บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเรซิน 5 สูตรที่ได้จากการอบด้วยเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

ในเบื้องต้นทำการทดลองอบอีพ๊อกซีคอมโพสิททั้งหมด 5 สูตรได้แก่สูตร I, II, IV, VI และ VIII ส่วนผสมของแต่ละสูตรแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 เพื่อเลือกสูตรที่คาดว่ามีแนวโน้มที่เหมาะสมสำหรับทำการวิจัยและพัฒนาสมบัติเชิงกลเพิ่มเติม สมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้แก่ สมบัติการต้านแรงดึง สมบัติการดัดโค้งและสมบัติการต้านทานแรงกระแทกโดยทุกสูตรที่ศึกษาจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ของน้ำหนักอีพ๊อกซีทั้งที่เสริมแรงและไม่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว โดยเส้นใยแก้วที่ใช้เป็นชนิดเส้นใยสานแบบสุ่ม โดยเป้าหมายของการเลือกต้องการเลือกสูตรที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟแล้วให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน

4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง

การทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงเป็นการวัดความสามารถของวัสดุที่ทนต่อแรงที่ดึงวัสดุและระยะที่วัสดุนั้นยืดออกได้ก่อนขาด การทนต่อแรงดึง รวมทั้งมอดุลัสที่เกิดจากแรงดึงเป็นสิ่งสำคัญที่ชี้ถึงความแข็งแรงของวัสดุและใช้ในการระบุสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนเปรียบเทียบกับที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ของน้ำหนักอีพ๊อกซีจากผลการทดสอบอธิบายได้ดังนี้

เนื่องจากไม่ทราบชนิดและปริมาณตังเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในสูตร I จึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะการอบในเตาอบความร้อนและในเตาอบไมโครเวฟเท่านั้นไม่มีผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงพบว่า อีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนให้ค่ามอดุลัสที่ใกล้เคียงกับอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าความคงทนต่อแรงดึง (ความเค้น ณ จุดขาด) และค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนให้ค่าสูงกว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1

สูตร II เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน ค่าที่ได้คือ 1.50 GPa และ 1.49 GPa ตามลำดับ แต่ค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซิน ที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน ค่าที่ทดสอบได้คือ 1.59 GPa และ 1.65 GPa ตามลำดับ ส่วนค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเรซินให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ให้ผลที่คล้ายกันคือ อีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% แต่อีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าต่ำกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%

สูตร IV จากการทดสอบพบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงกว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟทุกค่าทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ยกเว้นค่าความเครียด ณ จุดขาด ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเรซินให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ให้ผลที่คล้ายกันคือ อีพ๊อกซีเรซินเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร VI เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ค่าความคงทนต่อแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างการอบด้วยเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ค่าที่ทดสอบได้คือ 30.18 MPa และ 31.01 MPa ตามลำดับ ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาดของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อนเล็กน้อย ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเรซินให้ค่า มอดุลัสสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าคง

ทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาดของอีพ๊อกซีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร VIII เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและความเครียด ณ จุดขาดสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ส่วนค่าคงทนต่อแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนและเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด ของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเรซินให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าความคงทนต่อแรงดึงเมื่ออบด้วยเตาอบความร้อนอีพ๊อกซีเรซินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%ให้ค่าต่ำกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% แต่เมื่ออบด้วยเตาอบไมโครเวฟอีพ๊อกซีเรซินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาด เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

จากผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินทั้ง 5 สูตร พบว่าสูตร II ที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสเทียบเท่ากับการอบในเตาอบความร้อนทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ในขณะที่สูตร I, VI, VI และ VIII ที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน สำหรับค่าความคงทนต่อแรงดึงนั้นมีเพียงสูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และสูตร VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% เท่านั้นที่ให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ส่วนสูตรอื่นที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% สำหรับค่าความเครียด ณ จุดขาดนั้นทุกสูตรที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าที่สูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนยกเว้นสูตร I และสูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%

สาเหตุที่แต่ละสูตรมีแนวโน้มของสมบัติการต้านแรงดึงระหว่างการอบในเตาอบไมโครเวฟและเตาอบความร้อนที่ต่างกันนั้นอาจเนื่องจากความแตกต่างของชนิดและปริมาณของสารช่วยให้แข็ง ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับความร้อนที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการอบของแต่ละสูตร รวมไปถึงข้อจำกัดของเตาอบไมโครเวฟด้วยเพราะเตาไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่ใช้ในครัวเรือน (Tanrattanakul and Saetiaw, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารทำให้แข็งและปริมาณส่วนผสมทางเคมีจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซี (Dyakonov *et al.*, 1996)

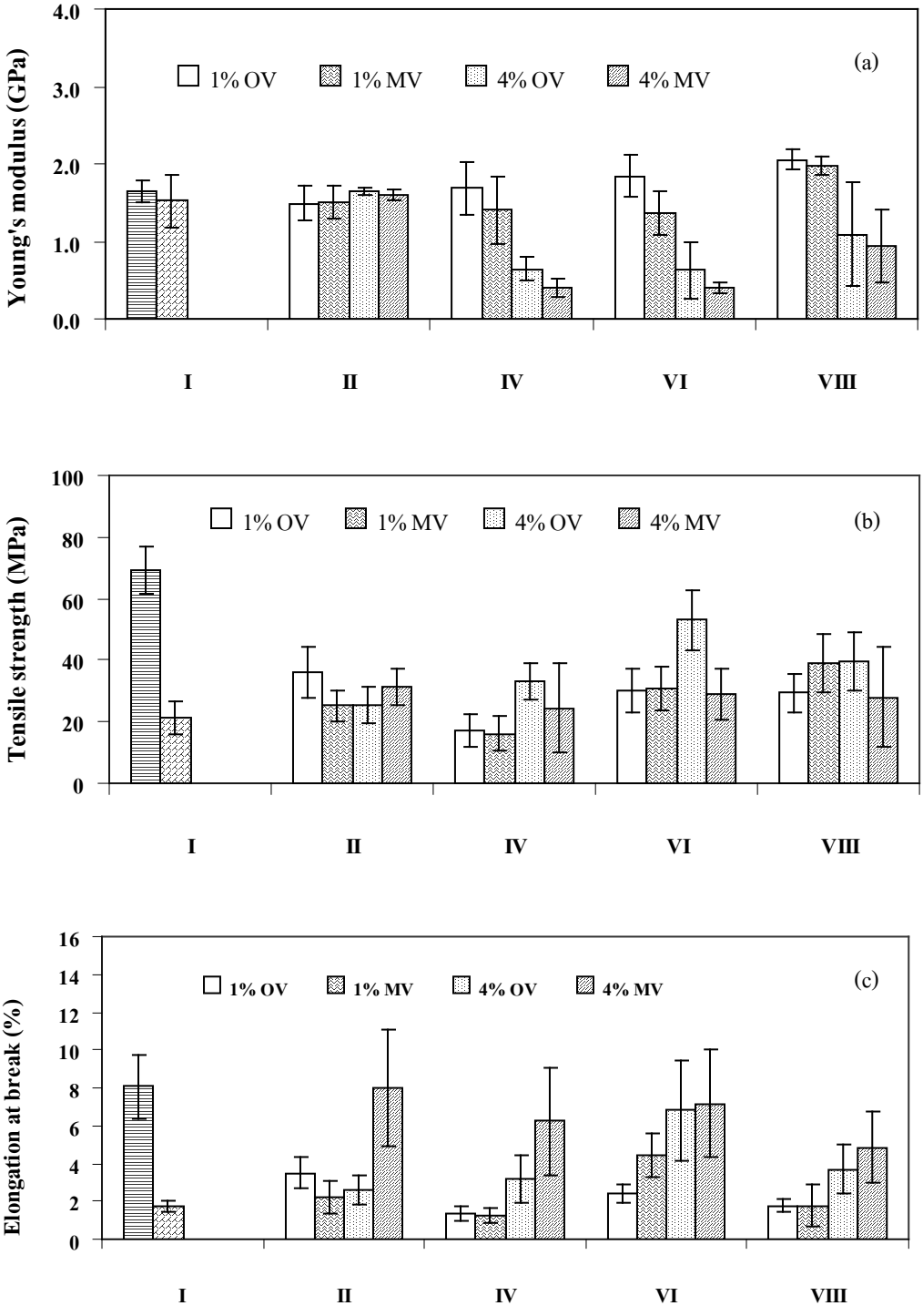
ซึ่งความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล มีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่อบในไมโครเวฟและอบด้วยความร้อน โดยใช้สารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน พบว่าอีพ๊อกซีที่อบในไมโครเวฟจะมีค่าการทนต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสของแรงดึงสูงกว่าอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบเล็กน้อย (Bai *et al.*, 1995) การใช้สารทำให้แข็งกลุ่มแอนไฮไดร์พบว่าอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟจะมีค่าความแข็งแรงอัด (compressive strength) และความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าการอบในเตาอบความร้อน (Jian *et al.*, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของอีพ๊อกซีสูตร II ที่ให้ค่ามอดุลัสเทียบเท่ากันระหว่างการอบทั้งสองระบบ และสูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบในเตาอบไมโครเวฟแสดงให้เห็นว่าให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงสูงกว่าการอบในเตาอบความร้อน มีการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับการอบอีพ๊อกซีในไมโครเวฟโดยอธิบายว่าคลื่นไมโครเวฟจะช่วยให้เกิดพอลิเมอไรเซชันของอีพ๊อกซีเรซินทำให้โมเลกุลจัดตัวกันแน่นขึ้นเนื่องจากความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้ใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้ในการหมุนของเคมิคัล เรดิคัล (chemical radical) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลและช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้กับอีพ๊อกซี (Jian *et al.*, 2003) ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1% เป็น 4% ในแต่ละสูตรทำให้สมบัติการต้านแรงดึงที่ได้จากการทดสอบบางค่าเพิ่มขึ้นบางค่าลดลงโดยในแต่ละสูตรมีแนวโน้มที่ต่างกันนั้น จากที่ได้อธิบายแล้วว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมีหลายปัจจัย กรณีเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1% เป็น 4% เป็นการเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นสูตรที่เพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วให้สมบัติการต้านแรงดึงดีขึ้นแสดงว่าการเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาน่าจะไปช่วยเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางพันธะหรือความหนาแน่นของอีพ๊อกซี ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลบางค่าดีขึ้น แต่ในกรณีที่เพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วให้สมบัติการต้านแรงดึงต่ำลงนั้น น่าจะมีผลมาจากตัวอีพ๊อกซีเองอาจไม่เหมาะกับการอบโดยใช้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว เช่น อีพ๊อกซีสูตร IV, VI และ VIII เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1% เป็น 4% ทำให้ค่ามอดุลัสของยังต่ำลงทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาไมโครเวฟ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษาร้อยละของการเกิดปฏิกิริยา (% conversion) ของอีพ๊อกซีสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1% เป็น 4% ร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาของอีพ๊อกซีต่างกันเพียงเล็กน้อย และร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาของอีพ๊อกซีส่วนใหญ่มากกว่า 90% (Tanrattanakul and Saetiaw, 2005)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินสูตรต่างๆ

สูตร			มอดุลัสของยัง (GPa)		ความคงทนต่อแรงดึง (MPa)		ความเครียด ณ จุดขาด (%)	
			เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
I*		OV	1.66	0.14	69.21	7.84	8.06	1.69
		MV	1.52	0.34	21.49	5.31	1.70	0.30
ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% W/W	II	OV	1.49	0.23	35.88	8.23	3.49	0.81
		MV	1.50	0.21	25.27	5.03	2.21	0.90
	IV	OV	1.68	0.33	17.12	5.12	1.31	0.39
		MV	1.41	0.44	16.23	5.54	1.28	0.38
	VI	OV	1.84	0.28	30.18	6.89	2.39	0.50
		MV	1.36	0.29	31.01	7.09	4.45	1.14
	VIII	OV	2.06	0.14	29.34	6.19	1.74	0.33
		MV	1.97	0.12	38.92	9.63	1.76	1.10
ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% W/W	II	OV	1.65	0.05	25.54	5.88	2.58	0.79
		MV	1.59	0.07	31.47	5.83	8.01	3.10
	IV	OV	0.64	0.15	33.27	6.00	3.18	1.23
		MV	0.40	0.11	24.55	14.30	6.22	2.87
	VI	OV	0.63	0.36	53.12	9.64	6.80	2.69
		MV	0.40	0.08	29.16	8.25	7.17	2.82
	VIII	OV	1.09	0.67	39.57	9.32	3.68	1.30
		MV	0.94	0.47	27.87	16.22	4.85	1.91

หมายเหตุ : MV = อบในเตาอบไมโครเวฟ OV = อบในเตาอบความร้อน

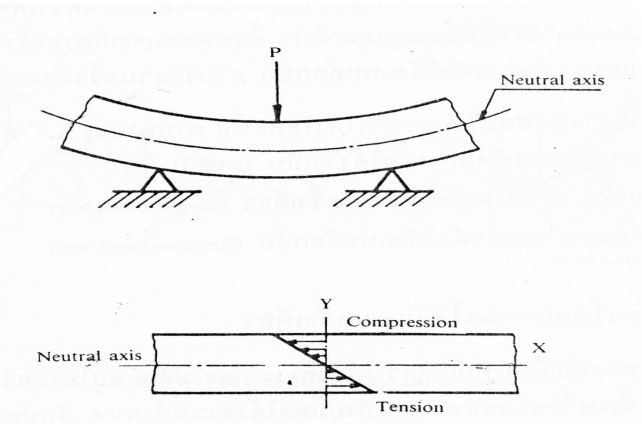
* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



รูปที่ 4.1 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ: (a) มอดุลัสของยัง; (b) ความคงทนต่อแรงดึง; (c) ความเครียด ณ จุดขาด; สูตร I ไม่ทราบชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้ง

วัสดุเมื่อได้รับแรงดัดมากระทำ เช่น ชิ้นทดสอบที่มีจุดรองรับสองจุดแล้วมีแรงมากระทำที่ตรงกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับทั้งสองก็จะทำให้เกิดการดัดขึ้น ชิ้นงานจะโค้งงอตามทิศทางของแรงที่มากระทำ เป็นผลทำให้บริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานจะหดเข้าเนื่องจากมีความเค้นอัดเกิดขึ้น และบริเวณผิวล่างของชิ้นทดสอบจะยืดออกเนื่องจากมีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานไม่มีการหดหรือยืดเนื่องจากความเค้นที่ผิวนั้นเท่ากับศูนย์เรียกว่า “Neutral surface” และผิวนี้จะตัดกับเส้นสะเทิน (neutral axis) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 การทดสอบการดัดโค้งช่วยบอกให้ทราบถึงความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานการดัดโค้งเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากน้อยเพียงไรหรือบอกถึงความเหนียวของวัสดุ (มลฆล, 2536)



รูปที่ 4.2 ความเค้นที่เกิดในวัสดุขณะรับแรงดัด (มลฆล, 2536)

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 เป็นผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนเปรียบเทียบกับที่อบในเตาอบไมโครเวฟใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ของน้ำหนักอีพ๊อกซีจากผลการทดสอบอธิบายให้ทราบดังนี้

เนื่องจากไม่ทราบชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอีพ๊อกซีสูตร I จึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะการอบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟเท่านั้น ไม่มีผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งทำให้ทราบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้ง (ความเค้นดัดโค้ง ณ จุดขาด) และค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาดสูงกว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟทุกค่า

สูตร II เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ส่วนค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าที่ใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทุกค่า ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเรซินให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทุกค่าในระบบที่อบในเตาอบความร้อน ส่วนอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟ พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% แต่ค่าการคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัด ณ จุดขาด ให้ผลที่คล้ายกันคือ อีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%

สูตร IV เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่า อีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทุกค่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน ค่าที่ได้คือ 2.59 GPa และ 2.64 GPa ตามลำดับ แต่ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบด้วยเตาอบความร้อนใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ที่ใกล้เคียงกันกับอีพ๊อกซีเรซินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ส่วนการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟพบว่า อีพ๊อกซีเรซินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทุกค่า

สูตร VI เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน แต่ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทุกค่า ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การอบในเตาอบความร้อนของอีพ๊อกซีเรซิน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาดสูงกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทุกค่า แต่การอบด้วยเตาอบไมโครเวฟให้ผลที่ตรงข้ามกันคือ อีพ๊

อกซีเรซินเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ต่ำกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทุกค่า

สูตร VIII เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน แต่ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้มอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทุกค่า ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการอบในเตาอบความร้อนของอีพ๊อกซีเรซินเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่ามอดุลัสค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ต่ำกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทุกค่า แต่การอบด้วยเตาอบไมโครเวฟให้ผลที่ตรงข้ามกันคือ อีพ๊อกซีเรซินเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ยกเว้นค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาดที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ต่ำกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%

จากผลการทดสอบสมบัติการทนต่อการดัดโค้งของอีพ๊อกซีทั้ง 5 สูตร พบว่ามีเพียงอีพ๊อกซีสูตร II ทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% และสูตร VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% เท่านั้น ที่ให้ค่ามอดุลัสของอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ในขณะที่สูตรอื่นๆให้ค่ามอดุลัสของอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ส่วนค่าความคงทนต่อการดัดโค้งที่ได้จากการทดสอบพบว่าสูตร II, IV และ VIII ที่ใช้ตัวเร่ง 4% ให้ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงานที่อบในเตาอบไมโครเวฟสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ในขณะที่สูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ให้ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งที่ใกล้เคียงกันระหว่างการอบทั้งสองระบบ ส่วนสูตรอื่นๆ ให้ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งที่ได้จากการอบในเตาอบไมโครเวฟต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งสิ้น สำหรับค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ที่ได้จากการทดสอบพบว่าสูตร I, IV ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และสูตร VI ที่ใช้ตัวเร่ง 4% ให้ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ของอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ส่วนสูตรที่เหลือต่างให้ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ของอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งหมด

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าอีพ๊อกซีบางสูตรที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติการดัดโค้งที่สูงกว่าการอบด้วยเตาอบความร้อน ในขณะเดียวกันบางสูตรจะให้ผลที่ตรงข้ามกัน คืออบด้วยเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติการดัดโค้งที่ต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบความร้อน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับที่กล่าวมาก่อนหน้านี้คือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีน่าจะขึ้นกับชนิดของสารช่วยให้แข็ง ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับความร้อนที่

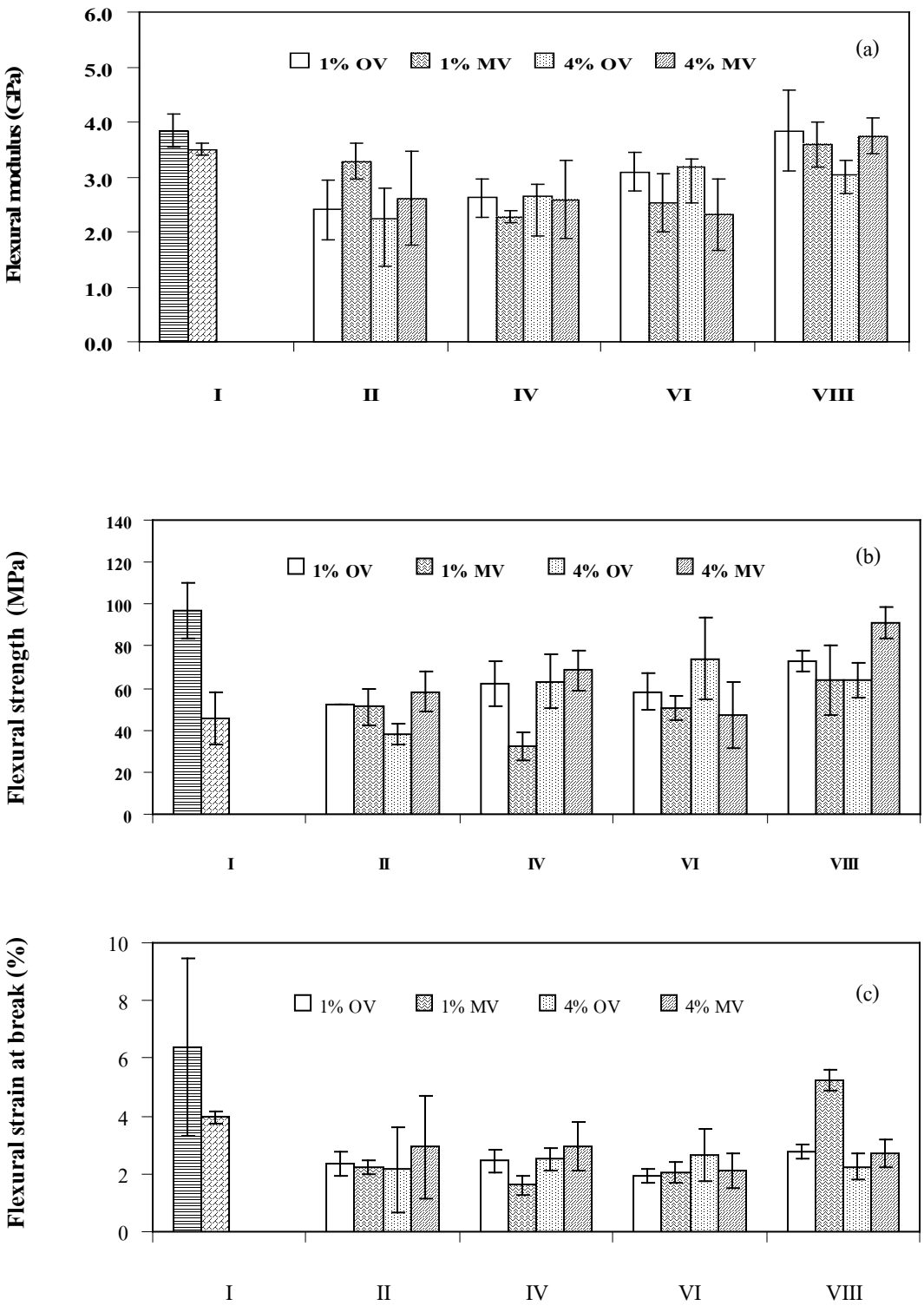
ใช้ในเตาอบไมโครเวฟ เวลาในการอบ (Tanrattanakul and Saeiaw, 2005) และความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซี (Dyakonov *et al.*, 1996)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเรซินสูตรต่างๆ

สูตร			มอดุลัส (GPa)		ความคงทนต่อการดัดโค้ง (MPa)		ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด (%)	
			เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
	I*	OV	3.84	0.30	96.81	13.00	6.36	3.08
		MV	3.51	0.10	45.42	12.31	3.95	0.23
ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% W/W	II	OV	2.40	0.54	52.08	0.20	2.33	0.41
		MV	3.29	0.32	50.98	8.79	2.21	0.24
	IV	OV	2.62	0.35	62.01	10.88	2.45	0.39
		MV	2.28	0.11	32.30	7.04	1.61	0.31
	VI	OV	3.09	0.35	58.35	8.95	1.94	0.25
		MV	2.52	0.53	50.82	5.74	2.06	0.37
	VIII	OV	3.84	0.73	73.08	5.18	2.78	0.26
		MV	3.60	0.41	63.71	16.44	5.24	0.37
ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% W/W	II	OV	2.23	0.56	38.12	5.24	2.14	1.48
		MV	2.61	0.86	58.39	9.58	2.93	1.79
	IV	OV	2.64	0.23	63.24	12.73	2.50	0.39
		MV	2.59	0.71	68.37	9.78	2.94	0.83
	VI	OV	3.17	0.15	74.04	19.42	2.67	0.91
		MV	2.31	0.65	47.46	15.63	2.11	0.59
	VIII	OV	3.04	0.25	63.95	8.42	2.25	0.45
		MV	3.74	0.33	90.99	7.65	2.70	0.48

หมายเหตุ : MV = อบในเตาอบไมโครเวฟ OV = อบในเตาอบความร้อน

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



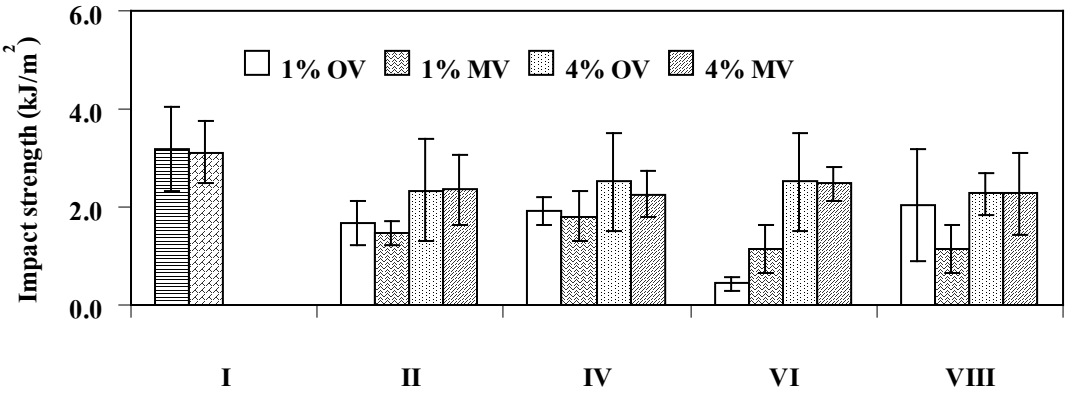
รูปที่ 4.3 สมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเรซินใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบในเตาอบความร้อนและไมโครเวฟ: (a) มอดุลัส; (b) ความคงทนต่อการดัดโค้ง; (c) ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด; สูตร I ไม่ทราบชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.3 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทก

การทดสอบการต้านแรงกระแทกเป็นการทดสอบโดยให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบอย่างเฉียบพลัน หากชิ้นทดสอบมีความคงทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าแรงที่ได้รับ ชิ้นทดสอบก็จะไม่เกิดการแตกหัก การศึกษาความคงทนต่อแรงกระแทกเป็นการศึกษาในเชิงพลังงาน ความสามารถในการกระจายตัวของพลังงานที่ได้รับหรือการสะสมของพลังงาน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งซึ่งเป็นจุดอ่อนแอที่สุด

รูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 เป็นผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเรซินที่อบในเตาอบความร้อนเปรียบเทียบกับที่อบในเตาอบไมโครเวฟใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% สูตร II และ VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และสูตร VI ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ที่อบในเตาอบไมโครเวฟเท่านั้นที่ให้ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ในขณะที่สูตรอื่นๆให้ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งหมด

มีงานวิจัยได้อธิบายไว้ว่าสมบัติเชิงฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ของอีพ๊อกซีขึ้นกับความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะ ถ้าปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะสูง อีพ๊อกซีจะมีลักษณะเปราะทำให้ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกต่ำ ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะลดลง (Bell, 1970; Misra *et al.*, 1979) ดังนั้นอาจจะเปรียบเทียบความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะแบบหยาบๆ จากค่าการคงทนต่อแรงกระแทกได้ จากผลการทดสอบพบว่าสูตร II และ VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกันระหว่างการอบด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบความร้อน ดังนั้นอาจบอกได้ว่าอีพ๊อกซีที่อบทั้งสองระบบมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.4 การต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเรซินใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบในเตาอบความร้อนและไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเรซินสูตรต่างๆ

สูตร			การต้านทานแรงกระแทก (kJ/m^2)	S.D.
I*		OV	3.18	0.87
		MV	3.11	0.63
ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% W/W	II	OV	1.68	0.44
		MV	1.46	0.24
	IV	OV	1.91	0.29
		MV	1.81	0.52
	VI	OV	0.44	0.14
		MV	1.14	0.48
	VIII	OV	2.04	1.15
		MV	1.14	0.48
ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% W/W	II	OV	2.34	1.03
		MV	2.36	0.72
	IV	OV	2.52	1.00
		MV	2.25	0.48
	VI	OV	2.52	1.00
		MV	2.47	0.35
	VIII	OV	2.27	0.43
		MV	2.28	0.84

หมายเหตุ : MV = อบในเตาอบไมโครเวฟ OV = อบในเตาอบความร้อน

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

4.2 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท 5 สูตรที่ได้จากการอบด้วยเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เป็นผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบด้วยเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟจะเห็นได้ว่า สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร I ที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ต่ำกว่าคอมโพสิทที่อบด้วยเตาอบความร้อนทุกค่า

สูตร II เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน ค่าที่ได้คือ 1.53 GPa และ 1.74 GPa ตามลำดับ แต่ค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่า อีพ๊อกซีคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟ ให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนแต่ค่ามอดุลัสและความเครียด ณ จุดขาด ให้ค่าที่ต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ให้ผลที่ตรงข้ามกันคือ อีพ๊อกซีคอมโพสิทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร IV เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด มีค่าที่สูงกว่าตัวอย่างที่อบในเตาอบความร้อนเล็กน้อย เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน แต่ค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ให้ผลที่ตรงข้ามกันคือ อีพ๊อกซีคอมโพสิทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร VI เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทุกค่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน แต่ค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ในขณะที่ค่าคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ให้ผลที่ตรงข้ามกันคือ อีพ๊อกซีคอมโพสิทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทุกค่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน แต่ค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ส่วนค่าคงทนต่อแรงดึงและค่าความเครียด ณ จุดขาด ให้ผลที่ตรงข้ามกันคือ อีพ๊อกซีคอมโพสิทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

จากผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของอีพ๊อกซีทั้ง 5 สูตร จะเห็นได้ว่ามีเพียงอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II เท่านั้น ที่อบในเตาอบไมโครเวฟแล้วให้ค่าการคงทนต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิทที่อบในเตาอบความร้อนทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ส่วนค่ามอดุลัสพบว่า คอมโพสิทสูตร IV, VI และ VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เท่านั้น ที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่อบในเตาอบความร้อน ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าคอมโพสิทสูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และสูตร IV, VI และ VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ให้ค่าสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน

จากผลการทดสอบพบว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทบางสูตรที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติการทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ในขณะที่บางสูตรที่อบในเตาอบความร้อนให้สมบัติการทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่อบในเตาอบไมโครเวฟ จากหัวข้อ 4.1 อธิบายไว้ว่าสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันของอีพ๊อกซีน่าจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซี ความแตกต่างของชนิดของสารช่วยให้แข็ง ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับความร้อนที่ใช้ในเตาอบ

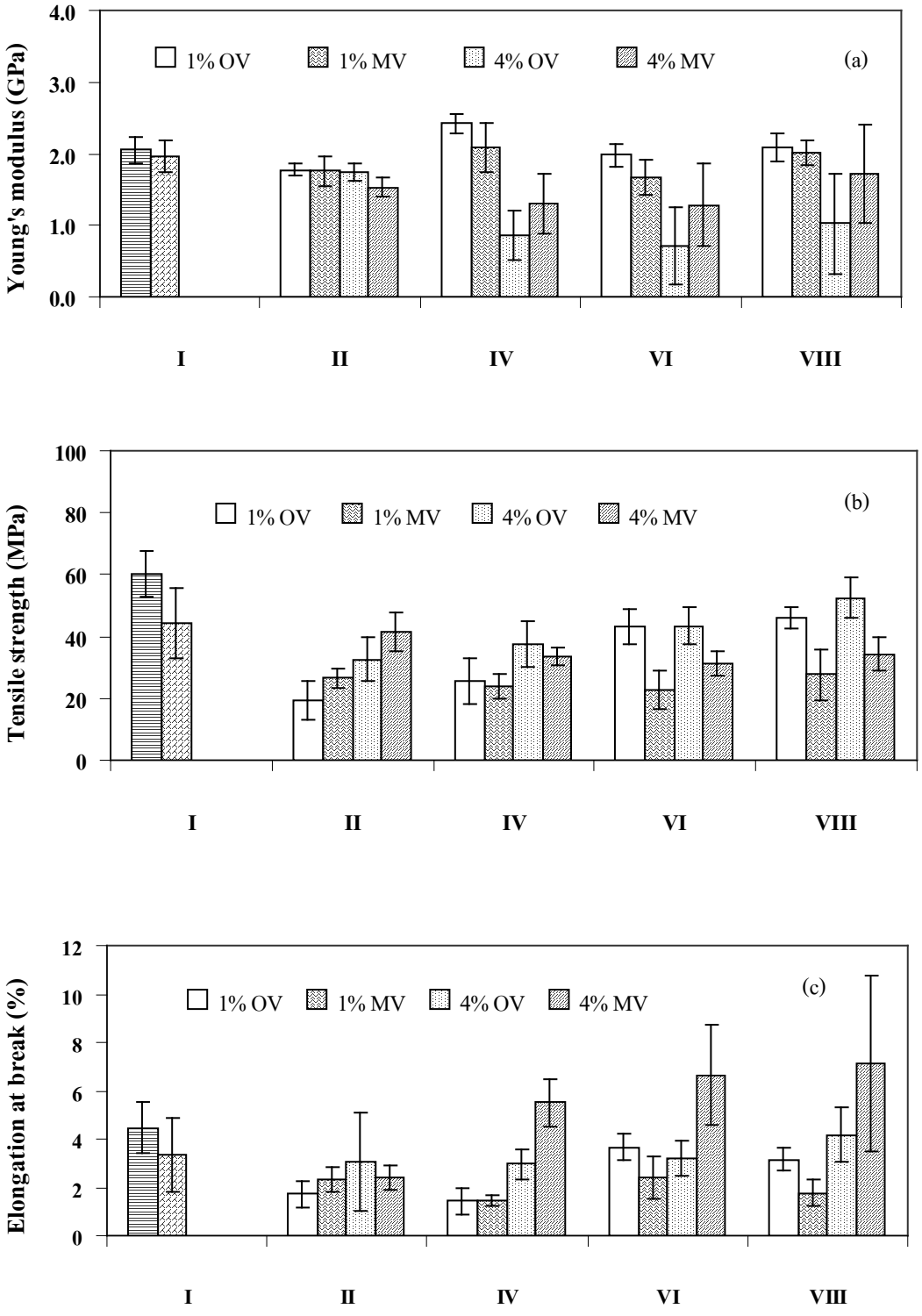
ไมโครเวฟและเวลาในการอบ แต่ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลนอกจากที่กล่าวมาแล้วยังมีปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญคือ การยึดเกาะระหว่างเฟสของอีพ๊อกซีกับเส้นใยแก้ว ฟองอากาศ ปริมาณช่องว่างระหว่างอีพ๊อกซีกับเส้นใยแก้ว ชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วที่ใช้ ปัจจัยที่กล่าวมามีความสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิททั้งสิ้น (อิทธิพล, 2544) มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการอบอีพ๊อกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและความร้อน พบว่าการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟมีปริมาณฟองอากาศมากกว่าการอบด้วยความร้อน แต่มีการยึดเกาะที่ผิวเส้นใยคาร์บอนมากกว่าส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีกว่า (Nightinigal and Day, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่อธิบายว่าคลื่นไมโครเวฟทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยแก้วกับอีพ๊อกซีเรซินดีกว่าการอบด้วยความร้อน เพราะคลื่นไมโครเวฟทำให้การส่งผ่านความร้อนที่ผิวเส้นใยแก้วสู่ภายนอกดีกว่าทำให้เส้นใยแก้วแห้งกว่า ช่วยให้การยึดเกาะที่ผิวเส้นใยแก้วสูงกว่าระบบที่ใช้ความร้อน (Fang and Scola, 1999) แต่ก็มีการศึกษาว่าฟองอากาศและช่องว่างระหว่างเฟสก็มีผลต่อสมบัติเชิงกลเช่นกัน โดยมีงานวิจัยพบว่าความแข็งแรงของคอมโพสิทจะลดลง 7% ทุกๆ 1% ของฟองอากาศและช่องว่างระหว่างเส้นใยในคอมโพสิท (อิทธิพล, 2544) ซึ่งน่าจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิท ซึ่งช่วยอธิบายผลการทดลองที่ว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทบางสูตรที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติการทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อนแต่บางสูตรอบในเตาอบความร้อนให้สมบัติการทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่อบในเตาอบไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตรต่างๆ

สูตร			มอดุลัสของยัง (GPa)		ความคงทนต่อแรงดึง (MPa)		ความเครียด ณ จุดขาด (%)	
			เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
I*		OV	2.05	0.18	60.26	7.56	4.47	1.07
		MV	1.96	0.23	44.40	11.17	3.36	1.54
ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% W/W	II	OV	1.77	0.08	19.48	6.27	1.73	0.56
		MV	1.76	0.20	26.58	3.08	2.33	0.54
	IV	OV	2.42	0.14	25.61	7.20	1.43	0.54
		MV	2.09	0.34	23.89	4.01	1.44	0.21
	VI	OV	1.98	0.17	43.08	5.69	3.66	0.54
		MV	1.67	0.24	22.73	6.17	2.40	0.87
	VIII	OV	2.08	0.20	46.26	3.38	3.15	0.49
		MV	2.02	0.17	27.58	8.44	1.77	0.53
ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% W/W	II	OV	1.74	0.12	32.65	6.93	3.03	2.03
		MV	1.53	0.14	41.34	6.30	2.39	0.53
	IV	OV	0.86	0.35	37.41	7.57	2.97	0.62
		MV	1.30	0.41	33.60	2.96	5.51	0.97
	VI	OV	0.72	0.54	43.46	5.87	3.19	0.71
		MV	1.28	0.58	31.35	3.90	6.65	2.05
	VIII	OV	1.03	0.70	52.49	6.49	4.17	1.13
		MV	1.71	0.69	34.36	5.26	7.11	3.63

หมายเหตุ : MV = อบในเตาอบไมโครเวฟ OV = อบในเตาอบความร้อน

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



รูปที่ 4.5 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบในเตาอบความร้อนและไมโครเวฟ: (a) มอดุลัสของยัง; (b) ความคงทนต่อแรงดึง;(c) ความเครียด ณ จุดขาด; สูตร I ไม่ทราบชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.2 ผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เป็นผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบด้วยเตาอบความร้อนและที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% กรณีสูตร I ไม่มีผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งทำให้ทราบว่า อีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทุกค่า

สูตร II เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟ ให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ส่วนค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด พบว่าคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าที่ใกล้เคียงกับที่อบด้วยเตาอบความร้อน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้ง สูงกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ส่วนค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด พบว่าให้ค่าต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าหรือใกล้เคียงกันกับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร IV แสดงให้เห็นว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ในขณะที่ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันของการอบทั้งสองระบบทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าหรือใกล้เคียงกันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

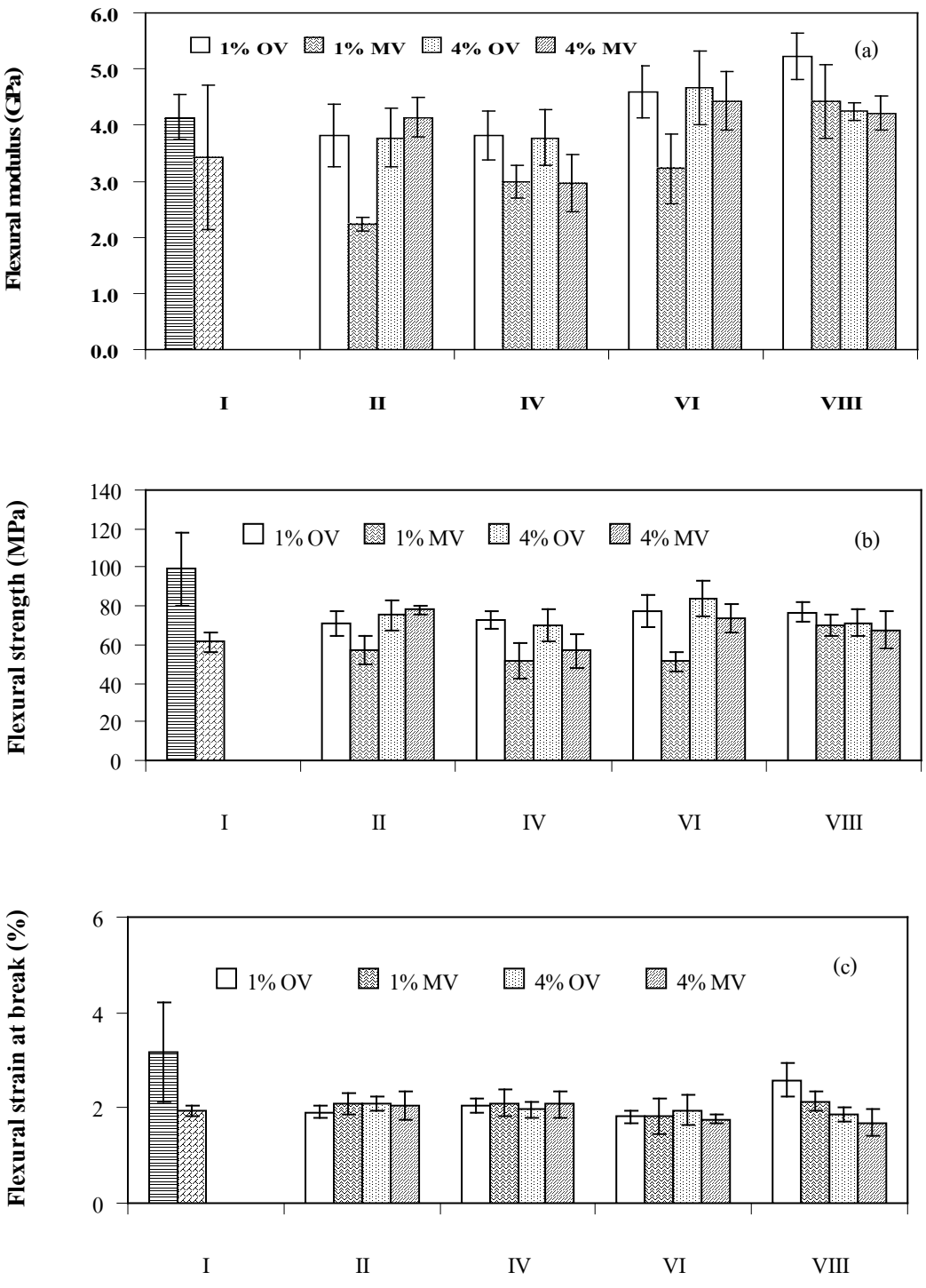
สูตร VI พบว่าคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ในขณะที่ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันของการอบทั้งสองระบบทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าถ้าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าหรือใกล้เคียงกันกับที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

สูตร VIII พบว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ต่ำกว่าที่อบด้วยเตาอบความร้อนทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทให้ค่ามอดุลัส ค่าความคงทนต่อการดัดโค้งและค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด สูงกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ

จากผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีทั้ง 5 สูตร มีเพียงอีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เท่านั้น ที่อบในเตาอบไมโครเวฟแล้วให้ค่ามอดุลัส ค่าการคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าคอมโพสิทที่อบในเตาอบความร้อน ในขณะที่สูตรอื่นให้ค่าที่ต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งสิ้น สำหรับค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด แสดงให้เห็นว่าสูตร II, IV และ VI ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันของการอบทั้งสองระบบทั้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ส่วนสูตรอื่นให้ค่าที่ต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งสิ้น จากผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท สังเกตได้ว่าคอมโพสิทที่อบในเตาอบไมโครเวฟส่วนใหญ่ให้สมบัติที่ต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน จากที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.1 ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท ในหัวข้อนี้ก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน และจากงานวิจัยของหลายๆคน มีการศึกษาพบว่าอัตราเร็วและปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของอีพ๊อกซีที่ได้จากไมโครเวฟสูงกว่าการอบด้วยความร้อน (Wei *et al*., 1993; Boey and Yap, 2000) แต่ไม่มีผลต่อโครงสร้างสามมิติของอีพ๊อกซีเรซินแต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของการเกิดความร้อน คือการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟความร้อนเกิดจากการหมุนของขั้วอยู่ในทิศของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่การอบด้วยเตาอบความร้อนเกิดจากแหล่งความร้อนภายนอกซึ่งทำให้เกิดการหมุนของขั้วเป็นแบบสุ่ม (Alazard, *et al*., 2003) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของอีพ๊อกซีเรซินที่ใช้สารทำให้แข็งกลุ่มมาลิอิกแอนไฮไดร์ พบว่าการอบด้วยความร้อนนานกว่าการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟประมาณ 3 เท่า (Zhou, *et al*., 2003) การที่อีพ๊อกซีคอมโพสิทที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าที่อบด้วยความร้อน ทำให้เกิดความร้อนสูงในเวลาสั้น เป็นสาเหตุให้อีพ๊อกซีเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งด้วยระยะเวลาที่รวดเร็ว อาจจะเป็นสาเหตุให้อีพ๊อกซีไหลแทรกเข้าไประหว่างเส้นใยแก้วได้อย่างไม่ทั่วถึง เนื่องจากเมื่ออีพ๊อกซีเริ่มเป็นเจลความหนืดจะสูงขึ้นทำให้เคลื่อนที่เข้าไปตามช่องว่างเล็กๆยาก และเมื่ออีพ๊อกซีเริ่มแข็งตัวจึงเกิดการกีดขวางการไหลเป็นสาเหตุให้อีพ๊อกซีมีพื้นที่สัมผัสกับเส้นใยแก้วน้อยทำให้มีการยึดติดที่ผิวของเส้นใยแก้วน้อยลงด้วยส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้มีค่าต่ำ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตรต่างๆ

สูตร			มอดุลัส (GPa)		ความคงทนต่อการดัดโค้ง (MPa)		ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด (%)	
			เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
I*		OV	4.14	0.40	99.29	18.82	3.16	1.04
		MV	3.43	1.29	61.54	5.12	1.94	0.12
ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% W/W	II	OV	3.81	0.55	71.07	6.63	1.92	0.12
		MV	2.24	0.12	57.33	7.31	2.08	0.22
	IV	OV	3.80	0.44	73.06	4.48	2.05	0.14
		MV	2.98	0.30	51.66	9.35	2.10	0.29
	VI	OV	4.59	0.47	77.56	8.16	1.81	0.13
		MV	3.22	0.62	51.36	4.86	1.83	0.36
	VIII	OV	5.22	0.41	76.71	5.17	2.59	0.35
		MV	4.42	0.66	69.89	5.71	2.14	0.22
ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% W/W	II	OV	3.77	0.52	75.08	8.06	2.10	0.16
		MV	4.14	0.36	77.92	2.55	2.05	0.31
	IV	OV	3.77	0.50	69.86	8.27	1.96	0.16
		MV	2.97	0.51	56.81	8.75	2.07	0.27
	VI	OV	4.67	0.65	84.06	9.34	1.95	0.31
		MV	4.43	0.53	73.66	6.99	1.77	0.10
	VIII	OV	4.24	0.15	71.18	7.04	1.86	0.14
		MV	4.21	0.30	67.68	9.78	1.69	0.29

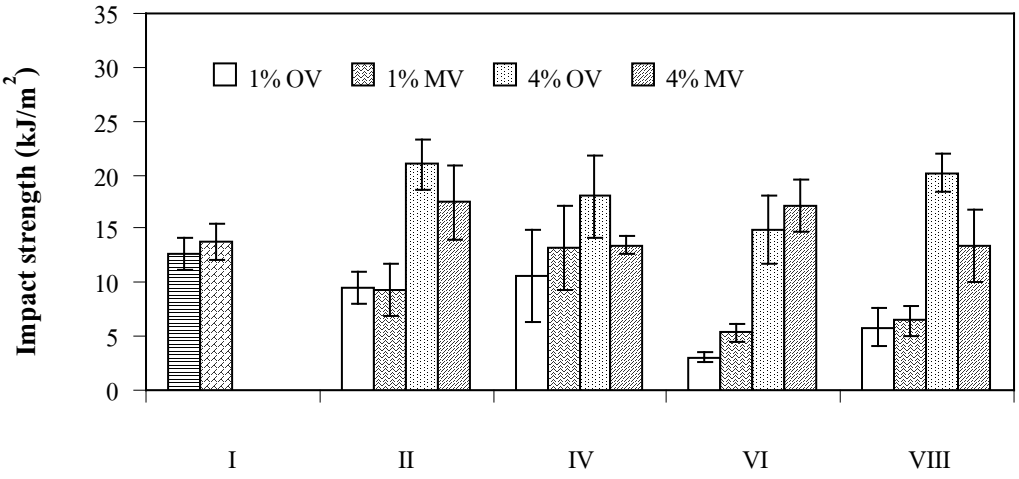


รูปที่ 4.6 สมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบในเตาอบความร้อนและไมโครเวฟ: (a) มอดุลัส; (b) ความคงทนต่อการดัดโค้ง; (c) ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด; สูตร I ไม่ทราบชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของ อีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิททั้ง 5 สูตรทั้งที่อบในเตาอบความร้อนและที่อบในเตาอบไมโครเวฟใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% พบว่ามีเพียงสูตร I, IV, VI และ VIII ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟเท่านั้น ที่มีค่าการคงทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ในขณะที่สูตรอื่นๆให้ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อนทั้งหมด ด้านความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทให้ค่าการคงทนต่อแรงกระแทกต่ำกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ทั้งระบบที่อบในเตาอบไมโครเวฟและความร้อน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทบางสูตรอบในเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติการต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน แต่บางสูตรอบในเตาอบความร้อนให้สมบัติการต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าที่อบในเตาอบไมโครเวฟ ซึ่งก็สามารถอธิบายผลการทดลองได้ในลักษณะเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2



รูปที่ 4.7 การต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตรต่างๆใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบในเตาอบความร้อนและไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตรต่างๆ

สูตร			การต้านทานแรงกระแทก (kJ/m^2)	S.D.
I*		OV	12.62	1.51
		MV	13.76	1.70
ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% W/W	II	OV	9.58	1.50
		MV	9.35	2.42
	IV	OV	10.60	4.23
		MV	13.18	3.89
	VI	OV	3.06	0.42
		MV	5.33	0.87
	VIII	OV	5.82	1.72
		MV	6.47	1.36
ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% W/W	II	OV	21.00	2.32
		MV	17.41	3.43
	IV	OV	17.97	3.78
		MV	13.49	0.90
	VI	OV	14.93	3.11
		MV	17.11	2.46
	VIII	OV	20.17	1.79
		MV	13.49	3.35

หมายเหตุ : MV = อบในเตาอบไมโครเวฟ OV = อบในเตาอบความร้อน

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีทั้ง 5 สูตร ทั้งที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและไม่เสริมแรง เพื่อเลือกสูตรที่คาดว่าน่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้นได้นั้น ในตอนแรกทดสอบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีโดยไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าอีพ๊อกซีสูตรที่อบในเตาอบไมโครเวฟแล้วให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อนได้แก่สูตร II

และ VIII แต่เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่ามีเพียงสูตร II เพียงสูตรเดียวที่อบในเตาอบไมโครเวฟแล้วให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่าที่อบในเตาอบความร้อน ดังนั้นจึงเลือกสูตร II ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เพื่อศึกษาและพัฒนาสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น สาเหตุที่เลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เพราะว่าใช้เวลาอบสั้นกว่าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% แต่มีค่าสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน นอกจากจะเลือกอีพ๊อกซีสูตร II แล้วยังเลือกที่จะศึกษาอีพ๊อกซีสูตร I ด้วย ถึงแม้ว่าสูตร I เราไม่ทราบทั้งชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และจากสมบัติเชิงกลที่ศึกษาก็พบว่าอีพ๊อกซีสูตร I ที่อบในเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ต่ำกว่าที่อบในเตาอบความร้อน แต่อีพ๊อกซีสูตร I เป็นสูตรที่ใช้อยู่จริงในเชิงการค้า จึงเลือกที่จะศึกษาและพัฒนาสูตร I ด้วย

จากผลการทดลองพบว่าอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟผิวของชิ้นงานเป็นคลื่นไม่เรียบ อาจเนื่องจากเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยเป็นระบบจานหมุนในขณะที่อบอีพ๊อกซีในเตาไมโครเวฟเบ้าจะหมุนตลอดเวลาทำให้เกิดคลื่นที่ผิวหน้าชิ้นงาน และจากที่กล่าวมาแล้วว่าคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วทำให้เกิดความร้อนสูงในเวลาสั้นทำให้อีพ๊อกซีเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็วทั้งที่ผิวหน้ายังเป็นคลื่น ดังนั้นเราต้องออกแบบการทดลองเพื่อลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟ จากปัญหาที่พบทำให้เกิดแนวคิดที่จะอบอีพ๊อกซีโดยแบ่งการอบออกเป็นช่วงเวลา ซึ่งแต่ละช่วงเวลาใช้ระดับความร้อนที่ต่างกันโดยเริ่มจากระดับความร้อนต่ำไปสูง ออกแบบการอบเป็นแบบใช้สองและสามระดับความร้อน ซึ่งแนวคิดนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ว่าการอบอีพ๊อกซีโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่องให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าแบบปล่อยคลื่นเป็นช่วงๆ (Bao และ Martin, 2000) และจากการศึกษาการอบวัสดุคอมโพสิทด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทั้งระบบความถี่เดียวและหลายความถี่จากการศึกษาพบว่าการอบวัสดุคอมโพสิทระบบความถี่เดียวทำให้เกิดความร้อนในอัตราที่สูงแต่จะเกิดอุณหภูมิที่สูงด้วยอาจทำให้สมบัติบางประการของอีพ๊อกซีคอมโพสิทเสียไป และจากการทดลองพบว่าเพื่อควบคุมสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิทต้องอาศัยการควบคุมความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Hawkins, R., *et al*., 1996)

4.3 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I ที่ได้จากการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟแบบหลายระดับความร้อน

การอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาไมโครเวฟแบ่งเป็นการอบแบบ 2 ขั้นตอน (อบ 2 ครั้ง) และ 3 ขั้นตอน (อบ 3 ครั้ง) ตัวอย่างเช่น การอบอีพ๊อกซีสูตร I สภาวะอบ 3S/1 อบครั้ง

แรกตั้งระดับความร้อนที่ 2 อบเป็นเวลา 15 min เมื่อครบเวลาที่กำหนด อบครั้งที่สองทันทีไม่ต้องเปิดฝาตู้อบโดยตั้งระดับความร้อนที่ 3 เป็นเวลา 10 min และเมื่อครบเวลาที่กำหนด อบครั้งที่ 3 ทันทีเช่นกัน ตั้งระดับความร้อนที่ 4 เป็นเวลา 5 min สำหรับการอบสภาวะอื่นก็อบในลักษณะเดียวกัน ในเบื้องต้นได้ออกแบบสภาวะอบในเตาอบไมโครเวฟของอีพ๊อกซีเรซินสูตร I ทั้งหมด 21 สภาวะอบ โดยแบ่งออกเป็นการอบแบบ 2 ระดับความร้อน 16 สภาวะอบ และการอบแบบ 3 ระดับความร้อน 5 สภาวะอบ จากการทดลองพบว่าหลายๆสภาวะอบให้ค่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกันหรือบางสภาวะก็ให้ค่าที่ต่ำ จึงเลือกนำเสนอเพียงบางสภาวะอบที่ให้สมบัติเชิงกลค่อน ข้างดี จึงเขียนการอบโดยใช้เตาอบไมโครเวฟแบบ 1 ระดับความร้อนแทนด้วย 1S การอบแบบสองระดับความร้อนแทนด้วย 2S การอบแบบสามระดับความร้อนแทนด้วย 3S และการอบด้วยเตาอบความร้อนแทนด้วย OV จากการทดลองทั้ง 21 สภาวะอบเมื่อได้สภาวะอบที่ดี เช่น ผิวเรียบ ไม่มีฟองอากาศ หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลโดยไม่ใส่เส้นใยแก้วเพื่อพิจารณาเลือกสูตรที่ให้สมบัติเชิงกลสูงไปอบแบบใส่เส้นใยแก้วต่อไปและจากผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง ทำให้ได้สภาวะอบที่ให้สมบัติการต้านแรงดึงที่ดีทั้งสิ้น 7 สภาวะอบโดยแบ่งเป็นการอบแบบ 2S สี่สภาวะอบและการอบแบบ 3S สามสภาวะอบ โดยสภาวะอบของสูตร I ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สภาวะอบของอีพ๊อกซีสูตร I อบด้วยเตาอบไมโครเวฟแบบหลายระดับความร้อน

สูตร I	สภาวะอบ					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	ระดับความร้อน	เวลา (min)	ระดับความร้อน	เวลา (min)	ระดับความร้อน	เวลา (min)
MV-1S	3	10	-	-	-	-
MV-2S/1	2	20	4	5	-	-
MV-2S/2	2	25	3	5	-	-
MV-2S/3	2	25	6	5	-	-
MV-2S/4	2	20	3	10	-	-
MV-3S/1	2	15	3	10	4	5
MV-3S/2	2	20	3	10	4	5
MV-3S/3	2	20	3	10	5	5

4.3.1 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินสูตร I อบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟ

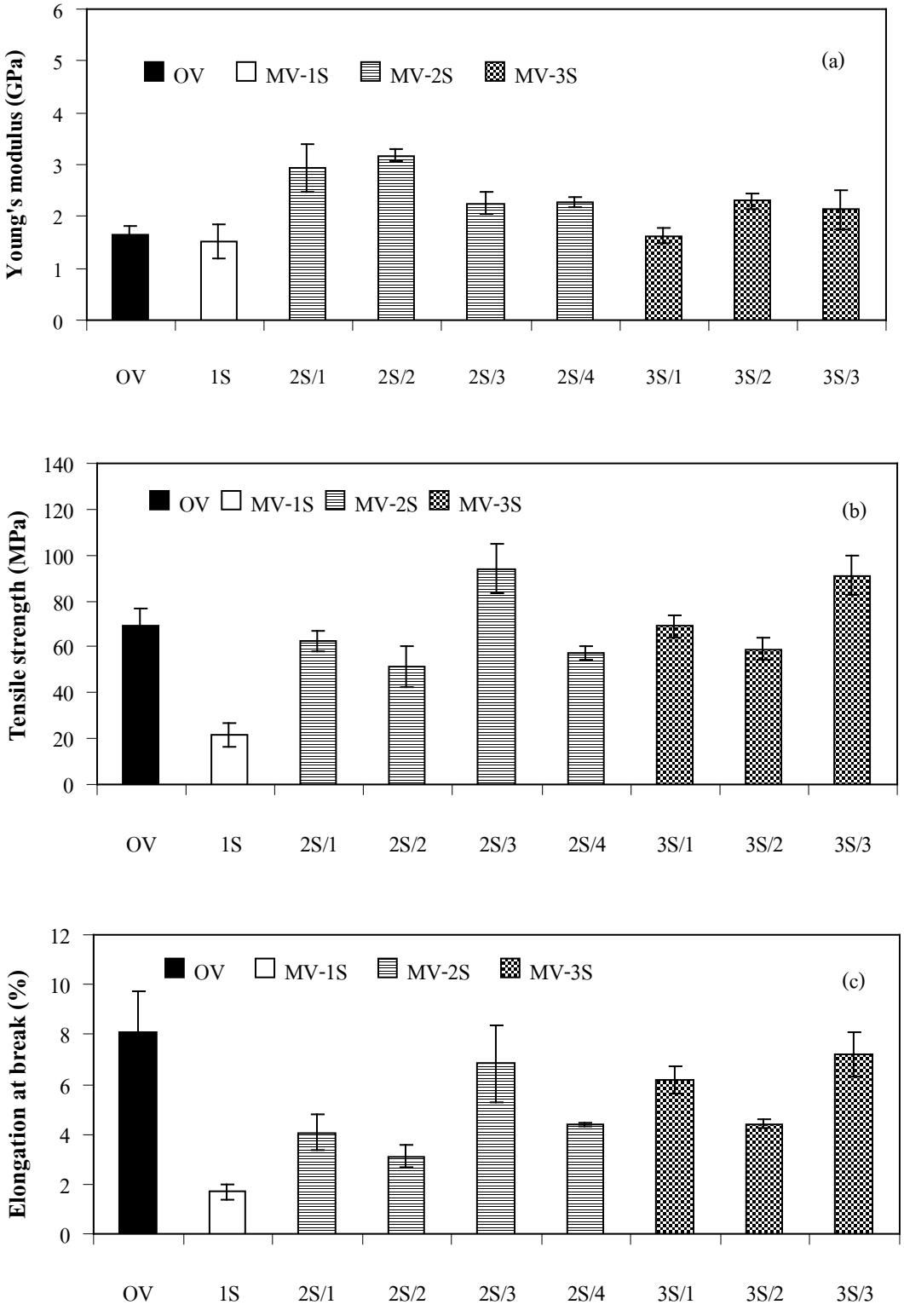
ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงสูตร I ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เปรียบเทียบระหว่างการอบแบบ OV, 1S, 2S และ 3S จากผลการทดสอบอธิบายให้ทราบดังนี้

จากการทดลองเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของการอบแบบต่างๆ พบว่าการอบแบบ 2S ให้ค่ามอดุลัสสูงที่สุด รองลงมาคือ การอบแบบ 3S, OV และ 1S ตามลำดับ โดยการอบแบบ 2S สภาวะอบที่ให้ค่ามอดุลัสสูงสุดคือ 2S/2 รองลงมาคือ 2S/1, 2S/3 และ 2S/4 ตามลำดับ ส่วนการอบแบบ 3S สภาวะอบที่ให้ค่ามอดุลัสสูงสุดคือ 3S/2 รองลงมาคือ 3S/3 และ 3S/1 ตามลำดับ สำหรับค่าความคงทนต่อแรงดึง พบว่าสภาวะอบแบบ 2S/3 ให้ค่าสูงสุดรองลงมาคือ 3S/3 และ OV ตามลำดับ โดยทั้งหมดให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงสูงกว่าการอบแบบ 1S สำหรับค่าความเครียด ณ จุดขาดพบว่าการอบแบบ OV สภาวะอบ 2S/3 และ 3S/3 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยการอบแบบ OV ให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงสุด รองลงมาคือสภาวะอบแบบ 2S/3 และ 3S/3 ตามลำดับโดยทั้งหมดให้ค่าสูงกว่าการอบแบบ 1S

ตารางที่ 4.8 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีสูตร I อบแบบหลายระดับความร้อน

สูตร I	มอดุลัสของยัง (GPa)		ความคงทนต่อแรงดึง (MPa)		ความเครียด ณ จุดขาด (%)	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
OV	1.66	0.14	69.21	7.84	8.06	1.69
MV-1S	1.52	0.34	21.49	5.31	1.70	0.30
MV-2S/1	2.94	0.46	62.58	4.36	4.07	0.71
MV-2S/2	3.18	0.13	51.41	8.80	3.12	0.45
MV-2S/3	2.25	0.22	94.17	10.95	6.84	1.53
MV-2S/4	2.28	0.10	57.32	2.80	4.40	0.08
MV-3S/1	1.63	0.15	69.02	5.05	6.19	0.55
MV-3S/2	2.30	0.15	59.19	5.10	4.40	0.18
MV-3S/3	2.13	0.39	91.11	8.34	7.19	0.91

หมายเหตุ: MV = อบในเตาอบไมโครเวฟ; OV = อบในเตาอบความร้อน



รูปที่ 4.8 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเรซินสูตร I : (a) มอดุลัสของยัง; (b) ความคงทนต่อแรงดึง; (c) ค่าความเครียด ณ จุดขาด

จากผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง พบว่าสูตร I สภาวะอบแบบ 2S/3 และ 3S/3 ให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึง สูงกว่าการอบแบบ OV และ 1S อย่างเห็นได้ชัด จึงเลือกสภาวะแบบ 2S/3 และ 3S/3 อบโดยเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเพื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง

4.3.2 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I อบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟ

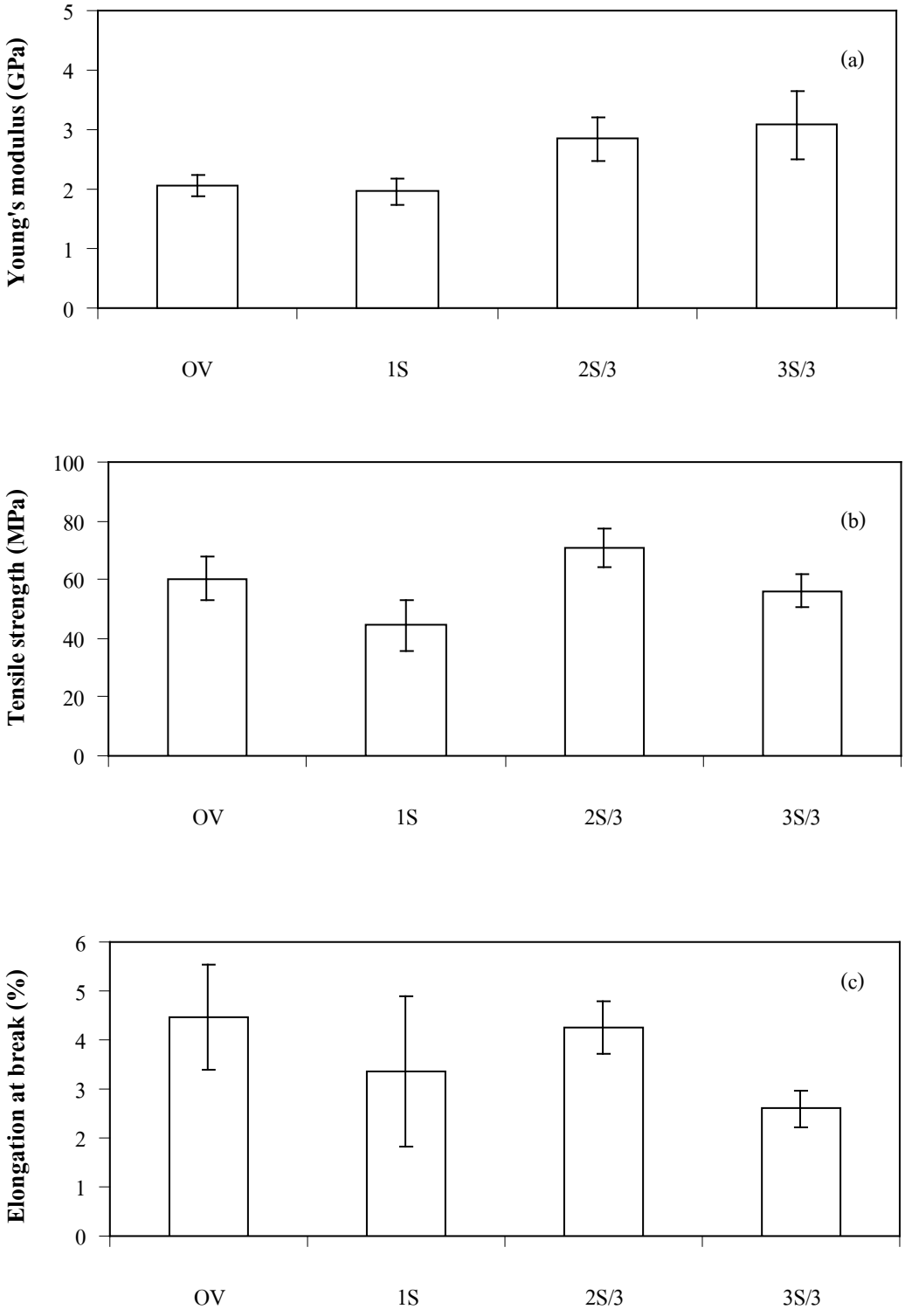
4.3.2.1 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I

รูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I เปรียบเทียบระหว่างการอบแบบ OV, 1S, สภาวะแบบ 2S/3 และ 3S/3 จากผลการทดสอบอธิบายให้ทราบดังนี้ ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง พบว่าสภาวะแบบ 3S/3 ให้ค่ามอดุลัสสูงสุด รองลงมาคือ 2S/3, OV และ 1S ตามลำดับ โดยสภาวะอบ 3S/3 และ2S/3 ให้ค่ามอดุลัสใกล้เคียงกันและสูงกว่า OV อย่างเห็นได้ชัด สำหรับค่าความคงทนต่อแรงดึง พบว่าสภาวะแบบ 2S/3 ให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงสูงสุด รองลงมาคือ OV, 2S/3 และ 1S ตามลำดับ ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าการอบแบบ OV และ 2S/3 ให้ค่าใกล้เคียงกัน โดยการอบแบบ OV ให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงสุด รองลงมาคือ 2S/3, 1S และ 3S/3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท สูตร I อบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟ

สูตร I	มอดุลัสของยัง (GPa)		ความคงทนต่อแรงดึง (MPa)		ความเครียด ณ จุดขาด (%)	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
OV	2.05	0.18	60.26	7.56	4.47	1.06
MV-1S	1.96	0.23	44.40	8.45	3.36	1.54
MV-2S/3	2.84	0.36	70.94	6.48	4.25	0.52
MV-3S/3	3.08	0.57	56.06	5.73	2.59	0.36

จากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท สูตร I พบว่าสภาวะอบแบบ 2S/3 ให้สมบัติที่น่าพอใจ คือให้ค่ามอดุลัสและความคงทนต่อแรงดึงสูงกว่าการอบแบบ OV ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาดให้ค่าใกล้เคียง



รูปที่ 4.9 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I : (a) มอดูลัสของยัง; (b) ความทนต่อแรงดึง; (c) ความเครียด ณ จุดขาด

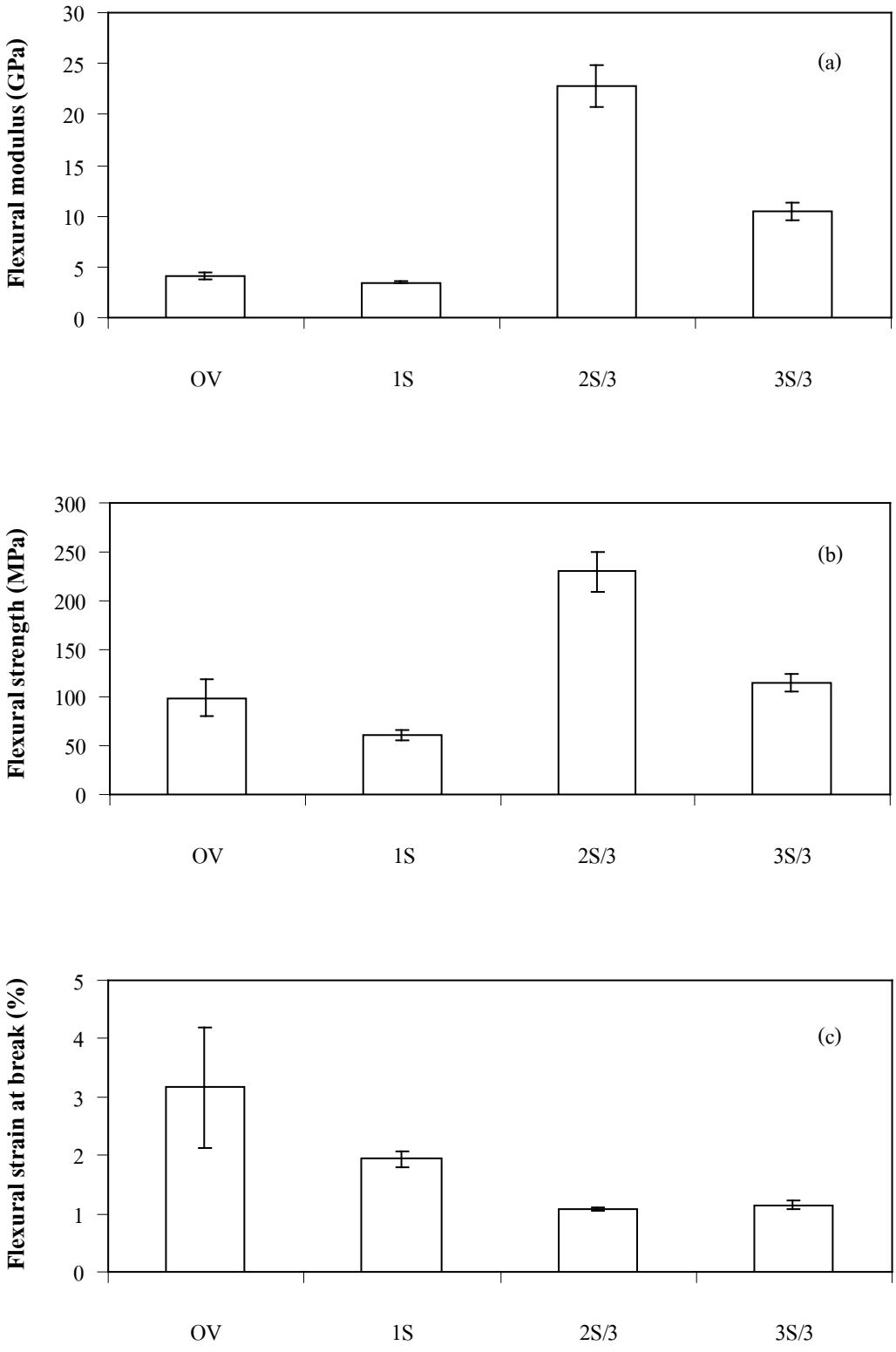
4.3.2.2 สมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I

จากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงทำให้ทราบว่าสภาวะอบ 2S/3 และ 3S/3 ให้สมบัติที่น่าสนใจ จึงเลือกสภาวะอบ 2S/3 และ 3S/3 เพื่อศึกษาสมบัติการดัดโค้งโดยผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.10 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสภาวะอบ 2S/3 ให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้ง สูงกว่าการอบแบบ 3S/3, OV และ 1S ตามลำดับอย่างเห็นได้ชัด แต่ค่าความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด พบว่าอบแบบ OV ให้ค่าสูงกว่า 2S/3, 3S/3 และ 1S ตามลำดับอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท สูตร I

สูตร I	มอดุลัส (GPa)		ความคงทนต่อการดัดโค้ง (MPa)		ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด (%)	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
OV	4.14	0.40	99.29	18.82	3.16	1.04
MV-1S	3.51	0.10	61.54	5.12	1.94	0.13
MV-2S/3	22.78	2.03	229.73	20.64	1.09	0.03
MV-3S/3	10.51	0.83	114.66	9.47	1.15	0.08

จากผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I พบว่าสภาวะอบแบบ 2S/3 ให้สมบัติที่น่าพอใจเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง คือให้ค่ามอดุลัสและความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าการอบแบบ OV อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.10 สมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท สูตร I : (a) มอดุลัส; (b) ความคงทนต่อการดัดโค้ง; (c) ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด

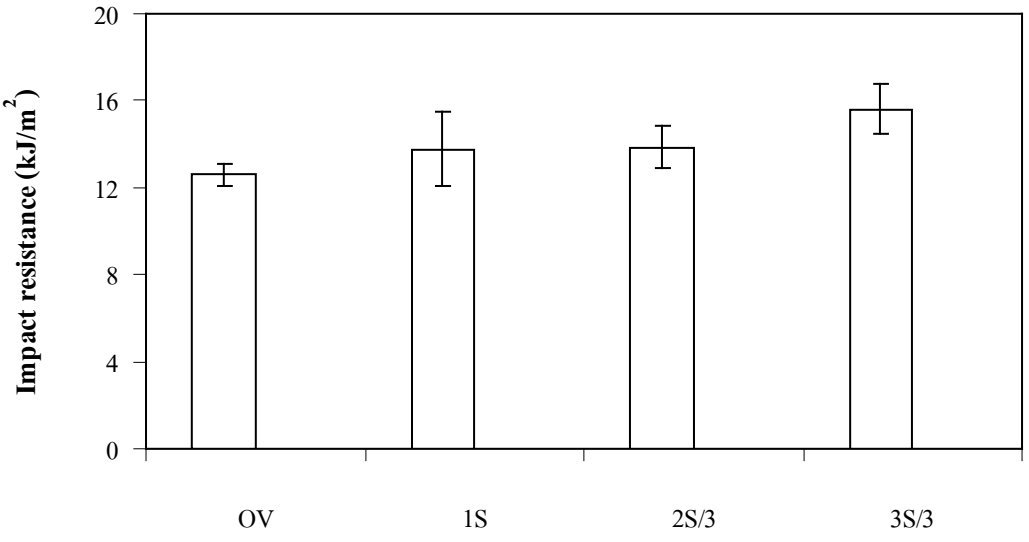
4.3.2.3 สมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติการดัดโค้งแสดงให้เห็นว่าสภาวะอบ 2S/3 และ3S/3 ให้สมบัติที่น่าสนใจ จึงเลือกสภาวะอบ 2S/3 และ3S/3 เพื่อศึกษาสมบัติการต้านแรงกระแทกโดยผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.11 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสภาวะอบ 3S/3 ให้ค่าความคงทนต่อแรงกระแทกสูงที่สุดรองลงมาคือ 2S/3, 1S และ OV ตามลำดับ โดยสภาวะอบ 3S/3 ให้ค่าสูงกว่า 2S/3 และ 1S เล็กน้อย

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I

สูตร I	การต้านทานแรงกระแทก (kJ/m^2)	S.D.
OV	12.62	0.51
MV-1S	13.76	1.70
MV-2S/3	13.84	0.97
MV-3S/3	15.62	1.12

จากผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกให้ผลการทดสอบที่เป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงและสมบัติการดัดโค้ง คือการอบแบบ 2S/3 และ 3S/3 ให้ค่าสมบัติการต้านแรงกระแทกสูงกว่าการอบแบบ OV



รูปที่ 4.11 การต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I

4.4 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II ที่ได้จากการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟแบบหลายระดับความร้อน

ในเบื้องต้นได้ออกแบบสภาวะอบในเตาอบไมโครเวฟของอีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร II ทั้งหมด 17 สภาวะอบโดยแบ่งออกเป็นการอบแบบ 2 ระดับความร้อน (2S) 13 สภาวะอบ และการอบแบบ 3 ระดับความร้อน (3S) 4 สภาวะอบ จากการทดลองพบว่าหลายๆสภาวะอบให้ค่าสม บัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกันหรือบางสภาวะก็ให้ค่าที่ต่ำจึงเลือกนำเสนอเพียง 10 สภาวะอบ โดยแบ่งออกเป็นการอบแบบ 2 ระดับความร้อน 5 สภาวะอบและการอบแบบ 3 ระดับความร้อน 5 สภาวะอบ โดยแสดงสภาวะอบไว้ในตารางที่ 4.12 สำหรับการทดสอบสูตร II เลือกที่จะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เพราะว่าให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% แต่ใช้เวลาน้อยกว่า

ตารางที่ 4.12 สภาวะอบของอีพ๊อกซีสูตร II อบด้วยเตาอบไมโครเวฟแบบหลายระดับความร้อน

สูตร II	สภาวะอบ					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	ระดับความร้อน	เวลา (min)	ระดับความร้อน	เวลา (min)	ระดับความร้อน	เวลา (min)
MV-1S	3	7	-	-	-	-
MV-2S/1	2	10	4	5	-	-
MV-2S/2	3	5	4	3	-	-
MV-2S/3	2	15	4	5	-	-
MV-2S/4	2	10	4	7	-	-
MV-2S/5	3	5	4	5	-	-
MV-3S/1	2	10	3	5	4	3
MV-3S/2	2	10	3	5	4	5
MV-3S/3	2	10	3	7	4	3
MV-3S/4	2	10	3	3	4	7
MV-3S/5	2	15	3	5	4	5

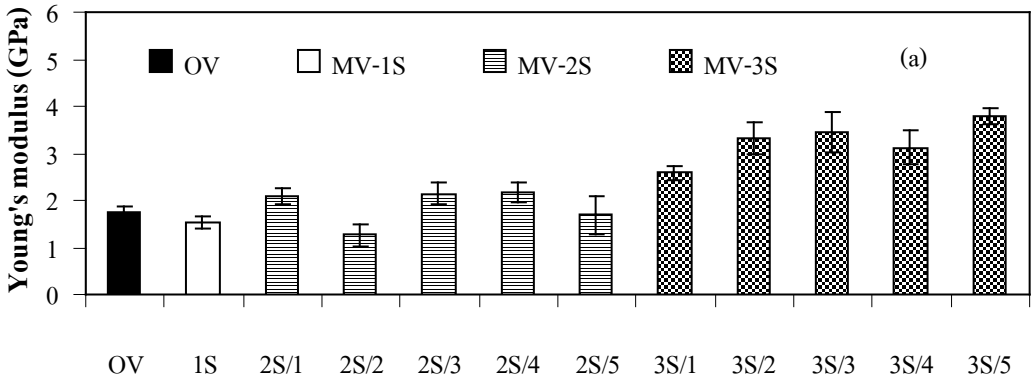
4.4.1 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

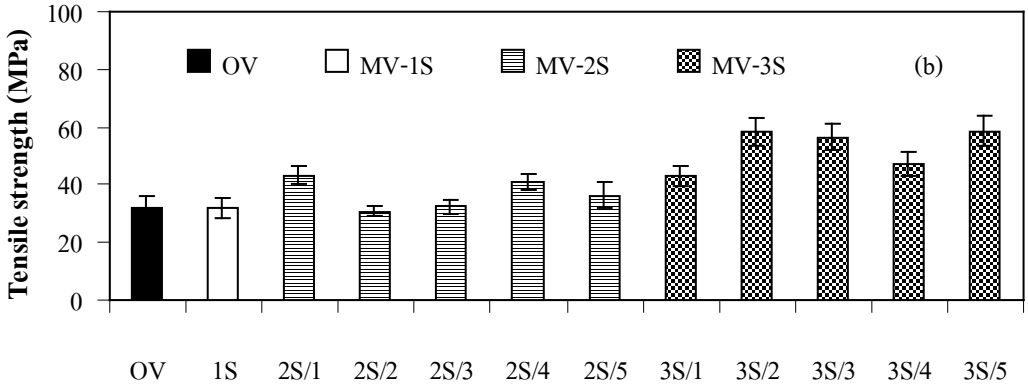
ตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II ผลการทดลองทำให้ทราบว่า การอบแบบ 3S ให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึงสูงกว่าการอบแบบ 2S และ OV ตามลำดับ โดยการอบแบบ 3S สภาวะอบที่ให้ค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึงสูงสุดคือ 3S/5 รองลงมาคือ 3S/3 และ 3S/2 ส่วนการอบแบบ 2S สภาวะอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ 2S/1 สำหรับค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าสภาวะอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ 2S/1 รองลงมาคือ 2S/2, 3S/1 และ OV ตามลำดับ

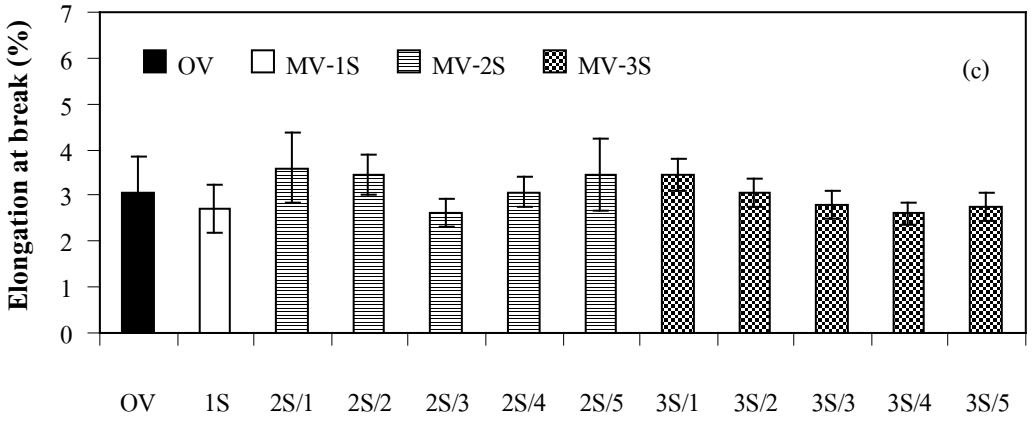
จากการทดลองพบว่าการอบแบบ 3S ให้ค่าการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงที่น่าพอใจ โดยเฉพาะค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อแรงดึง สภาวะอบที่ให้สมบัติการต้านแรงดึงที่สูงคือ 3S/2, 3S/3 และ 3S/5

ตารางที่ 4.13 การทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

สูตร II	มอดุลัสของยัง (GPa)		ความคงทนต่อแรงดึง (MPa)		ความเครียด ณ จุดขาด (%)	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	S.D.
OV	1.75	0.12	31.93	4.44	3.07	0.76
MV-1S	1.53	0.14	31.92	3.62	2.71	0.54
MV-2S/1	2.09	0.17	43.30	3.22	3.61	0.77
MV-2S/2	1.26	0.24	30.86	1.89	3.47	0.43
MV-2S/3	2.15	0.23	32.47	2.43	2.64	0.31
MV-2S/4	2.18	0.21	40.90	2.89	3.07	0.34
MV-2S/5	1.69	0.41	36.29	4.43	3.46	0.80
MV-3S/1	2.58	0.15	43.38	3.48	3.46	0.37
MV-3S/2	3.32	0.34	58.20	4.79	3.08	0.31
MV-3S/3	3.45	0.44	56.44	4.37	2.79	0.31
MV-3S/4	3.12	0.36	47.32	4.01	2.61	0.23
MV-3S/5	3.80	0.17	58.54	5.06	2.74	0.31







รูปที่ 4.12 สมบัติการต้านแรงดึงของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II : (a) มอดุลัสของยัง; (b) ความคงทนต่อแรงดึง; (c) ค่าความเครียด ณ จุดขาด

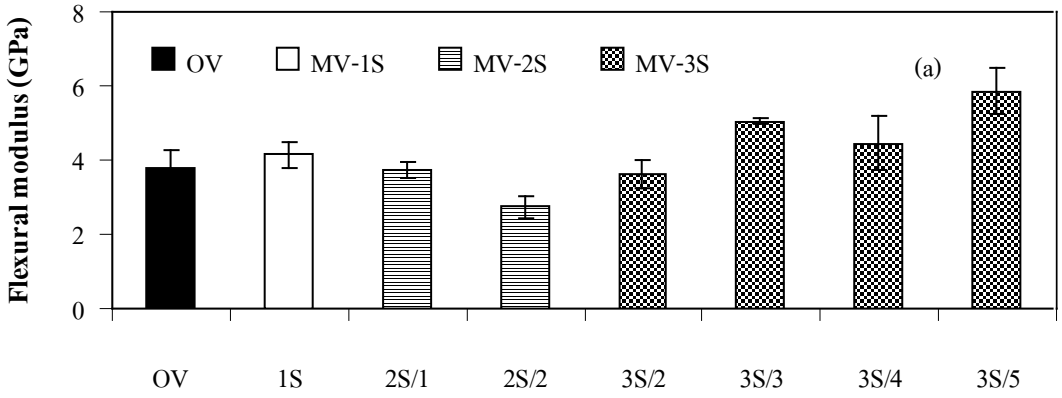
4.4.2 สมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

ตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบสมบัติการการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II ผลการทดลองทำให้ทราบว่าการอบแบบ 3S ให้ค่ามอดุลัสสูงกว่ากาอบแบบอื่น โดยสภาวะอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ 3S/5 รองลงมาคือ 3S/3, 3S/4, 1S, 2S/1 และ OV ตามลำดับ ส่วนค่าความคงทนต่อการดัดโค้ง สภาวะอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ 3S/3 รองลงมาคือ 3S/5, 2S/1, 1S และ OV ตามลำดับ สำหรับค่าความเครียด ณ จุดขาด พบว่าสภาวะอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ 2S/1 และ 2S/2 รองลงมาคือ 3S/3, OV และ 1S ตามลำดับ

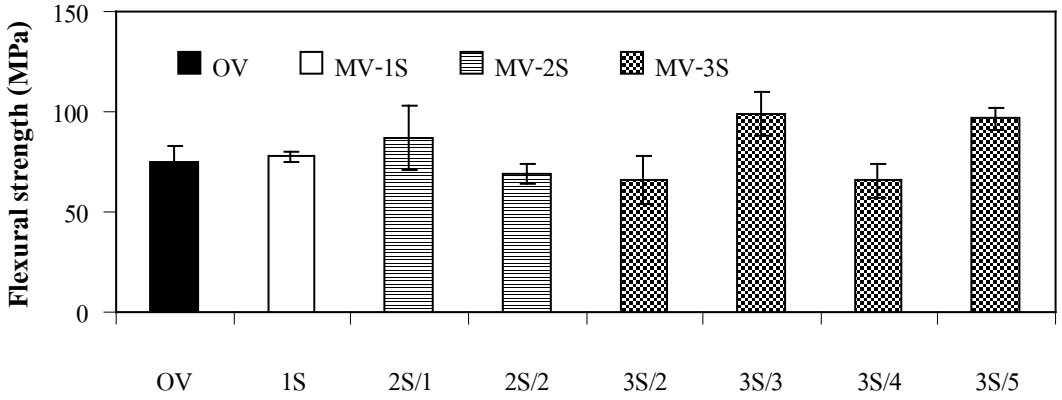
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

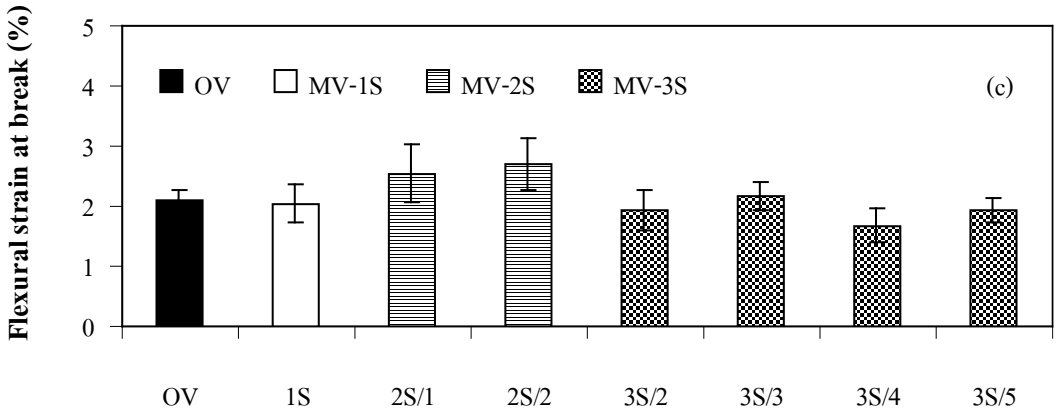
สูตร II	มอดุลัส (GPa)		ความคงทนต่อการดัดโค้ง (MPa)		ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด (%)	
	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย	เฉลี่ย	S.D.	เฉลี่ย
OV	3.77	0.52	75.08	8.06	2.10	0.16
MV-1S	4.14	0.36	77.92	2.55	2.05	0.31
MV-2S/1	3.73	0.22	87.35	16.04	2.54	0.48
MV-2S/2	2.73	0.29	68.76	5.08	2.70	0.43
MV-3S/2	3.63	0.38	65.92	12.11	1.93	0.34
MV-3S/3	5.05	0.10	98.66	10.84	2.16	0.23
MV-3S/4	4.45	0.74	65.54	8.47	1.68	0.29
MV-3S/5	5.86	0.62	96.61	5.40	1.93	0.20

จากผลการทดลองให้ผลคล้ายกับการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงคือ การอบแบบ 3S ให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจทั้งค่ามอดุลัสและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าการอบแบบ OV สภาวะอบที่ให้สมบัติที่สูงคือ 3S/3 และ 3S/5


Flexural modulus (GPa)
8
6
4
2
0
OV
MV-1S
MV-2S
MV-3S
(a)
OV
1S
2S/1
2S/2
3S/2
3S/3
3S/4
3S/5

(b)


Flexural strength (MPa)
150
100
50
0
OV
MV-1S
MV-2S
MV-3S
OV
1S
2S/1
2S/2
3S/2
3S/3
3S/4
3S/5



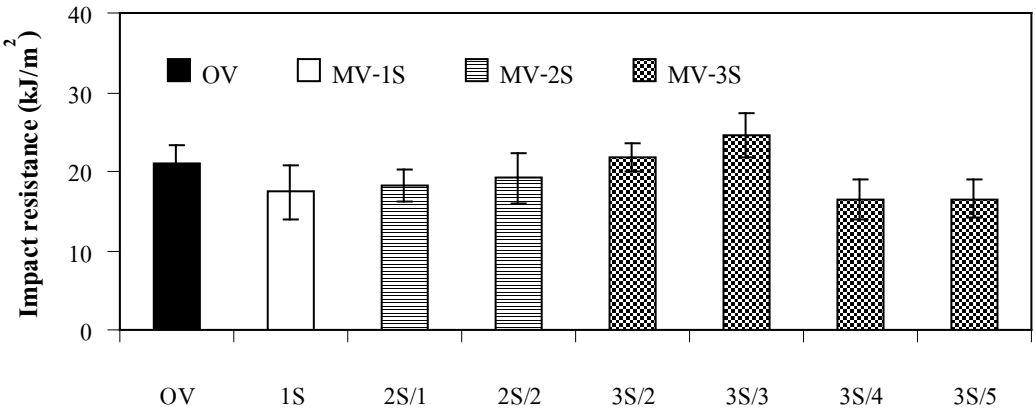
รูปที่ 4.13 สมบัติการดัดโค้งของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II : (a) มอดุลัส; (b) ความคงทนต่อการดัดโค้ง; (c) ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด

4.4.3 สมบัติการต้านทานแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

ตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II ผลการทดลองทำให้ทราบว่า การอบแบบ 3S ให้การคงทนต่อการกระแทกสูงกว่าการอบแบบอื่น โดยสภาวะอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ 3S/3 รองลงมาคือ 3S/2, OV, 2S/2, 2S/1 และ 1S จากการทดลองผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการอบแบบ 3S ยังคงให้สมบัติที่สูงกว่าการอบแบบอื่นสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงและสมบัติการดัดโค้ง

ตารางที่ 4.15 การทดสอบการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

สูตร	การต้านทานแรงกระแทก (kJ/m^2)	S.D.
OV	21.00	2.32
MV-1S	17.41	3.43
MV-2S/1	18.24	2.11
MV-2S/2	19.13	3.19
MV-2S/2	21.76	1.84
MV-2S/3	24.50	2.79
MV-2S/4	16.41	2.48
MV-2S/5	16.55	2.37



รูปที่ 4.14 สมบัติการต้านแรงกระแทกของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I และ II พบว่าทั้งสองสูตรให้ผลการทดสอบในทิศทางเดียวกัน คือการอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟให้ค่าสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่าการอบในเตาอบความร้อน สำหรับอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I พบว่าการอบแบบ 2S ให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่าการอบแบบอื่น ส่วนอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II พบว่าการอบแบบ 3S ให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่าการอบแบบอื่น โดยทั้งสูตร I และ II ต่างให้สมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น ชิ้นงานที่ได้จากการอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานที่อบในเตาอบความร้อน คือผิวหน้าเรียบไม่เป็นคลื่น สีและความใสใกล้เคียงกับชิ้นงานที่อบในเตาอบความร้อน สาเหตุที่การอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทให้สูงขึ้น ในเบื้องต้นสันนิษฐานว่าน่าเป็นเพราะการอบแบบหลายระดับความร้อนใช้เวลาอบนานกว่าการอบแบบระดับความร้อนเดียว อาจจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่สมบูรณ์กว่า และอีกปัจจัยที่คาดว่าเป็นสาเหตุที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล คือการยึดเกาะระหว่าง อีพ๊อกซีและเส้นใยแก้ว เนื่องจากการอบแบบหลายระดับความร้อนใช้เวลานานทำให้การกระจายความร้อนทั่วถึง เส้นใยแก้วได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงทำให้ส่งผ่านความชื้นที่เส้นใยแก้วได้ดี เส้นใยแก้วจึงแห้งทำให้การยึดเกาะระหว่างอีพ๊อกซีและเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้น ช่วยทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น สำหรับเหตุผลที่กล่าวมานั้นเป็นเพียงข้อสันนิษฐาน ในการจะอธิบายถึงสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นจำเป็นต้องทดสอบลักษณะเฉพาะของอีพ๊อกซีทั้งสูตร I และ II เพิ่มเติม และเพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานเกี่ยวกับการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วที่ว่า การอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วอย่างที่

ตั้งสมมติฐานไว้หรือไม่ จึงนำชิ้นทดสอบของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิททั้งสูตร I และ II ที่ผ่านการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

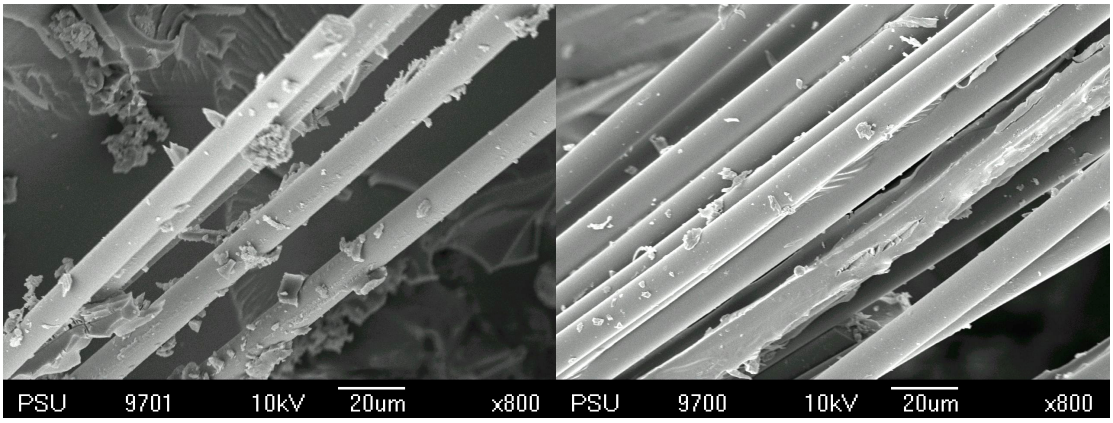
จากการศึกษาการเสียสภาพแบบยึดเกาะ (adhesive failure) และการเสียสภาพของตัวเอง (cohesive failure) พบว่าการศึกษาการเสียสภาพแบบยึดเกาะเกิดการแยกออกของเส้นใยแก้วและอีพ๊อกซีที่บริเวณอินเตอร์เฟสเนื่องจากความแข็งแรงของการยึดเกาะต่ำ ส่วนการเสียสภาพของตัวเองเกิดขึ้นเมื่อคอมโพสิทมีความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับอีพ๊อกซีมีค่ามากกว่าความแข็งแรงระหว่างอีพ๊อกซีทำให้อีพ๊อกซีเกาะตามเส้นใยแก้วที่เสริมแรง เมื่อคอมโพสิท ถูกทำให้เสียสภาพจากแรงกล (อิทธิพล, 2544) จากที่กล่าวมานั้นแสดงว่าถ้ามีอีพ๊อกซีเกาะติดที่ผิวของเส้นใยแก้วเป็นปริมาณมากแสดงว่ามีการยึดเกาะที่ดีระหว่างอีพ๊อกซีกับเส้นใยแก้ว ในทางตรงข้ามกันถ้ามีอีพ๊อกซีติดที่ผิวของเส้นใยแก้วเป็นปริมาณน้อยแสดงว่ามีการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างอีพ๊อกซีกับเส้นใยแก้ว โดยปริมาณการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วสามารถใช้อธิบายสมบัติเชิงกลได้

4.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิททั้งสูตร I

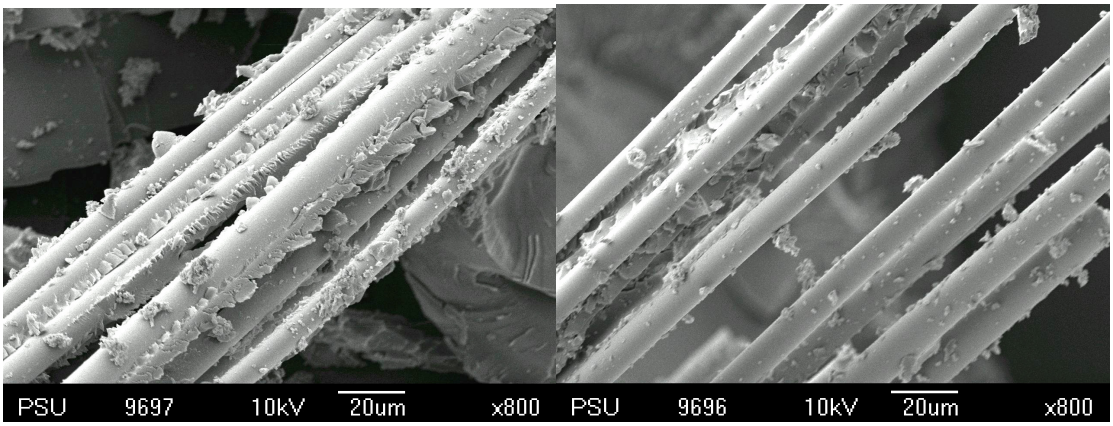
ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I แสดงในรูปที่ 4.15 จากการวิเคราะห์ชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงพบว่าปริมาณการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วของการอบแบบหลายระดับความร้อนมีปริมาณมากกว่าการอบแบบ 1S และ OV โดยการอบแบบ 2S (2S/3) มีปริมาณการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วมากที่สุดรองลงมา คือ 3S (3S/3), OV และ 1S ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I อบแบบหลายระดับความร้อนมีปริมาณการยึดติดหนาแน่นกว่าการอบแบบ 1S และ OV ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่คิดไว้และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ว่าคลื่นไมโครเวฟทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินดีกว่าการอบด้วยความร้อน เพราะคลื่นไมโครเวฟทำให้การส่งผ่านความร้อนที่ผิวเส้นใยแก้วสู่ภายนอกดีกว่าทำให้เส้นใยแก้วแห้งกว่าช่วยให้การยึดเกาะที่ผิวเส้นใยแก้วสูงกว่าระบบที่ใช้ความร้อน (Fang and Scola, 1999)

4.5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิททั้งสูตร II

ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II แสดงในรูปที่ 4.16 จากการวิเคราะห์ชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง พบว่าปริมาณการยึดเกาะที่ผิวของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วของการอบแบบหลายระดับความร้อนมีปริมาณมากกว่าการอบแบบ 1S และ OV เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ของสูตร I โดยการอบแบบ 3S (3S/3) มีปริมาณการยึดติดของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วมากที่สุด รองลงมา คือ 2S (2S/1), OV และ 1S ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II ให้ผลการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์ของคอมโพสิทสูตร I คือการอบแบบหลายระดับความร้อนมีปริมาณการยึดติดมากกว่าการอบแบบ 1S และ OV ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่คิดไว้ และเพื่อยืนยันสมมติฐานที่ว่าการอบแบบหลายระดับความร้อนสามารถเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซีนั้น จึงนำอีพ๊อกซีที่อบแบบหลายระดับความร้อนไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของอีพ๊อกซี ที่อบแบบระดับความร้อนเดียวและแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟของทั้งสองสูตร

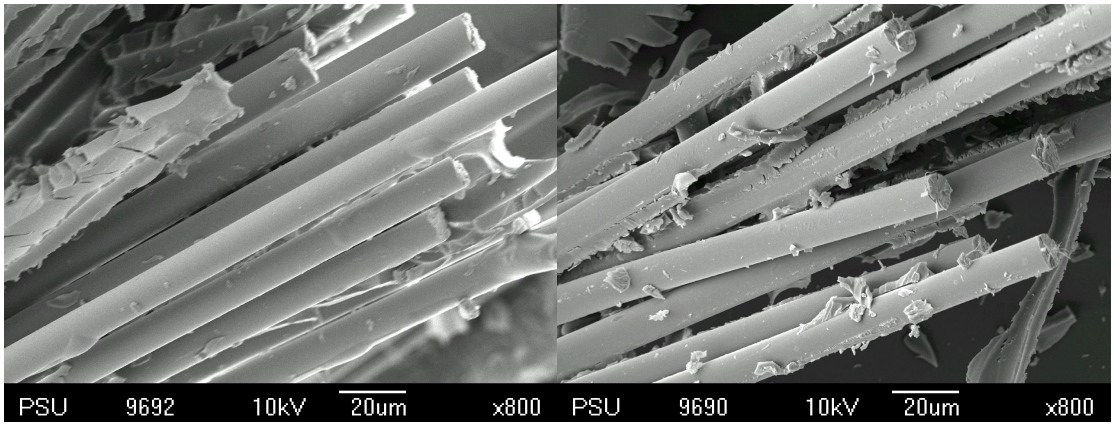


(a) (b)

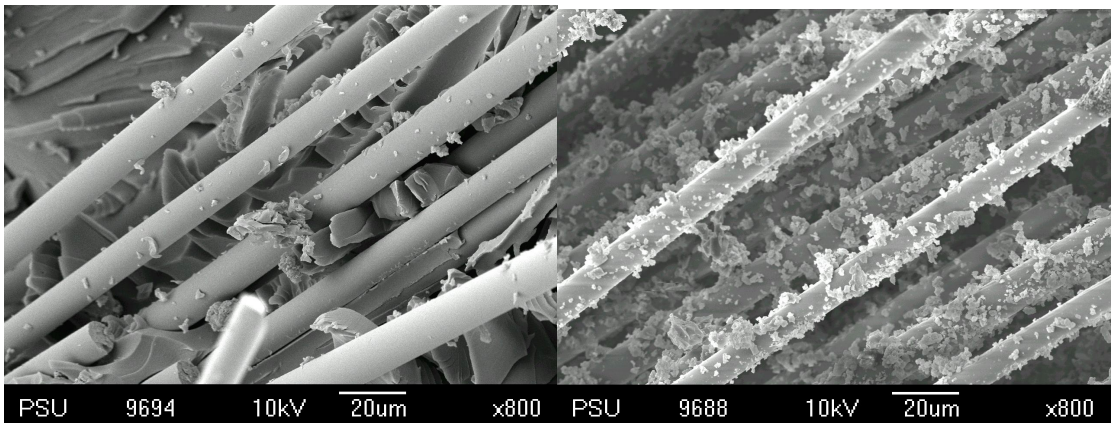


(c) (d)

รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I: (a) อบแบบ OV; (b) อบแบบ 1S; (c) อบแบบ 2S; (d) อบแบบ 3S



(a) (b)



(c) (d)

รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร II: (a) อบแบบOV; (b) อบแบบ1S; (c) อบแบบ 2S; (d) อบแบบ3S

4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

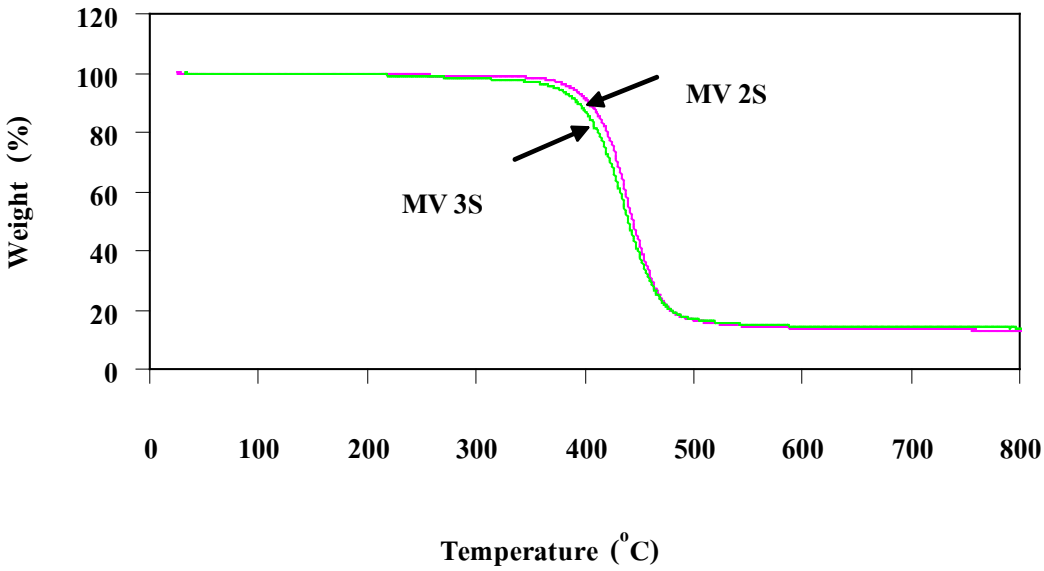
ค่าความเสถียรทางความร้อนนั้นสามารถบอกถึงการปริมาณการเชื่อมขวางพันธะที่สมบูรณ์กว่าของอีพ๊อกซี ดังนั้นการที่อีพ๊อกซีมีค่าความเสถียรทางความร้อนสูงนั้นแสดงว่ามีการเชื่อมขวางของพันธะสูงด้วยเพราะการเชื่อมขวางพันธะส่วนใหญ่เป็นพันธะโควาเลนท์ ซึ่งมีความแข็งแรงสูงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเพื่อทำลายพันธะและการที่มีปริมาณการเชื่อมขวางของพันธะสูง ส่งผลให้ค่า T_g สูงขึ้นด้วยเพราะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้อย่างจำกัดซึ่งส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลบางค่าของอีพ๊อกซีสูงด้วย (เสาวรจน์, 2541)

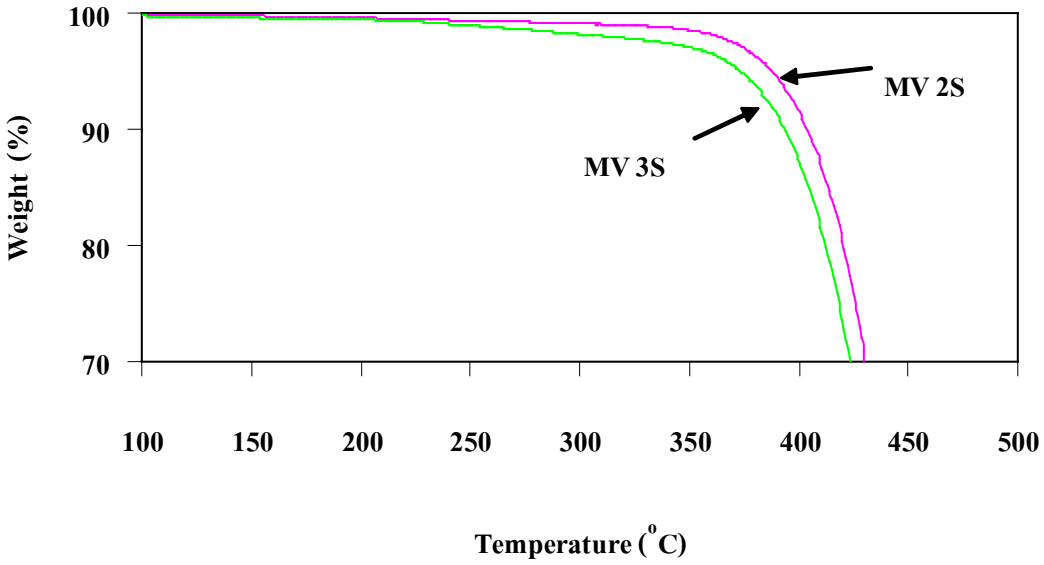
4.6.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของอีพ๊อกซีสูตร I

สำหรับอีพ๊อกซีสูตร I ทำการวิเคราะห์อีพ๊อกซีที่อบแบบ 3S (3S/3) เปรียบเทียบกับ 2S (2S/3) จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่าอบแบบ 3S เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิก่อน 200°C โดยสังเกตจากร้อยละของน้ำหนักที่เริ่มลดลงส่วน 2S เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิหลังจาก 300°C จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า 2S มีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่าการ 3S ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการอบแบบ 2S มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะมากกว่าการอบแบบ 3S หรือจากการที่การอบแบบ 3S ใช้เวลาอบนานกว่าการอบแบบ 2S ทำให้พันธะโควาเลนท์บางส่วนถูกทำลายไประหว่างการอบ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกลของสูตร I คือการอบแบบ 2S ให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ที่สูงกว่าการอบแบบ 3S ผลการวิเคราะห์ TGA ของอีพ๊อกซีสูตร I แสดงในรูปที่ 4.17

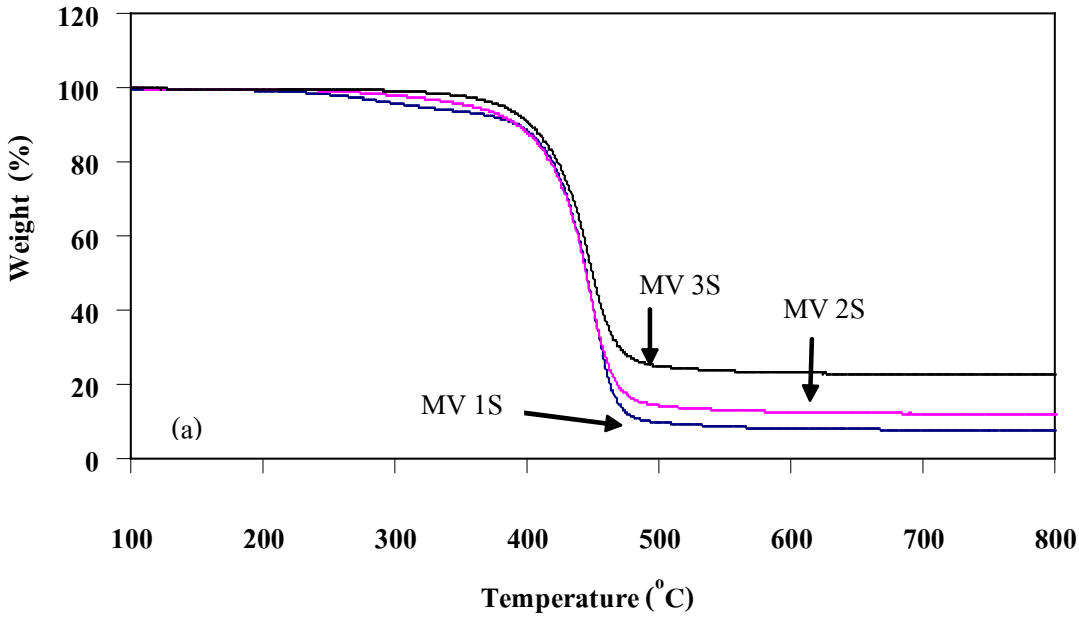
4.6.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของอีพ๊อกซีสูตร II

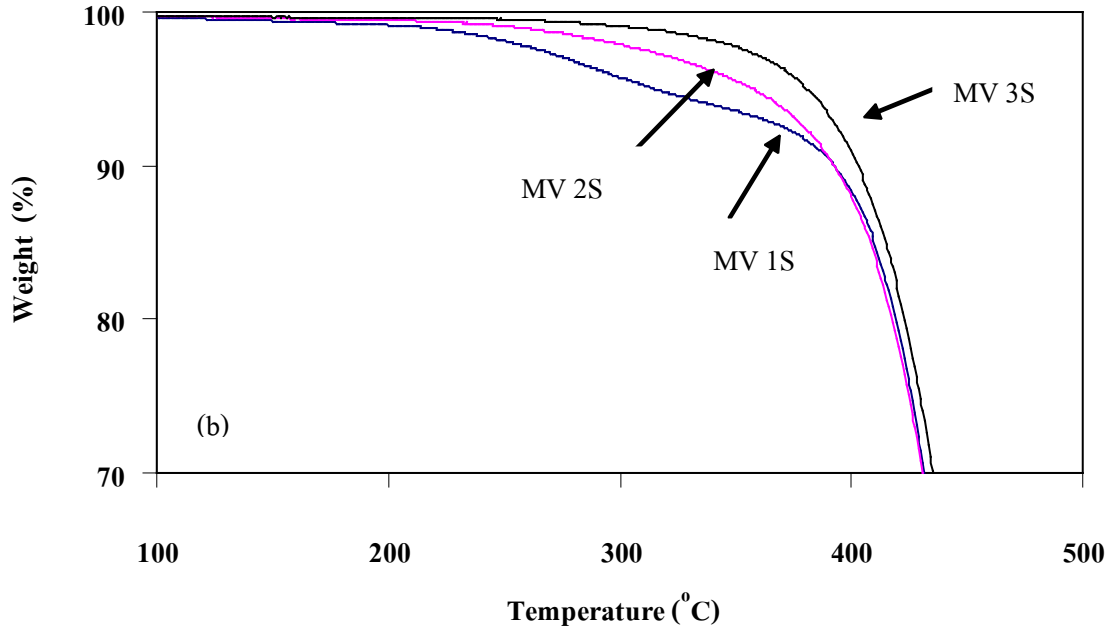
สำหรับอีพ๊อกซีสูตร II ทำการวิเคราะห์อีพ๊อกซีเปรียบเทียบระหว่างการอบแบบ 1S, 2S (2S/1) และ 3S (3S/3) จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่าอบแบบ 3S มีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่า 2S และ 1S ตามลำดับ โดย 2S และ 1S เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิก่อน 200°C ส่วน 2S เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิหลังจาก 300°C จากการสังเกตพบว่า 1S เกิดการสลายตัว 2 ขั้น โดยที่การสลายตัวในขั้นแรกน้ำหนักลดลงประมาณ 5% น้ำหนักที่หายไปในขั้นตอนแรกน่าจะเป็นโมเลกุลที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซี ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์และจากผลการวิเคราะห์ TGA แสดงให้เห็นว่าการอบแบบ 3S มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะมากกว่า 2S และ 1S ตามลำดับการวิเคราะห์ TGA ของอีพ๊อกซีสูตร II แสดงในรูปที่ 4.18


120
100
80
60
40
20
0
Weight (%)
MV 2S
MV 3S
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Temperature (°C)


100
90
80
70
Weight (%)
MV 2S
MV 3S
100
150
200
250
300
350
400
450
500
Temperature (°C)

รูปที่ 4.17 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นของอีพ๊อกซีสูตร I: (b) เป็นรูปขยายของรูป (a)





รูปที่ 4.18 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นของอีพ๊อกซีสูตร II: (b) เป็นรูปขยายของรูป (a)

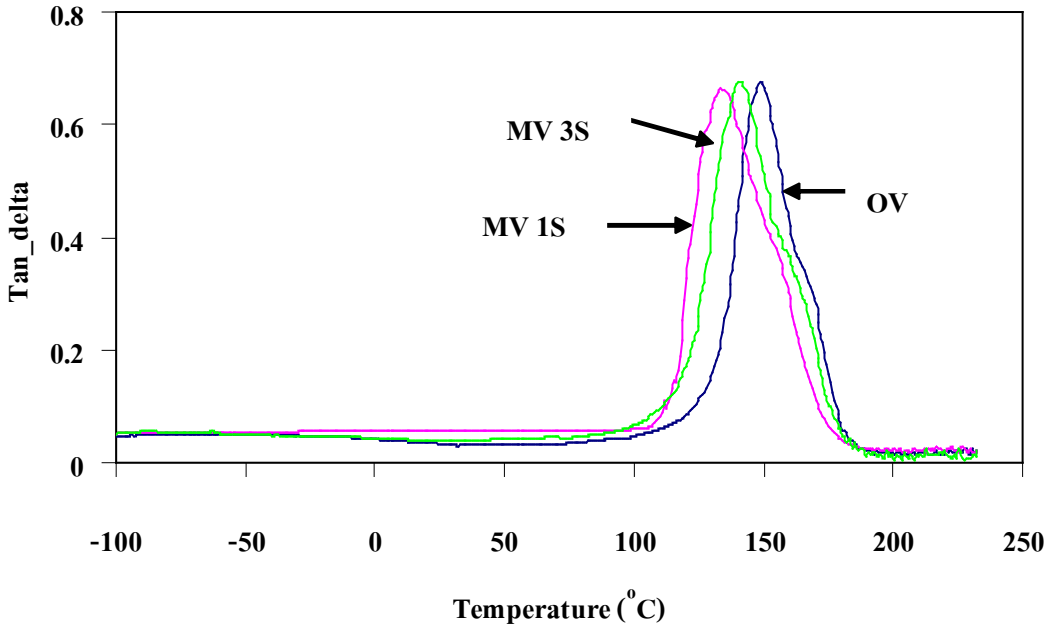
จากการศึกษาความเสถียรทางความร้อนของอีพ๊อกซีทั้งสูตร I และ II ด้วยเทคนิค TGA ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน คือการอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟมีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่าการอบแบบระดับความร้อนเดียว ซึ่งก็แสดงว่าการอบแบบหลายระดับความร้อนช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซี ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแต่ละสูตร เช่น ชนิดของสารช่วยให้แข็งและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย โดยแต่ละสูตรก็จะให้โครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสูตร I อบแบบ 2S มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าการอบแบบ 3S ในขณะที่สูตร II อบแบบ 3S มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าการอบแบบ 2S

เพื่อยืนยันให้แน่ใจว่าการอบแบบหลายระดับความร้อนช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะได้จริง จึงนำอีพ๊อกซีสูตร II ไปวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์เพื่อศึกษาค่า T_g ที่ได้

4.7 ผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ทำการทดลองเฉพาะสูตร II โดยเปรียบเทียบค่า T_g ระหว่างการอบแบบ 1S, 3S (3S/3) และ OV จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการอบแบบ OV ให้ค่า T_g สูงที่สุดรองลงมาคือ 3S และ 1S ตามลำดับ โดย OV มีค่า T_g ประมาณ 150 ^{o}C 3S และ 1S มีค่า T_g ประมาณ 140 ^{o}C และ 130 ^{o}C ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า 3S มีค่า T_g มากกว่า 1S ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ที่ว่า 3S มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะมากกว่า 1S และ 3S ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า 1S ด้วย ผลวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์แสดงในรูปที่ 4.19

วัสดุที่มีค่า T_g สูงควรมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าวัสดุที่มีค่า T_g ต่ำเพราะการที่ค่า T_g สูงอาจเนื่องมาจากมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้นมีปริมาณการเชื่อมขวางของพันธะมากขึ้นซึ่งจะทำให้มีสมบัติเชิงกลบางประการสูงขึ้นด้วย แต่จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า OV มีค่า T_g สูงกว่า 3S ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้ คือผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า 3S ให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่า OV ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสำหรับอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทนั้น ปัจจัยที่ส่งผลถึงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีหลายปัจจัยไม่สามารถพิจารณาเฉพาะค่า T_g เพียงอย่างเดียว ต้องพิจารณาปัจจัยอื่นด้วย เช่น การยึดเกาะระหว่างอีพ๊อกซีและเส้นใยแก้วที่ใช้เสริมแรง ปริมาณฟองอากาศ ช่องว่างระหว่างเส้นใยซึ่งมีผลมากต่อสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท สูตร II สามารถยืนยันได้ว่าการอบแบบ 3S (3S/3) มีปริมาณการยึดติดระหว่างอีพ๊อกซีและเส้นใยแก้วมากกว่า OV อย่างชัดเจน และจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีบางรายงานที่ปรากฏว่า T_g ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟสูงกว่าการอบด้วยเตาอบหรือมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เช่นโบอี (Boey and Yap, 2001) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิ T_g ของอีพ๊อกซีโดยมีสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน พบว่าอุณหภูมิ T_g ที่ได้จากการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบด้วยความร้อน ซึ่งสอด คล้องกับในกรณีที่เป็นอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่ทดลองโดยไบ (Bai and Djafari, 1995) แต่มีบางรายงานพบว่า T_g ที่ได้จากการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกับการอบด้วยความร้อน เช่น เอลาซาร์ด (Alazard *et al,* 2003) ได้ทำการศึกษาการอบอีพ๊อกซีที่มีสารทำให้แข็งกลุ่ม เอมีนระบบ DGEBA/DDM จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ T_g ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาอบไมโคร เวฟเทียบเท่าได้กับการอบด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของโบอี (Boey and Yap, 2001)



รูปที่ 4.19 ค่า T_g ของอีพ๊อกซีสูตร II จากการวิเคราะห์ด้วยทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

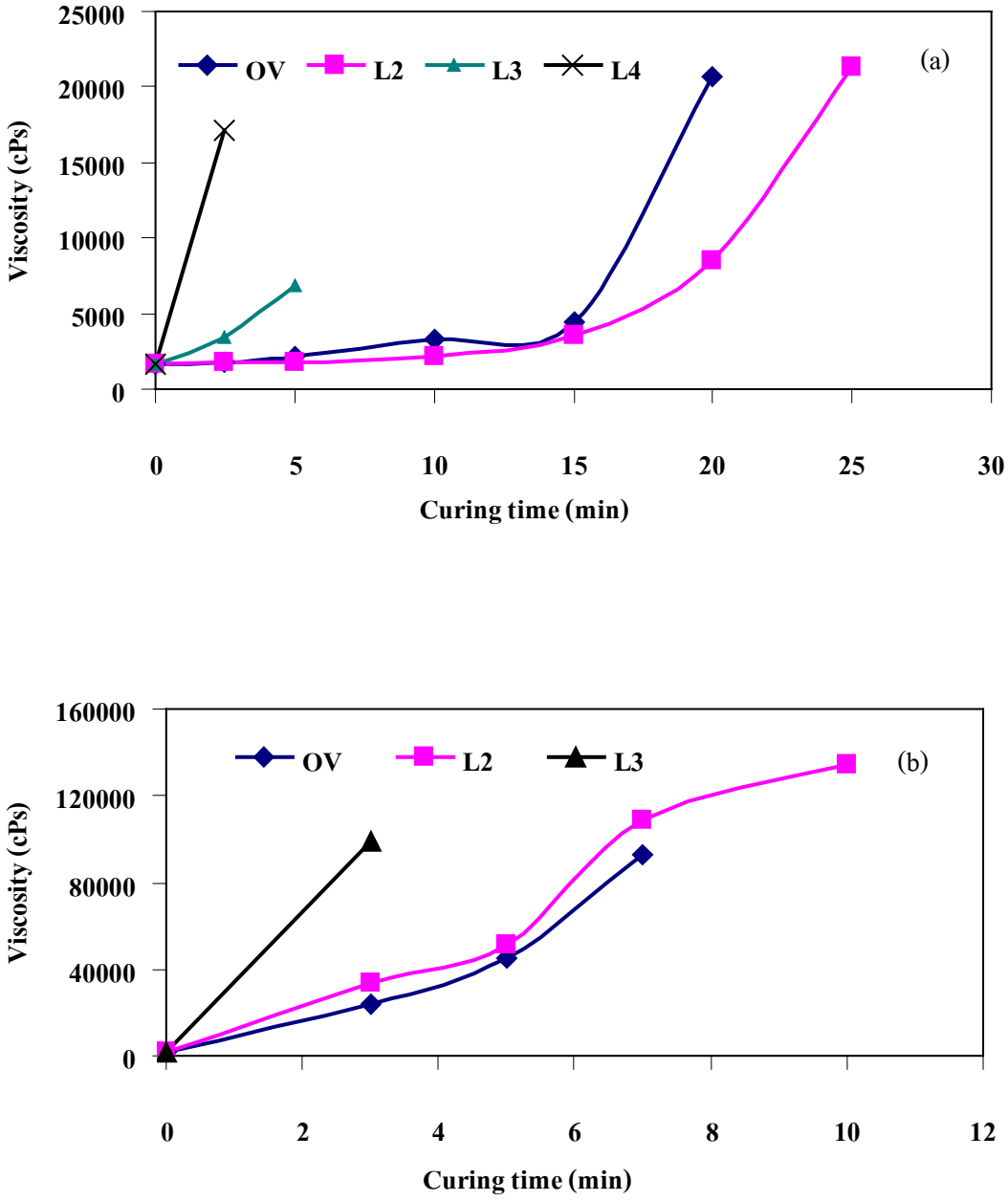
จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA และ DMTA แสดงให้เห็นว่าการอบแบบหลายระดับความร้อนช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ๊อกซีที่อบแบบระดับความร้อนเดียวในเตาอบไมโครเวฟได้ แต่จากการทดลองพบว่าการอบแบบหลายระดับความร้อนไม่เพียงแค่ช่วยให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางการกายภาพด้วย เช่น ความเรียบที่ผิว ความใส มีลักษณะคล้ายอีพ๊อกซีที่ได้จากการอบด้วยเตาอบความร้อน จึงทำให้เกิดการตั้งสมมติฐานขึ้นว่าการอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟน่าจะมีปัจจัยบางอย่างที่คล้ายกับการอบด้วยเตาอบความร้อน และจากความรู้ที่ว่าการให้ความร้อนจากการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟและเตาอบความร้อนต่างกันส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของอีพ๊อกซีต่างกัน ซึ่งน่าจะส่งผลถึงความหนืดและอุณหภูมิของอีพ๊อกซีในระหว่างการอบของทั้งสองระบบด้วย

4.8 ผลการทดสอบความหนืดและอุณหภูมิของอีพ๊อกซีที่ระดับความร้อนต่างๆเมื่อเวลาอบเพิ่มขึ้นจากการอบในเตาอบไมโครเวฟและเตาอบความร้อน

4.8.1 ผลการวัดความหนืดของอีพ๊อกซีที่ระดับความร้อนต่างๆเมื่อเวลาอบเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.20(a) เป็นผลการวัดความหนืดของอีพ๊อกซีสูตร I ที่อบด้วยระดับความร้อน

2–4 (L2-L4) และอบด้วยเตาอบควมร้อน (OV) เมื่อเวลาอบเพิ่มขึ้น ผลการทดลองอธิบายได้ว่ากา รอบแบบ OV ที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าในช่วง 15 min แรกอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดต่ำมาก ความหนืดของอีพ๊อกซีที่วัดได้ในช่วง 15 min แรกของการอบไม่เกิน 5,000 cPs แต่จากนาทีที่ 15 จนถึงนาทีที่ 25 อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดของอีพ๊อกซีสูงมาก ความหนืดของอีพ๊อกซีเพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็ว ที่เวลาอบ 25 min วัดความหนืดได้มากกว่า 20,000 cPs สำหรับการอบในเตา ไมโครเวฟเมื่อใช้ระดับความร้อนที่ 2 (L2) จะเห็นว่าในช่วง 15 min แรกอัตราการเพิ่มขึ้นของความ หนืดต่ำมาก ความหนืดของอีพ๊อกซีสูตร I ที่วัดได้ในช่วง 15 min แรกของการอบน้อยกว่า 5,000 cPs แต่จากนาทีที่ 15 จนถึงนาทีที่ 20 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดสูงมาก ความหนืดของอี พ๊อกซีที่เวลาอบ 20 min วัดความหนืดได้มากกว่า 20,000 cPs เมื่อใช้ระดับความร้อนที่ 3 (L3) พบว่า ความหนืดของอีพ๊อกซีมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูง วัดความหนืดได้ประมาณ 7,500 cPs ในเวลาเพียง 5 min ในขณะที่เมื่อใช้ระดับความร้อนที่ 4 (L4) พบ ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดสูงกว่า L3 คือ วัดความหนืดได้ประมาณ 17,500 cPs ในเวลาเพียง 2.5 min ผลการทดลองทำให้ทราบว่าการอบ แบบ OV และ L2 พบว่ามีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของความหนืดของอีพ๊อกซีที่คล้ายกันคือ ในช่วง 15 min แรกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดต่ำมาก หลังจากนาทีที่ 15 อัตราการเพิ่มขึ้นของความ หนืดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว รูปที่ 4.20(b) เป็นผลการวัดความหนืดของอีพ๊อกซีสูตร II การอบแบบ OV ในช่วง 5 min แรกอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดค่อนข้างต่ำ ที่เวลาอบ 5 min วัดความหนืดได้ ประมาณ 40,000 cPs หลังจากนาทีที่ 5 อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดสูงขึ้นเล็กน้อย ที่เวลาอบ 7 min วัดความหนืดได้ประมาณ 90,000 cPs การอบ ที่ระดับ L2 จะพบว่าที่เวลาอบ 5 min วัดความ หนืดได้ประมาณ 40,000 cPs หลังจากนาทีที่ 5 อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดสูงขึ้นเล็กน้อย ที่ เวลาอบ 7 min วัดความหนืดได้ประมาณ 110,000 cPs ที่เวลาอบ 10 min วัดความหนืดได้ประมาณ 140,000 cPs แต่ที่ L3 ความหนืดของอีพ๊อกซีมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่า L2 และ OV ที่เวลาอบ 2.5 min วัดความหนืดได้ประมาณ 100,000 cPs ผลการทดลองวัดความหนืดที่เวลาอบต่างๆของสูตร II พบว่าการอบแบบ OV และ L2 มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของความหนืดของอีพ๊อกซีที่คล้ายกัน



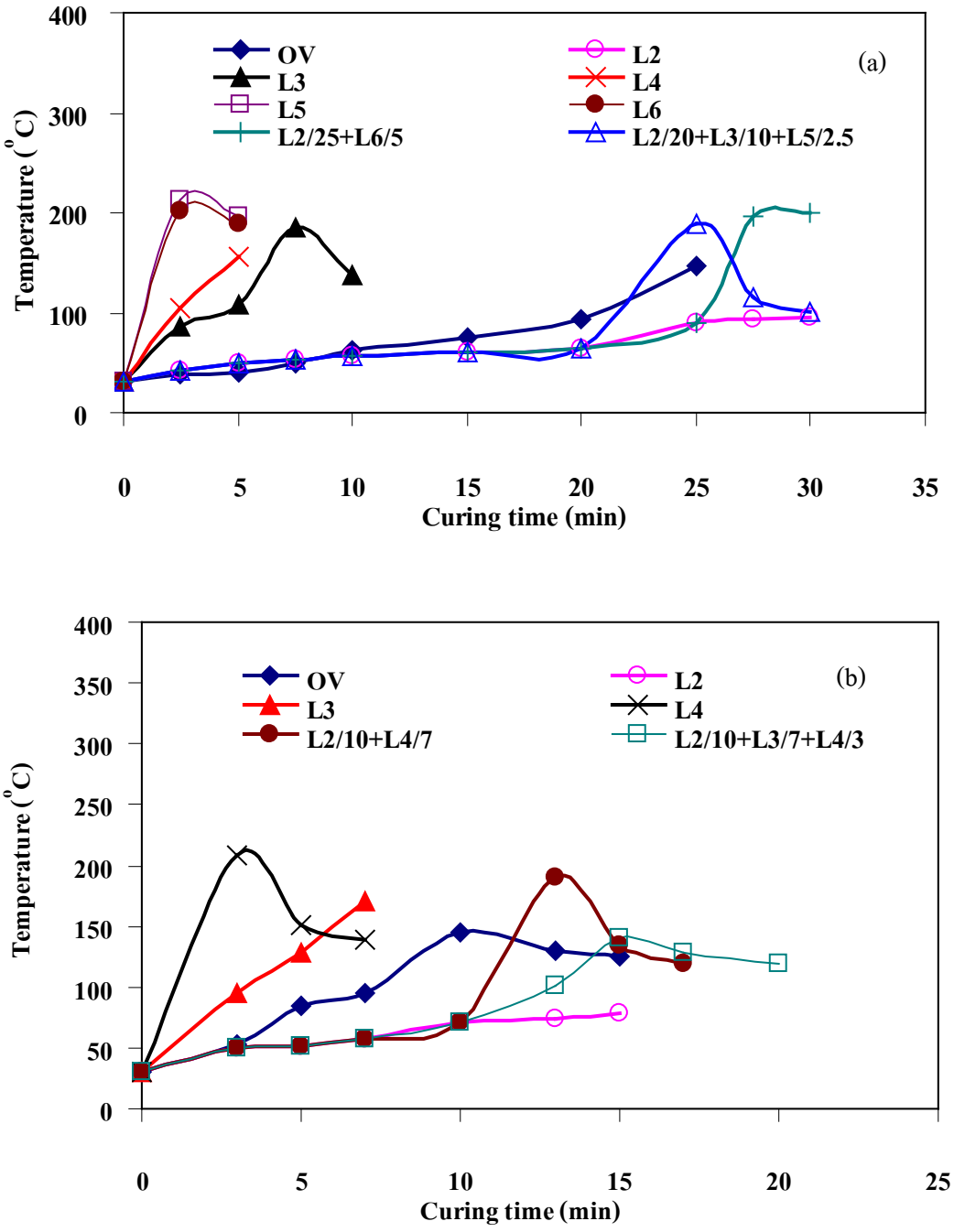
รูปที่ 4.20 ความหนืดที่เวลาอบต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ระดับความร้อนต่างๆ กับเตาอบความร้อนที่ 150 °C; (a) อีพ๊อกซีสูตร I; (b) อีพ๊อกซีสูตร II

4.8.2 ผลการวัดอุณหภูมิของอีพ๊อกซีที่ระดับความร้อนต่างๆเมื่อเวลาอบเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.21(a) เป็นผลการวัดอุณหภูมิของอีพ๊อกซีสูตร I ที่อบแบบ 1S, 2S และ3S โดยการอบแบบ 1S ทดสอบที่ระดับความร้อนที่ 3-6 (L3-L6) อบแบบ 2S ใช้สภาวะอบ 2S/3 (L2-

25+L6-5) อบแบบ 3S ใช้สภาวะอบ 3S/3 (L2-20+L3-10+L5-2.5) จากผลการทดสอบมีแนวโน้มคล้ายการทดสอบวัดความหนืด คือวัดการอบที่ L3-L6 พบว่าจะเกิดความร้อนสูงในเวลาอันสั้น เมื่อเวลาผ่านไป 2.5 min พบว่าอุณหภูมิสูงประมาณ 200°C และ 220°C สำหรับ L5 และ L6 ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไป 5 min พบว่าอุณหภูมิสูงประมาณ 110 °C และ 150°C สำหรับ L3 และ L4 ในขณะที่การอบแบบ 2S และ 3S มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคล้ายกับ OV โดยช่วง 20 min แรก อุณหภูมิไม่เกิน 70°C หลังจากนาทีที่ 20 พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 150°C และ 190°C ที่เวลา 25 min สำหรับ OV และ 3S ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 200°C ที่เวลา 27.5 min ผลการวัดอุณหภูมิของอีพ๊อกซีสูตร II พบว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคล้ายกับอีพ๊อกซีสูตร I และสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.21(b) โดยการอบแบบ 1S ทดสอบที่ระดับความร้อนที่ 3-4 (L3-L4) อบแบบ 2S ใช้สภาวะอบ 2S/1 (L2-10+L4-7) อบแบบ 3S ใช้สภาวะอบ 3S/3 (L2-10+L3-7+L4-3)

จากผลการทดลองวัดความหนืดและอุณหภูมิที่เวลาอบต่างๆ พบว่าอีพ๊อกซีทั้งสองสูตรมีแนวโน้มคล้ายกันคือ การอบโดยใช้หลายระดับความร้อนโดยเริ่มจากระดับความร้อนต่ำไปสูงนั้น มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนืดและอุณหภูมิที่เวลาอบต่างๆ คล้ายกับการอบด้วยเตาอบความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่ได้ คือ การอบแบบ 2S และ 3S ด้วยเตาอบไมโครเวฟทั้งอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทสูตร I และ II ให้ลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกับการอบด้วยเตาอบความร้อน เช่น สี ความใส ความเรียบที่ผิว จากการพิจารณาการอบแบบหลายระดับความร้อนของทั้งสองสูตร พบว่าในช่วงแรกความหนืดค่อนข้างต่ำและคงที่ทำให้อีพ๊อกซีมีเวลาที่ไหลแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของเส้นใยแก้วได้อย่างทั่วถึง ฟองอากาศที่เกิดจากการเทอีพ๊อกซีลงเบ้ามีเวลาเคลื่อนที่มาที่ผิวก่อนที่อีพ๊อกซีจะมีความหนืดมากและแข็งตัว ช่วยลดปริมาณการเกิดฟองอากาศและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับอีพ๊อกซี ในขณะที่อบโดยใช้ระดับความร้อนสูงต่อเนื่อง พบว่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาที่สั้นมาก ทำให้อีพ๊อกซีไหลแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของเส้นใยแก้วได้ยากและไม่ทั่วถึงอาจเกิดเป็นฟองอากาศขึ้นระหว่างผิวเส้นใยแก้วและอีพ๊อกซี พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับอีพ๊อกซีก็จะน้อยลง ซึ่งผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดช่วยยืนยันการวิเคราะห์ได้อย่างชัดเจนโดยการอบแบบหลายระดับความร้อนมีการยึดเกาะที่ผิวเส้นใยแก้วมากกว่าการอบแบบ 1 ระดับความร้อน



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิที่เวลาอบต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการอบด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ระดับความร้อนต่างๆ กับเตาอบความร้อนที่ 150 °C; (a) อีพ๊อกซีสูตร I; (b) อีพ๊อกซีสูตร II

4.9 การหาเวลาอบจริงของอีพ๊อกซีที่อบในเตาอบไมโครเวฟ

4.9.1 การวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟ

เนื่องจากเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ตามบ้านเรือน ซึ่งมีการออกแบบมาสำหรับปรุงอาหาร ปริมาณอาหารและลักษณะทางกายภาพของอาหารแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ถ้าหากไม่มีการควบคุมกำลังของเตา จะทำให้มีข้อจำกัดในการปรุงอาหาร ดังนั้นจึงมีการออกแบบเตาอบไมโครเวฟให้สามารถปรุงอาหารได้หลากหลายมากขึ้น เหมาะสมกับสภาพของอาหารที่จะปรุง โดยปกติเตาอบไมโครเวฟจะมีการควบคุมการจ่ายไฟที่จะป้อนไปเลี้ยงหม้อแปลงโดยสั่งผ่านอุปกรณ์ เช่น ตัวรีเลย์ (relays) ที่เป็นตัวควบคุมเพื่อทำการตัดต่อไฟเป็นระยะๆ ตามคาบเวลาที่สั่งจากวงจรควบคุม ส่งผลให้การส่งคลื่นไมโครเวฟออกมายังวัสดุที่ต้องการอบเป็นระยะเวลาตามระดับกำลังที่กำหนดไว้ (สุรพล, 2537) จากการวัดคาบการทำงานของเตาอบไมโครเวฟพบว่า เตาอบไมโครเวฟจะมีช่วงเวลาที่คลื่นไมโครเวฟถูกส่งออกมายังช่องอุ่นอาหารซึ่งจะมีเสียงดัง และช่วงเวลาที่หยุดปล่อยคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะเงียบ ถ้ารวมช่วงเวลาที่ปล่อยคลื่นและหยุดปล่อยคลื่นเรียกว่า “คาบ” จากการทดลอง พบว่าคาบของเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ SANYO® รุ่น 412 EM-X ของทุกๆระดับความร้อน มีเวลาเท่ากับ 17 sec ในแต่ละระดับความร้อนจะมีช่วงปล่อยคลื่นและหยุดปล่อยคลื่นแตกต่างกัน เมื่อระดับความร้อนสูงขึ้นช่วงระยะเวลาปล่อยคลื่นจะมีเวลานานขึ้น ส่วนช่วงหยุดปล่อยคลื่นจะสั้นลง โดยปกติใน 1 คาบเวลา จะต้องมีเวลาที่เป็นบวกและเป็นลบ ถ้าต้องการให้เกิดความร้อนมากที่สุด (ระดับกำลัง 10) วงจรควบคุมจะสั่งให้เป็นบวกมากที่สุด ตัวรีเลย์จะจ่ายไฟเลี้ยงหม้อแปลงตลอดเวลาไม่ตัดไฟเลยตามเวลาที่ตั้งไว้ คือในหนึ่งคาบ (17 sec) เตาอบไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นตลอดทั้ง 17 sec ในทางกลับกันถ้าต้องการให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด (ระดับกำลัง 1) วงจรควบคุมจะสั่งให้เป็นบวกน้อยที่สุด คือ ในช่วงเวลาหนึ่งคาบ 17 sec เตาอบไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นเพียง 2 sec และจะหยุดปล่อยคลื่น 15 sec ซึ่งในคาบต่อไปก็จะเป็นอย่างนี้ต่อไปจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ ผลการทดลองวัดช่วงเวลาการปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความร้อนต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าระยะเวลาการปล่อยคลื่นไมโครเวฟขึ้นกับระดับความร้อนที่ตั้งจากเตาอบไมโครเวฟ ดังนั้นการคำนวณเวลาที่ใช้อบอีพ๊อกซีในเตาอบไมโครเวฟควรคำนวณเฉพาะช่วงเวลาที่เตาไมโครเวฟปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาเท่านั้น

ตารางที่ 4.16 ช่วงเวลาการปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความร้อนต่างๆ ของเตาอบไมโครเวฟ

ระดับความร้อนที่	ใน 1 คาบมี 17 sec	
	ช่วงเวลาที่ปล่อยคลื่นไมโครเวฟ (sec)	ช่วงเวลาที่หยุดปล่อยคลื่นไมโครเวฟ (sec)
1	2	15
2	3	14
3	5	12
4	7	10
5	9	8
6	10	7
7	12	5
8	14	3
9	15	2
10	17	-

สามารถคำนวณหาเวลาที่แท้จริงที่อีพ๊อกซีได้รับคลื่นไมโครเวฟจากการอบในเตาอบ ไมโครเวฟได้จากตัวอย่างการคำนวณดังนี้

วิธีคำนวณ

1. สมมติตั้งระดับความร้อนที่ระดับ 3 โดยตั้งเวลาไว้ 120 sec และจากตารางที่ 4.16 ทำให้ทราบว่า 1 คาบมี 17 sec

   120 ÷ 17 = 7 เศษ 1

   จากค่าที่ได้แสดงว่าใน 120 sec มี 7 คาบ กับ 1 sec

2. จากตารางที่ 4.16 ทำให้ทราบว่าระดับความร้อนที่ 3 ใน 1 คาบ เตาอบไมโครเวฟปล่อยคลื่น 5 sec

   7 x 5 = 35

   35 + 1 = 36 ; บวกเศษ 1 sec

ดังนั้นจะได้ว่าที่ระดับความร้อนที่ 3 ตั้งเวลาไว้ 120 sec เตาอบไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นเพียง 36 sec และสำหรับระดับความร้อนอื่นก็สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน โดยเวลาแท้จริงที่ได้รับคลื่นของอีพ๊อกซีที่สภาวะอบแบบต่างๆได้แสดงในตารางที่ 4.17 และ 4.18

ตารางที่ 4.17 เวลาอบแท้จริงที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟของอีพ๊อกซีสูตร I ที่สภาวะอบต่างๆ

สูตร I	สภาวะอบ	เวลาที่ตั้งจากเตาอบไมโครเวฟ (sec)	เวลาที่เตาอบไมโครเวฟปล่อยคลื่น (sec)
OV	150°C 25 min	1500	
MV-1S	L3-10	600	180
MV-2S/1	L2-20 + L4-5	1500	339
MV-2S/2	L2-25 + L3-5	1800	357
MV-2S/3	L2-25 + L6-5	1800	465
MV-2S/4	L2-20+L3-10	1800	393
MV-3S/1	L2-15+L3-10+L4-5	1800	465
MV-3S/2	L2-20+L3-10+L4-5	2100	519
MV-3S/3	L2-20+L3-10+L5-5	2100	555

ตารางที่ 4.18 เวลาอบแท้จริงที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟของอีพ๊อกซีสูตร II ที่สภาวะอบต่างๆ

สูตร II	สภาวะอบ	เวลาที่ตั้งจากเตาอบไมโครเวฟ (sec)	เวลาที่เตาอบไมโครเวฟปล่อยคลื่น (sec)
OV	150°C 15 min	900	
MV-1S	L3-7	420	125
MV-2S/1	L2-10 + L4-5	900	234
MV-2S/2	L3-5 + L4-3	480	167
MV-2S/3	L2-15+L4-5	1200	285
MV-2S/4	L2-10+L4-7	1020	285
MV-2S/5	L3-5+L4-5	600	216
MV-3S/1	L2-10+L3-5+L4-3	1080	275
MV-3S/2	L2-10+L3-5+L4-5	1200	324
MV-3S/3	L2-10+L3-7+L4-3	1200	310
MV-3S/4	L2-10+L3-3+L4-7	1200	338
MV-3S/5	L2-15+L3-5+L4-5	1500	375

จากผลการเปรียบเทียบเวลาอบพบว่าอีพ๊อกซีสูตร I ที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟใช้เวลาอบเพียง 22.6–26.2% ของเวลาอบที่ใช้ในเตาอบความร้อน (คิดจากการอบแบบ 2S)และอีพ๊อกซีสูตร II ที่อบด้วยเตาอบไมโครเวฟใช้เวลาเพียงอบ 30.56–41.67% ของเวลาอบที่ใช้ในเตาอบความร้อน (คิดจากการอบแบบ 3S) จากผลการทดลองจะเห็นว่าทั้งอีพ๊อกซีสูตร I และ II อบด้วยเตาอบไมโครเวฟให้สมบัติเชิงกล เช่น มอดุลัสของแรงดึง ความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด มอดุลัสของการดัดโค้ง ความทนต่อการดัดโค้ง ณ จุดขาด และการต้านแรงกระแทก สูงกว่าการอบด้วยเตาอบความร้อนแต่ใช้เวลาอบน้อยกว่าครึ่งของเวลาอบที่ใช้ในเตาอบความร้อน

จากผลการเปรียบเทียบอีพ๊อกซีสูตร I และ II เนื่องจากอีพ๊อกซีสูตร I เป็นสูตรที่ใช้อยู่ในเชิงการค้าจึงไม่ทราบทั้งชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าสูตร II มีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับสูตร I มีเพียงสมบัติการดัดโค้งทั้งค่ามอดุลัสของการดัดโค้งและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งเท่านั้นที่อีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร I ให้ค่าสูงกว่าคอมโพสิทสูตร II อย่างชัดเจน จากผล SEM พบว่าการอบแบบ 2S ของสูตร I และการอบแบบ 3S ของสูตร II มีปริมาณการยึดติดของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้วใกล้เคียงกัน และจากการทดสอบ TGA พบว่าทั้งสองสูตรมีความเสถียรทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน ข้อดีของอีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร I คือค่ามอดุลัสของการดัดโค้งและค่าความคงทนต่อการดัดโค้งสูงกว่าคอมโพสิทสูตร II อย่างชัดเจน ส่วนข้อดีคอมโพสิทสูตร II คืออีพ๊อกซีที่อบแล้วมีลักษณะใสกว่าอีพ๊อกซีสูตร I และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4% พบว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร II ใช้เวลาอบน้อยกว่าอีพ๊อกซีคอมโพสิทสูตร I ทั้งระบบที่อบในเตาอบความร้อนและที่อบในเตาอบไมโครเวฟ

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทเปรียบเทียบระหว่างการอบในเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทในเตาอบไมโครเวฟบางสูตร ให้ค่าสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงกว่าอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่อบในเตาอบความร้อน ถึงแม้ว่าสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแต่ละสูตร เช่น ปริมาณและชนิดของสารช่วยให้แข็งตัว ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่ใช้ในการอบและความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะ แต่ในกรณีของอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิท ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล คือการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวของเส้นใยแก้ว ถึงแม้ว่าจากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ พบว่าอีพ๊อกซีสูตร II ที่อบในเตาอบความร้อนให้ค่า T_g สูงกว่าที่อบในเตาอบไมโครเวฟ แต่จากผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเห็นว่า การอบแบบหลายระดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟมีการยึดเกาะของอีพ๊อกซีที่ผิวเส้นใยแก้วเป็นปริมาณมากกว่าตัวอย่างที่อบด้วยเตาอบความร้อนอย่างชัดเจน และจากผลการวัดเวลาอบที่แท้จริงในเตาอบไมโครเวฟแสดงให้เห็นว่า อีพ๊อกซีที่อบแบบหลายระ

ดับความร้อนในเตาอบไมโครเวฟใช้เวลาอบน้อยกว่าครึ่งของเวลาอบที่ใช้ในเตาอบความร้อน แต่ให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ที่สูงกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่าการอบอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทด้วยคลื่นไมโครเวฟมีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรม เพื่อช่วยในการลดเวลาและต้นทุนในการผลิตต่อไปในอนาคต