บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (บริษัท Aspocomp)

3.1.2 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) (บริษัท Concrete composite)

3.1.3 สารเชื่อมขวาง (Hardener) (บริษัท Concrete composite)

3.1.4 เอทิล อะซีเตท (Ethyl acetate) (บริษัท Merck ประเทศไทย)

3.1.5 เฮกเซน (Hexane) (บริษัท Fisher scientific)

3.1.6 เมทิลลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) (บริษัท Merck ประเทศไทย)

3.1.7 อะซิโตน (Acetone) (บริษัท Merck ประเทศไทย)

3.1.8 เมทานอล (Methanol) (บริษัท Merck ประเทศไทย)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

3.2.1 แผ่นกระจกขนาด 30×30 ตารางเซนติเมตร แผ่นยางหนา 3.5 มิลลิเมตร ตัวยึด

3.2.2 เครื่องบดบอลมิลล์(Ball Mill)

3.2.3 ชุดคัดแยกขนาดอนุภาค (Sieves and Sieve Shaker) (FTL-0200/Filtra)

3.2.4 ชุดการทดลองรีฟลักซ์ (Reflux) (Pyrex)

3.2.5 ชุดการทดลองซอกเลต (Soxhlet) (Pyrex)

3.2.6 ชุดการทดลองถังความดัน (Pressure Tank)

3.2.7 เครื่องระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) (r-114/Buchi)

3.2.8 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer) (Nicolet 6700/Thermo scientific)

3.2.9 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคโลริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry) (DSC 2910/Dupont)

3.2.10 เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส (Thermaogravimetric Analysis) (TGA7/Perkin-Elmer)

3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer) (Asker/Kobunshi keiki)

3.2.12 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Strength Tester)
(Resil impactor/Ceast)

3.2.13 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)
(HSK-S, 0066/Hounsfiled)

3.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)
(S-4800/Hitachi)

3.3 การทดลอง

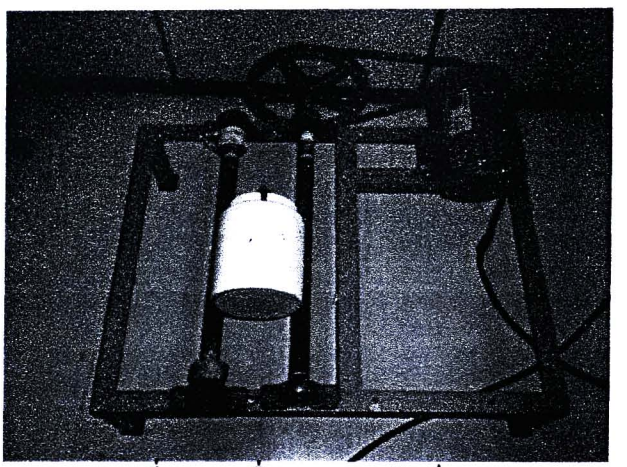
3.3.1 การเตรียมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบบดหยาบและบดละเอียด เตรียมได้จากการบดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เปล่าหรือแผ่นซัพเตรทชนิด FR-4 ด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ดังแสดงในภาพที่ 3-1 องค์ประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 จากบริษัท Aspocomp ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 จากบริษัท Aspocomp

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เส้นใยแก้ว	40-70
อีพ็อกซีเรซิน	20-30
โบรมีน	18-20

การเลือกใช้แผ่นซัพเตรทที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการกัดลายทองแดงหรือแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เปล่าที่ผ่านกระบวนการแยกโลหะออกแล้ว เพื่อคำนวณหาน้ำหนักที่แท้จริงของอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และป้องกันผลกระทบจากโลหะที่อยู่ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง



ภาพที่ 3-1 เครื่องบดบอลมิลล์

คัดแยกขนาดอนุภาคด้วยชุดคัดแยกขนาดอนุภาค ดังภาพที่ 3-2

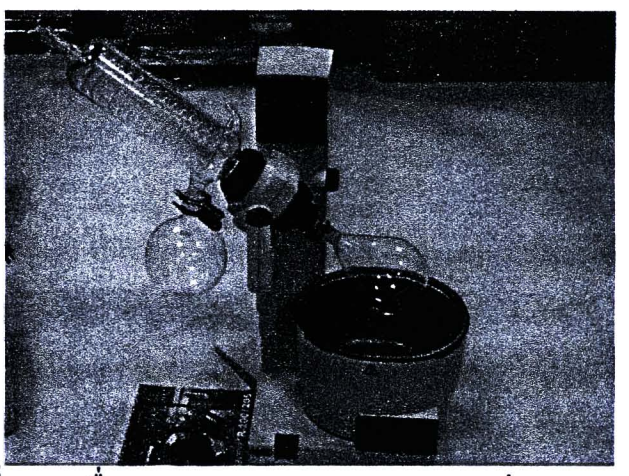
ภาพที่ 3-2 ชุดคัดแยกขนาดอนุภาคของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รุ่น FTL-0200

ในการทดลองเลือกใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 4 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคมากกว่า 60 mesh ขนาดอนุภาค 60-80 mesh (0.18-0.25 มิลลิเมตร) ขนาดอนุภาค 80-160 mesh (0.097-0.18 มิลลิเมตร) ขนาดอนุภาค 160-200 mesh (0.075-0.097 มิลลิเมตร) ดังภาพที่ 3-3

ภาพที่ 3-3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก. ขนาดอนุภาค 60-80 mesh ข. ขนาดอนุภาค 80-160 mesh ค. ขนาดอนุภาค 160-200 mesh

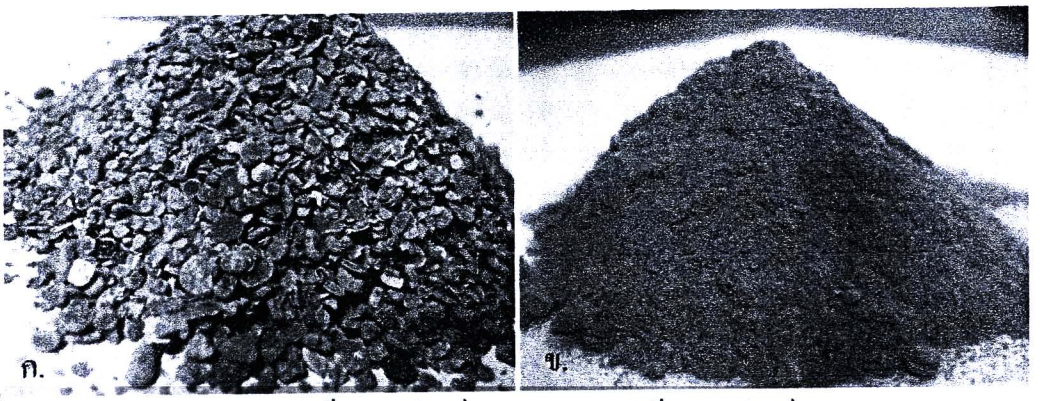
3.3.2 การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางเคมี

3.3.2.1 การทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการทดลองเปรียบเทียบตัวทำละลายแต่ละชนิดที่ใช้สำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เฮกเซน เมทิลลีนคลอไรด์ เอทิลอะซีเตท อะซีโตน เมทานอล ทำการทดลองด้วยเทคนิครีฟลักซ์ ใช้ตัวทำละลาย 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 20 กรัม ขนาด 60-80 mesh อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ระเหยด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 เครื่องระเหยสารแบบหมุน Rotavapor รุ่น r-114

3.3.2.2 การทดลองผลของขนาดอนุภาคของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อประสิทธิภาพใน การรีไซเคิล ทำการทดลองรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบบดหยาบและบดละเอียด ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 ขนาดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก. แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดหยาบ ข. แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดละเอียด

3.3.2.3 การทดลองหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ในการทดลองนี้ทำการทดลองด้วยเทคนิครีฟลักซ์ ใช้ตัวทำละลาย 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 20 กรัม ขนาด 60-80 mesh อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สกัดตัวทำละลายด้วยน้ำ แยกชั้นตัวทำละลายและระเหยด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน

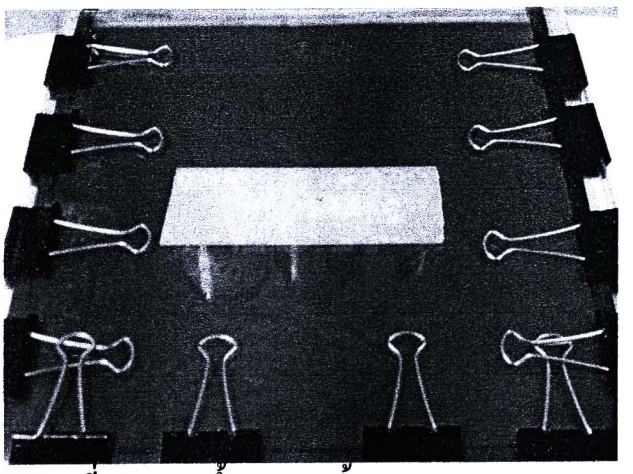
3.3.2.4 การทดลองหาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการทดลองเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ สำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เทคนิครีฟลักซ์ เทคนิคซอกเลต เทคนิคผสมระหว่างรีฟลักซ์กับซอกเลต และการใช้ถังความดัน ในการทดลองนี้ใช้ตัวทำละลาย 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 20 กรัม ขนาด 60-80 mesh อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ความดัน 15 บาร์ (สำหรับเทคนิคถังความดัน) สกัดตัวทำละลายด้วยน้ำ แยกชั้นตัวทำละลายและระเหยด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน

3.3.3 การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางกล

การทดลองการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางกล เป็นการทดลองการผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดอนุภาค 60-80 mesh ขนาดอนุภาค 80-160 mesh และขนาดอนุภาค 160-200 mesh กับอีพ็อกซีเรซินใหม่ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

3.3.4 การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบ

การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบใช้แผ่นกระจก 2 แผ่น ขนาด 30×30 ตารางเซนติเมตร ประกบเข้าหากัน ใช้ยางหนา 3.5 มิลลิเมตร เป็นแผ่นกั้นแล้วยึดที่ขอบของแผ่นกระจกทุกด้าน ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบ

อัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับสารเชื่อมขวาง เรซินจากการรีไซเคิลผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารเชื่อมขวาง และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารเชื่อมขวาง แสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนผสมของอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินผสมเรซินจากการรีไซเคิล และอีพ็อกซีเรซินผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ชิ้นงานทดสอบ	อัตราส่วนผสมของเรซินใหม่ต่อรีไซเคิลเรซิน (กรัม)	อัตราส่วนผสมของเรซินใหม่ต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (กรัม)	อัตราส่วนผสมของเรซินผสมต่อสารเชื่อมขวาง (กรัม)
E0	-	-	100 : 35
E1	90 : 10	-	90 : 10 : 31.5
E2	80 : 20	-	80 : 20 : 28.0
E3	70 : 30	-	70 : 30 : 24.5
E4	-	90 : 10	90 : 10 : 31.5
E5	-	80 : 20	80 : 20 : 28.0
E6	-	70 : 30	70 : 30 : 24.5
E7	-	90 : 10	90 : 10 : 31.5
E8	-	80 : 20	80 : 20 : 28.5
E9	-	70 : 30	70 : 30 : 24.5
E10	-	90 : 10	90 : 10 : 31.5

ตารางที่ 3-2 (ต่อ)

E11	-	80 : 20	80 : 20 : 28.5
E12	-	70 : 30	70 : 30 : 24.5

E0 คือ อีพ็อกซีเรซินใหม่

E1 คือ เรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10

E2 คือ เรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 20

E3 คือ เรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30

E4 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10

E5 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 20

E6 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 30

E7 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 80-160 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10

E8 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 80-160 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 20

E9 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 80-160 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 30

E10 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10

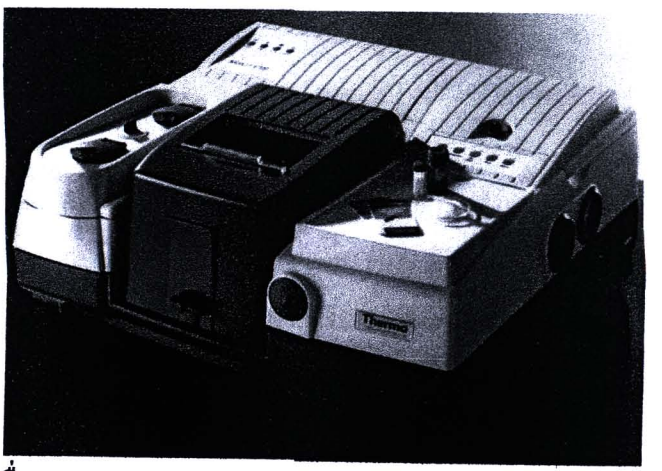
E11 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 20

E12 คือ เรซินใหม่ผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 30

ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ใช้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง และกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสุดท้ายใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 15 ชั่วโมง

3.3.5 การพิสูจน์หมู่ฟังก์ชัน

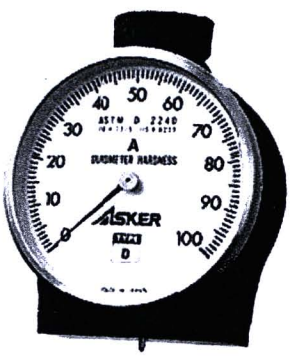
การพิสูจน์หมู่ฟังก์ชันของเรซินจากการรีไซเคิลด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี เครื่องมือทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ใช้สารตัวอย่าง 0.2 มิลลิลิตร หยดลงบน KBr cell ดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy รุ่น Nicolet 6700

3.3.6 การทดสอบความแข็ง

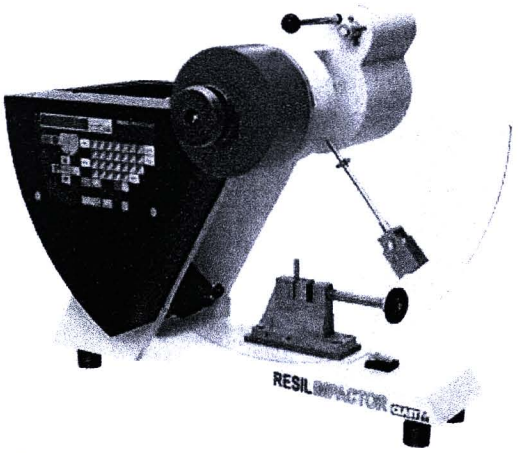
การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบ ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) D 2240 เครื่องมือทดสอบ Shore D Durometer ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 เครื่องมือทดสอบความแข็ง Shore D Durometer รุ่น Asker

3.3.7 การทดสอบแรงกระแทก

การทดสอบแรงกระแทก ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทก Ceast แบบ Izod ค้อน 2.75 จูล ดังภาพที่ 3-9

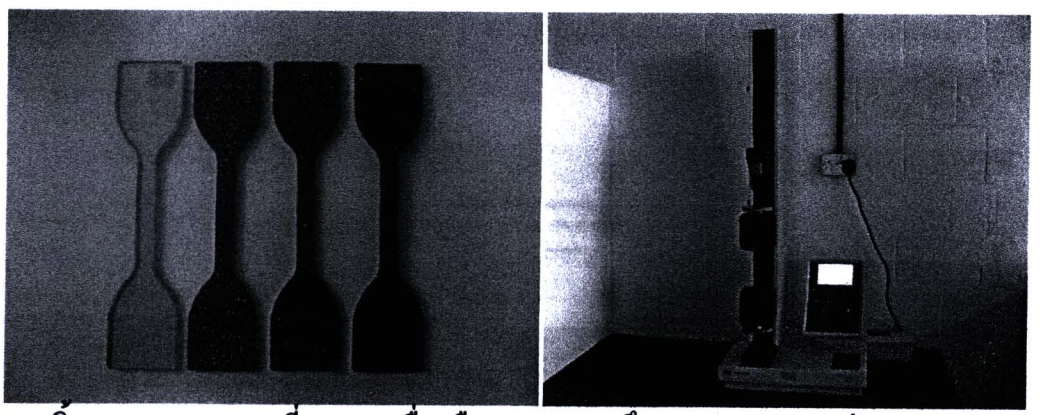


ภาพที่ 3-9 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod รุ่น Resil impactor

3.3.8 การทดสอบแรงดึงและแรงดัด

การทดสอบแรงดึง ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ตัวอย่างทดสอบแบบที่ 4 Load Cell 5000 N อัตราเร็วแรงดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ดังภาพที่ 3-10 ตัดชิ้นงานด้วยเทคนิค Wire Cut

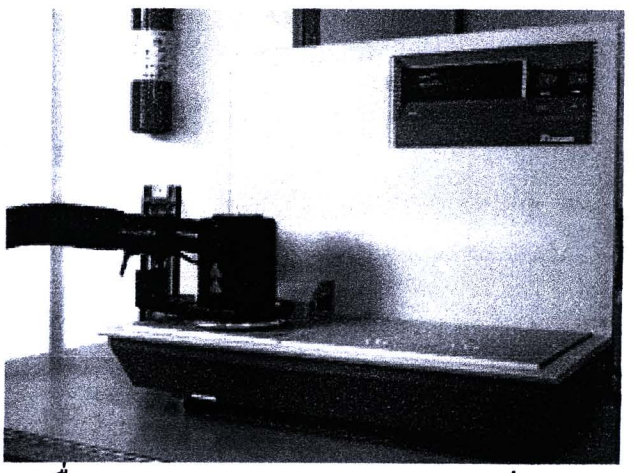
การทอสอบแรงดัด ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 ตัวอย่างทดสอบขนาด 127? 12.7? 3.2 มิลลิเมตร Support Span ขนาดยาว 80 มิลลิเมตร ลึก 4.7 มิลลิเมตร Load Cell 5000 N อัตราเร็วแรงกด 5 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 3-10ชิ้นงานทดสอบแบบที่ 4 และเครื่องมือทดสอบแรงดึง Tensile Testing รุ่น HSK-S, 0066

3.3.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคโลริเมทรี

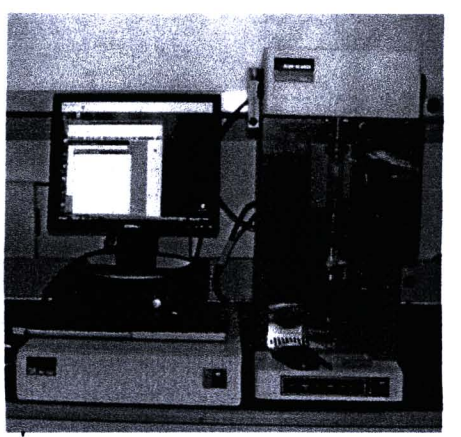
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคโลริมิเตอร์ ดังภาพที่ 3-11 สารตัวอย่าง 3 มิลลิกรัม อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ทดสอบช่วงอุณหภูมิ 0-250 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-11 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry รุ่น DSC 2910

3.3.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส

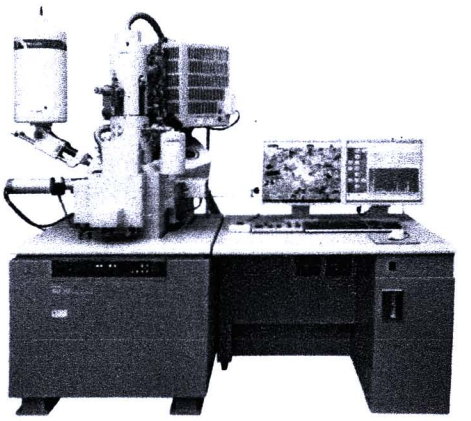
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส ดังภาพที่ 3-12 สารตัวอย่าง 1 มิลลิกรัม บรรจุในถาดอลูมิเนียม อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-12 เครื่อง Thermaogravimetric Analysis รุ่น TGA7

3.3.11 การทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยา

การทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากบริษัท Hitachi รุ่น S-4800 ดังภาพที่ 3-13 หักชิ้นงานทดสอบในไนโตรเจนเหลว เคลือบผิวชิ้นงานด้วยแพลทตินัม ค่าความต่างศักย์ 15 kV กำลังขยาย 200, 600 และ 2000 เท่า



ภาพที่ 3-13 เครื่อง Scanning Electron Microscopy รุ่น S-4800