การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่น

นายชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547
ISBN 974-17-6892-3
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4572276323

PREPARATION OF RIGID LOW DENSITY POLYURETHANE FOAMS FOR SURFBOARD APPLICATION

Mr. Chanwit Poonsrichaiyasit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6892-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่น
โดย	นายชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์ : การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่น. (PREPARATION OF RIGID LOW DENSITY POLYURETHANE FOAMS FOR SURFBOARD APPLICATION)
อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์, 179 หน้า ISBN 974-17-6892-3.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่นจากโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต พอลิออลชนิดต่าง ๆ และสารเติมแต่งที่จำเป็นที่จัดหาได้ภายในประเทศ เพื่อให้ได้กระดานโต้คลื่นที่มีคุณภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้วัตถุดิบจากต่างประเทศ โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นสูตรสำเร็จซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบหลักที่สำคัญ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างเซลล์โฟม วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารตั้งต้นดังกล่าว เพื่อรวบรวมข้อมูลที่ได้ไปเทียบเคียงหาวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมจากผู้ผลิตและจัดจำหน่ายภายในประเทศ โดยทำการแปรผันชนิดและปริมาณของพอลิออลรวมทั้งองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีความสำคัญ เช่น สารเร่งปฏิกิริยา สารฟู และสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น นอกจากนี้ ยังทำการหาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน (เช่น อุณหภูมิในการเก็บสารตั้งต้น ความเร็วรอบในการปั่นผสม และเวลาในการปั่นผสม) ซึ่งการเตรียมโฟมแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือการออกสูตรที่เหมาะสมและผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ และการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์ในระดับปฏิบัติการจริงที่โรงงานผู้ประกอบการ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างเซลล์โฟม วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมที่เตรียมได้ในระดับปฏิบัติการจริงเทียบกับผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นที่ผลิตจากวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

จากการวิจัย พบว่าสามารถเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่นจากสารตั้งต้นภายในประเทศให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้วัตถุดิบจากต่างประเทศได้ โดยชิ้นงานที่เตรียมจากสารตั้งต้นภายในประเทศนั้นมีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่นประมาณ 43-47 ก.ก./ม^3) มีเซลล์โฟมละเอียดสม่ำเสมอ (ขนาดประมาณ 250-350 ไมโครเมตร) และมีสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าปริมาณของน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดมีความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลลดลง ในขณะที่ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิดจะมีความหนาแน่นเท่ากัน แต่สมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้น

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2547

4572276323 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORD : RIGID LOW DENSITY POLYURETHANE FOAM/ SURFBOARD/ TOLUENE DIISOCYANATE/ POLYOLS/ DENSITY/ MORPHOLOGY/ MECHANICAL PROPERTIES

CHANWIT POONSRICHAIYASIT : PREPARATION OF RIGID LOW DENSITY POLYURETHANE FOAMS FOR SURFBOARD APPLICATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. DUANGDAO AHT-ONG (Ph.D.), 179 pp. ISBN 974-17-6892-3.

This research focused on the preparation of rigid low density polyurethane (PU) foams for surfboard application from toluene diisocyanate, several types of polyols, and additives provided from domestic suppliers in order to produce PU foam product which has the same or similar quality with the surfboard products prepared from imported raw materials. At the beginning, the physical and chemical properties of the imported raw materials were characterized in order to verify the important compositions for PU foam preparation. After that, the morphology, physical properties and mechanical properties of the PU foam sample prepared from imported reactants were investigated. Based on the obtained information, the suitable raw materials were gathered and selected from local manufacturers and suppliers. Then, the rigid PU foams were formulated by varying type and amount of polyols and other important ingredients such as catalyst, blowing agent, and surfactant. In addition, the conditions for preparing PU foams, i.e., storage temperature for reactants, stirring speed, and stirring time were also investigated. Two steps for manufacturing and developing PU foams, laboratory and production scales, were carried out. Cell structure, physical properties, and mechanical properties of the rigid PU foams prepared in production scale were measured and compared with the rigid PU foam surfboard produced from imported raw materials. The results showed that we were able to prepare rigid PU foams for surfboard application from locally available raw materials, which have similar quality to those, prepared from imported raw materials. Our foams have lightweight (density ca. 43-47 kg/m^3), fine and uniform cell structure with its diameter approximately 250-350 μm, and good mechanical properties. In addition, it was found that the density and mechanical properties of PU foams prepared in open mold decreased with an increase in distilled water (blowing agent). However, the density of PU foams prepared in closed-mold remained constant regarding of the amount of blowing agent, whereas their mechanical properties increased with increasing the blowing agent.

Department Materials Science
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology
Academic 2004

Student's signature.....
Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ การเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และวัตถุดิบสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับการช่วยเหลือ และการแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา การแก้ไขปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) (โครงการโปรแกรมการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการในภาคอุตสาหกรรม) และบริษัท คอบรา อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สารเคมีต้นแบบ และสถานที่ในการทำการวิจัย ตลอดจนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ลัดดาวัลย์ รัศมิทัต ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินผลงานและความก้าวหน้าของงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล ที่ช่วยประสานงาน เสนอข้อคิดเห็นและให้คำแนะนำต่าง ๆ จนโครงการวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ทีพีไอ โพลีออล จำกัด และ บริษัท เซาท์ซิตี้ ปิโตรเคม จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีที่มีความจำเป็น และให้คำแนะนำในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยรวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และมิตรสหายทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาการจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฐ

สารบัญรูป ..... ค

บทที่

1 บทนำ 1

2 วารสารปริทัศน์ 3

2.1 ความหมายหรือคำนิยามของโฟม 3

2.2 การจำแนกประเภทของโฟม 4

2.2.1 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะของเซลล์ 4

2.2.2 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ 5

2.2.3 ประเภทของโฟมจำแนกตามประเภทของพลาสติก 6

2.3 กระบวนการการเกิดโฟม 8

2.4 โครงสร้างเซลลูลาร์ 12

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติก 14

2.6 โฟมพอลิยูรีเทน 16

2.6.1 วิวัฒนาการของพอลิยูรีเทน 17

2.6.2 องค์ประกอบสำคัญหรือวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน 17

2.6.3 ปฏิกิริยาเคมีของโฟมพอลิยูรีเทน 36

2.6.4 การเกิดโซ่เชื่อมขวางในพอลิยูรีเทน 42

2.6.5 กรรมวิธีการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน 43

2.6.6 ปัจจัยที่มีผลกับการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน 45

2.6.7 โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง 47

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง 55

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3 การทดลอง 62
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ทำการทดลอง 62
3.2 การทดลอง 64
3.2.1 ศึกษาหาองค์ประกอบหลักและวิเคราะห์สมบัติขององค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่น 66
3.2.2 วิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมต้นแบบ 70
3.2.3 การเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ 71
3.2.4 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ 72
3.2.5 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น 72
3.2.6 ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น 73
3.2.7 ศึกษาวิธีการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้ในปัจจุบัน 76
3.2.8 ทดลองเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นจากพอลิออลที่จัดหาได้ภายในประเทศแต่ละชนิด 81
3.2.9 การวางแผนการทดลองในการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ 86
3.2.10 เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามแผนการทดลองในภาวะที่กำหนด 91
3.2.11 วิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากแผนการทดลอง 91
3.2.12 คัดเลือกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนจากผลการออกสูตรโฟมในระดับห้องปฏิบัติการเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ 91
3.2.13 ปรับปรุงสูตรและภาวะการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน 92
3.2.14 ระบุสูตรและภาวะการเตรียมที่เหมาะสม 92
3.2.15 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม 92

บทที่ หน้า

3.2.16 เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมในแม่แบบปิดที่จัดเตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ 93
3.2.17 แปรผันปริมาณสารฟูในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน 95
3.2.18 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากการแปรผันปริมาณสารฟู 95
3.2.19 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากการแปรผันปริมาณสารฟู 95
3.2.20 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางกลของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรที่เหมาะสมกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ 96
3.2.21 เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับปฏิบัติการจริง 97
3.2.22 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง 97
3.2.23 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง 98
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 99
4.1 ผลการศึกษาหาองค์ประกอบหลักและวิเคราะห์สมบัติขององค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่น 99
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารตั้งต้น 99
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง องค์ประกอบ และสมบัติทางเคมีของสารตั้งต้น 101
4.2 ผลวิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมต้นแบบ 110
4.2.1 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสารตั้งต้นประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 110
4.2.2 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสารตั้งต้นประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 110
4.3 ผลการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ .. 111

บทที่ หน้า

4.4 ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่าง โฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ 112
4.4.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงานตัวอย่าง 112
4.4.2 การหาค่าความหนาแน่น 112
4.5 ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ กระดานโต้คลื่น 113
4.5.1 การหาค่าความหนาแน่น 113
4.5.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา 113
4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น 116
4.6.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด 116
4.6.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง 116
4.6.3 การทดสอบความแข็ง 117
4.7 ผลการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นจากพอลิออลที่จัดหาได้ ภายในประเทศแต่ละชนิด 118
4.8 ผลการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามแผนการทดลองในภาวะที่กำหนด 119
4.9 ผลการคัดเลือกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนจากผลการออกสูตรโฟม ในระดับห้องปฏิบัติการเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ 121
4.10 ผลการปรับปรุงสูตรและภาวะการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน 123
4.10.1 การปรับเปลี่ยนสูตรองค์ประกอบ 123
4.10.2 การปรับภาวะการทดลอง 124
4.11 ระบุสูตรและภาวะการเตรียมที่เหมาะสม 124
4.12 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม 126
4.12.1 การศึกษาลักษณะปรากฏ 126
4.12.2 การหาค่าความหนาแน่น 127
4.12.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์ 127
4.13 ผลการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมในแม่แบบปิด ที่จัดเตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ 128

บทที่ หน้า

4.14 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิด 129
4.14.1 การหาค่าความหนาแน่น 129
4.15 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิด 130
4.15.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด 130
4.15.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง 131
4.15.3 การทดสอบความแข็ง 132
4.16 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด 133
4.16.1 การหาค่าความหนาแน่น 133
4.17 การวิเคราะห์ผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด 134
4.17.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด 134
4.17.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง 135
4.17.3 การทดสอบความแข็ง 135
4.18 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางกลของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรที่เหมาะสมกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ 137
4.19 ผลการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับปฏิบัติการจริง 140
4.20 ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง 141
4.20.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงาน 141
4.20.2 การหาค่าความหนาแน่น 141
4.20.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา 141

บทที่ หน้า

4.21 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียม
ในระดับปฏิบัติการจริง 142
4.21.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด 142
4.21.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง 143
4.21.3 การทดสอบความแข็ง 144
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 145
5.1 สรุปผลการทดลอง 145
5.2 ข้อเสนอแนะ 149

รายการอ้างอิง 150
ภาคผนวก 153
ภาคผนวก ก 154
ภาคผนวก ข 176
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 179

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ประเภทของโฟมที่มีการใช้งานในปัจจุบัน 7
ตารางที่ 2.2 วิวัฒนาการและการพัฒนาพอลิยูรีเทนที่สำคัญ 17
ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างพอลิออลสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นและชนิดแข็ง 25
ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยาทั้ง 2 ประเภทและฟังก์ชันนอลิตี 26
ตารางที่ 2.5 สารเร่งปฏิกิริยาประเภท Unreactiveamine 28
ตารางที่ 2.6 สารเร่งปฏิกิริยาประเภท Low-odour reactive amine 29
ตารางที่ 2.7 สารเร่งปฏิกิริยาประเภท Low-odour reactive amine (ต่อ) 29
ตารางที่ 2.8 สารเร่งปฏิกิริยาประเภทออกาโนเมทัลลิก (organometallic catayst) 30
ตารางที่ 2.9 สารเชื่อมขวางและเชนเอกซ์เทนเดอร์สำหรับโฟมพอลิยูรีเทน 33
ตารางที่ 2.10 ฟิลเลอร์บางชนิดที่ใช้ในงานพอลิยูรีเทน 35
ตารางที่ 2.11 เส้นใยเสริมแรงบางชนิดที่ใช้ในงานพอลิยูรีเทน 35
ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างผลการทดลองในสิทธิบัตร (6,713,521) 59
ตารางที่ 3.1 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (ReA 8411) (สูตรที่ 1) 82
ตารางที่ 3.2 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (ReA 8770) (สูตรที่ 2) 82
ตารางที่ 3.3 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 3003) (สูตรที่ 3) 83
ตารางที่ 3.4 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 4260) (สูตรที่ 4) 83
ตารางที่ 3.5 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 4414) (สูตรที่ 5) 83
ตารางที่ 3.6 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 4010) (สูตรที่ 6) 84
ตารางที่ 3.7 การแปรผันชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม 86
ตารางที่ 3.8 การแปรผันชนิดของพอลิออลเพื่อหาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม 88
ตารางที่ 3.9 แผนการออกสูตรโฟมเพื่อหาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม 89
ตารางที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 99
ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดของสารตั้งต้น 100
ตารางที่ 4.3 ผลการตกตะกอนของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด 101
ตารางที่ 4.4 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 107

หน้า

ตารางที่ 4.5 ความแตกต่างระหว่างพอลิออลสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นและชนิดแข็ง 108
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ เมื่อสารตั้งต้นมีอุณหภูมิห้องและทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 110
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้ เมื่อเก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิสารตั้งต้น 6-8 องศาเซลเซียส) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 110
ตารางที่ 4.8 ความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมผลิตภัณฑ์ 116
ตารางที่ 4.9 ความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมผลิตภัณฑ์ 117
ตารางที่ 4.10 ความแข็ง (ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย) ของชิ้นงานโฟมผลิตภัณฑ์ 117
ตารางที่ 4.11 ลักษณะการเกิดโฟมและชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นที่ได้จากพอลิออลแต่ละชนิด 118
ตารางที่ 4.12 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมตัวอย่างเทียบกับโฟมต้นแบบเมื่อเก็บสารไว้ที่อุณหภูมิห้อง 120
ตารางที่ 4.13 ผลการคัดเลือกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนจากผลการออกสูตรโฟมในระดับห้องปฏิบัติการ 122
ตารางที่ 4.14 สรุปสูตรโฟมและภาวะการเตรียมที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับที่ใหญ่ขึ้น และในระดับปฏิบัติการจริง 125
ตารางที่ 4.15 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของสูตรโฟมที่เหมาะสม 125
ตารางที่ 4.16 ความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิดจากการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) 133
ตารางที่ 4.17 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลบางประการของโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบและโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมที่เตรียมในแม่แบบปิดในระดับห้องปฏิบัติการ 137

หน้า

ตารางที่ 4.18 เสถียรภาพทางรูปร่างที่ภาวะต่าง ๆ ของโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ และโฟม พอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมที่เตรียมในแม่แบบปิด ในระดับห้องปฏิบัติการ 138
ตารางที่ 4.19 ความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียม ในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมโดยใช้สารตั้งต้น ที่จัดหาจากภายในประเทศ 143
ตารางที่ 4.20 ความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียม ในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมโดยใช้สารตั้งต้น ที่จัดหาจากภายในประเทศ 143
ตารางที่ 4.21 ความแข็ง (ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย) ของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสม โดยใช้สารตั้งต้นที่จัดหาจากภายในประเทศ 144
ตารางที่ 5.1 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลบางประการของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมขึ้น ในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับโฟมผลิตภัณฑ์ กระดานโต้คลื่น 148
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียม ในแม่แบบเปิดที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) 176
ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่ ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่เตรียมในแม่แบบปิด [ความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน (เฉลี่ย 44.7 ก.ก./ลบ.ม.)] 176
ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียม ในแม่แบบเปิดที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) 177
ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่ ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่เตรียมในแม่แบบปิด [ความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน (เฉลี่ย 44.7 ก.ก./ลบ.ม.)] 177

หน้า

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิดที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) 178
ตารางที่ ข-6 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่เตรียมในแม่แบบปิด [ความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน (เฉลี่ย 44.7 ก.ก./ลบ.ม.)] 178

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 สัณฐานโครงสร้างของโฟม 5
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสัณฐานวิทยาของโฟมบางชนิด 6
รูปที่ 2.3 แผนภาพขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการเกิดโฟม 12
รูปที่ 2.4 การขยายตัวของ dodecahedral cell ในทิศทางตั้งฉากและขนานกับ ทิศทางการเกิดโฟม 15
รูปที่ 2.5 ปริมาณการบริโภคพอลิยูรีเทนในโลกตั้งแต่ปี 1962 ถึง 1981 16
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ 2,4-TDI และ 2,6-TDI 18
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิต TDI 19
รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของ trifrunctional prepolymer 22
รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของ TDI-dimer (หรือ urethidinediones) 23
รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของ TDI-trimer (หรือไอโซไซยานูเรต) 23
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของMDI บริสุทธิ์ (4,4'-MDI) 24
รูปที่ 2.12 โครงสร้าง polymeric MDI 24
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิอีเทอร์พอลิออล 26
รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเอสเทอร์พอลิออล 27
รูปที่ 2.15 ผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อขนาดของเซลล์โฟม 31
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของบล็อคโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิอีเทอร์ และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน 32
รูปที่ 2.17 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิยูรีเทน 42
รูปที่ 2.18 แผนผังกรรมวิธีการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน 43
รูปที่ 2.19 เครื่องทำโฟมแท่งระบบ Hennecke 44
รูปที่ 2.20 ผลของขนาดของเซลล์โฟมต่อความสามารถในการนำความร้อน ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง 47
รูปที่ 2.21 ผลของปริมาณของน้ำ (สารฟู) ต่อความหนาแน่นของโฟม 48
รูปที่ 2.22 ผลของความหนาแน่นต่อ (1) สมบัติความต้านทานแรงกด และ (2) ความต้านทานแรงดึงของโฟม 48
รูปที่ 2.23 ผลของความหนาแน่นต่อสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของโฟม 49

หน้า

รูปที่ 2.24 ผลของความหนาแน่นต่อมอดุลัสของโฟมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 55 % 49
รูปที่ 2.25 ประโยชน์ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง 51
รูปที่ 2.26 ประโยชน์ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (ต่อ) 52
รูปที่ 2.27 ภายในโรงงานผลิตกระดานโต้คลื่น 53
รูปที่ 2.28 แผนผังกรรมวิธีการผลิตกระดานโต้คลื่นจากโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง 54
รูปที่ 3.1 เครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์ แบบใช้หน้าปัด 66
รูปที่ 3.2 เครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR, Nicolet รุ่น Impact 400D) 67
รูปที่ 3.3 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (TGA, Perkin-Elmer รุ่น TGA7) 68
รูปที่ 3.4 เครื่องเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟ (GPC, Waters 150-CV) 69
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM-6400) 73
รูปที่ 3.6 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานแรงกด 74
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500) พร้อมลักษณะการวางชิ้นทดสอบความต้านทานแรงกด 74
รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง 75
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500) พร้อมลักษณะการวางชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง 75
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็ง ชนิด shore C (Expanded rubber hardness test, TECLOCK GS-701 N) 76
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ 85
รูปที่ 3.12 แผนผังการออกสูตรโฟม 90
รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope, Olympus BH-2) 93
รูปที่ 4.1 โทลูอีนไดไอโซไซยาเนตที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 100
รูปที่ 4.2 สารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 100
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปคตรัมของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 102
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของ 2,4-TDI และ 2,6-TDI 103

หน้า

รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปคตรัมของสารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้ 103
รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปคตรัมอ้างอิงของพอลิอีเทอร์พอลิออล 105
รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปคตรัมอ้างอิงของพอลิเอสเทอร์พอลิออล 105
รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรม (TGA curve) ของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต ที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 106
รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรมของสารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 106
รูปที่ 4.10 โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่นจากสารตั้งต้น ที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 111
รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวาง (cross-section) ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง สำหรับกระดานโต้คลื่นจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ 112
รูปที่ 4.12 ลักษณะชิ้นงานโฟมผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นบางส่วน 113
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของโฟมตัวอย่างในทิศทางขนานกับการฟูตัว 114
รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของโฟมตัวอย่างในทิศทางตั้งฉากกับการฟูตัว 115
รูปที่ 4.15 ลักษณะชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นที่ได้จากพอลิออลแต่ละชนิด 119
รูปที่ 4.16 โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากสูตรที่เหมาะสม 126
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานตัวอย่างจากสูตรที่เหมาะสม 127
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ 127
รูปที่ 4.19 ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด 128
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบเปิด (ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ 129
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน ที่เตรียมในแม่แบบเปิดกับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ 130
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน ที่เตรียมในแม่แบบเปิดกับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ 132
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียม ในแม่แบบเปิดกับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ 132

หน้า

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ 134
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด (ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ 135
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมใน แม่แบบปิด (ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน) กับปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้..... 136
รูปที่ 4.27 ชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างหลักของกระดานโต้คลื่น โดยใช้สารตั้งต้นที่ผลิตในประเทศ 140
รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM ของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจาก สูตรที่เหมาะสมในทิศทางขนานกับการฟูตัว ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 141
รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงจาก สูตรที่เหมาะสมในทิศทางตั้งฉากกับการฟูตัว ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 142
รูปที่ ก-1 ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกตรสโคปี 154
รูปที่ ก-2 Single-stage TGA curve 156
รูปที่ ก-3 แผนผังของ thermobalance (TGA) 157
รูปที่ ก-4 ตัวอย่างเครื่อง TGA 157
รูปที่ ก-5 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟี 159
รูปที่ ก-6 ตัวอย่างเครื่อง GPC 159
รูปที่ ก-7 การคำนวณกำลังการขยายของ SEM 169
รูปที่ ก-8 โครงสร้างภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 169
รูปที่ ก-9 การเกิดภาพของ SEM 170
รูปที่ ก-10 ตัวอย่างเครื่อง SEM 170
รูปที่ ก-11 ลักษณะของเครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกด 171
รูปที่ ก-12 การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด 173
รูปที่ ก-13 การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งแบบ 4 จุด 173
รูปที่ ก-14 แรงเค้นในชิ้นทดสอบขณะทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้ง 174