บทที่ 3

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ

จากการวัดระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟและคำนวณตามสมการ (10) ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 ระดับกำลังวัตต์ของน้ำที่อบด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลังต่างๆ

ระดับที่	T_1 ($^\circ$C)	T_2 ($^\circ$C)	$T_2 - T_1$ (ΔT)	t (วินาที)	ค่าระดับกำลังที่ระบุโดยผู้ผลิต (วัตต์)	ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่วัดได้จริง (วัตต์)
1	-	-	-	-	80	-
2	9.0	19.1	10.1	600	160	70
3	9.0	19.2	10.2	270	240	155
4	9.0	19.1	10.1	170	320	246
5	9.2	19.3	10.1	120	400	349
6	9.0	18.7	9.7	100	480	418
7	9.4	19.2	9.8	80	560	523
8	9.1	18.9	9.8	70	640	598
9	9.0	19.2	10.2	70	720	598
10	9.0	19.0	10.0	60	800	698

ตัวอย่างการคำนวณหาระดับกำลังวัตต์ของน้ำที่ได้รับจากเตาไมโครเวฟระดับกำลัง 3

$$P = \frac{mc\Delta T}{t} \qquad (13)$$

$$P = \frac{(1\ \text{kg})(4.187\text{kJ/kg}^\circ\text{C})(10^\circ\text{C})}{(270\text{s})}$$

$$P = \frac{4180}{270} = 155 \quad \text{J/s}$$

จากตาราง 6 พบว่ากำลังวัตต์ที่วัดได้จริงต่ำกว่าที่ระบุโดยบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นในการเปรียบเทียบกำลังวัตต์จะนำค่ากำลังวัตต์ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับกำลังวัตต์ที่ได้จากการอบด้วยเตาอบ

ตาราง 7 ระดับกำลังวัตต์ของน้ำที่อบด้วยเตาอบและกำลังวัตต์ของอีพ๊อกซีสูตร I อบด้วยเตาอบและอบด้วยเตาไมโครเวฟ

วัสดุ	เงื่อนไขการอบ	T_1 ($^{\circ}C$)	T_2 ($^{\circ}C$)	$T_2 - T_1$ (ΔT)	t (วินาที)	กำลัง (วัตต์)
น้ำ (1000 กรัม)	อบในเตาอบ 150 $^{\circ}C$	9	19	10	300	140
อีพ๊อกซีสูตร I (50 กรัม)	อบในเตาอบ 150 $^{\circ}C$	9	19	10	60	-*
อีพ๊อกซีสูตร I (50 กรัม)	อบในเตาไมโครเวฟ ระดับกำลัง 4	10	20	10	10	-*

* ไม่ทราบความร้อนจำเพาะของส่วนผสมอีพ๊อกซี

จากตาราง 6 อบน้ำ 1000 กรัม ด้วยเตาไมโครเวฟ ระดับกำลัง 3 และ 4 ใช้เวลา 270 และ 170 วินาที น้ำได้รับกำลัง 155 และ 246 วัตต์ตามลำดับ (พิจารณาระดับกำลัง 3 และ 4 เนื่องจากเป็นระดับกำลังที่ใช้ในการอบส่วนผสมอีพ๊อกซี)

จากตาราง 7 อบน้ำ 1000 กรัม ด้วยเตาอบ อุณหภูมิ 150$^{\circ}C$ ใช้เวลา 300 วินาที จากการคำนวณตามสมการ (13) น้ำจะได้รับกำลัง 140 วัตต์ จะเห็นว่าที่ระดับกำลัง 3 เวลาที่ใช้ในการอบน้ำด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบแตกต่างกันเล็กน้อย (ประมาณ 10%) แต่ในระดับกำลัง 4 การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะลดเวลาการอบประมาณ 44% แสดงว่าการอบด้วยเตาไมโครเวฟเพื่อทำให้วัสดุร้อนนั้นขึ้นอยู่กับเวลา และระดับกำลัง และถ้าวัสดุได้รับกำลังวัตต์ที่เหมาะสมก็จะสามารถลดเวลาในการอบได้

จากตาราง 7 เมื่ออบส่วนผสมอีพ๊อกซีสูตร I จำนวน 50 กรัม ในเตาอบอุณหภูมิ 150$^{\circ}C$ ใช้เวลา 60 วินาที แต่เมื่ออบด้วยเตาไมโครเวฟระดับกำลัง 4 ใช้เวลาแค่ 10 วินาทีเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การอบด้วยเตาไมโครเวฟใช้เวลาในการอบน้อยกว่าการอบด้วยเตาอบ เพื่อทำให้วัสดุได้รับความร้อนเท่ากัน ดังนั้นการอบด้วยเตาไมโครเวฟสามารถลดเวลาการอบได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของนักวิจัยคนอื่นๆ (Wei, *et al*., 1995; Jordan, *et al*., 1995; Zhou, *et al.,* 2003)

3.2 การวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟ

เนื่องจากเตาอบไมโครเวฟที่ในงานวิจัย เป็นเตาไมโครเวฟที่ใช้ตามบ้านเรือนซึ่งมีการออกแบบมาสำหรับปรุงอาหาร ซึ่งปริมาณอาหารและลักษณะทางกายภาพของอาหารแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ซึ่งถ้าหากไม่มีการควบคุมกำลังของเตาจะทำให้มีข้อจำกัดในการปรุงอาหาร ดังนั้นจึงมีการออกแบบเตาอบไมโครเวฟให้สามารถปรุงอาหารได้หลากหลายมากขึ้น เหมาะสมกับสภาพของอาหารที่จะปรุง โดยมีแผงควบคุมเวลาการทำงานของแมกนีตรอนให้ทำงานตามเวลาที่กำหนด เพื่อควบคุมกำลังวัตต์ในแต่ละระดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการฟังเสียงระยะเวลาการทำงานของแมกนีตรอน ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 เวลาที่ได้จากการฟังเสียงของเตาไมโครเวฟเพื่อวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาไมโครเวฟยี่ห้อ SANYO®(800 วัตต์)

ระดับ	เวลาที่เกิดความแตกต่างของเสียง (วินาที)										
	ดัง	เงียบ	ดัง	เงียบ	ดัง	เงียบ	ดัง	เงียบ	ดัง	เงียบ	ดัง
1	120	118	103	101	86	84	69	67	42	40	25
2	120	117	103	110	86	83	69	66	42	39	25
3	120	115	103	98	86	81	69	64	42	37	25
4	120	113	103	96	86	79	69	62	42	35	25
5	120	111	103	94	86	77	69	60	42	33	25
6	120	110	103	93	86	76	69	59	42	32	25
7	120	108	103	91	86	74	69	57	42	30	25
8	120	106	103	89	86	72	69	55	42	28	25
9	120	105	103	88	86	71	69	54	42	27	25
10	120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 9 ระยะเวลาการปล่อยคลื่นของเตาไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ

ระดับ	คาบ = 17 วินาที	
	เวลาที่แมกนีตรอนทำงาน (ON) (วินาที)	เวลาที่แมกนีตรอนหยุดทำงาน (OFF) (วินาที)
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	-

โดยปกติเตาไมโครเวฟจะมีการควบคุมการจ่ายไฟที่จะป้อนไปเลี้ยงหม้อแปลง โดยสั่งผ่านอุปกรณ์ (เช่นตัวรีเลย์; relays) ที่เป็นตัวควบคุมเพื่อทำการตัดต่อไฟเป็นระยะๆ ตามคาบเวลาที่สั่งจากวงจรควบคุม (control circuit) จากการวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟพบว่า เตาอบไมโครเวฟจะมีช่วงเวลาที่แมกนีตรอนทำงาน (on) และช่วงและเวลาที่แมกนีตรอนหยุดทำงาน (off) ดังแสดงในตาราง 9 ซึ่งถ้ารวมช่วงเวลาแมกนีตรอนทำงานและหยุดทำงานจะเรียกว่าคาบ จากการทดลองพบว่า คาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ SANYO® รุ่น 412 EM-X ของทุก ๆ ระดับกำลัง เท่ากับ 17 วินาที ในแต่ละระดับกำลังจะมีช่วง on และ off แตกต่างกัน โดยเมื่อระดับกำลังสูงขึ้น ช่วง on จะมีเวลานานขึ้น ส่วนช่วง off สั้นลง ทำให้กำลังวัตต์ที่วัดได้มากขึ้น เช่น ถ้าต้องการให้พลังงานออกมามากที่สุด (ระดับกำลัง 10) เมื่อคาบเวลาเป็นบวกวงจรควบคุมจะสั่งให้ตัวรีเลย์ต่อไฟเข้าวงจรเลี้ยงหม้อไฟสูงทำให้แมกนีตรอนสามารถสร้างคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ปกติในคาบเวลาลูกหนึ่งจะต้องมีเวลาที่เป็นบวกและเป็นลบ ตัวรีเลย์จะจ่ายไฟเลี้ยงหม้อแปลงสูงตลอดเวลาไม่ตัดเลยตามเวลาที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงทำให้มีพลังงานออกมาสูงสุด ในทางกลับกันถ้าต้องการพลังงานน้อยที่สุด (ระดับกำลัง 1) วงจรควบคุมจะสั่งให้เป็นบวกน้อยที่สุดคือจะมีช่วงเวลาเป็นบวกเพียง 2 วินาทีเท่านั้น นอกจากนั้นจะเป็นลบ 15 วินาที สรุปคือในช่วงเวลาคาบลูกหนึ่ง 17 วินาที แมกนีตรอนจะทำงานเพียงแค่ 2 วินาที ซึ่งในคาบต่อไปก็จะเป็นอย่างนี้ต่อไปจนครบกำหนด

เวลาที่ตั้งไว้ เมื่อแมกนีตรอนทำงานน้อย หยุดนานขึ้น ทำให้พลังงานหรือกำลังงานที่ได้ออกมาโดยรวมน้อยลงด้วย (สุรพล สุธีระเวชช์, 2537 : 82)

จากตาราง 6 และตาราง 9 ระดับกำลัง 4 เวลาการอบ 170 วินาที น้ำได้รับกำลังวัตต์ 246 วัตต์ เวลาที่แมกนีตรอนทำงาน (effective time) 70 วินาที และเวลาที่แมกนีตรอนหยุดทำงาน (ineffective time) 100 วินาที จะเห็นว่าเวลาที่คลื่นไมโครเวฟทำให้น้ำ 1000 กรัมได้รับพลังงาน 246 วัตต์นั้นเพียง 70 วินาทีเท่านั้น ในขณะที่การอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C ต้องใช้เวลา 300 วินาที น้ำได้รับกำลังวัตต์เพียงแค่ 140 วัตต์ เท่านั้น ดังนั้นการอบด้วยเตาไมโครเวฟใช้เวลาน้อยกว่าการอบด้วยเตาอบแบบธรรมดา เนื่องจากการอบด้วยเตาไมโครเวฟความร้อนเกิดจากการกลับขั้วของโมเลกุลที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก แล้วค่อยส่งความร้อนออกมาด้านนอก แตกต่างจากการอบด้วยเตาอบซึ่งความร้อนเกิดจากการแผ่รังสีของขดลวดความร้อนด้านนอกเข้าสู่ด้านใน

3.3 การศึกษาลักษณะกายภาพของชิ้นตัวอย่าง

ในการทดลองอบอีพ๊อกซีนั้น จะต้องหาสภาวะที่ทำให้อีพ๊อกซีที่ถูกอบมีลักษณะทางกายภาพที่ดี (สังเกตด้วยสายตา) เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองหลายๆ ครั้งเพื่อให้ได้สภาวะการอบที่เหมาะสม และได้ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่ดี จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของอีพ๊อกซีที่เตรียมได้จากการอบด้วยเตาอบและเตาไมโครเวฟ พบว่ามีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 10 เมื่อเวลาอบนานขึ้น อีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟจะแข็งมากขึ้น โดยสังเกตจากบริเวณที่ติดกับขอบของเบ้าพิมพ์เทฟลอน เช่นเวลาการอบ 10 นาที ตัวอย่างบริเวณขอบเบ้าพิมพ์เทฟลอนยังเป็นของเหลวเหนียวหนืด แต่เมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้นเป็น 20 นาที อีพ๊อกซีที่อบได้จะแห้งและบริเวณขอบเบ้าพิมพ์เทฟลอนจะไม่เหนียวติดมือ เนื่องจากอีพ๊อกซีมีการส่งผ่านความร้อน (heat transfer) ต่ำ เมื่ออบนานขึ้นช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนจากแมกนีตรอนมากขึ้น ความร้อนจึงค่อยๆส่งผ่านไปที่บริเวณขอบๆของอีพ๊อกซีที่ติดกับเบ้าพิมพ์ และเนื่องจาก เทฟลอนมีการนำความร้อนต่ำกว่าอีพ๊อกซีเรซิน (Hawley and Delong, n.d.) ทำให้การส่งผ่านความร้อนที่บริเวณขอบที่ติดกับเบ้าพิมพ์เทฟลอนน้อยกว่าบริเวณตรงกลางซึ่งมีการส่งผ่านความร้อนจากอีพ๊อกซีด้วยกัน

ตาราง 10 ลักษณะกายภาพของส่วนผสมอีพ๊อกซีก่อนอบและหลังอบ

สูตร	ลักษณะกายภาพของอีพ๊อกซีเรซิน		
	ก่อนอบ	หลังอบ	
		อบในเตาอบ	อบในไมโครเวฟ
I*	ของเหลวหนืดสีน้ำตาล	ของแข็ง สีน้ำตาลเข้ม ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็งสีน้ำตาลเข้ม ผิวด้านหน้าเป็นคลื่นบ้างเล็กน้อย
II	ของเหลวหนืด สีขาวใส ในขณะคนจะมีฟองอากาศเล็กๆมาก	ของแข็งสีขาวใส ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็ง สีขมพู ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ
III	ของเหลวหนืด สีขาวใส	ของแข็งสีขาวใส ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็งสีขาวเหลือง ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ
IV	ของเหลวหนืด สีขาวใส	ของแข็งสีขาวใส ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็งสีขาวเหลือง ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ
VI	ของเหลวหนืด สีเหลืองอ่อน	ของแข็งสีเหลือง ใส ผิวเรียบไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็งสีเหลือง ผิวเรียบไม่เป็นฟองอากาศ
VII	ของเหลวหนืด สีเหลืองอ่อน	ของแข็งสีเหลือง ใส ผิวเรียบไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็งสีดำ ผิวเรียบ ไม่เป็นฟองอากาศ
VIII	ของเหลวหนืด สีเหลืองอ่อน	ของแข็งสีเหลือง ใส ผิวเรียบไม่เป็นฟองอากาศ	ของแข็งสีเหลือง อ่อน ไม่เป็นฟองอากาศ

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

3.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

3.4.1 Tensile Properties

ตาราง 11 Tensile Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที

สูตร	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	1.22± 0.02	70.86±2.14	9.70±1.34
II	0.79 ± 0.23	33.09 ± 9.6	4.33 ± 1.18
III	0.66 ± 0.06	48.32 ± 2.76	5.50 ± 1.5
IV	1.08 ± 0.10	36.01 ± 7.49	4.37 ± 1.46
VI	0.75 ± 0.13	54.97 ± 11.65	5.50 ± 1.18
VII	0.73 ± 0.10	47.37 ± 9.91	5.77 ± 1.08
VIII	1.05 ± 0.08	54.27 ± 9.29	6.41 ± 2.05

ตาราง 12 Tensile Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

สูตร	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	1.07 ± 0.20	55.17 ± 24.5	4.96 ±2.08
II	1.05 ± 0.12	37.53 ± 10.28	3.62± 0.82
III	1.13 ± 0.15	81.37 ± 22.37	7.27 ± 3.22
IV	1.28 ± 0.40	99.46 ± 6.22	8.96 ± 1.6
VI	1.08 ± 0.15	76.23 ± 23.45	5.13 ± 1.00
VII	1.01 ± 0.21	56.18 ± 9.54	6.03 ± 2.37
VIII	1.08 ± 0.25	65.6 ± 11.83	7.37 ± 2.87

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

ตาราง 13 Tensile Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10 และ 14 นาที

สูตร	ระดับ	เวลา (นาที)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	4	10	1.17 ± 0.12	57.32 ± 8.31	5.46 ± 0.91
		14	0.92 ± 0.82	61.03 ± 11.86	5.58 ± 0.82
II	4	10	1.04 ± 0.10	57.91 ± 7.17	5.80 ± 0.68
		14	1.12 ± 0.03	50.29 ± 5.30	4.96 ± 0.38
III	3	14	0.91 ± 0.08	59.61 ± 8.01	7.29 ± 1.86
IV	8	14	1.29 ± 0.19	39.30 ± 4.60	3.46 ± 0.57
VI	4	10	0.25 ± 0.05	40.43 ± 12.09	4.10 ± 0.39
		14	0.99 ± 0.12	49.24 ± 10.52	5.33 ± 0.81
		16	1.15 ± 0.19	51.49 ± 13.63	5.05 ± 0.96
VII	3	14	1.13 ± 0.06	70.78 ± 7.12	9.26 ± 3.30
VIII	5	10	1.13 ± 0.12	49.48 ± 3.29	4.18 ± 0.34
	4	14	1.35 ± 0.11	54.23 ± 8.83	4.41 ± 0.82

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

ตาราง 14 Tensile Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10, 14 และ 20 นาที

สูตร	ระดับ	เวลา (นาที)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	4	10	1.17 ± 0.12	57.32 ± 8.31	5.46 ± 0.91
		12	1.15 ± 0.00	60.98 ± 11.86	5.58 ± 0.96
		14	0.92 ± 0.21	61.03 ± 11.86	5.58 ± 0.82
		20	1.17 ± 0.05	49.64± 7.14	4.97± 0.80
II	4	10	0.98 ± 0.09	45.76 ± 8.33	4.83 ± 0.96
		14	1.02 ± 0.05	63.95 ± 12.10	6.81 ± 1.65
		20	1.10±0.06	43.64±5.00	4.47±0.41
III	3	10	0.93 ± 0.04	33.68 ± 10.49	4.31 ± 0.70
		14	0.84 ± 0.07	41.68 ± 7.64	5.05 ± 1.02
		20	1.14 ± 0.13	43.51±5.09	4.35±0.64
IV	3	10	0.90 ± 0.10	53.68 ± 2.68	5.96 ± 0.55
		14	0.98 ± 0.12	48.62 ± 8.78	5.27 ± 0.45
		20	1.13±0.16	42.64 ± 5.81	4.53±0.48
VI	4	10	0.96 ± 0.09	48.16 ± 7.62	5.17 ± 0.64
		14	1.05 ± 0.08	52.46 ± 15.07	7.32 ± 3.53
		20	1.11±0.17	40.68 ± 9.65	4.31 ± 0.62
VII	3	10	0.99 ± 0.18	56.56 ± 16.07	5.79 ± 1.55
		14	0.99 ± 0.11	43.23 ± 9.91	4.13 ± 0.18
		20	1.09± 0.07	49.48 ± 7.22	5.24±1.02
VIII	4	10	1.22 ± 0.08	60.98 ± 5.28	5.42 ± 0.48
		14	1.05 ± 0.06	64.01 ± 6.11	6.28 ± 0.65
		20	1.29 ± 0.13	48.25 ± 11.35	4.57±1.71

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

3.4.2 Impact Resistance

ตาราง 15 Impact Resistance ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที

สูตร	Impact Resistance (kJ/m^2)
I*	3.84 ± 0.83
II	2.63 ± 0.88
III	0.41 ± 0.18
IV	1.21 ± 0.44
VI	2.32 ± 0.55
VII	1.88 ± 0.28
VIII	2.24 ± 0.21

ตาราง 16 Impact Resistance ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

สูตร	Impact Resistance (kJ/m^2)
I*	1.80 ± 0.07
II	0.49 ± 0.24
III	1.65 ± 0.49
IV	0.53 ± 0.27
VI	2.56 ± 0.82
VII	1.93 ± 0.48
VIII	2.15 ± 0.73

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

ตาราง 17 Impact Resistance ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10 และ 14 นาที

สูตร	ระดับ	เวลา (นาที)	Impact Resistance (kJ/m^2)
I*	4	14	0.89 ± 0.11
II	4	14	1.47 ± 0.73
III	3	14	1.10 ± 038
IV	4	14	0.89 ± 0.35
VI	4	10	1.15 ± 0.27
		14	0.95 ± 0.18
		16	1.48 ± 0.69
VII	3	14	1.05 ± 0.32
VIII	6	14	1.78 ± 0.53

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

ตาราง 18 Impact Resistance ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10, 14 และ 20 นาที

สูตร	ระดับ	เวลา (นาที)	Impact Resistance (kJ/m^2)
I*	4	10	1.80 ± 0.46
		12	0.95 ± 0.10
		14	0.89± .0.11
		20	2.04 ± 0.36
II	4	10	1.37 ± 0.60
		14	1.15 ± 0.37
		20	0.77±0.20
III	3	10	1.28 ± 0.63
		14	2.27 ± 0.99
		20	0.72±0.28
IV	3	10	1.04 ± 0.31
		14	1.45 ± 0.35
		20	1.07±0.58
VI	4	10	1.23 ± 0.49
		14	1.81 ± 0.75
		20	0.96±0.24
VII	3	10	0.87 ± 0.16
		14	1.39 ± 1.22
		20	1.97±0.60
VIII	4	10	1.84 ± 0.83
		14	1.06 ± 0.25
		20	2.04±0.36

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

3.4.3 Flexural Properties

ตาราง 19 Flexural Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที

สูตร	Flexural Modulus (GPa)	Flexural Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	2.61 ± 1.7	106.55 ±4.78	8.24±1.17
II	3.7 ± 0.4	111.14 ± 31.94	3.39 ±1.24
III	3.32 ±0.31	129.16 ±23.92	5.97 ±1.61
IV	3.62 ±0.62	72.33 ±18.62	2.14 ±0.5
VI	4.24 ±0.26	115.35 ±27.51	3.12 ±1.39
VII	3.33 ±0.15	131.64 ±6.15	6.7 ± 0.92
VIII	6.77±1.39	129.87±30.5	01.97±0.33

ตาราง 20 Flexural Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

สูตร	Flexural Modulus (GPa)	Flexural Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	3.25 ± 0.5	120.54 ±21.31	6.48 ± 1.79
II	2.95 ± 0.81	63.91 ± 22.57	2.3 ± 0.68
III	3.13 ± 0.1	128.32 ± 8.77	7.15 ± 1.99
IV	3.19 ± 0.6	119.26±17.93	6.01 ± 2.16
VI	3.43 ± 0.25	125.11±22.55	6.37 ± 2.0
VII	3.57 ± 0.38	132.64 ±14.36	7.77 ± 2.44
VIII	2.84 ± 1.47	107.58 ± 40.24	7.49 ± 2.65

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

ตาราง 21 Flexural Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10 และ 14 นาที

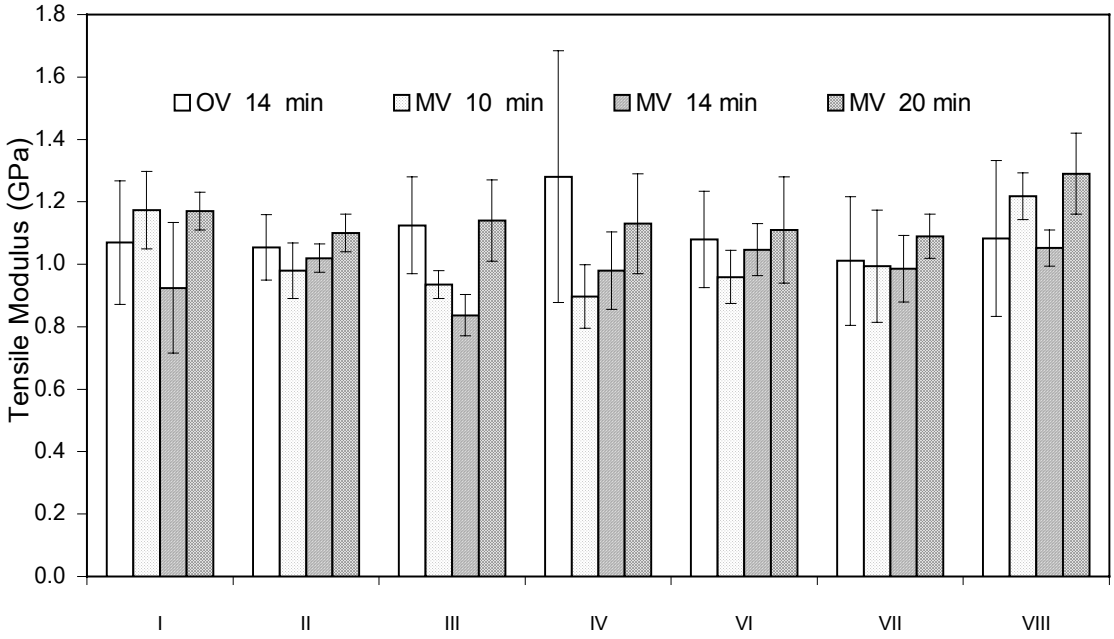
สูตร	ระดับ	เวลา (นาที)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	L4	14	3.11 ±0.41	96.22±18.57	4.88±3.03
II	L4	14	3.48±0.15	85.04±19.2	2.5±0.6
III	L3	14	2.75±1.24	112.4±47.59	5.78±2.89
IV	L4	14	3.15±0.24	73.85±17.5	2.38±0.43
VI	L4	10	3.58±0.38	114.6±31.57	3.38±0.58
		14	3.7±0.35	85.21±16.26	2.36±0.37
		16	3.65±0.4	91.63±15.09	2.57±0.5
VII	L3	14	3.47±0.45	104.6±33.62	3.68±1.85
VIII	L4	14	3.20±0.30	50.32±13.32	3.36±1.31

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

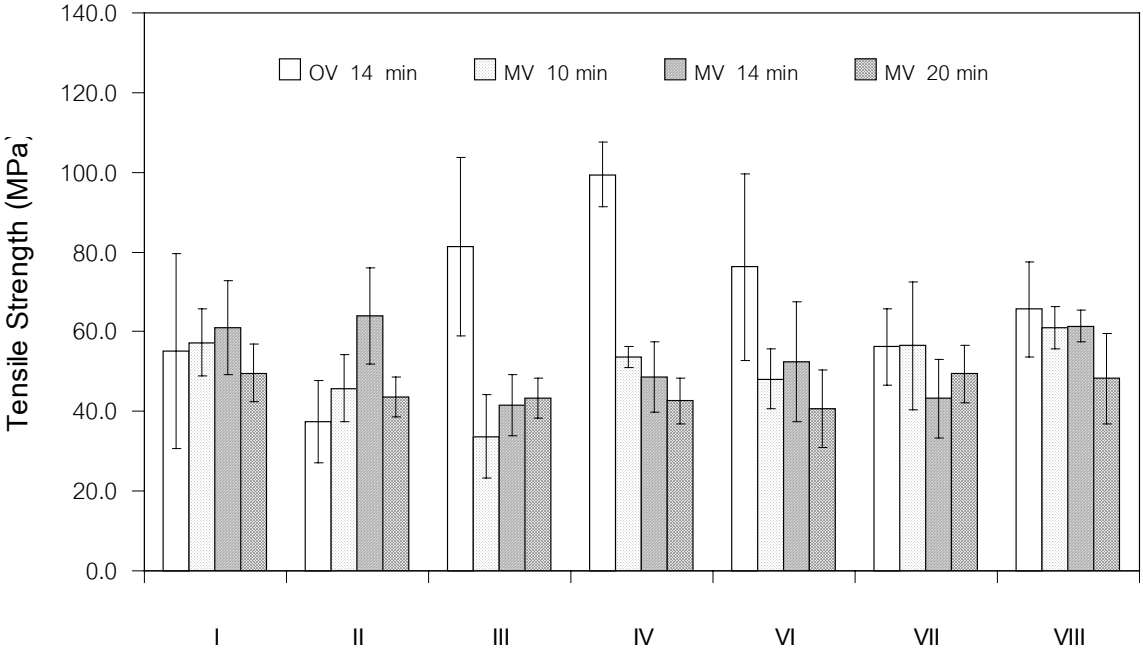
ตาราง 22 Flexural Properties ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10, 14 และ 20 นาที

สูตร	ระดับ	เวลา (นาที)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural Strength (MPa)	Strain at Break (%)
I*	L4	10	3.22±0.26	121.64±22.68	6.62±1.91
		12	3.34±0.27	127.7±17.31	3.34±0.27
		14	3.11±0.41	96.22±18.57	4.88±3.03
		20	2.77±0.68	75.15±26.31	3.6±2.68
II	L4	10	2.91±0.32	101.6±33.65	4.79±2.5
		14	3.28±0.73	102.73±61.52	4.29±2.9
		20	3.62±0.52	85.38±35.38	2.84±1.87
III	L3	10	2.34±0.27	115.83±13.39	8.3±1.61
		14	3.21±0.8	128.36±39.85	5.67±2.05
		20	2.11±0.46	58.89±13.34	2.93±0.66
IV	L3	10	3.09±0.27	120.06±18.03	5.66±2.31
		14	2.85±0.34	94.78±35.32	4.59±2.78
		20	2.17±0.54	47.75±9.57	2.41±0.21
VI	L4	10	3.23±0.37	123.04±26.51	5.5±1.94
		14	3.25±0.43	117.44±32.16	5.17±2.22
		20	3.95±1.56	84.97±30.35	2.88±1.96
VII	L3	10	2.77±0.59	122.76±15.94	8.52±1.46
		14	3.18±0.33	118.23±24.01	5.01±1.82
		20	2.32±0.55	94.58±29.8	7.9±3.58
VIII	L4	10	2.97±0.47	92.49±19.12	4.05±2.23
		14	3.14±0.4	110.11±24.4	4.87±2.14
		20	2.67±0.2	114.09±17.84	8.46±0.71

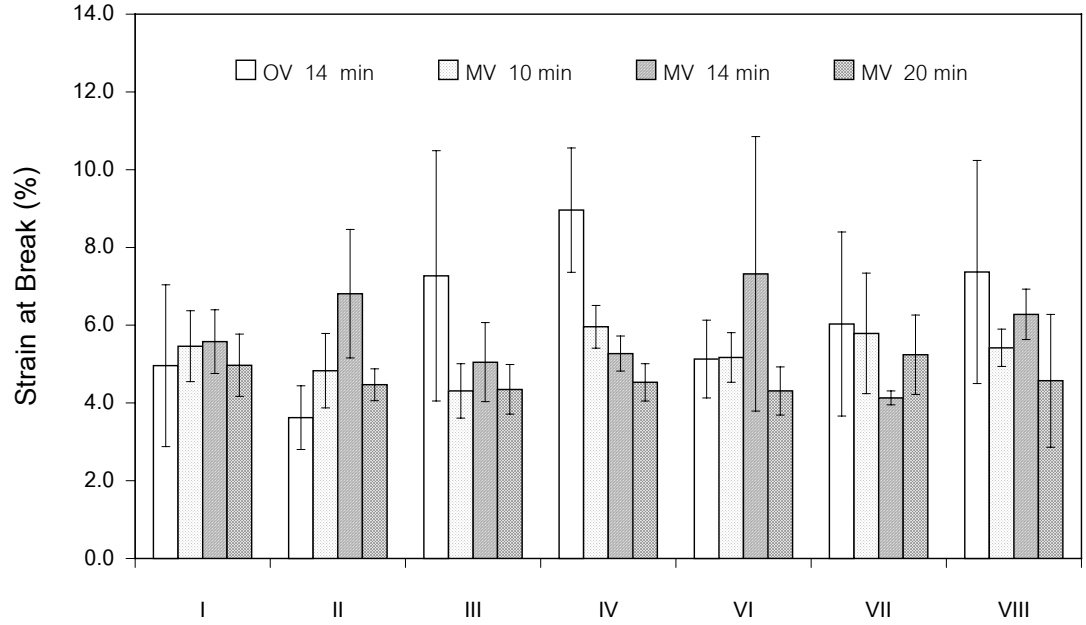
* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



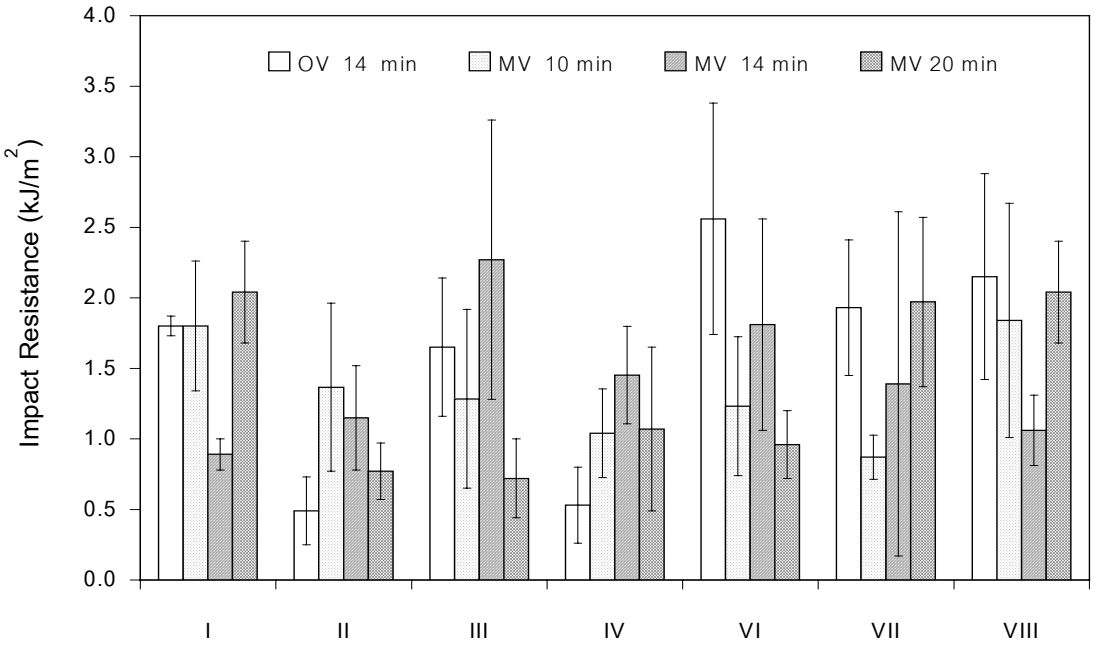
ภาพประกอบ 22 Tensile Modulus ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



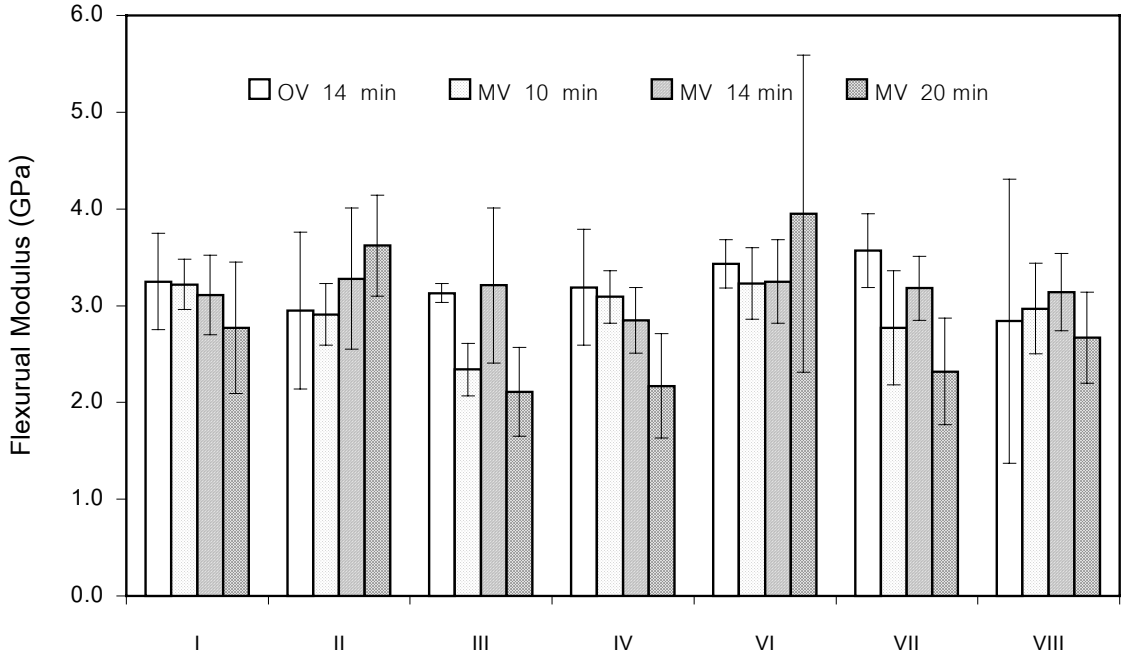
ภาพประกอบ 23 Tensile Strength ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



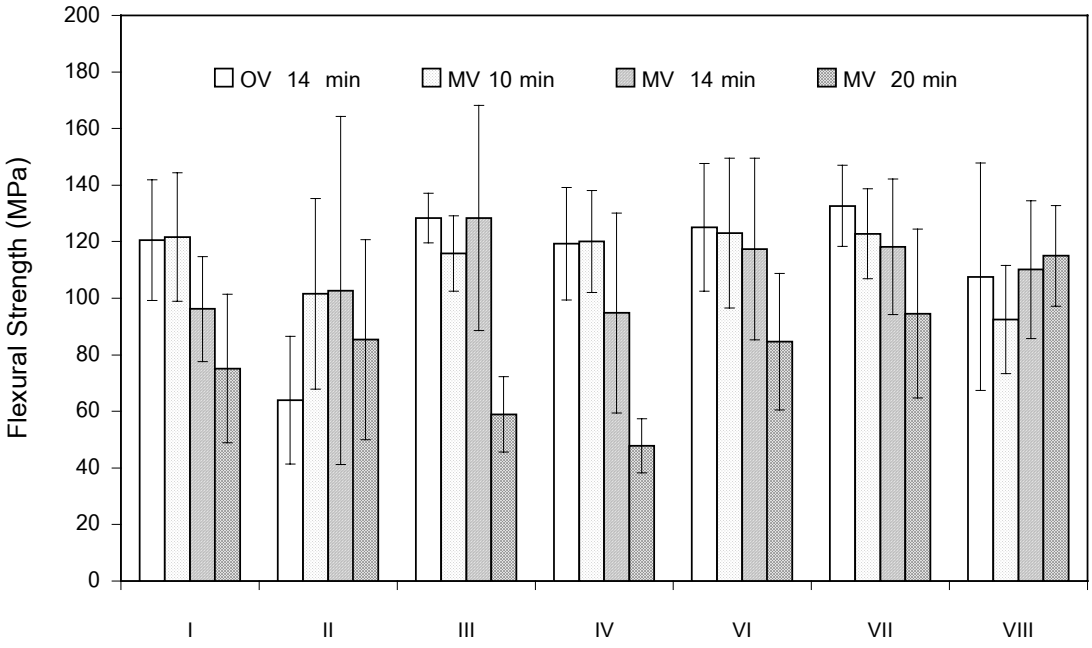
ภาพประกอบ 24 Strain at Break ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



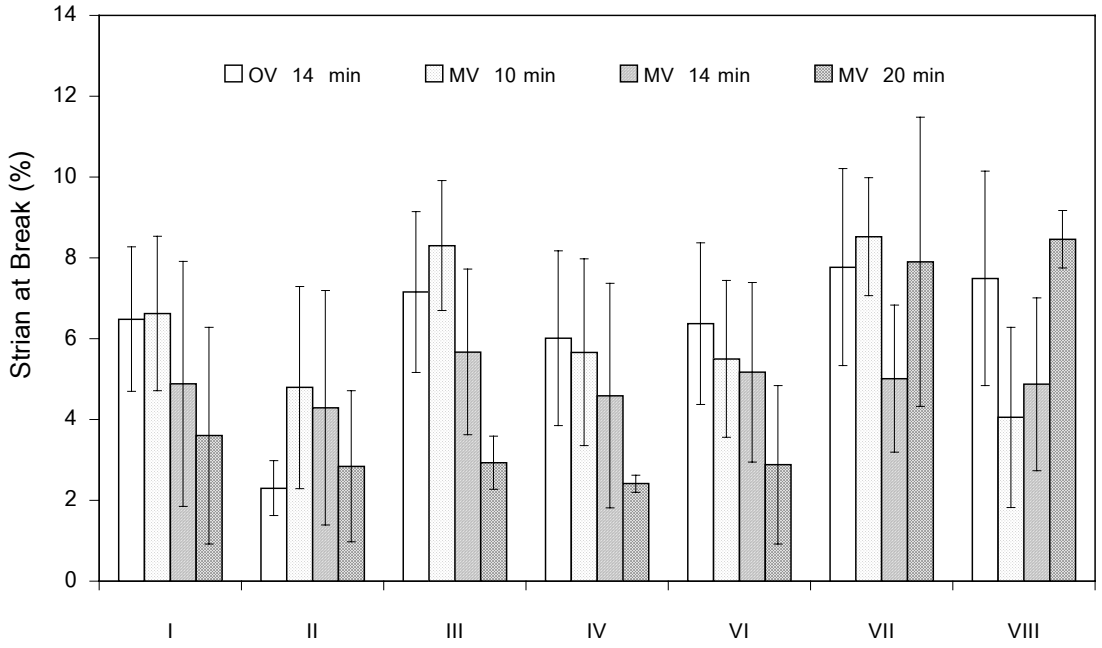
ภาพประกอบ 25 Impact Resistance ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



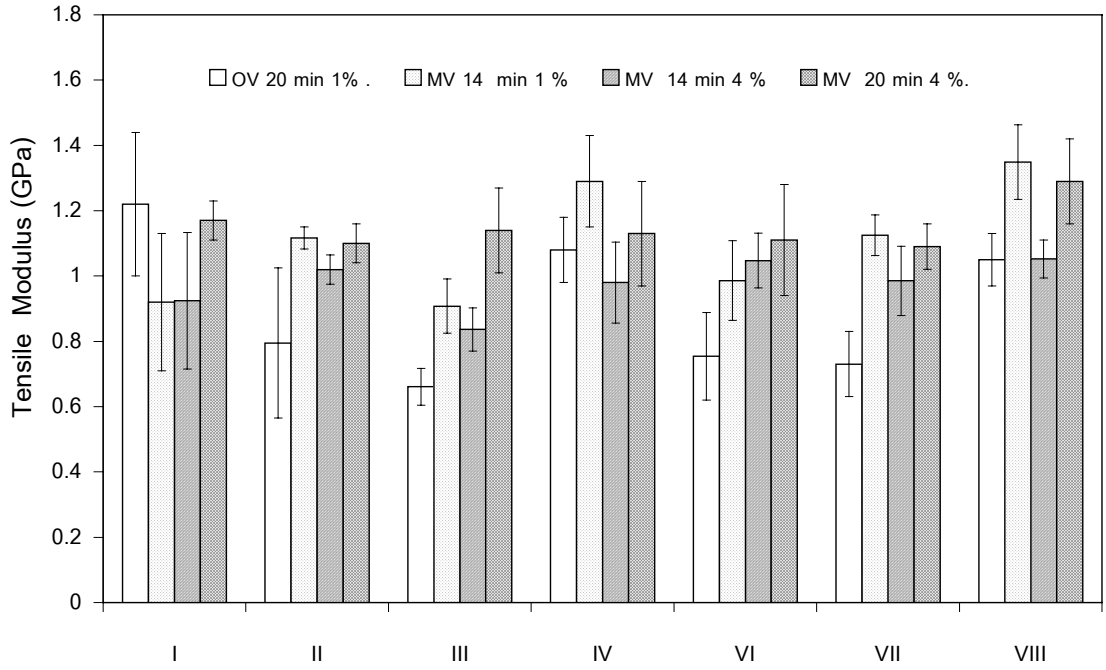
ภาพประกอบ 26 Flexural Modulus ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



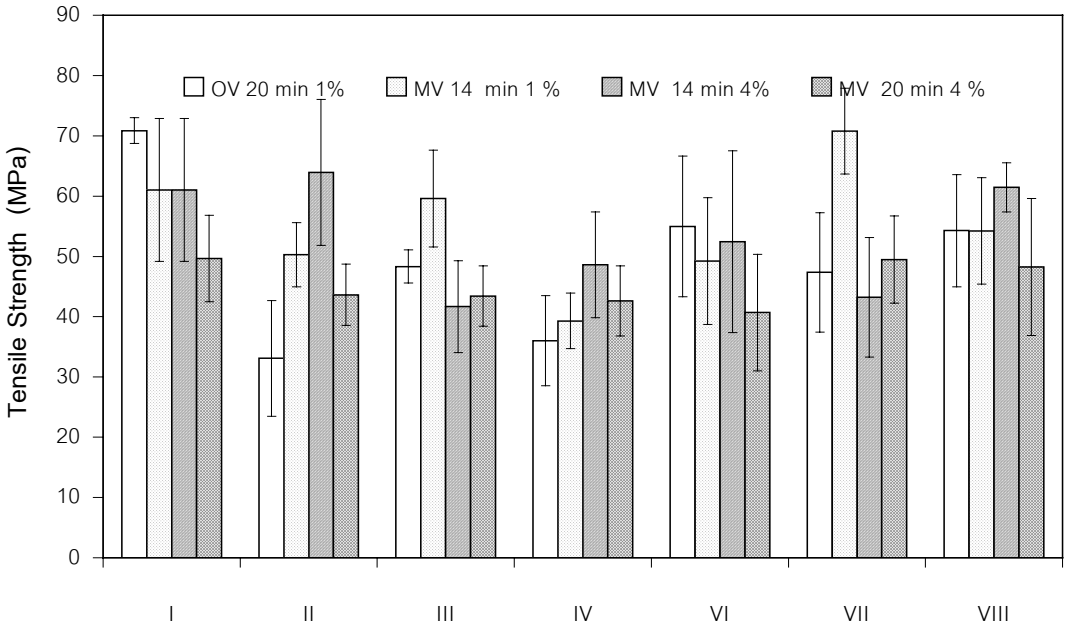
ภาพประกอบ 27 Flexural Strength ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



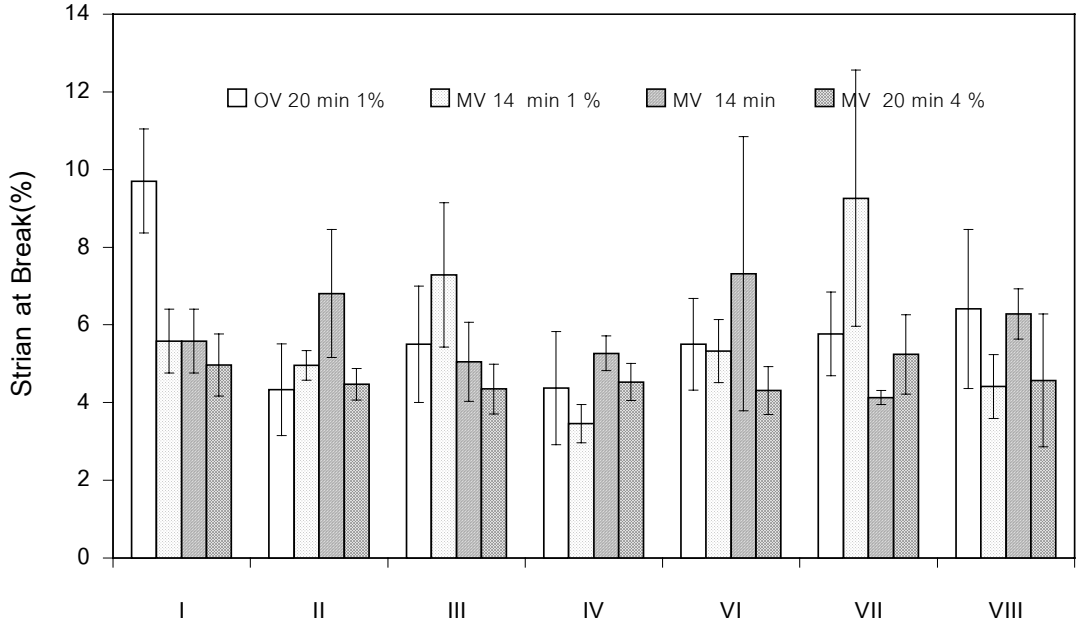
ภาพประกอบ 28 Strain at Break ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที



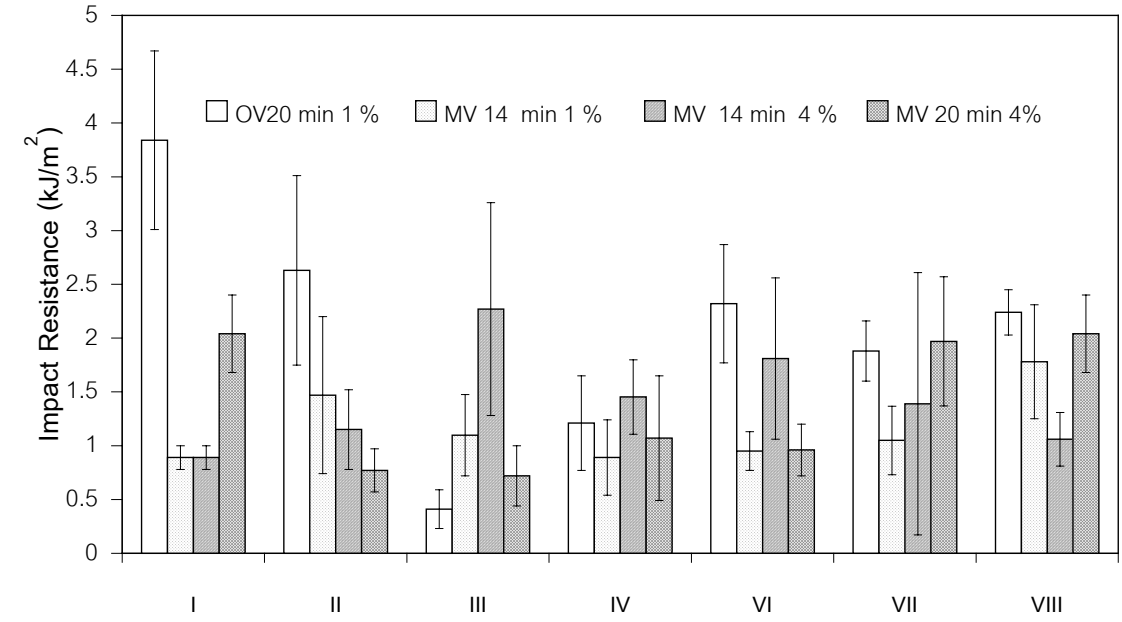
ภาพประกอบ 29 Tensile Modulus ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที



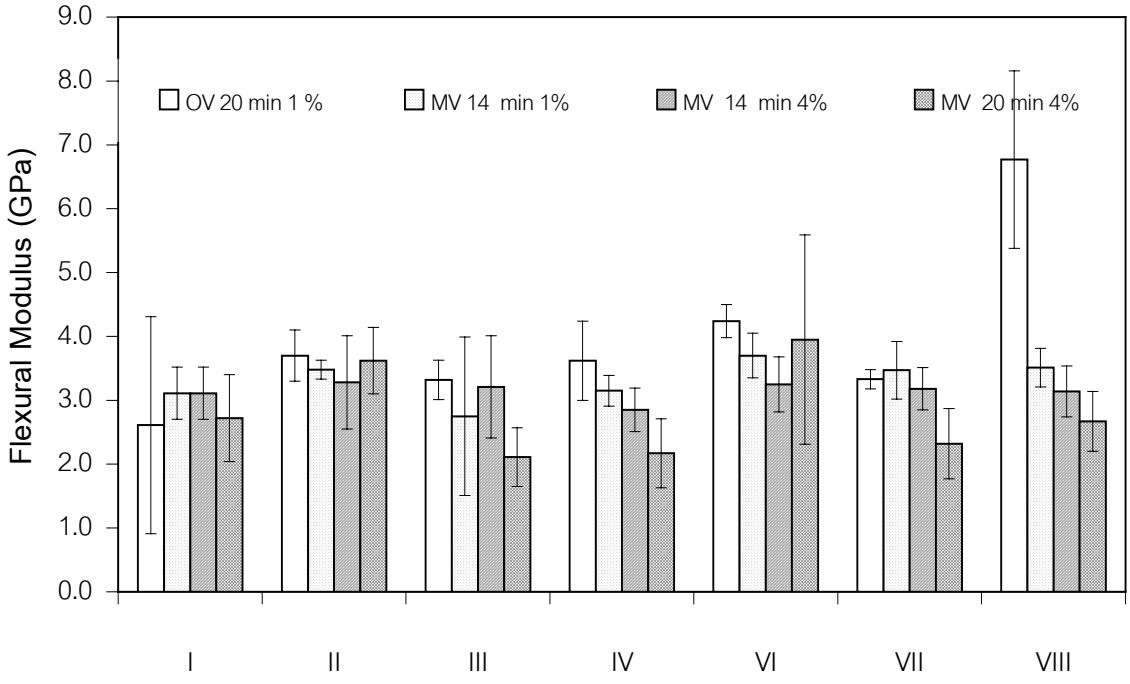
ภาพประกอบ 30 Tensile Strength ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที



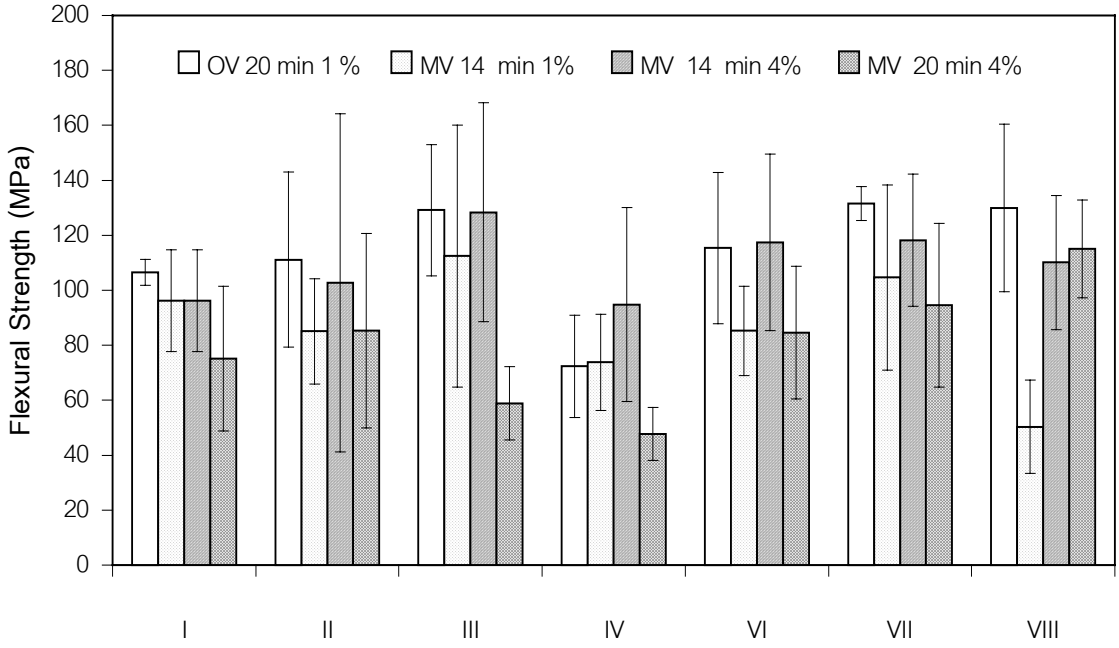
ภาพประกอบ 31 Strain at Break ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที



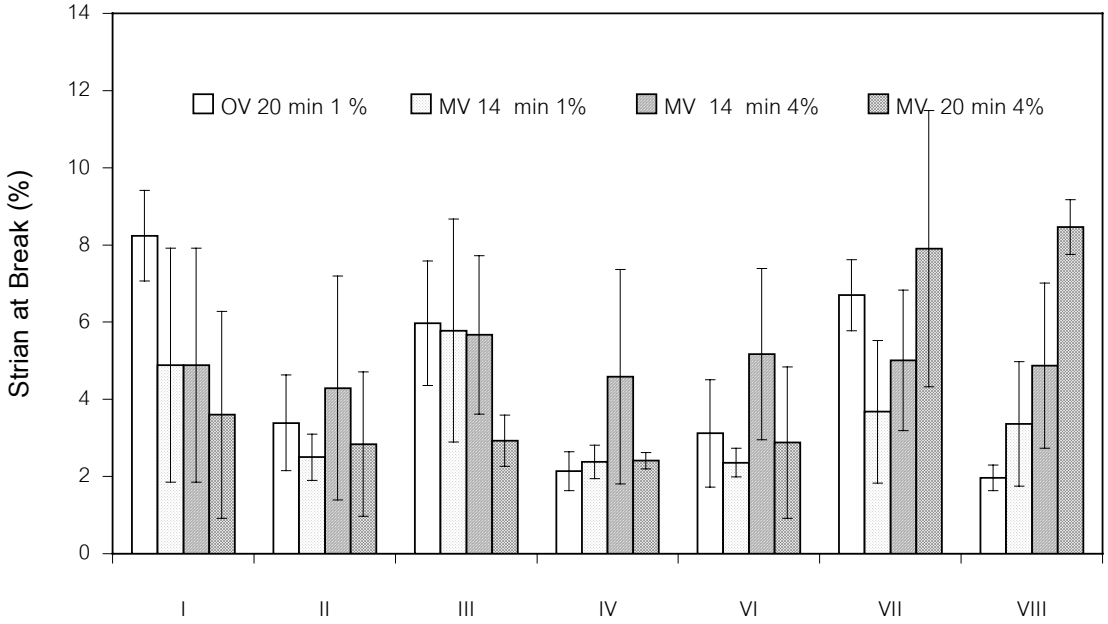
ภาพประกอบ 32 Impact Resistance ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที



ภาพประกอบ 33 Flexural Modulus ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที



ภาพประกอบ 34 Flexural Strength ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที



ภาพประกอบ 35 Strain at Break ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที

3.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากตาราง 11-22 และภาพประกอบ 22-35 แสดงผลสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและอบด้วยเตาอบ โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งเน้นในการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างสูตร แต่ต้องการเปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนในแต่ละสูตร เพื่อสามารถคัดเลือกสูตรที่เหมาะเพื่อนำไปพัฒนาต่อไปในการอบด้วยเตาไมโครเวฟ จากการทดลองเปลี่ยนวิธีการให้ความร้อนโดยใช้เตาไมโครเวฟ พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมของอีพ๊อกซีมีค่าใกล้เคียงกันกับการอบด้วยเตาอบ ซึ่งในแต่ละสูตรจะเหมาะกับสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสูตรและสภาวะการอบ โดยแยกเป็นหัวข้อเพื่อพิจารณาได้ดังนี้

3.5.1 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

จากภาพประกอบ 22-24 แสดง tensile modulus, tensile strength, และ strain at break ตามลำดับ พบว่า tensile properties ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งในบางสูตรที่อบด้วยเตาไมโครเวฟจะให้ค่า tensile properties สูงกว่าการอบด้วยเตาอบเล็กน้อย เช่นสูตร II, VI, VII, VIII

จากภาพประกอบ 25 สูตรที่อบด้วยเตาไมโครเวฟแล้วให้ impact resistance สูงกว่าการอบด้วยเตาอบ ได้แก่ สูตร II , III, IV

จากภาพประกอบ 26-28 พบว่า flexural properties ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบมีค่าใกล้เคียงกัน และมีบางสูตรที่แสดงแนวโน้มของ flexural properties ดีกว่าการอบด้วยเตาอบ คือสูตร II, VIII

3.5.2 ศึกษาผลของเวลาและระดับกำลังการอบ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10, 14 และ 20 นาที

สำหรับการอบอีพ๊อกซีด้วยเตาไมโครเวฟนั้นพบว่าขึ้นอยู่กับสภาวะการอบ โดยอีพ๊อกซีจะได้รับความร้อนจากเตาไมโครเวฟเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการอบ 2 อย่างคือ เวลาการอบนานขึ้นและระดับกำลังการอบสูงขึ้น

เมื่อใช้เวลาการอบนานขึ้น (ระดับกำลังเท่ากัน) อีพ๊อกซีจะได้รับพลังงานความร้อนมากขึ้น เนื่องจากจำนวนคาบหรือรอบที่แมกนีตรอนทำงานเพื่อปล่อยคลื่นให้มากระทบอีพ๊อกซีมีมากขึ้น ดังแสดงในตาราง 23 นั่นคือเมื่อเพิ่มเวลาการอบอีพ๊อกซีจาก 10, 14 และ 20 นาที พบว่าเวลาที่แมกนีตรอนทำงานหรือช่วงเวลาที่อีพ๊อกซีได้รับคลื่นก็จะนานขึ้น เช่นในระดับกำลัง 3 เวลาที่ อีพ๊อกซีได้รับคลื่นจะเพิ่มขึ้นจาก 2.91, 4.08 และ 5.86 นาที ตามลำดับ

ระดับกำลังการอบสูงขึ้น อีพ๊อกซีได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อระดับกำลังการอบสูงขึ้นแมกนีตรอนทำงานนานขึ้น หยุดน้อยลง เช่นที่ระดับกำลัง 3 และ 4 แมกนีตรอนทำงานคาบละ 5 และ 7 วินาที ตามลำดับ หรือ 30% และ 40% ของคาบ (1 คาบ = 17 วินาที)

จากภาพประกอบ 22-28 สมบัติเชิงกลที่เวลาการอบต่างกันคือ 10, 14 และ 20 นาที สมบัติเชิงกลมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งในบางสูตรเมื่อเวลาการอบนานขึ้นให้สมบัติบางประการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่น tensile modulus แต่สมบัติเชิงกลบางประการลดลงเช่น flexural modulus และ flexural strength จากผลการทดลองโดยรวมพบว่า สมบัติเชิงกลที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟที่เวลาและระดับกำลังต่างกันในแต่ละสูตรมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย แต่การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะมีข้อได้เปรียบในการลดเวลาในการอบถึง 60-70% ถ้าเทียบกับการอบด้วยเตาอบ

ตาราง 23 เวลาการอบและเวลาที่แมกนีตรอนทำงาน

เวลาการอบ (setting time) (วินาที)	เวลาที่แมกนีตรอนทำงาน (effective time) (วินาที)	
	ระดับกำลัง 3	ระดับกำลัง 4
600 (10 นาที)	175 (2.91 นาที)	247 (4.11 นาที)
840 (14 นาที)	245 (4.08 นาที)	345 (5.75 นาที)
1200 (20 นาที)	352 (5.86 นาที)	494 (8.23 นาที)

3.5.3 ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (1 และ 4%) ที่มีต่อสมบัติของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ พบว่า tensile modulus และ flexural modulus ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% จะให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เล็กน้อย ส่วน tensile strength และ flexural strength โดยส่วนใหญ่พบว่าเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% พิจารณาในกรณี impact resistance พบว่าเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% มีค่า impact resistance สูงกว่าเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% เล็กน้อย ยกเว้นสูตร II และ VIII ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งไม่มีผลต่อพันธะการเชื่อมโยงของอีพ๊อกซี แต่อาจจะมีผลด้านกลไกการเกิดปฏิกิริยา หรือปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งไม่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

3.5.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 14 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% เท่ากัน ระหว่างการอบด้วยเตาไมโครเวฟและการอบด้วยเตาอบ จากภาพประกอบ 29-35 พบว่า tensile modulus และ tensile strength ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 นาที จะมีค่าสูงกว่าการอบด้วยเตาอบเวลา 20 นาที เล็กน้อย (ยกเว้นสูตร I) ส่วน impact resistance จะให้ผลตรงกันข้ามคือ โดยส่วนใหญ่การอบด้วยเตาอบเวลา 20 นาที จะให้ค่าดีกว่าการอบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 นาที (ยกเว้นสูตร III) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ flexural modulus และ flexural strength ดังนั้นน่าจะมีการศึกษา tensile properties ของเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 14 นาที เพิ่มเติม

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซี-แอนไฮไดรด์ ที่ได้จากการการอบด้วยเตาไมโครเวฟและอบด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับสูตรและสภาวะการอบ บางสูตรจะให้สมบัติเชิงกลบางประการดีกว่าการอบด้วยเตาอบความร้อน ในขณะที่บางสูตรจะให้สมบัติบางประการลดลง ซึ่งจากการสำรวจรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เมื่อเปลี่ยนระบบการให้ความร้อนแก่อีพ๊อกซีเรซินจากการใช้ความร้อนธรรมดาเป็นการใช้เตาอบไมโครเวฟของนักวิจัยหลายคนยังมีความแตกต่างกัน เช่นการศึกษาอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) ของเวียและคณะ (Wei, *et al*., 1993) หรือจอร์แดนและคณะ (Jordan, *et al.,* 1995) พบว่าการอบอีพ๊อกซีด้วยไมโครเวฟจะเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา แต่ไมโจวิคและคณะ (Mijovic, *et al.,* 1998) พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออบด้วยไมโครเวฟ เวียและคณะ (Wei, *et al.,* 993) พบว่าโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์บางชนิดที่อบในเตาอบและอบด้วยเตาไมโครเวฟมีความแตกต่างกัน ในขณะที่เอลาซาร์ด (Alazard, *et al.,* 2003) พบว่าการอบด้วยเตาไมโครเวฟไม่มีผลต่อโครงสร้างสามมิติของอีพ๊อกซีเรซิน โบอี (Boey, 1995) พบว่าอีพ๊อกซีไฟเบอร์คอมโพสิทที่อบด้วยไมโครเวฟจะมีความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) สูงกว่าอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาอบ ส่วนซู (Zhou, *et al.,* 2003) พบว่าความแข็งแรงอัด (compressive strength) และค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (bending strength) ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของไบ (Bai, *et al.,* 1995) ที่แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงและค่ามอดูลัสของอีพ๊อกซีที่อบด้วยไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ในขณะที่จอร์แดน (Jordan, *et al.,* 1995) พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในค่ามอดูลัสของตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ

ดังนั้นจากการศึกษาสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซี-แอนไฮไดรด์ ที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟและการอบด้วยเตาอบของอีพ๊อกซีหลายๆ สูตร พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับสูตรและสภาวะที่ใช้ในการอบ ดังนั้นในการอบด้วยเตาไมโครเวฟจึงต้องพิจารณาเลือกสภาวะการอบที่เหมาะสมของแต่ละสูตร จากการทดลองสามารถสรุปสูตรที่อบที่สภาวะการอบด้วยเตาไมโครเวฟ แล้วให้สมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ดีกว่าการอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที ดังแสดงในตาราง 24

ตาราง 24 สูตรอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10, 14 และ 20 นาที ที่แสดงสมบัติเชิงกลดีกว่าหรือเทียบเท่ากับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

สมบัติเชิงกล	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 %		
	14 นาที	10 นาที	14 นาที	20 นาที
Tensile strength	II	II, VIII	II, VI, VII, VIII	I, II
Impact resistance	II	II, IV	II, III, IV	I, II, IV, VII, VIII
Flexural strength	I, VII	I, II, IV, VIII	II, VIII	VIII

จากภาพประกอบ 22-35 และตาราง 24 แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟขึ้นอยู่กับสูตรและสภาวะการอบ โดยแต่ละสูตรจะเหมาะกับสมบัติที่แตกต่างกัน โดยสูตร II จะแสดงแนวโน้มของสมบัติเชิงกลดีกว่าการอบด้วยเตาอบ ซึ่งน่าจะนำไปศึกษาเพิ่มเติมหรือประยุกต์ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม ส่วนบางสูตรที่อบด้วยเตาไมโครเวฟแล้วทำให้สมบัติบางประการลดลงเช่น สูตร III, IV, VI ให้ค่า tensile strength และ flexural strength ต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบ ส่วนสูตร VI และ VII ให้ค่า impact resistance ต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบ

3.6 ผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)

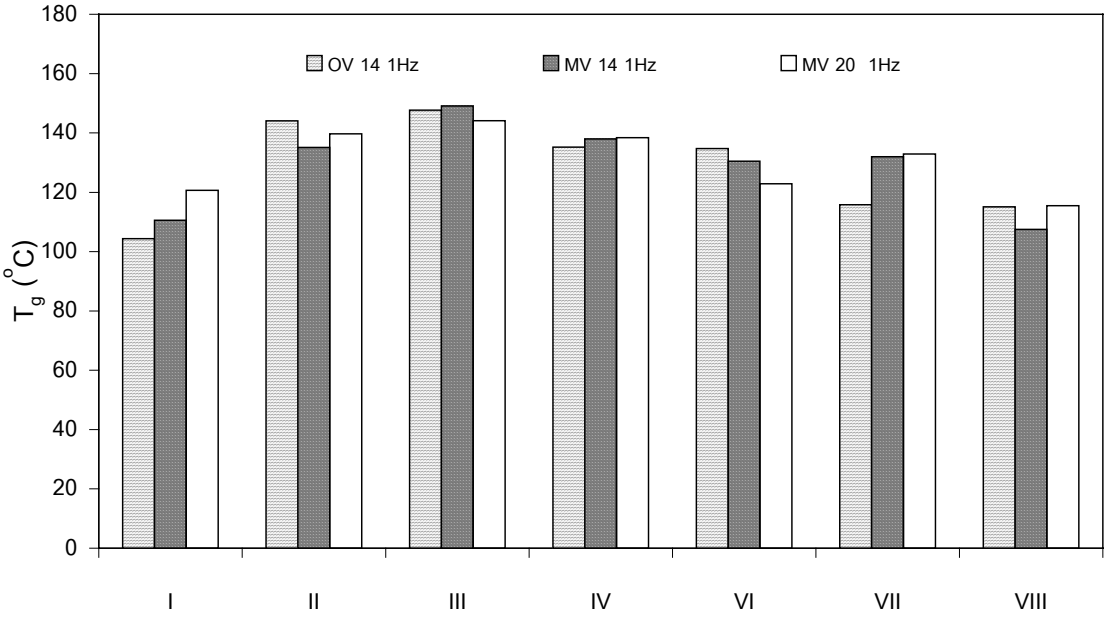
3.6.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass Transition Temperature, T_g)

จากการศึกษา T_g ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาอบและอบด้วยเตาไมโครเวฟ ด้วยเทคนิค DMTA ความถี่ 1, 10 และ 30 Hz ดังแสดงในตาราง 25 และภาพประกอบ 36 พบว่า T_g ที่ได้จากการทดสอบด้วย DMTA ที่ความถี่ 1 Hz ของอีพ๊อกซี-แอนไฮไดรด์ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยในแต่ละสูตรจะมีการเปลี่ยนแปลง T_g ต่างกัน และมีทิศทางไม่แน่นอน จากภาพประกอบ 36 พบว่ามีบางสูตรที่การอบด้วยเตาไมโครเวฟให้ค่า T_g สูงกว่าการอบด้วยเตาอบ เช่นสูตร I, III, IV, VII โดยเฉพาะสูตร III ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 14 นาทีจะมีค่า T_g สูงที่สุด คือ 155°C แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกับการอบด้วยเตาอบ

ตาราง 25 Glass Transition Temperature (T_g) ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

สูตร	T_g (°C)								
	อบด้วยเตาอบ 150°C เวลา 14 นาที			อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 14 นาที			อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 20 นาที		
	1 Hz	10 Hz	30 Hz	1 Hz	10 Hz	30 Hz	1 Hz	10 Hz	30 Hz
I*	104.4	113	115.2	110.6	120.7	123	112.7	123.6	129.2
II	144.1	148.4	152.8	135.1	146.2	147.4	139.7	144.9	150.1
III	147.7	161.5	160.9	149.1	155.2	161.5	144.1	153.3	153.6
IV	135.3	141.2	145.3	138	145.8	146.7	138.4	143.5	148
VI	134.7	140.7	144	130.5	136.1	142.6	122.9	142.6	139.6
VII	115.8	123.9	126.8	131.97	137.55	143.17	132.9	140.2	143.7
VIII	115.1	122.8	127.6	107.5	112.7	114.2	115.4	123.3	123.8

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



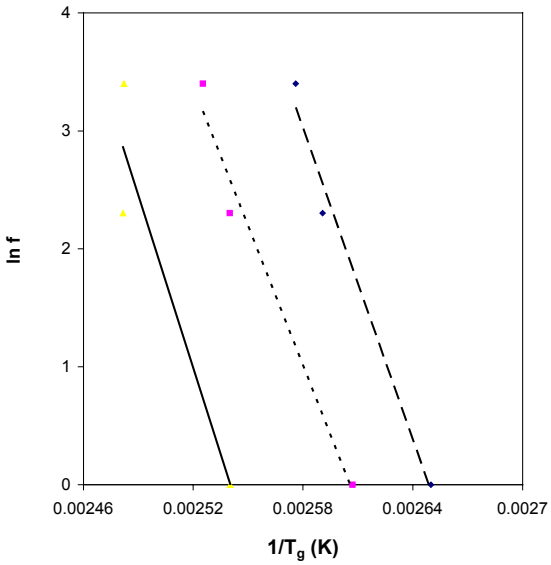
ภาพประกอบ 36 T_g ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

จากการสำรวจรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีบางรายงานที่ปรากฏว่า T_g ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟสูงกว่าการอบด้วยเตาอบ หรือมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เช่นโบอี (Boey and Yap, 2001) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิ T_g ของอีพ๊อกซีโดยมีสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน พบว่าอุณหภูมิ T_g ที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับในกรณีที่เป็นอีพ๊อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิทที่ทดลองโดยไบ (Bai and Djafari, 1995) แต่มีบางรายงานพบว่า T_g ที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกับการอบด้วยความร้อน เช่นเอลาซาร์ด (Alazard, *et al*., 2003) ได้ทำการศึกษาการอบอีพ๊อกซีที่มีสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน ระบบ DGEBA/ DDM จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ T_g ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเทียบเท่าได้กับการอบด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของโบอี (Boey and Yap, 2001)

3.6.2 พลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a)

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอุณหภูมิ T_g สามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) และคำนวณพลังงานความร้อน (activation enthalpy, $\Delta H^{\#}$) จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $\tan\delta_{(max)}$ หรือ $(1/T_g)$ กับลอกการิทึมของความถี่ (ln f) ของอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและอบด้วยเตาอบ ตามสมการ

ของอาร์รีเนียส และ อีริง (Arrhenius และ Eyring) เพื่อคำนวณหาค่า E_a และ $\Delta H^{\#}$ พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln f และ $1/T_g$ ของอีพ๊อกซีสูตร I, (- - -) อบด้วยเตาอบ 150°C เวลา 14 นาที, (.....) อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 นาที และ (-----) อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 20 นาที

จากการคำนวณ พบว่าค่า E_a และ $\Delta H^{\#}$ มีแนวโน้มเหมือนกันและแตกต่างกันไม่มากนัก ดังแสดงในตาราง 26 และ 27 ดังนั้นจึงนำค่า E_a มาใช้ในการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการอบด้วยเตาไมโครเวฟและการอบด้วยเตาอบ จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอุณหภูมิ เพื่อนำความชันมาคำนวณค่า E_a พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2) ที่ได้จากกราฟมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.95 และค่า E_a ของอีพ๊อกซีที่มีการเชื่อมโยงจะมีค่าอยู่ในช่วง 374-575 kJ/mol สำหรับอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที 327-597 kJ/mol และ 405-515 kJ/mol สำหรับอีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 38 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะหรือ E_a ของ อีพ๊อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 425 kJ/mol ส่วนในกรณีของสูตร VI ที่อบในเตาอบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 20 นาทีมีค่าต่ำกว่าสูตรอื่นๆ นั้นน่าจะมีค่าความผิดพลาดจากการทดลอง

ตาราง 26 Activation Energy (E_a) ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

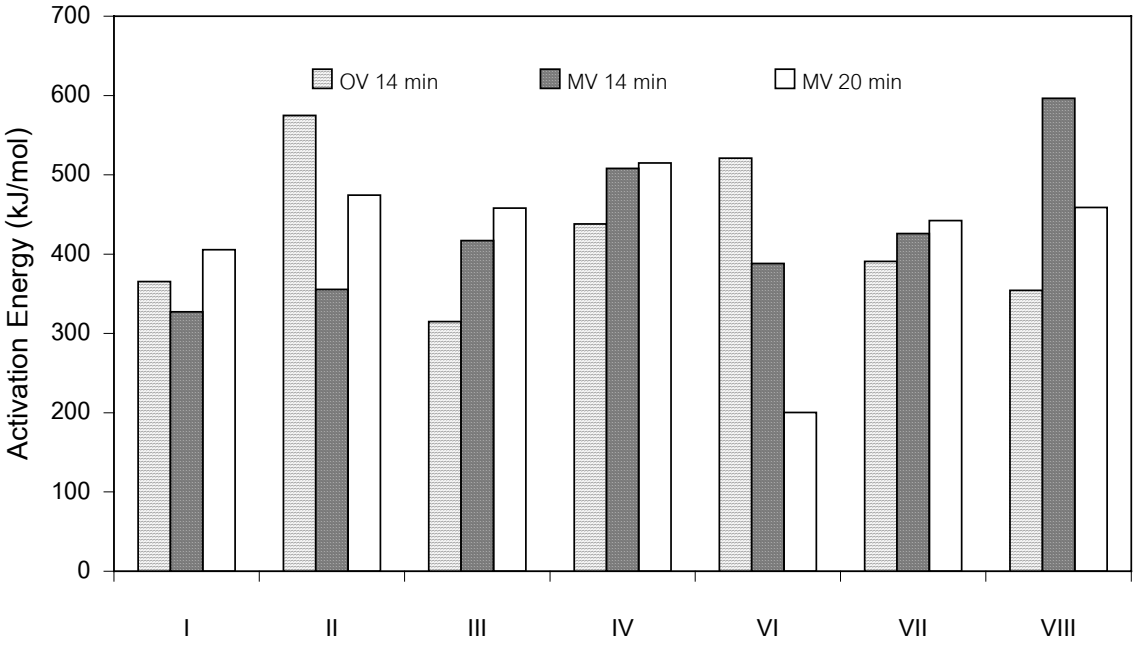
สูตร	Activation Energy, E_a (kJ/mol)		
	อบด้วยเตาอบ 150 °C เวลา14 นาที	อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา14 นาที	อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 20นาที
I*	365.45 (R^2=0.9823)	327.35 (R^2=0.9771)	405.57 (R^2=0.8954)
II	574.95 (R^2=0.9585)	355.49 (R^2=0.9480)	474.48 (R^2=0.9646)
III	314.92 (R^2=0.8744)	416.94 (R^2=0.9586)	458.08 (R^2=0.9201)
IV	437.93 (R^2=0.9504)	508.28 (R^2=0.9501)	515.10 (R^2=0.9754)
VI	521.03 (R^2=0.9989)	388.25 (R^2=0.9477)	200.31 (R^2=0.8078)
VII	390.96 (R^2=0.9952)	426.01 (R^2=0.9622)	442.37 (R^2=1.00)
VIII	354.23 (R^2=0.9963)	596.7 (R^2=0.9885)	458.99 (R^2=0.9280)

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

ตาราง 27 Activation Enthalpy ($\Delta H^{\#}$) ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

สูตร	Activation Enthalpy, $\Delta H^{\#}$ (kJ/mol)		
	อบในเตาอบ 14 นาที	อบในเตาไมโครเวฟ 14 นาที	อบในเตาไมโครเวฟ 20 นาที
I*	362.28 (R^2=0.9820)	324.1 (R^2=0.9767)	402.26 (R^2=0.8939)
II	571.45 (R^2=0.9584)	352.1 (R^2=0.9471)	471.00 (R^2=0.9640)
III	311.37 (R^2=0.8719)	413.38 (R^2=0.9579)	454.58 (R^2=0.9190)
IV	434.5(R^2=0.9496)	504.83 (R^2=0.9495)	511.64 (R^2=0.9737)
VI	517.6 (R^2=0.9989)	384.25 (R^2=0.9468)	196.94 (R^2=0.8024)
VII	387.68 (R^2=0.9951)	422.59 (R^2=0.9616)	438.96 (R^2=1.000)
VIII	350.96 (R^2=0.9962)	593.5 (R^2=0.9884)	455.72 (R^2=0.9271)

* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



ภาพประกอบ 38 Activation Energy (E_a) ของอีพ๊อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที

จากการสำรวจรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า E_a ของอีพ๊อกซีที่มีสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีนมีค่าอยู่ระหว่าง 286-525 kJ/mol (Dyaknow, *et al.,* 1996), 249-508 kJ/mol (Laza, *et al.,* 1998), 500-600 kJ/mol (Cook, *et al.,* 2004), 357 kJ/mol (Wingard, 1999) ซึ่งเป็นอีพ๊อกซีเสริมแรงด้วยใยแก้ว ส่วนในกรณีของพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่นไคโตซานจะมีค่าอยู่ในช่วง 225-544 kJ/mol (Lazaridou and Biliaderis, 2002) หรือโพลีอีเทอร์ซัลโฟน (polyether sulphone) 400-600 kJ/mol (Alkan,1995) ซึ่งจะเห็นว่าค่า E_a ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างการอบด้วยเตาไมโครเวฟและการอบด้วยเตาอบ และค่าที่คำนวณได้นี้อยู่ในช่วงเดียวกันกับ E_a ที่รายงานโดยนักวิจัยที่ได้กล่าวอ้างอิงมาแล้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและโครงสร้างของอีพ๊อกซีที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟและเตาอบไม่น่าจะแตกต่างกันมากนัก