

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(10)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	31
บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	32
2.1 สารเคมี	32
2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	33
2.3 วิธีการดำเนินการ	38
2.3.1 การเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	38
2.3.2 การวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟ	39
2.3.3 การเตรียมส่วนผสมีพ็อกซีเรซิน	39
2.3.4 การอบส่วนผสมีพ็อกซี	40
2.3.4.1 การอบส่วนผสมีพ็อกซีในเตาอบความร้อน	40
2.3.4.2 การอบส่วนผสมีพ็อกซีในเตาไมโครเวฟ	40
2.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล	41
2.3.5.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ	41
2.3.5.2 วิธีการทดสอบ	42
2.3.6 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	43
2.3.6.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ	43
2.3.6.2 สถานะการทดสอบ	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	45
3.1 ผลการเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	45
3.2 การวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟ	47
3.3 การศึกษาลักษณะกายภาพของชิ้นตัวอย่าง	49
3.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	51
3.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	67
3.6 ผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	71
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	76
4.1 สรุป	76
4.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก. วิธีการใช้เครื่อง Tensile Testing Machine รุ่น LLOD 10 K	89
ภาคผนวก ข. วิธีการใช้เครื่อง AG-100 kN SHIMADZU	94
ภาคผนวก ค. การใช้เครื่องทดสอบสมบัติอิมแพ็ค ZWICK	102
ภาคผนวก ง. ภาพประกอบข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบ DMTA ชุด I	104
ภาคผนวก จ. คำศัพท์ที่ใช้ในรายงานวิทยานิพนธ์	105
ภาคผนวก ฉ. Mechanical Properties and Dynamic Mechanical Thermal Analysis of Microwave-Cured Epoxy Resin	109
ประวัติผู้เขียน	118

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	3
		2
2	รายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3	รายละเอียดของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง	33
4	สูตรและส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4 % ตามน้ำหนักของอีพ็อกซีเรซิน	39
5	ระดับกำลังและเวลาการอบของอีพ็อกซีแต่ละสูตรที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ	41
6	ระดับกำลังวัตต์ของน้ำที่อบด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลังต่างๆ	45
7	ระดับกำลังวัตต์ของน้ำที่อบด้วยเตาอบและกำลังวัตต์ของอีพ็อกซีสูตร I ที่อบด้วยเตาอบและอบด้วยเตาไมโครเวฟ	46
8	เวลาที่ได้จากการฟังเสียงจากเครื่องไมโครเวฟเพื่อวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ SANSO [®] (800 วัตต์)	47
9	ระยะเวลาการปล่อยคลื่นของเตาไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ	48
10	ลักษณะกายภาพของส่วนผสมอีพ็อกซีก่อนอบและหลังอบ	50
11	Tensile Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	51
12	Tensile Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	51
13	Tensile Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 10 และ 14 นาที	52
14	Tensile Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที	53
15	Impact Resistance ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วย	54

	เตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	
16	Impact Resistance ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วย เตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	54
17	Impact Resistance ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วย เตาไมโครเวฟ เวลา 10 และ 14 นาที	55

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
18 Impact Resistance ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที	56
19 Flexural Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	57
20 Flexural Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	57
21 Flexural Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10 และ 14 นาที	58
22 Flexural Properties ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที	59
23 เวลาการอบและเวลาที่แมกนีตรอนทำงานหรือเวลาที่อบจริง	68
24 สูตรอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที ที่แสดงสมบัติเชิงกลดีกว่าหรือเทียบเท่ากับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	70
25 Glass Transition Temperature (T_g) ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	71
26 Activation Energy (E_a) ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟ เวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	74
27 Activation Enthalpy (ΔH^\ddagger)ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	74

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซี (Diglycidyl Ether of Bisphenol A, DGEBA)	2
2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเอมีนตติยภูมิ	3
3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิฟังก์ชันนอลเอมีน	4
4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแอซิดแอนไฮไดรด์	6
5 การเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซี-แอนไฮไดรด์	7
6 สูตรโครงสร้างสามมิติของอีพ็อกซีที่ใส่สารเชื่อมโยงประเภทแอนไฮไดรด์	7
7 ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ	11
8 การตอบสนองของวัสดุเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ	12
9 การให้ความร้อนแบบธรรมดาและการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ	12
10 โมเลกุลจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า	14
11 โมเลกุลกลับตัวไปมาตามสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว	14
12 ความสัมพันธ์เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่มีสมบัติต่างกัน	15
13 การวางขึ้นทดสอบแบบ Izod	18
14 ลักษณะการทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 point bending	19
15 อุณหภูมิ T_g ที่ตำแหน่ง $\tan \delta_{(max)}$	21
16 เตอบไมโครเวฟ ยี่ห้อ SANYO [®] EM-X 412 800 วัตต์	35
17 เตอบ MEMMERT [®] รุ่น D 06061, Model 500	35
18 เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงดัดโค้ง LLOYD [®]	36
19 เครื่องทดสอบแรงกระแทก, ZWICK [®]	36
20 เครื่องทดสอบทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ DMTA V 9002-50010	37
21 การวางขึ้นทดสอบในเครื่อง DMTA V 9002-50010	37
22 Tensile Modulus ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบอุ่นด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	60
23 Tensile Strength ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบอุ่นด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	60

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
24 Strain at Break ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	61
25 Impact Resistance ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	61
26 Flexural Modulus ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	62
27 Flexural Strength ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	62
28 Strain at Break ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 10, 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	63
29 Tensile Modulus ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	63
30 Tensile Strength ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	64
31 Strain at Break ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	64
32 Impact Resistance ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% ไปด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	65

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
33 Flexural Modulus ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วย เตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	65
34 Flexural Strength ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วย เตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	66
35 Strain at Break ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4% อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วย เตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที	66
36 T_g ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % อบด้วยเตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	72
37 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln f$ และ $1/T_g$ ของอีพ็อกซีสูตร I	73
38 Activation Energy (E_a) ของอีพ็อกซีที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4% อบด้วย เตาไมโครเวฟเวลา 14 และ 20 นาที เปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบ อุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที	75

ตัวอักษรย่อและสัญลักษณ์

DGEBA	Diglycidyl ether of bisphenol A
DMP	Tris-2,4,6-dimethylaminomethyl phenol (DMP)
EMI	2-ethyl-4-methyl imidazole
MTHPA1	Methyltetrahydrophthalic Anhydride Accelerator
MTHPA2	Methyltetrahydrophthalic Anhydride
MHHPA	Methylhexahydrophthalic Anhydride
BDMA	N,N-Dimethylbenzylamine (Benzyldimethylamine)
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analysis
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
TGA	Thermal Gravity Analysis
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	เซนติเมตร
m	เมตร
°C	องศาเซลเซียส
J	Joule
g	กรัม
mol	Molar
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
T _g	Glass transition temperature
E _a	Activation energy
m ²	ตารางเมตร
GHz	Giga Hertz
°K	Kelvin
P	Poise
cPs	centi Poise