

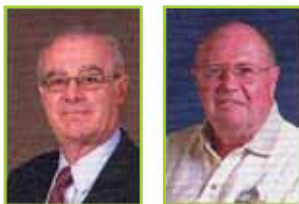


เป็นไปได้ม๊ึช... ที่จะทำให้ดีกว่า?

คุณลักษณะของพลังงานลม

In this paper, we will discuss the development of this new polyurethane class of resins and its implication in the manufacture of large wind turbine blades, and compare its performance in composite systems to systems made from epoxy and vinyl ester.

By



Usama E. Younes, Principal Scientist
Bayer MaterialScience LLC
Frank W. Bradish, Director, advanced material technology,
Molded Fiber Glass Research Company

Resin Prepreg Trend Design Offshore

JEC Composites Magazine
No.70 Jan-Feb 2012

แปลและเรียบเรียงโดย :
คุณกิตติ อนุชาพั๊ด
คุณจตุติ เพ็ชรล้ำเลิศ



การนำโพลียูรีเทนคอมโพสิตมาใช้ทำใบกังหันลมเพื่อบั่นกระแสไฟฟ้า

เนื้อหาในบทความนี้ ผู้เขียนเน้นไปที่ความเป็นไปได้ในการพัฒนาชนิดของโพลียูรีเทนเรซิน และการนำมาใช้งานในการผลิตใบของกังหันลมขนาดใหญ่เพื่อบั่นกระแสไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับสมรรถนะของใบพัดที่ใช้เรซินชนิดอื่น เช่น อีพ็อกซีและไวนิลเอสเตอร์ อุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยพลังลมได้ก้าวหน้าและแพร่หลายไปมาก มีการพัฒนาเพื่อให้ผลิตพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นโดยใช้พื้นที่การผลิตคงเดิม จึงกลายเป็นความจำเป็นที่จะต้องทำให้ขนาดของใบกังหันลมยาวขึ้นและกว้างขึ้น การที่จะทำเช่นนั้นได้จะต้องอาศัยความรู้และวิวัฒนาการด้านเทคโนโลยีคอมโพสิตที่ก้าวหน้าขึ้นไปอีก เพื่อให้ได้มาซึ่งกังหันลมที่แข็งแรงและทนทานต่อสภาพการใช้งานจริง

บริษัท Bayer Material Science ได้พัฒนาวัสดุที่ใช้ผลิตใบกังหันลมที่ใช้หมุนเครื่องปั่นไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์ขึ้นไป วัสดุดังกล่าวคือ **คอมโพสิต** ซึ่งมีความแข็งแรงและทนทานพอที่จะนำมาใช้รับแรงลมที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องปั่นกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ดังกล่าวได้ พวกเขาใช้โพลียูรีเทนเรซินชนิดใหม่ที่มีความหนืดต่ำและแห้งตัวช้า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อีพ็อกซีและไวนิลเอสเตอร์แล้ว มีจุดที่ได้เปรียบอยู่หลายประการ เช่น ไม่มีโอโรเซเทยทางเคมี วัสดุที่ใช้มาจากธรรมชาติจำพวก ถั่วเหลือง ซึ่งสามารถทดแทนได้เมื่อถูกใช้ไป สามารถผลิตขึ้นรูปได้รวดเร็วโดยใช้ระบบฉีดแบบอินฟิวชัน มีความทนทานต่อการล้าของวัสดุดีเยี่ยม มีความคงทนสูงต่อการแตกร้าวภายในของเส้นใยเสริมแรง (มักเป็นเส้นใยแก้ว-ผู้แปล) และลดการขยายตัวของ การแตกร้าวภายใต้ความล้าของวัสดุ

จากการทดสอบการทนความล้าของวัสดุ วัสดุที่ทำจากโพลียูรีเทนจะให้ค่าที่สูงกว่าไวนิลเอสเตอร์ และ อีพ็อกซีประมาณ 9 ถึง 14.8 เท่า โดยทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่ 69 MPa วัสดุอีพ็อกซีจะแตกที่การกระทำ 93,216 ครั้ง และวัสดุไวนิลเอสเตอร์จะแตกที่การกระทำ 57,507 ครั้ง ในขณะที่

ที่วัสดุโพลียูรีเทนสามารถทนได้ถึง 849,881 ครั้ง การทดลองถัดมาเป็นการทดสอบความคงทนต่อการแตกร้าวภายในของเส้นใยเสริมแรงหรือ G1C โดยโพลียูรีเทนคอมโพสิตสามารถทนต่อการแตกร้าวภายในโดยมีค่า G1C ที่ 3,798 J/m² (จูล/ตรม.) สูงกว่าอีพ็อกซี 2 เท่า และสูงกว่าไวนิลเอสเตอร์ประมาณ 3 เท่า และเช่นเดียวกันในการทดสอบการขยายตัวของ การแตกร้าวภายใต้ความล้าของวัสดุโพลียูรีเทน ก็ยังทำได้ดีกว่าอีพ็อกซีและไวนิลเอสเตอร์ ไม่ว่าจะใช้แรงกดต้นแบบใดก็ตาม

การนำเอาเทคโนโลยี และวิธีการผลิตที่ล้ำยุคมาใช้

ขณะที่มีความจำเป็นที่จะต้องทำให้ใบกังหันลมมีขนาดยาวขึ้นเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าให้สูงขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่จะนำไปใช้เป็นโครงสร้างให้แข็งแรงขึ้นตามไปด้วย ทุกวันนี้ใบของกังหันลมที่ใช้งานกันอยู่จะต้องทนต่อแรงกดเทียบเท่ากับแรงกดที่ปีกเครื่องบินโดยสารขณะกำลังบินอยู่ถึง 48 เท่า และคาดหวังที่จะใช้งานได้ยาวกว่าอายุการใช้งานของปีกเครื่องบินเป็นแปดเท่าอีกด้วย ดังนั้นความก้าวหน้าในการหาวัสดุคอมโพสิตที่จะนำมาใช้ทำใบกังหันลมดังกล่าวจึงจำเป็นจะต้องพัฒนาทั้งวัสดุคอมโพสิตและเทคโนโลยีในการขึ้นรูปไปพร้อมๆ กัน ซึ่งเป็นสองในห้าองค์ประกอบหลักที่ผู้ผลิตต้องคำนึงถึง การพัฒนาให้ชิ้นส่วนคอมโพสิตมีความเบาและแข็งแรงตามที่คาดหวังจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นถึง 35 % แต่ในขณะเดียวกันก็มีปัญหาตามมาเกี่ยวกับความวิตกเรื่องมลภาวะของคาร์บอนในบรรยากาศ จากการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่จะต้องพิจารณาไปพร้อมกัน กลายเป็นความจำเป็นที่จะต้องให้การผลิตวัสดุคอมโพสิตไม่มีการปล่อยโอโรเซเทยที่เป็นพิษในบรรยากาศเลยหรือให้ลดลงได้มากที่สุด จากโจทย์ด้านสิ่งแวดล้อมนี้โพลียูรีเทนให้ความเป็นไปได้สูงสุด จึงถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุหลัก เทคโนโลยีที่ใช้ส่วนประกอบทางธรรมชาติที่พัฒนาไปได้พอสมควรของยูรีเทนคอมโพสิตยิ่งจะช่วยลดมลภาวะให้น้อยลงไปอีก ยังมีความจำเป็นอีกด้วยว่า

ใบพัดเหล่านี้สามารถถูกตรวจสอบได้ทุกเวลา ตลอดอายุการใช้งาน ท่อคาร์บอนนาโน ที่เป็นสารกึ่งตัวนำสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบในคอมโพสิตเพื่อทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์ส่งข้อมูลด้านประสิทธิภาพการทำงานของใบพัดภายใต้สิ่งแวดล้อมต่างๆ การทดสอบขั้นต้นเรื่องคุณสมบัติที่ได้จากการใช้ท่อคาร์บอนนาโนผสมในเรซินได้รวบรวมอยู่ในรายงานนี้ด้วยแล้ว

การเตรียมวัสดุ

แผ่นรีดเรียบบางขึ้นรูปโดยระบบอินฟิวชันโดยจะทำขึ้นจากวัสดุทั้งสามชนิด คือ อีพ็อกซี ไวนิลเอสเตอร์เรซินและโพลียูรีเทนเรซินเพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ

แผ่นเส้นใยเสริมแรงของแต่ละแผ่นทดสอบใช้ใยแก้วชนิด E-glass ที่ทอแบบ+- 45 องศา ขนาด 610 x 610 มิลลิเมตร ของ Vectorply E-BX-2400-5 น้ำหนัก 810 กรัม/ตรม. เรซินแต่ละชนิดใช้ส่วนผสมตามที่ผู้ผลิตกำหนดโดยใช้อีพ็อกซีเรซิน Hexion Epicote 135 i 100 ส่วน ต่อตัวทำปฏิกิริยา Hexion Epi Kure 1366 30 ส่วน ไวนิลเอสเตอร์เรซิน Reichhold Dion 9102-75 100 ส่วน ต่อตัวทำปฏิกิริยา Syrgis Norox CHP 1.5 ส่วน และโพลียูรีเทน เรซิน Bayer 840871 polyol 100 ส่วน ต่อ Bayer 840857 isocyanate 90 ส่วน ส่วนผสมเรซินที่ใช้ทดสอบทั้งหมดจะถูกดูดเอาฟองอากาศออก ก่อนเข้ากระบวนการเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 23°C ภายใต้แรงดูดสุญญากาศขนาด 70 มิลลิบาร์ หลังจากเรซินซึมผ่านเส้นใยเรียบร้อยแล้วทั้งเข้าและออกถูกปิด ก็จะนำชิ้นงานทดสอบที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชม. จากนั้นจะถูกทำให้เย็นลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนจะนำไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชม. ภายหลังจากปล่อยให้ชิ้นงานทดสอบเย็นลงภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. แล้ว ชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดเป็นแถบยาวเพื่อทดสอบตามมาตรฐาน ISO 527-4 เพื่อทำการทดสอบหาค่าแรงดึงและ โมดูลัสที่อุณหภูมิ 23°C และหาค่าทดสอบ Poisson's

ratio ก่อนหาค่าแรงดึงและโมดูลัสอีกครั้งที่อุณหภูมิ -50°C

การทดสอบการไหลของเรซินตามความยาวของชิ้นงานทดสอบขณะทำการขึ้นรูปด้วยระบบอินฟิวชัน



Fig. 1: 610 x 610 mm thin, flat plaque infusion set-up

ทำการทดสอบโดยขึ้นรูปแผ่นลามิเนทแนวยาวด้วยระบบอินฟิวชันจำนวน 2 ชุด ชุดหนึ่งเรียบบาง และอีกชุดหนึ่งที่มีความหนามากกว่า เพื่อทำการเปรียบเทียบการไหลของเรซินแต่ละชนิด โดยทำการทดสอบบนโต๊ะเหล็กควบคุมอุณหภูมิที่เรียบยาวพอสำหรับการทำอินฟิวชันพร้อมๆกัน 3 ชุด ตามรูป

ชิ้นงานทดสอบแบบบางจะขึ้นรูปด้วยใยแก้ว Vectorply E-BX-2400-5 ขนาด 810 กรัม/ตรม. เส้นใยทอสองทางแบบ +- 45 โดยตัดให้เป็นแถบขนาด 330 x 2,440 มิลลิเมตร ทับกัน 4 ชั้น สำหรับทดสอบเรซินแต่ละชนิด ส่วนชิ้นงานทดสอบแบบหนาจะขึ้นรูปด้วยใยแก้วชนิดเดียวกันขนาดเดียวกันจำนวน 12 ชั้น และ อีก 4 ชั้น ของใยแก้วชนิดทอทางเดียว Vectorply E-TX-2900 ขนาด 1,000 กรัม/ตรม โดยการวางทับให้มีความสมดุลกันแบบ BX/TX/BX และวางให้เส้นใยของ TX เป็นแนวตั้งฉาก (โดยปกติจะเป็นแนวขนาน-ผู้แปล) กับแนวการไหลของเรซิน ใยแก้วเหล่านี้จะถูกปิดผิวหน้าด้วย Airtech flow media ขนาด 330 x 2,440 มิลลิเมตร และแต่ละชุดจะถูกปิดด้วยถุง nylon สองชั้นหนา 0.08

มิลลิเมตร ภายใต้ความดันที่ลบ 70 มิลลิบาร์ ที่ได้จากปั๊มสุญญากาศกลางที่มีท่อดูดอากาศหลายทางต่อเข้ากับแต่ละชุดทดสอบ เพื่อให้แต่ละชุดทดสอบมีแรงดูดสุญญากาศเท่าๆกัน หลังจากการผสมเรซินแต่ละชนิดตามที่ได้ผลิตเรซินแต่ละชนิดกำหนดแล้วจึงเริ่มกระบวนการอินฟิวชัน โดยเปิดให้เรซินไหลเข้าไปในแม่แบบที่เตรียมไว้พร้อมๆกันทุกชนิด ระยะเวลาในการทำอินฟิวชัน และระยะทางในการไหลของเรซิน รวมถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จะถูกบันทึกเอาไว้เป็นช่วงๆ จนครบถ้วน จากนั้นชิ้นงานทดสอบที่แข็งตัวแล้วจะถูกตัดเป็นส่วนๆ ที่ระยะ 457 มิลลิเมตร 1,067 มิลลิเมตร และ 1,981 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เพื่อตรวจหาจำนวนรูอากาศ (void content analysis) ตามมาตรฐานตรวจสอบ ASTM-D-2737

การทดสอบเพื่อวัดขนาดที่ใช้งานของชิ้นส่วนผลิตจากระบบอินฟิวชัน

ต่อเนื่องด้วยการทดสอบคุณสมบัติของโพลียูรีเทนเรซิน เปรียบเทียบกับอีพ็อกซีเรซินที่ขึ้น

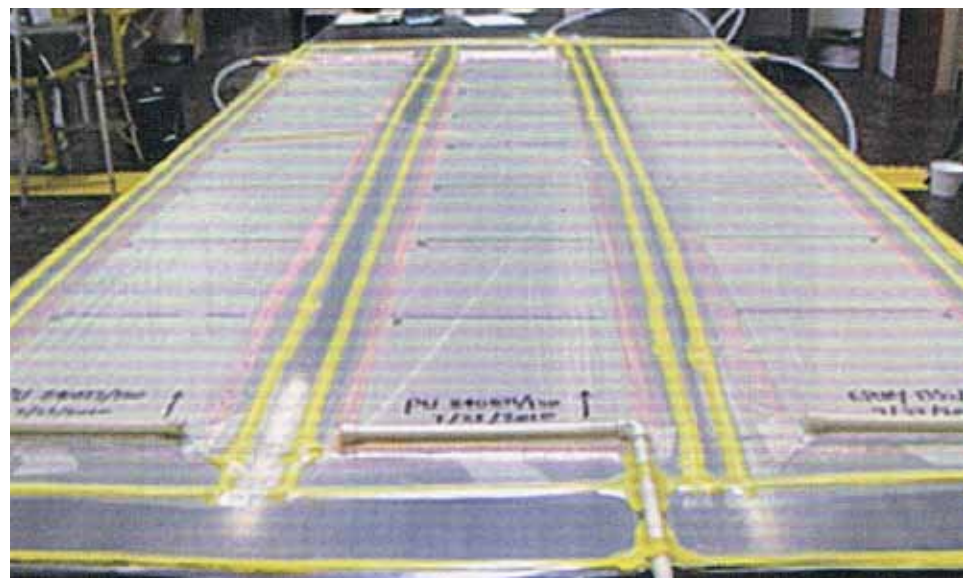


Fig. 2: 330 x 2,440 mm Long-flow, thin and thick Laminate infusion set-up

รูปด้วยวิธีแบบเก่าในการผลิตฐานใบพัด เพื่อการนี้กระบวนการอินฟิวชันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะนำมาใช้ขึ้นรูปฐานใบพัดดังกล่าวด้วย โดยใช้วัสดุที่เกี่ยวข้องดังนี้

- Hexion Epi Cote 135 i / Hexion Epi Kure 1366 เป็นส่วนผสมของระบบอีพ็อกซีเรซิน
- Reichhold Dion 9102-75 Syrgis Norox CHP เป็นส่วนผสมของระบบไวนิลเอสเตอริ์เรซิน
- Bayer 840871/840859 เป็นส่วนผสมของระบบโพลียูรีเทนเรซิน

เรซินแต่ละชนิดจะถูกดูดเข้าไปในแม่แบบฐานใบพัด โดยใช้ใยเสริมแรง 21 ชั้น ประกอบไปด้วย Vectorply E-BX-2400-5 จำนวน 14 ชั้น และ Vectorply E-T-2900 อีก 7 ชั้น (ตามที่ได้กล่าวเอาไว้ก่อนหน้านี้) วางสลับกันเป็นชั้นๆ ในรูปแบบ BX/LT/BX สำหรับการทำอินฟิวชันของเรซินชนิดต่างๆ นั้น แผ่นใยเสริมแรงที่วางซ้อนเป็นชั้นๆ จะถูกอัดแน่นในถุงสองชั้น (double bagged) ภายใต้ความดันลบ 70 มิลลิบาร์ ที่ 23°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนเริ่มกระบวนการขณะที่เรซินแต่ละชนิดจะถูกผสมและดูดเข้าฟองอากาศออกด้วยแรงดันลบ 70 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนเริ่มกระบวนการ ในกรณีของระบบโพลียูรีเทน การผสมจะกระทำโดยเครื่อง Langeman เพื่อลดผลกระทบของความร้อนในการทำปฏิกิริยาทางเคมีของโพลี

ยูรีเทนในระหว่างกระบวนการอินฟิวชันการติดตั้งเครื่องมือของกระบวนการอินฟิวชันนั้นให้มีทางเข้าของเรซิน 2 ทางเพื่อให้เรซินไหลผ่านท่อเกลียว ที่วางไปตามด้านบนของแม่แบบและต่อเนื่องไปบางส่วนตามด้านข้างของขอบปีกแม่แบบ ส่วนทางเรซินออกจะเป็นทางเดียวที่วางตำแหน่งเอาไว้ที่ตรงกลางของส่วนล่าง ในทุกกรณีกระบวนการอินฟิวชันจะทำที่อุณหภูมิ 22°C - 24°C เมื่อเรซินไหลจนเต็มแม่แบบแล้วท่อเรซินเข้าและออกจะถูกปิดและแม่แบบจะถูกอบด้วยความร้อนในอัตราเพิ่มขึ้น 2°C ต่อนาที จนอุณหภูมิสูงถึง 60°C โดยทิ้งไว้นาน 12 ชม. ก่อนที่จะปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการรื้อถุงสุญญากาศออกและถอดแม่แบบออก

ฐานใบพัดที่แกะออกจากแม่แบบจะมาวางแยกไว้ด้านข้าง โดยไม่มีอะไรกดทับเป็นเวลา 24 ชม. ในอุณหภูมิปกติ ก่อนที่จะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติต่อไป

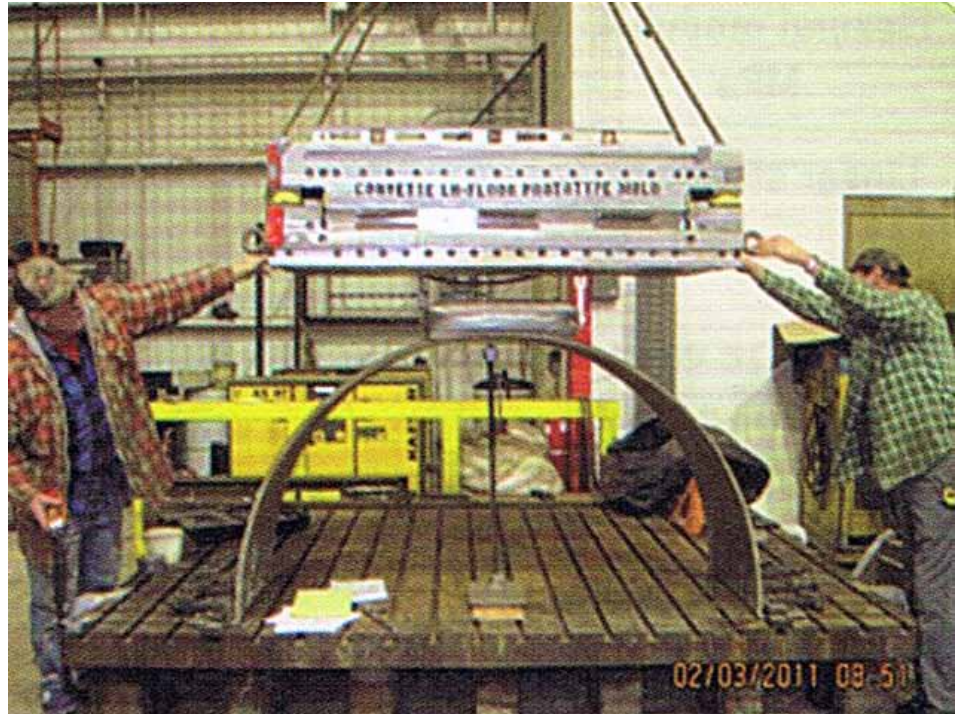


Fig. 4: Static load/deflection testing of root ring insert mouldings, 1,180 kg. applied in 45.5 kg increments



Fig. 3: Epoxy, vinyl ester and polyurethane root ring mouldings

เริ่มด้วยการทดสอบความคงที่ของขนาดชิ้นงานเมื่อเทียบกับขนาดแม่แบบ โดยให้มีแรงกดทับลงบนชิ้นงานเพื่อหาค่าความแข็งแรงด้วย

น้ำหนักถ่วงที่ 1180 กิโลกรัม การถ่วงจะค่อยๆกระทำโดยเพิ่มน้ำหนักถ่วงขึ้นเป็นขั้นๆ ชิ้นละ 45 กิโลกรัม แล้ววัดความงอของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดดิจิตอลที่ติดอยู่ด้านใต้ของชิ้นงานดังที่แสดงตามภาพ

คุณสมบัติของเรซินเปล่า

แผ่นเรซินไม่เสริมแรงถูกทำขึ้นมาจากการหล่อขึ้นรูป โดยใช้วิธีอินฟิวชันด้วยแม่แบบเปิด ขั้นตอนทดสอบที่ทำขึ้นมาทั้งหมดจะถูกอบให้แข็งตัวที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นจะถูกอบหลังแข็งตัวด้วยอุณหภูมิเท่าเดิมอีก 6 ชม. การทดสอบค่าการหดตัวจะใช้แผ่นทดสอบที่ถูกหล่อขึ้นรูปในแม่แบบเปิดด้านบนให้ได้ขนาด 15.2×22.9 เซนติเมตร ที่ความหนาเฉลี่ย 1.27 เซนติเมตร การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงบิดจะใช้ขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 และการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงจะใช้ขั้นตอนตามมาตรฐาน ASTM D 638 ค่าการหดตัวจะวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบดิจิตอล ผลการทดสอบต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



Table 1: Neat resin properties

	Epoxy	Vinyl ester	Soy-based polyurethane	Polyurethane
Tensile strength, MPa	71	43.4	61.4	72.4
Tensile modulus, MPa	2,434	3,006	2,406	2,703
% elongation	5.0	1.8	3.4	5.3
Hardness, Shore D	86	86	82	83
Flexural strength, MPa	115.8	82.1	98.6	108.3
Flexural modulus, MPa	3,068	3,765	2,689	2,985
Linear shrinkage	3.0	3.4	1.3	1.3

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าไวนิลเอสเตออร์เรซินเปลาามีค่าโมดูลัสสูงกว่า ทั้งโมดูลัสแรงบิดและโมดูลัสแรงดึง ค่าของการยึดตัวของมันที่ต่ำกว่าเรซินชนิดอื่นจะทำให้มีค่าความทนต่อแรงกระแทกน้อยกว่าอีพ็อกซีเรซิน ความได้เปรียบเหล่านี้ของไวนิลเอสเตออร์จะหายไปเมื่อมีการเสริมแรงด้วยใยแก้วซึ่งจะกล่าวในภายหลัง

สิ่งหนึ่งที่โพลียูรีเทนแสดงให้เห็นข้อได้เปรียบกว่าทั้งต่ออีพ็อกซีและไวนิลเอส

การทนต่อความล้า

การทดสอบการทนความล้า ของเรซินทั้ง 3 ชนิด คือ อีพ็อกซี ไวนิลเอสเตออร์ และโพลียูรีเทน ได้ถูกทดสอบตามวิธีการที่ได้กล่าวมาในขั้นตอนการทดสอบที่ผ่านมาแล้ว รูปภาพของชิ้นส่วนก่อนและหลังการทดสอบแสดงให้เห็นความเสียหายที่เกิดจากความล้าดังแสดงในรูป

Table 2: Fatigue test data

Test sample	Peak stress (MPa)	Number of cycles
Vinyl ester	82.7	25,999
	68.9	93,216
	62.1	1,000,000
	55.1	1,000,000
Epoxy	82.7	4,164
	68.9	57,507
	62.1	175,415
	55.1	1,000,000
Polyurethane	89.6	22,372
	82.7	44,594
	75.8	387,418
	68.9	849,881

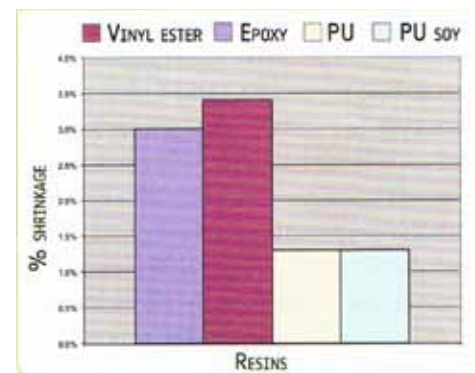


Fig 6: Linear shrinkage of neat resins

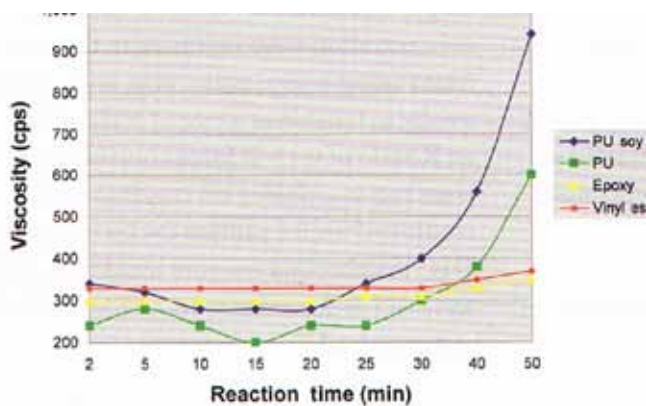


Fig 5: Viscosity rise over time of the neat resins

เตออร์ คือเรื่องค่าการหดตัวที่ต่ำ ทำให้โพลียูรีเทนเหมาะกับการนำมาใช้ในงานที่ต้องการแรงการแข็งตัวของเรซินด้วยความร้อนโดยไม่ทำให้ชิ้นงานแตกร้าว

โพลียูรีเทนคอมโพสิตจะคงทนต่อแรงกระทำได้ดีกว่าทั้งอีพ็อกซีและไวนิลเอสเตออร์คอมโพสิต ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากจำนวนครั้งของการกระทำ

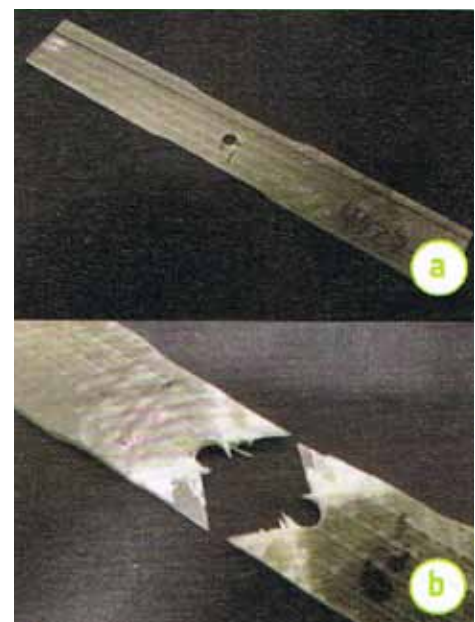


Fig 7: Test specimen prior to testing (a), Test specimen after fatigue (b)

ไปตามแรงยึดเหนี่ยวของเรซินกับใยแก้ว ในภาพที่ 10 เป็นภาพของโพลียูรีเทนเทียบกับอีพ็อกซี่ ที่ จะเห็นความแตกต่างของการยึดเหนี่ยวที่ ดีกว่าของโพลียูรีเทน ทั้งนี้ใยแก้วที่ใช้ทดสอบนั้นเป็นสูตรที่สารเคลือบใยแก้วที่ใช้ได้กับทั้งโพลียูรีเทนและอีพ็อกซี่

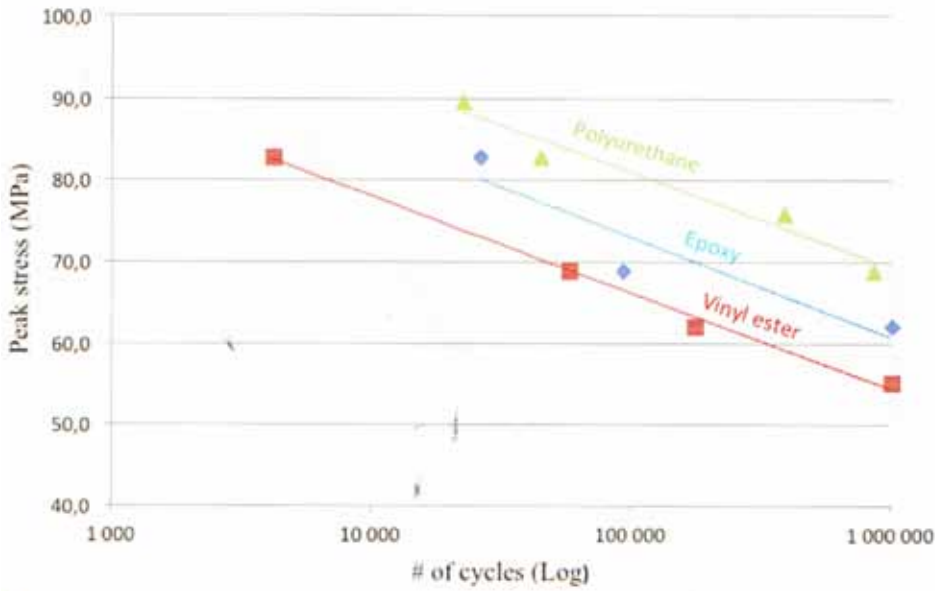


Fig. 8: Fatigue endurance curves

Table 3: G1C interlaminar fracture toughness results

ASTM D5528	Epoxy	Vinyl ester	Polyurethane
Stable delamination G1C (J/m ²)	1,918	1,377	3,788
Standard deviation	507	212	728

ความคงทนต่อการแตกร้าวภายใน

ผลของการทดสอบ G1C แสดงให้เห็นถึงความเหนียวของโพลียูรีเทนในการวัดค่าของการแตกร้าวภายใน รูป (Fig 9) แสดงให้เห็นการทดสอบชิ้นงานระหว่างทำการทดสอบ และค่าทดสอบในตารางที่ 3

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แสดงถึงความแตกต่างในการทนต่อแรงกระทำแบบไดนามิกมาของเรซินคอมโพสิททั้งสามชนิดนั้น มีผลต่อการยึดเกาะระหว่างเรซินและเส้นใยแก้วเสริมแรง จากภาพของกล้องเราจะพบการแตกหักที่ผิวหน้าต่างๆ กัน



Electron microscope

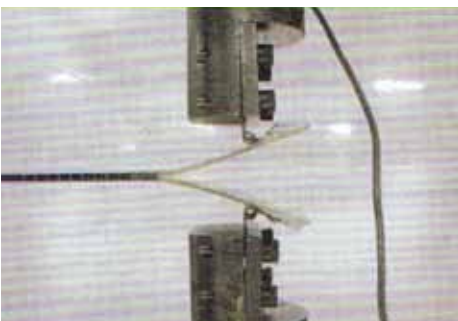


Fig. 9: G1C testing



Fig. 10: SEM of fractured surface of epoxy/glass fibre composite

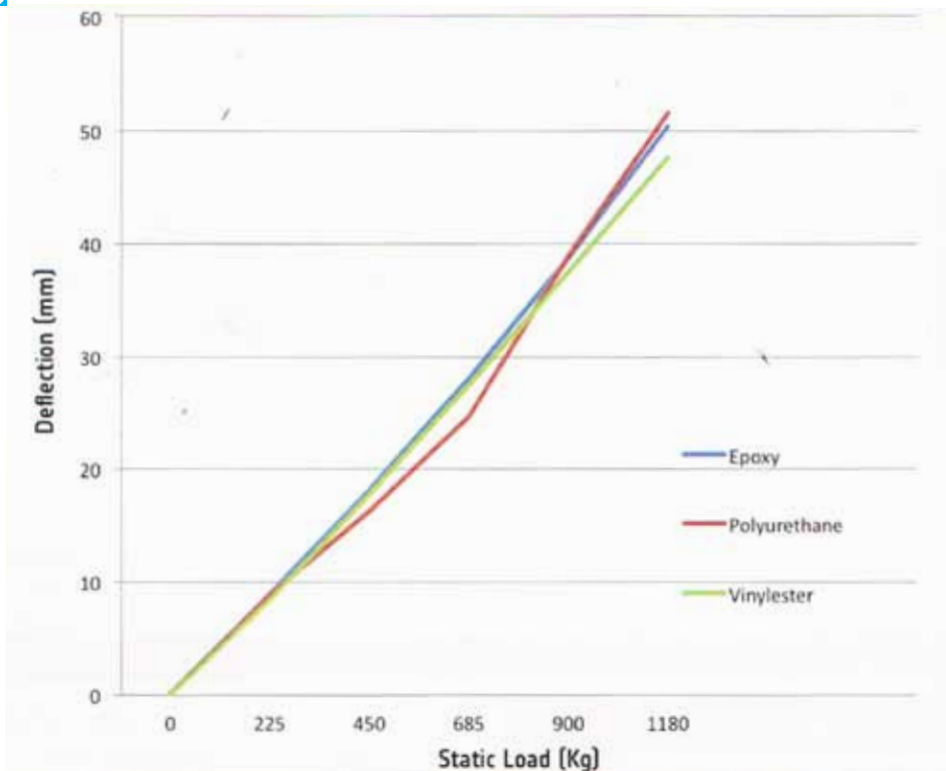


Fig. 8: Fatigue endurance curves

การให้ตัวของฐานใบพัดอากาศยานเมื่อทดสอบแรงกดแบบคงที่

การทดสอบการให้ตัวของฐานของใบพัดกระทำโดยวิธีการที่ไดกล่าวเอาไว้แล้วก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบปรากฏดังภาพที่ 11 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนี้ไม่แสดงถึงความแตกต่างที่เด่นชัดในการให้ตัวของเรซินทั้ง 3 ชนิด และไม่พบว่ามีเสียงใดๆเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบของเรซินระบบใดๆ เมื่อเอาน้ำหนักกดสูงสุดที่ 1,180 กิโลกรัม ออกชั้นทดสอบก็จะกลับคืนสู่สภาพเดิม หลังจากถูกกดอยู่นาน 20 นาที ที่อุณหภูมิ 22°C จากการทดสอบทั้งหมดจึงสรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างในด้านความทนต่อแรงกดแบบคงที่และไม่มีการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบในทุกขั้นตอนของการทดสอบ แม้เป็นการทดสอบที่ออกแบบมาให้บอกความแตกต่างของชิ้นทดสอบที่ทำขึ้นด้วยอีพ็อกซี ไวนิลเอสเทอร์ หรือโพลียูรีเทนได้ จึงถือได้ว่าเรซินทั้ง 3 ชนิดมีความคงทนต่อแรงกดแบบคงที่เท่าๆกัน

ข้อมูลเพิ่มเติม:
www.materialscience.bayer.com

อัตราการไหลของเรซิน

ผลจากการศึกษาอัตราการไหลของเรซินในกระบวนการอินฟิวชัน ตามที่ได้อธิบายเอาไว้ในส่วนของ การทดสอบก่อนหน้าได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4 สำหรับการทดสอบชิ้นงานคอมโพสิตแบบหนา และในตาราง 5 สำหรับการทดสอบชิ้นงานคอมโพสิตแบบบาง

เมื่อพิจารณาถึงข้อแตกต่างในผลที่แสดงจากทั้งสองตาราง ทำให้เห็นได้ว่าโพลียูรีเทนเรซินใช้เวลาในการไหลซึมเข้าไปทั่วแม่แบบภายในระยะเวลาที่

สั้นที่สุด ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าโพลียูรีเทนเรซิน เหมาะกับการใช้ในกระบวนการอินฟิวชันเพื่อผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และหนาอย่างใบกังหันลมได้เป็นอย่างดี

บทสรุป

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยใยแก้วที่ทำจากโพลียูรีเทนได้ถูกนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่นเดียวกับการทำใบกังหันลม ได้แก่ อุปกรณ์ทางเกษตรกรรม อุปกรณ์ในการก่อสร้างขนาดหนัก และเรือชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามระบบโพลียูรีเทนนี้เป็นที่รู้กันว่าถูกออกแบบเพื่อกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว เรซินจะเริ่มแข็งตัวเร็ว และถอดออกจากแม่แบบได้เร็ว ในบทความนี้เราได้แสดงให้เห็นว่าระบบโพลียูรีเทน สามารถปรับให้เข้ากับกระบวนการผลิตใบกังหันลมในปัจจุบัน และรับให้เข้ากับดีไซน์ที่ร่วมสมัยได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำ ระบบโพลียูรีเทนยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทนทานต่อความล้าและการแตกหักที่ดีขึ้น รวมถึงถึงความรวดเร็วในการถอดแม่แบบเมื่อเปรียบเทียบกับเรซินชนิดอื่นที่ใช้ผลิตใบกังหันลมอยู่ทั่วไป

Table 3: G1C interlaminar fracture toughness results

Infusion flow distance, cm	Epoxy infusion time, minutes	Polyurethane infusion time, minutes	Soy-containing polyurethane infusion
30.48	1	0.5	1
60.96	4	1	2
91.44	8	4	5
121.92	18	8	12
152.4	26	16	24

Table 3: G1C interlaminar fracture toughness results

Flow, mm	Epoxy - time, min.	Vinyl ester - time, min	Polyurethane - time, min.
609	1	2	2
1,219	4	4	4
1,524	8	-	7
1,826	18	17	12
2,133	26	27	20
2,438	33	43	28