บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ทำการทดลอง

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ผู้ประกอบการ (บริษัท คอบรา อินเตอร์เนชันแนล จำกัด) ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ (จากบริษัท Bennett Surfboards จำกัด ประเทศออสเตรเลีย)
   - 1.1 โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต
   - 1.2 สารประกอบพอลิออล

2. วัตถุดิบและสารเคมีที่จัดหาได้จากภายในประเทศ
   - 2.1 โทลูอีนไดไอโซไซยาเนตพรีพอลิเมอร์ (toluene diisocyanate prepolymer) จากบริษัท ทีพีไอ โพลีออล จำกัด
     - BX 9201 (ชื่อทางการค้า) มี NCO content ประมาณ 32
   - 2.2 พอลิเอสเทอร์พอลิออล (polyester polyol) จากบริษัท ทีพีไอ โพลีออล จำกัด
     - Rayelast® A 8411 (ReA 8411) มี OHV ประมาณ 55
     - Rayelast® A 8770 (ReA 8770) มี OHV ประมาณ 57
   - 2.3 พอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyol) จากบริษัท ทีพีไอ โพลีออล จำกัด
     - Raypol® 3003 (RP 3003) มี OHV ประมาณ 56
     - Raypol® 4260 (RP 4260) มี OHV ประมาณ 360
     - Raypol® 4414 (RP 4414) มี OHV ประมาณ 490
     - Raypol® 4010 (RP 4010) มี OHV ประมาณ 640
   - 2.4 สารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) จากบริษัท เซาท์ซิตี้ ปิโตรเคม จำกัด
     - Dimethylcyclohexylamine (DMCHA) (Polycat® 8 : PC 8, ชื่อทางการค้า)
     - Dimethylethanolamine (DMEA)
     - Sol^{n} of 33 % triethylenediamine and 67 % dipropylene glycol (Dabco® 33-LV, ชื่อทางการค้า)
     - Pentamethyldiethylene triamine (Polycat® 5 : PC 5, ชื่อทางการค้า)
   - 2.5 สารลดแรงตึงผิว (surfactants) จากบริษัท กิจการไทย จำกัด
     - Polyether polydimethylsiloxane copolymer (TEGOSTAB® B 8444, ชื่อทางการค้า)

2.6 สารฟู (blowing agent) จากห้องปฏิบัติการของภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- น้ำกลั่น (distilled water)

2.7 สารสี (pigment) จากจากบริษัท ทีพีไอ โพลีออล จำกัด

- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide : TiO_2)

2.8 อะซีโตน (acetone)

2.9 สารช่วยให้หลุดจากแม่พิมพ์ (mold release agent) จากบริษัท Marbo จำกัด

- CPD® 118 (ชื่อทางการค้า)

3. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1 เครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (high speed mixer) พร้อมใบกวน

3.2 เครื่องชั่งสาร (top loading)

3.3 ตู้แช่เย็น (refrigerator)

3.4 เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

3.5 นาฬิกาจับเวลา (stop watch)

3.6 แม่แบบเปิด (open mold) : กล่องกระดาษทรงสี่เหลี่ยมขนาด 5 x 5 x 7 ลูกบาศก์นิ้ว

3.7 แม่แบบปิด (closed mold) : เหล็กหนาทรงสี่เหลี่ยมขนาด 25 x 30 x 10 ลบ.ซม.

3.8 ไม้แหลม

3.9 ถุงพลาสติก

3.10 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (vernier caliper)

3.11 เครื่องตัดโฟม (foam cutting machine)

3.12 เครื่องวัดความหนืดประเภทบรูคฟิลด์ แบบหน้าปัด (dial-Brookfield viscometer)

3.13 เครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR, Nicolet รุ่น Impact 400D)

3.14 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (TGA, Perkin-Elmer รุ่น TGA7)

3.15 เครื่องเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟ (GPC, Waters 150-CV)

3.16 กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope, Olymplus BH-2)

3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM-6400)

3.18 เครื่องทดสอบความแข็ง (Expanded rubber hardness test, TECLOCK GS-701 N)

3.19 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500)

4. สถานที่ทำการทดลอง

4.1 ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ส่วนการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน บริษัท คอบรา อินเตอร์เนชันแนล จำกัด นิคมอุสาหกรรมบางปะกง จังหวัดชลบุรี

3.2 การทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. การวิเคราะห์ ตรวจสอบ และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของสารตั้งต้นและชิ้นงานที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน
2. การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ
3. การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในระดับปฏิบัติการจริง

โดยในแต่ละส่วนข้างต้นจะแบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ ดังนี้

- **การวิเคราะห์ ตรวจสอบ และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของสารตั้งต้นและชิ้นงานที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน**

3.2.1 ศึกษาหาองค์ประกอบหลักและวิเคราะห์สมบัติขององค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่น

3.2.2 วิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (reaction profile) ของโฟมต้นแบบ

3.2.3 การเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้

3.2.4 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของชิ้นงานตัวอย่างโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ

3.2.5 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น

3.2.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น

- **การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ**

3.2.7 ศึกษาวิธีการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้ในปัจจุบัน

3.2.8 ทดลองเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นจากพอลิออล (polyols) ที่จัดหาได้ภายในประเทศแต่ละชนิด

3.2.9 วางแผนการทดลอง (experimental design) ในการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.10 เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามแผนการทดลองในภาวะที่กำหนด

3.2.11 วิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากแผนการทดลอง

3.2.12 คัดเลือกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนจากผลการออกสูตรโฟมในระดับห้องปฏิบัติการเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ

3.2.13 ปรับปรุงสูตรและภาวะการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

3.2.14 ระบุสูตรและภาวะการเตรียมที่เหมาะสมเบื้องต้น

3.2.15 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม

3.2.16 เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่ปรับปรุงแล้วบางสูตรในแม่แบบปิดที่จัดเตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.17 แปรผันปริมาณสารฟูในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

3.2.18 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากการแปรผันปริมาณสารฟู

3.2.19 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากการแปรผันปริมาณสารฟู

3.2.20 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรที่เหมาะสมกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ

- **การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในระดับปฏิบัติการจริง**

3.2.21 เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับปฏิบัติการจริง

3.2.22 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง

3.2.23 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง

1. การวิเคราะห์ ตรวจสอบ และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของสารตั้งต้นและชิ้นงานที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน

3.2.1 ศึกษาหาองค์ประกอบหลักและวิเคราะห์สมบัติขององค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับกระดานโต้คลื่น

ทำการศึกษาหาองค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง โดยการวิเคราะห์สารตั้งต้นทั้ง 2 ส่วนที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน นั่นคือ โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (toluene diisocyanate : TDI) และสารประกอบพอลิออล (polyol composition) เพื่อใช้ในการจัดหาสารตั้งต้นที่มีความใกล้เคียงหรือเหมาะสมจากผู้ประกอบการในประเทศดังนี้

3.2.1.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารตั้งต้น

3.2.1.1.1 <u>การศึกษาลักษณะปรากฏ</u> (physical appearance)

เป็นการตรวจดูลักษณะภายนอกของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออล ในด้านของกลิ่น สี ความขุ่น ความใส-หนืด อนุภาคที่แขวนลอยให้เห็นด้วยสายตา เป็นต้น

3.2.1.1.2 <u>การหาค่าความหนืด</u> (viscosity)

เป็นการหาค่าความหนืดของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออล โดยใช้เครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์ (Brookfield Viscometer) แบบใช้หน้าปัด (dial) ดังในรูปที่ 3.1 ทำการวัดค่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และหน่วยที่วัดได้แสดงเป็น เซนติพอยส์ (centipoise : cps)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 เครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์ แบบใช้หน้าปัด

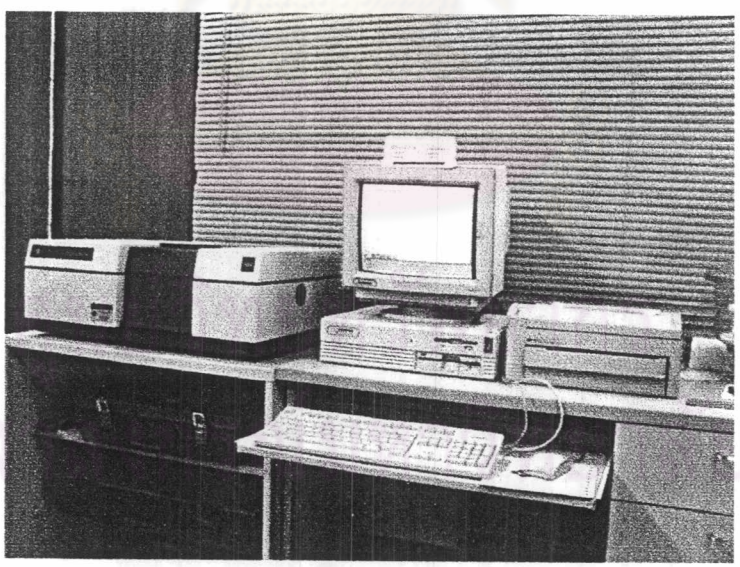
3.2.1.1.3 <u>การตกตะกอน</u> (precipitation)

เป็นการตรวจดูลักษณะภายนอกของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออลด้วยการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10-15 วัน เพื่อตรวจดูว่ามีสารเคมีที่แขวนลอยอยู่ในสารดังกล่าวหรือไม่ โดยใช้หลักการตกตะกอน ทั้งนี้ระหว่างที่ตั้งทิ้งไว้โดยเฉพาะโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตต้องปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปทำปฏิกิริยาทำให้สารตั้งต้นแข็งตัวได้

3.2.1.2 วิเคราะห์โครงสร้าง องค์ประกอบ และสมบัติทางเคมีของสารตั้งต้น

3.2.1.2.1 <u>การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี</u> (Infrared Spectroscopy : IR)

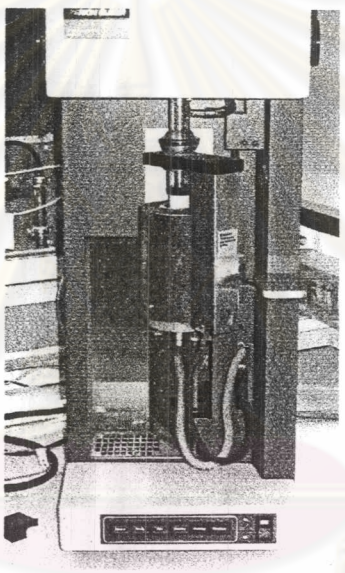
เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยพิจารณาจากหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออลด้วยเครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR, Nicolet รุ่น Impact 400D) ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้จำนวนการสแกน 32 ครั้ง resolution 4 cm^{-1} และรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 4,000–400 cm^{-1} [โดยความถี่ในหน่วยของเวฟนัมเบอร์ (cm^{-1}) เท่ากับ 10^4/ความยาวคลื่นในหน่วยไมครอน (μm)] (ภาคผนวก ก-1)



รูปที่ 3.2 เครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR, Nicolet รุ่น Impact 400D)

3.2.1.2.2 <u>การวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมทรี</u> (Thermogravimetric Analysis : TGA)

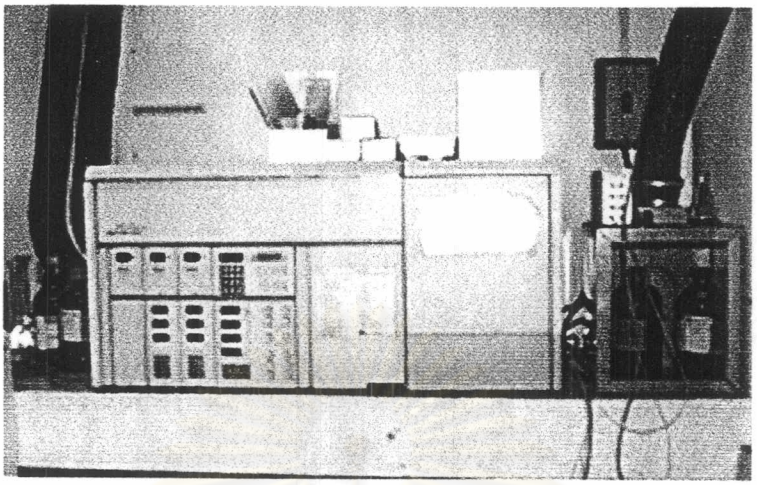
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA นี้เป็นการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัวของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออล ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (TGA, Perkin-Elmer รุ่น TGA7) ดังรูปที่ 3.3 โดยใส่สารตั้งต้นในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง น้ำหนักประมาณ 25-35 มิลลิกรัม ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของกาซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 20-600 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (ภาคผนวก ก-2)



รูปที่ 3.3 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์
(TGA, Perkin-Elmer รุ่น TGA7)

3.2.1.2.3 <u>การหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟี</u>
(Gel Permeation Chromatography : GPC)

การหาน้ำหนักโมเลกุลของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออล กระทำโดยนำสารตัวอย่างแต่ละชนิดไปละลายในเตตระไฮโดรฟูราน (tetrahydrofluran) ก่อน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่องเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟ (GPC, Waters 150-CV) ดังรูปที่ 3.4 ใช้คอลัมน์ PL gel 5 μm 100 A° จำนวน 2 คอลัมน์ ซึ่งมีความสามารถในการหาน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 100-4,000 ฉีดสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้พอลิสไตรีน น้ำหนักโมเลกุล 580-1,300 เป็นสารอ้างอิงมาตรฐาน (ภาคผนวก ก-3)



รูปที่ 3.4 เครื่องเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟ (GPC, Waters 150-CV)

3.2.1.2.4 <u>การหาค่าไอโซไซยาเนตคอนเทนต์</u> (NCO content หรือ % NCO by wt.) ในโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต

เป็นการหาค่าร้อยละโดยน้ำหนักของหมู่ไอโซไซยาเนตที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของสารตัวอย่างโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต ตามมาตรฐาน ASTM D 2572 (ภาคผนวก ก-4)

3.2.1.2.5 <u>การหาค่าไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิลนัมเบอร์</u> (Hydroxyl value : OHV หรือ Hydroxyl number) ของสารประกอบพอลิออล

เป็นการหาค่า OHV เฉลี่ยของสารประกอบพอลิออลซึ่งค่าดังกล่าวนี้เป็นตัววัดความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวกับหมู่ไอโซไซยาเนตต่อน้ำหนักของพอลิออล และมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม (mg KOH/g) ตามมาตรฐาน ISO 14900 (ภาคผนวก ก-5)

3.2.1.2.6 <u>การหาปริมาณน้ำ</u> (water content) ของสารประกอบพอลิออล

เป็นการหาปริมาณน้ำที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ NCO 2 หมู่ตามมาตรฐาน ISO 14897 ซึ่งแสดงออกมาในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt)

3.2.2 วิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (reaction profile) ของโฟมต้นแบบ

เนื่องจากอุณหภูมิของสารตั้งต้นก่อนการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนมีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดโฟม จึงทำการเก็บข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นภาวะการเตรียมที่ง่ายที่สุด จากนั้นทำการเก็บข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นภาวะที่ใกล้เคียงกับที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนี้

3.2.2.1 การเก็บข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสารตั้งต้นประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

ทำการเก็บข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาจากการเตรียมชิ้นงานโดยใช้สารตั้งต้นและอัตราส่วนการผสมที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ ซึ่งสารตั้งต้นดังกล่าวก่อนการทำปฏิกิริยาการเกิดโฟมจะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต 100 ส่วนโดยน้ำหนัก (part by weight : pbw)
2. ชั่งสารประออลพอลิออล 53 ส่วนโดยน้ำหนัก (pbw)
3. ผสมสารทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง (high speed mixer) ความเร็วรอบประมาณ 2000 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลาประมาณ 8-10 วินาที
4. เทของผสมลงในถุงพลาสติกและปล่อยให้โฟมเกิดการฟูตัวอย่างอิสระ
5. ทำการบันทึกข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (reaction profile) ซึ่งแสดงเป็นค่า cream time (ct) gel time (gt) และ tact free time (tft) ตามลำดับ
6. ทำความสะอาดเครื่องปั่นผสมด้วยอะซีโตน (acetone)

3.2.2.2 การเก็บข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสารตั้งต้นประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

วิธีการทำเหมือนในข้อ 3.2.2.1 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของสารตั้งต้นมาที่ประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ

รายละเอียดของข้อมูลการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้ [1]

- cream time (ct) คือระยะเวลาตั้งแต่ผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกันจนถึงจุดที่ของผสมเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีครีมและโฟมเริ่มฟูตัวขึ้น (บางครั้งอาจเรียกว่า initiation time)
- gel time (gt) คือระยะเวลาตั้งแต่ผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกันจนโฟมเริ่มเป็นเจล โดยสังเกตจากการเอาไม้แหลมแตะที่ผิวโฟมแล้วเริ่มยืดเป็นเจล
- tact free time (tft) คือระยะเวลาตั้งแต่ผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกันจนโฟมฟูตัวเต็มที่ โดยสังเกตจากเมื่อนำมือมาสัมผัสที่ผิวของโฟมแล้วโฟมเริ่มไม่ติดมือ

3.2.3 การเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้

เป็นการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้สารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่นที่มีคุณภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ โดยการเตรียมนั้นจะใช้อัตราส่วนโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต 100 ส่วนโดยน้ำหนัก (part by weight : pbw) ต่อสารประกอบพอลิออล 53 ส่วนโดยน้ำหนัก (TDI : polyols, 100 : 53 pbw) [เก็บสารตั้งต้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 6-8 องศาเซลเซียส)] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต และสารประกอบพอลิออลตามอัตราส่วนข้างต้นใส่ลงในภาชนะพลาสติกโดยแยกภาชนะกัน
2. ผสมสารทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (high-speed mixer) ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 50-60 วินาที
3. เทของผสมลงในแม่แบบเปิด และปล่อยให้โฟมเกิดการฟูตัวอย่างอิสระ
4. ทำความสะอาดเครื่องปั่นผสมความเร็วสูงด้วยอะซีโตน (acetone)
5. เมื่อชิ้นงานโฟมแห้งจึงนำโฟมออกจากแม่แบบ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-2 วัน เพื่อให้โฟมเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

3.2.4 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของชิ้นงานตัวอย่างโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ

เป็นการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นเองในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้สารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ (ในข้อ 3.2.3)

3.2.4.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงานตัวอย่าง

เป็นการตรวจดูลักษณะภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างในส่วนของลักษณะการสัมผัสด้วยมือ สีสัน และความละเอียดของเซลล์โฟมที่สังเกตเห็นจากสายตา เป็นต้น

3.2.4.2 การหาค่าความหนาแน่น (density)

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของโฟมที่ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ (free rise density) ตามมาตรฐาน ISO 845 โดยวัดมวลและปริมาตรของโฟมตัวอย่างที่ตัดจากบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างตามสมการที่ 3.1

$$D = \frac{m}{V} \, x \, 10^6 \qquad (3.1)$$

เมื่อ D = ความหนาแน่นของโฟมตัวอย่าง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

m = มวลของชิ้นงาน (กรัม)

V = ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

3.2.5 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น

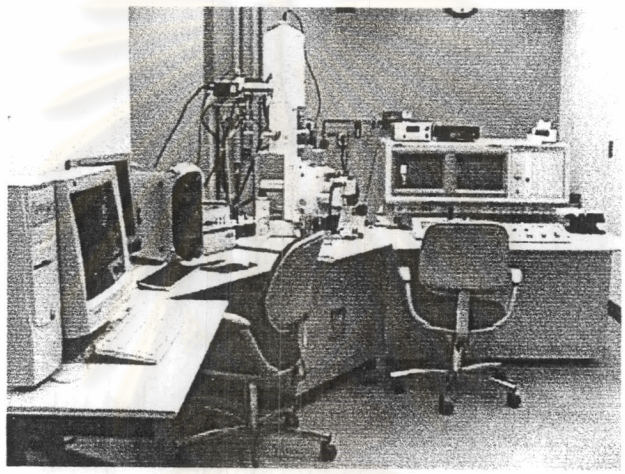
เป็นการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นที่ผู้ประกอบการเตรียมได้ในปัจจุบันโดยอาศัยสารตั้งต้นจากต่างประเทศ

3.2.5.1 การหาค่าความหนาแน่น (density)

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นในส่วนกลางของชิ้นงาน (core density) ตามมาตรฐาน ISO 845 โดยวัดมวลและปริมาตรของชิ้นงาน แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างตามสมการที่ 3.1 ข้างต้น

3.2.5.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา (morphology)

เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์โฟม เช่น ขนาด ความสม่ำเสมอ และความละเอียด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM-6400) ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้กระแสอิเล็กตรอน (electron beam) 15 กิโลโวลต์ และกำลังขยาย 25 และ 50 เท่า ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างจะถูกตัดให้มีขนาดประมาณ 5 มม. x 5 มม. x 5 มม. โดยเลือกตัดบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานไปติดบนแท่นทรงกลม (stub) ด้วยกาว แล้วจึงนำไปเคลือบด้วยทอง และนำชิ้นงานตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM ต่อไป โดยที่การวิเคราะห์นี้จะกระทำการตรวจสอบชิ้นงานทั้งในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับการฟูตัวของโฟม (ภาคผนวก ก-6)



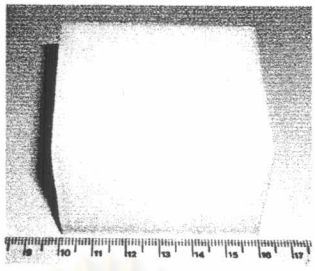
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM-6400)

3.2.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น

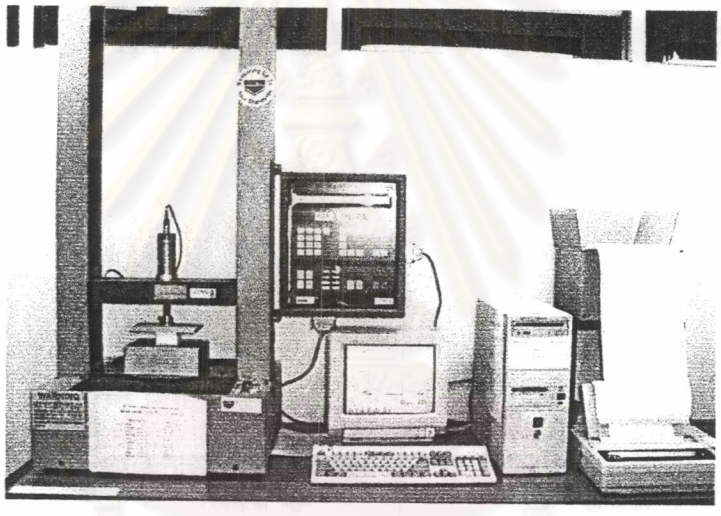
เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นที่ผู้ประกอบการเตรียมได้ในปัจจุบันโดยอาศัยสารตั้งต้นจากต่างประเทศ

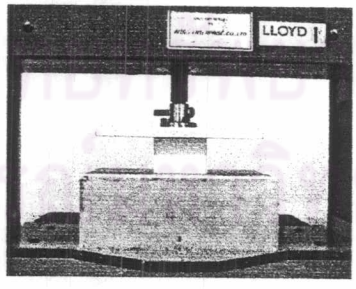
3.2.6.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด (compression test)

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 844 โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 60 x 60 x 40 ลูกบาศก์มิลลิเมตรด้วยใบมีดคม (รูปที่ 3.6) จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500) ดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ (cross head speed) 10 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะทางในการกด 10 % ของความหนาเริ่มต้น ภาวะในการทดสอบที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 % R.H. (ภาคผนวก ก-7)



รูปที่ 3.6 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานแรงกด



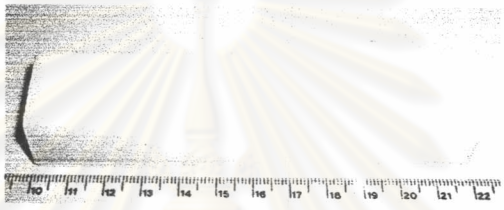


รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500)
พร้อมลักษณะการวางชิ้นทดสอบความต้านทานแรงกด

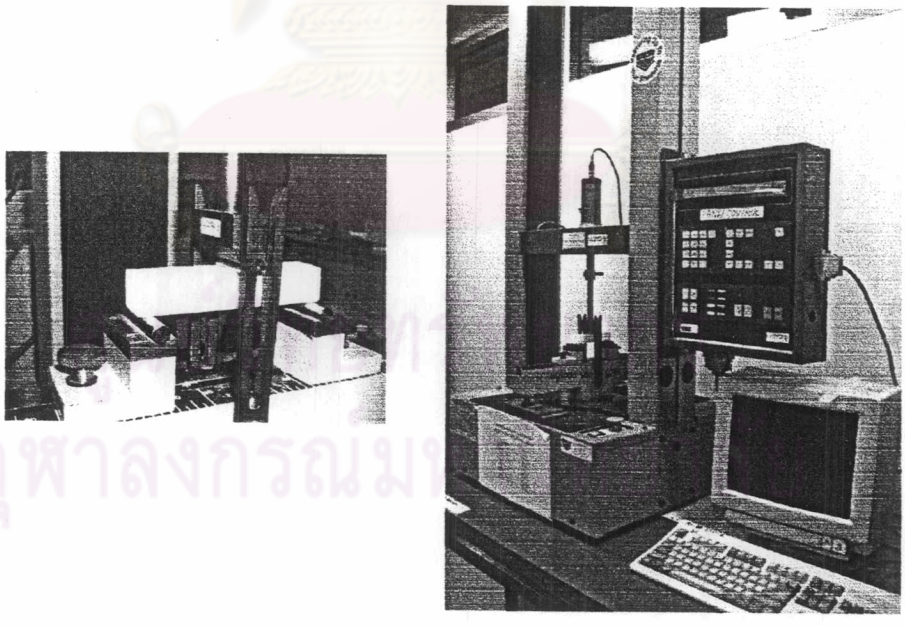
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.6.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (bending or flexural test)

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 1209-1 โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 25 x 120 x 20 ลูกบาศก์มิลลิเมตรด้วยใบมีดคม (รูปที่ 3.8) จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500) ดังรูปที่ 3.9 โดยหัวทดสอบเป็นแบบ 3-point bending เส้นผ่านศูนย์กลางเพลากด 10 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างหัวรองรับ (span length) 100 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วหัวทดสอบ 20 มิลลิเมตรต่อนาที ภาวะในการทดสอบที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 % R.H. (ภาคผนวก ก-8)



รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, LLOYD L500) พร้อมลักษณะการวางชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

3.2.6.3 การทดสอบความแข็ง (hardness test)

เป็นการทดสอบความแข็งของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 2439 โดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 200 x 200 x 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตรด้วยใบมีดคม จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ชนิด shore C (Expanded rubber hardness test, TECLOCK GS-701 N) ดังรูปที่ 3.10 โดยกดค้างไว้ 30 วินาที จึงบันทึกค่าแรงกดเป็นนิวตัน (newtons) (ภาคผนวก ก-9)

รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็ง ชนิด shore C
(Expanded rubber hardness tester, TECLOCK GS-701 N)

2. การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.7 ศึกษาวิธีการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้ในปัจจุบัน [2, 4]

จากที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 ว่าโฟมพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของสารตั้งต้นหลัก 2 ชนิดระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับพอลิออลโดยมีน้ำเป็นสารฟู ดังนั้นในการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเลือกใช้พอลิออล และ/หรือสารเติมแต่งที่ต่างชนิดและปริมาณกันนั้นจำเป็นจะต้องทราบว่าแต่ละสูตรต้องการไอโซไซยาเนตมากน้อยเพียงใดถึงจะทำให้หมู่ไอโซไซยาเนต (NCO-group) ทำปฏิกิริยาพอดีกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH-group) ของพอลิออล และสารเติมแต่ง (reactive additive) ต่าง ๆ [สารเติมแต่งดังกล่าวต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบจึงจะนำมาร่วมใช้ในการคำนวณ เช่น น้ำ สารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) และเชนเอกซ์เทนเดอร์ (chain extender) เป็นต้น] ซึ่งเป็นปริมาณตามทฤษฎี แต่ปริมาณของไอโซไซยาเนตที่ใช้จริงนั้น อาจต้องปรับให้มีปริมาณที่มากเกินพอ (excess) หรือน้อยลงกว่าปริมาณตามทฤษฎี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบของพอลิยูรีเทน สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และผลข้างเคียงต่าง ๆ เช่น ขนาดของระดับการผลิต (scale of manufacture) และภาวะที่ใช้ (ambient condition) เป็นต้น [5, 24]

โดยปกตินั้นปริมาณของไอโซไซยาเนตที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยากับพอลิออล และสารเติมแต่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จาก chemically stoichiometric equivalents ของสารเหล่านี้ที่ทำปฏิกิริยากัน อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะทราบถึงการคำนวณหาปริมาณไอโซไซยาเนตที่ต้องการในแต่ละสูตรนั้นควรจะทำความเข้าใจกับนิยามหรือคำจำกัดความต่อไปนี้ นั่นคือ

- Isocyanate index
- Isocyanate value
- Hydroxyl value
- Acid value
- Water content

- Isocyanate index (Index number)

Isocyanate index คือปริมาณของไอโซไซยาเนตที่ใช้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎี (theoretical equivalent amount) ปกติจะเรียกค่านี้ว่า Index number หรือ Isocyanate index โดยสามารถคำนวณได้จากปริมาณไอโซไซยาเนตที่ใช้จริงต่อปริมาณที่ต้องใช้ตามทฤษฎีคูณด้วย 100 ดังนี้

$$Isocyanate\ index = \frac{Actual\ amount\ of\ isocyanate\ used}{Theoretical\ amount\ of\ isocyanate\ required} \times 100 \qquad (3.2)$$

ตัวอย่างเช่น การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนแผ่นชนิดยืดหยุ่น (flexible polyurethane foam slabstock) มักใช้ค่า Isocyanate index ประมาณ 103-108 (3-8 % excess of isocyanate) และในอุตสาหกรรมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งโดยทั่วไปจะใช้ค่า Isocyanate index ประมาณ 110-140 เป็นต้น

- Isocyanate value (NCO content)

Isocyanate value คือค่าร้อยละโดยน้ำหนักของหมู่ไอโซไซยาเนต (NCO group) ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของสารไอโซไซยาเนต ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$Isocyanate\,value\,(NCO\,content) = \%-NCO\,group = \frac{42 \times functionality}{Molecular\,weight} \times 100$$

หรือ

$$= \frac{4200}{Equivalent\ \ weight} \qquad (3.3)$$

- Hydroxyl value (Hydroxyl number)

Hydroxyl value (OHV) คือค่าความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิออลที่ว่องไวกับหมู่ไอโซไซยาเนต โดยมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม (mgKOH/g) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$OHV = \frac{56.1 \times \%\,Hydroxyl\,group}{1.7} = \%\,Hydroxyl\,group \times 33$$

หรือ

$$OHV \ = \ \frac{56.1 \times 1000}{Equivalent\ weight} \qquad (3.4)$$

$$Number\ \ of\ \ equivalent \ = \ \frac{Actual\ \ amount\ \ of\ \ polyol\ \ used}{Equivalent\ \ weight} \qquad (3.5)$$

- Acid value

Acid value คือค่าความเป็นกรดของพอลิออลที่มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม (mg KOH/g)

- Water content

Water content คือปริมาณน้ำที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ NCO 2 หมู่ ซึ่งแสดงออกมาในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt)

$$Equivalent\ weight\ of\ water = \frac{Molecular\ weight}{funtionality} \qquad (3.6)$$

$$= \frac{18}{2}$$

$$= 9$$

การคำนวณหาอัตราส่วนหรือปริมาณขององค์ประกอบที่ใช้

โดยทั่วไปการคำนวณหาอัตราส่วนขององค์ประกอบที่ต้องการสำหรับการผลิตพอลิยูรีเทน จะคำนวณหาปริมาณส่วนโดยน้ำหนัก (part by weight : pbw) ของไอโซไซยาเนตที่ต้องการในการทำปฏิกิริยากับพอลิออล 100 ส่วนโดยน้ำหนัก และสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา

ดังนั้นข้อมูลที่มีความจำเป็นในการคำนวณจะประกอบไปด้วย

- Isocyanate index ของไอโซไซยาเนตที่ต้องการ
- Isocyanate value ของไอโซไซยาเนต
- Hydroxyl value ของพอลิออลและสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา
- Acid value ของพอลิออลและสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา
- Water content ของพอลิออลและสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา
- ปริมาณสารฟู (น้ำ) ที่ใช้

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

ถ้าต้องการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

พอลิออลพื้นฐาน 3 ชนิด (ใช้พอลิออลทั้งหมด 100 pbw ในที่นี้สมมติให้เป็น 100 กรัม)

- Re A 8411	15.0	กรัม	} 100 กรัม
- RP 4260	50.0	กรัม	
- RP 4010	35.0	กรัม	
สารฟู (น้ำ)	5.0	กรัม	
สารเร่งปฏิกิริยา	0.6	กรัม	
สารลดแรงตึงผิว	2.0	กรัม	

ต้องใช้ปริมาณไอโซไซยาเนต BX 9201 ปริมาณเท่าใด เมื่อกำหนด Isocyanate index เท่ากับ 130

<u>วิธีการ</u>

จากข้อมูลที่มี ทราบว่า

- Isocyanate index ของที่ต้องการ = 130
- Isocyanate value ของ BX 9201 = 32
- Hydroxyl value ของพอลิออลและสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามีค่าดังนี้
  - Re A 8411 = 55 mgKOH/g
  - RP 4260 = 360 mgKOH/g
  - RP 4010 = 640 mgKOH/g

- Acid value ของพอลิออลและสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามีค่าดังนี้
  - Re A 8411 = 1.0 mgKOH/g
  - RP 4260 = -
  - RP 4010 = -
- Water content ของพอลิออลและสารเติมแต่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (น้อยมาก)
- ปริมาณสารฟู (น้ำ) ที่ใช้ = 5.0 กรัม

<u>คำนวณ</u>

Equivalent weight ของ ReA 8411 $= \frac{56100}{55+1} = 1001.79$

Number of equivalent ของ ReA 8411 $= \frac{15}{1001.79} = 0.015$

Equivalent weight ของ RP 4260 $= \frac{56100}{360} = 155.83$

Number of equivalent ของ RP 4260 $= \frac{50}{155.83} = 0.321$

Equivalent weight ของ RP 4010 $= \frac{56100}{640} = 87.66$

Number of equivalent ของ RP 4010 $= \frac{35}{87.66} = 0.399$

Equivalent weight ของ น้ำ $= \frac{18}{2} = 9.00$

Number of equivalent ของ น้ำ $= \frac{5}{9} = 0.556$

ดังนั้น Number of equivalent ทั้งหมด $= 0.015 + 0.321 + 0.399 + 0.556$

$= 1.291$

Equivalent weight ของ TDI (BX 9201) $= \frac{4200}{32}$

$= 131.25$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ Isocyanate index = 100 จะใช้ TDI (BX 9201)

= (Equivalent weight of TDI) x (No. of Equivalent)

= 131.25 x 1.291

= 169.44 กรัม

ดังนั้นที่ Isocyanate index = 130 จะต้องใช้ TDI (BX 9201)

$$= \frac{130}{100} \times 169.44$$

= 220.27 กรัม

ดังนั้นในการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนที่มีพอลิออลทั้ง 3 ชนิด (ReA 8411, RP 3003 และ RP 4260) 100 กรัม จะต้องใช้ไอโซไซยาเนต (BX 9201) ในปริมาณ 220.27 กรัม นั่นเอง

3.2.8 ทดลองเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้นจากพอลิออล (polyols) ที่จัดหาได้ภายในประเทศแต่ละชนิด

เมื่อทราบถึงวิธีการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนในข้อ 3.2.7 แล้ว จึงได้ทำการทดลองเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้พอลิออลพื้นฐานแต่ละชนิดเป็นหลัก เพื่อศึกษาลักษณะของโฟมตัวอย่างที่เตรียมได้จากพอลิออลพื้นฐานแต่ละชนิด โดยผลที่ได้ในขั้นตอนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการวางแผนการออกสูตรในข้อ 3.2.9 ต่อไป

ชนิดของพอลิออลพื้นฐานที่จัดหาจากภายในประเทศ มีดังนี้

- ReA 8411 OHV = 55
- ReA 8770 OHV = 57
- RP 3003 OHV = 56
- RP 4260 OHV = 360
- RP 4414 OHV = 490
- RP 4010 OHV = 640

สำหรับการออกสูตรโฟมเพื่อศึกษาลักษณะของโฟมจากพอลิออลพื้นฐานแต่ละชนิดนี้จะต้องกำหนดให้ สารเติมแต่งอื่น ๆ คงที่ในทุกสูตร ทั้งในด้านชนิดและปริมาณ ทั้งนี้จะทำการแปรผันชนิดของพอลิออลและปริมาณไอโซไซยาเนตที่ต้องการเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยกำหนดให้

- Isocyanate index = 130
- สารเร่งปฏิกิริยา : DMCHA = 0.2 pbw
- สารลดแรงตึงผิว : B 8444 = 2.0 pbw
- สารฟู : น้ำกลั่น = 5.0 pbw

การออกสูตรเบื้องต้นจากพอลิออลพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 3.1-3.6

ตารางที่ 3.1 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (ReA 8411) (สูตรที่ 1)

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	ReA 8411	100
Distilled water	-	5
Catalyst	DMCHA	0.2
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	111.60 (ตามการคำนวณ)

หมายเหตุ ผลรวมของพอลิออล (polyol) ทั้งหมด เท่ากับ 100 pbw

ตารางที่ 3.2 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (ReA 8770) (สูตรที่ 2)

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	ReA 8770	100
Distilled water	-	5
Catalyst	DMCHA	0.2
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	112.20 (ตามการคำนวณ)

ตารางที่ 3.3 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 3003) (สูตรที่ 3)

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	RP 3003	100
Distilled water	-	5
Catalyst	DMCHA	0.2
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	111.90 (ตามการคำนวณ)

ตารางที่ 3.4 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 4260) (สูตรที่ 4)

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	RP 4260	100
Distilled water	-	5
Catalyst	DMCHA	0.2
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	204.31 (ตามการคำนวณ)

ตารางที่ 3.5 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 4414) (สูตรที่ 5)

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	RP 4414	100
Distilled water	-	5
Catalyst	DMCHA	0.2
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	243.90 (ตามการคำนวณ)

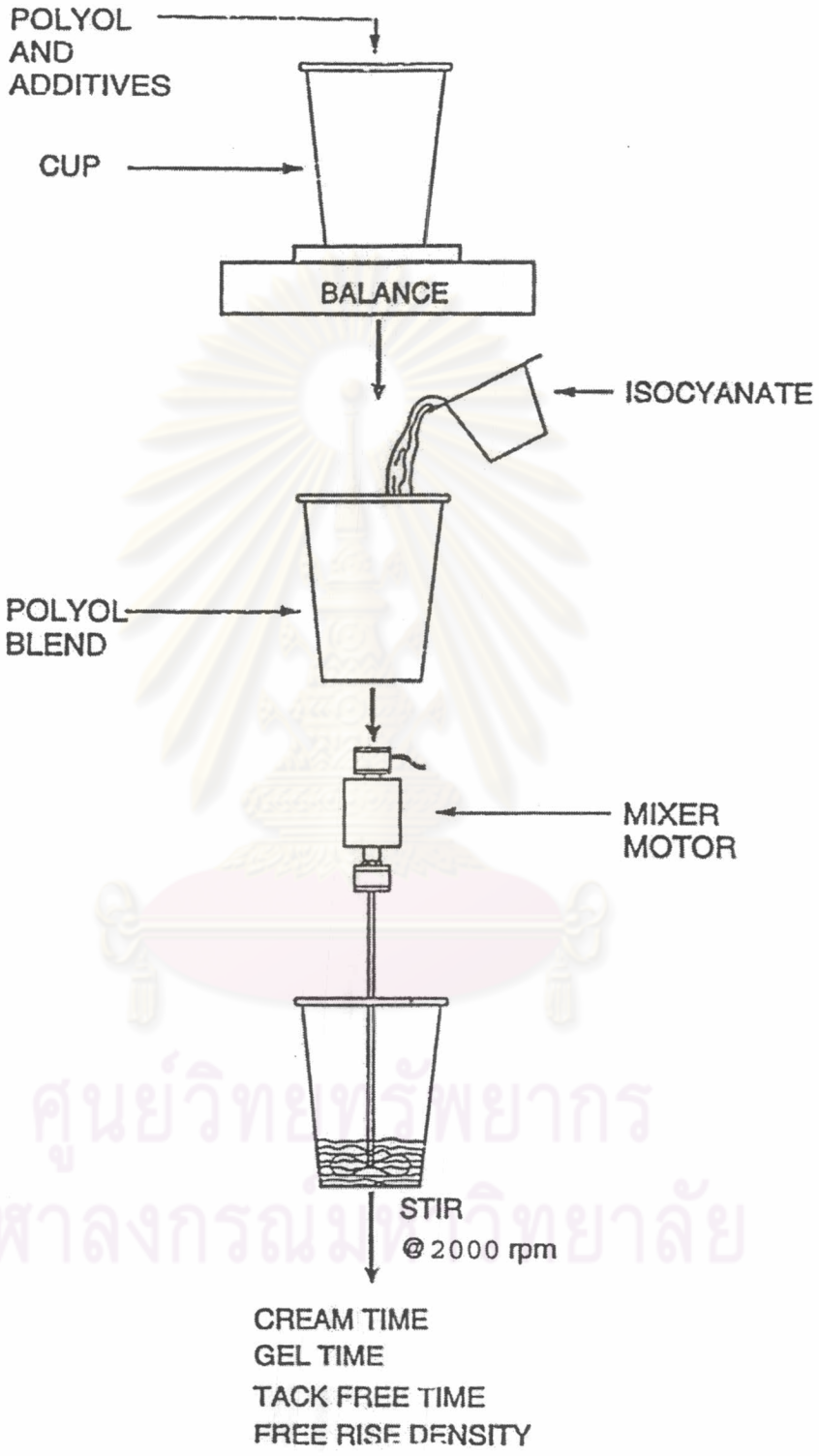
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 สูตรองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนเบื้องต้น (RP 4010) (สูตรที่ 6)

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	RP 4010	100
Distilled water	-	5
Catalyst	DMCHA	0.2
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	289.51 (ตามการคำนวณ)

ขั้นตอนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

1. ชั่งพอลิออลตามอัตราส่วนในสูตรข้างต้นใส่ลงในภาชนะพลาสติกที่แยกภาชนะจากโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต
2. เติมน้ำ สารเร่งปฏิกิริยา และสารลดแรงตึงผิวลงในพอลิออล จากนั้นทำการกวนส่วนผสมให้เข้ากัน (ในขั้นตอนนี้สามารถกวนด้วยมือได้)
3. เติมโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตลงไปในของผสม จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (high-speed mixer) ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 8-10 วินาที (ขึ้นอยู่กับเวลาที่เกิดครีม (cream time) ของแต่ละสูตร)
4. เทของผสมลงในแม่แบบเปิด และปล่อยให้โฟมเกิดการฟูตัวอย่างอิสระ
5. ทำการบันทึกข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (reaction profile) ซึ่งแสดงออกมาเป็นค่า cream time (ct), gel time (gt) และ tack free time (tft) ตามลำดับ
6. ทำความสะอาดเครื่องปั่นผสมความเร็วสูงด้วยอะซีโตน (acetone)
7. เมื่อชิ้นงานโฟมแห้งจึงนำโฟมออกจากแม่แบบ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-2 วัน เพื่อให้โฟมเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ [28]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.9 วางแผนการทดลอง (experimental design) ในการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ

การวางแผนการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนในระดับห้องปฏิบัติการจะทำการแปรผันชนิดของพอลิออลและสารเร่งปฏิกิริยาเป็นหลัก และกำหนดให้สารเติมแต่งอื่นคงที่ โดยกระทำที่อุณหภูมิห้อง (30-32 องศาเซลเซียส) สำหรับการวางแผนการออกสูตรนั้นจะอ้างอิงผลที่ได้ในข้อ 3.2.8 เป็นเกณฑ์ นั่นคือจะพิจารณาผลของลักษณะชิ้นงานที่ได้จากพอลิออลพื้นฐานแต่ละชนิดนำมาประกอบการวางแผน ซึ่งแผนการออกสูตรโฟมประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : หาชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม
ขั้นตอนที่ 2 : หาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 1 : หาชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากผลการทดลองในข้อ 3.2.8 จะทำการเลือกสูตรที่มีผลของโฟมตัวอย่างที่ได้ค่อนข้างดี กล่าวคือโครงสร้างเซลล์โฟมค่อนข้างละเอียด ความหนาแน่นใกล้เคียงกับชิ้นงานต้นแบบ และไม่มีการหดตัวของชิ้นงาน มาทำการแปรผันชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา โดยพิจารณาจากเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟมเป็นสำคัญ เพื่อให้ได้สารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสม คือให้ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบมากที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยเลือกสูตรที่ค่อนข้างดีมา 1 สูตร แล้วทำการแปรผันชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การแปรผันชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol	(สูตรที่ดึงมา)[1]	100
Blowing agent (Distilled water)	-	5
Catalyst	(แปรผัน)[2]	(แปรผัน)[3]
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	ตามการคำนวณ
Stirring speed = 2,000 rpm		
Stirring time = 8-10 second		
Storage temperature of reactants = 30-32 degree C		

หมายเหตุ

[1] พอลิออลพื้นฐานที่เลือกมา 1 ชนิดจากผลที่ได้ในข้อ 3.2.8

[2] แปรผันชนิดของสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่จัดหาได้จากภายในประเทศ ดังนี้

- Dimethylcyclohexylamine (DMCHA) (Polycat® 8 : PC 8, trade name)
- Dimethyllethanolamine (DMEA)
- Sol^{n} of 33 % triethylenediamine and 67 % dipropylene glycol (Dabco® 33-LV, trade name)
- Pentamethyldiethylene triamine (Polycat® 5 :PC 5, trade name)

[3] ปริมาณที่ทำการแปรผันแต่ละชนิดคือ 0.2, 0.4 และ 0.6 pbw จากพอลิออลทั้งหมด 100 pbw

ขั้นตอนที่ 2 : หาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม

เมื่อได้ชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม จากขั้นตอนที่ 1 แล้วจากนั้นจึงเป็นการหาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

กำหนดให้ (สรุปดังตารางที่ 3.8)

- ปริมาณของพอลิออลในแต่ละสูตรคงที่คือ 100 pbw
- สารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม (จากผลข้อ 3.2.9 ขั้นตอนที่ 1) ทั้งชนิดและปริมาณ
- สารลดแรงตึงผิวคงที่ทั้งชนิดและปริมาณ (อ้างอิงตามเอกสารทางวิชาการ)
- สารฟูคงที่ (ใช้น้ำในปริมาณคงที่) อ้างอิงผลการวิเคราะห์ค่า water content ของสารประกอบพอลิออลที่ผู้ประกอบการใช้อยู่
- โทลูอีนไดไอไซโซยาเนตพรีพอลิเมอร์ (Isocyanate index 130)
- สารตั้งต้นทุกชนิดเก็บที่อุณหภูมิห้อง (30–32 องศาเซลเซียส)
- ความเร็วรอบในการปั่นผสมประมาณ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 8-10 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.8 การแปรผันชนิดของพอลิออลเพื่อหาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ปริมาณ (part by weight : pbw)
Polyol ชนิดที่ 1	(แปรผัน)	(แปรผัน)
Polyol ชนิดที่ 2	(แปรผัน)	(แปรผัน)
Polyol ชนิดที่ 3	(แปรผัน, ถ้ามี)	(แปรผัน, ถ้ามี)
Polyol ชนิดที่ 4	(แปรผัน, ถ้ามี)	(แปรผัน, ถ้ามี)
Blowing agent (Distilled water)	-	5
Catalyst	(จากผลข้อ 3.2.9 ตอนที่ 1)	(จากผลข้อ 3.2.9 ตอนที่ 1)
Surfactant	B 8444	2
TDI prepolymer (Isocyanate index = 130)	BX 9201	ตามการคำนวณ

เพื่อง่ายต่อการวางแผนการออกสูตรจึงกำหนดตัวแปรดังนี้

กำหนดให้

ReA 8411 = F1
ReA 8770 = F2
RP 3003 = F3
} อ่อนหรือยืดหยุ่น (Flexible)

RP 4260 = R1
RP 4414 = R2
RP 4010 = R3
} แข็ง (Rigid)

ทำการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนโดยพิจารณาชิ้นงานที่ได้จากพอลิออลพื้นฐานแต่ละชนิด ซึ่งจากผลการทดลองในข้อ 3.2.8 พบว่าชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็น 2 จำพวกคือ

F1 - F3 มีลักษณะแบบอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น (หดตัวสูง)

R1 - R3 มีลักษณะแบบแข็ง (ไม่หดตัวแต่เปราะ)

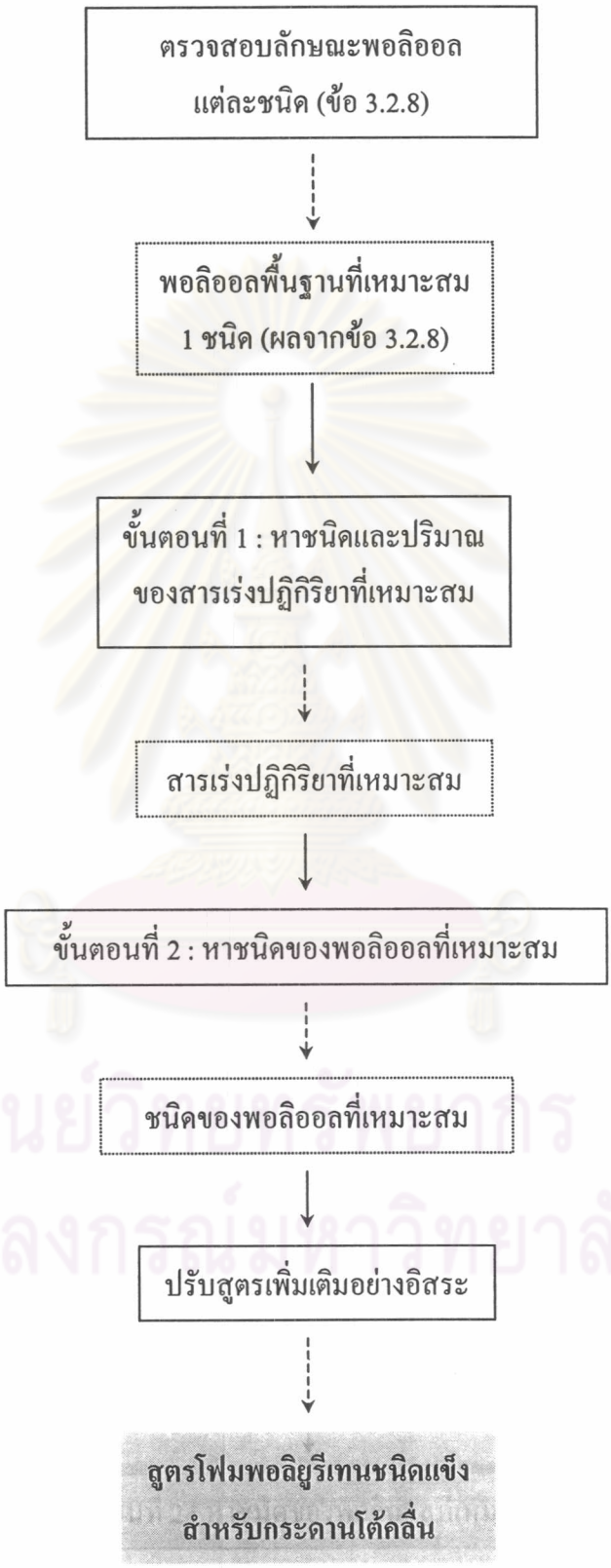
ดังนั้นจึงต้องทำการออกสูตรโฟม ในลักษณะที่ต้องมีทั้งพอลิออลที่ให้โฟมแบบอ่อนนุ่ม (F1-F3) กับแบบแข็งเปราะ (R1-R3) ผสมกัน เพื่อป้องกันการหดตัวดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 แผนการออกสูตรโฟมเพื่อหาชนิดของพอลิออลที่เหมาะสม

ลักษณะพอลิออล	สูตรส่วนผสมของพอลิออล (จากการกำหนดตัวแปร)	ปริมาณของพอลิออลแต่ละชนิด (จากพอลิออลทั้งหมด 100 pbw) (pbw)	จำนวนสูตร (สูตร)
(อ่อน : แข็ง, 1 : 1)	(F1,R1) (F1,R2) (F1,R3) (F2,R1) (F2,R2) (F2,R3) (F3,R1) (F3,R2) (F3,R3)	50	9
(อ่อน : แข็ง, 1 : 2)	(F1,R1,R2) (F1,R2,R3) (F1,R1,R3) (F2,R1,R2) (F2,R2,R3) (F2,R1,R3) (F3,R1,R2) (F3,R2,R3) (F3,R1,R3)	33.33	9
(อ่อน : แข็ง, 2 : 1)	(F1,F2,R1) (F1,F2,R2) (F1,F2,R3) (F1,F3,R1) (F1,F3,R2) (F1,F3,R3) (F2,F3,R1) (F2,F3,R2) (F2,F3,R3)	33.33	9
(อ่อน : แข็ง, 1 : 3)	(F1,R1,R2,R3) (F2,R1,R2,R3) (F3,R1,R2,R3)	25	3
(อ่อน : แข็ง, 2 : 2)	(F1,F2,R1,R2) (F1,F2,R1,R3) (F1,F2,R2,R3) (F1,F3,R1,R2) (F1,F3,R1,R3) (F1,F3,R2,R3) (F2,F3,R1,R2) (F2,F3,R1,R3) (F2,F3,R2,R3)	25	9
(อ่อน : แข็ง, 3 : 1)	(F1,F2,F3,R1) (F1,F2,F3,R2) (F1,F2,F3,R3)	25	3
(แข็ง : แข็ง, 1 : 1)	(R1,R2) (R1,R3) (R2,R3)	50	3
(แข็ง : แข็ง : แข็ง, 1 :1 :1)	(R1,R2,R3)	33.33	1
รวมทั้งหมด			46

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปการวางแผนการออกสูตรโฟม ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนผังการออกสูตรโฟม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.10 เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามแผนการทดลองในภาวะที่กำหนด

หลังจากศึกษาวิธีการออกสูตรโฟมและวางแผนการออกสูตรโฟม จึงทำการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนตามวิธีและขั้นตอนที่กำหนดไว้ (ในข้อ 3.2.9)

3.2.11 วิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (reaction profile) และสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากแผนการทดลอง

3.2.11.1 ตรวจสอบข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมพอลิยูรีเทน

เป็นการเก็บและนำข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมในแต่ละสูตร (ผลข้อ 3.2.10) มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาของโฟมต้นแบบ (ผลข้อ 3.2.2)

3.2.11.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงานตัวอย่าง

เป็นการตรวจดูลักษณะภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างในส่วนของสีสัน ลักษณะการสัมผัสด้วยมือ และความละเอียดของเซลล์โฟมที่สังเกตเห็นจากสายตา เป็นต้น

3.2.11.3 การหาค่าความหนาแน่น

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของโฟมที่ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระ (free rise density) ตามมาตรฐาน ISO 845 โดยวัดมวลและปริมาตรของโฟมตัวอย่างที่ตัดจากบริเวณตรงกลางของชิ้นงานแล้วคำนวณค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างตามสมการที่ 3.1

3.2.12 คัดเลือกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนจากผลการออกสูตรโฟมในระดับห้องปฏิบัติการเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบ

ทำการคัดเลือกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนจากผลการออกสูตร เพื่อนำสูตรที่มีความใกล้เคียงกับโฟมต้นแบบไปทำการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้ได้โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เหมาะสมจะใช้เป็นโครงสร้างหลักของกระดานโต้คลื่นตามที่ผู้ประกอบการต้องการ ทั้งนี้การคัดเลือกสูตรโฟมจะพิจารณาจากข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์และตรวจสอบได้ในหัวข้อ 3.2.11 เป็นเกณฑ์

3.2.13 ปรับปรุงสูตรและภาวะการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

เป็นการนำผลการออกสูตรโฟมในข้อ 3.2.12 มาทำการปรับปรุงทั้งในด้านองค์ประกอบและภาวะการเตรียมโฟมอย่างอิสระ เพื่อให้ได้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบมากที่สุด ซึ่งการปรับสูตรต่าง ๆ กระทำดังต่อไปนี้

3.2.13.1 การปรับเปลี่ยนสูตรองค์ประกอบ

- การปรับเปลี่ยนปริมาณสารตั้งต้นรวมทั้งสารเติมแต่ง ตามลักษณะเด่นของสารนั้น ๆ โดยพิจารณาจากข้อด้อยของชิ้นงานที่เตรียมได้ในข้อ 3.2.12 เช่น ถ้าชิ้นงานตัวอย่างจากสูตรที่ได้มีความอ่อนนุ่มเกินไป จะทำการลดปริมาณพอลิออลชนิดที่ให้ผลแบบอ่อนนุ่มลง แต่ไปเพิ่มปริมาณพอลิออลชนิดที่ให้ความแข็งแทน หรือถ้าปฏิกิริยาของโฟมเกิดเร็วเกินไปก็ทำการปรับลดปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาลง เป็นต้น
- การเติมสารสีขาว คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ลงไป เพื่อทำให้ชิ้นงานมีสีขาวขึ้น

3.2.13.2 การปรับภาวะการทดลอง

- การลดอุณหภูมิของสารตั้งต้นที่ใช้ลงมาที่ประมาณ 14-16 และ 6-8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- เพิ่มระยะเวลาในการปั่นผสมให้มากขึ้นเพื่อความเข้ากันได้ดีขององค์ประกอบ แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นกับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟมในสูตรนั้น ๆ

3.2.14 ระบุสูตรและภาวะการเตรียมที่เหมาะสม

ทำการสรุปสูตรและภาวะการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในแม่แบบปิดที่จัดเตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ และเตรียมชิ้นงานในระดับปฏิบัติการจริง ณ โรงงานผู้ประกอบการ

3.2.15 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม

3.2.15.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงานตัวอย่าง

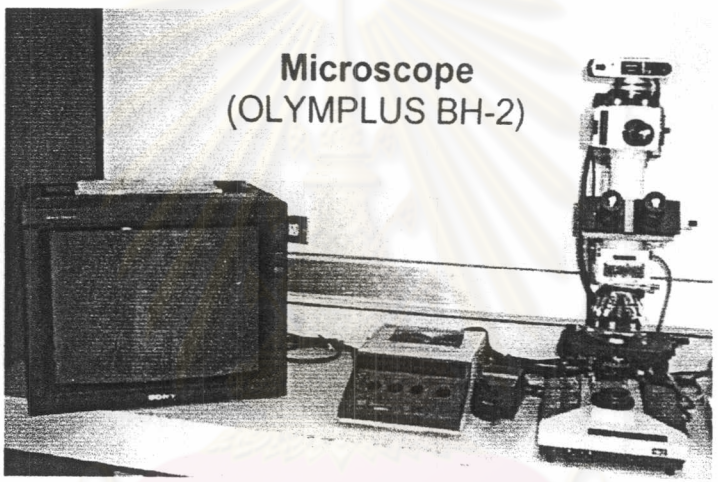
เป็นการตรวจดูลักษณะภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากสูตรที่เหมาะสม (ข้อ 3.2.14) ในส่วนของสีสัน ลักษณะการสัมผัสด้วยมือ และความละเอียดของเซลล์โฟมที่สังเกตเห็นจากสายตา เป็นต้น

3.2.15.2 การหาค่าความหนาแน่น

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของโฟมที่ปล่อยให้ฟูตัวอย่างอิสระตามมาตรฐาน ISO 845 โดยวัดมวลและปริมาตรของโฟมตัวอย่างที่ตัดจากบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างตามสมการที่ 3.1

3.2.15.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา (โดยกล้องจุลทรรศน์)

เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์โฟม เช่น ขนาด ความสม่ำเสมอ และความละเอียด ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope, Olymplus BH-2) (รูปที่ 3.13) ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างจะถูกตัดให้มีขนาดประมาณ 5 ซม. x 5 ซม. x 5 ซม. โดยเลือกตัดบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope, Olymplus BH-2)

3.2.16 เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสมในแม่แบบปิดที่จัดเตรียมขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ

เป็นการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่ปรับปรุงแล้ว (ข้อ 3.2.14) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นที่ผู้ประกอบการเตรียมได้ในปัจจุบันซึ่งเป็นการเตรียมในแม่แบบปิดเช่นกัน

สำหรับการเตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในแม่แบบปิดกระทำได้ดังนี้

1. คัดเลือกสูตรโฟมที่จะทำการเตรียม
2. ทาสารช่วยให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ (mold release agent) ที่ด้านในของแม่แบบทุกด้าน เพื่อกันการติดแม่แบบของชิ้นงาน และง่ายต่อการถอดชิ้นงาน

3. หาปริมาณของสารตั้งต้น (กรัม) ที่ต้องใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานในแม่แบบปิดโดยคำนวณจากสมการที่ 3.1 ในกรณีนี้เราทราบค่าความหนาแน่น (D) ที่ต้องการและปริมาตร (V) ของแม่แบบปิด ดังนั้นจึงสามารถหาปริมาณสารตั้งต้น (m) ที่ต้องใช้ได้จาก

$$m = \frac{DV}{10^6}$$

เมื่อ m = ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)
D = ความหนาแน่นของโฟมที่ต้องการ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
V = ปริมาตรของแม่แบบ (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

หมายเหตุ
- ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ต้องคิดเผื่อกรณีสารตั้งต้นติดค้างอยู่ในภาชนะผสม หากชิ้นงานที่เตรียมได้ในแม่แบบปิดมีลักษณะที่ไม่เต็มแม่แบบ จำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ขึ้น
- การใช้สารตั้งต้นในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่สูงขึ้น

4. พยายามปรับสูตรในส่วนของปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิดให้สูตรที่ได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารตั้งต้นที่ต้องใช้ (ในข้อ 3) กล่าวคือปริมาณของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตรวมกับสารประกอบพอลิออล (polyol composition) จากสูตรที่ออกต้องมีความใกล้เคียงกับปริมาณสารตั้งต้นที่คำนวณได้
5. เตรียมชิ้นงานโดยใช้วิธีเดียวกับที่เตรียมในแม่แบบเปิด (open mold) (ข้อ 3.2.8) แต่ต้องพยายามปั่นผสมองค์ประกอบให้เข้ากันมากที่สุด โดยใช้เครื่องปั่นผสมที่มีกำลังขับและความเร็วรอบที่สูง (ประมาณ 2000 รอบต่อนาที) อีกทั้งยังต้องปั่นผสมในเวลาที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะ ค่า cream time ของแต่ละสูตรด้วย
6. ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ หลังจากทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 30-40 นาที
7. ตั้งชิ้นงานทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-2 วัน เพื่อให้โฟมพอลิยูรีเทนเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.2.17 แปรผันปริมาณสารฟูในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

จากสูตรที่เหมาะสม (ข้อ 3.2.14) ทำการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่ใช้ เพื่อให้ทราบถึงผลของปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ที่มีต่อความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิยูรีเทน โดยจะทำการเตรียมชิ้นงานในแม่แบบเปิดและแม่แบบปิด และแปรผันปริมาณสารฟูหรือน้ำกลั่นที่ปริมาณ 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 pbw ตามลำดับ

3.2.18 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากการแปรผันปริมาณสารฟู

3.2.18.1 การหาค่าความหนาแน่น

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟูที่เตรียมในแม่แบบเปิด และในแม่แบบปิด (ข้อ 3.2.17) ตามมาตรฐาน ISO 845 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.4.2

3.2.19 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนจากการแปรผันปริมาณสารฟู

3.2.19.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงานที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู ตามมาตรฐาน ISO 844 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.1

3.2.19.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟู ตามมาตรฐาน ISO 1209-1 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.2

3.2.19.3 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ทำการแปรผันปริมาณสารฟูตามมาตรฐาน ISO 2439 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.3

3.2.20 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรที่เหมาะสมกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการสรุปสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งในส่วนของสูตรที่เหมาะสมที่เตรียมขึ้นในแม่แบบปิดในระดับห้องปฏิบัติการ (ข้อ 3.2.20) เปรียบเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบที่เตรียมในแม่แบบปิดที่มีลักษณะเดียวกันโดยใช้สารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนี้

3.2.20.1 การหาค่าความหนาแน่น

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 845 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.4.2

3.2.20.2 การทดสอบความต้านทานแรงกด

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 844 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.1

3.2.20.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 1209-1 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.2

3.2.20.4 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความแข็งของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 2439 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.3

3.2.20.5 การทดสอบเสถียรภาพทางรูปร่าง (dimensional stability test)

เป็นการทดสอบเสถียรภาพทางรูปร่างของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 2796 โดยทำการตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาด 100 x 100 x 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตรด้วยใบมีดคม (รูปที่ 3.14) และวัดขนาดที่แน่นอนของชิ้นงานตัวอย่างเก็บไว้ จากนั้นนำชิ้นงานไปวางในตะแกรงลวดที่อากาศผ่านได้ทั่วทั้งชิ้นงาน แล้วนำไปไว้ในภาวะต่าง ๆ ดังนี้ คือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในภาวะแห้ง (dry condition)

- ที่ -20 องศาเซลเซียส (วางในตู้เย็นโดยใส่ซิลิกาเจลเพื่อดูดความชื้น)
- ที่ 30 องศาเซลเซียส (วางไว้ใน desicator)
- ที่ 80 องศาเซลเซียส (วางไว้ในตู้อบ)

ในภาวะชื้น (100 % R.H.)

- ที่ 60 องศาเซลเซียส (แช่น้ำแล้ววางไว้ในตู้อบ)

จากนั้นทิ้งชิ้นงานไว้ตามเวลาที่กำหนดคือ 20 ชั่วโมง 48 ชั่วโมง 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ หลังจากเวลาครบกำหนดในแต่ละช่วงจึงนำชิ้นงานออกมาวัดขนาดที่เปลี่ยนแปลง

3. การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในระดับปฏิบัติการจริง

3.2.21 เตรียมชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนในระดับปฏิบัติการจริง

ทำการเตรียมชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างหลักของกระดานโต้คลื่นโดยใช้เครื่องมืออุปกรณ์ และภาวะการเตรียมในระดับปฏิบัติการจริงที่ ส่วนการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน บริษัท คอบรา อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ซึ่งใช้แม่แบบที่ทำจากปูนซีเมนต์ มีขนาดความยาวของกระดานโต้คลื่น 6 ฟุต 2 นิ้ว (ประมาณ 185 เซนติเมตร)

หลังจากเตรียมชิ้นงานแล้วต้องทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 5-6 วัน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์

3.2.22 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง

เป็นการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงดังต่อไปนี้

3.2.22.1 การศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงาน

เป็นการตรวจดูลักษณะภายนอกของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน ในส่วนของสีสัน ลักษณะการสัมผัสด้วยมือ และความละเอียดของเซลล์โฟมที่สังเกตเห็นจากสายตา เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.22.2 การหาค่าความหนาแน่น

เป็นการหาค่าความหนาแน่น (core density) ของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง ตามมาตรฐาน ISO 845 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.4.2

3.2.22.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างของเซลล์โฟมของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง ในลักษณะเดียวกับในข้อ 3.2.5.2

3.2.23 วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง

เป็นการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริงดังต่อไปนี้

3.2.23.1 การทดสอบความต้านทานแรงกด

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง ตามมาตรฐาน ISO 844 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.1

3.2.23.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

เป็นการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง ตามมาตรฐาน ISO 1209-1 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.2

3.2.23.3 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในระดับปฏิบัติการจริง ตามมาตรฐาน ISO 2439 ในลักษณะเดียวกับข้อ 3.2.6.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย