

## บทที่ 2

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

#### 2.1 สารเคมี

สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| สารเคมี   | ตัวย่อ | เครื่องหมายการค้าและบริษัทจำหน่าย         |
|---|--------|---|
| <b>เรซิน (Resin)</b>  |        |   |
| อีพ็อกซีเรซิน<br>(Diglycidyl ether of bisphenol A)                      | DGEBA  | D.E.R. <sup>®</sup> 331(Dow Chemical Co.) |
| <b>สารทำให้แข็ง (Hardener)</b>  |        |   |
| เมทิลเตตระไฮโดรฟทาติกแอนไฮไดรด์<br>(Methyltetrahydrophthalic anhydride) | MTHPA1 | Lindau 46 QC                              |
| เมทิลเตตระไฮโดรฟทาติกแอนไฮไดรด์<br>(Methyltetrahydrophthalic anhydride) | MTHPA2 | LONZA SPA (MTHPA EG/NT)                   |
| เมทิลเฮกซะไฮโดรฟทาติกแอนไฮไดรด์<br>(Methylhexahydrophthalic anhydride)  | MHHPA  | LONZA SPA (MHHPA/SW)                      |
| <b>ตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator)</b>                                   |        |   |
| ไตรเมทิลอะมิโนเมทิลฟีนอล<br>(Tris-2,4,6-dimethylaminomethyl phenol)     | DMP-30 | Air Product (Ankamine K54)                |
| เอทิล เมทิล อิมิดาโซล<br>(2-ethyl-4-methyl imidazole)                   | EMI    | Air Product (Imicure <sup>®</sup> )       |
| เบนซิลไดเมทิลเอมีน<br>(Benzyl dimethylamine)                            | BDMA   | Air Product (Ankamine BDMA)               |
| <b>อื่นๆ</b>  | -      |   |
| สารหล่อลื่น (Releasing agent)   |        | Solar Wax                                 |
| สารทำความสะอาด (Cleaning agent)   |        |   |

ตาราง 2 รายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| สารเคมี | สี              | ความหนืด<br>$\eta(25^{\circ}\text{C})$ | ความหนา<br>แน่นจำเพาะ<br>(g/ml) | Weight Per<br>Epoxide<br>(WPE) | Anhydride<br>Equivalent<br>(AE) |
|---------|-----------------|--|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| DGEBA   | ใส ไม่มีสี      | 11,800 (cPs)                           | 1.16                            | 189                            | -                               |
| MTHPA1  | สีน้ำตาลเข้ม    | 60 (cPs)                               | 1.24                            | -                              | 166                             |
| MTHPA2  | สีเหลืองอ่อน ใส | 58 (cPs)                               | 1.19                            | -                              | 166                             |
| MHHPA   | ใส ไม่มีสี      | 53 (cPs)                               | 1.14                            | -                              | 168                             |
| DMP-30  | สีเหลืองอ่อน    | 2 (P)                                  | 0.97                            | -                              | -                               |
| EMI     | สีเหลืองน้ำตาล  | 6500 (cPs)                             | 0.99                            | -                              | -                               |
| BDMA    | ใส ไม่มีสี      |  | 0.89                            | -                              | -                               |

## 2. 2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

2.2.1 เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน (Microwave oven) ยี่ห้อ SANYO<sup>®</sup> ซึ่งแสดงรายละเอียดในตาราง 3 และภาพประกอบ 16

ตาราง 3 รายละเอียดของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

|                            | SANYO <sup>®</sup> 800 วัตต์ รุ่น EM-X 412       |
|----------------------------|--|
| กำลังไฟ                    | 220 โวลต์ AC 50 เฮิทซ์<br>1,300 วัตต์            |
| เข้าพุท                    | 800 วัตต์  |
| ความถี่ในการทำงาน          | 2,450 เฮิทซ์                                     |
| ขนาดของตัวเครื่องด้านนอก   | 305 x 525 x 431 มิลลิเมตร<br>(สูง x กว้าง x ลึก) |
| ขนาดของช่องปรุงอาหาร       | 219 x 350 x 355 มิลลิเมตร<br>(สูง x กว้าง x ลึก) |
| ความจุของเตาอบ             | 28 ลิตร  |
| น้ำหนักสุทธิ               | ประมาณ 17.9 กิโลกรัม                             |
| ระบบการปรุงอาหารให้ทั่วถึง | ระบบจานหมุน                                      |

2.2.2 เตาอบ (Oven) รุ่น D 06061, UM 500 ยี่ห้อ MEMMERT<sup>®</sup> ความจุ 108 ลิตร ขนาดภายใน 560 x 480 x 400 มิลลิเมตร (กว้าง x สูง x ลึก) ดังแสดงในภาพประกอบ 17

2.2.3 เครื่องทดสอบแรงดึงและคดโค้ง (Tensile and Flexural test), Universal Testing Machine, UTM, LLOYD<sup>®</sup> instrument และ AG -100 kN SHIMADZU<sup>®</sup> ดังแสดงในภาพประกอบ 18

2.2.4 เครื่องทดสอบแรงกระแทก, ZWICK<sup>®</sup> ดังแสดงในภาพประกอบ 19

2.2.5 เครื่องวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer, DMTA) Rheometric Scientific<sup>®</sup> รุ่น DMTA V 9002-50010 ดังแสดงในภาพประกอบ 20 และ 21

2.2.6 เครื่องตัดชิ้นงาน (Pelletizer), Shimpo industrial

2.2.7 เครื่องตัดจิกซอร์, Scoll saw (CH-s16), Chin-Chun incorporation

2.2.8 แท่งแบบดัมเบล, ASTM D638 Type I

2.2.9 เบ้าพิมพ์เทฟลอน เป็นแบบที่ผ่านการกลึงมีเส้นศูนย์กลาง 17.0 เซนติเมตร ลึก 4.0 มิลลิเมตร

2.2.10 เบ้าพิมพ์เหล็ก ชุบโครเมียมเป็นเหล็กขนาด 20x20 เซนติเมตร

2.2.11 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.02 กรัม

2.2.12 เครื่องวัดความหนาไมโครมิเตอร์ (micrometer) ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutuyo<sup>®</sup>

2.2.13 ถ้วยพลาสติก

2.2.14 ช้อนพลาสติก

2.2.15 เทอร์โมมิเตอร์ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-100 °C



ภาพประกอบ 16 เตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ SANYO<sup>®</sup> EM-X 412 800 วัตต์



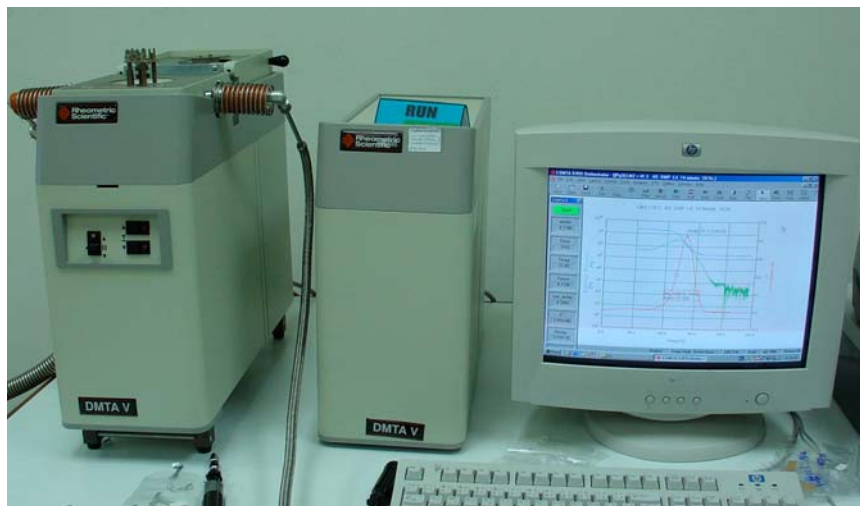
ภาพประกอบ 17 เตาอบ MEMMERT<sup>®</sup> รุ่น D 06061, Model 500



ภาพประกอบ 18 เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงค้ำโค้ง, LLOYD®



ภาพประกอบ 19 เครื่องทดสอบแรงกระแทก, ZWICK®



ภาพประกอบ 20 เครื่องทดสอบทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ Rheometric Scientific<sup>®</sup> รุ่น  
DMTA V 9002-50010



ภาพประกอบ 21 การวางชิ้นทดสอบในเครื่อง DMTA V 9002-50010

## 2.3 วิธีการดำเนินการ

### 2.3.1 การเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (ธนากร ชีรพันธุ์, 2544 : 31 )

2.3.1.1 ใส่น้ำสะอาดจำนวน  $1000 \pm 5$  กรัม อุณหภูมิเริ่มต้น  $8 - 12^{\circ}\text{C}$  ลงในภาชนะแก้ว โปไลซิติลิกेट รูปทรงกระบอกหนา 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 190 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ก่อนการทดลองภาชนะและเตาไมโครเวฟควรอยู่ในอุณหภูมิห้อง วัดอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_1$ ) ของน้ำที่อยู่ในภาชนะก่อนการทดลอง

2.3.1.2 นำภาชนะที่บรรจุน้ำไปอบในเตาไมโครเวฟ โดยตั้งค่าระดับกำลังสูงสุด และจับเวลาตั้งแต่เตาไมโครเวฟเริ่มให้พลังงาน จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในภาชนะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น  $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_2$ ) โดยผลต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายกับอุณหภูมิห้องมีค่าต่างกันไม่เกิน  $5^{\circ}\text{C}$  ( $T_2 - T_1 = \Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$ )

2.3.1.3 วัดอุณหภูมิสุดท้ายโดยก่อนวัดอุณหภูมิให้นำแท่งแก้วลงไปคนให้ทั่วภาชนะก่อนเพื่อให้พลังความร้อนถ่ายเททั่วภาชนะ

2.3.1.4 นำค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายที่วัดได้ คำนวณหาค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟ ตามสมการ (10) ดังนี้

$$P = 4187 * (T_2 - T_1) / t \quad (10)$$

โดย

|       |   |   |
|-------|---|---|
| P     | = | ค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ให้ (วัตต์หรือ J/s)                        |
| 4187  | = | ความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $\text{J} / ^{\circ}\text{C}$ )                |
| $T_1$ | = | ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำก่อนอบในเตาอบไมโครเวฟ ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| $T_2$ | = | ค่าอุณหภูมิสุดท้ายหลังอบในเตาอบไมโครเวฟ ( $^{\circ}\text{C}$ )        |
| t     | = | เวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ (วินาที)                            |

หมายเหตุ

ก. นำน้ำดื่มแช่ในตู้เย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของน้ำ  $8-10^{\circ}\text{C}$

ข. เนื่องจากอุณหภูมิ น้ำเริ่มต้น ( $T_1$ ) มีค่าต่ำ คือประมาณ  $8-12^{\circ}\text{C}$  และต้องใช้เวลาในการอบน้ำในไมโครเวฟ เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นอีกประมาณ  $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นค่า ( $T_2 - T_1 = \Delta T$ ) ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำสุดท้าย ( $T_2$ ) จึงควรอยู่ระหว่าง  $16-24^{\circ}\text{C}$  และจะได้ค่าความ

แตกต่าง  $\Delta T$  น้อยกว่าอุณหภูมิห้อง  $5^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิห้องประมาณ  $23^{\circ}\text{C}$  ตลอดเวลา

ค. เมื่อทำการทดลองเสร็จแต่ละครั้ง ต้องพักเตาอบไมโครเวฟไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้อุปกรณ์การทดลอง เช่น เครื่องแก้ว และเตาอบไมโครเวฟอยู่ที่อุณหภูมิเริ่มทำการทดลองเท่ากันหมด ก่อนจะทดลองครั้งต่อไป

### 2.3.2 การวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟ

เปิดเครื่องเตาอบไมโครเวฟระดับกำลัง 1 ตั้งเวลาการอบ 2 นาที ฟังและบันทึกเวลาตามความแตกต่างของโทนเสียงที่ได้ยิน ทำเช่นนี้ทุกระดับกำลัง เพื่อศึกษาเวลาที่แมกนีตรอนทำงานในแต่ละระดับ

### 2.3.3 การเตรียมส่วนผสมอีพ็อกซีเรซิน

ผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารทำให้แข็งและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าด้วยกันในถ้วยพลาสติก โดยใช้อัตราส่วน ดังแสดงในตาราง 4 คนให้เข้ากันเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้สารเคมีผสมกันเป็นเนื้อเดียว หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที เพื่อให้ฟองอากาศหายไป

ตาราง 4 สูตรและส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4 % ตามน้ำหนักของอีพ็อกซีเรซิน

| สูตร | อีพ็อกซีเรซิน (กรัม) | สารทำให้แข็ง (กรัม) |       |        | ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) |      |      |
|------|----------------------|---------------------|-------|--------|-------------------------|------|------|
|      |                      | MTHPA1*             | MHHPA | MTHPA2 | DMP                     | EMI  | BDMA |
| I*   | 100                  | 80                  | -     | -      | -                       | -    | -    |
| II   | 100                  | -                   | 80    | -      | 1, 4                    | -    | -    |
| III  | 100                  | -                   | 80    | -      | -                       | 1, 4 | -    |
| IV   | 100                  | -                   | 80    | -      | -                       | -    | 1, 4 |
| VI   | 100                  | -                   | -     | 80     | 1, 4                    | -    | -    |
| VII  | 100                  | -                   | -     | 80     | -                       | 1, 4 | -    |
| VIII | 100                  | -                   | -     | 80     | -                       | -    | 1, 4 |

\* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ



## 2.3.4 การอบส่วนผสมอีพ็อกซี และศึกษาลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีที่เตรียมได้

### 2.3.4.1 การอบส่วนผสมอีพ็อกซีในเตาอบความร้อน

ก. เตรียมเบ้าพิมพ์เหล็กซึ่งเคลือบด้วยโครเมียมขนาด 20x20 เซนติเมตร โดยการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและทาสารหล่อลื่น (releasing agent) ให้ทั่ว หลังจากนั้นใช้ซิลิโคนทนความร้อนทำเป็นขอบ เพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 18x18 เซนติเมตร ตรวจสอบเช็ครอยร้าวหรือช่องว่างบริเวณขอบที่ทำจากซิลิโคน

ข. เทส่วนผสมอีพ็อกซีที่เตรียมไว้จากข้อ 2.3.3 จำนวน 57 กรัม ใส่เบ้าพิมพ์ที่เตรียมไว้

ค. นำเบ้าพิมพ์ข้อ ข. ไปอบในเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที (สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) และ 20 นาที (สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%) นำเบ้าพิมพ์ออกจากเตาอบ และเก็บในช่องแช่แข็งทันที

ง. สังเกตและจดบันทึกลักษณะกายภาพของชิ้นตัวอย่างอีพ็อกซีที่เตรียมได้

### 2.3.4.2 การอบส่วนผสมอีพ็อกซีในเตาไมโครเวฟ

ก. เตรียมเบ้าพิมพ์เทฟลอน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 17 เซนติเมตร โดยการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและทาสารหล่อลื่นให้ทั่ว

ข. เทส่วนผสมอีพ็อกซีที่เตรียมไว้จากข้อ 2.3.3 จำนวน 40 กรัม ใส่ในเบ้าพิมพ์ที่เตรียมไว้ นำเบ้าพิมพ์วางตำแหน่งตรงกลางบนจานแก้ว พร้อมทั้งปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้ส่วนผสมกระเด็นติดผนังของเตาไมโครเวฟ ตั้งระดับกำลังวัตต์และเวลาการอบของแต่ละสูตร ดังแสดงในตาราง 5 เมื่อได้เวลาตามที่กำหนดแล้ว นำตัวอย่างออกจากเตาอบไมโครเวฟ แกะชิ้นตัวอย่างออกจากแบบแล้วเก็บในช่องแช่แข็งทันที

ค. สังเกตและจดบันทึกลักษณะกายภาพของตัวอย่างที่เตรียมได้

ง. เลือกชิ้นตัวอย่างอีพ็อกซีที่มีผิวเรียบไปเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

จ. ถ้ามีการใช้งานไมโครเวฟติดต่อกันนานเกิน 1 ชั่วโมง ให้หยุดพักเป็นเวลา 30 นาที ทุกๆ 1 ชั่วโมง

ในการหาระดับกำลังและเวลาที่เหมาะสมเพื่ออบส่วนผสมอีพ็อกซีในเตาอบไมโครเวฟ นั้นเริ่มจากการอบระดับกำลังต่ำสุด เวลาการอบ 14 นาที (เพื่อเปรียบเทียบกับการอบในเตาอบ) สังเกตลักษณะกายภาพของอีพ็อกซีที่เตรียมได้ ถ้าอีพ็อกซีที่อยู่ในเบ้าพิมพ์ยังเป็นของเหลว ให้เตรียมตัวอย่างใหม่แล้วอบที่ระดับกำลังสูงขึ้น ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนได้อีพ็อกซีเป็นแผ่นแข็ง

ตาราง 5 ระดับกำลังและเวลาการอบของอีพ็อกซีแต่ละสูตรที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4%  
อบด้วยเตาไมโครเวฟ

| สูตร | ระดับกำลัง | เวลาการอบ (นาที)           |                            |
|------|------------|----------------------------|----------------------------|
|      |            | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 % | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % |
| I*   | 4          | 14                         | 10, 12, 14, 20             |
| II   | 4          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| III  | 3          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| IV   | 3          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| VI   | 4          | 10, 14, 16                 | 10, 14, 20                 |
| VII  | 3          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| VIII | 4          | 14                         | 10, 14, 20                 |

\* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

### 2.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

#### 2.3.5.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ (Test Specimen)

##### ก. Tensile Test (ภาคผนวก ก. และ ข.)

- (1) นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 19x165 มิลลิเมตร
- (2) วางชิ้นตัวอย่างที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมบนแท่งเหล็กที่เป็นรูปคัมเบลซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type I กลึงด้วยเครื่องตัดพลาสติก ได้ชิ้นตัวอย่างตามขนาดมาตรฐาน ใช้กระดาษทรายละเอียดขัดบริเวณขอบให้เรียบ
- (3) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบ 5-10 ชิ้น
- (4) วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกันอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย
- (5) ทำเครื่องหมายตำแหน่งระยะระหว่างตัวยึด (grip) ที่บริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ เพราะหลังการทดสอบชิ้นทดสอบจะแยกออกจากกัน และไม่ควรถ่ายเครื่องหมายเป็นรอยลึกเพราะจะทำให้ชิ้นทดสอบไวต่อการแตกร้าว

### ข. Notch Izod Impact Test (ภาคผนวก ค.)

(1) นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 12.75x63.50 มิลลิเมตร และบากชิ้นทดสอบที่ตรงกลางเป็นรูปตัววี (V-notch) มุม 45 องศา ตามมาตรฐาน ASTM D 256

(2) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบ 5-10 ชิ้น

(3) วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย ทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบที่บริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ

### ค. Flexural Test (ภาคผนวก ข.)

(1) นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 790

(2) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบ 5-10 ชิ้น

(3) วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย

(4) ทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ เพื่อระบุตำแหน่งของระยะระหว่างฐานรอง (support span) และบริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ

### 2.3.5.2 วิธีการทดสอบ

#### ก. Tensile Test

(1) นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้เข้ายึดกับลิ้มยึด (grip) ของเครื่องทดสอบ ในการจับควรยึดชิ้นทดสอบข้างบนก่อน แล้วค่อยๆ ยกชิ้นทดสอบให้เคลื่อนที่ขึ้น เพื่อยึดชิ้นทดสอบข้างล่างกับลิ้มยึด ดึงชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 5 มิลลิเมตร/นาที อุณหภูมิทดสอบ 25°C

(2) รายงานผลการทดสอบ

- Tensile modulus หน่วยเป็น GPa (ระยะแรง 200-400 นิวตัน)
- Tensile strength หน่วยเป็น MPa
- Strain at break หน่วยเป็น %

#### ข. Notch Izod Impact Test

(1) ยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับหัวจับในแนวตั้ง โดยหันด้านรอยบากให้เข้าหาด้านของหัวค้อน ยกค้อนขึ้นให้สูงตามตำแหน่งที่ล็อกค่าไว้ ปล่อยค้อนลงกระทบชิ้นทดสอบให้หัก บันทึกขนาดพลังงานกระทบที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักมีหน่วยเป็น J อุณหภูมิทดสอบ 25°C

(2) รายงานผลการทดสอบ เป็นพลังงานต่อพื้นที่บริเวณรอยบากขึ้นทดสอบตามสมการ (8) ซึ่งมีหน่วยเป็น  $\text{kJ/m}^2$

#### ค. Flexural Test

(1) นำชิ้นทดสอบวางบน support ตามตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ ระยะระหว่าง support คือ 25.0 มิลลิเมตร กดขึ้นทดสอบด้วยความเร็ว 0.8 มิลลิเมตร/นาที จนกว่าชิ้นทดสอบแตกหัก อุณหภูมิทดสอบ  $25^{\circ}\text{C}$

(2) รายงานผลการทดสอบ

- Flexural modulus หน่วยเป็น GPa (ระยะแรง 50-100 นิวตัน)
- Flexural strength หน่วยเป็น MPa
- Strain at break หน่วยเป็น %

**2.3.6 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ ( Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)**

##### 2.3.6.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

- ก. นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด  $10 \times 24 \times 1$  มิลลิเมตร
- ข. จำนวนชิ้นทดสอบทั้งหมด 3 ชิ้น
- ค. วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่งและคำนวณหาค่าเฉลี่ย

##### 2.3.6.2 สถานะการทดสอบ

- ก. เทคนิคที่ใช้ทดสอบ คือ single cantilever bending
- ข. อุณหภูมิทดสอบ  $50-250^{\circ}\text{C}$  อัตราการให้ความร้อน  $2^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  และเปอร์เซ็นต์การยืด 0.1%

ค. ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ 1, 10 และ 30 Hz (ทดสอบความถี่ละ 1 ชิ้น)

ง. รายงานผลการทดสอบ

(1) อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) ที่ตำแหน่ง  $\tan\delta_{(\max)}$  (ภาคผนวก ง.)

(2) พลังงานกระตุ้น (activation energy,  $E_a$ ) และพลังงานความร้อน (activation enthalpy,  $\Delta H^\ddagger$ ) ตามสมการของอาร์เรนีเยสดังนี้

คำนวณ activation energy ( $E_a$ ) จากความชัน  $m = E_a/R$  ที่เกิดจากการพล็อตกราฟความถี่สัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(f)$  และ  $1/T_g$  ตามสมการ (11) ดังนี้

$$\ln(f) = \ln A - (E_a/R) \cdot 1/T_g \quad (11)$$

เมื่อ

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant = 8.314 J/K mol)

f = ความถี่ที่ทดสอบ หน่วยเป็น Hz

$1/T_g$  = ส่วนกลับของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $\tan \delta_{(\max)}$  หรืออุณหภูมิ  $T_g$  หน่วยเป็น K

คำนวณ activation enthalpy ( $\Delta H^\#$ ) จากค่าความชัน  $m = (\Delta H^\#/R)$  โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(f/T_g)$  และ  $1/T_g$  ตามสมการ (12) ดังนี้

$$\ln(f/T_g) = \ln(k/2\pi h) - (\Delta H^\#/R) \cdot 1/T_g - \Delta S^\#/R \quad (12)$$

เมื่อ

h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant =  $6.626 \times 10^{-34}$  Js)

k = ค่าคงที่ของโบลทซ์แมน (Boltzman constant =  $1.380 \times 10^{-23}$  J/K)

$\Delta S^\#$  = activation entropy

## 2.3 วิธีการดำเนินการ

### 2.3.1 การเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (ธนากร ชีรพันธุ์, 2544 : 31 )

2.3.1.1 ใส่น้ำสะอาดจำนวน  $1000 \pm 5$  กรัม อุณหภูมิเริ่มต้น  $8 - 12^{\circ}\text{C}$  ลงในภาชนะแก้ว โปไลซิติลิกेट รูปทรงกระบอกหนา 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 190 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ก่อนการทดลองภาชนะและเตาไมโครเวฟควรอยู่ในอุณหภูมิห้อง วัดอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_1$ ) ของน้ำที่อยู่ในภาชนะก่อนการทดลอง

2.3.1.2 นำภาชนะที่บรรจุน้ำไปอบในเตาไมโครเวฟ โดยตั้งค่าระดับกำลังสูงสุด และจับเวลาตั้งแต่เตาไมโครเวฟเริ่มให้พลังงาน จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในภาชนะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น  $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_2$ ) โดยผลต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายกับอุณหภูมิห้องมีค่าต่างกันไม่เกิน  $5^{\circ}\text{C}$  ( $T_2 - T_1 = \Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$ )

2.3.1.3 วัดอุณหภูมิสุดท้ายโดยก่อนวัดอุณหภูมิให้นำแท่งแก้วลงไปคนให้ทั่วภาชนะก่อนเพื่อให้พลังความร้อนถ่ายเททั่วภาชนะ

2.3.1.4 นำค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายที่วัดได้ คำนวณหาค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟ ตามสมการ (10) ดังนี้

$$P = 4187 * (T_2 - T_1) / t \quad (10)$$

โดย

|       |   |   |
|-------|---|---|
| P     | = | ค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ให้ (วัตต์หรือ J/s)                        |
| 4187  | = | ความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $\text{J} / ^{\circ}\text{C}$ )                |
| $T_1$ | = | ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำก่อนอบในเตาอบไมโครเวฟ ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| $T_2$ | = | ค่าอุณหภูมิสุดท้ายหลังอบในเตาอบไมโครเวฟ ( $^{\circ}\text{C}$ )        |
| t     | = | เวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ (วินาที)                            |

หมายเหตุ

ก. นำน้ำดื่มแช่ในตู้เย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของน้ำ  $8-10^{\circ}\text{C}$

ข. เนื่องจากอุณหภูมิ น้ำเริ่มต้น ( $T_1$ ) มีค่าต่ำ คือประมาณ  $8-12^{\circ}\text{C}$  และต้องใช้เวลาในการอบน้ำในไมโครเวฟ เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นอีกประมาณ  $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นค่า ( $T_2 - T_1 = \Delta T$ ) ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำสุดท้าย ( $T_2$ ) จึงควรอยู่ระหว่าง  $16-24^{\circ}\text{C}$  และจะได้ค่าความ

แตกต่าง  $\Delta T$  น้อยกว่าอุณหภูมิห้อง  $5^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิห้องประมาณ  $23^{\circ}\text{C}$  ตลอดเวลา

ค. เมื่อทำการทดลองเสร็จแต่ละครั้ง ต้องพักเตาอบไมโครเวฟไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้อุปกรณ์การทดลอง เช่น เครื่องแก้ว และเตาอบไมโครเวฟอยู่ที่อุณหภูมิเริ่มทำการทดลองเท่ากันหมด ก่อนจะทดลองครั้งต่อไป

### 2.3.2 การวัดคาบการปล่อยคลื่นของเตาอบไมโครเวฟ

เปิดเครื่องเตาอบไมโครเวฟระดับกำลัง 1 ตั้งเวลาการอบ 2 นาที ฟังและบันทึกเวลาตามความแตกต่างของโทนเสียงที่ได้ยิน ทำเช่นนี้ทุกระดับกำลัง เพื่อศึกษาเวลาที่แมกนีตรอนทำงานในแต่ละระดับ

### 2.3.3 การเตรียมส่วนผสมอีพ็อกซีเรซิน

ผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารทำให้แข็งและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าด้วยกันในถ้วยพลาสติก โดยใช้อัตราส่วน ดังแสดงในตาราง 4 คนให้เข้ากันเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้สารเคมีผสมกันเป็นเนื้อเดียว หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที เพื่อให้ฟองอากาศหายไป

ตาราง 4 สูตรและส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4 % ตามน้ำหนักของอีพ็อกซีเรซิน

| สูตร | อีพ็อกซีเรซิน (กรัม) | สารทำให้แข็ง (กรัม) |       |        | ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) |      |      |
|------|----------------------|---------------------|-------|--------|-------------------------|------|------|
|      |                      | MTHPA1*             | MHHPA | MTHPA2 | DMP                     | EMI  | BDMA |
| I*   | 100                  | 80                  | -     | -      | -                       | -    | -    |
| II   | 100                  | -                   | 80    | -      | 1, 4                    | -    | -    |
| III  | 100                  | -                   | 80    | -      | -                       | 1, 4 | -    |
| IV   | 100                  | -                   | 80    | -      | -                       | -    | 1, 4 |
| VI   | 100                  | -                   | -     | 80     | 1, 4                    | -    | -    |
| VII  | 100                  | -                   | -     | 80     | -                       | 1, 4 | -    |
| VIII | 100                  | -                   | -     | 80     | -                       | -    | 1, 4 |

\* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

## 2.3.4 การอบส่วนผสมอีพ็อกซี และศึกษาลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีที่เตรียมได้

### 2.3.4.1 การอบส่วนผสมอีพ็อกซีในเตาอบความร้อน

ก. เตรียมเบ้าพิมพ์เหล็กซึ่งเคลือบด้วยโครเมียมขนาด 20x20 เซนติเมตร โดยการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและทาสารหล่อลื่น (releasing agent) ให้ทั่ว หลังจากนั้นใช้ซิลิโคนทนความร้อนทำเป็นขอบ เพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 18x18 เซนติเมตร ตรวจสอบเช็ครอยร้าวหรือช่องว่างบริเวณขอบที่ทำจากซิลิโคน

ข. เทส่วนผสมอีพ็อกซีที่เตรียมไว้จากข้อ 2.3.3 จำนวน 57 กรัม ใส่เบ้าพิมพ์ที่เตรียมไว้

ค. นำเบ้าพิมพ์ข้อ ข. ไปอบในเตาอบอุณหภูมิ 150°C เวลา 14 นาที (สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4%) และ 20 นาที (สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%) นำเบ้าพิมพ์ออกจากเตาอบ และเก็บในช่องแช่แข็งทันที

ง. สังเกตและจดบันทึกลักษณะกายภาพของชิ้นตัวอย่างอีพ็อกซีที่เตรียมได้

### 2.3.4.2 การอบส่วนผสมอีพ็อกซีในเตาไมโครเวฟ

ก. เตรียมเบ้าพิมพ์เทฟลอน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 17 เซนติเมตร โดยการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและทาสารหล่อลื่นให้ทั่ว

ข. เทส่วนผสมอีพ็อกซีที่เตรียมไว้จากข้อ 2.3.3 จำนวน 40 กรัม ใส่ในเบ้าพิมพ์ที่เตรียมไว้ นำเบ้าพิมพ์วางตำแหน่งตรงกลางบนจานแก้ว พร้อมทั้งปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้ส่วนผสมกระเด็นติดผนังของเตาไมโครเวฟ ตั้งระดับกำลังวัตต์และเวลาการอบของแต่ละสูตร ดังแสดงในตาราง 5 เมื่อได้เวลาตามที่กำหนดแล้ว นำตัวอย่างออกจากเตาอบไมโครเวฟ แกะชิ้นตัวอย่างออกจากแบบแล้วเก็บในช่องแช่แข็งทันที

ค. สังเกตและจดบันทึกลักษณะกายภาพของตัวอย่างที่เตรียมได้

ง. เลือกชิ้นตัวอย่างอีพ็อกซีที่มีผิวเรียบไปเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

จ. ถ้ามีการใช้งานไมโครเวฟติดต่อกันนานเกิน 1 ชั่วโมง ให้หยุดพักเป็นเวลา 30 นาที ทุกๆ 1 ชั่วโมง

ในการหาระดับกำลังและเวลาที่เหมาะสมเพื่ออบส่วนผสมอีพ็อกซีในเตาอบไมโครเวฟ นั้นเริ่มจากการอบระดับกำลังต่ำสุด เวลาการอบ 14 นาที (เพื่อเปรียบเทียบกับการอบในเตาอบ) สังเกตลักษณะกายภาพของอีพ็อกซีที่เตรียมได้ ถ้าอีพ็อกซีที่อยู่ในเบ้าพิมพ์ยังเป็นของเหลว ให้เตรียมตัวอย่างใหม่แล้วอบที่ระดับกำลังสูงขึ้น ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนได้อีพ็อกซีเป็นแผ่นแข็ง



ตาราง 5 ระดับกำลังและเวลาการอบของอีพ็อกซีแต่ละสูตรที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 4%  
อบด้วยเตาไมโครเวฟ

| สูตร | ระดับกำลัง | เวลาการอบ (นาที)           |                            |
|------|------------|----------------------------|----------------------------|
|      |            | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 % | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 % |
| I*   | 4          | 14                         | 10, 12, 14, 20             |
| II   | 4          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| III  | 3          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| IV   | 3          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| VI   | 4          | 10, 14, 16                 | 10, 14, 20                 |
| VII  | 3          | 14                         | 10, 14, 20                 |
| VIII | 4          | 14                         | 10, 14, 20                 |

\* มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาแล้วแต่ไม่ทราบชนิดและปริมาณ

### 2.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

#### 2.3.5.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ (Test Specimen)

##### ก. Tensile Test (ภาคผนวก ก. และ ข.)

- (1) นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 19x165 มิลลิเมตร
- (2) วางชิ้นตัวอย่างที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมบนแท่งเหล็กที่เป็นรูปคัมเบลซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type I กลึงด้วยเครื่องตัดพลาสติก ได้ชิ้นตัวอย่างตามขนาดมาตรฐาน ใช้กระดาษทรายละเอียดขัดบริเวณขอบให้เรียบ
- (3) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบ 5-10 ชิ้น
- (4) วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกันอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย
- (5) ทำเครื่องหมายตำแหน่งระยะระหว่างตัวยึด (grip) ที่บริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ เพราะหลังการทดสอบชิ้นทดสอบจะแยกออกจากกัน และไม่ควรถ่ายเครื่องหมายเป็นรอยลึกเพราะจะทำให้ชิ้นทดสอบไวต่อการแตกร้าว

### ข. Notch Izod Impact Test (ภาคผนวก ค.)

(1) นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 12.75x63.50 มิลลิเมตร และบากชิ้นทดสอบที่ตรงกลางเป็นรูปตัววี (V-notch) มุม 45 องศา ตามมาตรฐาน ASTM D 256

(2) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบ 5-10 ชิ้น

(3) วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย ทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบที่บริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ

### ค. Flexural Test (ภาคผนวก ข.)

(1) นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 790

(2) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบ 5-10 ชิ้น

(3) วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย

(4) ทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ เพื่อระบุตำแหน่งของระยะระหว่างฐานรอง (support span) และบริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ

### 2.3.5.2 วิธีการทดสอบ

#### ก. Tensile Test

(1) นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้เข้ายึดกับลิ้มยึด (grip) ของเครื่องทดสอบ ในการจับควรยึดชิ้นทดสอบข้างบนก่อน แล้วค่อยๆ ยกชิ้นทดสอบให้เคลื่อนที่ขึ้น เพื่อยึดชิ้นทดสอบข้างล่างกับลิ้มยึด ดึงชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 5 มิลลิเมตร/นาที อุณหภูมิทดสอบ 25°C

(2) รายงานผลการทดสอบ

- Tensile modulus หน่วยเป็น GPa (ระยะแรง 200-400 นิวตัน)
- Tensile strength หน่วยเป็น MPa
- Strain at break หน่วยเป็น %

#### ข. Notch Izod Impact Test

(1) ยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับหัวจับในแนวตั้ง โดยหันด้านรอยบากให้เข้าหาด้านของหัวค้อน ยกค้อนขึ้นให้สูงตามตำแหน่งที่ล็อกค่าไว้ ปล่อยค้อนลงกระทบชิ้นทดสอบให้หัก บันทึกขนาดพลังงานกระทบที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักมีหน่วยเป็น J อุณหภูมิทดสอบ 25°C

(2) รายงานผลการทดสอบ เป็นพลังงานต่อพื้นที่บริเวณรอยบากขึ้นทดสอบตามสมการ (8) ซึ่งมีหน่วยเป็น  $\text{kJ/m}^2$

#### ค. Flexural Test

(1) นำชิ้นทดสอบวางบน support ตามตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ ระยะระหว่าง support คือ 25.0 มิลลิเมตร กดขึ้นทดสอบด้วยความเร็ว 0.8 มิลลิเมตร/นาที จนกว่าชิ้นทดสอบแตกหัก อุณหภูมิทดสอบ  $25^{\circ}\text{C}$

(2) รายงานผลการทดสอบ

- Flexural modulus หน่วยเป็น GPa (ระยะแรง 50-100 นิวตัน)
- Flexural strength หน่วยเป็น MPa
- Strain at break หน่วยเป็น %

### 2.3.6 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ ( Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)

#### 2.3.6.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

- ก. นำชิ้นตัวอย่างที่อบเสร็จแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาด  $10 \times 24 \times 1$  มิลลิเมตร
- ข. จำนวนชิ้นทดสอบทั้งหมด 3 ชิ้น
- ค. วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างกัน อย่างน้อย 3 ตำแหน่งและคำนวณหาค่าเฉลี่ย

#### 2.3.6.2 สถานะการทดสอบ

- ก. เทคนิคที่ใช้ทดสอบ คือ single cantilever bending
- ข. อุณหภูมิทดสอบ  $50-250^{\circ}\text{C}$  อัตราการให้ความร้อน  $2^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  และเพอร์เซ็นต์การยืด 0.1%

ค. ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ 1, 10 และ 30 Hz (ทดสอบความถี่ละ 1 ชิ้น)

ง. รายงานผลการทดสอบ

(1) อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) ที่ตำแหน่ง  $\tan\delta_{(\max)}$  (ภาคผนวก ง.)

(2) พลังงานกระตุ้น (activation energy,  $E_a$ ) และพลังงานความร้อน (activation enthalpy,  $\Delta H^\ddagger$ ) ตามสมการของอาร์เรนีเยสดังนี้

คำนวณ activation energy ( $E_a$ ) จากความชัน  $m = E_a/R$  ที่เกิดจากการพล็อตกราฟความถี่สัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(f)$  และ  $1/T_g$  ตามสมการ (11) ดังนี้

$$\ln(f) = \ln A - (E_a/R) \cdot 1/T_g \quad (11)$$

เมื่อ

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant = 8.314 J/K mol)

f = ความถี่ที่ทดสอบ หน่วยเป็น Hz

$1/T_g$  = ส่วนกลับของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $\tan\delta_{(\max)}$  หรืออุณหภูมิ  $T_g$  หน่วยเป็น K

คำนวณ activation enthalpy ( $\Delta H^\#$ ) จากค่าความชัน  $m = (\Delta H^\#/R)$  โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(f/T_g)$  และ  $1/T_g$  ตามสมการ (12) ดังนี้

$$\ln(f/T_g) = \ln(k/2\pi h) - (\Delta H^\#/R) \cdot 1/T_g - \Delta S^\#/R \quad (12)$$

เมื่อ

h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant =  $6.626 \times 10^{-34}$  Js)

k = ค่าคงที่ของโบลทซ์แมน (Boltzman constant =  $1.380 \times 10^{-23}$  J/K)

$\Delta S^\#$  = activation entropy