ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242468

การรีไซเคิลอิฟอกบีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

นายศักดิ์ชัย สมเชื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

โดย นายศักดิ์ชัย สมเชื้อ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

_____คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงษ์)

6 พฤษภาคม 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ ศุภผล)

_____กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ระพีพันธ์ แดงตันกี)

_____กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศิริศาส เอื้อใจ)

_____กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุชาติ เซี่ยงฉิน)

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242468

การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

นายศักดิ์ชัย สมเชื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายศักดิ์ชัย สมเชื้อ
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
สาขาวิชา : วัสดุศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.ระพีพันธ์ แดงตันกี
ปีการศึกษา : 2553

242468

บทคัดย่อ

อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) จากเรซินชนิด Diglycidylether of Bisphenol A ผสมกับเส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เป็นส่วนประกอบหลักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการรีไซเคิล (Recycle) อีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4โดยเปรียบเทียบผลของตัวทำละลายและวิธีการรีไซเคิล จากผลการทดลองพบว่า การรีไซเคิลด้วยถังความดัน 15 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และตัวทำละลายที่ใช้ คือ เอทธิลอะซีเตท ได้ร้อยละผลผลิตสูงสุด จากการพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี เรซินที่ได้จากการรีไซเคิลมีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกับอีพ็อกซีเรซิน มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองอมส้ม เรซินผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินใหม่กับรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด จากผลการทดลองพบว่า อีพ็อกซีเรซินใหม่กับรีไซเคิลเรซินสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดัดงอ เปอร์เซ็นต์การยืดดึง มอดูลัสยืดดึงและมอดูลัสดัดงอสูงกว่าอีพ็อกซีเรซินใหม่กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด และอุณหภูมิคล้ายแก้วของเรซินผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินใหม่กับรีไซเคิลเรซิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของรีไซเคิลเรซิน

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 133 หน้า)

คำสำคัญ : รีไซเคิล, อีพ็อกซีเรซิน, แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr.Sakchai Somchua
Thesis Title : Recycling of Epoxy Resin in Print Circuit Board
Major Field : Materials Science
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Dr.Rapeephun Dangtungee
Academic Year : 2010

242468

Abstract

Composition of printed circuit board (PCB) type FR-4 consist of Diglycidylether of Bisphenol A type epoxy resin and glass fiber. In this research, we study and develop the methods for produced recycling of epoxy resin in print circuit board using hot solvents . It was found that, the maximum of recycling epoxy resin yield is pressure tank method with pressure 15 bar, temperature 80 C, reaction time 6 h and ethyl acetate solvent. The color of recycled resin is orange-yellow and has high viscosity. IR spectrum of recycled resin indicated similar to pure epoxy resin. The fracture surface of recycled resin/pure epoxy resin is more homogeneous. Compared to print circuit board/pure epoxy resin. The mechanical properties (e.g. hardness, impact strength tensile strength and flexural strength) of recycled resin/pure epoxy resin were higher than that print circuit board powder/pure epoxy resin. Glass transition temperature (T_g) of recycled resin/pure epoxy resin decreased with increase of the content of recycled resin.

(Total 133 pages)

Keywords : Recycling, Epoxy Resin, Print Circuit Board

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์” นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดีจากความอนุเคราะห์ช่วยเหลือของบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ระพีพันธ์ แดงตันกี และ อาจารย์ ดร.สุชาติ เซี่ยงฉิน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนติดตามผลการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบพระคุณบริษัท Aspocomp จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิด FR-4 ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกที่ใช้ในการวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในการวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและความคิดเห็นต่าง ๆ เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้แก่ศิษย์ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ในภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดจนสารเคมีต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณบุคคลทุก ๆ ท่านที่ยังไม่ได้เอ่ยนาม และขอบใจเพื่อน ๆ ทุกคนในการช่วยเหลือต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศักดิ์ชัย สมเชื้อ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์	5
2.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	5
2.2 การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	7
2.3 อีพ็อกซีเรซิน	9
2.4 สารเชื่อมขวาง	11
2.5 เส้นใยแก้ว	12
2.6 เทคนิคการสกัด	13
2.7 การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก	17
2.8 การวิเคราะห์	21
2.9 งานวิจัยเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์	33
บทที่ 3 การทดลอง	37
3.1 สารเคมี	37
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ	37
3.3 การทดลอง	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	49
4.1 ประสิทธิภาพของตัวทำละลายในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซิน ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 51

4.3 เวลาที่ใช้ในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 53

4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอิพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 54

4.5 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันหลักด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรสโคปี 57

4.6 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ 58

4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา 68

4.8 สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ 71

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 73

5.1 สรุปผลการทดลอง 73

5.2 ปัญหา อุปสรรคและข้อเสนอแนะ 75

เอกสารอ้างอิง 77

ภาคผนวก ก 81

ภาคผนวก ข 87

ภาคผนวก ค 99

ภาคผนวก ง 113

ประวัติผู้วิจัย 133

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นส่วนประกอบ	6
2-2	องค์ประกอบของส้นใยแก้วชนิด E-Glass Fiber	13
2-3	ปัจจัยที่ผลต่ออุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์	24
3-1	องค์ประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 จากบริษัท Aspocomp	38
3-2	อัตราส่วนผสมของอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินผสมเรซินจากการรีไซเคิล และอีพ็อกซีเรซินผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	42
4-1	ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย 5 ชนิด	50
4-2	อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลาย	51
4-3	ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดหยาบและบดละเอียด	51
4-4	ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เวลาในการรีไซเคิลต่าง ๆ	53
4-5	ร้อยละผลิตภัณฑ์การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 4 เทคนิค	55
4-6	ความแข็งของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	59
4-7	ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	60
4-8	ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดดึงและมอดูลัสของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-9	อุณหภูมิคล้ายแก้วของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	71
ข-1	ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย 5 ชนิด	88
ข-2	ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดหยาบและบดละเอียด	88
ข-3	ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เวลาในการรีไซเคิลต่าง ๆ	88
ข-4	ร้อยละผลิตภัณฑ์การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 4 เทคนิค	89
ข-5	ความแข็งของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	90
ข-6	ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	91
ข-7	ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	92
ข-8	เปอร์เซ็นต์การยืดดึงของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	93
ข-9	มอดูลัสยืดดึงของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-10	ความต้านทานแรงดัดงอของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	95
ข-11	มอดูลัสดัดงอของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	96
ข-12	อุณหภูมิคล้ายแก้วของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	97

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างทางเคมีของ Tetrabromobisphenol A	6
2-2	องค์ประกอบของเครื่อง Corona Electrostatic Separation	7
2-3	พอลิเมอร์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางกลโดยผสมกับเรซินใหม่	8
2-4	แผ่นพอลิเมอร์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางกลโดยการอัดขึ้นรูป	8
2-5	การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชั่นแบบโครงร่างตาข่ายของอีพ็อกซีเรซิน	9
2-6	ปฏิกิริยาเคมีการเตรียมแอลลิลคลอไรด์จากโพรพิลีนกับคลอรีน	10
2-7	ปฏิกิริยาเคมีการเตรียม Dichlorohydrin จากแอลลิลคลอไรด์กับกรดไฮโปคลอรัส	10
2-8	ปฏิกิริยาเคมีการเตรียม Epichlorohydrin จาก Dichlorohydrin	10
2-9	ปฏิกิริยาเคมีการเตรียม Bisphenol A จากฟีนอลกับอะซีโตน	11
2-10	ปฏิกิริยาเคมีการเตรียม Diglycidylether of Bisphenol A จาก Bisphenol A กับ Epichlorohydrin	11
2-11	โครงสร้างโมเลกุลของ Dicyandiamide	12
2-12	กราฟการแพร่กระจายของตัวถูกละลายระหว่างเฟสสองเฟส	14
2-13	Continuous Infusion Extractor	17
2-14	Discontinuous Infusion Extractor หรือเครื่องสกัดซอกเลต	17
2-15	ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแบบ Dimple Rupture	18
2-16	ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแบบ Stress Line Pattern	18
2-17	ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแบบ Quasi-Cleavage Fracture	19
2-18	ลักษณะการเกิดคอดอด	20
2-19	Microvoid ที่เกิดจากแรงกระทำลักษณะแตกต่างกัน	21
2-20	รูปแบบการสั่นและการหมุนโมเลกุลของสารตัวอย่าง	22
2-21	ส่วนประกอบหลักของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอรม์สเปคโทรมิเตอร์	22
2-22	ส่วนประกอบของมิเชลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์	23
2-23	ส่วนประกอบของเครื่อง DSC ระบบวัดความแตกต่างของกำลัง	26
2-24	ส่วนประกอบของเครื่อง DSC ระบบวัดความแตกต่างของฟลักซ์ความร้อน	26
2-25	ส่วนประกอบของเครื่อง TGA	27
2-26	เครื่องมือวัดความแข็งแบบ Durometer	28
2-27	เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-28	เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด	29
2-29	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานทดสอบของกราฟความเค้นความเครียด	31
2-30	การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับช่วงกำลังขยายต่าง ๆ	32
2-31	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
3-1	เครื่องบดบอลมิลล์	39
3-2	ชุดคัดแยกขนาดอนุภาคของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รุ่น FTL-0200	39
3-3	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	40
3-4	เครื่องระเหยสารแบบหมุน Rotavapor รุ่น r-114	40
3-5	ขนาดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	41
3-6	การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบ	42
3-7	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy รุ่น Nicolet 6700	44
3-8	เครื่องมือทดสอบความแข็ง Shore D Durometer รุ่น Asker	44
3-9	เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod รุ่น Resil Impactor	45
3-10	ชิ้นงานทดสอบแบบที่ 4 และเครื่องมือทดสอบแรงดึง Tensile Testing รุ่น HSK-S, 0066	45
3-11	เครื่อง Differential Scanning Calorimetry รุ่น DSC 2910	46
3-12	เครื่อง Thermaogravimetric Analysis รุ่น TGA7	46
3-13	เครื่อง Scanning Electron Microscopy รุ่น S-4800	47
4-1	โครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดพันธะเชื่อมขวาง	52
4-2	ชุดทดลองรีฟลักซ์	54
4-3	ชุดทดลองผสมระหว่างรีฟลักซ์กับซอกเลต	56
4-4	IR spectra ของ Diglycidylether of Bisphenol A และรีไซเคิลเรซิน	57
4-5	IR spectra ของรีไซเคิลเรซินจากเทคนิคซอกเลตและเทคนิคถังความดัน	58
4-6	มอดูลัสของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-7	ความต้านทานแรงดัดงอของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	66
4-8	มอดูลัสดัดงอของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก	67
4-9	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	68
4-10	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	69
4-11	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก.อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 200 เท่า ข. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 2000 เท่า	70
4-12	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก.อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 200 เท่า ข. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 2000 เท่า	72
ค-1	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด กำลังขยาย 120 เท่า	100
ค-2	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	100
ค-3	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ค-4	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	101
ค-5	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	102
ค-6	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	102
ค-7	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	103
ค-8	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	103
ค-9	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	104
ค-10	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	104
ค-11	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 20 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	105
ค-12	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 20 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	105
ค-13	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 20 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ค-14	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	106
ค-15	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	107
ค-16	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	107
ค-17	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	108
ค-18	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	108
ค-19	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	109
ค-20	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า	109
ค-21	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	110
ค-22	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	110

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ค-23	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 600 เท่า	111
ค-24	ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 2000 เท่า	111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEM-2	Composite Epoxy Materials type 2
CEM-3	Composite Epoxy Materials type 3
CEM-4	Composite Epoxy Materials type 4
DICY	Dicyandiamide
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E-Glass Fiber	Electrical Grade Glass Fiber
FR-3	Flame Retardant type 3
FR-4	Flame Retardant type 4
FTIR	Fourier Transform Spectrometer
IC	Intregated Circuit
IR	Infrared Spectroscopy
kJ	Kilojoule
kV	Kilovolt
MPa	Megapascal
n	Number of cycle
N	Newton
OM	Optical Microscope
PCB	Print Circuit Board
PTH	Plat Through Hole
R	Reference Pan
S	Sample Pan
SEM	Scanning Electron Microscope
TEM	Transmission Electron Microscope
T_g	Glass Transition Temperature
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
T_m	Melting Temperature