

บทที่ 3

ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.1 ข้อมูลเบื้องต้น

3.1.1 การเปรียบเทียบระดับกำลังของเตาไมโครเวฟ

เตาไมโครเวฟที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ มีขนาด 800 วัตต์ และแมกนีตรอนอยู่ด้านบน เป็นประเภทจานหมุน มีความถี่ 2.45 GHz เป็นเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน มีราคาถูก และยังไม่ผ่านกระบวนการเทียบค่ามาก่อน ระดับกำลัง (power level) ของเตาไมโครเวฟประเภทนี้โดยทั่วไปจะระบุเป็น 10% - 100% หรือ level 1 - 10 ของระดับกำลังที่สูงสุดของเตาไมโครเวฟนั้น โดยมีหน่วยเป็นวัตต์ การเทียบค่าทำได้โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้าดังที่สรุปในรายงานวิจัยของ ชนากร พิระพันธ์ (อ้างอิงในบทที่ 2)

นำค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_1) อุณหภูมิสุดท้าย (T_2) และเวลาที่ใช้ในเตาไมโครเวฟ (t) ณ ระดับกำลังต่างๆ ของเตาอบไมโครเวฟ คำนวณตามสมการ (2.1) ค่ากำลังวัตต์ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 3.1 และจะระบุว่าเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

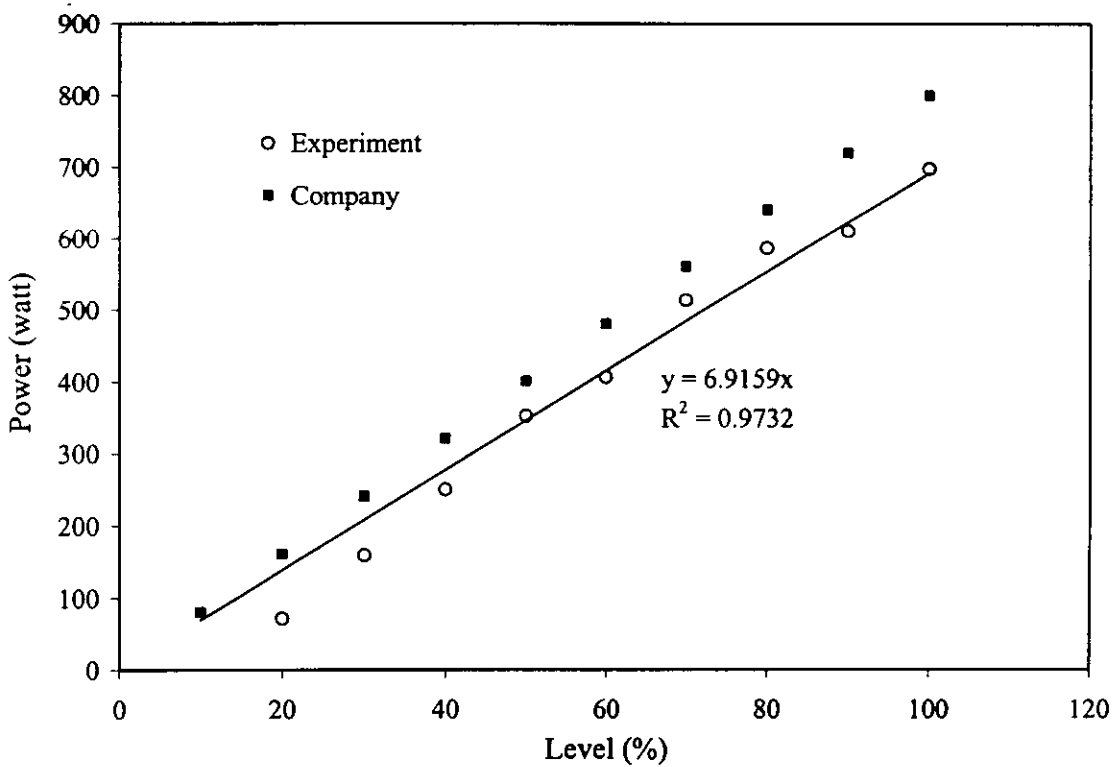
ตารางที่ 3.1 กำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟที่ได้จากการทดลองการอุ่นน้ำ

Power level	T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	$T_2 - T_1$	t (sec)	Power (watt)
1	N/A	N/A	-	-	-
2	9.0	19.1	10.1	600	71
3	9.0	19.2	10.2	270	158
4	9.0	19.1	10.1	170	249
5	9.2	19.3	10.1	120	352
6	9.0	18.7	9.7	100	406
7	9.4	19.2	9.8	80	513
8	9.1	18.9	9.8	70	586
9	9.0	19.2	10.2	70	610
10	9.0	19.0	10.0	60	698

นำค่าที่คำนวณได้วาดกราฟระหว่างระดับกำลัง (Level, %) และกำลังวัตต์ที่คำนวณได้ (Power, watt) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) จะได้ความสัมพันธ์ของระดับกำลังของเตาไมโครเวฟกับระดับกำลังที่ให้ในหน่วยวัตต์ ในรูปสมการเส้นตรง ดังนี้

$$P_w = 6.9159 * P_y \quad (3.1)$$

โดยที่ P_w = ค่าระดับกำลังของเตาไมโครเวฟที่ให้ในหน่วยวัตต์
 P_y = ค่าระดับกำลังของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงค่ากำลังวัตต์ที่วัดได้จากการทดลองและจากข้อมูลของบริษัท กราฟเส้นตรงได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอยของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

นำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย (สมการ 3.1) คำนวณหาค่ากำลังวัตต์ที่ระดับต่างๆ ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเปรียบเทียบกำลังวัตต์ที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ และจากข้อมูลที่บริษัทกำหนดไว้ สังเกตว่าค่ากำลังวัตต์ที่ได้จากการทดลองและจากการวิเคราะห์แบบถดถอย มีค่าต่ำกว่าค่าที่รายงานจากบริษัทผู้ผลิตประมาณ 14% ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปเทียบกับกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟอื่นๆที่มีการเทียบค่าไว้แล้ว การควบคุมกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนที่สามารถเปลี่ยนระดับกำลังวัตต์ได้นั้น ทำได้โดยการควบคุมระยะเวลาในการปล่อยให้ไมโครเวฟออกมาสัมผัสกับอาหารหรือวัสดุ เพราะในทางปฏิบัติ แมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟชนิดนี้จะทำงานเต็มที่ตามกำลังวัตต์ที่ระบุไว้จากผู้ผลิต เช่น 800 วัตต์ สำหรับเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้ ระหว่างการทำงานของเตาไมโครเวฟ จะมีระบบควบคุมระยะเวลาในการปิด-เปิดกระแสไฟ¹ ทำให้ค่าเฉลี่ยของกำลังวัตต์เปลี่ยนไป ถ้าต้องการกำลังวัตต์ต่างๆ เช่น ระดับกำลัง 2 ระยะเวลาใน "การเปิด" จะสั้นกว่าที่ระดับกำลังสูงซึ่งมีค่าวัตต์โดยเฉลี่ยสูงกว่า วงจรการทำงานปิด-เปิดนี้มีระยะเวลาเท่ากันในทุกระดับกำลัง เรียกว่า คาบ (period) ซึ่งอาจมีระยะเวลาแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตและกำลังวัตต์สูงสุด ได้การทดลองวัดวงจรการทำงานของเตาไมโครเวฟโดยการฟังเสียงที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นเสียงปิด-เปิด บันทึกระยะเวลาในการปิด-เปิด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3 เตาชนิดนี้ใช้เวลา 17 วินาที ภายในหนึ่งคาบ การใช้ระดับกำลังตั้งแต่ 9 ลงมา เวลาในการสัมผัสกับไมโครเวฟ (actual heating time) สั้นกว่าเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่อง (setting time) ดังแสดงในตารางที่ 3.4

¹ E.T. Thostenson and T.W. Chou, *Compos. A*, 30, 1055 (1999); Y. Liu, Y. Xiao, X Sun and D.A. Scola, *J. Appl. Polym. Sci.*, 73, 2391 (1999).

ตารางที่ 3.2 ผลการหาค่าระดับกำลังของเตาไมโครเวฟเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอยและค่าที่ระบุจากบริษัท

Power Level (%)	Power (watt)		
	Experiment	Analysis	Company
10	-	-	80
20	71	138	160
30	158	207	240
40	249	276	320
50	352	345	400
60	406	414	480
70	513	483	560
80	586	552	640
90	610	621	720
100	698	690	800

ตารางที่ 3.3 ระยะเวลาในการปิด-เปิดกระแสไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้

Power level	Duration power on (sec)	Duration power off (sec)
10	17	-
9	15	2
8	14	3
7	12	5
6	10	7
5	9	8
4	7	10
3	5	12
2	3	14
1	2	15

ตารางที่ 3.4 ค่าเปรียบเทียบเวลาในการสัมผัสกับไมโครเวฟ (actual heating time) และเวลาในการตั้งเครื่อง (setting time) ที่ระดับกำลัง 3 และ 4

Power level	Setting time (min)	Actual heating time (min)
3	10	3
	14	4
	20	6
4	10	4
	14	6
	20	8

3.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณปฏิกิริยาเคมีของเรซินชนิด fresh sample ด้วยเทคนิค DSC

ทำการผสมอีพ็อกซี สารทำให้แข็ง (MTHPA1, MTHPA2, MHHPA) และ ตัวเร่งปฏิกิริยา (DMP-30, EMI, BDMA) ในสัดส่วนต่างๆกัน (โดยน้ำหนัก) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาคิดตามน้ำหนักของอีพ็อกซี ตารางที่ 3.5 แสดงสูตรเรซินที่ใช้ในการศึกษา การเรียกชื่อส่วนผสมแต่ละสูตรจะเรียกดังนี้ สูตรที่ I/90, I/85 อักษรตัวแรก หมายถึงสูตรที่ และตัวเลขถัดมาหมายถึงปริมาณสารทำให้แข็ง เช่น I/90 คือ สูตรที่ I (Epoxy + MTHPA1) ที่มี ส่วนผสมเท่ากับ 100:90 หรือ I/85 คือ สูตรที่ II (Epoxy + MTHPA1 + 1%DMP-30) ที่มีส่วนผสมเท่ากับ 100:85 เป็นต้น ผสมสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 3.5 นำไปวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนที่คายออกมาจากการเกิดปฏิกิริยา และค่า Tg ด้วยเครื่อง DSC

ตารางที่ 3.5 สูตรเรซินที่ใช้ในการศึกษาด้วยเทคนิค DSC จากเรซินที่ไม่ได้ผ่านการอบ

Resin	ส่วนผสม	Epoxy : Hardener (wt/wt)				
		100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
I	Epoxy + MTHPA1	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
II	Epoxy + MHHPA + 1%DMP-30	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
III	Epoxy + MHHPA + 1% EMI	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
IV	Epoxy + MHHPA + 1% BDMA	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
VI	Epoxy + MTHPA2 + 1%DMP-30	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
VII	Epoxy + MTHPA2 + 1% EMI	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
VIII	Epoxy + MTHPA2 + 1% BDMA	100:90	100:85	100:80	100:75	100:70

พื้นที่ใต้กราฟ (ΔH) ของ exothermic peak จาก 1st heating scan เป็นปริมาณความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking reaction) ค่า peak temperature เป็นอุณหภูมิสูงสุดระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ค่า Tg วัดได้จาก 2nd heating scan เลือกใช้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง inflection point (ช่วงกลางของแทรนซิชัน) ทำการวิเคราะห์ 1 ครั้ง/ตัวอย่าง ผลการทดลองสรุปในตารางที่ 3.6 – 3.8 และในรูปที่ 3.2 – 3.4

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC แสดงค่าความร้อน (ΔH) ที่คายออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ (J/g) ของ fresh samples

Resin	Hardener	Accelerator	Heat of Reaction (J/g)				
			100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
I	MTHPA1	Unknown	307	325	312	301	305
II	MHHPA	DMP-30	238	250	254	240	270
III		EMI	349	328	339	334	321
IV		BDMA	268	257	251	301	274
VI	MTHPA2	DMP-30	272	267	282	266	285
VII		EMI	348	346	363	366	350
VIII		BDMA	294	289	302	295	304

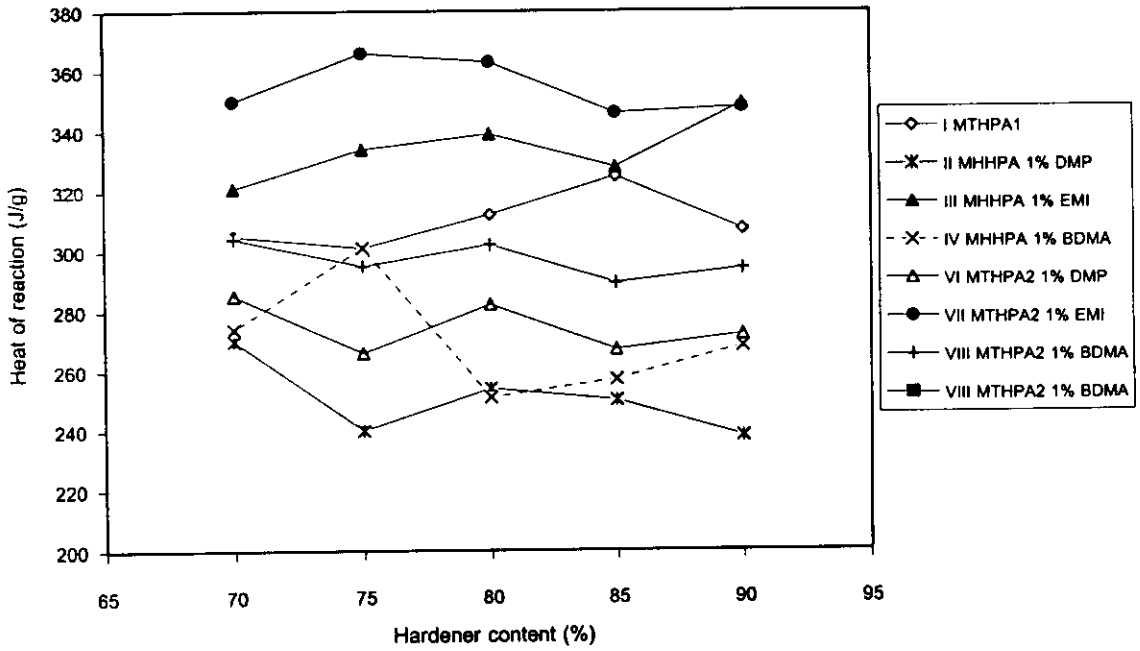
ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC แสดงอุณหภูมิ (peak temperature) ที่พีคของการคายความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ของ fresh samples

สูตร	Hardener	Accelerator	Peak temperature (°C)				
			100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
I	MTHPA1	Unknown	158.3	158.0	157.7	158.3	158.3
II	MHHPA	DMP-30	167.3	165.3	166.3	165.3	162.3
III		EMI	166.0	162.7	162.3	161.3	160.7
IV		BDMA	166.3	168.3	169.7	163.7	165.3
VI	MTHPA2	DMP-30	168.3	169.3	167.7	167.3	163.7
VII		EMI	166.3	168.0	166.0	164.7	166.0
VIII		BDMA	168.7	168.3	168.0	166.7	165.3

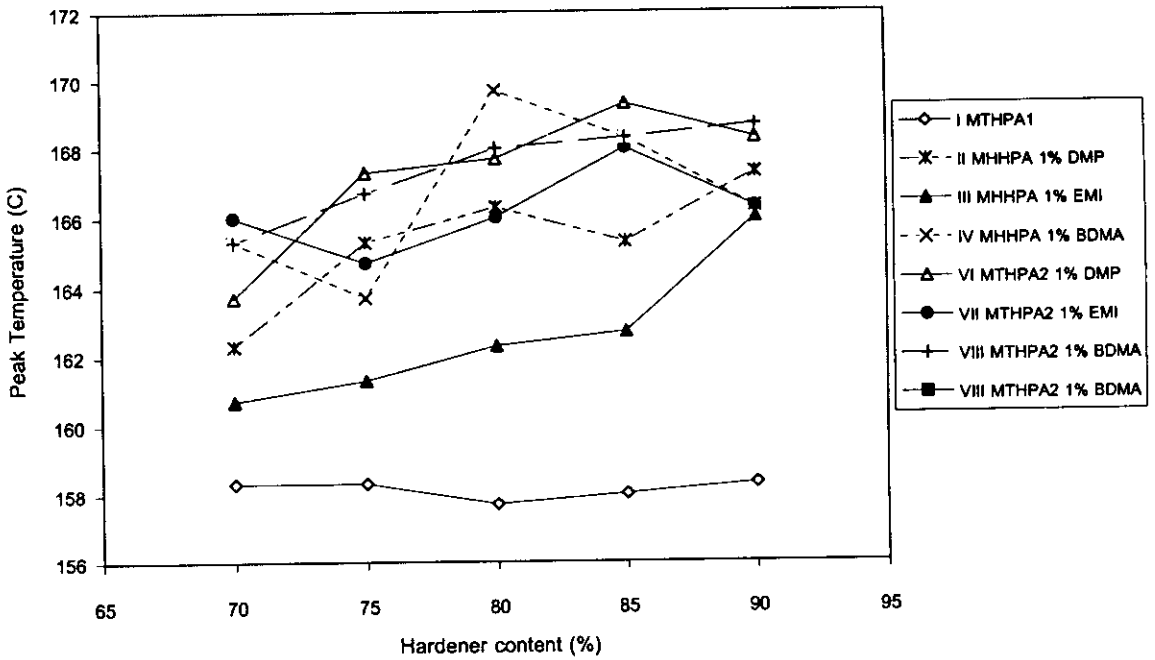
ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC แสดง T_g ของอีพ็อกซีที่เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ภายในเครื่อง DSC

Resin	Hardener	Accelerator	T_g (°C)				
			100:90	100:85	100:80	100:75	100:70
I	MTHPA1	Unknown	114.4	119.1	115.7	113.7	119.4
II	MHHPA	DMP-30	83.4	84.7	93.1	93.1	98.1
III		EMI	146.1	147.7	146.4	146.1	139.1
IV		BDMA	97.4	93.1	88.7	108.4	101.1
VI	MTHPA2	DMP-30	75.7	70.7	83.7	73.7	88.4
VII		EMI	117.4	123.4	131.4	134.4	127.7
VIII		BDMA	75.7	75.7	85.1	80.4	89.1

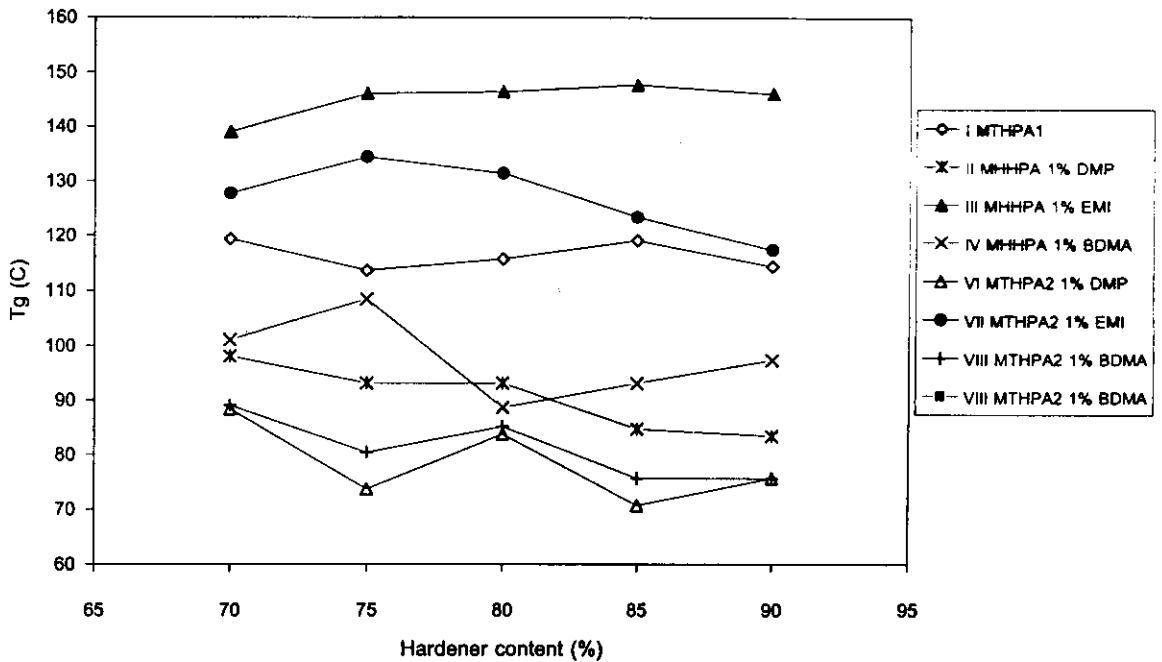
ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นี้จะเรียกว่า fresh sample เนื่องจากยังไม่ผ่านการอบและยังไม่เกิดปฏิกิริยา การได้รับความร้อนภายในเครื่อง DSC จัดว่าเป็นการอบและทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ดังนั้น ค่า ΔH หรือพื้นที่ใต้กราฟของ exothermic peak ที่ได้จึงเทียบเท่ากับปริมาณความร้อนที่คายออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ (100% conversion) ค่า ΔH นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซี (curing conversion) ที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟและดูอุณหภูมิในการทดลองต่อไป รูปที่ 3.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของเรซินและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา สังเกตได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น สูตร VII (MTHPA2 + 1% EMI) มีปริมาณความร้อนออกมามากที่สุด รองลงมาคือสูตร III (MHHPA + 1% EMI) ในสูตรหนึ่งๆนั้น ค่าปริมาณความร้อนอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าอัตราส่วนผสมจะต่างกัน อาจเป็นเพราะว่าปริมาณสารทำให้แข็งที่ใช้ในช่วง 75 – 90 phr (per hundred of epoxy) นี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้ VII > III > I > VIII > VI > IV > II



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาและส่วนผสม



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่พีคของปฏิกิริยาและส่วนผสม



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_g และส่วนผสม

เป็นที่ทราบกันว่า cross-linking reaction เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และอีพ็อกซีเป็นฉนวนความร้อน ดังนั้น อุณหภูมิที่จุดสูงสุดนี้น่าจะเป็นตัวบ่งชี้ว่า การให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นไม่ควรจะใช้เกินอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้ นอกจากนี้ตำแหน่งนี้น่าจะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้อาจไม่สอดคล้องกับกระบวนการอบจริงในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากอัตราการให้ความร้อนและขนาดของชิ้นงานต่างกัน สูตร I มี peak temperature ต่ำสุด และมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราส่วน สูตรอื่น ๆ มี peak temperature สูงกว่าและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารทำให้แข็ง ความแตกต่างที่มากที่สุดของช่วงอุณหภูมิในสูตรหนึ่ง ๆ มีค่าประมาณ 5°C พิจารณาอีกแง่มุมหนึ่งจะได้ว่า ถ้า peak temperature ต่ำกว่าแสดงว่ามีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเหล่านี้อยู่ในช่วงเดียวกันและค่า onset temperature ของทุกสูตรจะอยู่ในช่วง 130°C ขึ้นไป แสดงว่าอุณหภูมิที่จะใช้ในการอบอีพ็อกซีควรจะสูงกว่า 130°C

Glass transition temperature (T_g) แสดงในตารางที่ 3.8 และในรูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมในแต่ละสูตรกับค่า T_g มีทิศทางไม่แน่นอนเมื่อสารทำให้แข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น นั่นคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือมีทั้งค่าเพิ่มขึ้นและลดลง หรือมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่หากดูรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าสามารถแบ่งเรซินตามค่า T_g ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ โดยกลุ่มแรกจะมีค่า T_g สูงกว่า 110°C ซึ่งได้แก่ สูตรที่ I, III และ VII ส่วนที่เหลือจะมีค่า T_g ต่ำกว่า 110°C ในทุกอัตราส่วน เป็นที่น่าสังเกตว่า EMI จะให้ค่า T_g สูงสุดในบรรดากลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยา

สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ΔH มีค่าใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วนผสม เมื่อใช้ hardener และ accelerator ชนิดเดียวกัน
2. สูตร VIII (MTHPA2, 1%BDMA) มีปริมาณความร้อนใกล้เคียงกับสูตร I (MTHPA1)
3. สูตร VII (MTHPA2, 1% EMI) มีปริมาณความร้อนออกมามากที่สุด

3.1.3 การทดลองอบอีพ็อกซีด้วยเตาไมโครเวฟและปริมาณปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความสามารถในการอบด้วยเตาไมโครเวฟ ของอีพ็อกซีเรซินสูตรต่าง ๆ และเปรียบเทียบปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของเรซินภายใต้สภาวะการอบที่ต่างกัน โดยเลือกสูตรที่มีสารทำให้แข็ง 80 phr และมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1%² (สูตร I/3 - VII/3 สูตรเดียวกันกับผลการทดลองที่ 3.1.2) เทลงในเบ้าเทพลอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm ลึก 2 mm อบด้วยเตาไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ ตัวแปรคือ ระดับกำลัง (level 2 - 5) และ เวลา (2 - 14 นาที) และวัดอุณหภูมิของตัวอย่างหลังการอบทันทีภายนอกเตาไมโครเวฟ โดยวัดให้แล้วเสร็จภายใน 10 วินาที เก็บตัวอย่างที่อบแล้วไว้ในช่องแช่แข็งของตู้เย็นจนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เนื่องจากเป็นการทดลองเบื้องต้นจึงใช้เบ้าพิมพ์ขนาดเล็ก

ผลการทดลองพบว่าไม่ควรใช้ระดับกำลังสูงๆ เพราะเรซินจะไหม้หรือเกิดฟองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 3.9 ตัวอย่างที่มีลักษณะดี หมายถึง เป็นของแข็งและไม่มีฟองอากาศ บางตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์หรือเกิดได้น้อยจะมีลักษณะคล้ายเยลลี่ ตัวอย่างที่มีฟองอากาศจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณกลางชิ้นงานก่อน และจะมีฟองอากาศเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้น หากสภาวะในการอบรุนแรงมาก ตัวอย่างก็จะไหม้และมีฟองอากาศมากเป็นที่สังเกตว่าการไหม้ก็จะเริ่มเกิดขึ้นในส่วนกลางชิ้นงาน จะเลือกเอาบริเวณกลางชิ้นงานหรือส่วนใกล้เคียงที่มีลักษณะดี คือ ไม่มีฟองอากาศและไม่ไหม้ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC การวางเรซินในเตาไมโครเวฟ จะวางในบริเวณจุดศูนย์กลางของจานหมุน

รูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (conversion) ของอีพ็อกซีเรซินภายหลังการอบด้วยเตาไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ ของเรซินทุกสูตร พบว่าเรซินส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยามากกว่า 90% ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาไมโครเวฟคำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าปริมาณความร้อนที่คายออกมา (heat of reaction, ΔH) ของตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเทียบกับตัวอย่างที่เรียกว่า fresh sample และเขียนเป็นสูตรดังนี้

$$\text{Conversion (\%)} = 100 - \frac{[(\Delta H_{\text{microwave cured sample}}) \times 100]}{\Delta H_{\text{fresh sample}}} \quad (3.2)$$

รูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 แสดงค่าอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างที่วัดได้ทันทีที่อบแล้วเสร็จเมื่อใช้ระดับกำลังที่ 2 และ 3 ตามลำดับ อุณหภูมิที่วัดได้เมื่อใช้ระดับกำลัง 2 (รูปที่ 3.7) มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลานานขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิที่วัดได้ในรูปที่ 3.8 เมื่อใช้ระดับกำลัง 3 มีแนวโน้มคงที่ อุณหภูมิที่ลดลงเมื่อเวลาอบนานขึ้นนั้น น่าจะเกิดจากการที่เรซินเกิดปฏิกิริยาไปแล้วและอาจเป็นข้อผิดพลาดในการวัด (experimental error) เพราะข้อควรระวังในการใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรดคือระยะโฟกัส เนื่องจากเบ้าเทพลอนที่ใช้ในการอบมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับช่องใส่ตัวอย่างของเตาไมโครเวฟ ซึ่งอาจเป็นขนาดที่ไม่เหมาะสมที่จะได้รับคลื่นไมโครเวฟกระจายทั่วชิ้นงาน ทำให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ได้มีข้อผิดพลาดเล็กน้อย แต่คิดว่าเป็นข้อผิดพลาดที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการทดลองตอนนี้เป็นการตรวจสอบความสามารถในการอบอีพ็อกซีเรซินด้วยเตาไมโครเวฟรุ่นนี้ จึงใช้ปริมาณเรซินไม่มากนัก เป็นการประหยัดเรซินและเทพลอน เมื่อจะทำการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล จะเตรียมชิ้นงานขนาดใหญ่ซึ่งจะมีพื้นที่ในการรับคลื่นไมโครเวฟมากขึ้นและสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

ในการทดลองเบื้องต้นใช้ระดับกำลังวัตต์สูงและเวลานั้นๆ เช่น ระดับ 5 ในเวลา 2 นาที ปรากฏว่าชิ้นงานไหม้หรือมีฟองอากาศมาก จึงทำการลดระดับกำลังวัตต์และเพิ่มระยะเวลาในการอบให้นานขึ้น จึงจะได้ชิ้นงานที่มี

² ปริมาณที่ระบุเป็น % และ phr นี้มีความหมายเดียวกันคือ เป็นปริมาณที่เทียบกับอีพ็อกซี 100 ส่วนโดยน้ำหนัก เช่น อีพ็อกซี 100 g ใช้สารทำให้แข็ง 80 g และตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g

ลักษณะดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของนักวิจัยอื่นๆที่ใช้เวลาค่อนข้างนาน เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน ซึ่งต่างจากงานวิจัยของนักวิจัยอื่นๆที่ประดิษฐ์เตาไมโครเวฟขึ้นมาเอง ทำให้การเปรียบเทียบผลการทดลองเป็นไปได้ระดับหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เตาไมโครเวฟที่ใช้จะมีระยะเวลาในการปล่อยไมโครเวฟออกมาเป็นช่วงๆ ขึ้นอยู่กับระดับกำลังที่ใช้ เช่น ที่ระดับกำลังเท่ากับ 2 จะปล่อยไมโครเวฟออกมาเป็นเวลาเพียง 18% ของระยะเวลาที่กำหนดให้เตาไมโครเวฟทำงาน คือ ในเวลา 17 วินาที เตาไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นออกมาเพียง 3 วินาที และที่ระดับกำลังเท่ากับ 3 จะปล่อยไมโครเวฟออกมาเป็นเวลาเพียง 29% ของระยะเวลาที่กำหนดให้เตาไมโครเวฟทำงาน คือ ในเวลา 17 วินาที เตาไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นออกมาเพียง 5 วินาที ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าในการทดลองที่ใช้เวลา 16 นาที นั้น แท้จริงจะใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนจากไมโครเวฟเพียง 2.88 นาที และ 4.64 นาที เมื่อใช้ระดับกำลังที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการอบด้วยเตาไมโครเวฟนี้สั้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบด้วยตู้อบความร้อนที่ต้องใช้เวลาถึง 15 นาที ที่ 150°C ถึงแม้ว่าระดับกำลัง 2 จะให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างสูง (95%) ในหลายสูตร แต่เมื่อเทียบกับการใช้ระดับกำลัง 3 จะพบว่าที่ระดับกำลัง 3 นั้น ปริมาณการเกิดปฏิกิริยามีค่าตั้งแต่ 95% ขึ้นไป ผลการทดลองของ IV/3 ที่เวลา 2 นาที ในรูปที่ 3.6 มีค่าค่อนข้างต่ำ (90%) อาจจะเป็นข้อผิดพลาดในการทดลอง ขอให้สังเกตว่าผลการทดลองนี้จะไม่สอดคล้องกับผลการทดลองต่อมา ที่ใช้ขนาดเบ้าเทฟลอนขนาดใหญ่ ในขณะที่ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับกำลัง 2 สามารถทำให้อีพ็อกซีแข็งตัวได้ คือเกิดปฏิกิริยาเคมี ถ้าใช้เบ้าเทฟลอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 17 – 20 mm และให้ชั้นงานมีความหนา 1 – 3 mm จะไม่สามารถใช้ระดับกำลัง 2 ได้เลย ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาถึง 25 นาที อีพ็อกซีจะไม่เป็นของแข็ง อย่างไรก็ตาม ในการทดลองต่อมา ทำให้ทราบว่าไมโครเวฟเหมาะกับตัวอย่างที่มีขนาดค่อนข้างหนามากกว่าตัวอย่างที่ค่อนข้างบาง และตัวอย่างขนาดเล็กเกินไป เช่น เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm ไม่เหมาะที่จะใช้กับเตาไมโครเวฟรุ่นนี้ในโครงการวิจัยนี้

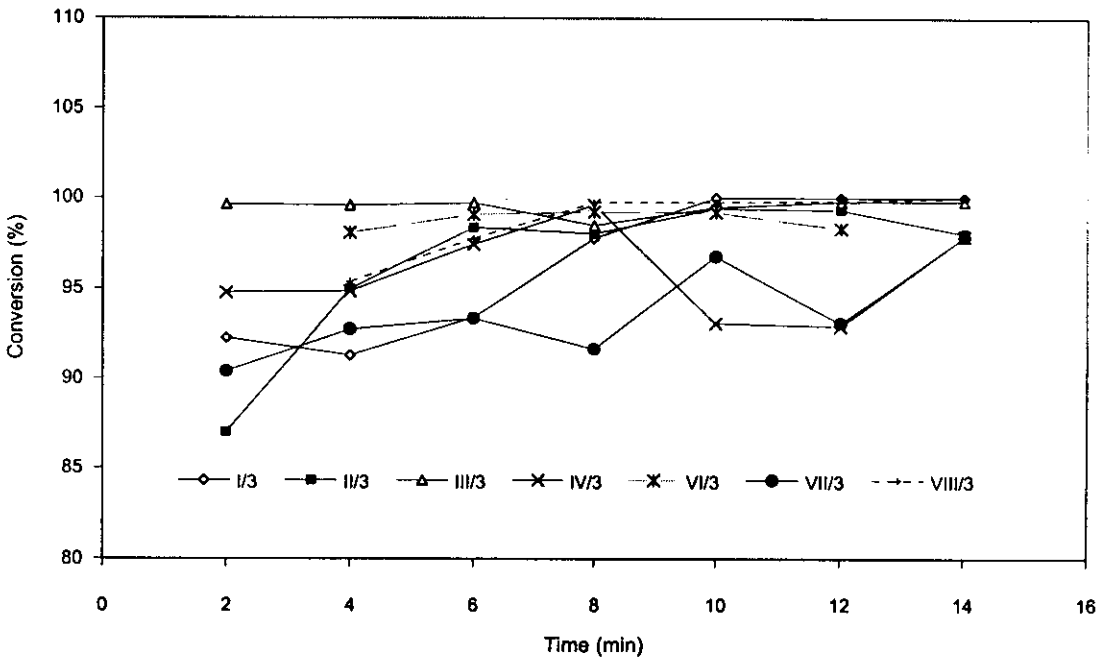
ได้มีรายงานการวิจัยที่แสดงอุณหภูมิของตัวอย่างหลังการอบด้วยเตาไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการอบเป็นรูปประมงคว่ำ แต่ผลการทดลองในโครงการวิจัยนี้ต่างจากการรายงานดังกล่าว คือ อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าลดลงตามเวลาเมื่อใช้ระดับกำลัง 2 และมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้ระดับกำลัง 3 อุณหภูมิที่วัดได้ไม่แสดงความสัมพันธ์กับปริมาณปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน แต่มีแนวโน้มว่าการใช้ระดับกำลังสูงกว่า จะทำให้เกิดปฏิกิริยามากกว่าและตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงกว่า นอกจากนี้ อุณหภูมิที่วัดได้ไม่สอดคล้องกับ peak temperature ของ fresh sample ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC (รูปที่ 3.3) อุณหภูมิที่วัดได้ทั้งในรูปที่ 3.7 และ 3.8 มีค่าต่ำกว่า peak temperature ของ fresh sample ซึ่งส่วนใหญ่มีอุณหภูมิสูงกว่า 160°C สันนิษฐานว่าอุณหภูมิที่วัดได้นี้น่าจะเป็นความร้อนที่คายออกมาจากการเกิดปฏิกิริยา และการเกิดปฏิกิริยาน่าจะเกิดได้เร็วภายในเวลาที่อบ 2 – 4 นาที (ดูปริมาณการเกิดปฏิกิริยาที่มีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการอบเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6) เมื่อให้เวลานานการอบนานขึ้นทำให้ชิ้นตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยาแล้วมีเวลาในการถ่ายเทความร้อนนานขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิที่วัดได้ในระดับกำลัง 2 จึงมีค่าลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การใช้ระดับกำลังสูงกว่า หมายถึงการใช้กำลังวัตต์หรือพลังงานสูงกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยามากกว่าและมีความร้อนคายออกมามากกว่า ดังนั้น อุณหภูมิที่วัดได้ในระดับกำลัง 3 จึงมีค่าสูงกว่า

สรุปผลการทดลอง

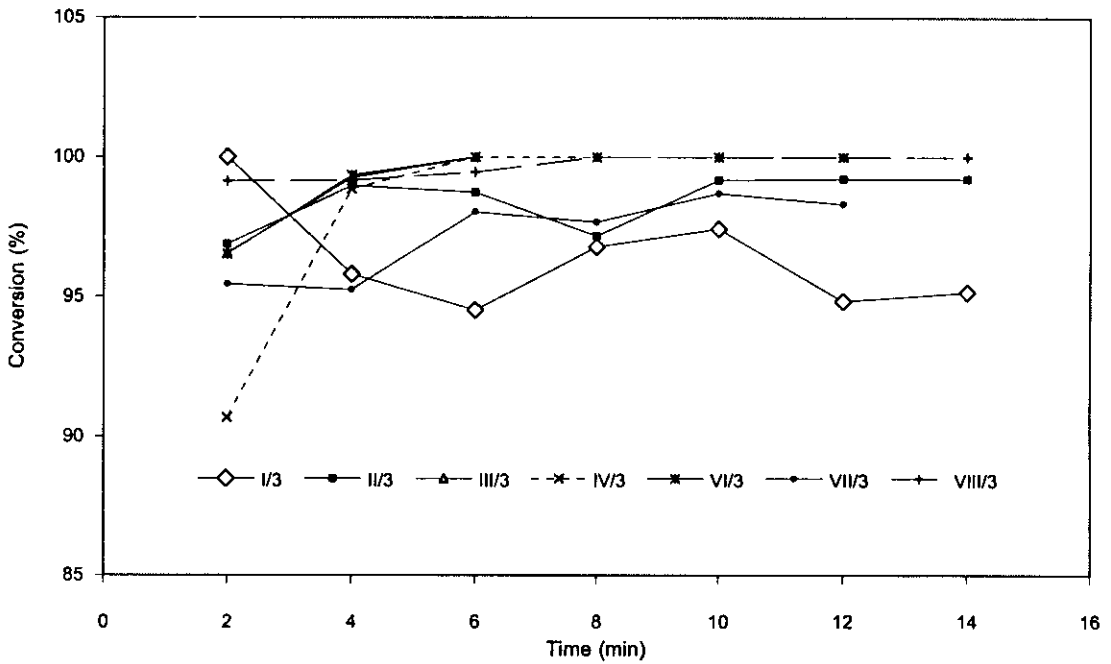
1. อีพ็อกซีเรซินทุกสูตรของโครงการวิจัยนี้สามารถอบด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนได้และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลได้สมบูรณ์
2. การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะใช้เวลาสั้นกว่าการอบด้วยตู้อบความร้อน
3. การอบด้วยเตาไมโครเวฟควรใช้ระดับกำลังค่อนข้างต่ำและเวลานาน

ตารางที่ 3.9 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ

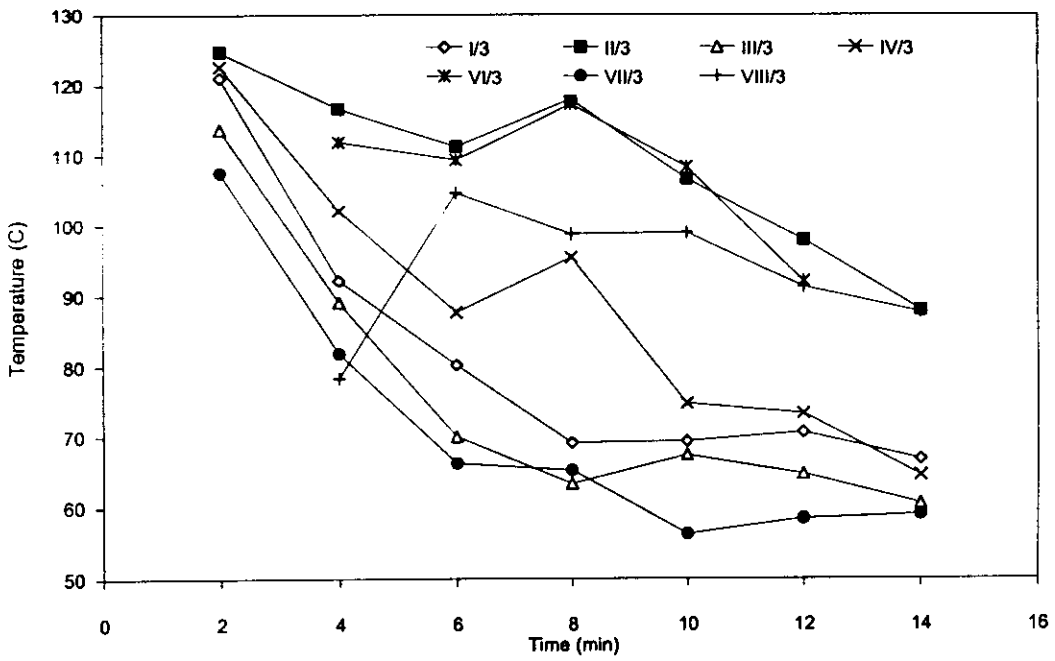
	I/3	II/3	III/3	IV/3	VI/3	VII/3	VIII/3
Level 2 2 min	ดี	ดี	ดี	ดี	เหมือนเยลลี่	ดี	เหมือนเยลลี่
4 min	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
6 min	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
8 min	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
10 min	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
12 min	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
14 min	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
Level 3 2 min	ดี	ดี	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	ดี	ดี	ดี
4 min	ดี	ดี	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	ดี	ดี
6 min	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	ดี	ดี
8 min	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	-	-	-	ดี	มีฟองอากาศ
10 min	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	-	-	-	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ
12 min	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	-	-	-	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ
14 min	มีฟองอากาศ	ใหม่	-	-	-	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ
Level 4 2 min	-	ดี	มีฟองอากาศ	ใหม่	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ
4 min	-	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	ใหม่	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ
6 min	-	-	ใหม่	ใหม่	-	มีฟองอากาศ	มีฟองอากาศ
Level 5 2 min	-	ใหม่	ใหม่	-	มีฟองอากาศ	ใหม่	มีฟองอากาศ
4 min	-	-	-	-	-	-	มีฟองอากาศ



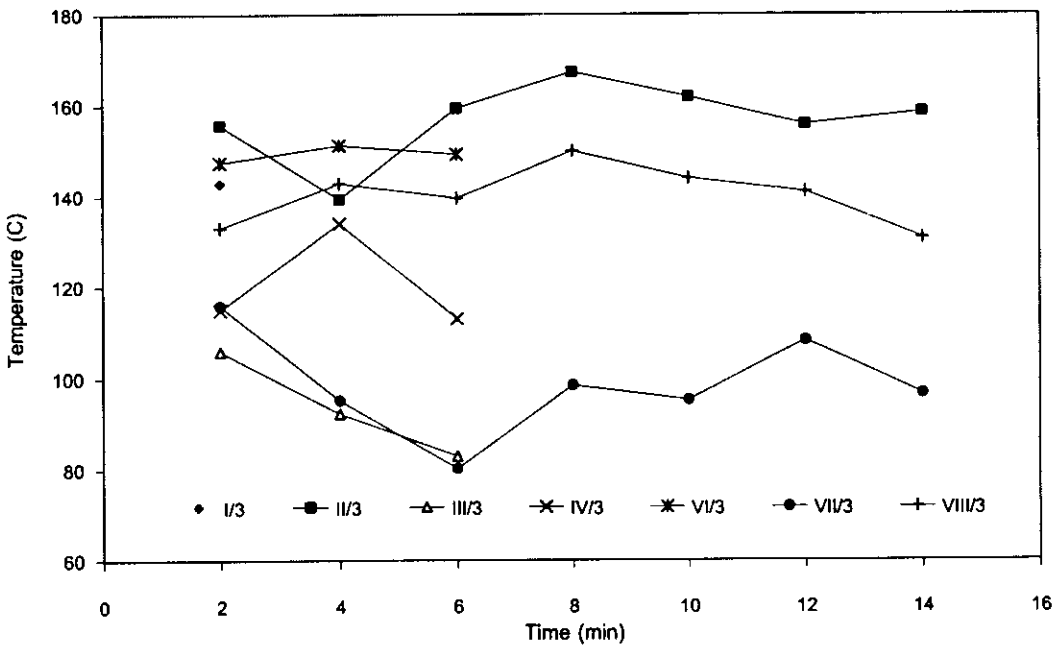
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดปฏิกิริยาและระยะเวลาในการอบตัวอย่างด้วยเตาไมโครเวฟภายใต้ระดับกำลัง 2



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดปฏิกิริยาและระยะเวลาในการอบตัวอย่างด้วยเตาไมโครเวฟภายใต้ระดับกำลัง 3



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงานภายหลังจากการอบและระยะเวลาในการอบตัวอย่างด้วยเตาไมโครเวฟภายใต้ระดับกำลัง 2



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงานภายหลังจากการอบและระยะเวลาในการอบตัวอย่างด้วยเตาไมโครเวฟภายใต้ระดับกำลัง 3

3.2 อีพ็อกซีเรซินอบด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับขึ้นตัวอย่างบาง

3.2.1 สมบัติเชิงกล

เตรียมอีพ็อกซีเรซินสูตรต่างๆ (I - VIII) ที่มีสารทำให้แข็ง 80 phr โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% การใช้เตาไมโครเวฟนี้จะใช้งานประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วหยุดพักประมาณ 30 นาที เนื่องจากเตาจะร้อนมากและจากการทดลองพบว่าเมื่อเกิดการเกิดปฏิกิริยาของเรซิน ตัวอย่างที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟจะมีผิวหน้าเป็นคลื่นวงกลม เนื่องจากการหมุนของจานรอง จึงต้องขัดผิวหน้าให้เรียบ ทำให้ความหนาของชิ้นงานมีขนาดลดลง จากความหนาเดิม 1.4 mm ลดลงเป็น 1 mm หรือน้อยกว่า ได้ทำการทดลองเพิ่มความหนาของตัวอย่างให้หนากว่า 1.4 mm แต่ไม่เป็นผลสำเร็จ เนื่องจากการใส่เรซินลงในเบ้าเทฟลอนมากขึ้น จะทำให้เกิดคลื่นที่ผิวหน้ามากขึ้นและถูกเหวี่ยงล้นออกมานอกเบ้า ข้อจำกัดนี้เกิดขึ้นเพราะเบ้าเทฟลอนที่ใช้มีความลึกเพียง 4 mm หากทำให้ลึกมากกว่านี้ เช่น 6 - 8 mm จะต้องใช้แผ่นเทฟลอนที่หนากว่านี้มาก แผ่นเทฟลอนที่นำมาใช้เป็นแม่พิมพ์นี้มีความหนาเพียง 1 cm จึงเจาะลึกได้เพียง 4 mm เพื่อให้แม่พิมพ์มีความหนาที่ฐาน 6 mm และรักษาความแข็งแรงของฐานนี้ไว้ ถึงแม้ว่าเทฟลอนจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้น้อย แต่ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลของอีพ็อกซี เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและมีความร้อนออกมามาก เชื่อว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีค่าไม่น้อยกว่า 150 °C ในการใช้เตาไมโครเวฟ 1 ชั่วโมง จะทำการอบเรซินได้ประมาณ 4 ครั้ง ดังนั้นเบ้าเทฟลอนจะเริ่มนิ่มและอ่อนนุ่มขึ้นมาบริเวณส่วนกลาง จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ไม่สามารถเจาะลึกเกิน 4 mm ได้ ตัวอย่างที่ได้จากการอบด้วยตู้อบมีผิวหน้าเรียบไม่มีการขัด การกลึงชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ การตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมและการบากรูปตัววี ต้องใช้ความระมัดระวังและขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ทำ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างอีพ็อกซีเปราะมาก ๆ มักจะเกิดการแตกหัก ทำให้เสียเวลาในการเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนนี้มาก

เบ้าเทฟลอนที่กล่าวในหัวข้อ 3.1.3 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm ปริมาณเรซินที่ใช้ประมาณ 1.5 กรัม ชิ้นตัวอย่างมีขนาดหนาประมาณ 2 mm สภาวะการอบที่เหมาะสมคือระดับกำลัง 2 เวลา 4-14 นาที เมื่อใช้ระดับกำลัง 3 ชิ้นงานมีฟองอากาศและเริ่มไหม้ถ้าใช้เวลานานขึ้น ไม่สามารถใช้ระดับกำลัง 4 ได้ เพราะชิ้นงานไหม้ จากการทดลองต่อมาพบว่าสภาวะการอบเรซินขึ้นอยู่กับปริมาณหรือขนาดของเรซินด้วย เมื่อทำการอบเรซินที่มีปริมาณมากขึ้น จะต้องใช้สภาวะที่รุนแรงขึ้นดังเช่นการทดลองนี้ที่ใช้เรซินประมาณ 57 กรัม ความหนาของชิ้นงานในการทดลองตอนนี้ประมาณ 1 - 1.4 mm

เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM จึงต้องเตรียมแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องหาสภาวะการอบที่เหมาะสมใหม่ พบว่าจำเป็นต้องใช้ระดับกำลังของเตาไมโครเวฟอยู่ในช่วง 3 และ 4 ในเวลา 10 - 14 นาที จึงจะได้ชิ้นงานที่ดี ที่ระดับกำลัง 5 จะเกิดการไหม้บริเวณกลางชิ้นงาน การเตรียมชิ้นงานในแต่ละสูตรจะเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดสำหรับสูตรนั้นๆ ไม่จำเป็นต้องกำหนดใช้สภาวะเดียวกัน เรซินที่อบด้วยระดับกำลัง 2 ไม่แข็งตัวถึงแม้จะเพิ่มเวลาเป็น 20 นาที เป้าหมายในการทดลองนี้ต้องการใช้เวลาในการอบไม่เกิน 15 นาที เพราะเวลาที่ใช้ในการอบผลิตภัณฑ์ในโรงงานจะใช้เวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C แต่มีการทดลองใช้เวลาอบ 20 นาที ด้วยเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ระดับกำลังและเวลาที่ใช้ในการอบด้วยเตาไมโครเวฟของอีพ็อกซีเรซินสูตรต่างๆแสดงในตารางที่ 3.10 ส่วนการอบด้วยตู้อบนั้น การเซตตัวของเรซินขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและขนาดของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่าเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ไม่แข็งตัวสมบูรณ์เมื่ออบด้วยตู้อบใช้เวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C ต้องใช้เวลา 20 นาที จึงจะแข็งตัวดี ในทางตรงกันข้าม หากตัวอย่างมีขนาดเล็กๆ เช่น เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว หนา 2 mm จะแข็งตัวได้ดีเมื่อใช้เวลา 15 นาที

การทดสอบสมบัติเชิงกลนี้มีการเปรียบเทียบเรซินที่อบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C โดยใช้เวลาในการอบที่ 14 นาที และ 20 นาที สำหรับเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และ 1% ตามลำดับ กับเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟตามตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบ tensile properties แสดงในตารางที่ 3.11 - 3.14 ผลการทดสอบ flexural properties

แสดงในตารางที่ 3.15 – 3.18 และผลการทดสอบ impact strength แสดงในตารางที่ 3.19 – 3.21 ค่า flexural elasticity ที่ได้จากการทดสอบแบบ 3-point bending แสดงผลในรูปแบบ modulus

ตารางที่ 3.10 สูตรเรซินและสภาวะการอบด้วยเตาไมโครเวฟ

Resin	Hardener	Accelerator	Level	Time (min)
I	MTHPA1	Unknown	4	10, 14, 20
II	MHHPA	1%, 4% DMP	4	10, 14, 20
III	MHHPA	1%, 4% EMI	3	10, 14, 20
IV	MHHPA	1%, 4% BDMA	3	10, 14, 20
VI	MTHPA2	1%, 4% DMP	4	10, 14, 20
VII	MTHPA2	1%, 4% EMI	3	10, 14, 20
VIII	MTHPA2	1%, 4% BDMA	4	10, 14, 20

ตารางที่ 3.11 Tensile properties ของเรซินที่อบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 14 นาที เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 4%

Resin	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	1.07 ± 0.20	55.17 ± 8.31	4.96 ± 2.07
II	1.05 ± 0.10	37.53 ± 8.33	3.62 ± 0.82
III	1.13 ± 0.15	81.37 ± 10.49	7.27 ± 2.2
IV	1.28 ± 0.33	99.46 ± 6.22	8.92 ± 1.39
VI	1.08 ± 0.08	76.23 ± 13	5.13 ± 1.09
VII	1.02 ± 0.19	56.18 ± 9.54	6.03 ± 2.37
VIII	1.08 ± 0.25	65.60 ± 11.83	7.37 ± 2.5

ตารางที่ 3.12 Tensile properties ของเรซินที่อบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 20 นาที เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 1%

Resin	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	1.22 ± 0.22	70.86 ± 2.14	9.7 ± 1.34
II	0.79 ± 0.23	33.09 ± 9.6	4.33 ± 1.18
III	0.68 ± 0.05	48.32 ± 2.76	5.5 ± 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 ± 0.07	54.27 ± 9.29	6.41 ± 2.05

ตารางที่ 3.13 Tensile properties ของเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ยกเว้นสูตร I

Resin	Level	Time (min)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	4	10	1.17 ± 0.12	57.32 ± 7.95	5.46 ± 0.90
		14	0.92 ± 0.21	61.03 ± 11.86	5.58 ± 0.82
		20	1.17 ± 0.06	49.64 ± 7.17	4.97 ± 0.8
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	1.1 ± 0.06	43.64 ± 5.09	4.47 ± 0.41
III	3	10	0.93 ± 0.04	33.68 ± 5.49	4.31 ± 0.7
		14	0.84 ± 0.07	41.68 ± 7.64	5.05 ± 1.02
		20	1.14 ± 0.13	43.42 ± 5.01	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 ± 1.53
		20	1.11 ± 0.17	43.23 ± 9.91	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	61.45 ± 4.09	6.28 ± 0.65
		20	1.29 ± 0.13	48.25 ± 4.09	4.57 ± 1.71

ตารางที่ 3.14 Tensile properties ของเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ยกเว้นสูตร I

Resin	Level	Time (min)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	4	10	1.17 ± 0.12	57.32 ± 8.31	5.46 ± 0.91
		14	0.92 ± 0.21	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	3	14	1.29 ± 0.14	39.30 ± 4.60	3.46 ± 0.49
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
VII	3	14	1.13 ± 0.06	70.78 ± 7.12	9.26 ± 3.30
VIII	4	10	1.13 ± 0.12	49.48 ± 3.29	4.18 ± 0.34
		14	1.35 ± 0.11	54.23 ± 8.83	4.41 ± 0.82

ตารางที่ 3.15 Flexural properties ของเรซินที่อบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 14 นาที เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ยกเว้นสูตร I

Resin	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	3.25 ± 0.50	121 ± 21	6.48 ± 1.79
II	2.95 ± 0.81	64 ± 23	2.3 ± 0.68
III	3.31 ± 0.10	128 ± 9	7.15 ± 1.99
IV	3.19 ± 0.60	119 ± 18	6.01 ± 2.16
VI	3.43 ± 0.25	125 ± 23	6.37 ± 2.00
VII	3.57 ± 0.38	133 ± 14	7.77 ± 2.44
VIII	2.84 ± 1.47	108 ± 40	7.49 ± 2.65

ตารางที่ 3.16 Flexural properties ของเรซินที่อบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 20 นาที เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ยกเว้นสูตร I

Resin	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	2.61 ± 1.7	107 ± 5	8.24 ± 1.17
II	3.70 ± 0.4	111 ± 32	3.39 ± 1.24
III	3.32 ± 0.31	129 ± 24	5.97 ± 1.61
IV	3.62 ± 0.62	72 ± 19	2.14 ± 0.50
VI	4.24 ± 0.26	115 ± 28	3.12 ± 1.39
VII	3.33 ± 0.15	132 ± 6	6.70 ± 0.92
VIII	6.77 ± 1.39	130 ± 30	10.97 ± 0.33

ตารางที่ 3.17 Flexural properties ของเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ยกเว้นสูตร

Resin	Level	Time (min)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	4	10	3.22 ± 0.26	122 ± 23	6.62 ± 1.91
		14	3.11 ± 0.41	96 ± 19	4.88 ± 3.03
		20	2.77 ± 0.68	75 ± 26	3.60 ± 2.68
II	4	10	2.91 ± 0.32	102 ± 34	4.79 ± 2.50
		14	3.28 ± 0.73	103 ± 62	4.29 ± 2.9
		20	3.62 ± 0.52	85 ± 35	2.84 ± 1.87
III	3	10	2.34 ± 0.27	116 ± 13	8.3 ± 1.61
		14	3.21 ± 0.80	128 ± 40	5.67 ± 2.05
		20	2.11 ± 0.46	59 ± 13	2.93 ± 0.66
IV	3	10	3.09 ± 0.27	120 ± 18	5.66 ± 2.31
		14	2.85 ± 0.34	95 ± 35	4.59 ± 2.78
		20	2.17 ± 0.54	48 ± 10	2.41 ± 0.21
VI	4	10	3.23 ± 0.37	123 ± 27	5.5 ± 1.94
		14	3.25 ± 0.43	117 ± 32	5.17 ± 2.22
		20	3.95 ± 1.64	85 ± 24	2.88 ± 1.96
VII	3	10	2.77 ± 0.59	123 ± 16	8.52 ± 1.46
		14	3.18 ± 0.33	118 ± 24	5.01 ± 1.82
		20	2.32 ± 0.55	95 ± 30	7.9 ± 3.58
VIII	4	10	2.97 ± 0.47	92 ± 19	4.05 ± 2.23
		14	3.14 ± 0.40	110 ± 24	4.87 ± 2.14
		20	2.67 ± 0.47	115 ± 18	8.46 ± 0.71

ตารางที่ 3.18 Flexural properties ของเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ยกเว้นสูตร

Resin	Level	Time (min)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
I	4	14	3.11 ± 0.41	96 ± 19	4.88 ± 3.03
		20	2.72 ± 0.68	75 ± 26	3.6 ± 2.68
II	4	14	3.48 ± 0.15	85 ± 19	2.50 ± 0.60
		20	3.62 ± 0.52	85 ± 35	2.84 ± 1.87
III	3	14	2.75 ± 1.24	112 ± 48	5.78 ± 2.89
		20	2.11 ± 0.46	59 ± 13	2.93 ± 0.66
IV	3	14	3.15 ± 0.24	74 ± 18	2.38 ± 0.43
		20	2.17 ± 0.54	48 ± 9	2.41 ± 0.21
VI	4	10	3.58 ± 0.38	115 ± 32	3.38 ± 0.58
		14	3.70 ± 0.35	85 ± 16	2.36 ± 0.37
		20	3.95 ± 1.64	85 ± 24	2.88 ± 1.96
VII	3	14	3.47 ± 0.45	105 ± 34	3.68 ± 1.85
		20	2.32 ± 0.55	95 ± 30	7.9 ± 3.58
VIII	4	14	3.20 ± 0.30	50 ± 13	3.36 ± 1.31
		20	2.67 ± 0.47	115 ± 18	8.46 ± 0.71

ตารางที่ 3.19 Impact strength (kJ/m^2) ของเรซินที่อบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C

Resin	Cure time 14 min (4% accelerator)	Cure time 20 min (1% accelerator)
I*	1.80 ± 0.07	3.84 ± 0.83
II	0.49 ± 0.24	2.63 ± 0.88
III	1.65 ± 0.49	0.41 ± 0.18
IV	0.53 ± 0.27	1.21 ± 0.44
VI	2.56 ± 0.82	2.32 ± 0.55
VII	1.93 ± 0.48	1.88 ± 0.28
VIII	2.15 ± 0.60	2.24 ± 0.21

(*ไม่ทราบชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)

ตารางที่ 3.20 Impact strength ของเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ยกเว้นสูตร I

Resin	Level	Time (min)	Impact strength (kJ/m ²)
I	4	10	1.80 ± 0.46
		14	0.89 ± 0.11
		20	2.04 ± 3.06
II	4	10	1.37 ± 0.60
		14	1.15 ± 0.37
		20	0.77 ± 0.2
III	3	10	1.28 ± 0.63
		14	2.27 ± 0.50
		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 ± 0.60
		20	0.96 ± 0.24
VII	3	10	0.87 ± 0.16
		14	1.39 ± 0.50
		20	1.97 ± 0.6
VIII	4	10	1.84 ± 0.60
		14	1.06 ± 0.25
		20	2.04 ± 0.36

ตารางที่ 3.21 Impact strength ของเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ยกเว้นสูตร I

Resin	Level	Time (min)	Impact strength (kJ/m ²)
I	4	14	0.89 ± 0.11
II	4	10	1.10 ± 0.38
		14	1.47 ± 0.73
III	3	14	1.10 ± 0.38
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	4	10	1.78 ± 0.53

- ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้ มีสภาวะการอบและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อเป็นการง่ายต่อการเปรียบเทียบ จึงได้วาดกราฟแสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของตัวแปรต่างๆ โดยมีการเปรียบเทียบดังนี้

1. อุณหภูมิอบ : 14 นาที (4%) - 20 นาที (1%)
2. เตาไมโครเวฟ (4%) : 14 นาที - 10 นาที
3. เตาไมโครเวฟ (1%) : 14 นาที - 10 นาที
4. เตาไมโครเวฟ (14 นาที) : 4% - 1%
5. เตาไมโครเวฟ (10 นาที) : 4% - 1%
6. อุณหภูมิอบ 14 นาที 4% - เตาไมโครเวฟ 10 นาที 4% - เตาไมโครเวฟ 10 นาที 1%
7. อุณหภูมิอบ 14 นาที 4% - เตาไมโครเวฟ 14 นาที 4% - เตาไมโครเวฟ 14 นาที 1%
8. อุณหภูมิอบ 20 นาที 1% - เตาไมโครเวฟ 14 นาที 1% - เตาไมโครเวฟ 10 นาที 1%
9. อุณหภูมิอบ 20 นาที 1% - เตาไมโครเวฟ 14 นาที 4% - เตาไมโครเวฟ 10 นาที 4%

รูปที่ 3.9 – 3.17 แสดง tensile properties (modulus, stress at break, strain at break) ของการเปรียบเทียบดังกล่าว รูปที่ 3.18 – 3.22 แสดงการเปรียบเทียบ flexural properties (modulus, stress at break, strain at break) และ รูปที่ 3.23 – 3.27 แสดงการเปรียบเทียบ impact strength ของเรซินที่ได้จากการอบในสภาวะต่างๆ ค่า impact strength ใช้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบบริเวณที่บากในการคำนวณ ค่าที่ได้มีหน่วยเป็น kJ/m^2 รูปที่ 3.28 แสดง tensile properties ของเรซินทุกสูตรที่อบด้วยเตาไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ ส่วนค่าของ flexural properties และ impact strength ของเรซินทุกสูตรที่อบด้วยเตาไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30 ตามลำดับ

Tensile Properties

รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่า การอบด้วยอุณหภูมิต่ำนั้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าและใช้เวลาอบน้อยกว่า จะทำให้เกิดปฏิกิริยาหรือการเซตตัวได้ดีขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียง 1% น่าจะใช้เวลาในการอบนานกว่า 20 นาที จึงจะให้ความแข็งแรง (modulus และ stress at break) เท่ากับที่อบ 14 นาที ของชุด 4%

รูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงผลการใช้เวลาในการอบต่างกันของเตาไมโครเวฟ ความแตกต่างของสมบัติในแต่ละสูตรไม่มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน มีทั้งค่าที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันเล็กน้อย และต่างกันมาก การทดลองใช้เวลาอบต่างกันเพียง 4 นาที อาจจะมีผลแตกต่างน้อยเกินไป หรือระยะเวลาอบ 10 - 14 นาที อยู่ในช่วงเดียวกัน จึงไม่ส่งผลให้เห็นอิทธิพลของเวลาที่มีต่อ Tensile properties ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มนี้ น่าจะเกิดจากการที่ไม่สามารถควบคุมการปล่อยคลื่นไมโครเวฟและการตกกระทบได้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อบในเวลาเท่ากัน (รูปที่ 3.12 และ 3.13) สูตร VI (10 min, 1% acc.) มีค่า modulus ต่ำมาก อาจเกิดจากชิ้นงานมีตำหนิหรือเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงการเปรียบเทียบการอบด้วยอุณหภูมิต่ำ (14 นาที, 4%) และเตาไมโครเวฟ การอบด้วยอุณหภูมิต่ำให้สมบัติดีกว่าการอบด้วยเตาไมโครเวฟพบในสูตร III, IV และ V แต่สูตร I และสูตร II แสดงสมบัติที่ดีขึ้นบางค่าเมื่ออบด้วยเตาไมโครเวฟ เรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และอบด้วยอุณหภูมิต่ำ 20 นาที มีความแข็งแรงน้อยกว่าเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17

ถึงแม้ว่าผลการทดสอบ tensile properties ของอุณหภูมิต่ำ (14 นาที, 4%) จะดีกว่าเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟก็ตาม แต่หากพิจารณาการใช้ระยะเวลาในการอบจริงของเตาไมโครเวฟ จะใช้เวลาสั้นมาก คือ การตั้งเวลาอบ 14 นาที จะมีการปล่อยคลื่นไมโครเวฟประมาณ 6 นาที หากควบคุมการอบได้ในเตาไมโครเวฟ น่าจะได้

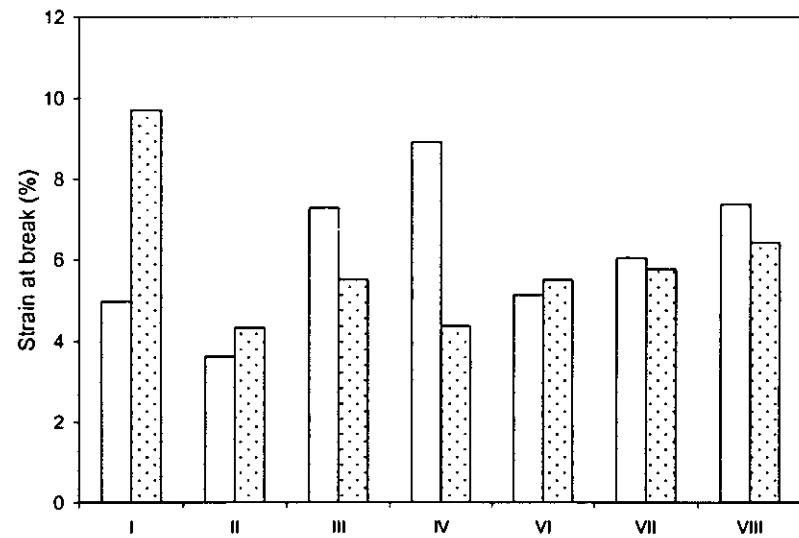
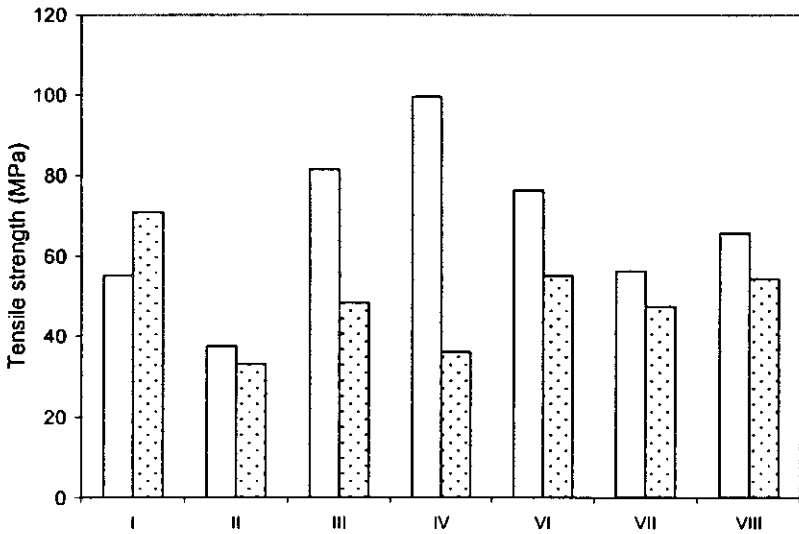
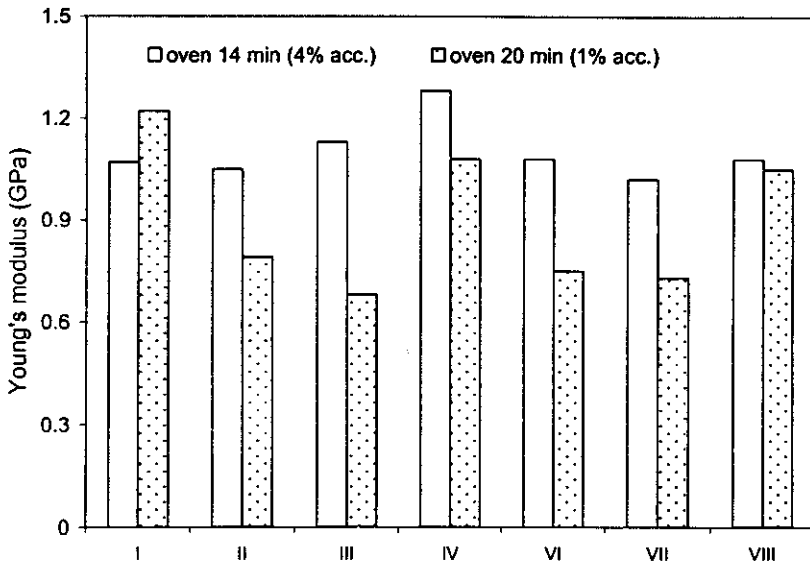
สมบัติที่ดีเท่าเทียมกัน ดังนั้นจะมีการทดลองหาสภาวะการอบในเตาไมโครเวฟที่ดีกว่านี้เพื่อให้ได้ tensile properties ที่ไม่ด้อยกว่าที่อบในตู้อบความร้อน

Flexural Properties

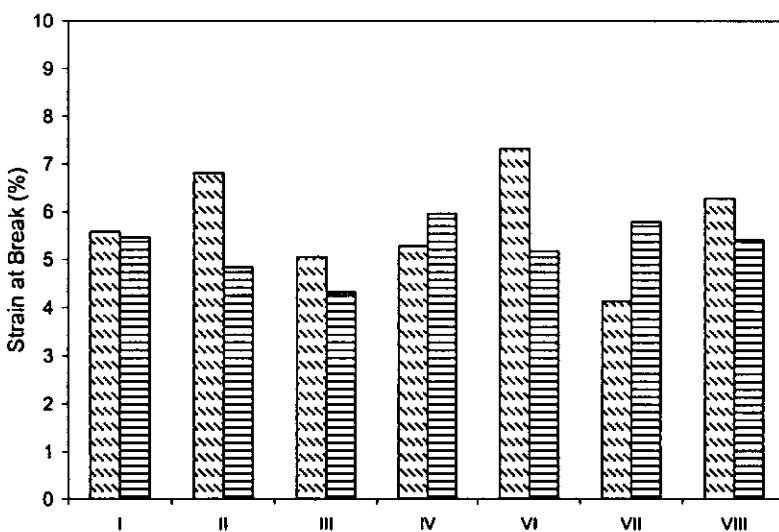
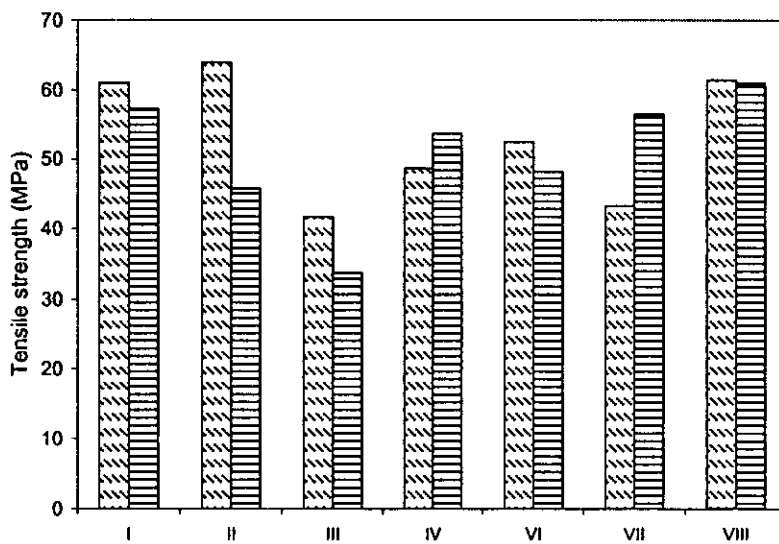
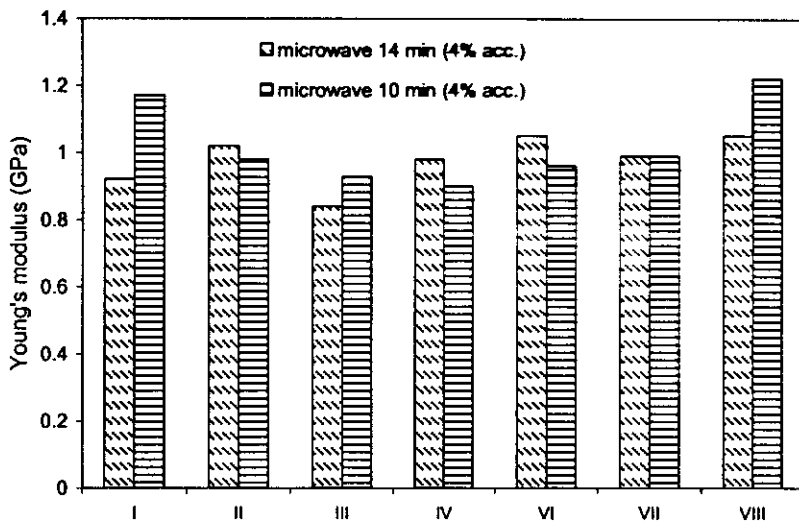
การทดสอบแบบ three - point bending จะให้ผลการทดลองที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากมีทั้ง tension และ compression เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ผลการทดลองที่แสดงในรูปภาพเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 3.18 – 3.22 นั้น มีความหลากหลายเช่นเดียวกับที่ปรากฏในการทดสอบ tensile properties ไม่มีทิศทางที่แน่นอนของความแตกต่าง และแต่ละสูตรมีความแตกต่างที่ไม่แน่นอนด้วย

Impact Strength

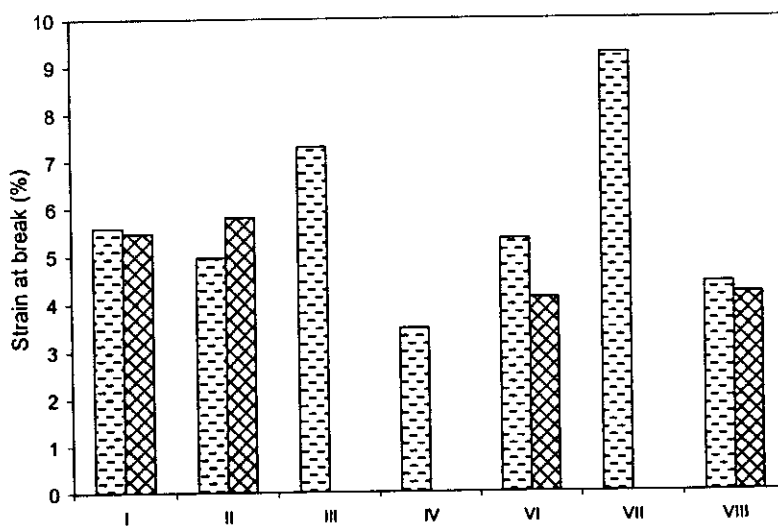
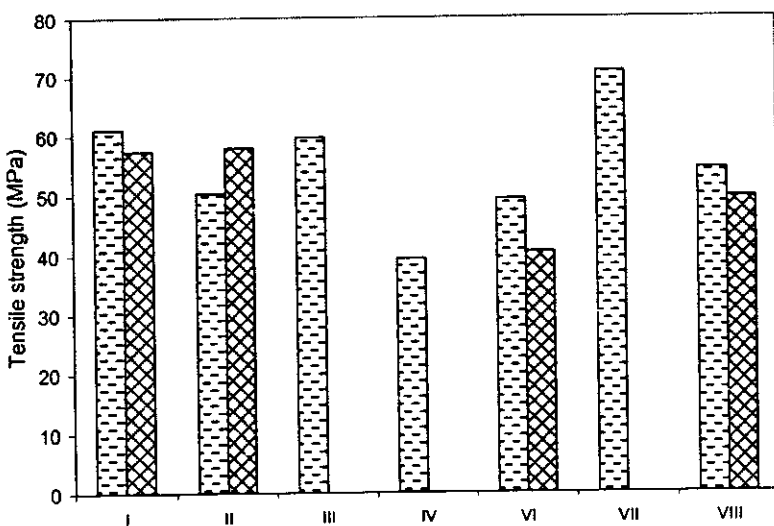
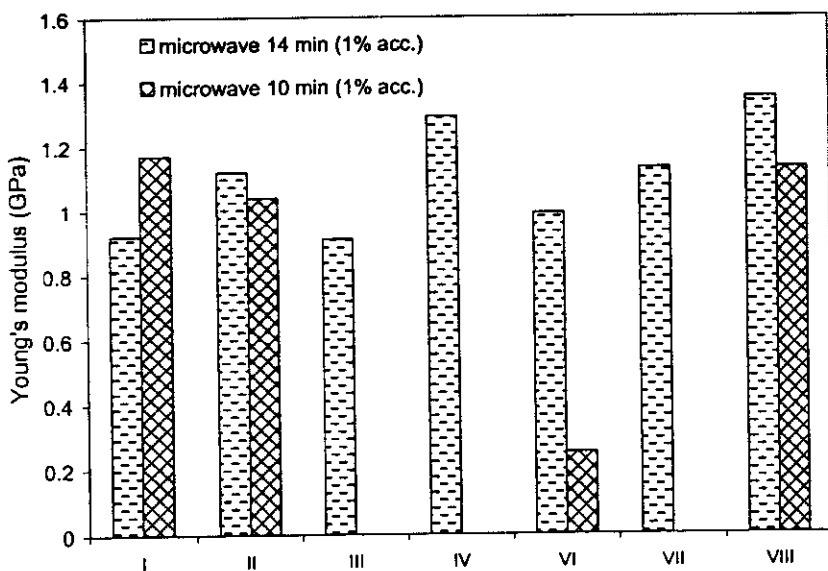
กราฟเปรียบเทียบ impact strength แสดงในรูปที่ 3.23 – 3.27 ตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟใน สูตร II III และ IV แสดงค่า impact strength สูงกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.26 - 3.27



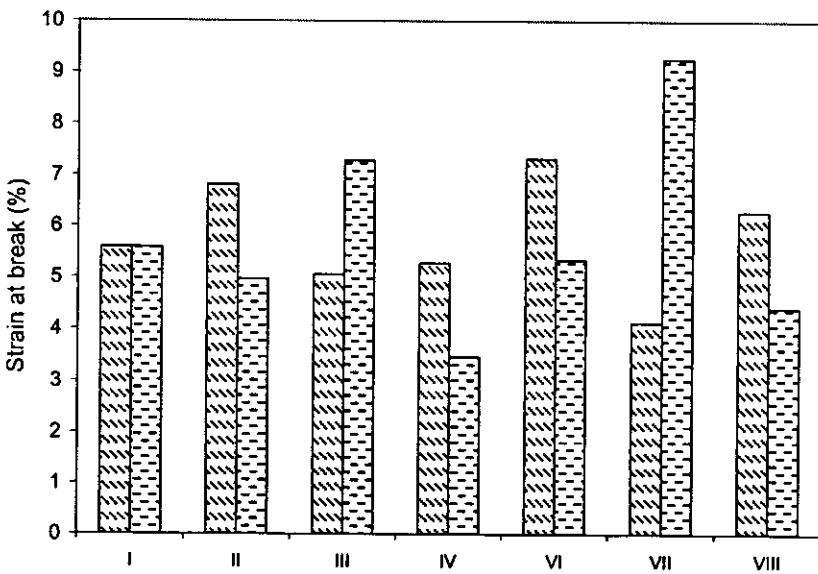
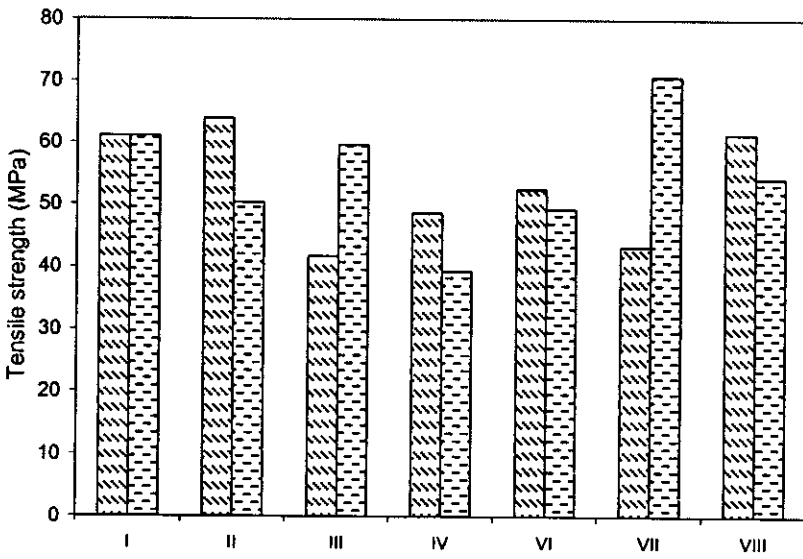
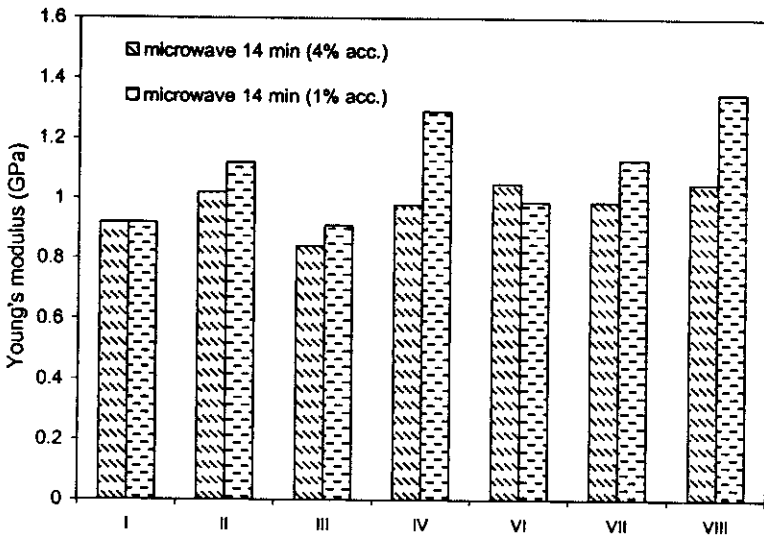
รูปที่ 3.9 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบเป็นเวลา 14 นาที และ 20 นาที เปรียบจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และ 1% ตามลำดับ



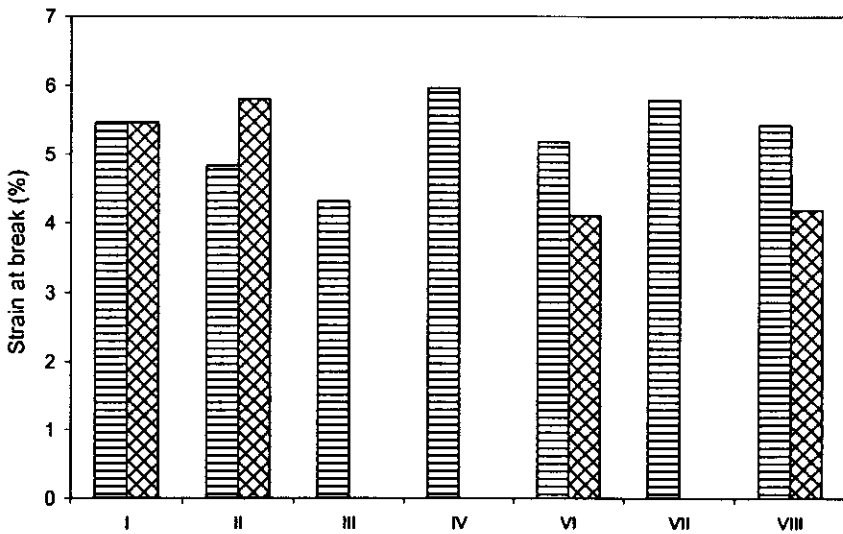
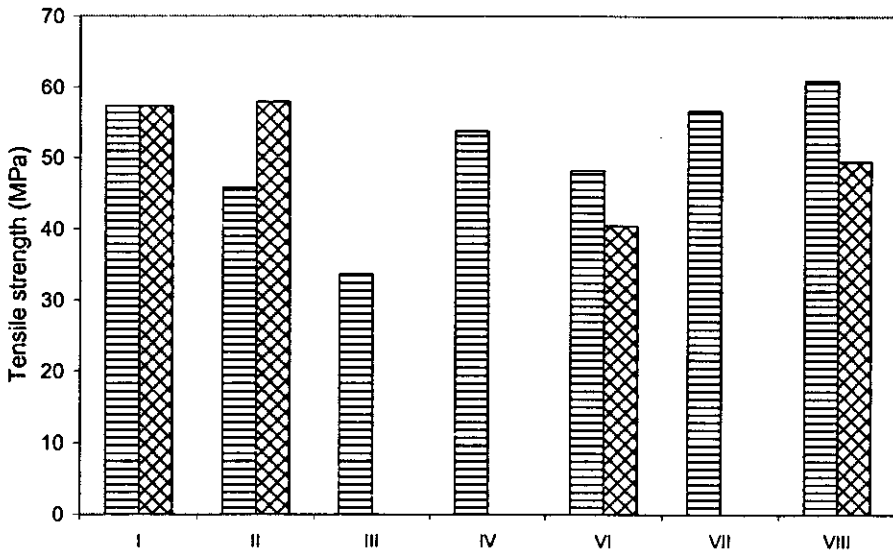
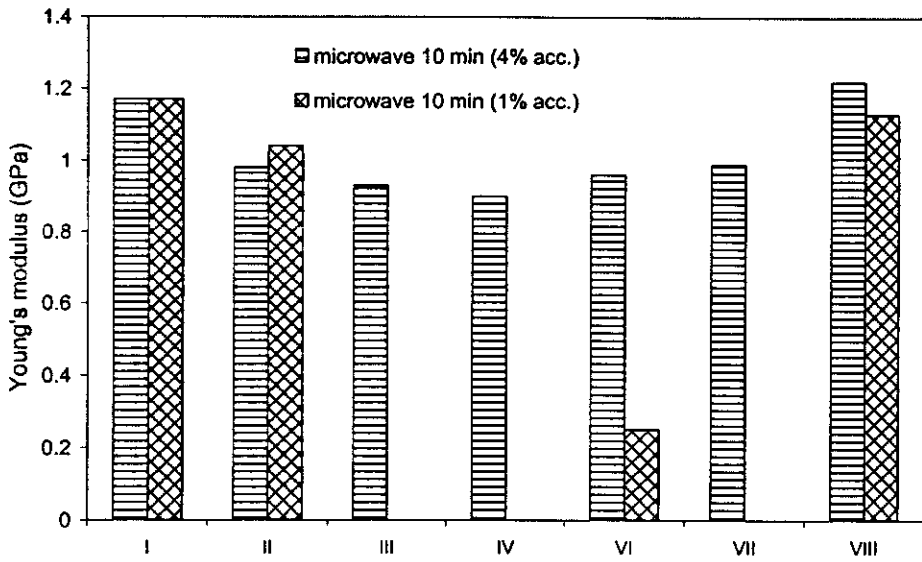
รูปที่ 3.10 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที และ 10 นาที เตรียมจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4%



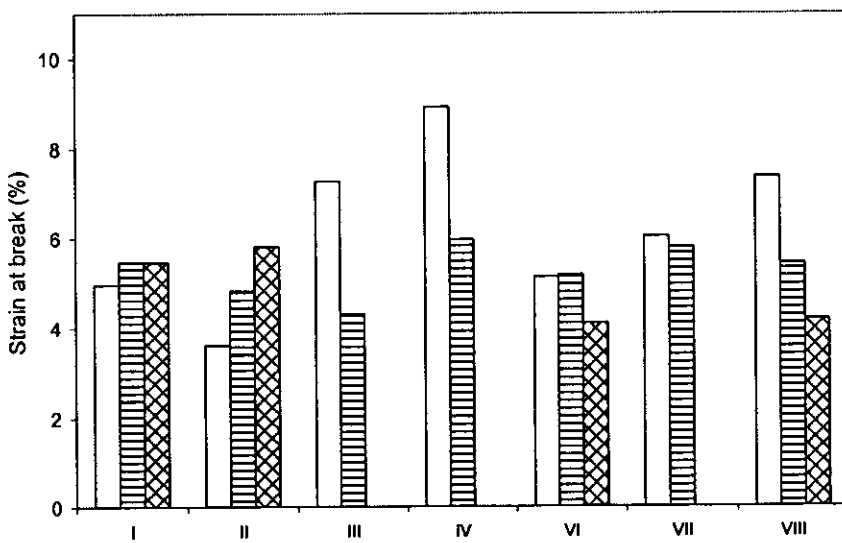
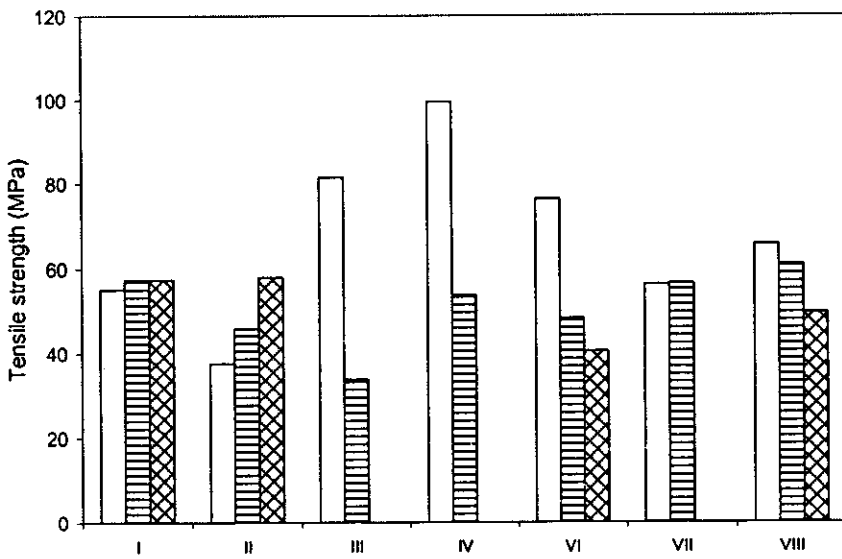
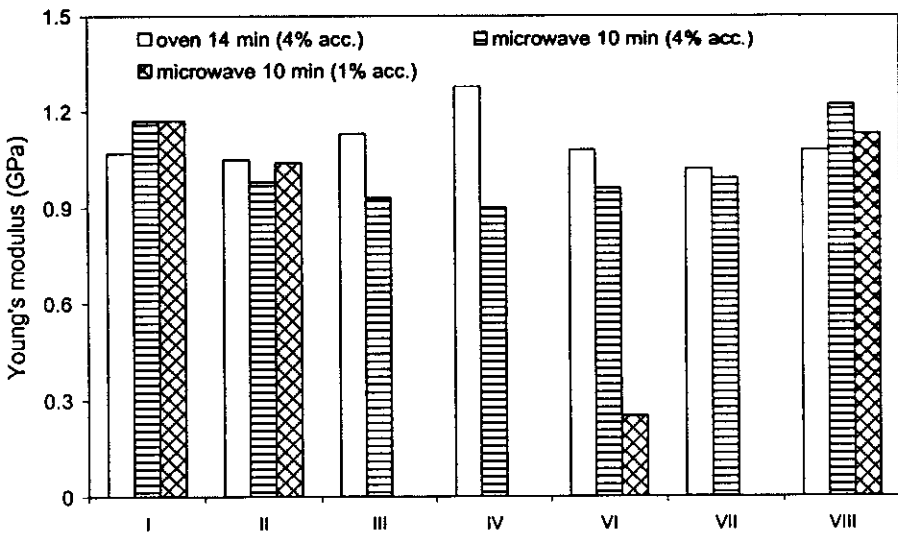
รูปที่ 3.11 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที และ 10 นาที เตรียมจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 1%



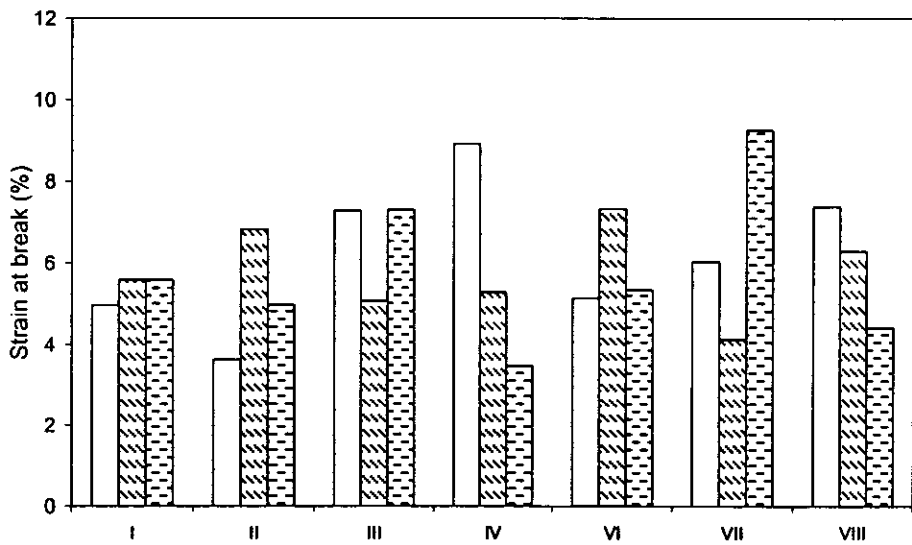
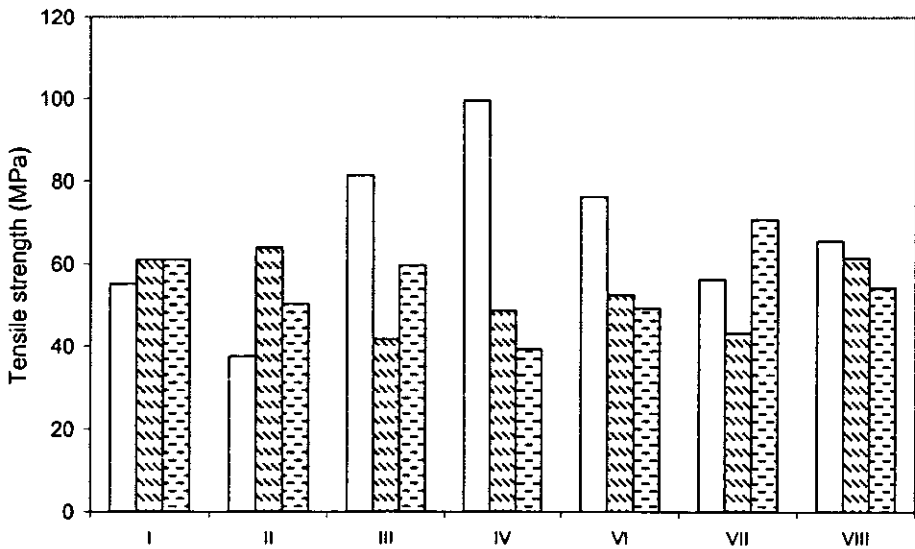
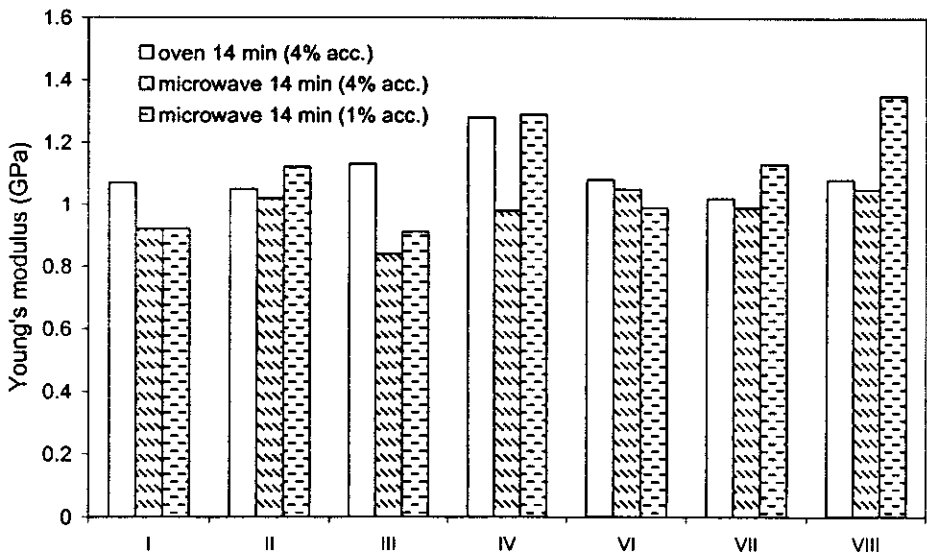
รูปที่ 3.12 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที เตรียมจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และ 1%



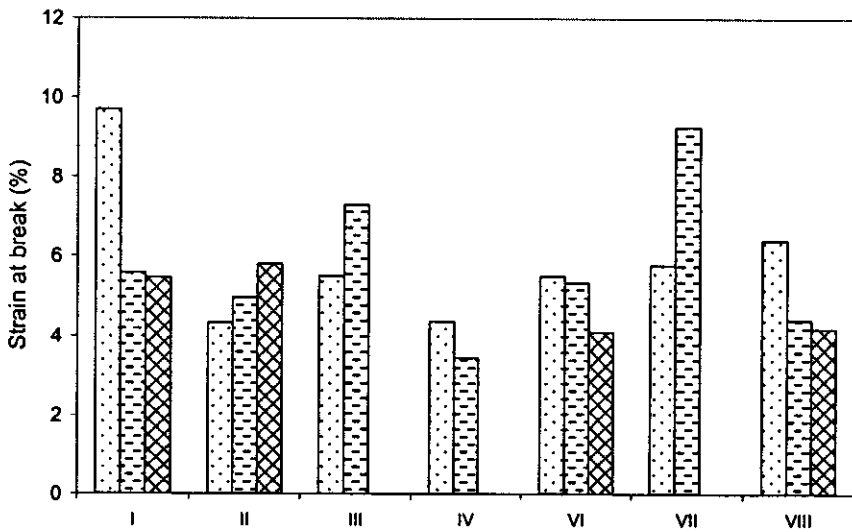
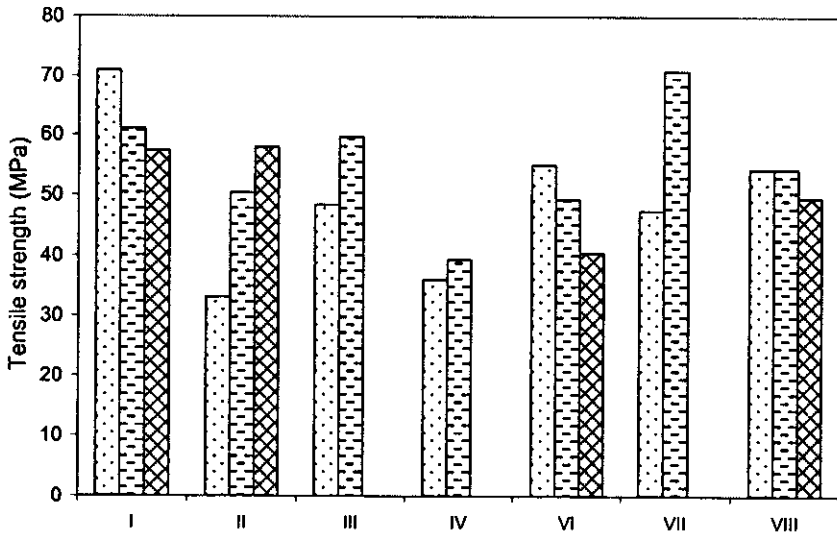
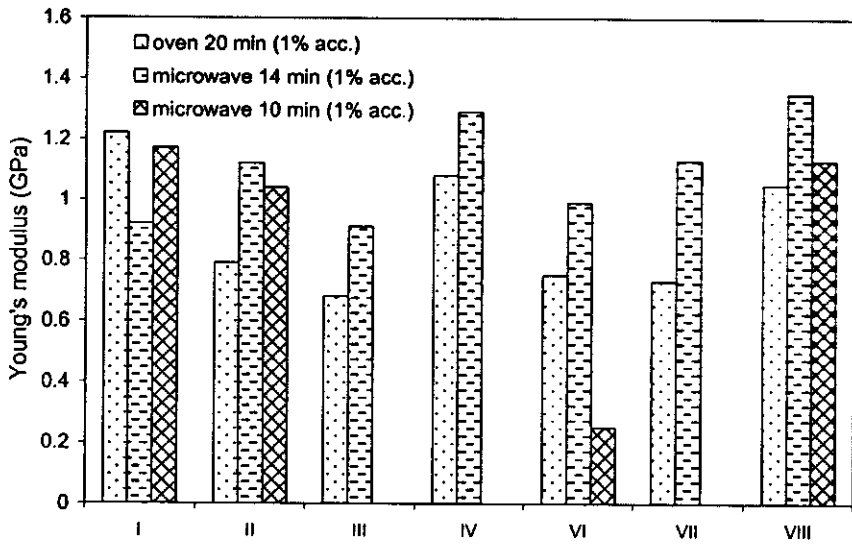
รูปที่ 3.13 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยดามไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที
เตรียมจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และ 1%



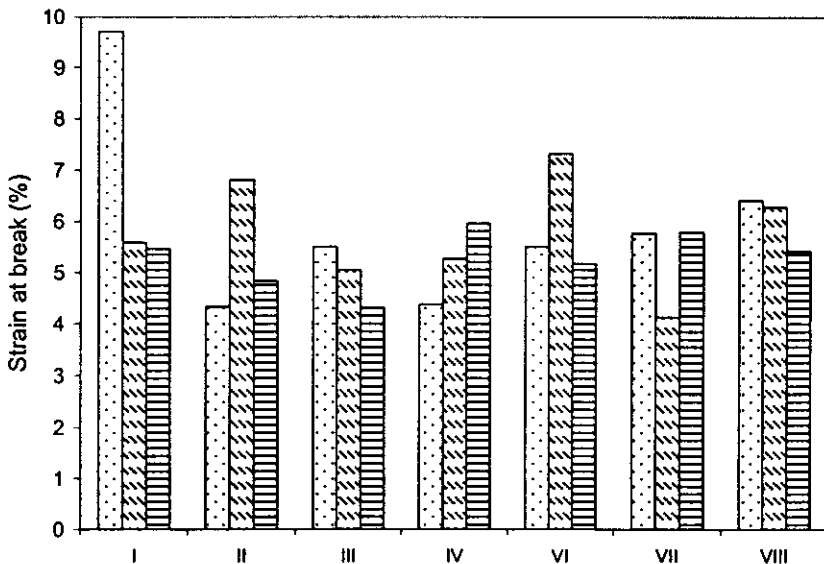
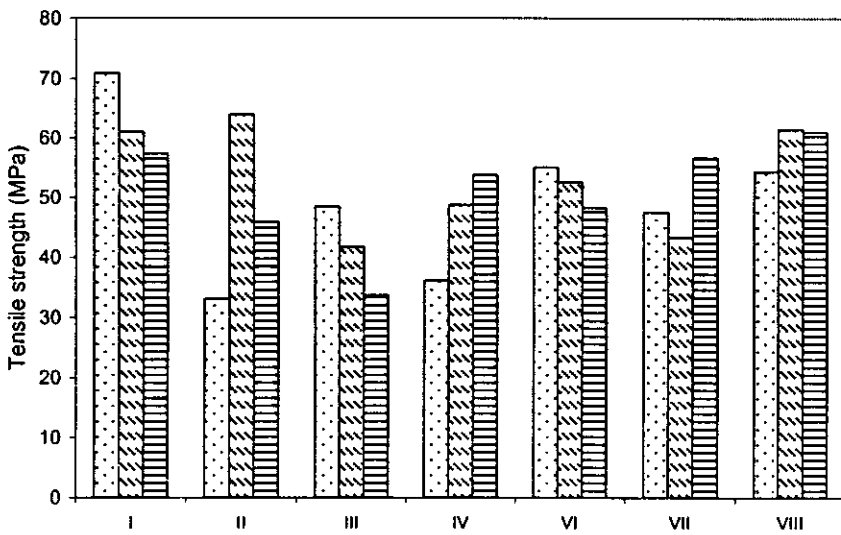
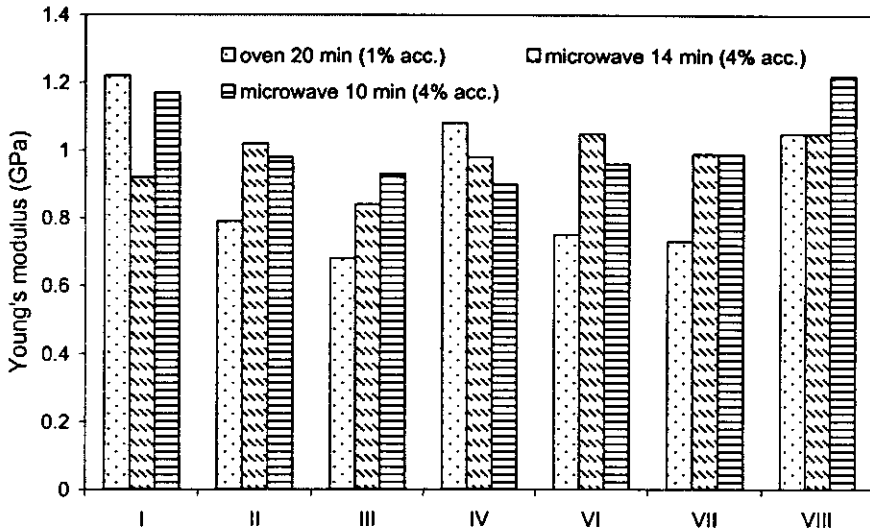
รูปที่ 3.14 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟ ใช้เวลาการอบในเตาไมโครเวฟสั้นกว่าการอบในตู้อบ



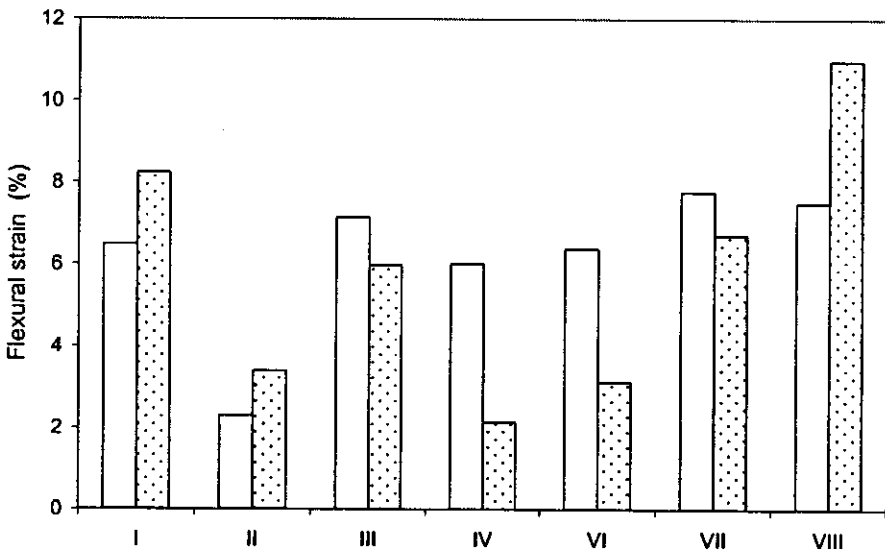
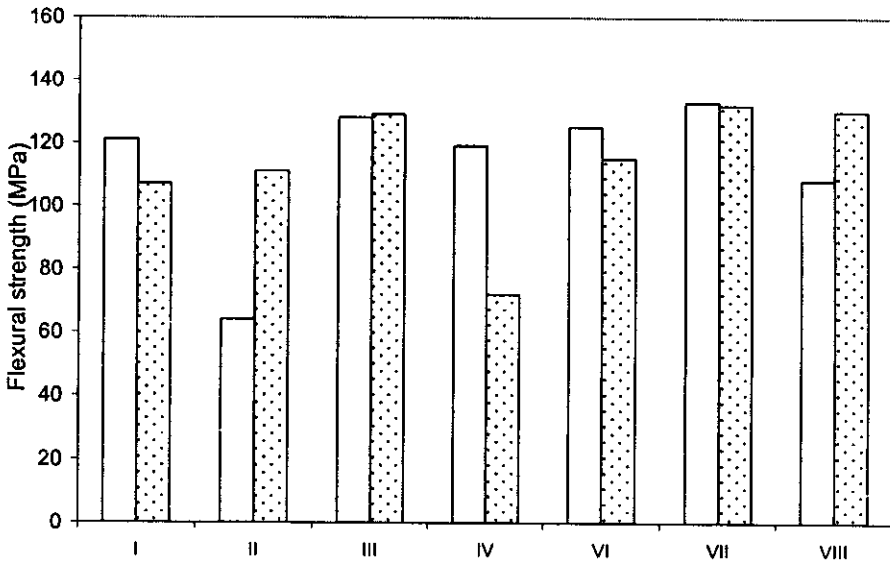
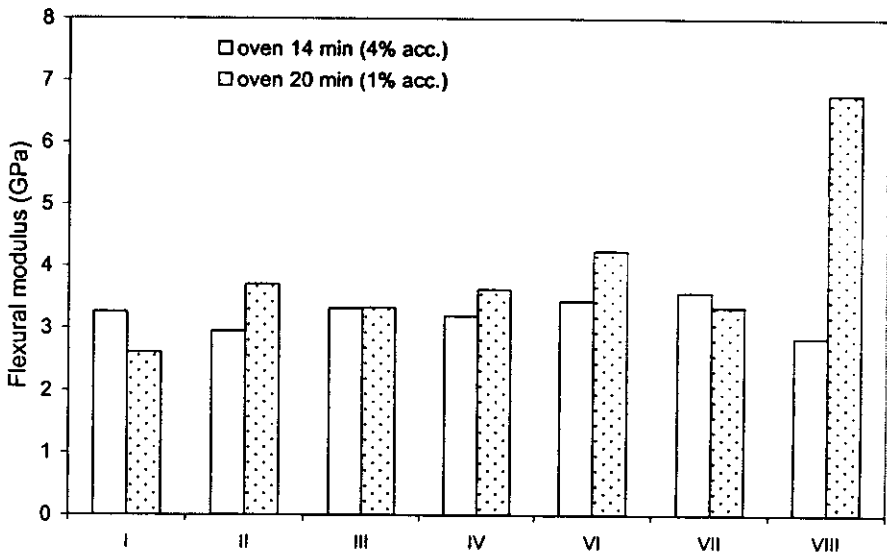
รูปที่ 3.15 Tensile properties ของซึ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟ ใช้เวลาการอบในเตาไมโครเวฟเท่ากับการอบในตู้อบ (14 นาที)



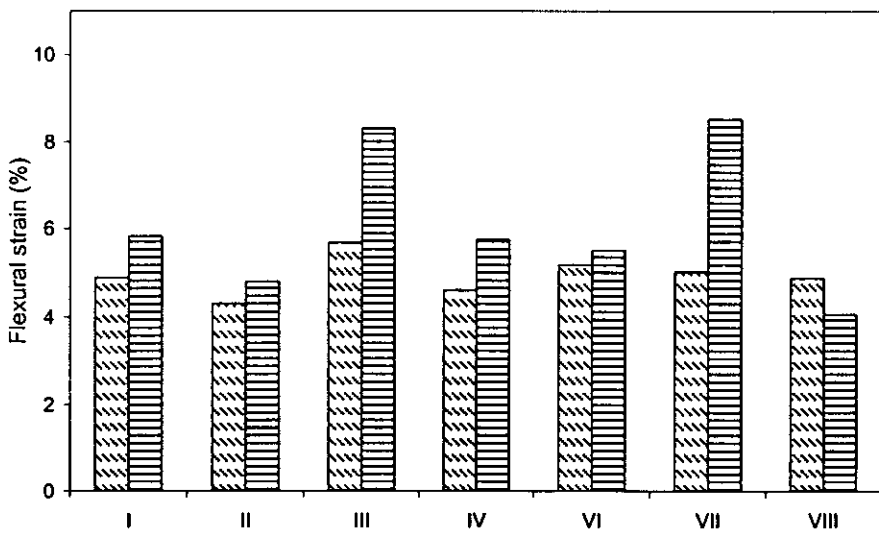
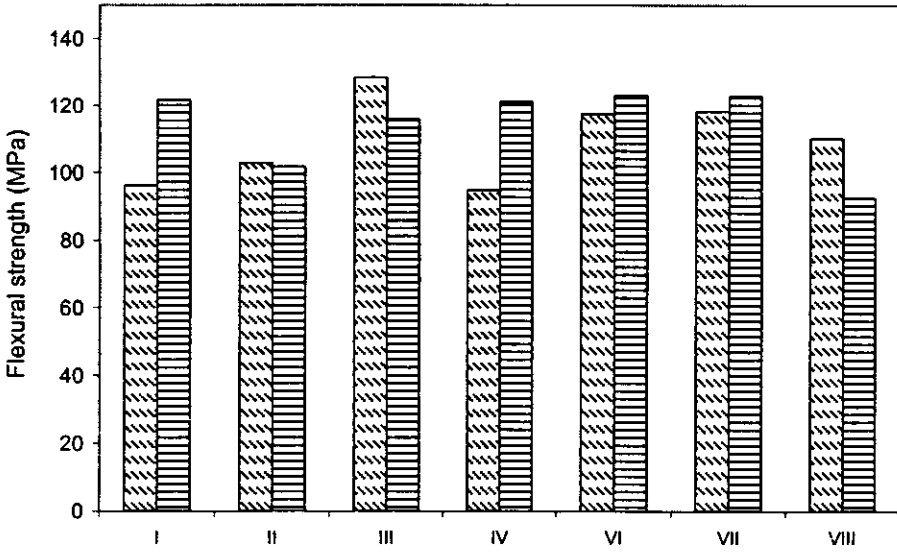
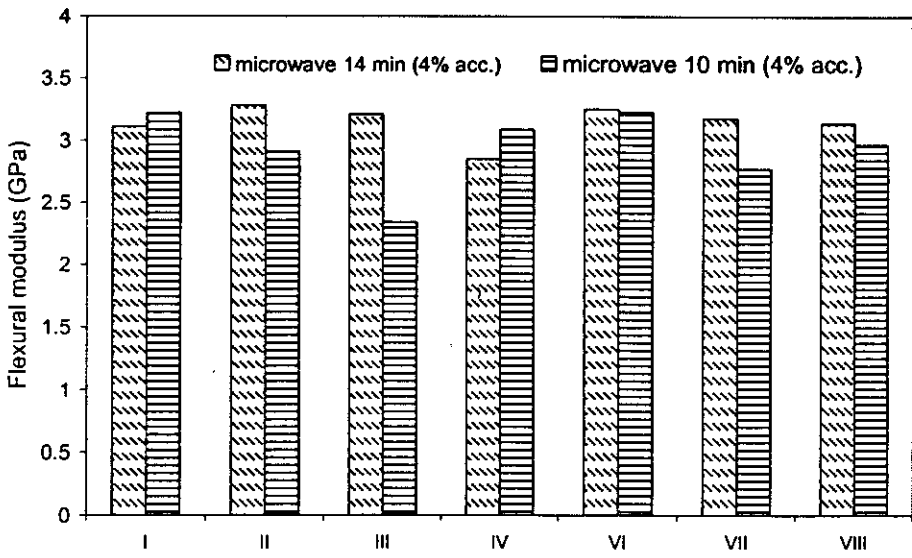
รูปที่ 3.16 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟ ตัวอย่างมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1 % และมีระยะเวลาในการอบต่างกัน



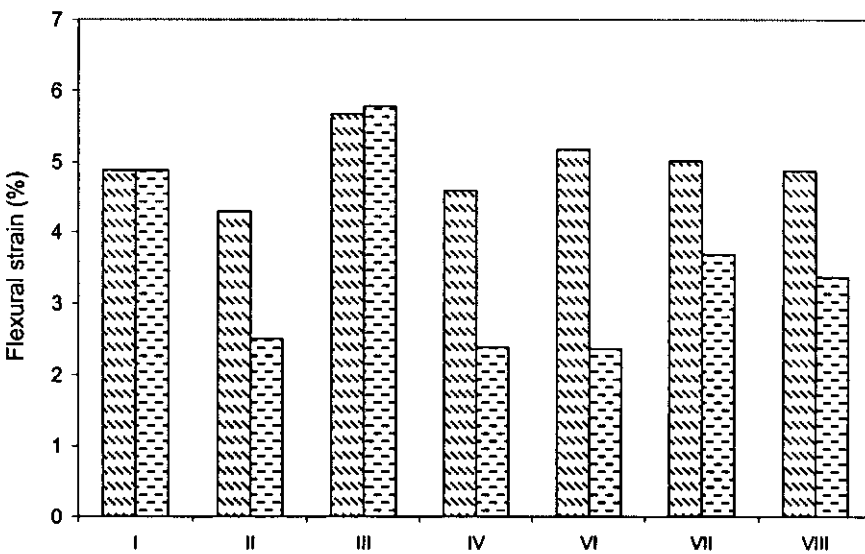
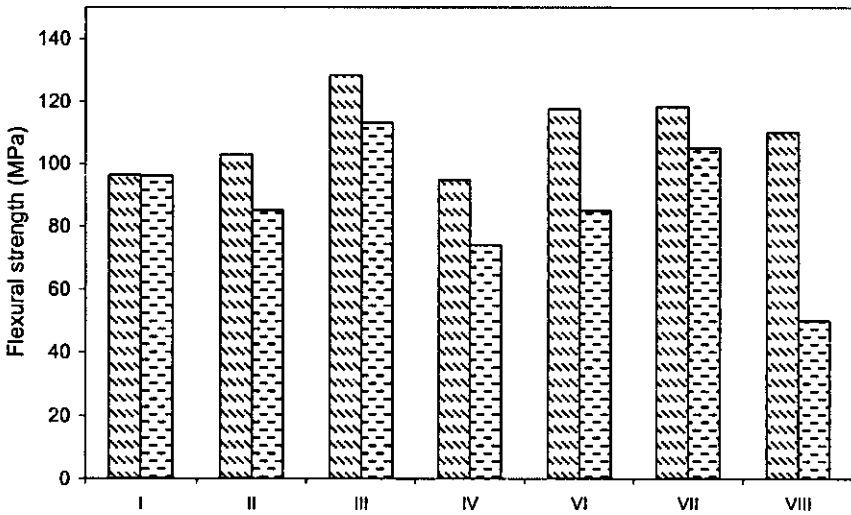
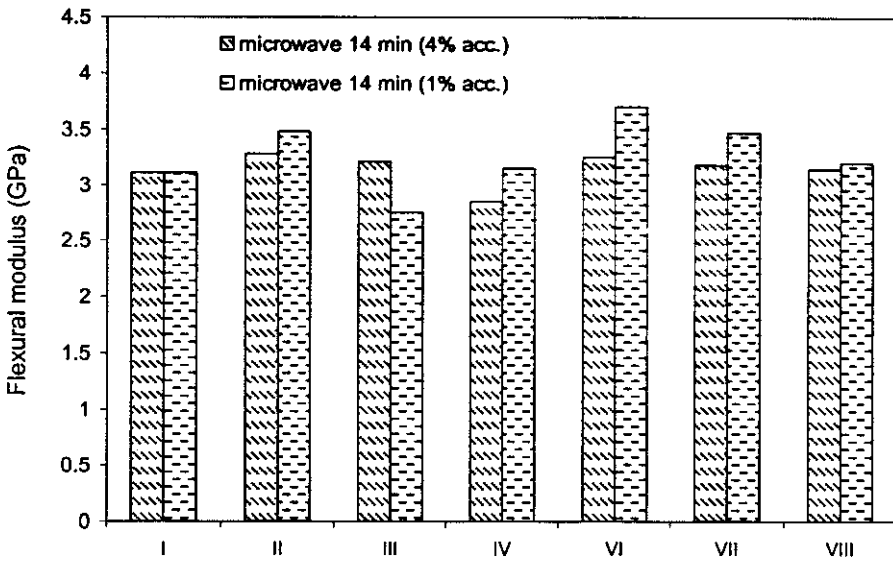
รูปที่ 3.17 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟในระยะเวลาการอบต่างกัน



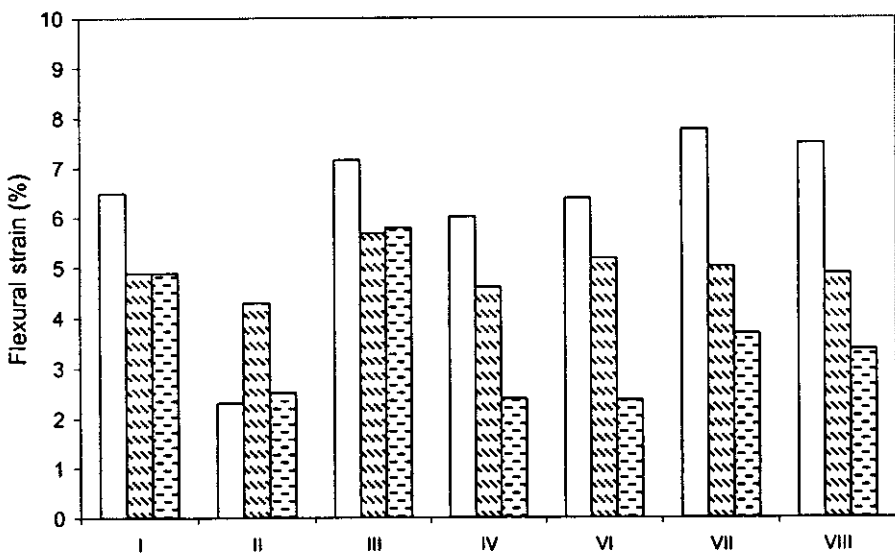
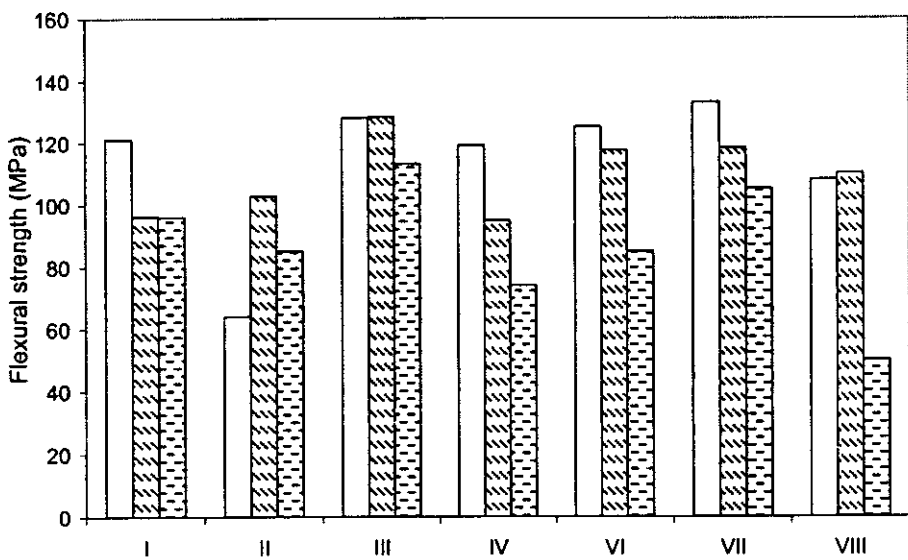
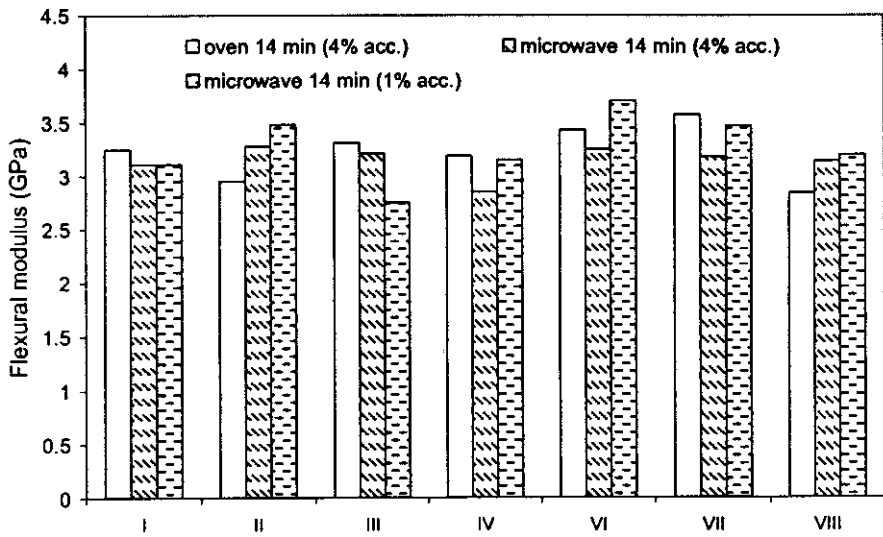
รูปที่ 3.18 Flexural properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบเป็นเวลา 14 นาที และ 20 นาที เตรียมจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และ 1% ตามลำดับ



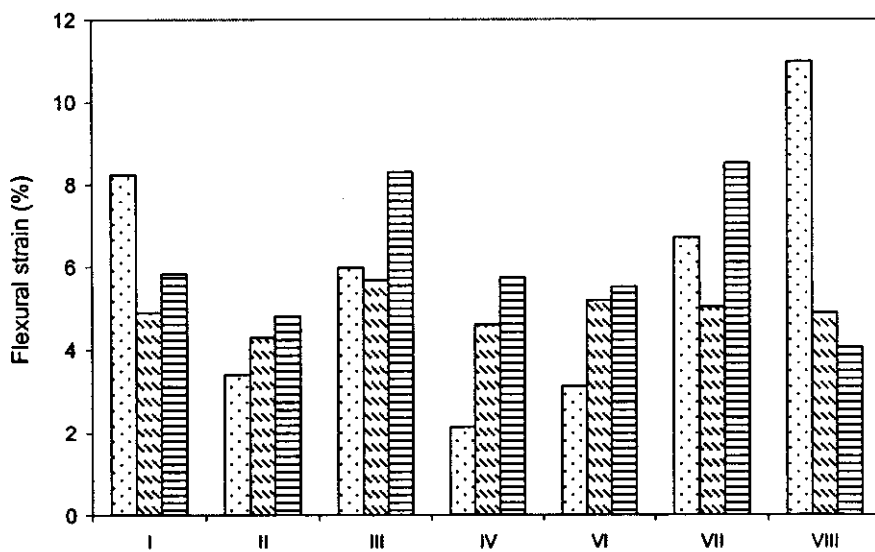
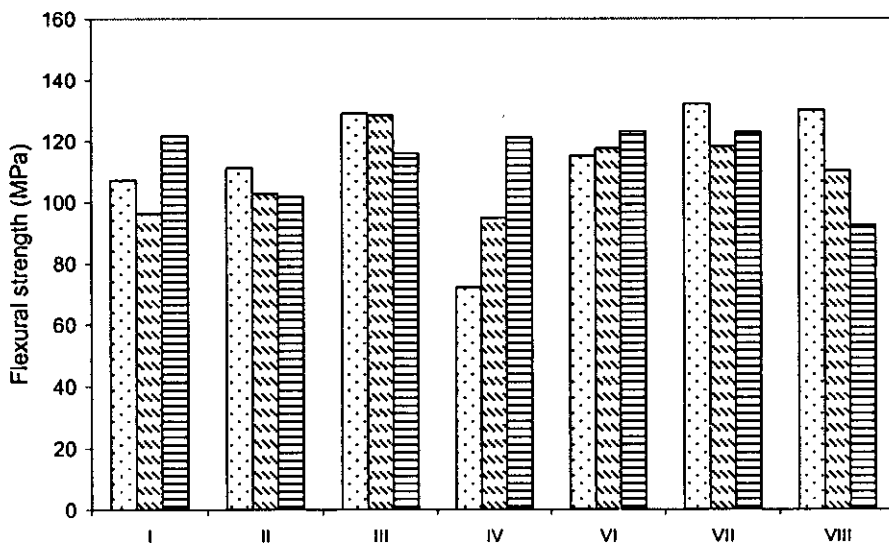
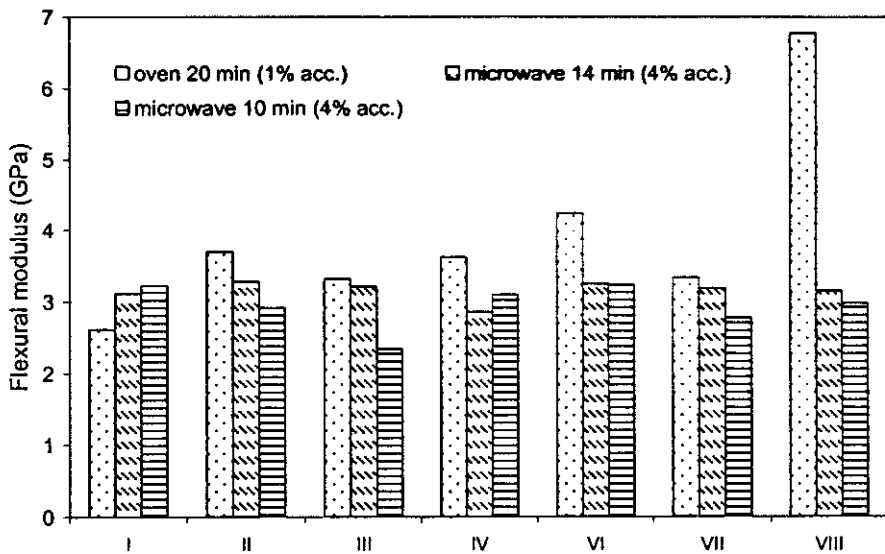
รูปที่ 3.19 Flexural properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที และ 10 นาที เตรียมจากเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4%



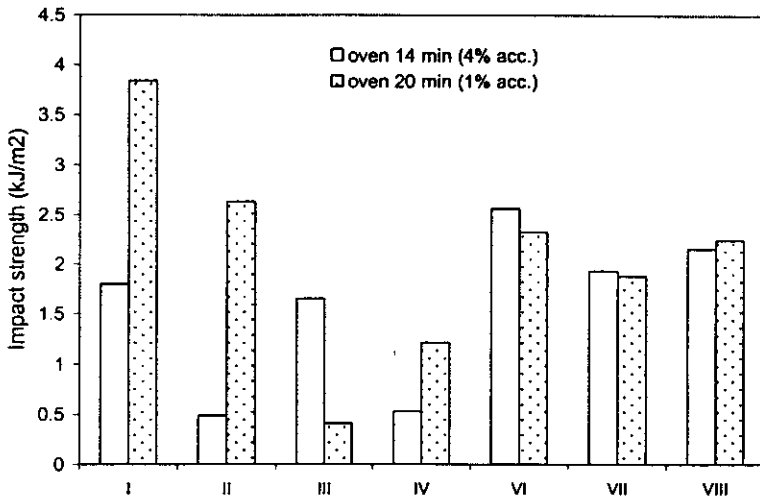
รูปที่ 3.20 Flexural properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที เตรียมจากรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% และ 1%



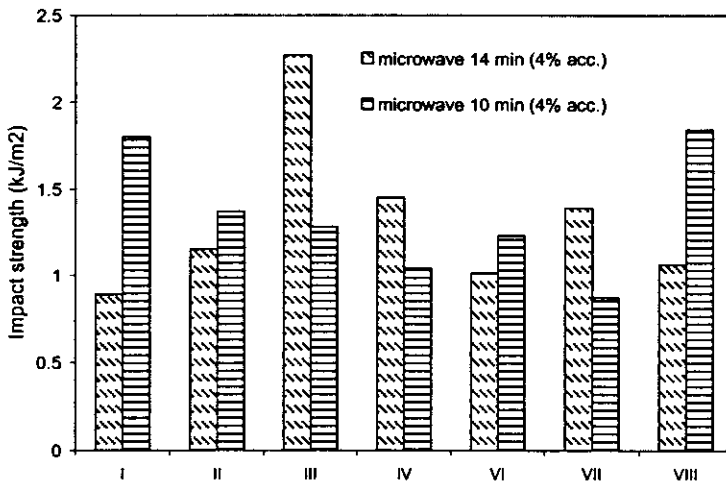
รูปที่ 3.21 Flexural properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที เเรชนมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



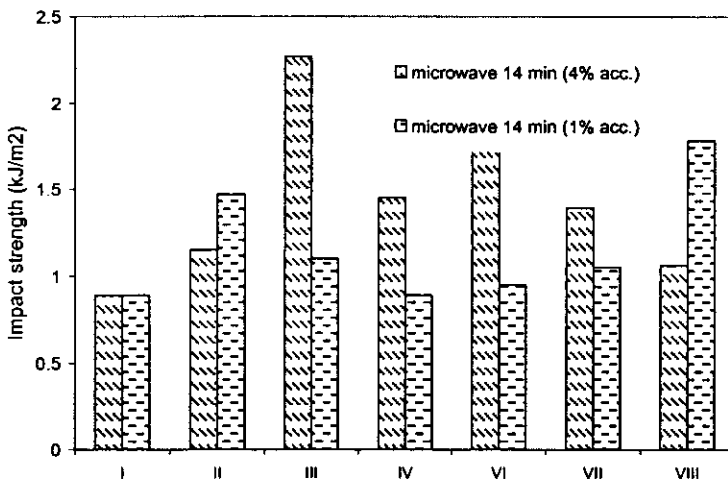
รูปที่ 3.22 Flexural properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบ 20 นาที และอบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 14 นาที และ 10 นาที เชนมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



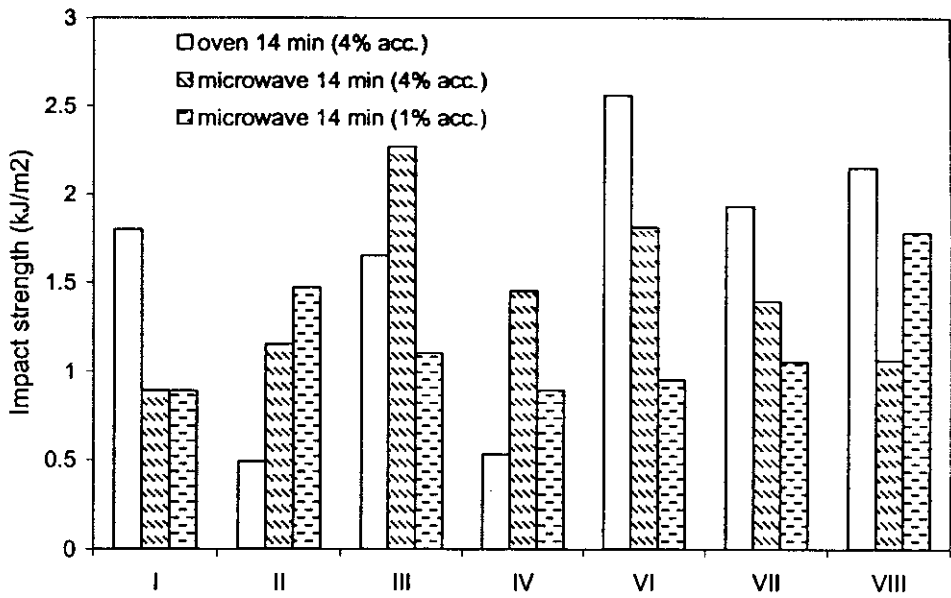
รูปที่ 3.23 Impact strength (kJ/m^2) ของชั้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบ 14 นาที และ 20 นาที เชนมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



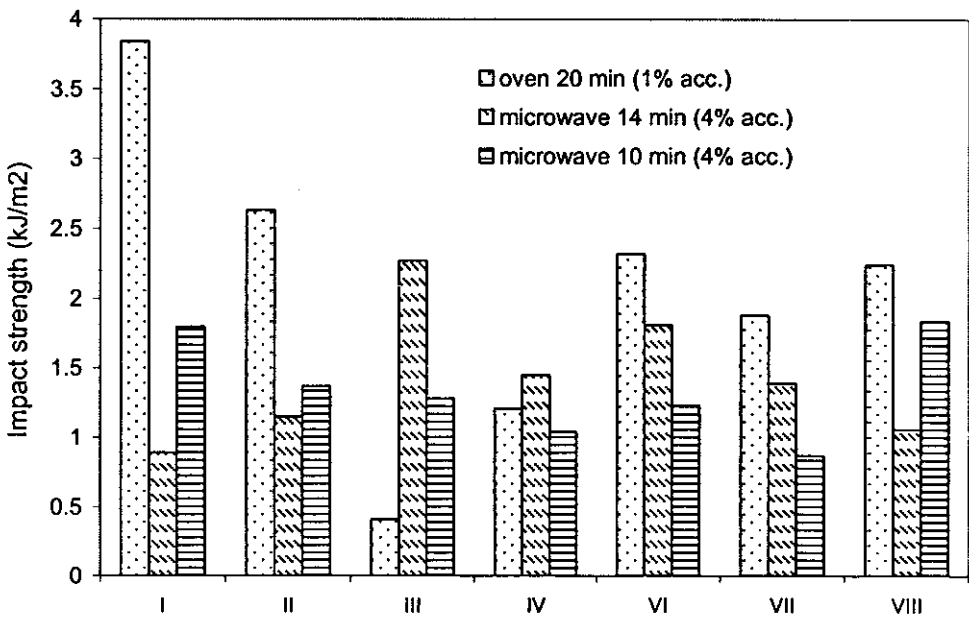
รูปที่ 3.24 Impact strength (kJ/m^2) ของชั้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 14 นาที และ 10 นาที เชนมีตัวเร่งปฏิกิริยา 4%



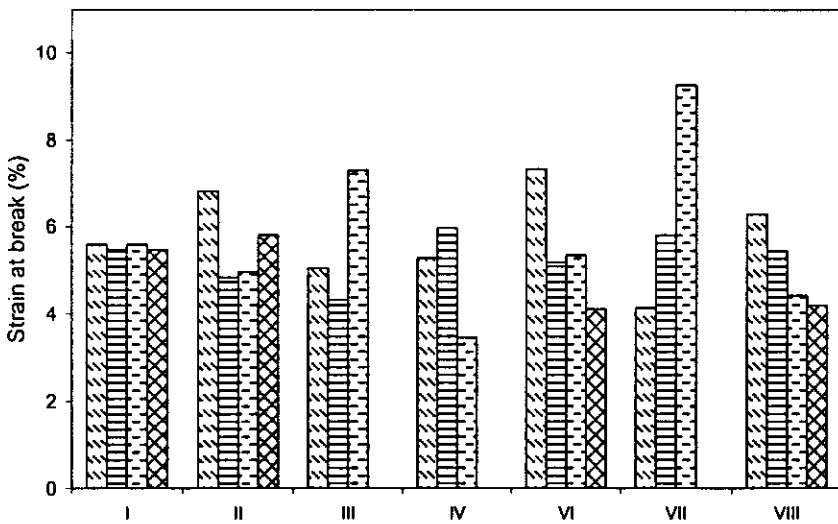
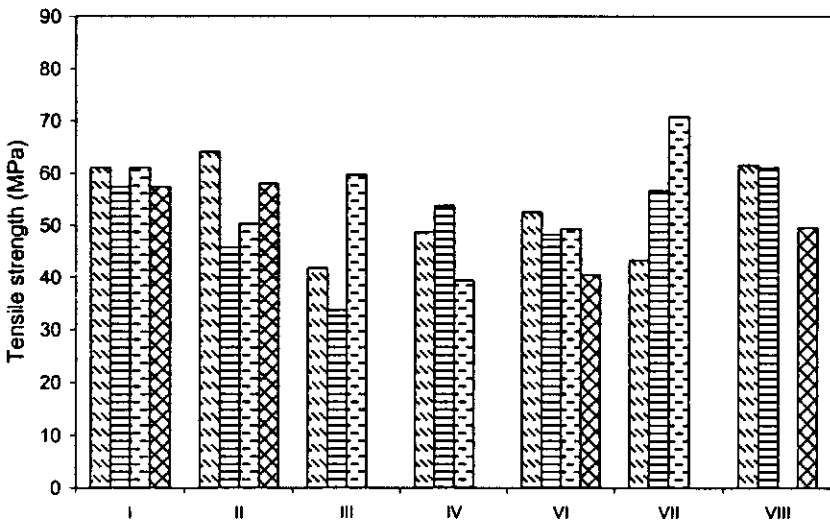
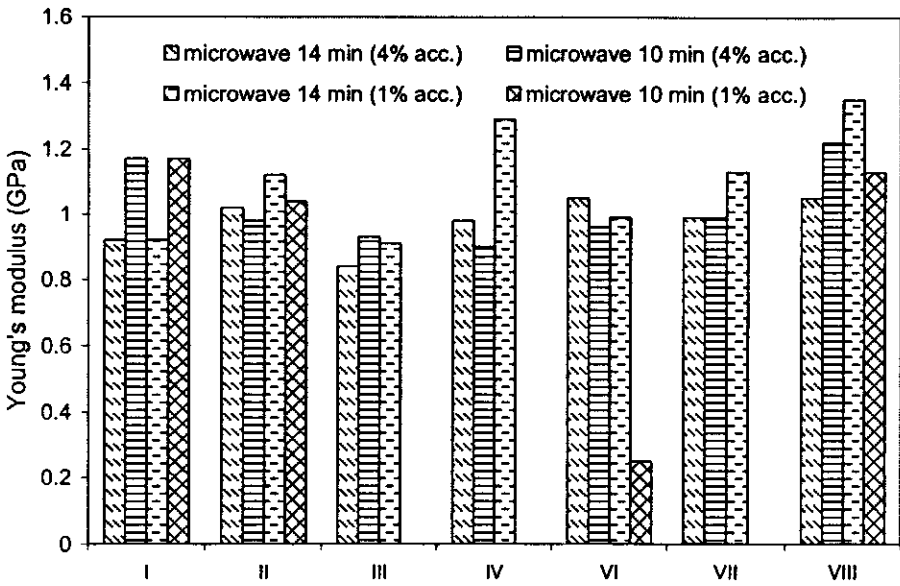
รูปที่ 3.25 Impact strength (kJ/m^2) ของชั้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 14 นาที เชนมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



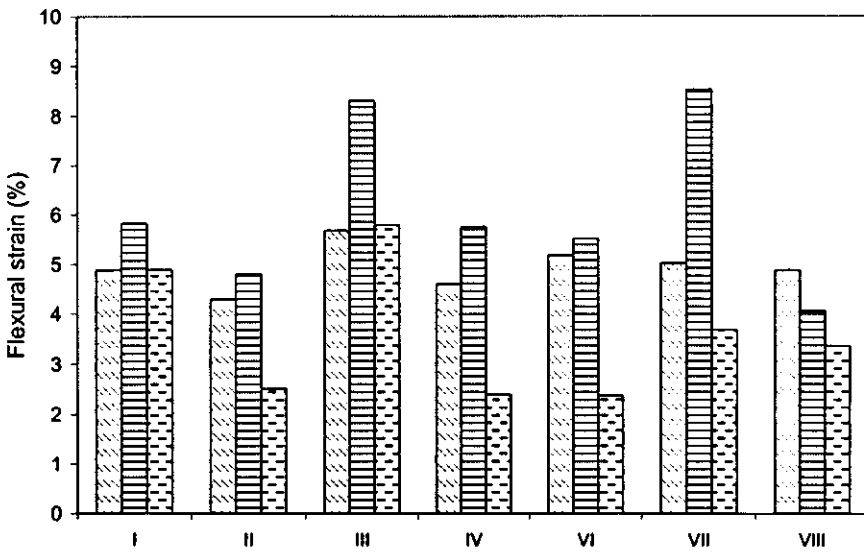
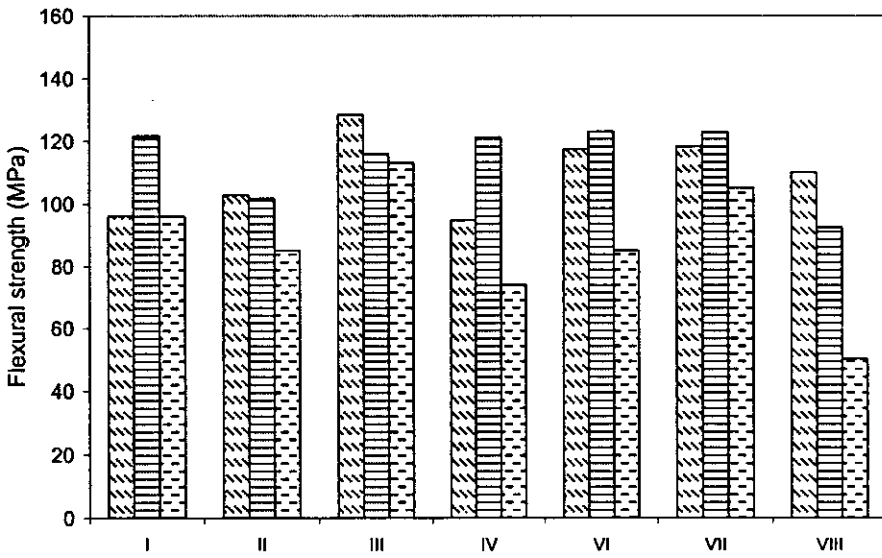
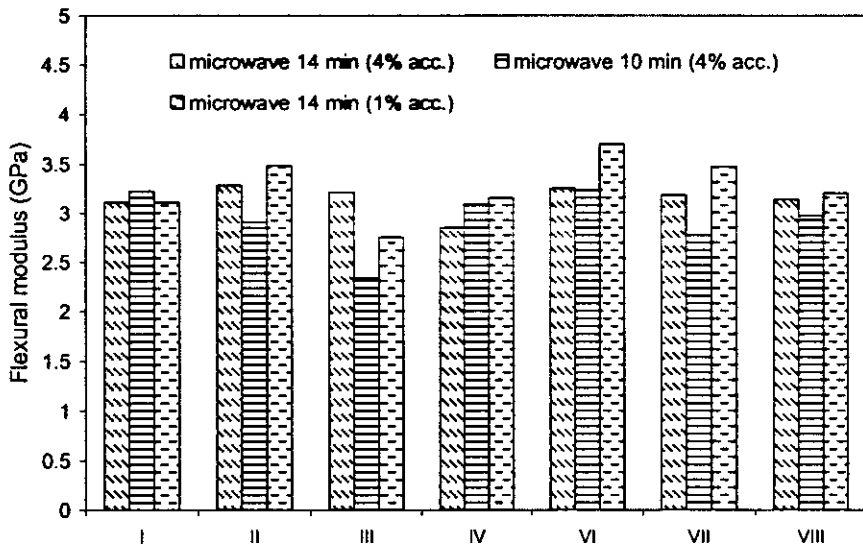
รูปที่ 3.26 Impact strength (kJ/m²) ของชั้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟ 14 นาที เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



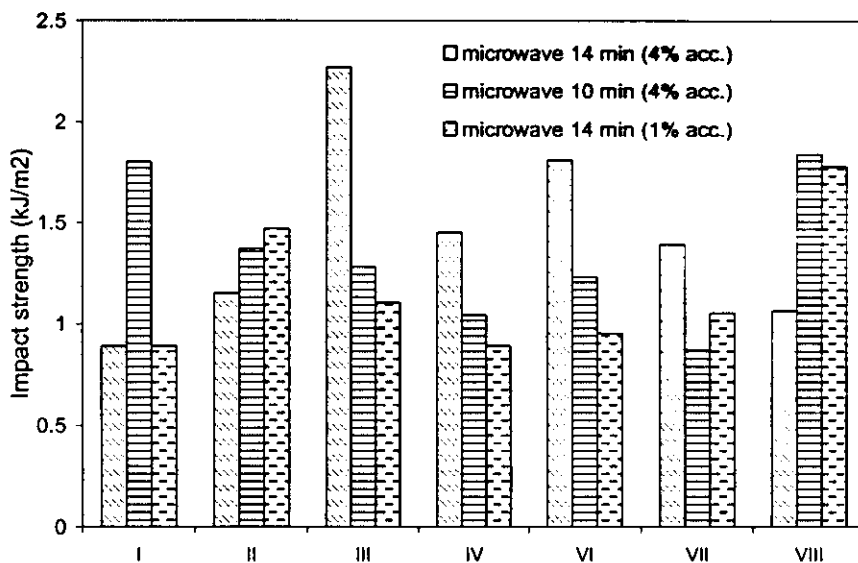
รูปที่ 3.27 Impact strength (kJ/m²) ของชั้นทดสอบที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟใน เวลาต่างๆกัน เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.28 Tensile properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟในเวลาต่างๆกัน
เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.29 Flexural properties ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟในเวลาต่างๆกัน
 เเรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.30 Impact strength (kJ/m^2) ของชิ้นทดสอบที่อบด้วยเตาไมโครเวฟในเวลาร่างต่างกัน เชนมีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เท่ากัน

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบแต่ละสูตรสามารถสรุปผลการทดลองของแต่ละสูตรได้ดังนี้

1. สูตร I

- (ก) เปรียบเทียบสภาวะเตาไมโครเวฟ : ตัวอย่างอบ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดงค่า flexural properties และ impact strength ต่ำกว่าตัวอย่างที่อบ 10 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แต่มีค่า tensile properties ใกล้เคียงกัน
- (ข) ตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดง tensile properties ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 10 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%)
- (ค) ตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดง flexural properties และ impact strength สูงกว่าตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%)

2. สูตร II

- (ก) เปรียบเทียบสภาวะเตาไมโครเวฟ : ตัวอย่างที่อบ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดงสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด โดยให้ค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟที่สภาวะอื่นๆ และที่อบด้วยตู้อบความร้อน
- (ข) ตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน 20 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%) แสดงลักษณะยืดหยุ่น (flexible) มากกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) และมี tensile properties ต่ำกว่าตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟทุกสภาวะ
- (ค) ตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดงค่า impact strength สูงกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%)

3. สูตร III

- (ก) เปรียบเทียบสภาวะเตาไมโครเวฟ : tensile properties ของตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%) และ (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%)

ตัวอย่างที่อบ 10 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แต่มีค่า flexural properties สูงกว่า และมีค่า impact strength ต่ำกว่า

- (ข) เปรียบเทียบสภาวะดื้ออบ : ตัวอย่างที่อบ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดงค่า tensile properties สูงกว่าตัวอย่างที่อบ 20 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%)
- (ค) ตัวอย่างที่อบด้วยดื้ออบความร้อน 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) แสดงค่า tensile properties ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) ทั้ง 10 นาที และ 14 นาที แต่แสดงความแข็งแรงด้าน flexural properties ต่ำกว่า (แต่ยืดมากกว่า) และแสดงค่า impact strength สูงกว่าตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ 14 นาที (ตัวเร่งปฏิกิริยา 4%)

จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นว่าการอบด้วยเตาไมโครเวฟสามารถให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการอบด้วยดื้ออบความร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสูตรเรซิน สภาวะการอบ และประเภทของสมบัติเชิงกล อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า เรซินสูตร II มีศักยภาพในการอบด้วยเตาไมโครเวฟ คือ แสดงสมบัติเชิงกลดีขึ้นในภาพรวม

3.2.2 สมบัติทางกลแบบพลวัตเชิงความร้อนและพลังงานกระตุ้น

นำชิ้นงานที่อบแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA เพื่อหาค่า dynamic mechanical properties ($\tan \delta$, storage modulus, loss modulus, full-width at half-maximum) และพลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) activation enthalpy (ΔH^\ddagger) และ activation entropy (ΔS^\ddagger) ณ ตำแหน่ง T_g การวิเคราะห์จะได้สมบัติต่างๆดังนี้

(1) อุณหภูมิที่สูงที่สุดของ $\tan \delta$ ซึ่งเทียบเท่ากับ glass transition temperature (T_g)

(2) $\tan \delta$ maximum คือตำแหน่งที่สูงที่สุดของ $\tan \delta$ เป็นตัวบ่งบอกอัตราส่วนระหว่าง loss modulus (E'') และ storage modulus (E') ถ้าค่าสูงขึ้นแสดงว่ามีสัดส่วนพลังงานที่สูญหายไปมากขึ้น

(3) Full-width-at-half-maximum (FWHM) เป็นความกว้างของพีค $\tan \delta$ ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความสูง ค่านี้จะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานหรือ damping ถ้าพีคกว้างขึ้นจะมี damping มากขึ้น ความสามารถในการรับพลังงานมากขึ้น

ตารางที่ 3.22 แสดงสมบัติด้านกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal properties) ของเรซินสูตรต่างๆที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % ทดสอบด้วยความถี่ 1 Hz ในที่นี้จะเปรียบเทียบในแง่ของการอบที่แตกต่างกันเท่านั้น ไม่ได้มีความมุ่งหมายที่จะเปรียบเทียบสูตรแต่ละสูตร ค่า $\tan \delta$ หรือ T_g ของเรซินที่ได้จากการอบด้วยดื้ออบและอบด้วยเตาไมโครเวฟ มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าที่ไม่เท่ากันนี้อาจเป็นเพราะความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุลไม่เท่ากัน หรือความเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอไม่เท่ากัน ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง T_g จากตารางที่ 3.22 และปริมาณการเกิดปฏิกิริยาจากตารางที่ 3.24 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีข้อผิดพลาดจากการทดลอง (experimental errors) แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ปรากฏการณ์ที่ค่า T_g ไม่สัมพันธ์กับปริมาณการเกิดปฏิกิริยานี้พบในการทดลองของ Boey and Yap [1] ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างอิพ็อกซีเรซินที่อบด้วยวิธีการทั้งสอง

ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) ที่ตำแหน่ง T_g (α transition) ที่คำนวณด้วยเทคนิค DMTA ได้จากเอกสารอ้างอิง [2-6] ตามสมการอาร์เรเนียส ดังนี้

$$\ln(f) = \ln A - (E_a/R) \cdot 1/T_g \quad (3.3)$$

เมื่อ f = ความถี่ที่ทดสอบ หน่วยเป็น Hz
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant = 8.314 J/K mol)

T_g = อุณหภูมิที่ตำแหน่ง $\tan\delta_{\max}$ หรือ T_g หน่วยเป็น K

คำนวณพลังงานกระตุ้นจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(f)$ และ $1/T_g$ ในการทดลองนี้ใช้ค่า T_g ที่ความถี่ 1, 10 และ 30 Hz

ค่า activation enthalpy (ΔH^*) ได้จากความชัน ($\Delta H^*/R$) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(f/T_g)$ และ $1/T_g$ ตามสมการต่อไปนี้

$$\ln(f/T_g) = \ln(k/2\pi h) - (\Delta H^*/R) \cdot 1/T_g - \Delta S^*/R \quad (3.4)$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant = 6.626×10^{-34} Js)

K = ค่าคงที่ของโบลทซ์แมน (Boltzman constant = 1.380×10^{-23} J/K)

ΔS^* = activation entropy คำนวณได้จากจุดตัดแกน y ($c = \ln(k/2\pi h) - \Delta S^*/R$)

(คำนวณ activation enthalpy และ activation entropy ตามเอกสารอ้างอิง [3])

ตารางที่ 3.22 สมบัติด้าน DMTA ของเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % ทดสอบที่ความถี่ 1 Hz

	I	II	III	IV	VI	VII	VIII
tan δ ($^{\circ}$C)							
Thermal 14 min	104.4	144.1	147.7	135.3	134.7	115.8	115.1
Microwave 14 min	110.6	135.1	149.1	138.0	130.5	132.0	107.5
Microwave 20 min	120.7	139.7	144.1	138.4	122.9	132.9	115.4
tan δ maximum							
Thermal 14 min	1.240	0.781	0.525	0.846	0.773	0.652	0.667
Microwave 14 min	1.185	0.734	0.534	0.915	0.832	0.649	0.875
Microwave 20 min	0.763	0.756	0.539	0.943	0.866	1.010	0.859
Full-width-at-half-maximum (FWHM) of tan δ ($^{\circ}$C)							
Thermal 14 min	19.25	20.61	32.29	18.82	23.67	33.67	33.02
Microwave 14 min	17.58	21.43	11.83	19.67	31.18	25.15	21.42
Microwave 20 min	23.45	26.20	23.51	27.54	26.68	17.56	19.50
Glassy modulus (GPa)							
Thermal 14 min	2.43	1.58	1.57	1.81	2.20	2.39	1.72
Microwave 14 min	1.51	1.56	1.16	1.04	1.27	1.46	1.93
Microwave 20 min	1.19	1.38	1.22	1.23	0.84	1.42	1.56
Rubbery modulus (MPa)							
Thermal 14 min	24.8	15.7	16.9	16.5	18.7	14.1	10.7
Microwave 14 min	14.4	17.9	15.7	14.2	13.7	16.8	11.8
Microwave 20 min	14.7	13.1	26.8	16.1	11.4	14.1	13.9

ค่าพลังงานกระตุ้นของอีพ็อกซี-แอนไฮไดรด์เรซินที่ศึกษานี้ มีพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 327 - 597 kJ/mol ยกเว้นสูตร VI ที่มีค่าต่ำมาก (200 kJ/mol) ดังแสดงในตารางที่ 3.23 ซึ่งน่าจะเกิดจากข้อผิดพลาดในการทดลอง พลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับพลังงานกระตุ้นของอีพ็อกซีที่รายงานจากนักวิจัยอื่นๆ ได้แก่ 286 - 525 kJ/mol [3], 290 -508 kJ/mol [4], และ 357 kJ/mol [5] Cook และคณะ [6] ได้รายงานว่าพลังงานกระตุ้นของอีพ็อกซีมีค่าประมาณ 500 - 600 kJ/mol ซึ่งค่าที่ได้นี้มีค่าอยู่ระหว่างค่าที่มีการรายงานมาก่อน คือ 700 - 900 kJ/mol และ 200 kJ/mol Chen และคณะ [7] ได้รายงานค่าพลังงานกระตุ้นของพอลิเมอร์ต่างๆ (PEEK, nylon 6, nylon 6/12, nylon 12, PET) มีค่าอยู่ในช่วง 230 - 790 kJ/mol จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นของอีพ็อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกับที่อบด้วยตูบอบบ่งบอกว่าระบบการให้ความร้อนทั้งสองแบบนี้ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างของโมเลกุลที่เชื่อมโยงกัน ค่าพลังงานกระตุ้นมีแนวโน้มสัมพันธ์กับ T_g หรือ $\tan \delta_{max}$ คือเมื่อ T_g สูงขึ้นพลังงานกระตุ้นจะสูงขึ้นด้วย พฤติกรรมนี้พบในรายงานอื่นๆ ด้วย [3,4] Lasa และคณะ [4] อธิบายว่าความหนาแน่นของปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลของอีพ็อกซีสัมพันธ์กับค่า T_g มากกว่าค่าพลังงานกระตุ้น ในขณะที่ผลการทดลองของโครงการวิจัยนี้ ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างพลังงานกระตุ้นและปริมาณการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าปริมาณการเกิดปฏิกิริยาที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมากเพราะใช้สูตรเรซินที่คล้ายคลึงกันมาก และโดยทั่วไปค่าพลังงานกระตุ้นของพอลิเมอร์จะอยู่ในช่วงกว้างมาก ซึ่ง Cook และคณะ [6] ได้กล่าวว่าพลังงานกระตุ้นอาจไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดปฏิกิริยา ส่วนค่า activation enthalpy มีทิศทางเดียวกันกับค่าพลังงานกระตุ้น ค่า activation entropy ที่คำนวณได้มีค่าสูงมาก แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบในระดับสูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีปริมาณการเคลื่อนไหวของโมเลกุลสูงในช่วง α transition (high degree of long range cooperative motion) รายละเอียดของผลการทดลองอ่านเพิ่มเติมใน reprint ที่แนบในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.23 พลังงานกระตุ้นที่ตำแหน่ง T_g ของเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % คำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA

	I	II	III	IV	VI	VII	VIII
Activation energy, E_a (kJ/mol)							
Thermal 14 min	365	575	315	438	521	391	354
Microwave 14 min	327	355	417	508	388	426	597
Microwave 20 min	406	474	458	515	200	442	459
Activation enthalpy, ΔH^\ddagger (kJ/mol)							
Thermal 14 min	363	571	311	435	518	388	351
Microwave 14 min	324	352	413	504	384	423	594
Microwave 20 min	402	471	455	512	197	439	456
Activation entropy, ΔS^\ddagger (J/mol)							
Thermal 14 min	728	1139	508	832	1037	765	673
Microwave 14 min	613	630	749	996	717	813	1328
Microwave 20 min	790	911	857	1012	267	850	941

เอกสารอ้างอิง

1. Boey, F.Y.C.; Yap, B.H. *Polymer Testing* 2001, 20, 837.
2. Cukierman, S.; Halary, J.L.; Monnerie, L. *Polym Eng Sci* 1991, 31, 1476.
3. Dyakonov, T.; Chen, Y.; Holland, K.; *et al.* *Polym Degrad Stab* 1996, 53, 217.

4. Laža, J.M., Julian, C.A., Larrauri, E., Leon, L.M. Polymer 1998, 40, 35.
5. Wingard, C.D. Thermo Acta 2000, 357-358, 293.
6. Cook, W.D., Scott, T.F., Tjevenon, S.Q., Forsythe, J.S. J Appl Polym Sci 2004, 93, 1348.
7. Chen, M.; Hellgeth, J. W.; Siochi, E.J.; Ward, T.C.; McGrath, J.E. Polym Eng Sci 1993, 33, 1122.

3.2.3 ปริมาณปฏิกิริยาเคมีและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

นำชิ้นงานที่อบแล้วมาตรวจสอบหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิค DSC ปริมาณพื้นที่ใต้กราฟของพีคคายความร้อน (exothermic peak) ถูกคำนวณเพื่อบ่งบอกปริมาณการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของชิ้นทดสอบนั้น เมื่อได้รับความร้อนอีกครั้งภายในเครื่องวิเคราะห์ พื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ (100% conversion) ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยเรซินที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่อง DSC นั้น โดยการผสมสารเคมีตามสูตรต่างๆที่เรียกว่า fresh sample เกลงใน DSC pan

วิเคราะห์หาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลของเรซินด้วยเครื่อง DSC ทำโดยตัดชิ้นงานจากชิ้นทดสอบบริเวณกลางแผ่นและบริเวณใกล้ขอบแผ่น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ถูกจับยึดด้วยหัวจับของเครื่องทดสอบ tensile properties ถ้าหากการอบเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ จะมีพีคคายความร้อนปรากฏบน DSC thermograms นำค่าพื้นที่ใต้พีคนี้คำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\chi = [1 - (\Delta H_x / \Delta H_t)] \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	χ	คือ	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (extent of conversion)
	ΔH_t	คือ	ปริมาณความร้อนที่คายออกมาจาก fresh sample
	ΔH_x	คือ	ปริมาณความร้อนที่คายออกมาจากชิ้นทดสอบ

ΔH_t เป็นตัวแทนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (100% conversion) โดยได้จากพื้นที่ของ exothermic peak เช่นเดียวกัน ตารางที่ 3.24 แสดงปริมาณปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการอบของเรซินสูตรต่างๆเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน เรซินส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาในช่วง 90 - 100 % มีเพียงบางสูตรในบางสภาวะที่มีการเกิดปฏิกิริยาไม่ถึง 90% จากการทดลองเปรียบเทียบค่าเหล่านี้ระหว่างบริเวณศูนย์กลางแผ่นและบริเวณใกล้ขอบแผ่น พบว่าปริมาณการเกิดปฏิกิริยาต่างกันเล็กน้อย ผลการทดลองนี้บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของการเกิดปฏิกิริยาตลอดทั่วชิ้นงาน เพราะตามปกติแล้ว การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะทำให้บริเวณศูนย์กลางแผ่นร้อนก่อนบริเวณขอบ ถ้าใช้เวลาในการอบไม่เพียงพอ บริเวณขอบแผ่นจะไม่แข็งหรือเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า

หากพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบจริงกับปริมาณการเกิดปฏิกิริยาแล้ว การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการอบด้วยตู้อบ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบด้วยตู้อบจะใช้เวลาานกว่า คือ 20 นาที สำหรับเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 % และ 14 นาที สำหรับเรซินที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % ในขณะที่การอบด้วยเตาไมโครเวฟนั้น เวลาที่อบจริงจะสั้นกว่าเวลาที่ตั้งไว้ในตารางที่ 3.4 หน้า 33

ความสม่ำเสมอการเกิดปฏิกิริยาบนชิ้นตัวอย่าง

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เพื่อคำนวณหา ปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (extent of conversion) ของอีพ็อกซีเรซินที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟแสดงในตารางที่ 3.24 ชิ้นงานบริเวณกลางแผ่น (center) มีความสำคัญมากเพราะเป็นบริเวณที่นำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ส่วนบริเวณขอบ (edge) ไม่ใช่ส่วนสำคัญในการทดสอบสมบัติเชิงกล แต่เป็นส่วนที่บ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่นงาน เตาไมโครเวฟที่ดีจะต้องทำ

ให้เรซินเกิดความร้อนสม่ำเสมอทั่วแผ่นงาน อย่างไรก็ตาม ความสม่ำเสมอในการเกิดความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน (ความกว้าง) ที่เหมาะสมต่อเตาไมโครเวฟและสภาวะการอบด้วย

การอบด้วยเตาไมโครเวฟและค่าอุณหภูมิของเรซินส่วนใหญ่มีปริมาณการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกันมาก มีเพียงบางตัวอย่างเท่านั้นที่มีค่าต่างกันมาก ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของชิ้นงานบริเวณศูนย์กลางและบริเวณขอบของเรซินส่วนใหญ่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสภาวะการอบและขนาดของแบบหล่อมีความเหมาะสมต่อการอบ อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นทดสอบเดียวกันนี้แสดงในตารางที่ รูปที่ 3.31 – 3.34 เป็นกราฟเปรียบเทียบปริมาณการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของข้อมูลในตารางที่ 3.24 และ 3.25

ตารางที่ 3.24 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (%) ของอีพ็อกซีเรซิน คำนวณด้วยเทคนิค DSC

สูตร	Specimen Thickness 1.5 mm ^a				Specimen Thickness 3 mm ^b			
	Accelerator 1%		Accelerator 4%		Accelerator 1%		Accelerator 4%	
	Center ^c	Edge ^d	Center ^c	Edge ^d	Center ^e	Edge ^f	Center ^e	Edge ^f
I (OV)	86.9	-	86.9	-	99.2	99.5	99.2	99.5
(MV)	92.3	92.3	92.3	92.3	96.9	97.5	96.9	97.5
II (OV)	89.7	-	97.2	-	99.6	99.4	98.8	-
(MV)	97.4	94.5	97.2	97.9	96.9	94.3	99.5	98.3
III (OV)	93.4	-	96.6	-	-	-	-	-
(MV)	99.9	85.2	99.6	94.1	-	-	-	-
IV (OV)	81.6	-	99.6	-	98.3	98.0	100	-
(MV)	96.3	88.4	99.7	97.7	94.7	94.6	99.5	99.8
VI (OV)	94.5	-	97.5	-	98.6	98.8	98.2	-
(MV)	95.0	91.3	98.2	83.4	94.6	93.7	96.2	97.7
VII (OV)	99.9	-	96.0	-	-	-	-	-
(MV)	99.9	99.1	99.3	91.4	-	-	-	-
VIII (OV)	97.3	-	99.1	-	98.5	99.2	99.2	-
(MV)	98.6	93.5	97.9	97.9	92.2	95.7	96.9	97.1

^a ใช้เวลาอบ 14 นาที สำหรับเตาไมโครเวฟ ใช้เวลาอบ 20 นาที และ 10 นาที สำหรับการอบด้วยตู้อบความร้อนของเรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ตามลำดับ ใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 3 และ 4 (ดูตารางที่ 3.4 หน้า 33) ไม่ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในสูตร I

^b ดูสภาวะการอบในตารางที่ 3.27 หน้า 82

^c ชิ้นทดสอบตัดจากบริเวณแกงของ tensile tested specimens

^d ชิ้นทดสอบตัดจากปลายสุดของ tensile tested specimens (ส่วนที่ถูกจับยึดด้วย grip ของเครื่องทดสอบขณะดึง)

^e ชิ้นทดสอบตัดจากบริเวณกลางแผ่นชิ้นงานที่อบได้ (ใกล้จุดศูนย์กลางแผ่น)

^f ชิ้นทดสอบตัดจากบริเวณห่างจากศูนย์กลางแผ่นชิ้นงานที่อบได้ประมาณ 3-5 ซม.

ตารางที่ 3.25 Glass transition temperature ของอีพ็อกซีเรซิน จำนวนด้วยเทคนิค DSC (ข้อมูลชุดเดียวกันกับตารางที่ 3.24)

สูตร	Specimen Thickness 1.5 mm ^a				Specimen Thickness 3 mm ^b			
	Accelerator 1%		Accelerator 4%		Accelerator 1%		Accelerator 4%	
	Center ^c	Edge ^d	Center ^c	Edge ^d	Center ^e	Edge ^f	Center ^e	Edge ^f
I (OV)	82.3	-	82.3	-	118.3	118.7	118.3	118.7
(MV)	89.0	88.3	89.0	88.3	106.3	106.0	106.3	106.0
II (OV)	90	-	76.7	-	110.7	112.3	116.6	-
(MV)	93.0	91.3	96	93	80.7	81.0	112.3	115.7
III (OV)	88.7	-	99.0	-	-	-	-	-
(MV)	114.3	83.0	111.7	89.7	-	-	-	-
IV (OV)	83.3	-	77.0	-	120.7	126.0	116.6	-
(MV)	89.7	78.3	95.7	63.7	81.7	83.0	115.3	112.0
VI (OV)	88	-	89.3	-	80.7	78.7	101.9	-
(MV)	85.3	81.7	90	70	75.0	75.7	86.1	77.3
VII (OV)	89.3	-	85.7	-	-	-	-	-
(MV)	89.0	88.0	88	60	-	-	-	-
VIII (OV)	88.0	-	88.3	-	75.7	74.7	102.4	-
(MV)	82.0	80.0	100.0	91	77.7	75.7	93.3	94.7

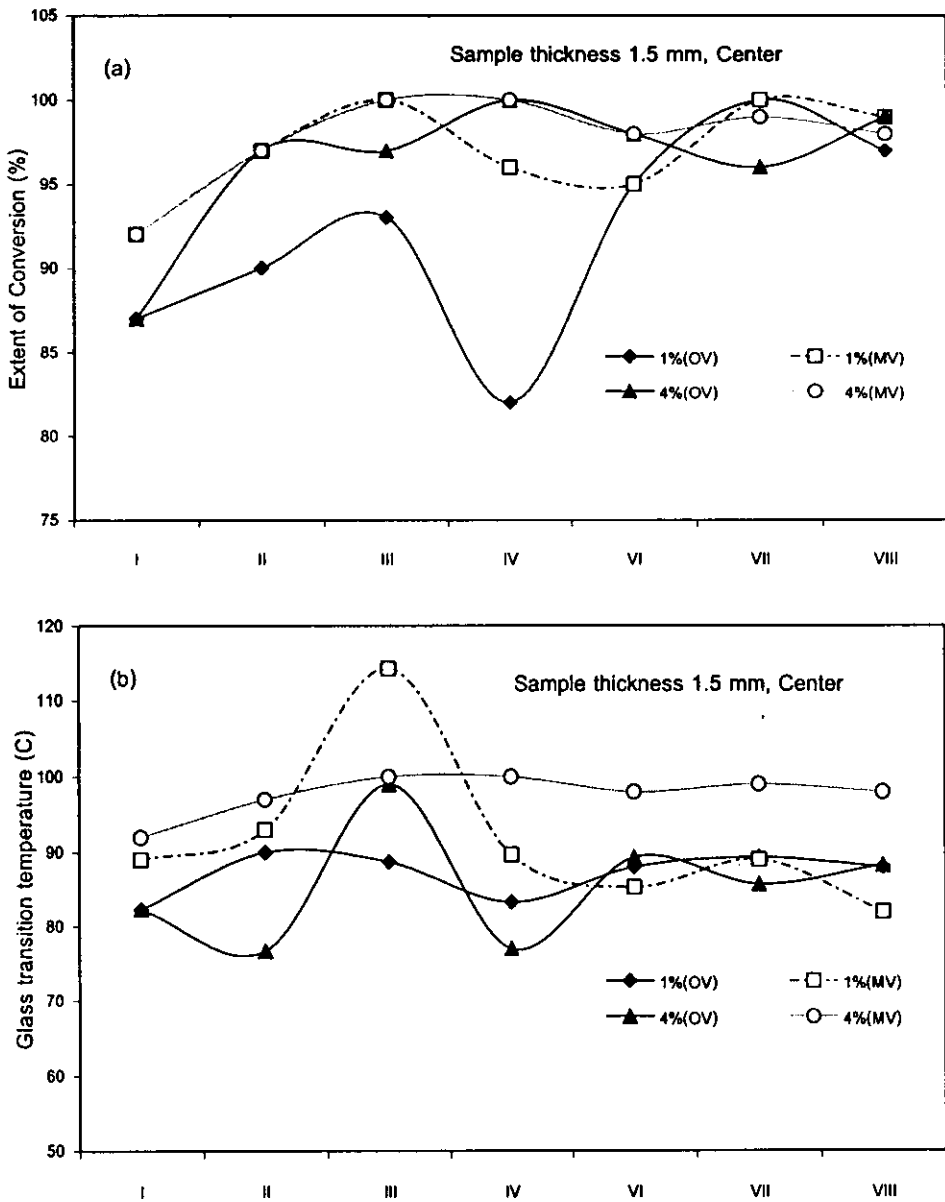
(^e - ^f เช่นเดียวกับตารางที่ 3.24)

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณการคายความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 3.26 ซึ่งอุณหภูมิสูงสุด (T_{peak}) จะต่ำลงมากกว่า 10 °C เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 4% พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ยกเว้นสูตร VII ที่มีปริมาณต่างกันน้อยมาก แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น (อุณหภูมิลดลง) และส่งผลให้มีปฏิกิริยามากขึ้น (การคายความร้อนมากขึ้น)

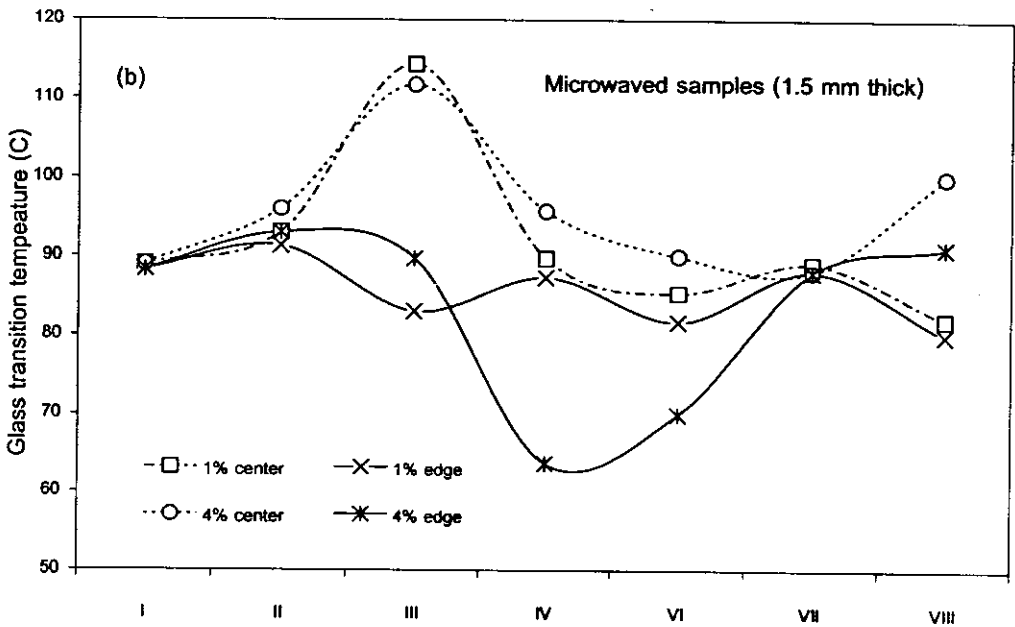
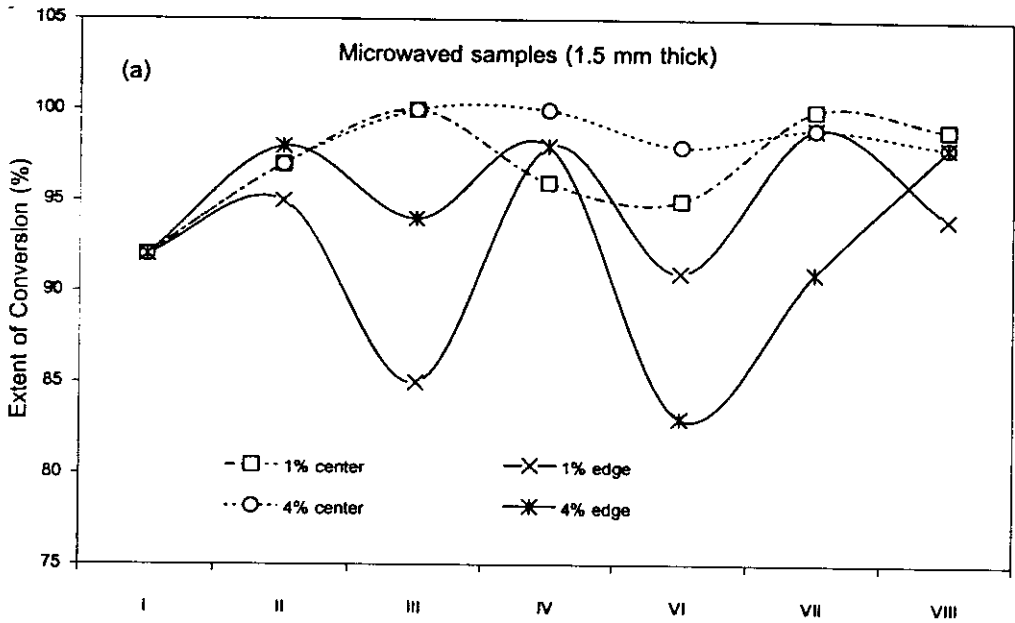
ตารางที่ 3.26 พื้นที่ใต้พีค (enthalpy, ΔH) และอุณหภูมิที่ตำแหน่งของ exothermal peak (T_{peak}) ของ fresh samples (epoxy : hardener = 100 : 80) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Resin	Accelerator 1%		Accelerator 4%	
	ΔH (J/g)	T_{peak} (°C)	ΔH (J/g)	T_{peak} (°C)
I ^a	312	157.7	312	157.7
II	254	166.3	330	143.0
III	339	162.3	363	150.0
IV	252	169.7	324	146.3
VI	282	167.7	322	149.3
VII	363	166.0	367	153.7
VIII	302	168.0	340	148.7

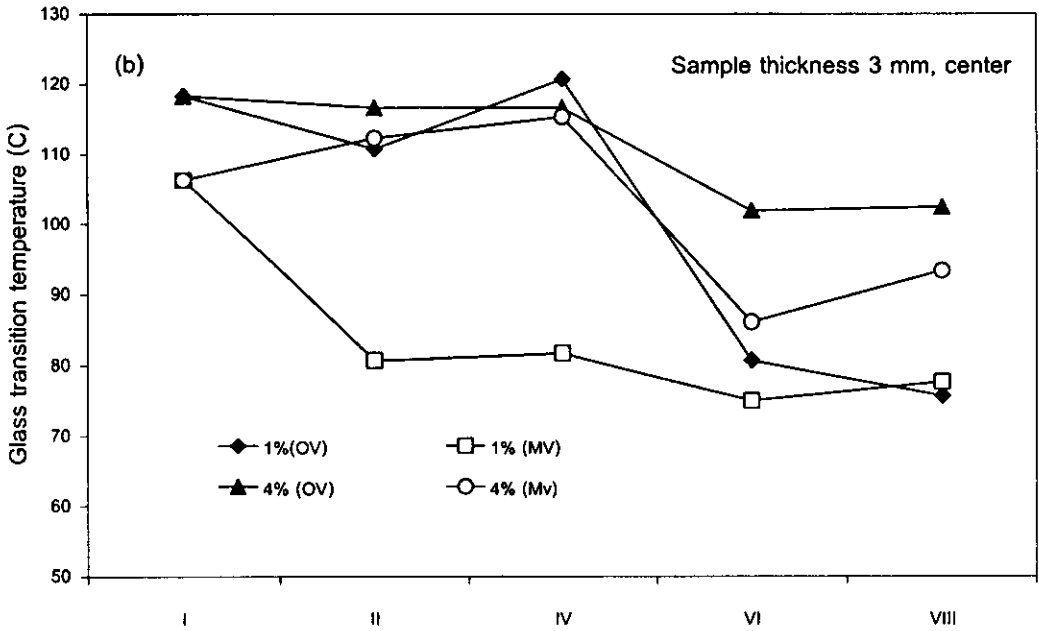
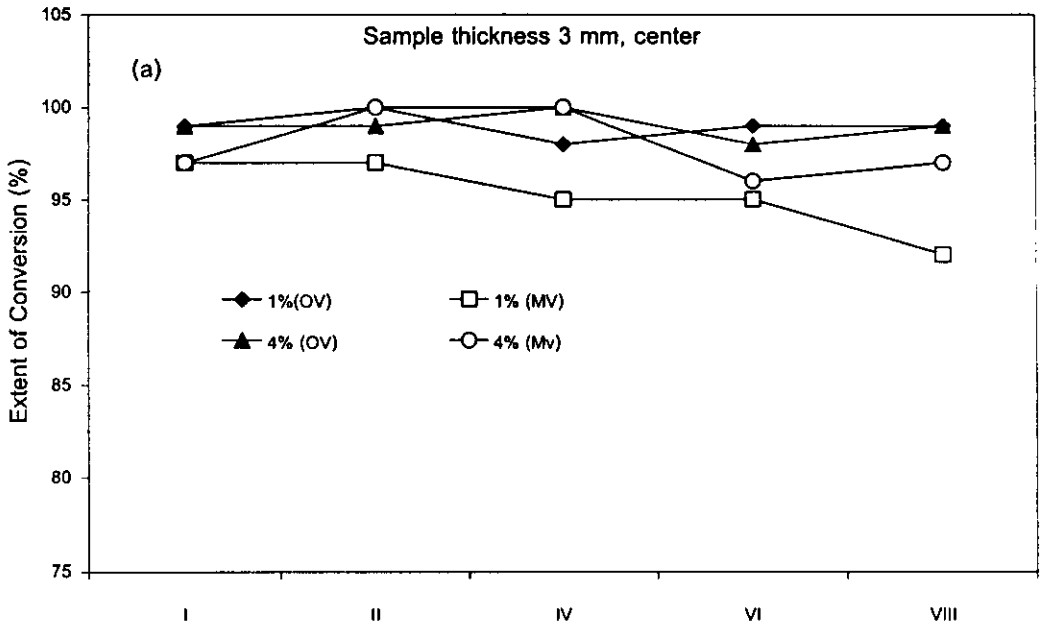
(^a ไม่ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)



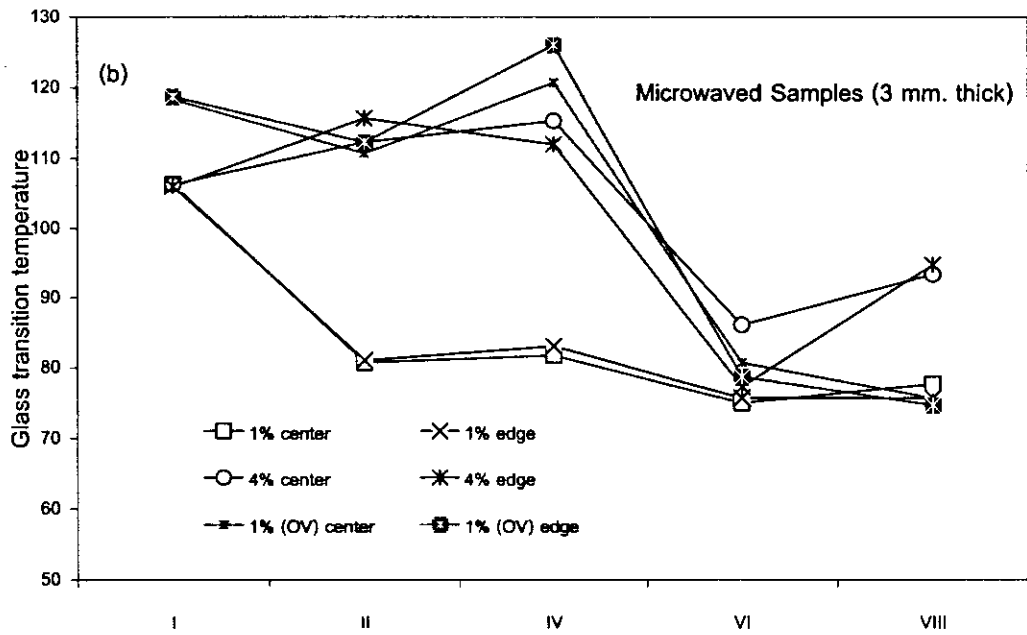
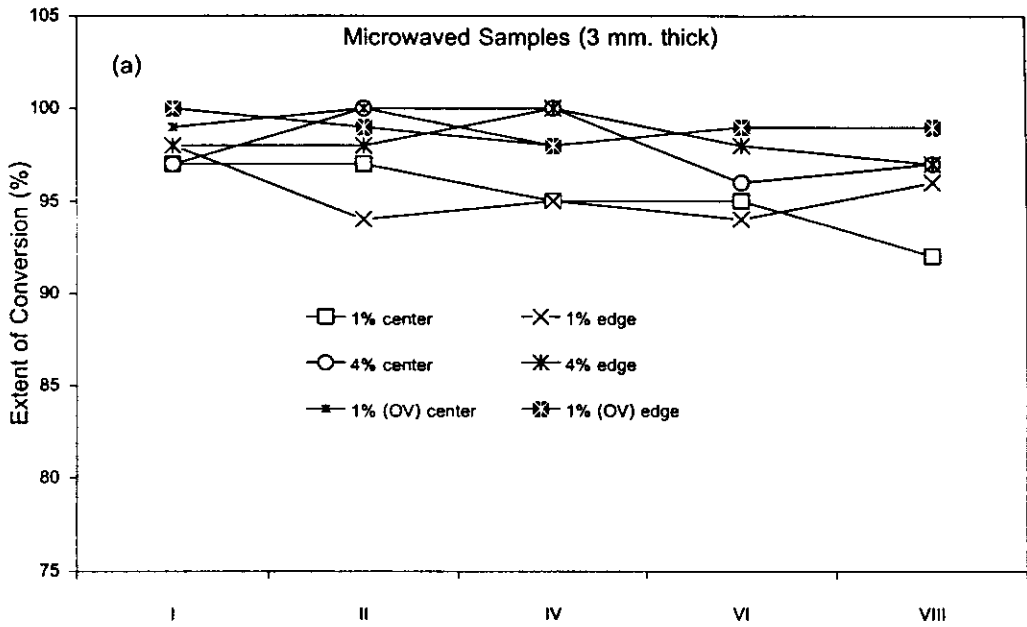
รูปที่ 3.31 กราฟแสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (a) และอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (b) ของอีพ็อกซีเรซิน ที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟ (MV) ชั้นงานหนา 1.5 mm และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ตัดตัวอย่างบริเวณศูนย์กลางแผ่น



รูปที่ 3.32 กราฟแสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (a) และอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (b) ของอีพ็อกซีเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ ชีงงานหนา 1.5 mm และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ตัดตัวอย่างบริเวณศูนย์กลางแผ่น (center) และบริเวณขอบแผ่น (edge)



รูปที่ 3.33 กราฟแสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (a) และอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (b) ของอีพ็อกซีเรซินที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟ (MV) ชี้นางหนา 3 mm และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ตัดตัวอย่างบริเวณศูนย์กลางแผ่น



รูปที่ 3.34 กราฟแสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยา (a) และอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (b) ของอีพ็อกซีเรซินที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและตู้อบความร้อน (OV 1%) ชั้นงานหนา 3 mm และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ตัดตัวอย่างบริเวณศูนย์กลางแผ่น (center) และบริเวณขอบแผ่น (edge)

สรุปผลการทดลอง

1. อีพ็อกซี-แอนไฮไดรด์เรซินที่ใช้ศึกษานี้ สามารถอบให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนได้เช่นเดียวกันกับการอบด้วยตู้อบ โดยสมบัติเชิงกลของเรซินสูตร I และ II ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟเหมาะสมในการที่จะนำไปศึกษาต่อเพื่อทำเป็นอีพ็อกซีคอมโพสิตที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ เนื่องจากทั้งสองสูตรนี้เมื่ออบด้วยเตาไมโครเวฟ แสดงสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่ด้อยกว่าชิ้นงานที่อบด้วยตู้อบความร้อน
2. การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะใช้เวลาสั้นกว่าการอบด้วยตู้อบความร้อน เมื่อเทียบกับระยะเวลาอบจริงกับปริมาณการเกิดปฏิกิริยา
3. สมบัติที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA แสดงให้เห็นว่าอีพ็อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟน่าจะมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงโมเลกุลใกล้เคียงกับอีพ็อกซีที่อบด้วยตู้อบ
4. การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ในการหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน ยังไม่สามารถชี้แนะความแตกต่างสมบัติเชิงกลระหว่างตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบและเตาไมโครเวฟ

3.3 อีพ็อกซีเรซินอบด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับชิ้นตัวอย่างหนา

เนื่องจากการเตรียมอีพ็อกซีคอมโพสิต จำเป็นต้องใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาเพิ่มขึ้น โดยมีความหนาไม่ต่ำกว่า 3 mm ดังนั้น จึงทำการทดลองชุดใหม่ที่มีความหนา 3 mm สูตรที่มี EMI เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถหาสภาวะการอบในเตาไมโครเวฟที่เหมาะสมได้ เนื่องจากเรซินจะไหม้ คาดว่าเป็นเพราะชิ้นงานมีความหนามากขึ้น สภาวะการอบในตู้อบความร้อนและในเตาไมโครเวฟแสดงในตารางที่ 3.27 สังเกตได้ว่าเป็นสภาวะการอบที่แตกต่างจากการอบตัวอย่างที่มีขนาดบาง จากที่กล่าวมาแล้วว่าสามารถใช้สภาวะการอบที่ต่างกันได้ เพราะจะใช้ลักษณะชิ้นงานที่อบได้เป็นเกณฑ์กำหนด แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าสภาวะการอบด้วยเตาไมโครเวฟของแต่ละสูตรยังอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ ใช้ระดับกำลัง 3 และใช้เวลาในการอบในช่วง 6 – 10 นาที

ตารางที่ 3.27 สภาวะการอบด้วยเตาไมโครเวฟของตัวอย่างชนิดหนาแบบอบครั้งเดียว (single step)

Resin	Thermal oven (150°C)		Microwave oven (Level 3)	
	Accelerator 1%	Accelerator 4%	Accelerator 1%	Accelerator 4%
I	25 min		10 min	
II	25 min	15 min	12 min	7 min
IV			15 min	7 min
VI			12 min	6 min
VIII			10 min	6 min

3.3.1 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินที่อบแบบขั้นตอนเดียว

Tensile properties, impact strength และ flexural properties ของอีพ็อกซีเรซินสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.28 – 3.31 และรูปที่ 3.35 – 3.37 เรซินสูตร I ไม่ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนเรซินสูตรอื่นๆมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1% และ 4% เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแต่ละสูตรที่มีระบบการอบต่างกัน พบว่าความแตกต่างสมบัติเชิงกลของสูตรต่างๆมีความซับซ้อน จำเป็นต้องพิจารณาแต่ละสมบัติ ซึ่งจะมีความเฉพาะตัวของสูตรและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา สูตร I ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟแสดง Tensile properties และ flexural properties ด้อยกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบ ส่วนเรซินสูตร II ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 4% เป็นสูตรที่มีศักยภาพสำหรับการอบด้วยเตาไมโครเวฟ เพราะให้สมบัติเชิงกลที่เทียบเท่าหรือดีกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบ เรซินสูตรอื่นๆแสดงสมบัติไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 3.28 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินหนา 3 mm เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบอุ่นด้วยอุณหภูมิ

Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	1.66	69.21	8.06	3.84	96.81	6.36	3.18
	±	±	±	±	±	±	±
	0.14	7.84	1.69	0.30	13.00	3.08	0.87
II	1.49	35.88	3.49	2.40	52.08	2.33	1.68
	±	±	±	±	±	±	±
	0.23	8.23	0.81	0.54	0.20	0.41	0.44
IV	1.68	17.12	1.31	2.62	62.01	2.45	1.91
	±	5.12	±	±	±	±	±
	0.33		0.39	0.35	10.88	0.39	0.29
VI	1.84	30.18	2.39	3.09	58.35	1.94	0.44
	±	6.89	±	±	±	±	±
	0.28		0.50	0.35	8.95	0.25	0.13
VII	2.06	29.34	1.74	3.84	73.08	2.78	2.04
	±	6.19	±	±	±	±	±
	0.14		0.33	0.73	5.18	0.26	1.15

ตารางที่ 3.29 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินหนา 3 mm เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบอุ่นด้วยอุณหภูมิ

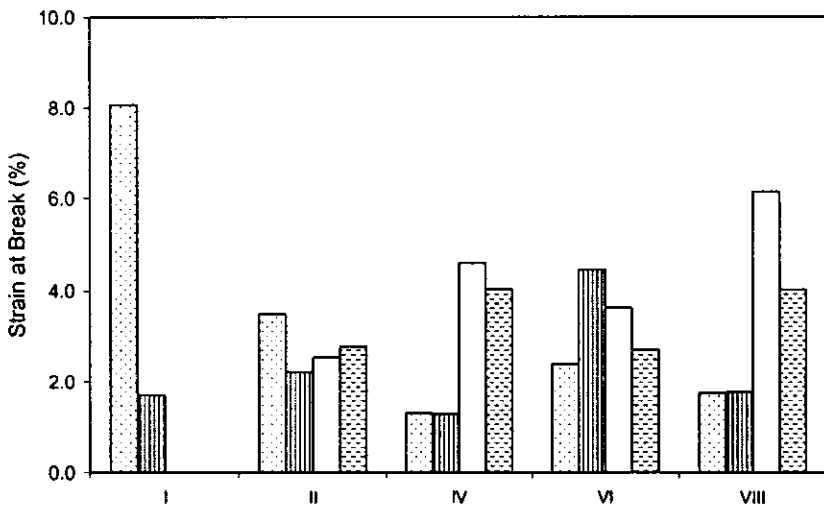
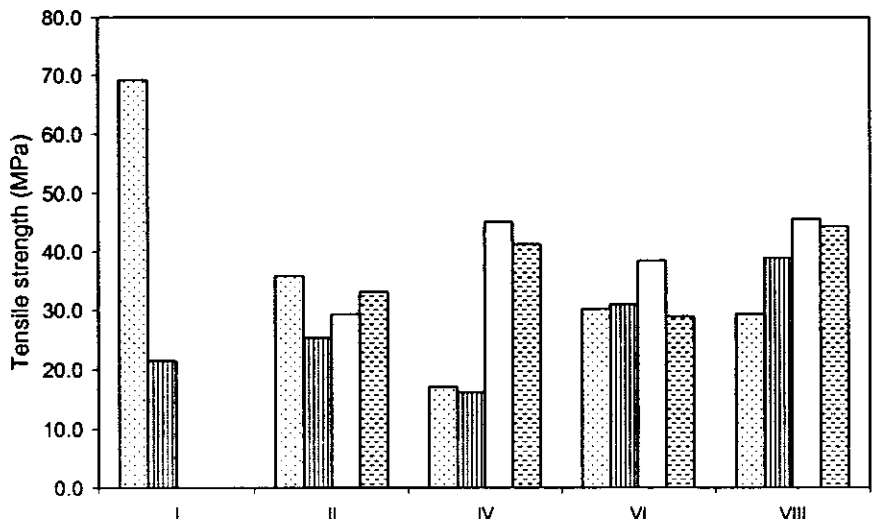
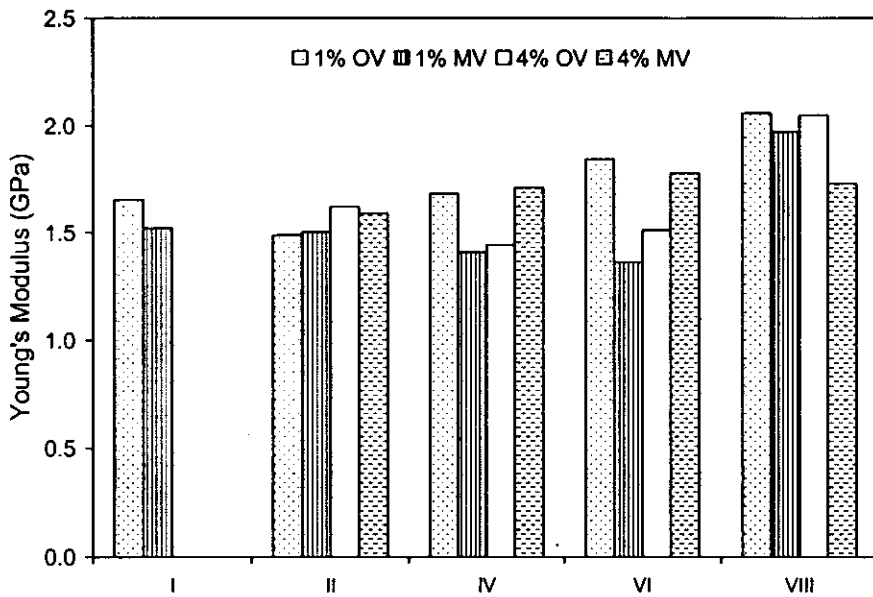
Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	1.66	69.21	8.06	3.84	96.81	6.36	3.18
	±	±	±	±	±	±	±
	0.14	7.84	1.69	0.30	13.00	3.08	0.87
II	1.62	29.30	2.54	2.23	38.12	2.14	2.34
	±	±	±	±	±	±	±
	0.05	3.19	0.42	0.56	5.24	1.48	1.03
IV	1.44	45.07	4.59	2.64	63.24	2.51	2.52
	±	±	±	±	±	±	±
	0.07	9.04	0.73	0.23	12.73	0.39	1.00
VI	1.51	38.43	3.63	3.17	74.04	2.67	2.52
	±	±	±	±	±	±	±
	0.17	5.00	0.54	0.15	19.42	0.91	0.96
VII	2.05	45.51	6.14	3.04	63.95	2.25	2.27
	±	±	±	±	±	±	±
	0.15	7.00	2.9	0.25	8.42	0.46	0.43

ตารางที่ 3.30 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินหนา 3 mm เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ

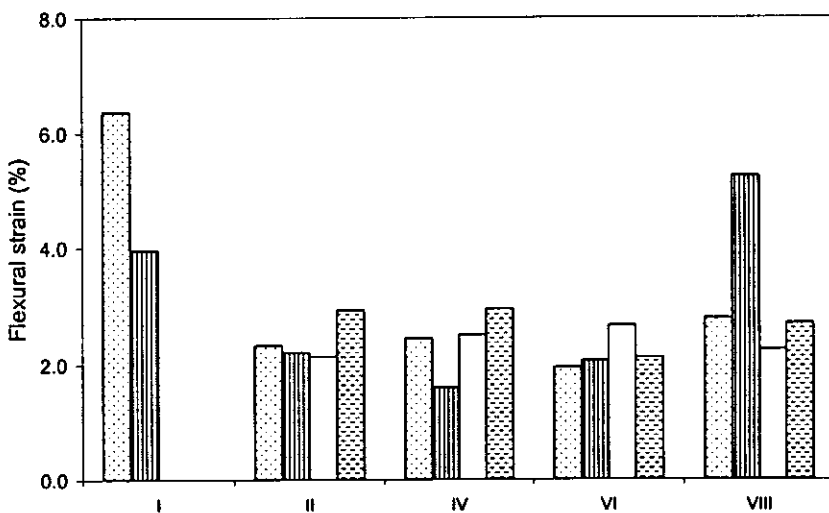
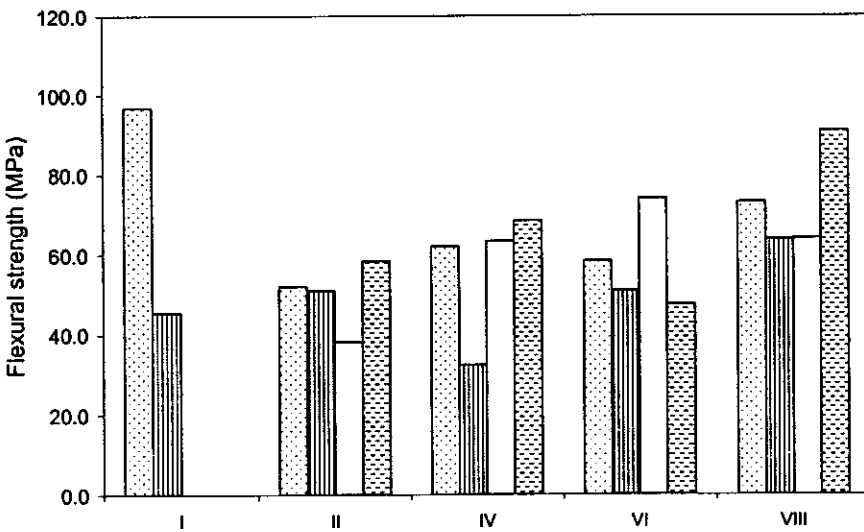
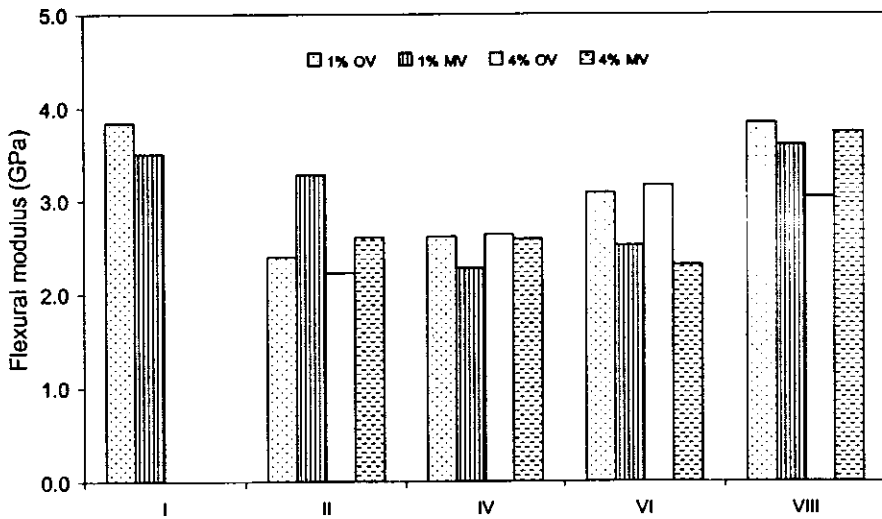
Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	1.52	21.49	1.70	3.51	45.24	3.95	3.11
	±	±	±	±	±	±	±
	0.34	5.31	0.30	0.10	12.31	0.23	0.63
II	1.50	25.27	2.21	3.29	50.98	2.21	1.46
	±	±	±	±	±	±	±
	0.21	5.03	0.90	0.32	8.79	0.24	0.24
IV	1.41	16.23	1.28	2.28	32.30	1.61	1.81
	±	±	±	±	±	±	±
	0.44	5.54	0.38	0.11	7.04	0.31	0.52
VI	1.36	31.01	4.45	2.52	50.82	2.06	1.14
	±	±	±	±	±	±	±
	0.29	7.09	1.14	0.53	5.74	0.37	0.45
VII	1.97	38.92	1.76	3.60	63.71	5.24	1.14
	±	±	±	±	±	±	±
	0.12	9.63	1.1	0.41	16.44	0.37	0.45

ตารางที่ 3.31 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินหนา 3 mm เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ

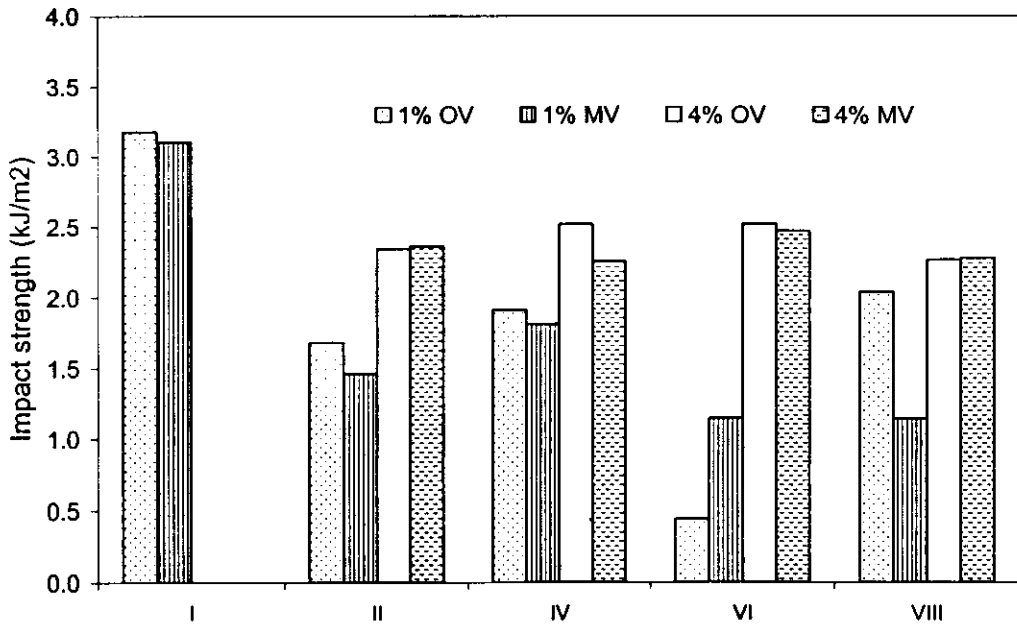
Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	1.52	21.49	1.70	3.84	96.81	6.36	3.18
	±	±	±	±	±	±	±
	0.34	5.31	0.30	0.30	13	0.38	0.87
II	1.59	33.11	2.78	2.61	58.39	2.93	2.36
	±	±	±	±	±	±	±
	0.17	2.38	0.58	0.86	9.58	1.7	0.71
IV	1.71	41.24	4.03	2.59	68.37	2.94	2.25
	±	±	±	±	±	±	±
	0.16	6.95	0.37	0.71	9.78	0.83	0.45
VI	1.78	28.88	2.70	2.31	47.46	2.11	2.47
	±	±	±	±	±	±	±
	0.07	7.92	0.54	0.65	15.63	0.59	0.35
VII	1.73	44.28	4.02	3.74	9099	2.70	2.28
	±	±	±	±	±	±	±
	0.25	6.30	1.30	0.33	7.65	0.48	0.84



รูปที่ 3.35 Tensile properties ของอีพ็อกซีเรซินอบแบบครั้งเดียว มีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ชั้นทดสอบหนา 3 mm (OV = oven และ MV = microwave)



รูปที่ 3.36 Flexural properties ของอีพ็อกซีเรซินสูตรต่างๆ แบบอบครั้งเดียว ชั้นงานหนา 3 mm (OV = oven, MV = microwave, 1% และ 4% คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)



รูปที่ 3.37 Impact strength ของอีพ็อกซีเรซินสูตรต่างๆ ที่อบแบบครั้งเดียว ชั้นงานหนา 3 mm (OV = oven, MV = microwave, 1% และ 4% คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)

สิ่งสำคัญของโครงการวิจัยนี้ คือ การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินและคอมโพสิทระหว่างชั้นงานที่อบด้วยตู้อบ (thermal curing) และอบด้วยเตาไมโครเวฟ (microwave curing) โดยศึกษาจากเรซินสูตรต่างๆ ไม่ได้มุ่งเน้นเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างสูตร แต่จะคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมต่อการอบด้วยเตาไมโครเวฟ งานวิจัยในครั้งหลังนี้เป็นการศึกษาคอมโพสิท ในขณะที่งานวิจัยช่วงแรกเป็นการศึกษาเฉพาะอีพ็อกซีเรซิน แต่เนื่องจากการปรับความหนาของชั้นงานเมื่อทำเป็นคอมโพสิท ดังนั้น จึงมีการศึกษาอีพ็อกซีเรซินที่ความหนาใหม่นี้ด้วย โดยช่วงแรกเตรียมตัวอย่างหนาประมาณ 1 - 2 mm ต่อมาเตรียมตัวอย่างหนาประมาณ 3 - 4 mm

3.3.2 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินที่อบแบบหลายขั้นตอน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า สูตร II เป็นสูตรที่เหมาะสมต่อการอบด้วยเตาไมโครเวฟมากที่สุด ดังนั้น การทดลองต่อไปจึงเลือกใช้สูตรนี้ และทำการเปรียบเทียบกับสูตร I การทดลองตอนนี้จะเลือกใช้เรซินที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% เท่านั้น การอบหลายขั้นตอนในเตาไมโครเวฟ หมายถึงการอบโดยใช้ระดับกำลังต่างๆก่อน ในระยะเวลาหนึ่งๆ แล้วเพิ่มระดับกำลังให้สูงขึ้น ทำต่อเนื่องกันไป การเลือกใช้สภาวะการอบเช่นนี้ เป็นการทดลองคล้ายกับการลองผิดลองถูกในเบื้องต้น เพื่อให้ทราบทิศทางสภาวะที่น่าจะเป็น โดยมีหลักการพื้นฐานคือ การอุ่นเรซินให้ร้อนด้วยระดับกำลังต่างๆก่อน จากการทดลองที่ผ่านมา ระดับกำลัง 2 ไม่สามารถทำให้อีพ็อกซีเรซินแข็งตัวได้ จึงเลือกใช้ระดับกำลังนี้เป็นจุดเริ่มต้น แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นนั้น ไม่มีเกณฑ์ในการกำหนด ต้องทำการทดลองเก็บข้อมูลด้วยการใช้ระยะเวลาต่างๆกัน สภาวะการอบในเตาไมโครเวฟแบบหลายขั้นตอนของเรซินสูตร I และสูตร II แสดงในตารางที่ 3.32 เรซินสูตร I จะนำไปทดสอบ Tensile properties เท่านั้น ส่วนเรซินสูตร II มีสมบัติเชิงกลทั้ง 3 ประเภท กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเรซินในตารางที่ 3.32 แสดงในรูปที่ 3.38 - 3.41 เป็นที่น่าสังเกตว่า การอบหลายขั้นตอนในเตาไมโครเวฟจะแสดงสมบัติเชิงกลดีกว่าการอบแบบขั้นตอนเดียวและอบด้วย

ดูบความร้อน ยกเว้น impact strength ของเรซินสูตร II ที่การอบด้วยเตาไมโครเวฟแบบสองชั้นตอน ให้ค่าต่ำลง ทั้งนี้ต้องตระหนักว่า สภาวะการอบที่ทำนี้อาจไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมก็ได้

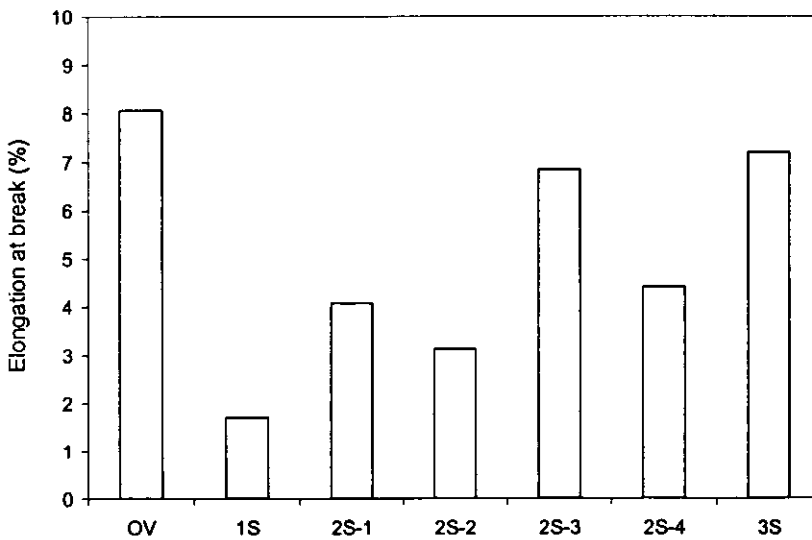
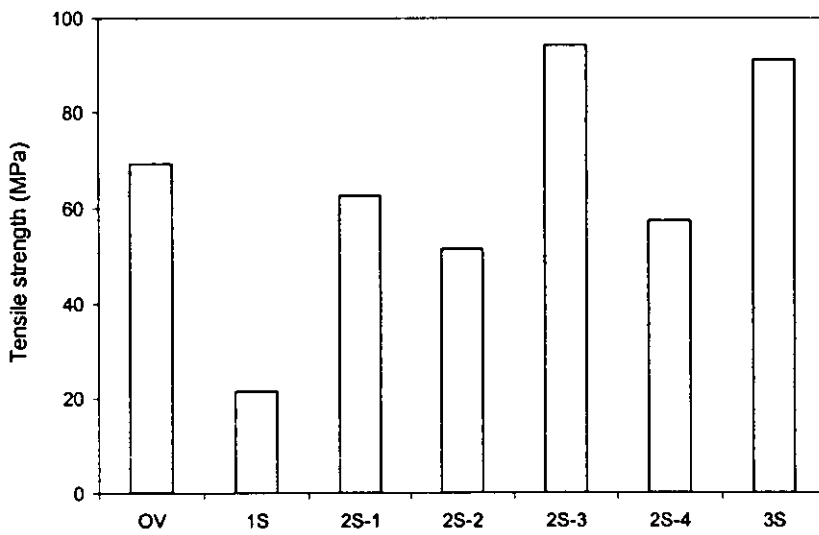
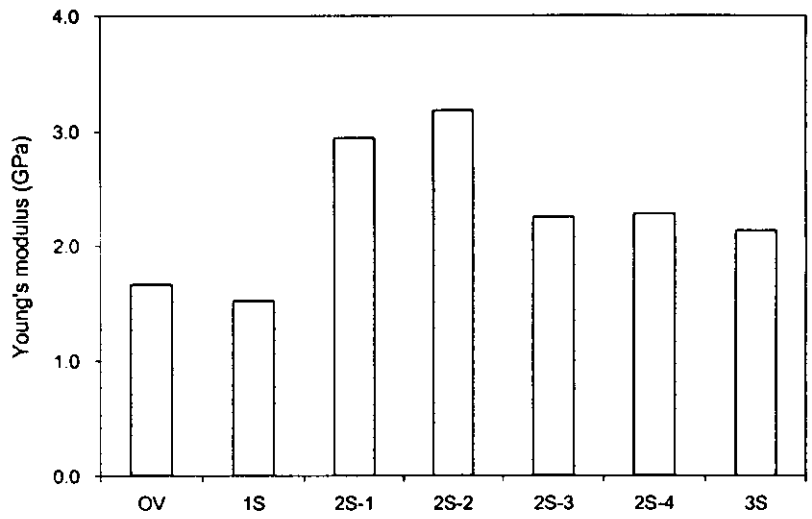
ตารางที่ 3.32 สภาวะการอบในเตาไมโครเวฟแบบหลายชั้นตอนของเรซินสูตร I และสูตร II

Code	Resin I			Resin II		
	Heat source	Condition	T* (sec)	Heat source	Condition	T* (sec)
OV	Thermal oven	150°C, 25 min	1500	Thermal oven	150°C, 15 min	900
1S	Microwave oven	L3/10	180	Microwave oven	L3/7	125
2S-1		L2/20 + L4/5	339		L2/5 + L4/3	131
2S-2		L2/25 + L3/5	357		L2/5 + L3/5	144
2S-3		L2/25 + L6/5	465		L2/3 + L4/3	110
2S-4		L2/20 + L3/10	393		L2/3 + L4/5	159
2S-5		-	-		L2/10 + L3/5	198
2S-6		-	-		L2/10 + L3/7	233
2S-7		-	-		L2/10 + L4/3	185
2S-8		-	-		L2/10 + L4/5	234
2S-9		-	-		L3/5 + L4/3	167
3S		L2/20+L3/10+L5/5	555		L2/10 + L3/7 + L4/3	310

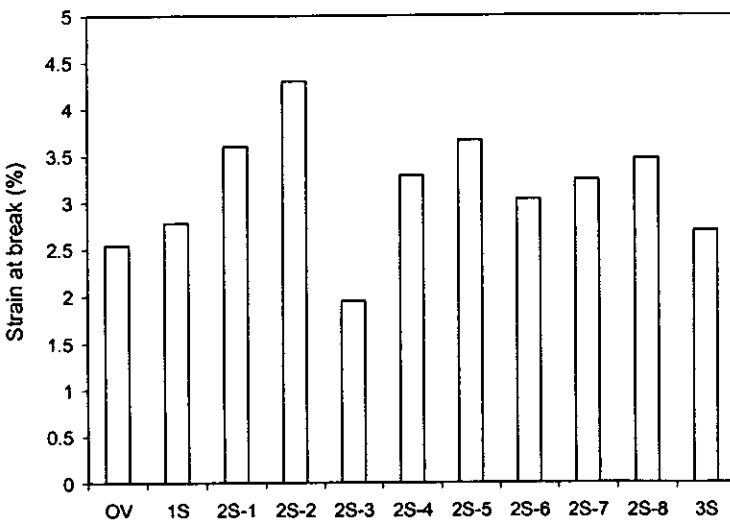
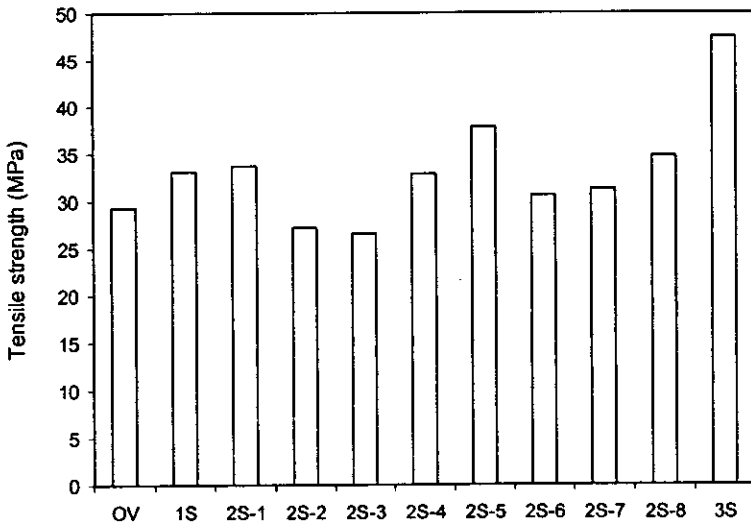
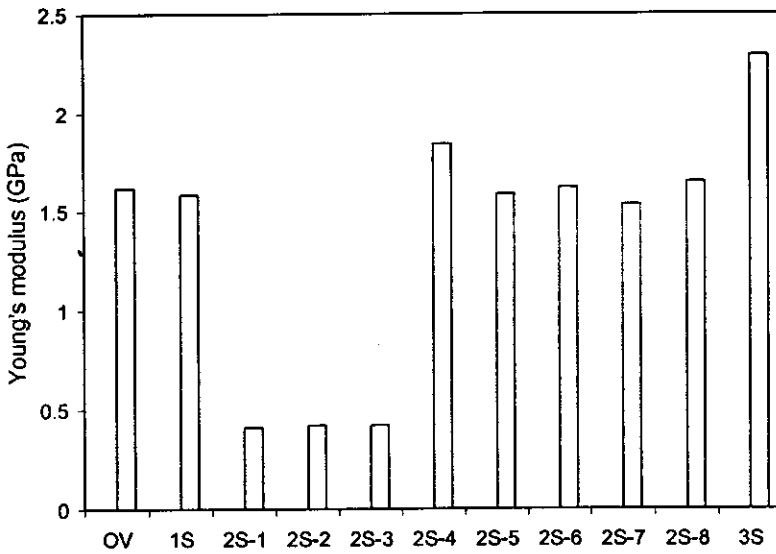
หมายเหตุ L2/20 หมายถึงใช้ระดับกำลัง 2 และตั้งเวลาไว้ 20 นาที

T* หมายถึงเวลาที่ใช้จริงในการให้คลื่นไมโครเวฟแก่ตัวอย่าง (actual heating time)

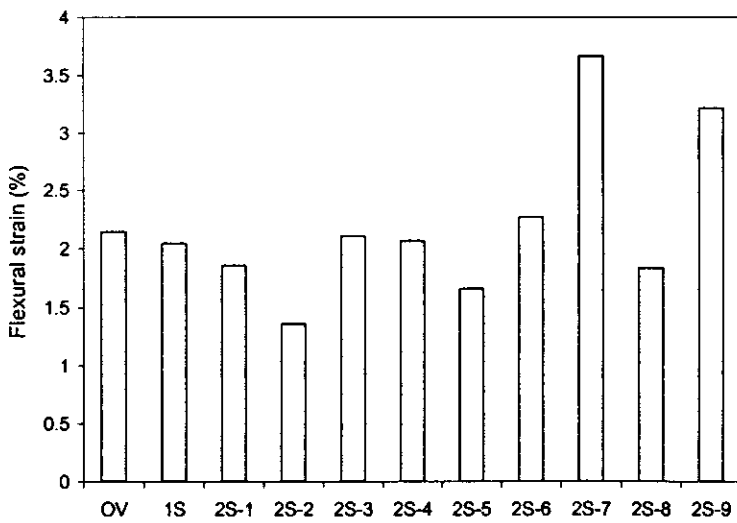
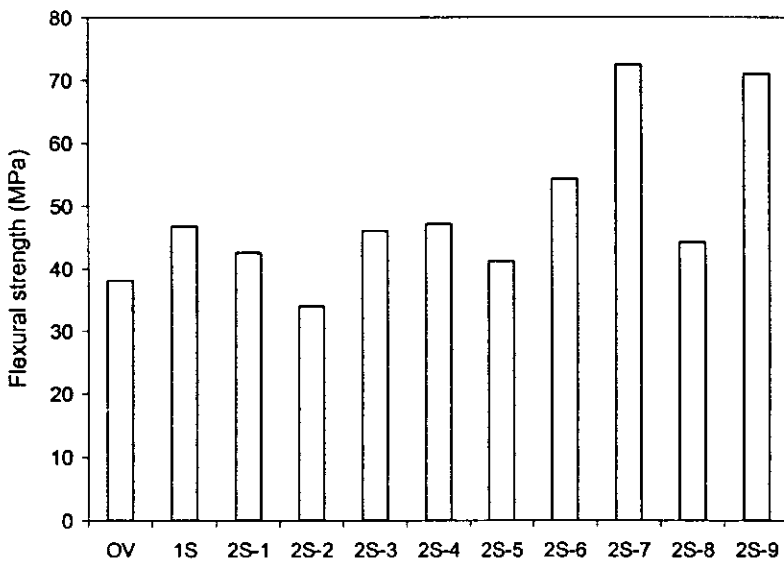
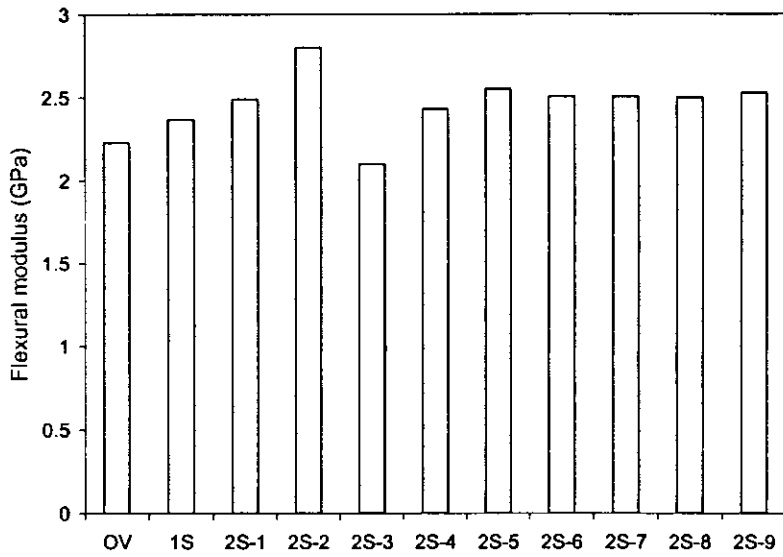
ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองตอนนี้เป็นตัวอย่างชนิดหนา (≥ 3 mm) ดังนั้น ระยะเวลาในการอบด้วยดูบความร้อนจึงค่อนข้างนาน การคิดเวลาในการอบด้วยเตาไมโครเวฟ เป็นหัวข้อที่อาจมีข้อคิดเห็นขัดแย้งกันได้ เพราะเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน มีระยะเวลาในการเปิดเครื่องไม่เท่ากับระยะเวลาที่วัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากโครงการวิจัยนี้มีข้อจำกัด คือไม่สามารถสร้างเตาไมโครเวฟได้เอง จึงไม่สามารถควบคุมระยะเวลาปล่อยคลื่นให้ต่อเนื่องได้ ถ้าหากคิดระยะเวลาในการเปิดเครื่อง (setting time) จากผลรวมของเวลาทุกระดับ เช่น สูตร 2S-1 ที่ใช้เวลาเท่ากับ 25 นาที แต่ถ้าหากพิจารณาเวลาที่เครื่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมา (actual heating time) จะเป็นเวลาเพียง 339 วินาที เท่านั้น การพิจารณาระยะเวลาอบในดูบความร้อนนั้น จะต้องใช้เวลาทั้งหมดที่วัสดุอยู่ภายในดูบ เนื่องจากการใช้ไอร้อนในบรรยากาศภายในตู้ ด้วยเหตุนี้ จะเห็นว่าเตาไมโครเวฟใช้เวลาสั้นกว่าดูบความร้อน อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าคิดว่า หากใช้เตาไมโครเวฟที่ให้คลื่นแบบต่อเนื่อง ผลของการอบทั้งแบบชั้นตอนเดียวและหลายชั้นตอน อาจต่างจากผลการทดลองที่ปรากฏในโครงการวิจัยนี้ได้ เพราะระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟในครัวเรือนนี้ ถึงแม้ว่าตามทฤษฎีนั้น คลื่นไมโครเวฟที่ออกมาจะเป็นแบบต่อเนื่อง แต่ระบบจะมีการปิด-เปิดสัญญาณทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังลดลง ทำให้มีพฤติกรรมคล้ายกับ pulsed wave



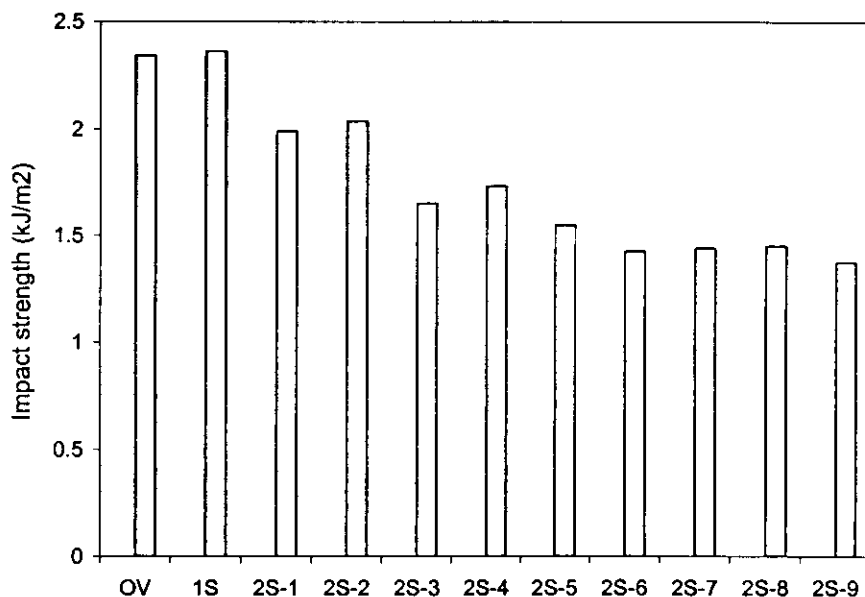
รูปที่ 3.38 Tensile properties ของเรซินสูตร I ที่อบด้วยคู่อุณหภูมิร้อน (OV) และ เตาไมโครเวฟแบบขั้นตอนเดียว (1S) สองขั้นตอน (2S-1 – 2S-4) และ สามขั้นตอน (3S)



รูปที่ 3.39 Tensile properties ของเรซินสูตร II ที่อบด้วยอุณหภูมิความร้อน (OV) และ เตาไมโครเวฟแบบขั้นตอนเดียว (1S) สองขั้นตอน (2S-1 – 2S-8) และ สามขั้นตอน (3S)



รูปที่ 3.40 Flexural properties ของเวรินสูตร II ที่อบด้วยอุณหภูมิความร้อน (OV) เตาไมโครเวฟแบบขั้นตอนเดียว (1S) และสองขั้นตอน (2S-1 – 2S-9)



รูปที่ 3.41 Impact strength ของเรซินสูตร II ที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และ เตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) และสองชั้นตอน (2S-1 – 2S-9)

3.4 อีพ็อกซี-เส้นใยแก้วคอมโพสิตอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.4.1 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีคอมโพสิตสูตรต่าง ๆ

Tensile properties, impact strength และ flexural properties ของอีพ็อกซีคอมโพสิตสูตรต่างๆ แสดงใน ตารางที่ 3.33 – 3.36 และรูปที่ 3.42 – 3.44 คอมโพสิตสูตร I ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟยังคงแสดงสมบัติที่ดีกว่า ตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบ คอมโพสิตสูตร II ที่อบด้วยเตาไมโครเวฟแสดง flexural properties ดีกว่าตัวอย่างที่อบด้วย ตู้อบ ส่วน tensile properties และ impact strength ต่ำกว่าเล็กน้อย

ตารางที่ 3.33 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีคอมโพสิต เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยตู้อบความร้อน

Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	2.05	60.26	4.47	4.14	99.29	3.16	12.62
	±	±	±	±	±	±	±
	0.18	7.56	1.07	0.40	18.82	1.04	1.51
II	1.77	19.48	1.73	3.81	71.07	1.92	9.58
	±	±	±	±	±	±	±
	0.08	6.27	0.56	0.55	6.63	0.12	1.50
IV	2.42	25.61	1.43	3.80	73.06	2.05	10.60
	±	±	±	±	±	±	±
	0.14	7.20	0.54	0.44	4.48	0.14	4.23
VI	1.98	43.08	3.66	4.59	77.56	1.91	3.06
	±	±	±	±	±	±	±
	0.17	5.70	0.54	0.47	8.16	0.13	0.42
VII	2.08	46.26	3.15	5.22	76.71	2.59	5.82
	±	±	±	±	±	±	±
	0.20	3.38	0.49	0.41	5.17	0.35	1.72

ตารางที่ 3.34 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีคอมโพสิต เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบอุ่นด้วยอุณหภูมิ

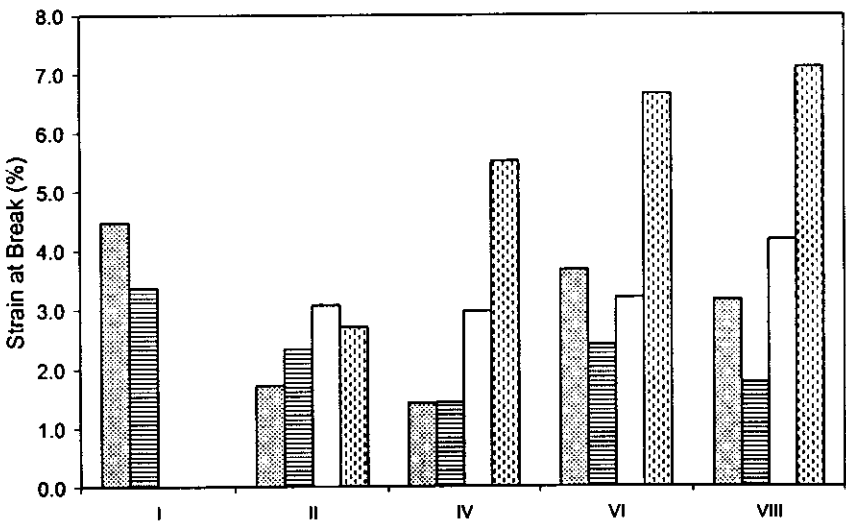
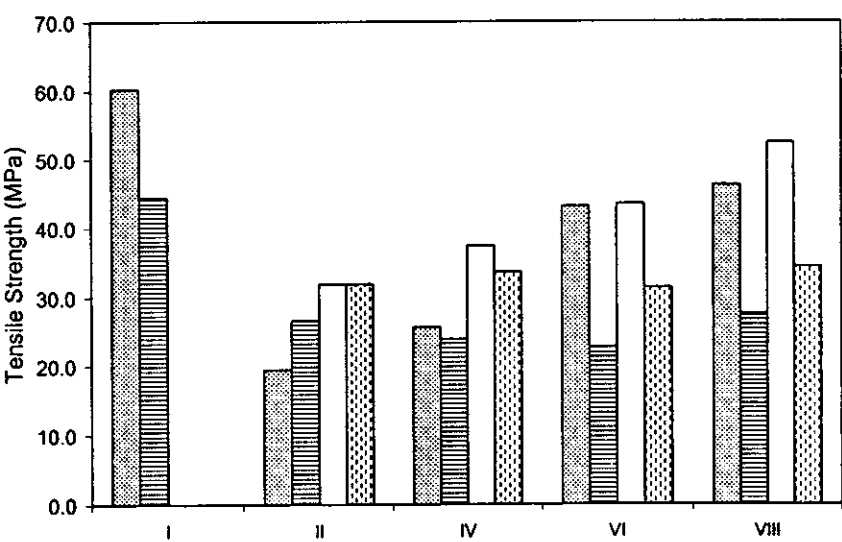
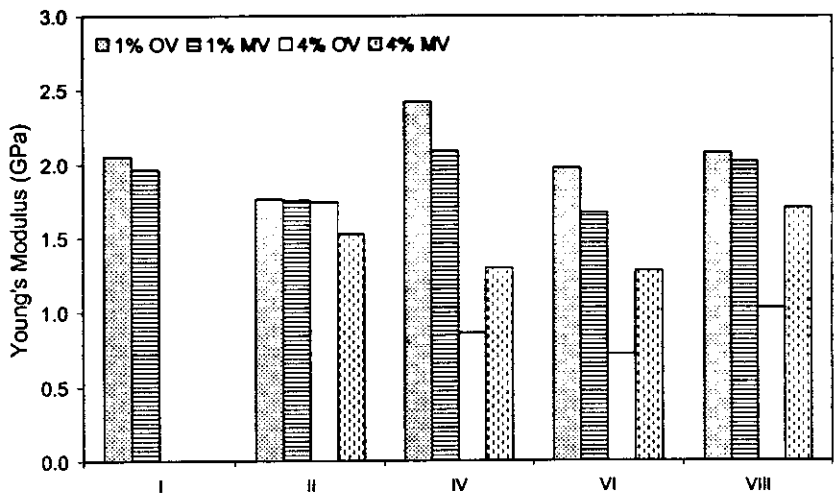
Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	2.05	60.26	4.47	4.14	99.29	3.16	12.62
	±	±	±	±	±	±	±
	0.18	7.56	1.07	0.40	18.82	1.04	1.51
II	1.75	31.93	3.07	3.77	75.08	2.10	21.00
	±	±	±	±	±	±	±
	0.12	4.44	0.76	0.52	8.06	0.15	2.32
IV	0.86	37.41	2.97	3.77	69.86	1.96	17.97
	±	±	±	±	±	±	±
	0.35	7.57	0.62	0.50	6.27	0.16	3.78
VI	0.72	43.46	3.19	4.67	84.06	1.95	14.93
	±	±	±	±	±	±	±
	0.54	5.87	0.71	0.65	9.34	0.31	3.11
VII	1.03	52.49	4.17	4.24	71.18	1.86	20.97
	±	±	±	±	±	±	±
	0.70	6.49	1.13	0.16	7.04	0.14	1.79

ตารางที่ 3.35 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีคอมโพสิต เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ

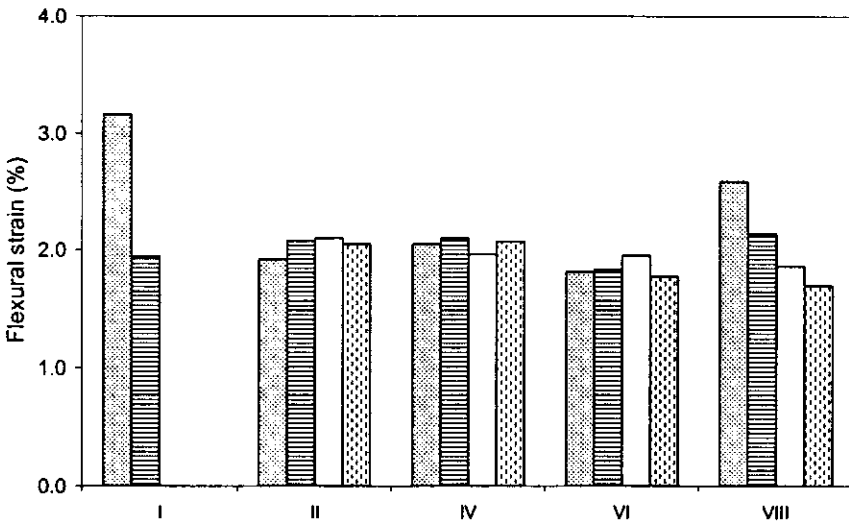
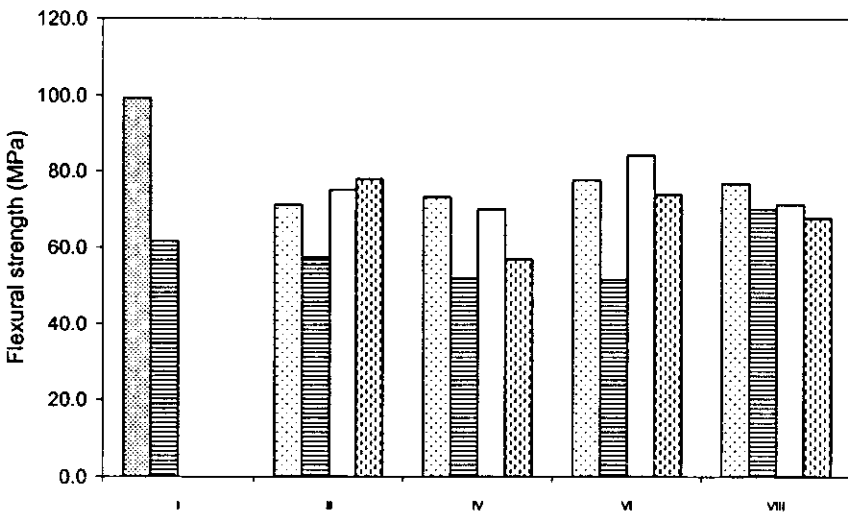
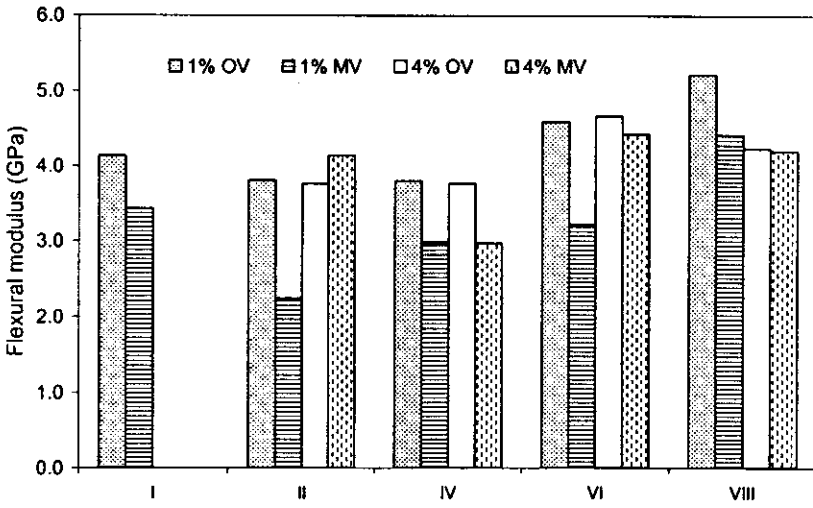
Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	1.96	44.40	3.36	3.43	61.54	1.94	13.76
	±	±	±	±	±	±	±
	0.23	1.17	1.54	1.29	5.12	0.12	1.70
II	1.76	26.58	2.33	2.24	57.33	2.08	9.35
	±	±	±	±	±	±	±
	0.20	3.08	0.54	0.12	7.31	0.22	2.42
IV	2.09	23.89	1.44	2.98	51.66	2.10	13.18
	±	±	±	±	±	±	±
	0.34	4.01	0.21	0.30	9.35	0.29	3.98
VI	1.67	22.73	2.40	3.22	51.36	1.83	5.33
	±	±	±	±	±	±	±
	0.24	6.17	0.87	0.62	4.87	0.36	0.87
VII	2.02	27.58	1.77	4.42	69.89	2.14	6.47
	±	±	±	±	±	±	±
	1.71	8.44	0.53	0.66	5.71	0.22	1.36

ตารางที่ 3.36 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีคอมโพสิต เรซินมีตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ

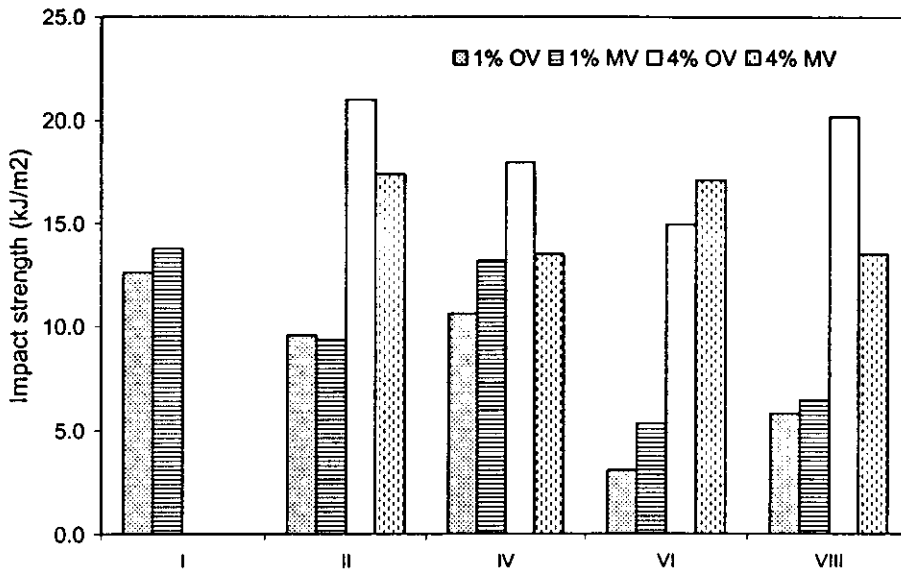
Resin	Tensile properties			Flexural properties			Impact Strength (kJ/m ²)
	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	E (GPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	
I	1.96	44.40	3.36	3.43	61.54	1.94	13.76
	±	±	±	±	±	±	±
	0.23	1.17	1.54	1.29	5.12	0.12	1.70
II	1.53	31.92	2.71	4.14	77.92	2.05	17.41
	±	±	±	±	±	±	±
	0.14	3.62	0.54	0.36	2.55	0.31	3.43
IV	1.3	33.6	5.51	2.97	56.81	2.07	13.49
	±	±	±	±	±	±	±
	0.41	2.96	0.97	0.51	8.75	0.27	0.90
VI	1.28	31.35	6.65	4.43	73.66	1.77	17.11
	±	±	±	±	±	±	±
	0.58	3.9	2.05	0.53	6.99	0.10	2.46
VII	1.71	34.36	7.11	4.21	67.68	1.69	13.49
	±	±	±	±	±	±	±
	0.69	5.26	3.63	0.30	9.78	0.29	3.35



รูปที่ 3.42 Tensile properties ของอีพ็อกซีคอมโพสิตสูตรต่างๆ อบแบบครั้งเดียว มีตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ชั้นทดสอบหนา 3 mm (OV = oven และ MV = microwave)



รูปที่ 3.43 Flexural properties ของอีพ็อกซีคอมโพสิทส์สูตรต่างๆ แบบอบครั้งเดียว ชั้นงานหนา 3 mm (OV = oven, MV = microwave, 1% และ 4% คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)



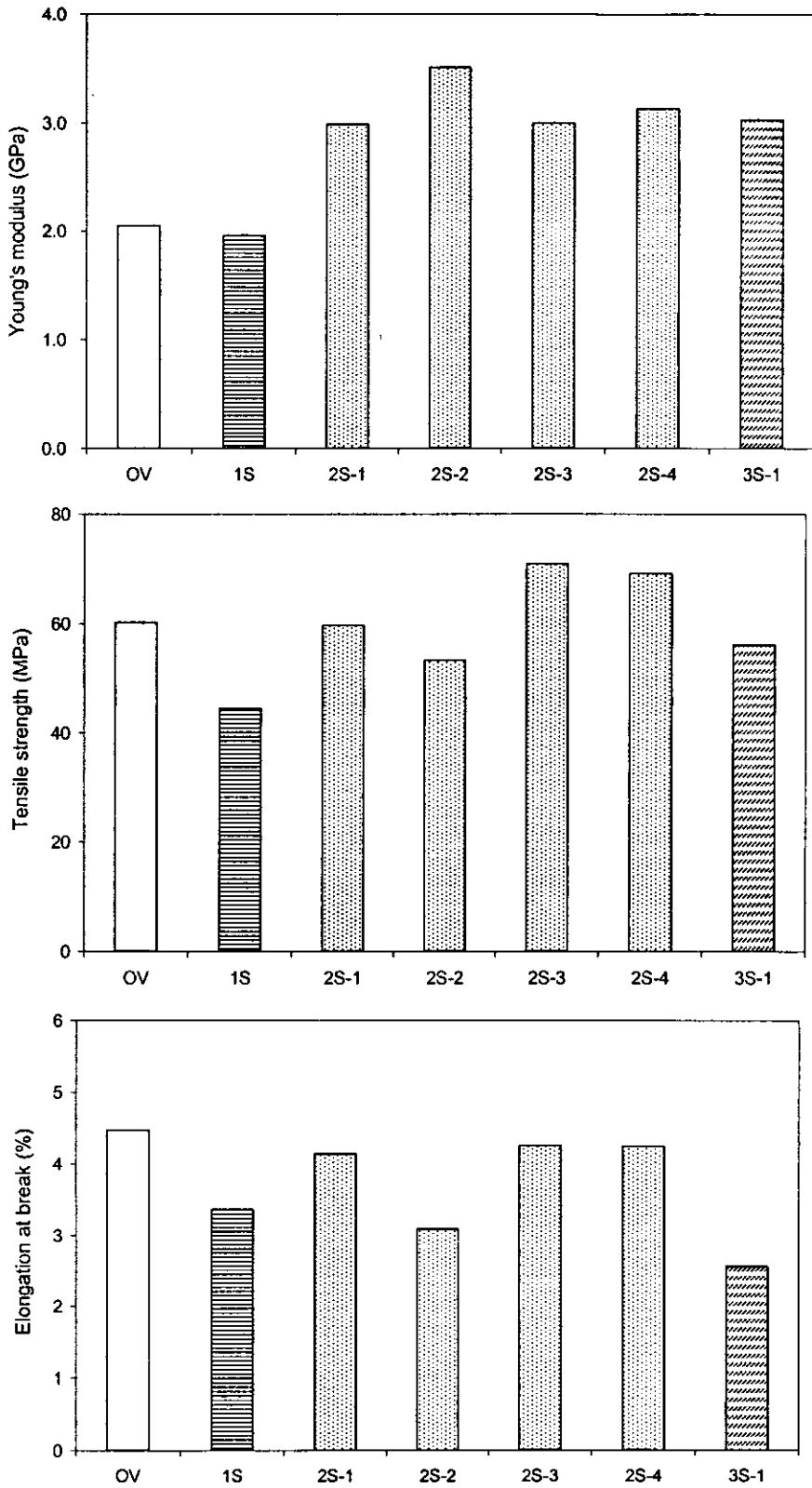
รูปที่ 3.44 Impact strength ของอีพ็อกซีคอมโพสิทส์ต่างๆ ที่อบแบบครั้งเดียว ชั้นงานหนา 3 mm (OV = oven, MV = microwave, 1% และ 4% คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)

3.4.2 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีคอมโพสิทส์ที่อบแบบหลายขั้นตอน

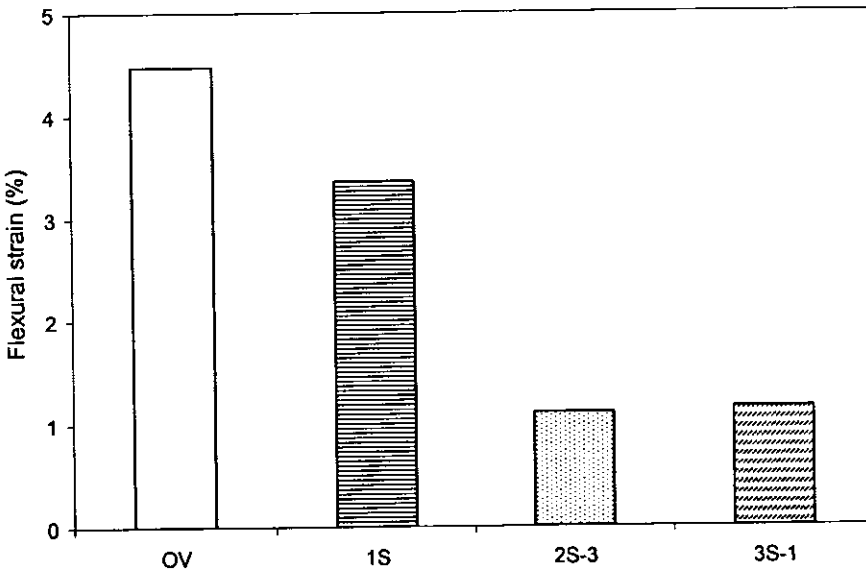
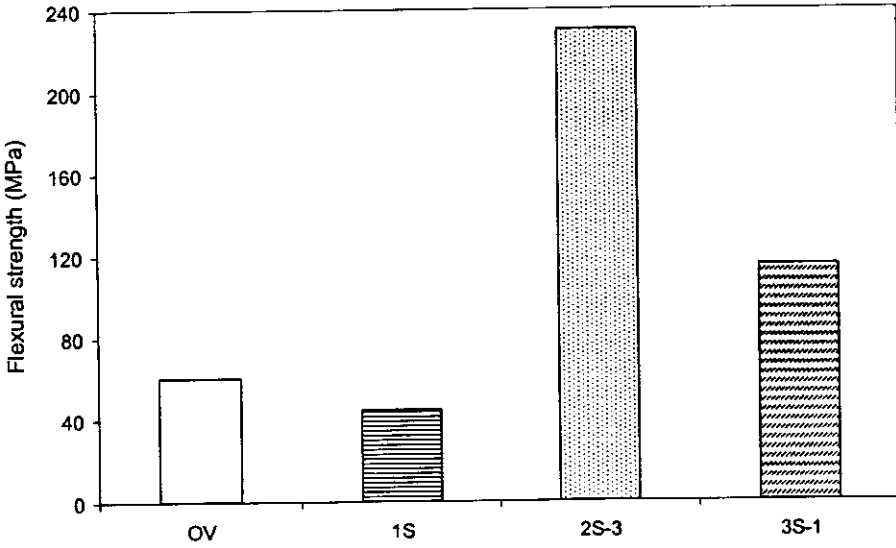
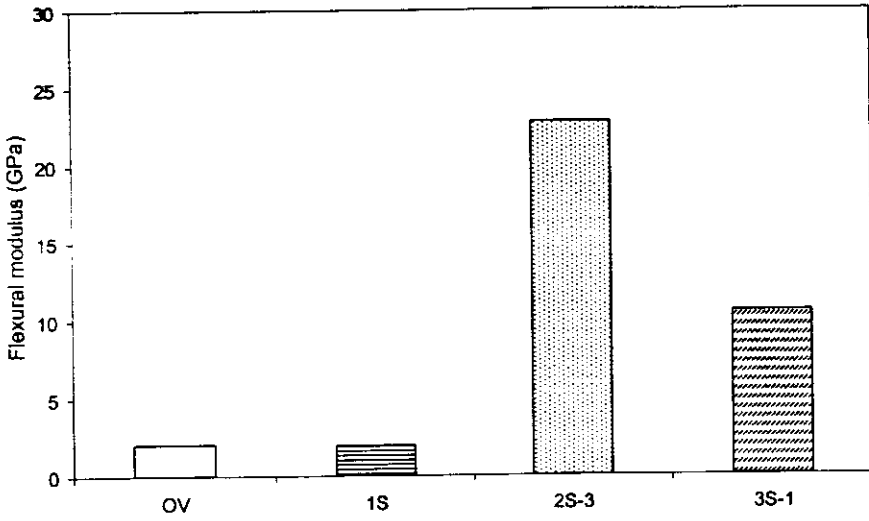
คอมโพสิทส์ I ใช้สภาวะการอบเหมือนกับเรซินสูตร I ส่วนคอมโพสิทส์ II จะมีบางสภาวะที่เหมือนกับที่ใช้ในการทดลองกับเรซิน แต่ข้อมูลส่วนใหญ่จะทดลองกับคอมโพสิทส์มากกว่า สภาวะการอบคอมโพสิทส์แสดงในตารางที่ 3.37 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.45 – 3.50

ตารางที่ 3.37 สภาวะการอบในเตาไมโครเวฟแบบหลายขั้นตอนของคอมโพสิทส์ I และสูตร II

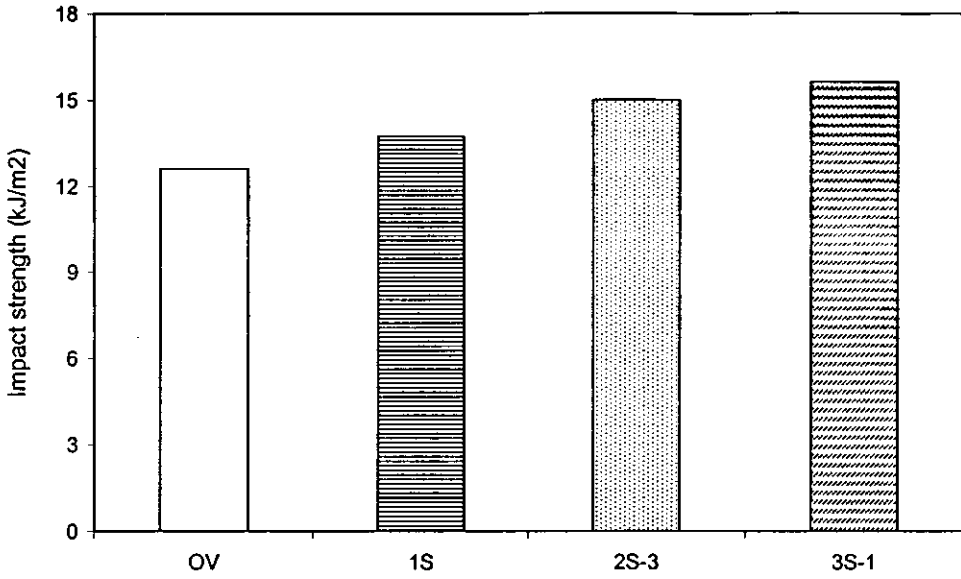
Code	Composites I			Composites II		
	Source of heat	Condition	T* (sec)	Source of heat	Condition	T* (sec)
OV	Thermal oven	150°C, 25 min	1500	Thermal oven	150°C, 15 min	900
1S	Microwave oven	L3/10	180	Microwave oven	L3/7	125
2S-1		L2/20 + L4/5	339		L2/10 + L4/5	234
2S-2		L2/25 + L3/5	357		L3/5 + L4/3	167
2S-3		L2/25 + L6/5	465		L2/15 + L4/5	285
2S-4		L2/20 + L3/10	393		L2/10 + L4/7	285
2S-5		-	-		L3/5 + L4/5	216
3S-1		L2/20+L3/10+L5/5	555		L2/10+L3/5+L4/3	275
3S-2		-	-		L2/10+L3/5+L4/5	324
3S-3		-	-		L2/10+L3/7+L4/3	310
3S-4		-	-		L2/10+L3/3+L4/7	338
3S-5		-	-		L2/15+L3/5+L4/5	375



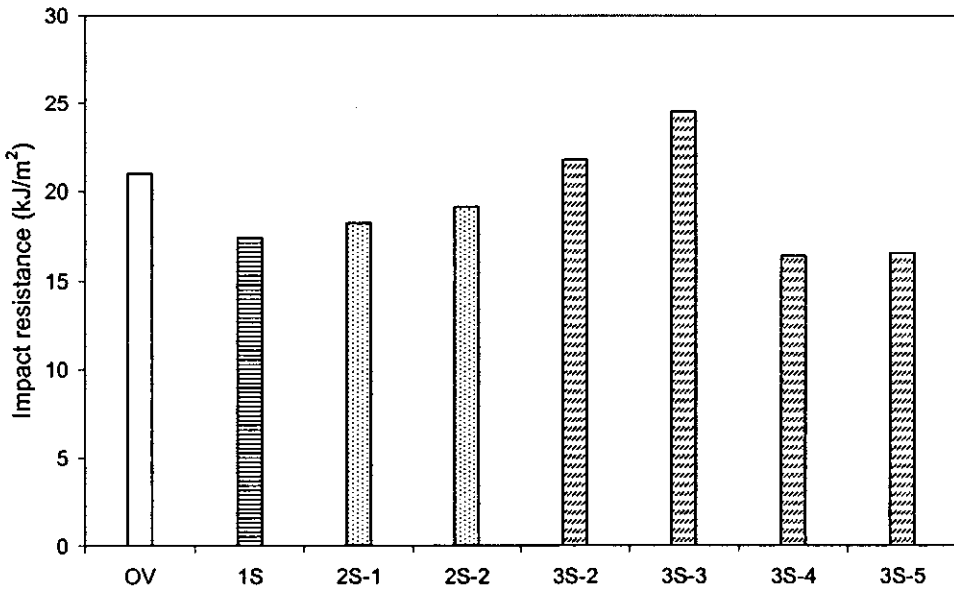
รูปที่ 3.45 Tensile properties ของคอมโพลีเอสเตอร์ I ที่อบด้วยอุณหภูมิความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) สองชั้นตอน (2S-1 – 2S-4) และสามชั้นตอน (3S-1)



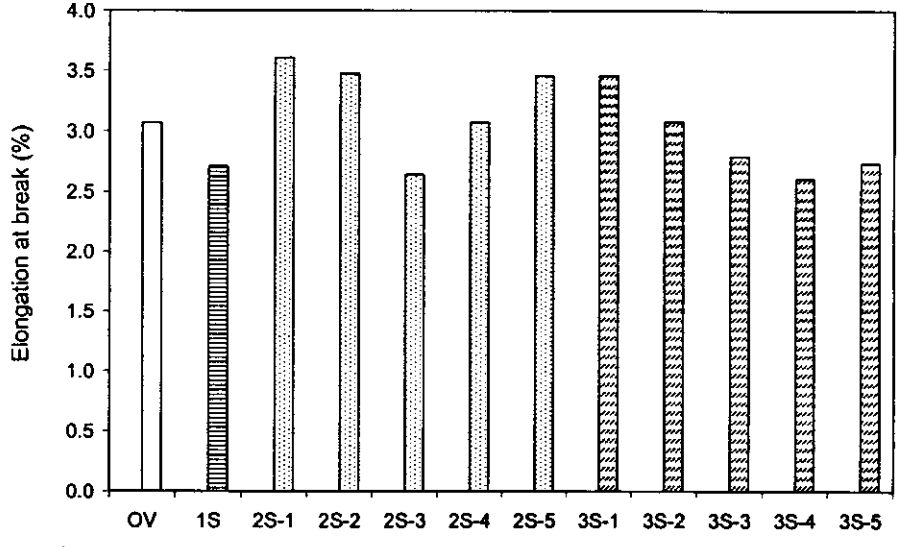
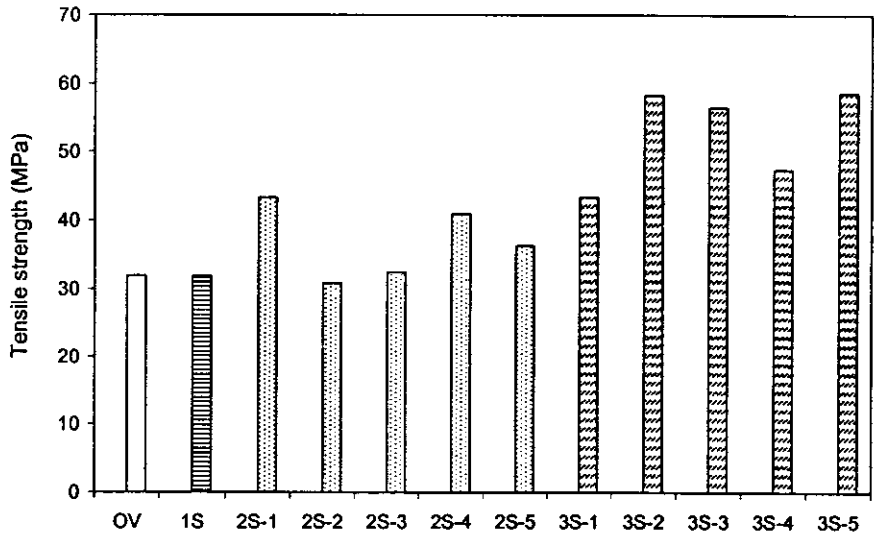
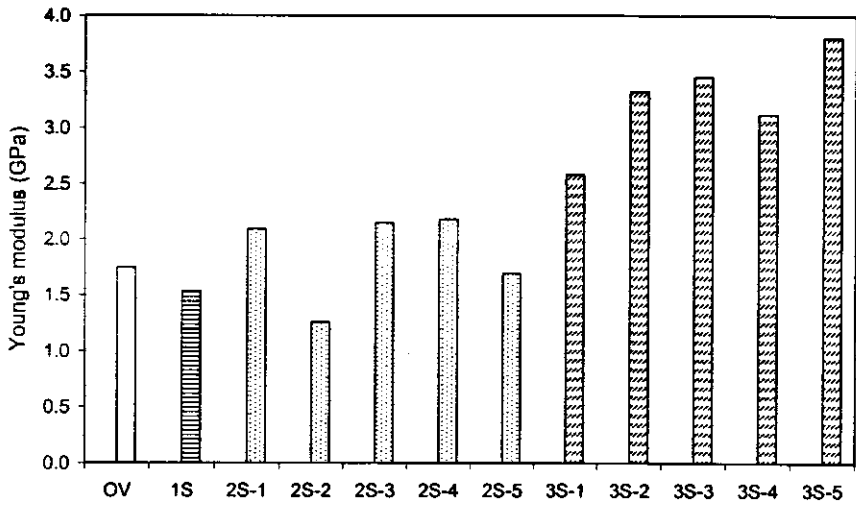
รูปที่ 3.46 Flexural properties ของคอมโพสิทสูท I ที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) สองชั้นตอน (2S-3) และสามชั้นตอน (3S-1)



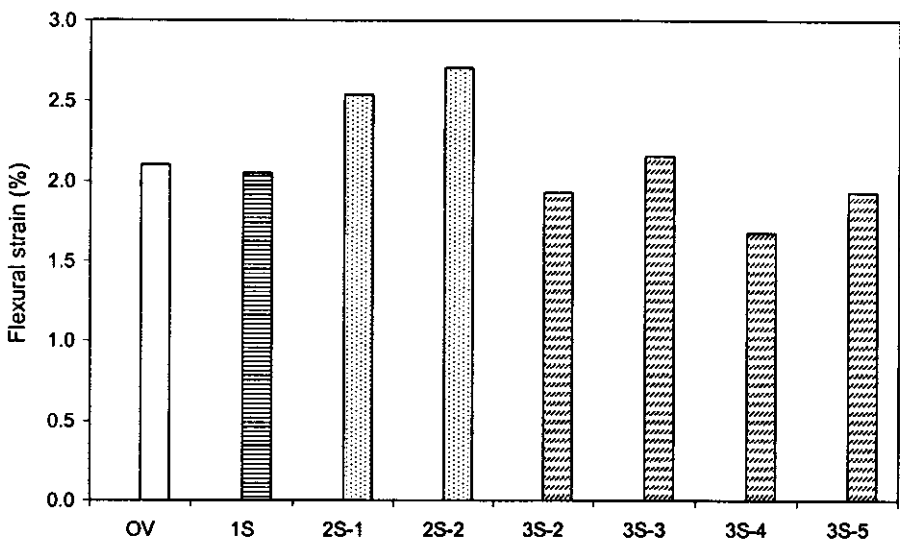
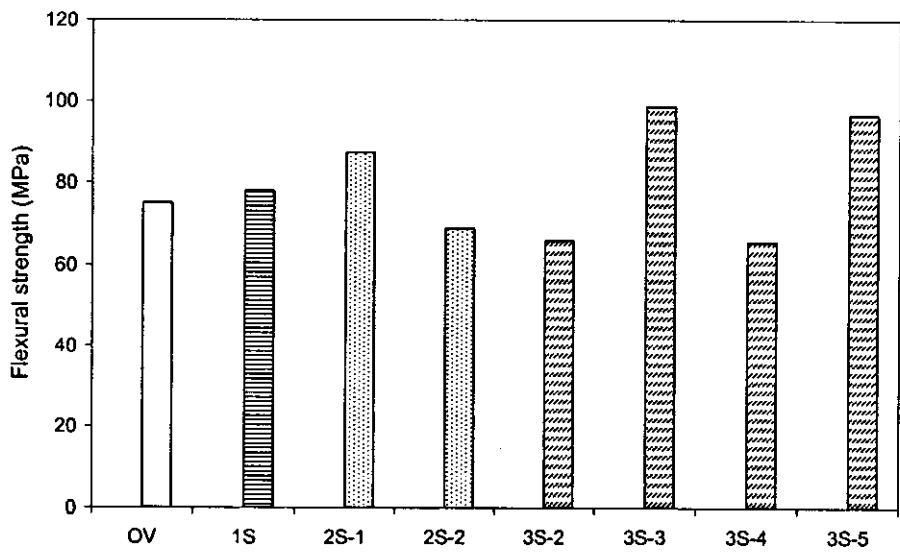
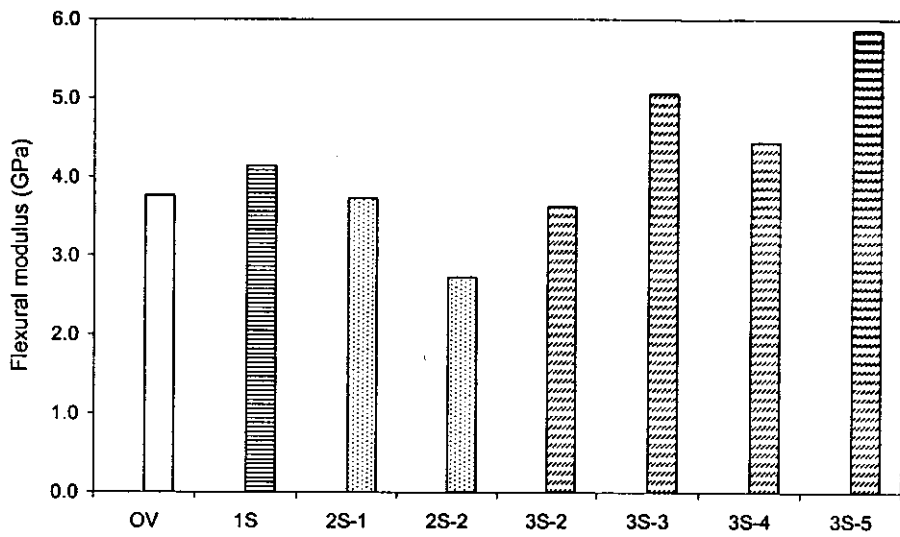
รูปที่ 3.47 Impact strength ของคอมโพสิทสูตร I ที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) สองชั้นตอน (2S-3) และสามชั้นตอน (3S-1)



รูปที่ 3.48 Impact strength ของคอมโพสิทสูตร II ที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) สองชั้นตอน (2S-1 - 2S-2) และสามชั้นตอน (3S-3 - 3S-5)



รูปที่ 3.49 Tensile properties ของคอมโพสิตคาร์บอน II ที่อบด้วยอุณหภูมิความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) สองชั้นตอน (2S-1 - 2S-5) และสามชั้นตอน (3S-1 - 3S-5)



รูปที่ 3.50 Flexural properties ของคอมโพสิทสูท II ที่อบด้วยตู้อบความร้อน (OV) และเตาไมโครเวฟแบบชั้นตอนเดียว (1S) สองชั้นตอน (2S-1 - 2S-2) และสามชั้นตอน (3S-2 - 3S-5)

รูปที่ 3.45 – 3.47 เป็นสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์ I ดูเหมือนว่าในสภาวะการอบที่ใช้อยู่นี้ การอบแบบสองชั้นตอนจะให้สมบัติเชิงกลดีกว่าการอบแบบชั้นตอนเดียวและอบในตู้อบความร้อน ในขณะที่คอมโพลีเมอร์ II จะแสดงสมบัติเชิงกลได้ดีที่สุดเมื่ออบแบบสามชั้นตอน (รูปที่ 3.48 – 3.50) ผลการทดลองตอนนี้แสดงให้เห็นว่าหากใช้สภาวะการอบที่เหมาะสมในเตาไมโครเวฟ สมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์และเรซินจะมีค่าสูงขึ้นมากและมีค่ามากกว่าชั้นทดลองที่ได้จากการอบด้วยตู้อบ การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบ เป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.2 ค่า T^* ในตารางที่ 3.37 คือค่า actual heating time เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว

ถึงแม้ว่าผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบในเตาไมโครเวฟแบบหลายชั้นตอนดีกว่าการอบแบบชั้นตอนเดียว และดีกว่าการอบด้วยตู้อบ แต่ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดว่า คอมโพลีเมอร์ I ต้องอบแบบสองชั้นตอนและคอมโพลีเมอร์ II ต้องอบแบบสามชั้นตอน เพราะการกำหนดสภาวะการอบแบบสามชั้นตอนที่ใช้กับคอมโพลีเมอร์ I อาจไม่เหมาะสมก็ได้ สิ่งที่สามารถสรุปได้คือ การอบแบบหลายชั้นตอนให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากมีเวลาในการอุ่นเรซินให้ค่อยๆร้อน น่าจะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างเรซินและเส้นใยแก้วดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ interfacial adhesion ระหว่างเส้นใยแก้วและเรซิน ด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง SEM และวิเคราะห์ลักษณะอื่นๆ ดังที่จะกล่าวต่อไป

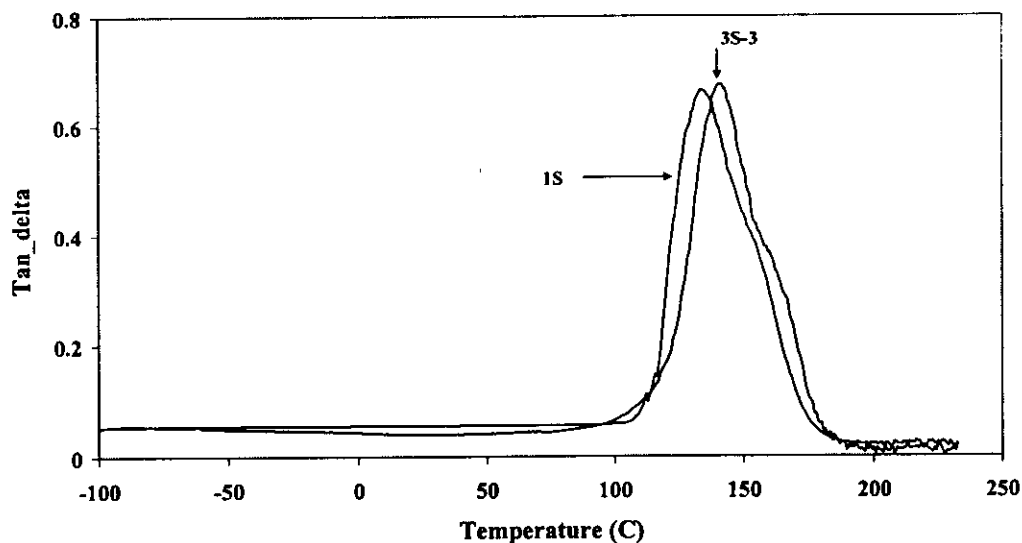
3.5 การวิเคราะห์สาเหตุการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟแบบหลายชั้นตอน

3.5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเคมี

เนื่องจากการอบแบบหลายชั้นตอนแสดงค่ามอดุลัส (modulus) และความแข็งแรง (strength) สูงขึ้นมาก เช่น สภาวะการอบ 2S-3 และ 3S-3 ของคอมโพลีเมอร์ I และ II ตามลำดับ ดังนั้น จึงเป็นที่น่าสนใจว่าเพราะเหตุใดสภาวะการอบทั้งสองนี้ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง เหตุใดการอบแบบสองชั้นตอนดีกว่าการอบแบบสามชั้นตอนในคอมโพลีเมอร์ I และตรงข้ามกับคอมโพลีเมอร์ II ที่สภาวะการอบแบบสามชั้นตอนดีกว่าแบบสองชั้นตอน จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่า ไม่ปรากฏ exothermic peaks ซึ่งบ่งบอกว่าอีพ็อกซีเกิดปฏิกิริยาได้หมด การเกิดปฏิกิริยาที่กล่าวถึงนี้ได้หมายถึงการเชื่อมโยงโมเลกุลเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของอีพ็อกซีด้วย ตามความเป็นจริง การวิเคราะห์ด้วย DSC ไม่สามารถบอกปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลได้ แต่จะบอกว่าเรซินมีการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอีกหรือไม่ระหว่างการให้ความร้อนภายในเครื่อง DSC นั้นๆ

โดยทั่วไป คอมโพลีเมอร์ที่มี T_g สูงขึ้น จะให้ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงสูงขึ้น ได้ทำการเปรียบเทียบค่า α transition temperature ของสภาวะการอบแบบ 1S และ 3S-3 ของคอมโพลีเมอร์ II แสดงในรูปที่ 3.51 โดยที่สภาวะการอบแบบ 1S มีค่า T_g เท่ากับ 138°C และสภาวะการอบแบบ 3S-3 มีค่า T_g เท่ากับ 143°C เป็นที่น่าเสียดายที่ไม่สามารถตรวจพบ β transition temperature จากการวิเคราะห์ค่ามอดุลัสสะสมในช่วง 200°C (ช่วงยืดหยุ่นแบบยาง, rubbery plateau region) ของตัวอย่าง 3S-3 มีค่าสูงกว่าตัวอย่าง 1S แสดงว่าตัวอย่าง 3S-3 มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่าตัวอย่าง 1S ถึงแม้ว่าผลการทดลองจากเทคนิค DMTA ให้ค่า T_g ต่างกันไม่มากนัก แต่ผลการวัด T_g จากเทคนิค DSC ให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ตัวอย่าง 1S, 2S-1 และ 3S-3 ของคอมโพลีเมอร์ II จะมี T_g เรียงตามลำดับดังนี้ 78, 106 และ 115°C ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและโครงร่างโมเลกุล (molecular architecture) หรือสัณฐานวิทยาของคอมโพลีเมอร์ในโครงการวิจัยนี้ สอดคล้องกับสมมติฐานที่กล่าวมา อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ เพราะในบางกรณี T_g ไม่สัมพันธ์กับสมบัติเชิงกล ตัวอย่างเช่น การอบพอลิเอมีด-เส้นใยคาร์บอนคอมโพลีเมอร์ด้วยความร้อน แสดงค่า T_g ต่ำ

กว่าแต่ให้ค่า flexural strength สูงกว่าตัวอย่างที่อบด้วยเตาไมโครเวฟ³ ทั้งนี้เป็นเพราะการยึดเกาะระหว่างเรซินและเส้นใยมีบทบาทที่สำคัญมากในวัสดุคอมโพสิต การพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลจึงไม่สามารถใช้ค่า T_g เพียงปัจจัยเดียวในการพิจารณา

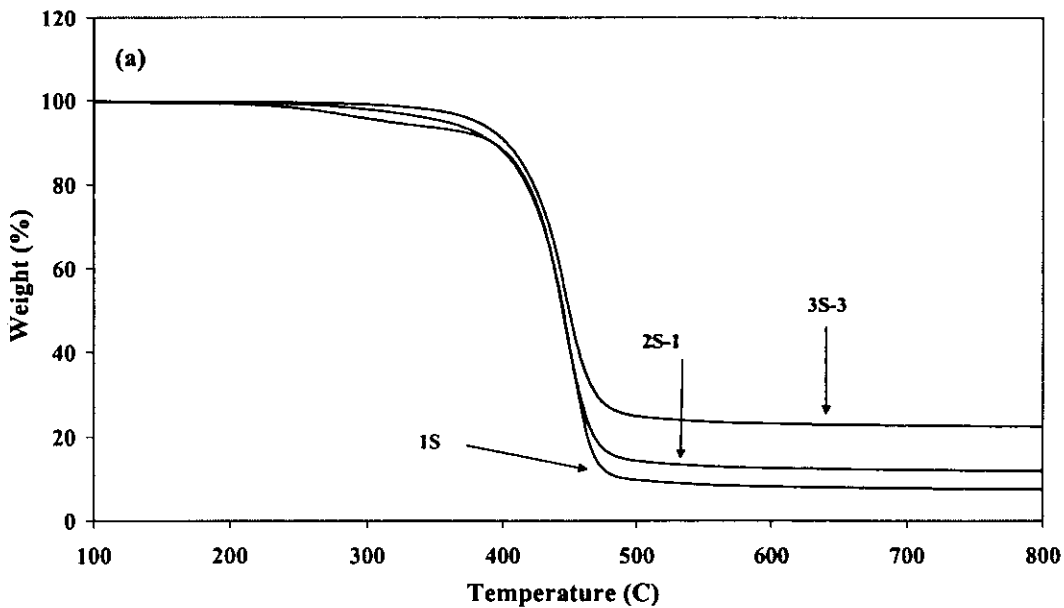


รูปที่ 3.51 α transition temperature ของคอมโพสิต II สภาวะการอบแบบขั้นตอนเดียว (1S) แสดงค่าต่ำกว่าสภาวะการอบแบบสามขั้นตอน (3S-3)

เทคนิค TGA เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เทคนิคหนึ่งที่มีประโยชน์มาก เทอร์โมแกรมของตัวอย่าง 1S, 2S-1 และ 3S-3 ของคอมโพสิต II แสดงในรูปที่ 3.52a-b ตัวอย่าง 1S และ 2S-1 แสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอน (two step degradation) และเริ่มสลายตัวที่ 200°C ในขณะที่ตัวอย่าง 3S-3 มีการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียว (one step degradation) และเริ่มสลายตัวที่ 240°C ปริมาณการสลายตัวขั้นตอนแรกของตัวอย่าง 1S (6.6%) สูงกว่าตัวอย่าง 2S-1 เล็กน้อย (4.2%) อาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslink density) ของคอมโพสิตเหล่านี้ สามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้ $3S-3 > 2S-1 > 1S$ ได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลสรุปนี้ ด้วยการนำเรซินสูตร II ที่อบแบบขั้นตอนเดียว (1S) และสามขั้นตอน (3S-3) วิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าให้ผลการทดลองแบบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.53a-b คือตัวอย่าง 1S ยังคงแสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอน และตัวอย่าง 3S-3 สลายตัวแบบขั้นตอนเดียว การสลายตัวแบบสองขั้นตอนและขั้นตอนเดียวนี้อาจมีสาเหตุมาจากการมีโครงร่างโมเลกุลต่างกัน โดยทั่วไป โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า จะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าพวกที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และที่แข็งแรงกว่า โมเลกุลแบบเส้นตรง (linear polymers) จะสลายตัวก่อนโมเลกุลร่างแห (polymer network) ปริมาณการเชื่อมโยงมากขึ้นจะทำให้สลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การอบแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนในคอมโพสิตสูตร II ยังไม่สมบูรณ์ อาจมีตำแหน่งในโครงร่างโมเลกุล อาจมีอีพอกซีโมเลกุลที่ไม่เกิดเป็นร่างแหและถูกกักขังไว้ในร่างแห หรือมีความไม่สม่ำเสมอในโครงร่าง สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดการสลายตัวก่อนกำหนด สาเหตุนี้สามารถนำมาอธิบายการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลในคอมโพสิตสูตร II การอบแบบสามขั้นตอนทำให้ไม่มีการกักขังโมเลกุลดังกล่าว ทำให้เกิดร่างแหที่สมบูรณ์กว่าการอบแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน

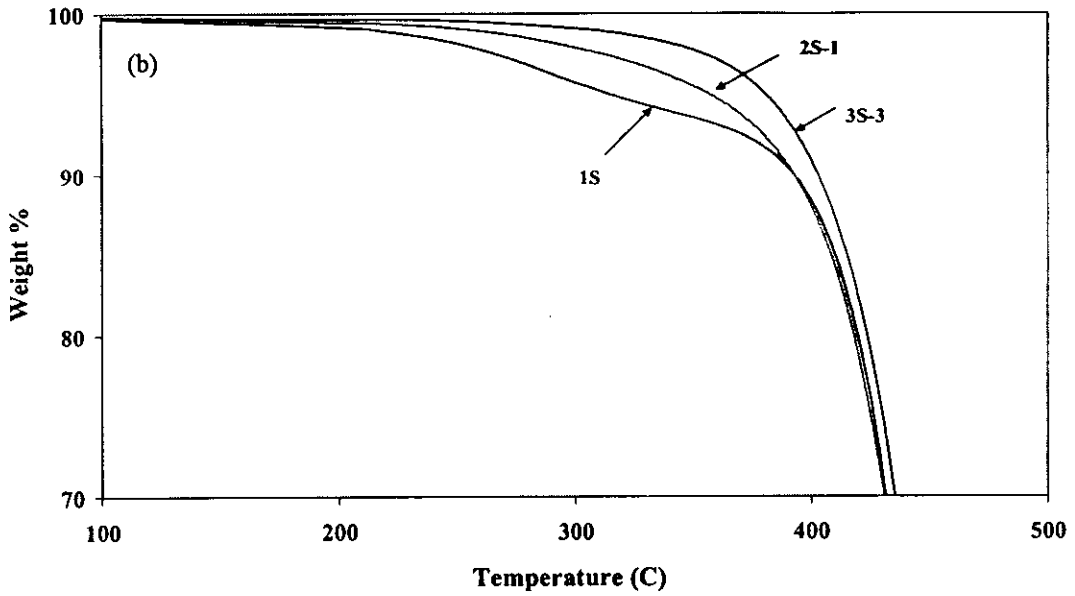
³ X. Fang and D.A. Scola, J. Polym. Sci. Polym. Chem., 37, 4616 (1999).

แนวความคิดเรื่องความสมบูรณ์ของโครงร่างแหหรือความสม่ำเสมอทางโครงสร้างนี้ ได้รับการสนับสนุนอีกครั้งจากผลการทดลองที่วิเคราะห์ด้วยคอมโพสิทิสูตร I ดังแสดงในรูปที่ 3.54a-b ตัวอย่าง 3S-1 ที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าตัวอย่าง 2S-3 นั้น แสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอน โดยเริ่มสลายตัวที่ 200°C ในขณะที่ตัวอย่าง 2S-3 มีการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียว แสดงว่าสภาวะการอบแบบสามขั้นตอนที่ใช้ในคอมโพสิทิสูตร I นี้ เป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสม ทำให้ได้โครงร่างแหที่มีค้ำหนั มีการกักขังโมเลกุลในร่างแหเช่นกัน ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค TGA สอดคล้องกับสมบัติเชิงกล คอมโพสิทิสูตรที่มีการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียวและสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่า ได้มีรายงานว่าการอบเรซินด้วยไมโครเวฟ อาจทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าการอบด้วยความร้อน⁴ ทั้งนี้เป็นเพราะมีการกักขังโมเลกุลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (functional molecules) ไว้ภายในโครงร่างแห ทำให้ชั้นงานเกิดปฏิกิริยาได้อีกเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย DSC แต่เหตุผลดังกล่าวนี้ไม่สามารถอธิบายคอมโพสิทิสูตรในโครงการวิจัยนี้ได้ เพราะผลการวิเคราะห์ด้วย DSC ของคอมโพสิทิสูตรทั้งสองสูตร พบว่าไม่มีการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมภายใต้การให้ความร้อนด้วยเครื่อง DSC แสดงว่าการอบด้วยเตาไมโครเวฟทำให้อีพ็อกซีเรซินเกิดปฏิกิริยาได้หมด แต่การเกิดปฏิกิริยานี้ไม่ได้หมายถึงการเกิดโครงร่างแหเท่านั้น การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันจัดว่าเป็นปฏิกิริยาเคมีที่จะต้องเกิดขึ้นด้วย แต่ความสามารถในการเชื่อมโยงโมเลกุลเพื่อให้เกิดเป็นร่างแหนั้น มีปัจจัยหลายอย่างมาควบคุม นักวิจัยเชื่อว่าโมเลกุลของอีพ็อกซีที่ไม่ได้เกิดเป็นร่างแห ถูกกักขังไว้ในโครงร่างแห ส่งผลให้เกิดการสลายตัวก่อนกลุ่มโมเลกุลที่เป็นร่างแห กล่าวอีกนัยหนึ่งชั้นงานที่มีโมเลกุลถูกกักขังไว้ในร่างแหนี้ มีความสม่ำเสมอทางโครงสร้าง (structural homogeneity) ลดน้อยลง และน่าจะมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงโมเลกุลลดน้อยลงเช่นกัน สาเหตุหลักของความแตกต่างทางโครงสร้างนี้ เกิดจากการอบที่แตกต่างกัน

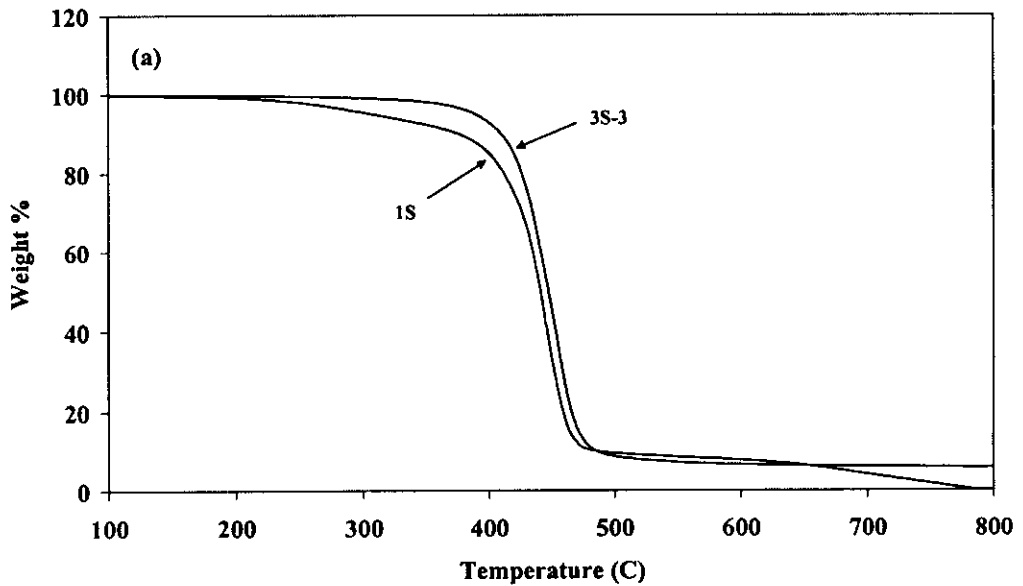


รูปที่ 3.52a TGA thermograms ของคอมโพสิทิสูตร II ตัวอย่าง 1S และ 2S-1 แสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอนตัวอย่าง 3S-3 แสดงการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียว

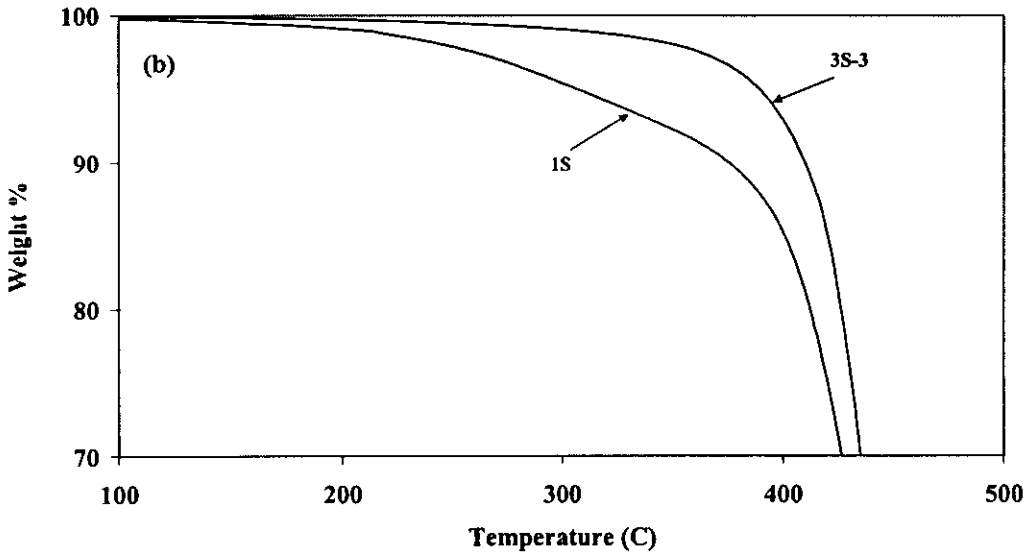
⁴ C. Jordan, J. Galy, J.P. Pascault, C. More, M. Delmotte and H. Jullien, Polym. Eng. Sci. 35, 233 (1995).



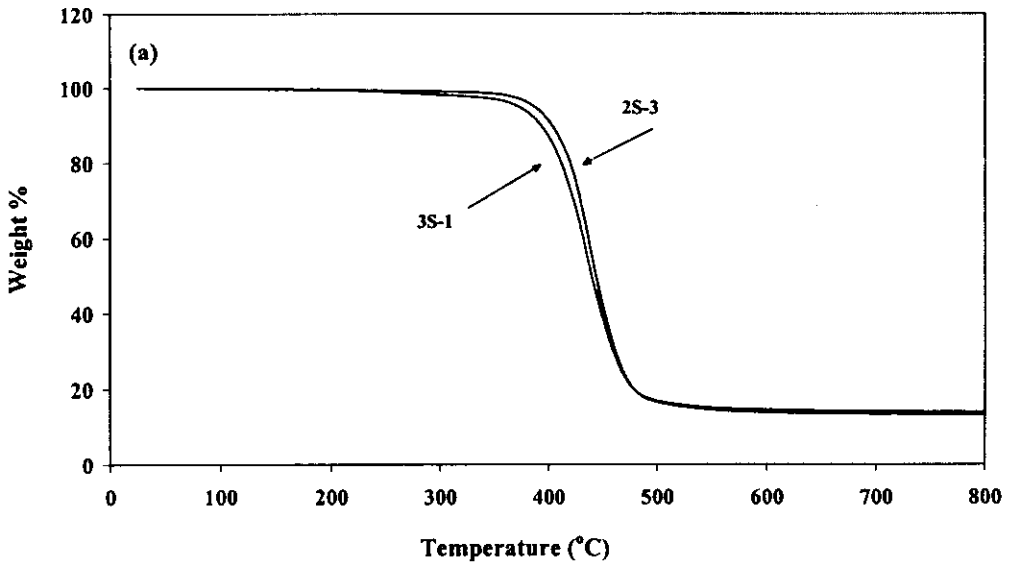
รูปที่ 3.52b TGA thermograms ของคอมโพลีเมอร์ II ตัวอย่าง 1S และ 2S-1 แสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอนตัวอย่าง 3S-3 แสดงการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียว รูป b เป็นภาพขยายของรูป a



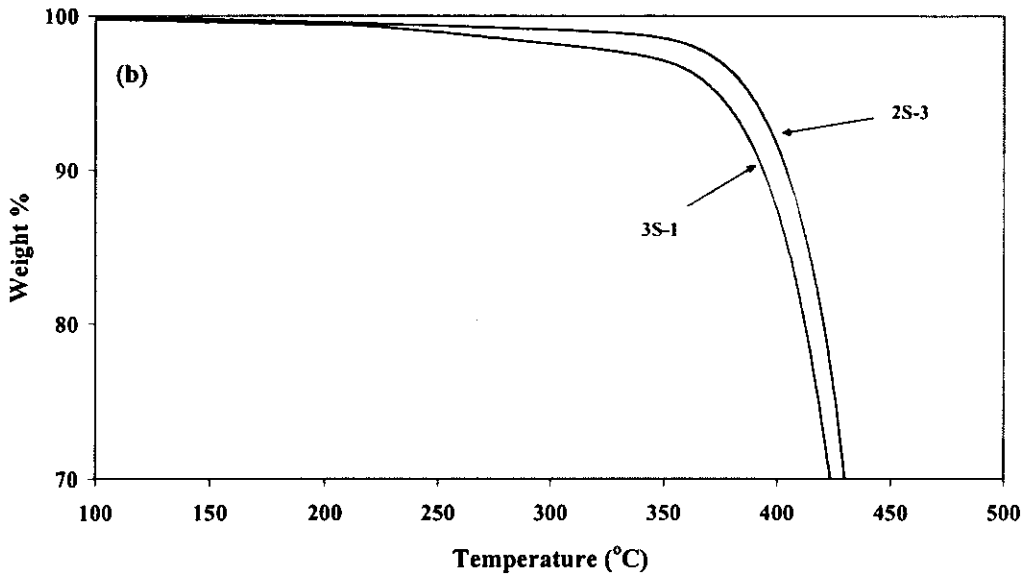
รูปที่ 3.53a TGA thermograms ของเรซินสูตร II ตัวอย่าง 1S แสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอน ตัวอย่าง 3S-3 แสดงการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียว



รูปที่ 3.53b TGA thermograms ของเรซินสูตร II ตัวอย่าง 1S แสดงการสลายตัวแบบสองขั้นตอน ตัวอย่าง 3S-3 แสดงการสลายตัวแบบขั้นตอนเดียว รูป b เป็นภาพขยายของรูป a



รูปที่ 3.54a TGA thermograms ของคอมโพสิทสูตร I ตัวอย่าง 3S-1 แสดงการสลายตัวก่อนตัวอย่าง 3S-1



รูปที่ 3.54b TGA thermograms ของคอมโพลีเมอร์ I ตัวอย่าง 3S-1 แสดงการสลายตัวก่อน ตัวอย่าง 3S-1 รูป b เป็นภาพขยายของรูป a

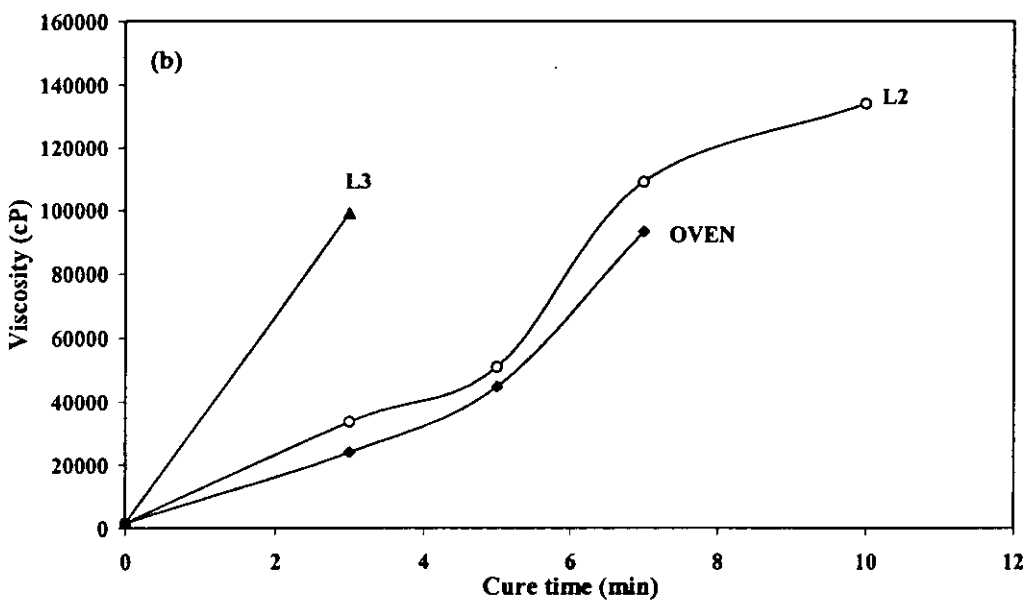
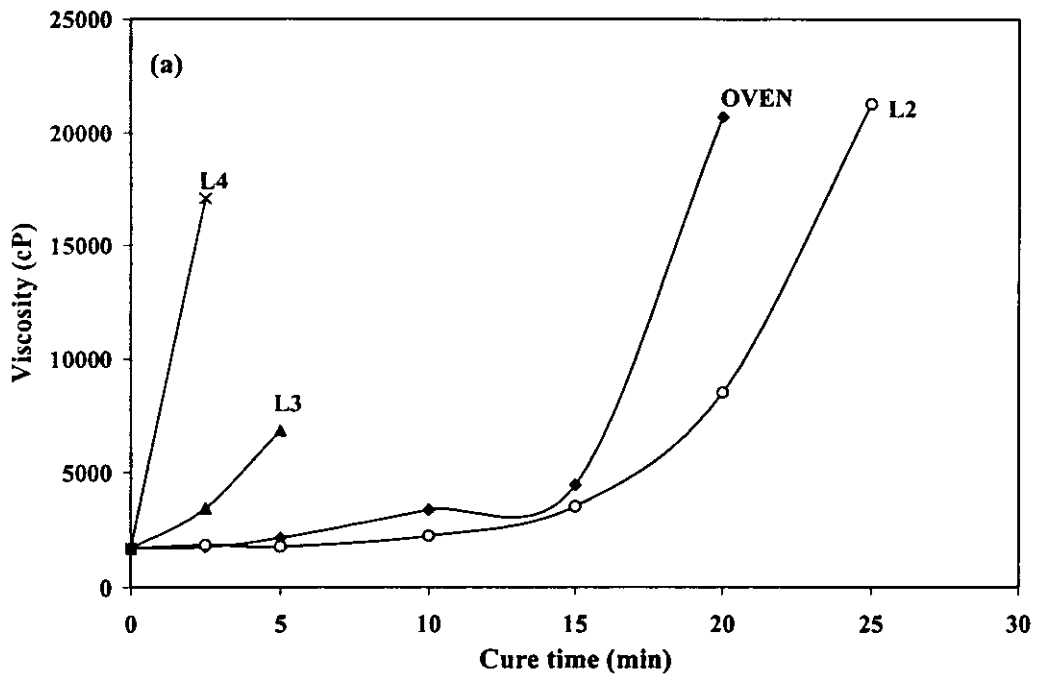
3.5.2 การตรวจสอบความหนืดและอุณหภูมิของเรซินระหว่างการอบ

จากการวิเคราะห์ด้วย TGA ทำให้เชื่อว่าการอบที่ต่างกัน (แบบขั้นตอนเดียว-สองขั้นตอน-สามขั้นตอน) ทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างต่างกัน คาดว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสม่ำเสมอทางโครงสร้างคือความหนืดของเรซินและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเรซินระหว่างการอบ ถ้าเรซินมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดตำหนิในโครงสร้างแห้วได้ เช่น มีการกักขังเรซินที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล⁵ ในระยะเริ่มต้นของการเกิดร่างแห ถ้าหากเรซินมีความหนืดสูงเกินไป จะทำให้การไหลหรือการแพร่กระจายของอีพ็อกซีและสารทำให้แข็งมีค่าต่ำลง เมื่อปฏิกิริยาเกิดไปอย่างต่อเนื่อง เรซินจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น การเคลื่อนไหวแบบบราวเนียนก็จะถูกจำกัดลงไปเรื่อยๆ และทำให้จลนพลศาสตร์ของการเกิดร่างแหลดลง⁶ สิ่งเหล่านี้อาจก่อให้เกิดความแตกต่างในบางพื้นที่ หรือทำให้มีความไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ

ได้ทำการทดลองอบคอมโพลีเมอร์ในระยะเวลาต่างๆเพื่อนำไปวัดความหนืด และวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเรซิน โดยทำการวัดทันทีที่อบเสร็จ ใช้เวลาในการวัดไม่เกิน 5 วินาที ตัวอย่างชุดนี้เป็นชุดเดียวกันกับที่ทำการวัดความหนืด รูปที่ 3.55 แสดงผลการวัดความหนืดของคอมโพลีเมอร์ I และ II การอบด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลัง 2 จะให้ความหนืดใกล้เคียงกับการอบด้วยตู้อบความร้อน และอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดก็ใกล้เคียงกัน ตรงข้ามกับการอบที่ระดับกำลัง 3 และ 4 เรซินจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว คอมโพลีเมอร์ I จะเริ่มมีลักษณะคล้ายเยลลี่หรือเกิดเป็นเจล (gel) ที่สภาวะ L3 – 7 min และ L5 – 2.5 min ในขณะที่สภาวะ L4 – L6 เป็นเวลา 5 นาที จะมีเรซินบางส่วนแข็งตัว ตัวอย่างเหล่านี้จะไม่นำมาวิเคราะห์หาความหนืด เนื่องจากการวัดความหนืดจะไม่ใช้ตัวทำละลาย เพราะต้องการวิเคราะห์ความหนืดที่แท้จริงของเรซินในคอมโพลีเมอร์นี้

⁵ J.J. Aktonis and W.J. MacKnight, Introduction to Polymer Viscoelasticity, 2nd edn., John Wiley & Sons, new York, 1983.

⁶ P. Alazardm, M. Palumbo and A. Gourdenne, Macromol. Symp. 199, 59 (2003).



รูปที่ 3.55 ความหนืดของเรซินระหว่างการอบด้วยคู่อบความร้อน (OV) ที่ 150°C และอบด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลังต่างๆ (L2 - L4) : (a) คอมโพสิต I; (b) คอมโพสิต II

คอมโพสิตสูตร II จะเกิดเป็นเจลที่สภาวะ L2 - 15 min, L3 - 5 min และ L4 - 3 min ความหนืดที่ L2 - 25 min ของสูตร I และที่ L2 - 10 min ของสูตร II มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความหนืดที่ L3 - 5 min ของสูตร I และที่ L3 - 3 min ของสูตร II เมื่อพิจารณาสภาวะการอบคอมโพสิตสูตร I ตัวอย่าง 1S จะเริ่มเกิดเป็นของแข็งเมื่อใช้ระดับกำลัง 3 ในเวลา 7.5 นาที และเป็นของแข็งในเวลา 10 นาที ถึงแม้ว่าตัวอย่าง 1S จะเป็นของแข็งก่อนตัวอย่าง 2S-3 แต่ความหนืดของตัวอย่าง 1S ในช่วงก่อนเป็นเจลซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,420 cP (ที่ L3 - 5 min) มีค่าต่ำกว่าความหนืดของเรซินที่อบที่ L2 - 25 min (21,300 cP) อัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของหนืดก่อนเกิดเป็นเจลน่าจะเป็นความสำคัญมากกว่าค่าความหนืด และอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆของความหนืดน่าจะเป็นลักษณะที่พึงประสงค์

ได้ทำการตรวจวัดความหนืดของตัวอย่าง 2S-1 และ 3S-3 ของคอมโพสิทสูตร II ทั้งสองตัวอย่างเริ่มแข็งตัวเมื่ออยู่ในการอบขึ้นตอนที่สอง คือ L4 - 3 min (ตัวอย่าง 2S-1) และ L3 - 5 min (ตัวอย่าง 3S-3) โดยที่สภาวะการอบของตัวอย่าง 2S-1 คือ L2 - 10 min + L4 - 5 min และสภาวะการอบของตัวอย่าง 3S-3 คือ L2 - 10 min + L3 - 5 min + L4 - 3 min ความหนืดก่อนเกิดเป็นเจลของตัวอย่าง 1S เท่ากับ 98,900 cP (L3 - 3 min) และมีค่าต่ำกว่าความหนืดก่อนเกิดเป็นเจลของตัวอย่าง 2S-1 และ 3S-3 ที่มีค่าเท่ากับ 134,000 cP (L2 - 10 min) ในทำนองเดียวกันกับที่กล่าวไว้ในคอมโพสิทสูตร I อัตราเร็วในการเพิ่มความหนืดมีบทบาทสำคัญ และการอบที่ดีควรมีอัตราการเพิ่มความหนืดแบบช้าๆ

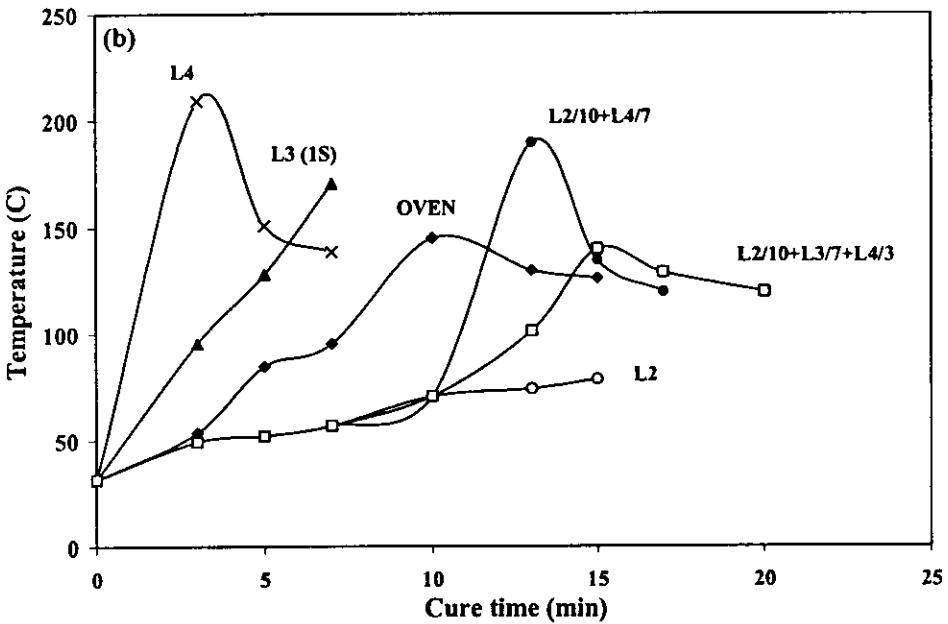
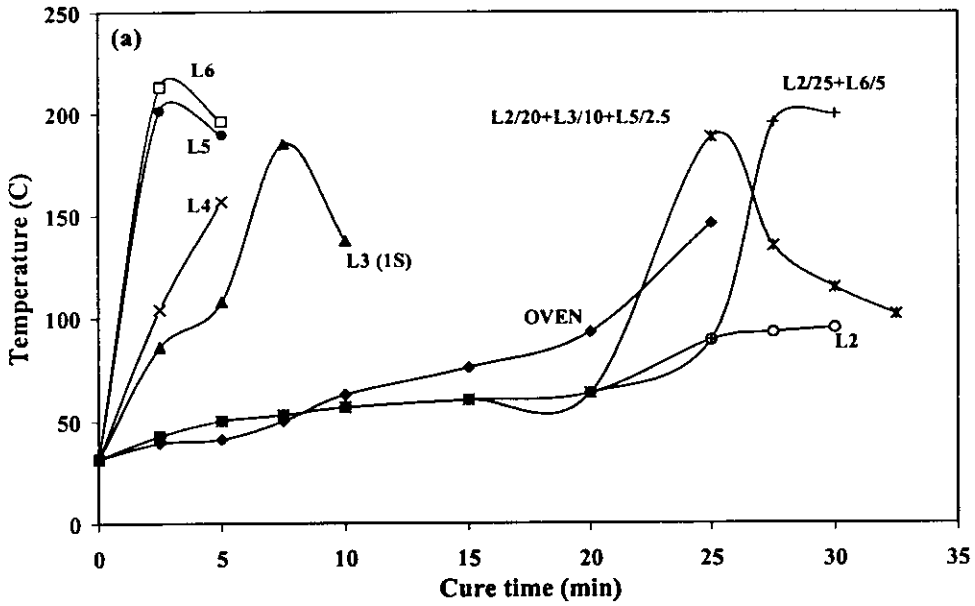
ผลของการวัดอุณหภูมิที่ได้จากการอบในระยะเวลาต่างๆนั้นแสดงในรูปที่ 3.56 อุณหภูมิที่วัดได้นี้เป็นอุณหภูมิจริงของเรซิน เนื่องจากการวัดทันทีที่อบเสร็จ ใช้เวลาในการวัดไม่เกิน 5 วินาที มีการใช้เรซิน 1 ครั้งต่อ 1 การทดลอง ใช้เข้าเทพลอนขนาดเดียวกันกับที่ใช้เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล ดังนั้น ผลการวัดจึงมีความน่าเชื่อถือ และใช้เป็นตัวแทนชิ้นงานของแต่ละสภาวะการอบได้ อุณหภูมิของคอมโพสิทเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการอบ และบางสภาวะมีอุณหภูมิลดลง ตำแหน่งที่เป็นพีคนี้เป็นอุณหภูมิที่เรซินกลายเป็นของแข็ง สำหรับการอบแบบขั้นตอนเดียวนั้น การใช้ระดับกำลังสูงขึ้นจะทำให้อัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของความหนืด ที่ระดับกำลัง 2 จะมีอัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิช้าที่สุด และอุณหภูมิสูงสุดมีค่าไม่เกิน 100°C ดังนั้น จึงไม่เป็นที่สงสัยว่า ที่ L2 นี้เรซินไม่แข็งตัว การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆที่ L2 นี้ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนืดช้าตามไปด้วย เมื่อเทียบกับระดับกำลังอื่นๆ ระดับกำลัง 3 - 6 จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามลำดับ ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกักขังโมเลกุล ทำให้ไม่สามารถเกิดเป็นร่างแหได้ จากที่ได้กล่าวเบื้องต้นว่าสภาวะการอบแบบสามขั้นตอนในคอมโพสิทสูตร I นั้นเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสม พิสูจน์ได้จากการที่เรซินแข็งตัวเร็วกว่าการอบแบบสองขั้นตอน ซึ่งสังเกตได้จากกราฟในรูป 3.56a ในทำนองเดียวกันการอบแบบสามขั้นตอนในคอมโพสิทสูตร II จะแข็งตัวช้ากว่าการอบแบบสองขั้นตอน แสดงว่าการแข็งตัวที่ช้ากว่าจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า นั่นคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความหนืดควรมีอัตราเร็วที่เหมาะสม และน่าจะเป็นอัตราที่ค่อนข้างช้า

3.5.3 การวิเคราะห์การยึดเกาะของเรซินบนเส้นใยแก้วด้วยภาพ SEM

การอบคอมโพสิทในเตาไมโครเวฟด้วยระดับกำลังสูงขึ้น จะทำให้เรซินมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากที่ระดับกำลังสูงจะมีระยะเวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟนานขึ้น ดังนั้นจะมีความร้อนภายในเรซินมากขึ้น เรซินเกิดปฏิกิริยามากขึ้น นี่เป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของความหนืดของเรซิน การใช้ระดับกำลังต่างๆ เช่น L2 เพื่อใช้ในการอุ่นเรซินทำให้เรซินค่อยๆร้อนขึ้น มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลให้เรซินเกาะติดเส้นใยแก้วได้มากขึ้น หรือทำให้เส้นใยแก้วเปียกมากขึ้น ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการอุ่นเรซินด้วยเตาไมโครเวฟในผลิตภัณฑ์ RTM laminates⁷ พบว่าเส้นใยแก้วมีลักษณะเปียกมากขึ้นและทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของผิวหน้าชิ้นตัวอย่างที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงในรูปที่ 3.57 และ 3.58 สำหรับคอมโพสิทสูตร I และ II ตามลำดับ บริเวณที่เป็นอีพ็อกซีเรซินจะไม่มีฟองอากาศหรือช่องว่าง (voids) ใดๆเลย สังเกตปริมาณการเกาะติดของอีพ็อกซีเรซินบนเส้นใยแก้ว เส้นใยแก้วที่มีผิวเรียบ ไม่มีเรซินเกาะติด แสดงว่า interfacial adhesion ระหว่างเรซินและเส้นใยแก้วต่ำมากเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์คอมโพสิท เพราะจะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิทต่ำลง ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีเรซินเกาะติดที่เส้นใยแก้วมาก แสดงว่ามี interfacial adhesion สูงมาก ในการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM นี้ ได้ทำการส่องถ่ายภาพชิ้นงานแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่า ตัวอย่างที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดจะมีเรซินเกาะติดที่เส้นใยแก้วมากที่สุด จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM สามารถเรียงลำดับลักษณะการเกาะติดของเรซินบน

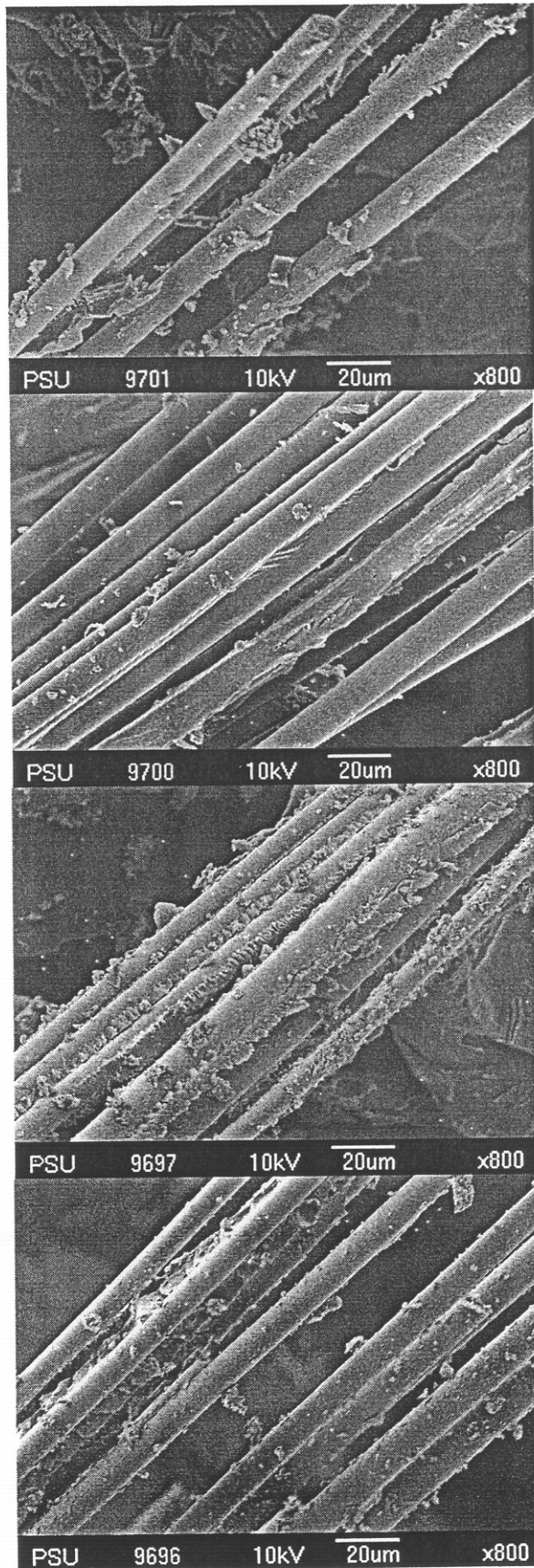
⁷ M.S. Johnson, D.D. Rudd and D.J. Hill, Polym. Compo. 18, 185 (1997).

เส้นใยแก้วได้ดังนี้ 2S-3 > 3S-1 > OV, 1S (สำหรับคอมโพสิทสูตร I) และ 3S-3 > 2S-1, 1S, OV (สำหรับคอมโพสิทสูตร II) การอบด้วยเตาไมโครเวฟในสภาวะที่เหมาะสมจะทำให้ interfacial adhesion ระหว่างเรซินและเส้นใยแก้วสูงกว่าการอบด้วยความร้อน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานมาก่อนหน้านี้⁸

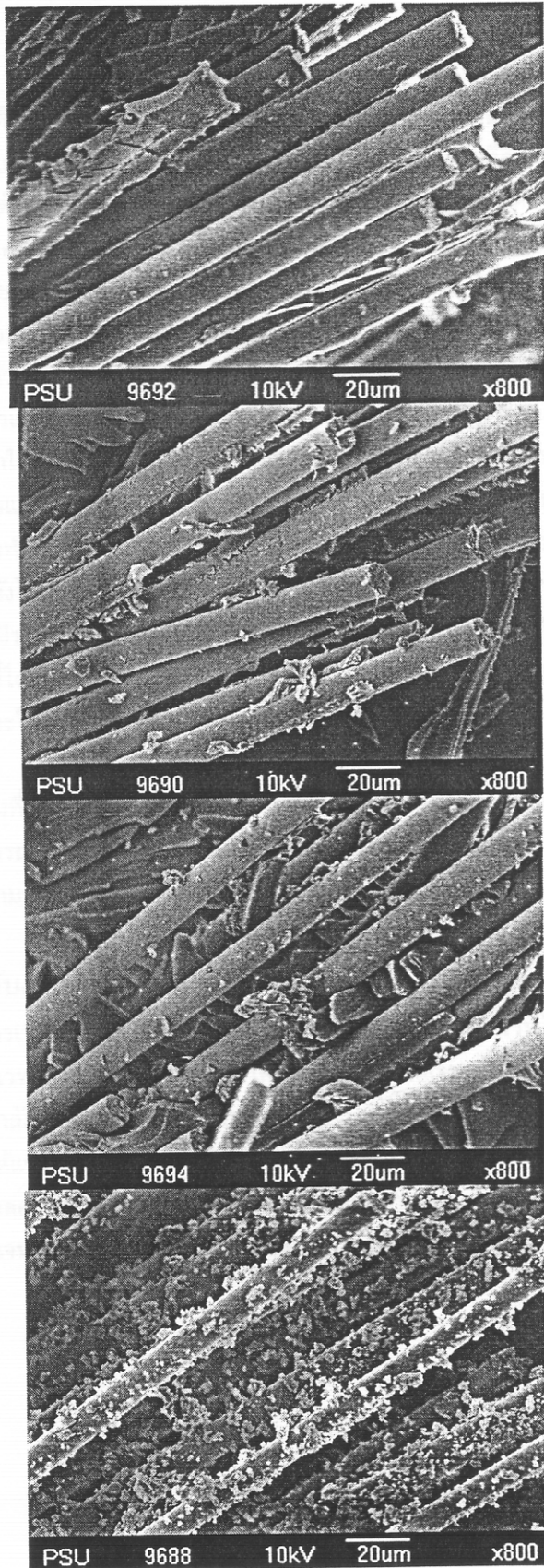


รูปที่ 3.56 อุณหภูมิในเรซินที่วัดได้ระหว่างการอบด้วยตู้อบความร้อนที่ 150°C (OV) และอบด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลังต่างๆ (a) คอมโพสิท I (b) คอมโพสิท II

⁸ X. Fang and D.A. Scola, J. Polym. Sci. Polym. Chem. 37, 4616 (1999) และ S.L. Bai and V. Djafari, Composites 26, 645 (1995).



รูปที่ 3.57 ภาพถ่ายจาก SEM ของผิวหน้าตัวอย่างที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต I เรียงลำดับจากบนลงล่าง : OV, 1S, 2S-3, 3S-1 สังเกตตัวอย่าง 2S-3 มีเรซินเกาะติดบนเส้นใยแก้วมากที่สุด



รูปที่ 3.58 ภาพถ่ายจาก SEM ของผิวหน้าตัวอย่างที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต II เรียงลำดับจากบนลงล่าง : OV, 1S, 2S-1, 3S-3 สังกัดตัวอย่าง 3S-3 มีเรซินเกาะติดบนเส้นใยแก้วมากที่สุด

3.6 สรุปผลการทดลอง

เตาไมโครเวฟที่ใช้ศึกษานี้สามารถอบฮีฟอกซีเรซินและฮีฟอกซีคอมโพสิตได้ดีเช่นเดียวกับตู้อบ การอบด้วยเตาไมโครเวฟของเรซินและคอมโพสิตสูตรต่างๆ สามารถให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับการอบด้วยตู้อบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของสมบัติ และสภาวะการอบ สูตร I และ II เป็นสูตรที่ดีที่สุดที่เหมาะสมต่อการอบด้วยเตาไมโครเวฟภายใต้สภาวะการอบที่ศึกษา การอบด้วยเตาไมโครเวฟแบบขั้นตอนเดียวสามารถให้สมบัติเชิงกลที่เทียบเท่ากับการอบด้วยตู้อบความร้อน ความแตกต่างของสมบัติเชิงกลระหว่างชิ้นงานที่อบด้วยเตาไมโครเวฟและตู้อบความร้อน ขึ้นอยู่กับสูตรเรซินและประเภทของสมบัติเชิงกล เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลทั้งที่สูงขึ้นและต่ำลงเมื่ออบด้วยเตาไมโครเวฟ การอบด้วยเตาไมโครเวฟแบบหลายขั้นตอน ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าการอบแบบขั้นตอนเดียวและการอบด้วยตู้อบความร้อน ทั้งนี้เป็นเพราะการอบแบบหลายขั้นตอนมีการอุ่นเรซินในการอบขั้นตอนแรก ทำให้เรซินมีอุณหภูมิและความหนืดไม่สูงมากนัก เกาะติดกับเส้นใยแก้วดีขึ้น ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเรซินและเส้นใยแก้ว (interfacial adhesion) สูงขึ้น ในทางตรงข้ามการอบแบบขั้นตอนเดียวจะทำให้เรซินมีอุณหภูมิสูงขึ้นทันที จึงทำให้เรซินมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การยึดเกาะระหว่างเรซินและเส้นใยแก้วจึงลดลง และทำให้มีการกักขังโมเลกุลอยู่ในโครงร่างแห สมบัติเชิงกลจึงต่ำกว่า เตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนจะควบคุมระดับกำลังวัตต์โดยมีระยะเวลาที่ให้คลื่นออกมา ดังนั้น ระยะเวลาที่กำหนดไว้จึงไม่ใช่ระยะเวลาที่เรซินได้รับคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาที่ได้รับคลื่นขึ้นอยู่กับระดับกำลัง (power level) ที่ใช้ และจะมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาที่ใช้ เช่น ที่ระดับกำลัง 3 เรซินจะได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 30% ของระยะเวลาที่ตั้งไว้ในการใช้เตาไมโครเวฟนี้ ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า การอบด้วยเตาไมโครเวฟจะใช้เวลาน้อยกว่าการอบด้วยตู้อบความร้อนและสามารถให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบความร้อน แต่จำเป็นต้องใช้สภาวะการอบที่เหมาะสม ข้อจำกัดของโครงการวิจัยนี้คือ ไม่สามารถสร้างเตาไมโครเวฟได้เอง ทำให้ไม่สามารถควบคุมการปล่อยคลื่นให้แม่นยำ และเป็นเวลาต่อเนื่องได้โดยที่สามารถควบคุมกำลังวัตต์ได้

3.7 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ควรสร้างเตาไมโครเวฟขึ้นมาเองเพื่อจะได้ควบคุมการปล่อยคลื่นไมโครเวฟได้
2. ควรซื้อเตาไมโครเวฟรุ่นเดียวกันมากกว่า 2 เครื่องขึ้นไป ตั้งแต่เริ่มการทดลอง เพราะบางครั้งบริษัทผู้ผลิตอาจไม่ผลิตรุ่นที่กำลังใช้อยู่ ทำให้หาซื้อเพิ่มเติมไม่ได้
3. ไม่ควรใช้สารทำให้แข็งกลุ่มแอนไฮไดรต์ เพราะกลิ่นและควันที่เกิดขึ้นจากการอบมีอันตรายต่อสุขภาพมาก ระหว่างทำการทดลองจะต้องสวมแว่นตานิรภัยและใส่หน้ากากปิดจมูกเสมอ กลิ่นค่อนข้างรุนแรงมาก เป็นที่รบกวนของผู้อื่นจนไม่สามารถปฏิบัติงานในห้องเดียวกันได้