# บทที่ 3
# ขั้นตอนการวิจัย

## 3.1 สารเคมีและวัสดุ

สารเคมีและวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตาราง 3.1

**ตาราง 3.1** สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

| ลำดับที่ | สารเคมี | หน้าที่ | ชนิด/ขนาดอนุภาค | บริษัท |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (NOVOLAC PGB-9511) | เมทริกซ์ | แบบผง | บริษัท TGCI Resitop จำกัด |
| 2 | แกรไฟต์ (Timrex KS-150) | สารตัวเติมนำไฟฟ้า | <180μm | บริษัท Timcal จำกัด |
| 3 | ผงเขม่าดำ (N115) | สารตัวเติมนำไฟฟ้า | <44μm | บริษัท Thai carbon black จำกัด |
| 4 | ซิลิกอนคาร์ไบด์ | สารตัวเติมเสริมสมบัติเชิงกล | <45μm | กากของเสียจากบริษัท EFD (Thailand) จำกัด |
| 5 | ยางไนไตรล์ | สารตัวเติมทำให้เหนียว | <250μm | บริษัท มินิแบ ประเทศไทย จำกัด |
| 5 | กาวเงิน (Silver paint) | ทำให้ Contact resistance คงที่ | - | บริษัท Structure Probe จำกัด |
| 6 | น้ำมันซิลิโคน (Silicon oil) | ป้องกันไม่ให้พลาสติกติดแม่แบบ | - | บริษัท Ajax Finechem จำกัด |
| 7 | ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) | สารหล่อลื่น | แบบผง | บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด |

**3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์**

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตาราง 3.2

**ตาราง 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย**

| ลำดับที่ | เครื่องมือและอุปกรณ์ | บริษัท | รุ่น |
|---|---|---|---|
| 1 | เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) | Lab Tech Engineering Co., Ltd. | LP 20 |
| 2 | เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal testing machine) | Lloyd Co., Ltd. | LRX |
| 3 | เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact resistance testing machine) | Cometech Co., Ltd. | QC-639K |
| 4 | ตะแกรงร่อน | Retsch Co., Ltd.. | - |
| 5 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) | JEOL Technics Co., Ltd. | JSM 5910 LV |
| 6 | เครื่องมัลติมิเตอร์ | Goldstar Electronic Co., Ltd. | DM-333 |
| 7 | เตาอบไฟฟ้า | EduSystem Co., Ltd. | Binder |
| 8 | เวอร์เนียร์ | Kannom (Stainlass Hardened) Co., Ltd. | S755 |
| 9 | เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง | Scientific Promotion Co., Ltd. | BP210 |
| 10 | เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง | Scientific Promotion Co., Ltd. | 5A310S |

## 3.3 สมบัติของเมทริกซ์

### 3.3.1 สมบัติของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol-Formaldehyde)

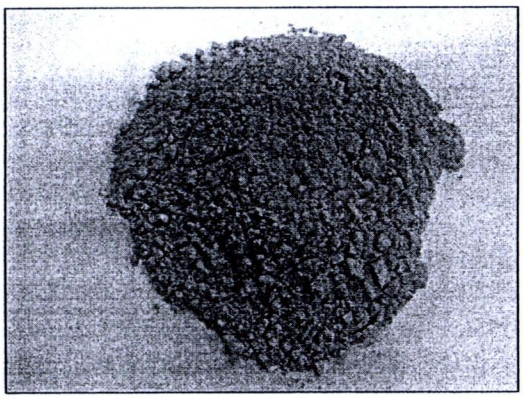
ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นเทอร์มอเซตติงพอลิเมอร์เนื้อแข็ง ที่มีความคงตัว ทนทานต่อการผุกร่อน และทนความร้อนได้สูง (260 องศาเซลเซียส) ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์มีอยู่ 2 ชนิด คือ Novolac หรือฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดผง และResole หรือฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดของเหลว ซึ่งฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันดังนี้ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดผงนั้นจะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าชนิดของเหลว แต่ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดของเหลวนั้นจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าชนิดผงเล็กน้อย เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน $\sigma$–OH มากกว่าแต่ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดผงให้ค่าความพรุนตัวที่น้อยกว่าและให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า [14] ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดผงแสดงดังรูป 3.1 โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทไทยจีซีไอ เรซิท็อป จำกัด ชื่อทางการค้าคือ NOVOLAC PGB-9511 มีสมบัติดังตาราง 3.3

**ตาราง 3.3** สมบัติของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ชนิด NOVOLAC PGB-9511 [51]

| สมบัติ | ค่า | หน่วย |
|---|---|---|
| อุณหภูมิหลอมเหลว ($T_m$) | 70-80 | $^{\circ}C$ |
| อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ($T_d$) | 260 | $^{\circ}C$ |
| ความหนาแน่นที่ 25 $^{\circ}C$ (Density) | 0.3 | $g/cm^3$ |
| ปริมาณสารช่วยแข็งตัว (Hexamine) | 8.6-9.6 | % |
| ลักษณะทางกายภาพ | ผงสีเหลือง | - |
| Gelation time ที่ 150°C | 65-85 | Sec |
| อัตราการไหลที่ 125°C (MFI) | 22-32 | g/10 min |

**ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์**

ใช้ทำปลอกหุ้มคอยล์รถยนต์ แกนคอยล์ในเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ เปลือกเครื่องโทรศัพท์สมัยโบราณ ด้ามเครื่องมือช่าง หูหม้อ หูกะทะ ด้ามมีด ลูกบิลเลียด แผงวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กาว สารเคลือบผิว ตลอดจนใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมยาง



**รูป 3.1** ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (RESITOP® PGB-9511)

## 3.4 สมบัติของสารตัวเติมนำไฟฟ้า

### 3.4.1 แกรไฟต์ (Graphite)

ผงแกรไฟต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ผงแกรไฟต์ TIMREX™ KS150 จากบริษัท Timcal ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ซึ่งตัวอย่างของผงแกรไฟต์ ชนิดนี้แสดงดังรูป 3.2 ซึ่งสมบัติทางกายภาพของสารตัวเติมแสดงดังตาราง 3.4

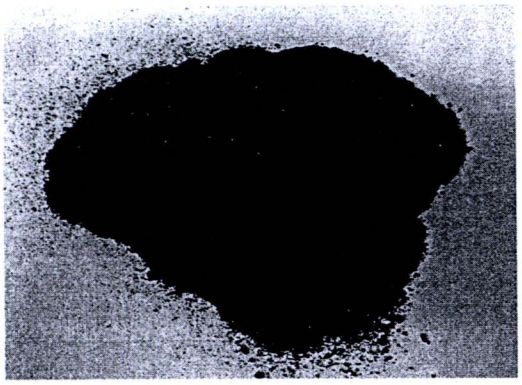
**รูป 3.2** ผงแกรไฟต์ TIMREX™ KS150

ตาราง 3.4 สมบัติทางกายภาพของ แกรไฟต์ (TIMREX™ KS150) [26]

| General Information | Value |
|---|---|
| **Purity** | |
| **Ash** | **0.06%** |
| **Moisture** | **0.05%** |
| **Bulk Density** | **0.42 g/cm$^3$** |
| **Density** | |
| **Xylene** | **2.08 – 2.30 g/cm$^3$** |
| **Specific Bulk Volume** | **263 ml/100g** |
| **Particle Size Distribution** | |
| **vibrated Sieving** | |
| **> 180 µm** | **0.20%** |
| **> 150 µm** | **4%** |
| **> 100 µm** | **20%** |
| **Airjet Sieving** | |
| **>63 µm** | **60%** |
| **>32 µm** | **40%** |
| **Melting Temperature** | **app.3500 °C** |
| **Ignition Temperature** | **> 570 – 740 °C** |

### 3.4.2 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

ผงเขม่าที่ใช้มีลักษณะดังรูป 3.3 และมีสมบัติดังตาราง 3.5



**รูป 3.3** ผงเขม่าดำ (N115)

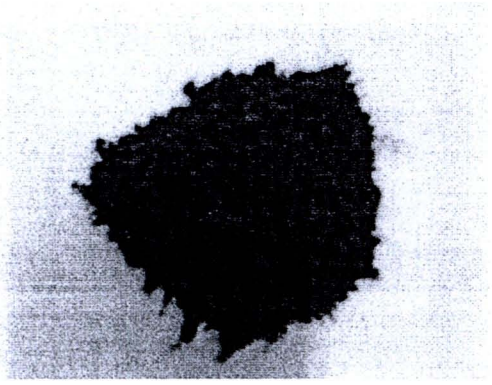
**ตาราง 3.5** สมบัติของผงเขม่าดำ N115 [46]

| สมบัติ | ค่า | หน่วย |
|---|---|---|
| Iodine Absorption | 160 | mg/g |
| Density | 0.345 | $g/cm^3$ |
| Pellet Hardness | 12 - 51 | g |
| Ash content | 0.75 | % Max |
| Sulphur content | 1.5 | % Max |
| pH | 6 - 10 | - |

## 3.5 สมบัติของสารตัวเติมเสริมแรง

### 3.5.1 ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)

อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในงานวิจัยนี้ เป็นกากของเสียจากโรงงานเจียรนัยเพชรที่ใช้แล้วมาทำการคัดแยกให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 45 ไมโครเมตร โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท EFD (Thailand) จำกัด แสดงดังรูป 3.4 และสมบัติทางกายภาพของสารตัวเติมแสดงดังตาราง 3.6



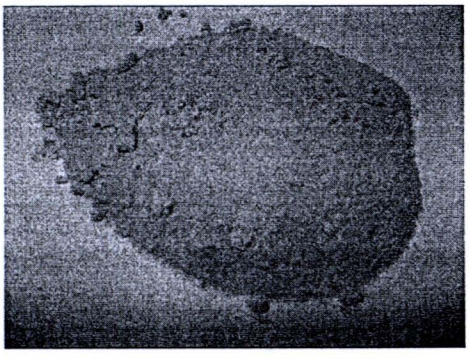
**รูป 3.4** ซิลิกอนคาร์ไบด์

**ตาราง 3.6** สมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ [45]

| สมบัติ | ค่า | หน่วย |
|---|---|---|
| จุดหลอมเหลว (mp) | 2,700 | $^{o}C$ |
| การขยายตัวเนื่องจากความร้อน | $4.0 \times 10^{-6}$ | K |
| ความแข็งแรงเชิงกล (Compresive Strength) | 576 | $kg/cm^{3}$ |
| มอดุลัสยืดหยุ่น | 410 | GPa |
| ความทนต่อกรดและเบส | สูง | - |
| ความทนต่อการสึกกร่อน(Wear Resistance) | สูง | - |
| ความทนและนำความร้อน | สูง | - |

**3.5.2 อนุภาคยางไนไตรล์**

ยางไนไตรล์ เป็นยางที่มีความเป็นขั้วสูงมีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อความร้อนและต้านทานต่อการขัดถูได้ดี อนุภาคยางไนไตรล์ในงานวิจัยนี้ ได้จากการนำถุงมือยางไนไตรล์ที่ใช้แล้วมาทำการบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.25 มิลลิเมตร โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท มินิแบ ประเทศไทย ซึ่งแสดงดังรูป 3.5

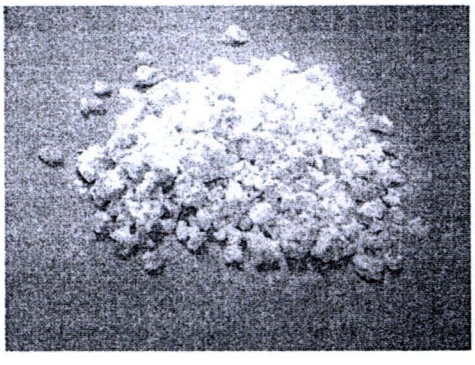


**รูป 3.5** อนุภาคยางไนไตรล์

## 3.6 สารตัวเติมอื่นๆ

### 3.6.1 ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate)

เป็นสารหล่อลื่น และช่วยการกระจายตัวของสารตัวเติม มีลักษณะเป็นผงสีขาว ซึ่งผลิตโดยบริษัท Riedel-de Haen จำกัด มีลักษณะดังรูป 3.6



**รูป 3.6** ซิงค์สเตียเรต

**3.7 วิธีการทดลอง**

**3.7.1 การเตรียมคอมโพสิตฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์**

ทำการอบผงแกรไฟต์ ผงเขม่าดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ และอนุภาคยางไนไตรล์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่มีอยู่ในสาร จากนั้นเตรียมคอมโพสิตในอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยเตรียมพอลิฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ผงแกรไฟต์ ผงเขม่าดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ อนุภาคยางไนไตรล์ และซิงค์สเตียเรตตามอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่างๆ ดังตาราง 3.7 (โดยคิด 100% เท่ากับ 60 กรัม) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมคอมโพสิตในงานวิจัยนี้คือ

- อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
- ความดัน 1,500 และ 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- เวลาในการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat) 10 นาที
- เวลาในการกดอัดด้วยความร้อน 10 นาที
- เวลาในการหล่อเย็น 10 นาที

จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานที่ได้มาตัดตามขนาดเพื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ และนำชิ้นงานไปทำการอบหลังบ่มที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง [8] เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการบ่มที่สมบูรณ์และลดความเค้นบนชิ้นงาน

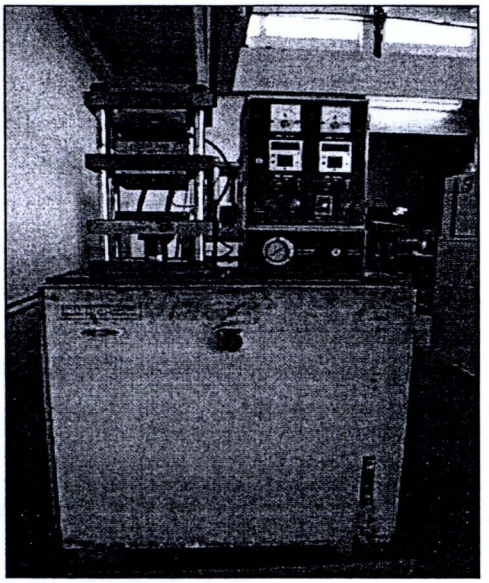
การเตรียมชิ้นงานโดยวิธีกดอัด (Compression Molding)

ชิ้นงานแผ่นเรียบ ขนาด 11x11 เซนติเมตร หนา 3.3 มิลลิเมตร ดังรูป 3.9 ทาน้ำยาถอดแบบ (silicone oil) บนแม่แบบ ดังรูป 3.8 ให้ทั่วเพื่อความสะดวกในการถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ จากนั้นเทวัสดุผสมลงในแม่แบบแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 1,500 และ 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยมีการให้ความร้อนก่อนการกดอัด 10 นาที จากนั้นทำการกดอัดร้อนเป็นเวลา 10 นาที นำแม่แบบออกจากเครื่องกดอัด ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

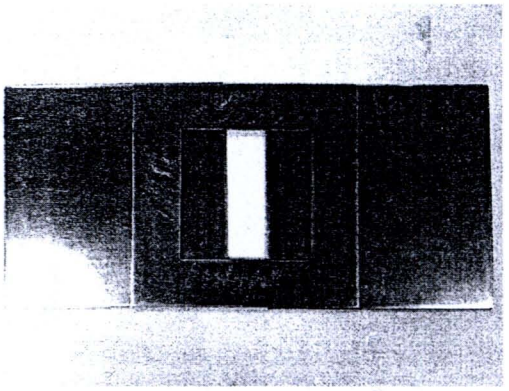
**3.7.2 การเตรียมคอมโพสิตฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีช่องทางเดินของก๊าซ**

เมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนของคอมโพสิตที่อัตราส่วนต่าง ๆ แล้วนำอัตราส่วนที่ให้สมบัติต่าง ๆที่ดีที่สุดมาทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีช่องทางเดินของก๊าซ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูป 3.11 ทาน้ำยาถอดแบบบนแม่แบบ ดังรูป 3.10 จากนั้นเทวัสดุผสมลงในแม่แบบแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความดัน 1,800 ปอนด์ต่อ

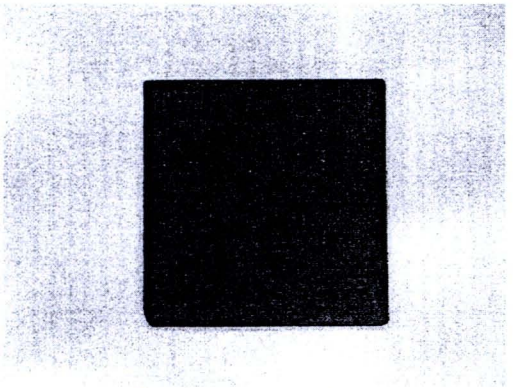
ตารางนิ้ว โดยมีการให้ความร้อนก่อนการกดอัด 15 นาที จากนั้นทำการกดอัดร้อนเป็นเวลา 10 นาที นำแม่แบบออกจากเครื่องกดอัด ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานออกจากแม่แบบ ก่อนขัดหน้า – หลัง แล้วนำไปประกอบในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนดังรูป 3.12 เพื่อทดสอบต่อไปโดยกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงในภาควิชาฟิสิกส์



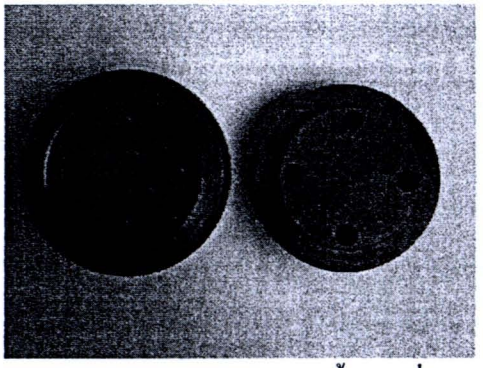
**รูป 3.7** เครื่องอัดไฮดรอลิก



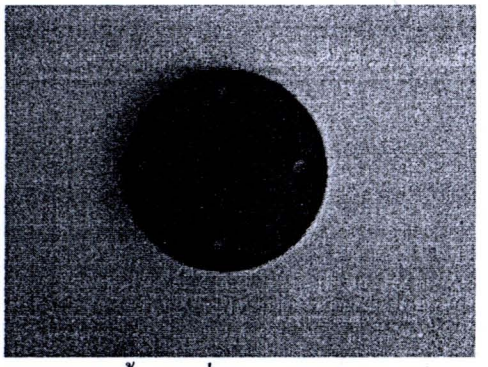
**รูป 3.8** แม่แบบสำหรับอัดแผ่นชิ้นงาน



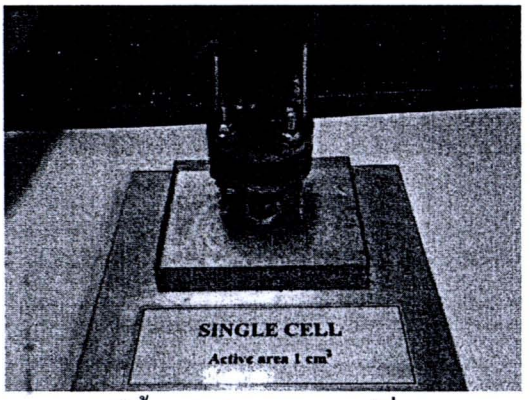
**รูป 3.9** ชิ้นงานที่ได้จากเครื่องอัดแผ่น



**รูป 3.10** แม่แบบสำหรับอัดชิ้นงานที่มีช่องทางเดินของก๊าซ



**รูป 3.11** ชิ้นงานที่มีช่องทางเดินของก๊าซ




**รูป 3.12** เซลล์เชื้อเพลิงประกอบเซลล์เดี่ยว (PEMFC)

ตาราง 3.7 ส่วนประกอบของคอมโพสิตที่เตรียมในงานวิจัยนี้

| Polymer Composites | PF (%) | G (%) | N (%) | SiC (%) | CB (%) | ZnSt (%) | Post cure 190°C (hours) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SiC0 | 100 | - | - | - | - | - | - |
| SiC2 | 98 | - | - | 2 | - | - | - |
| SiC4 | 96 | - | - | 4 | - | - | - |
| SiC6 | 94 | - | - | 6 | - | - | - |
| SiC8 | 92 | - | - | 8 | - | - | - |
| SiC10 | 90 | - | - | 10 | - | - | - |
| G80 | 20 | 80 | - | - | - | 1 | - |
| G80Po30 | 20 | 80 | - | - | - | 1 | 30 |
| G80N5 | 15 | 80 | 5 | - | - | 1 | - |
| G80N5Po30 | 15 | 80 | 5 | - | - | 1 | 30 |
| G79N5SiC1 | 15 | 79 | 5 | 1 | - | 1 | - |
| G79N5SiC1Po30 | 15 | 79 | 5 | 1 | - | 1 | 30 |
| G78N5SiC2 | 15 | 78 | 5 | 2 | - | 1 | - |
| G78N5SiC2Po30 | 15 | 78 | 5 | 2 | - | 1 | 30 |
| G76N5SiC4 | 15 | 76 | 5 | 4 | - | 1 | - |
| G76N5SiC4Po30 | 15 | 76 | 5 | 4 | - | 1 | 30 |
| G74N5SiC6 | 15 | 74 | 5 | 6 | - | 1 | - |
| G74N5SiC6Po30 | 15 | 74 | 5 | 6 | - | 1 | 30 |
| G72N5SiC8 | 15 | 72 | 5 | 8 | - | 1 | - |
| G72N5SiC8Po30 | 15 | 72 | 5 | 8 | - | 1 | 30 |
| G75N5CB5 | 15 | 75 | 5 | - | 5 | 1 | - |
| G75N5CB5Po30 | 15 | 75 | 5 | - | 5 | 1 | 30 |
| G79N5CB1 | 15 | 79 | 5 | - | 1 | 1 | - |

ตาราง 3.7 ส่วนประกอบของคอมโพสิตที่เตรียมในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

| Polymer Composites | PF (%) | G (%) | N (%) | SiC (%) | CB (%) | ZnSt (%) | Post cure 190°C (hours) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| G79N5CB1Po30 | 15 | 79 | 5 | - | 1 | 1 | 30 |
| G79N5CB1SiC1 | 15 | 79 | 5 | 1 | 1 | 1 | - |
| G79N5CB1SiC1Po30 | 15 | 79 | 5 | 1 | 1 | 1 | 30 |
| G79N5CB1SiC1 (70g,P) | 15 | 79 | 5 | 1 | 1 | 1 | - |
| G79N5CB1SiC1Po30 (70g,P) | 15 | 79 | 5 | 1 | 1 | 1 | 30 |

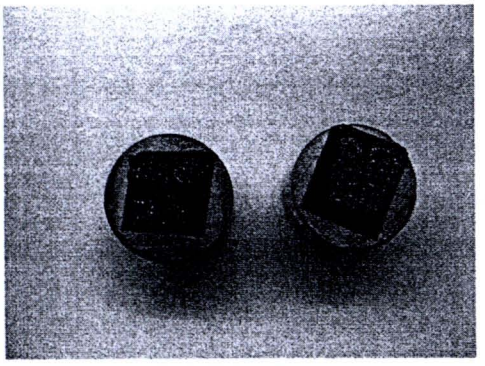
หมายเหตุ PF คือ พอลิฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ชนิดผง, 70g คือ เพิ่มปริมาณขึ้นเป็น 70 กรัม
N คือ อนุภาคยางไนไตรล์, Po คือ Post cure
G คือ ผงแกรไฟต์ P คือ เพิ่มความดันจาก 1,500 เป็น 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
SiC คือ อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์
ZnSt คือ ซิงค์สเตียเรต

**3.8 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต**

**3.8.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต**

**3.8.1.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM)**

นำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบไปหักโดยใช้คีม แล้วติดเข้ากับก้านวางตัวอย่าง (Specimen stub) ดังรูป 3.13 ซึ่งเป็นพลาสติกลักษณะเป็นแท่งกลมด้วยเทปคาร์บอน เมื่อติดชิ้นทดสอบบนก้านวางตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นทดสอบมาฉาบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีอะตอมขนาดเล็ก การฉาบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าเพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับชิ้นทดสอบ โดยกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ และให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพเป็นอะตอมและตกลงบนผิวชิ้นทดสอบในอัตราส่วนเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ทองในการฉาบผิวชิ้นงาน และนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติม ซึ่งมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน



**รูป 3.13** รูปชิ้นงานที่ติดเข้ากับก้านวางตัวอย่าง

**3.8.1.2 การทดสอบค่าความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต**

การทดสอบค่าความหนาแน่นของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นโดยใช้ขวดวัดความหนาแน่น หาค่าความหนาแน่นของวัตถุดิบที่คิดจากความหนาแน่นที่แท้จริง ไม่รวมช่องว่างหรือรูพรุนใด ๆ ทั้งสิ้น ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง}(cm^3)}$$

โดยที่ น้ำหนักตัวอย่าง คือ W-P

น้ำหนักน้ำ คือ W1-P

น้ำหนักน้ำที่เหลือ คือ W2-(W-P)-P

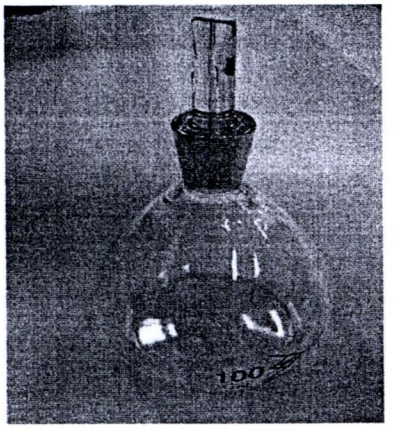
ปริมาตรน้ำ คือ $\frac{W1-P}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$

ปริมาตรน้ำที่เหลือ คือ $\frac{W2-(W-P)-P}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$

ปริมาตรตัวอย่าง (ปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่) คือ ปริมาตรน้ำ – ปริมาตรน้ำที่เหลือ

1. ชั่งน้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ และฝาปิด (P)
2. ชั่งน้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ ฝาปิดและตัวอย่างบรรจุอยู่ (W)
3. ชั่งน้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ ฝาปิดและน้ำกลั่น (W1)
4. ชั่งน้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ ฝาปิด ตัวอย่าง และน้ำกลั่น (W2)

ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.9971 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจะมีการแสดงตัวอย่างการคำนวณการหาความหนาแน่นไว้ที่ภาคผนวก จ



**รูป 3.14** ขวดวัดความหนาแน่น

**3.8.2 การทดสอบสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของคอมโพสิต**

การทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนั้น จะเป็นการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นทดสอบ ทำได้โดยทำการตัดชิ้นทดสอบให้มีความยาว 10 เซนติเมตร กว้าง 0.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปเคลือบกาวเงินที่ปลายทั้งสองข้างแล้วนำไปอบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กาวเงินแห้ง นำมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ดังรูป 3.15 และนำค่าที่อ่านได้จากเครื่องมัลติมิเตอร์ มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้ สมการ (3.3) และสมการ (3.4)

$$\rho = (RA/L) \qquad (3.3)$$

โดยกำหนดให้ $\rho$ คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้า ($\Omega$.cm)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าค่าที่อ่านได้จากเครื่อง ($\Omega$)

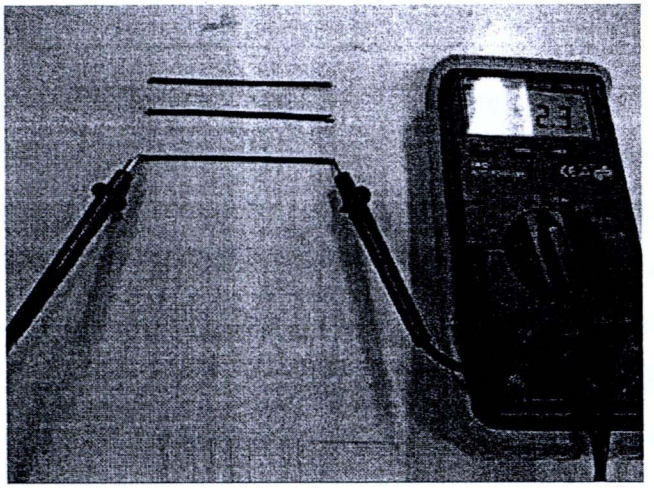
L คือ ความยาวของชิ้นงาน (cm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ($cm^2$)

หลังจากนั้นนำมาหาค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้สมการ (3.4)

$$\sigma = (1/\rho) \qquad (3.4)$$

โดยกำหนดให้ $\sigma$ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (S/cm)

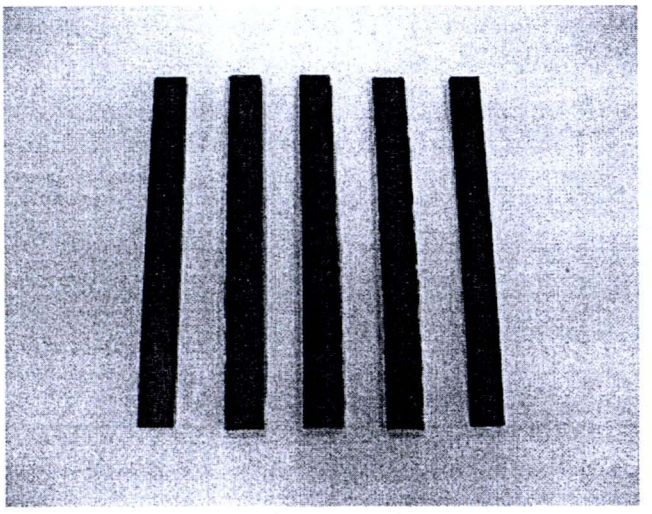


**รูป 3.15** การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์

**3.8.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต**

**การเตรียมชิ้นงานทดสอบ**

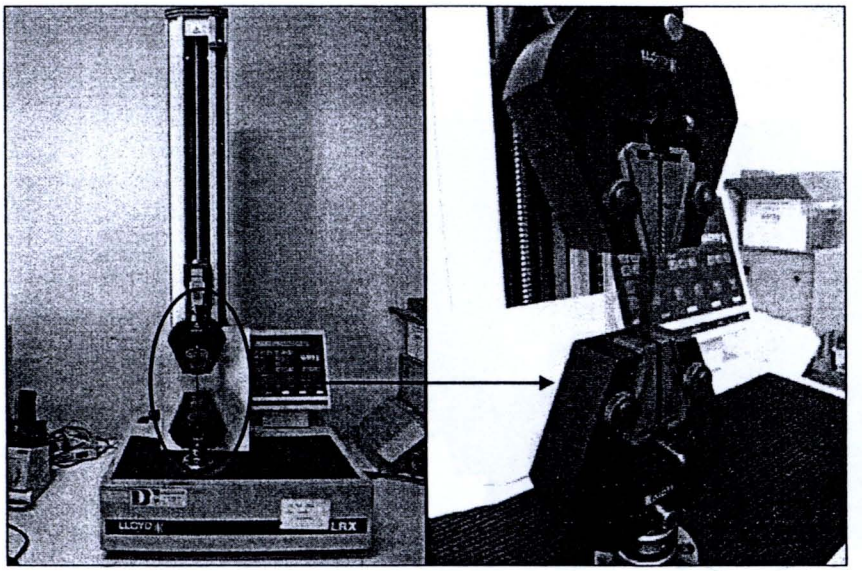
การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต ทำได้โดยทำการตัดชิ้นงานที่เตรียมได้ให้มีความยาว 10 เซนติเมตร กว้าง 1 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตรดังแสดงในรูป 3.16



**รูป 3.16** ลักษณะของชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงกล

**3.8.3.1 การทดสอบความทนแรงดึง**

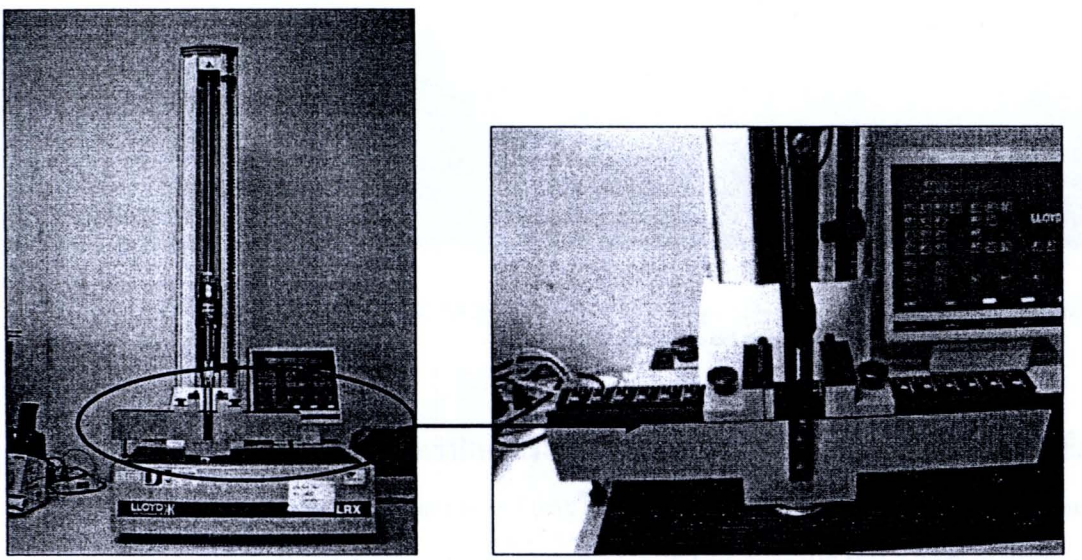
การทดสอบความทนแรงดึงของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิต ทำการทดสอบโดยการใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal testing machine) แสดงดังรูป 3.17 โดยทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อมีการดึงเกิดขึ้นชิ้นงานที่ทดสอบจะถูกยืดออก และเกิดการต่อต้านแรงที่กระทำจากคาน ดังนั้นหัววัดแรงที่ติดกับคานจะทำหน้าที่วัดแรงแล้วส่งข้อมูลไปยังหน่วยแสดงผลเป็นตัวเลข และกราฟ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป สามารถทดสอบ และแสดงผลของสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ ชิ้นทดสอบมีความยาวพิกัด (Gauge length: $L_0$) 40 มิลลิเมตร ความกว้างของชิ้นทดสอบ ในช่วง 10 มิลลิเมตร ทำการวัดความกว้าง และความหนาของชิ้นทดสอบที่หลายๆ ตำแหน่ง เพื่อนำค่าไปคำนวณพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (Cross sectional area: $A_0$) กำหนดอัตราเร็วในการดึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ตัววัดแรง (Load cell) 2,500 นิวตัน เครื่องจะดึงชิ้นทดสอบจนขาด โปรแกรมสำเร็จรูปจะแสดงผลค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ




**รูป 3.17** เครื่องทดสอบความทนแรงดึงและหัวดึง

**3.8.3.2 การทดสอบความทนแรงโค้งงอ**

การทดสอบความทนแรงโค้งงอในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal testing machine) ณ อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกับความทนแรงดึง การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด (Three point bending) ทำตามมาตรฐาน ASTM D790-81 ช่วงของตำแหน่งในการวางชิ้นทดสอบ 40 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการทดสอบความเค้นโดยจะมีตัวกดสำหรับให้แรงกด 1 จุด ซึ่งจะอยู่ด้านบนของชิ้นทดสอบ และจะมีตัวรองรับที่กำหนดระยะอยู่ด้านล่างชิ้นทดสอบ 2 จุด ลักษณะของหัวกดและฐานแสดงดังรูป 3.18 ชิ้นทดสอบมีความยาวพิกัด (Gauge length: $L_0$) 40 มิลลิเมตร ความกว้างของชิ้นทดสอบ ในช่วง 10 มิลลิเมตร ทำการวัดความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบที่หลายๆตำแหน่งเพื่อนำค่าไปคำนวณพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (Cross sectional area: $A_0$) กำหนดอัตราเร็วในการดึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ตัววัดแรง (Load cell) 2,500 นิวตัน เครื่องจะกดชิ้นทดสอบจนหัก โปรแกรมสำเร็จรูปจะแสดงผลค่าความทนแรงโค้งงอของชิ้นงานทดสอบ

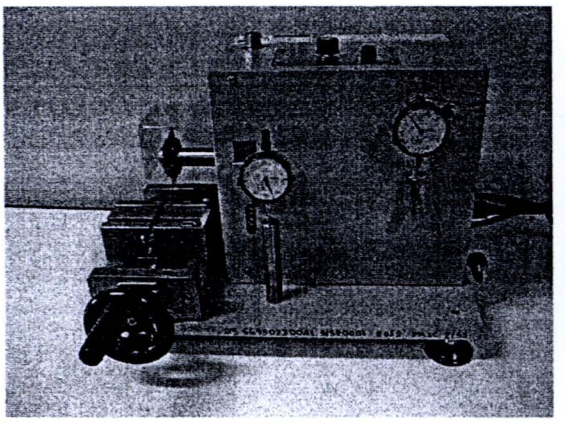



**รูป 3.18** เครื่องทดสอบความทนต่อแรงโค้งงอและหัวกด

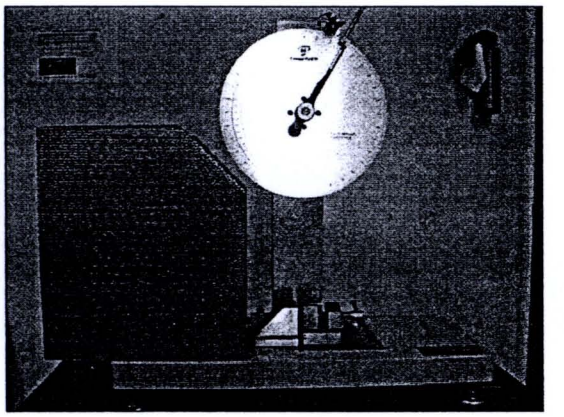
**3.8.3.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก**

การทดสอบความทนแรงกระแทกเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-81 ทำการทดสอบด้วยเครื่องทนแรงกระแทก (Impact resistance testing machine) ดังรูป 3.20 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก (Pendulum impact) แบบอิซอด (Izod type) ขนาดของตุ้มน้ำหนักคือ 1 จูล

ชิ้นงานที่เตรียมมีความยาว 2.5 นิ้ว กว้าง 0.5 นิ้ว หนา 3 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบทำรอยบากโดยใช้เครื่องทำรอยบาก ดังรูป 3.19 ด้านข้างที่จุดกึ่งกลางประมาณ 2 มิลลิเมตร ทำมุม 22.5 ± 0.5 องศา จากนั้นนำไปวัดระยะรอยบากจนถึงขอบโดยใช้มาตรวัดจากเครื่องทำรอยบากวัดค่าได้เลย ค่าที่ได้ทำการบันทึกไว้เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



**รูป 3.19** เครื่องทำรอยบาก



**รูป 3.20** เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดให้อยู่ในแนวตั้งในลักษณะของคานยื่น (cantilever) และใช้เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact resistance testing machine) ที่เป็นแบบค้อนเหวี่ยงกระแทก (pendulum impact)ดังรูป 3.20 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ได้มาตรฐาน ISO-13802 โดยมีขนาดของหัวเหวี่ยง 1 จูล ในการทดลองจะมีการเหวี่ยงหัวเหวี่ยงสามครั้ง ครั้งแรกจะเหวี่ยงหัวเหวี่ยงให้โดนชิ้นงานบริเวณที่มีรอยบาก ชิ้นงานก็จะเกิดการแตกหัก จากนั้นทำการบันทึกค่าเป็นค่าที่หนึ่ง จากนั้นนำเข็มกลับเข้าที่ที่จุดเริ่มต้น แล้วปล่อยหัวเหวี่ยงลงมาเป็นครั้งที่สองแต่คราวนี้ไม่มีชิ้นงานให้เหวี่ยงอากาศ ทำการบันทึกเป็นค่าที่สอง จากนั้นนำหัวเหวี่ยงกลับเข้าที่แต่ไม่ต้องหมุนเข็มกลับ เหวี่ยงหัวเหวี่ยงให้โดนเข็ม และจะเหวี่ยงไปจนกว่าหัวเหวี่ยง

ไม่สามารถตีโดนเข็มแล้ว ทำการบันทึกค่าที่หัวเหวี่ยงไม่สามารถตีโดนเข็มแล้วเป็นค่าที่สาม จากนั้นนำค่าต่างๆที่ได้จากการวัดไปคำนวณด้วยวิธีมาตรฐาน (standard testing method) ดังสมการ (3.5) และ (3.6) ในการทดลองนี้ใช้ชิ้นทดสอบในแต่ละสภาวะ 10 ชิ้นทดสอบ เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละสภาวะ

ความทนแรงกระแทก = $I_s$ (J/m)

$$I_s = (E_s - E_{tc})/t \tag{3.5}$$

$$E_{tc} = [E_a - (E_b/2)](B/A) + E_b/2 \tag{3.6}$$

$E_{tc}$ = ค่าพลังงานที่ถูกต้อง (correction value)

t = ความกว้างของชิ้นงาน (m)

$E_s$ = ค่าพลังงานที่ได้จากการตีครั้งที่ 1

$E_a$ = ค่าพลังงานที่ได้จากการตีครั้งที่ 2

$E_b$ = ค่าพลังงานที่ได้จากการตีครั้งที่ 3

A = มุมที่ได้จากการตีครั้งที่ 2

B = มุมที่ได้จากการตีครั้งที่ 3