซ้ายบน และลักษณะของเส้นกราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันมากอันเป็นการสะท้อนให้เห็นว่าเป็น

กระบวนการที่มีต้นทุนสูง และปริมาณการผลิตต่ำ ในขณะที่พื้นที่ส่วนกลางและด้านมุมขวาล่างจะเป็นบริเวณที่เหมาะสมต่อกระบวนการ RTM ในด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งมีปริมาณการผลิตสูงและมีคุณสมบัติการใช้งานได้ดี ชิ้นงานใหญ่สามารถผลิตได้ตั้งแต่ครึ่งละปานกลางไปถึงครึ่งละมาก ๆ ในขณะที่พื้นที่มุมขวาล่างเป็นบริเวณสำหรับ compression molding ที่เหมาะต่อปริมาณการผลิตที่สูงมาก ในการเปรียบเทียบกระบวนการเหล่านี้ โดยเปรียบเทียบพื้นฐานของกระบวนการ RTM สามารถสรุปทั่วไปในแต่ละประเด็นที่สำคัญๆ ดังได้กล่าวมาแล้วในตารางที่ 5

ประเด็นที่สำคัญ ซึ่งเป็นจุดสนใจกับผู้ลงทุน ก็คือการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในด้านของต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงได้ทำเสนอตารางเปรียบเทียบในส่วน



รูปที่ 1 ภาพแสดงความเหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆ โดยยกตัวอย่างจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆ ที่ใช้เทคนิคการผลิตวัสดุเสริมแรงในพลาสติก
(ข้อมูลจาก Owens-Corning Corp.)

| | RESIN TRANSFER MOLDING | OPEN MOLDING | | COLD PRESS MOLDING | COMPRESSION MOLDING | |
|--------------------------------------|---|-------------------|---|---|---|---|
| | | SPRAY-UP | HAND LAY-UP | | MAT-PREFORM | SHEET MOLDING COMPOUND |
| Mold construction | FRP, spray metal, cast aluminum; gas-ket seal, air vents self-sealing injection port | FRP | | FRP, spray metal, cast aluminum, pinch (land) | Metal, shear edge | High grade steel, shear edge |
| Pressure | Pressure feed pumping equipment req'd; mold halves clamped (methods range from clamp frame to pressure pod) | None | | Low pressure press. capable of 50 psi (hydraulic or pneumatic mechanical); resin dispensing equipment not req'd but recommended | Hydraulic press, normal range of 100-500 psi | Hydraulic, as high as 2,000 psi |
| Cure system | Room temperature | | | | Heated, normal range of 225-325 °F | Heated, normal range of 275-350 °F |
| Resin compounding equipment | High shear type | Not needed | | High shear type | | |
| Reinforcement | Continuous strand mat, preform, woven roving | Continuous roving | Chopped strand mat, woven roving, cloth | Continuous strand mat, preform, woven roving | Continuous strand mat, preform, woven roving | Continuous roving (specific orientations for higher strength) |
| Part trim equipment | Yes | | | | With optimum shear edges, minor trimming only | |
| Generally expected mold life (parts) | 3,000 | 1,000 | | 3,000 | 150,000+ | 150,000+ |

จากรายละเอียดต้นทุนการผลิตในตารางที่ 6 โดยเปรียบเทียบ RTM กับกระบวนการ SCM และ Injection Molding ขณะที่ตารางที่ 7 เปรียบเทียบ RTM กับ Hand Lay-up

ตารางที่ 6 ต้นทุนการผลิตของกระบวนการ RTM แยกออกเป็นรายละเอียดในแต่ละส่วน เปรียบเทียบกับเทคนิคการขึ้นรูปแบบ SMC และ Injection Molding

| | Resin transfer molding | Sheet molding compounds | Injection molding |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Process operation | | | |
| Production volume..... | 5000-10 000 / Press | 25 000/ Press | 30 000/ Press |
| Fixed assets..... | Moderate | High | High |
| Labor..... | High | Moderate | Moderate |
| Skill dependency..... | Considerable | Very low | Lowest |
| Operation..... | Movements, intersections | Flowing, neat | Flowing, neat |
| Inspection/control | | | |
| Raw materials..... | Yes | Compounds for degradation | Compounds for degradation |
| Products..... | Visual with attention | Visual, easy | Visual, easy |
| Finishing..... | Trim flash and so on | Very little | Very little |
| Product | | | |
| Complexity..... | Preform limit | Yes | Best |
| Size..... | Big parts for low investment | Big parts if flat | Not very big parts |
| Tolerance..... | Good | Very good | Very good |
| Surface appearance..... | Gel-coated | Very good | Very good |
| Voids/wrinkles..... | Occasional | Extremely rare | Least |
| Reproducibility..... | Skill dependent | Yes | Yes |
| Cores/inserts..... | Possible | Not easy | Possible |
| Strength..... | Moderate | Best | Very good |
| Material usage | | | |
| Raw-material cost..... | Lowest | Highest | High |
| Handling/applying..... | Skill dependent | Easy | Automatic feed |
| Inventory..... | Raw materials | Dependent on number of types | Dependent on number of types |
| Precision..... | Skill dependent | Very good | Automatic feed |
| Waste..... | <3% | Very low | Attention runner |
| Scrap..... | Skill dependent | Cuts reusable | Low |
| Reinforcement flexibility..... | Yes | No | No |
| Mold | | | |
| Initial cost..... | Moderate | Very high | Very high |
| Cycle life..... | 3000-4000 parts | Years | Years |
| Handling..... | With care | Metal | Metal |
| Preparation..... | In-factory | Special shop | Special shop |
| Maintenance..... | In-factory | Special machine shop/equipment | Special machine shop/equipment |

ตารางที่ 7 ต้นทุนการผลิตของกระบวนการ RTM เปรียบเทียบกับ Hand Lay-up โดยแยกรายละเอียดในรายการต่างๆ

| | Resin transfer molding | Hand lay-up |
|------------------------------------|------------------------|---------------|
| Product weight, kg (lb.)..... | 30 (65) | 33 (75) |
| Production rate, pieces/month..... | 1000 | 1000 |
| Direct laborers | 14 | 30 |
| Materials cost | | |
| Resin | 28.4% | 27.4% |
| Glass fibers | 27.7% (a) | 26.4% |
| Others | 0.3% | 2.7% |
| Subtotal | 56.4% | 56.5% |
| Depreciation cost | | |
| Mold | 9.0% (b) | 3.0% (c) |
| Equipment | 1.3% | 0.7% |
| Subtotal | 10.8% | 3.7% |
| Scrap | 1.6% | 0.0% |
| Manufacturing cost | 14.4% | 39.6% |
| Fuel cost | 0.0% | 0.2% |
| Subtotal | 16.0% | 39.8% |
| Total | 83.2% | 100.0% |

(a) Including the cost of auxiliary materials fuel, manufacturing, depreciation of preformer and preforming screen. (b) life of the mold is assumed to be 2000 pieces. (c) life of the mold is assumed to be 200 pieces.

ตารางที่ 7 จะเห็นชัดว่าข้อดีของ RTM ที่มีเหนือ Hand Lay-up นั้น คือในส่วนของค่าแรงและการขึ้นรูปชิ้นงาน แต่จะมีข้อเสีย คือ ค่าเสื่อมราคาทั้งของแม่แบบและเครื่องจักร ในกรณีที่จะดูเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในตารางที่ 6 ข้อดีของ RTM ที่มีเหนือกว่ากระบวนการอื่นๆ ในด้านของชนิดของชิ้นงานที่จะผลิต และต้นทุนของอุปกรณ์แม่แบบ

การพิจารณาเลือกใช้กระบวนการ RTM ว่าจะเหมาะสมแล้วหรือยัง หรือยังมีกระบวนการอื่นที่ควรพิจารณาด้วย

หรือไม่นั้น หลักการอย่างง่าย ๆ ก็คงไม่พ้นการมองไปที่ตัวชิ้นงานที่ต้องการผลิต สมบัติในการใช้งาน ตลอดจนจนถึงจำนวนชิ้นงานในการผลิตและประเด็นอื่นๆ อีก ตามที่ได้รวบรวมเอาไว้ในบทความนี้ ดังนั้นสุดท้ายแล้วกระบวนการผลิตชนิด RTM จะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดแล้วหรือไม่ และตัวแปรตัวใดที่จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเพียงไหน คงต้องเป็นการพิจารณาตัดสินใจของผู้ลงทุน โดยอาศัยข้อมูลทางเทคนิคเข้าประกอบการตัดสินใจด้วย

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณวรรณิ ฉินศิริกุล จาก Penn State University Pennsylvania, U.S.A. ที่ได้ช่วยส่งข้อมูลมาให้

เอกสารอ้างอิงและเอกสารอ่านประกอบ

1. Chan, A.W. and R.J. Morgan, Modelling Preform Impregnation and Void Formation in Resin Transfer Molding of Unidirectional Composites, SAMPE QUARTERLY, 48-52, April 1992.
2. Composite Materials Handbook, P. 4. 114-4.115.
3. Engineered Materials Handbook, Volume I, COMPOSITES, ASM International, Metals Park, OHIO.
4. Modern Plastics Encyclopedia 1988, P. 262,266,268,270
5. Perry, M.J., J. Xu, Y. Ma, L.J. Lee, and K.J. Liou; Analysis of Thermal Characteristics of Alternative Mold Materials for Resin Transfer Molding, SAMPE QUARTERLY, 20-34, July 1992.
6. Plastics Processing Data Handbook, P. 260-277.