

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์

2.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เป็นแผ่นยึดและเป็นทางเดินของสัญญาณไฟฟ้าระหว่างชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ประกอบอยู่ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบไปด้วยแผ่นฐานหรือฉัพเตรท (Substrate) เป็นแผ่นฉนวนบาง เช่น แผ่นใยแก้วอัดขึ้นรูปด้วยอีพ็อกซีเรซินหรือกระดาษใยฝ้ายอัดขึ้นรูปด้วยฟีนอลิกเรซิน แผ่นใยแก้วหรือกระดาษใยฝ้ายมีหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับแผ่นฉัพเตรท ส่วนพอลิเมอร์มีหน้าที่กระจายแรงและยึดแผ่นเสริมแรงไว้ด้วยกัน หน้าที่หลักของแผ่นฉัพเตรท คือ รองรับแผ่นตัวนำที่ใช้เชื่อมสัญญาณไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ แผ่นตัวนำไฟฟ้าที่นิยมคือ แผ่นทองแดง ในครั้งแรกตัวนำไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าทำจากหมึกที่เป็นตัวนำไฟฟ้าลากลงบนแผ่นฉัพเตรท จึงทำให้เป็นที่มาของคำว่า Printed Circuit Board (PCB) แต่ปัจจุบันนิยมใช้แผ่นทองแดงบาง ยึดกับผิวหน้าของแผ่นฉัพเตรทด้วยกาว เรียกว่า Metal Clad Laminate [6-7]

ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มี 4 ประเภท ได้แก่

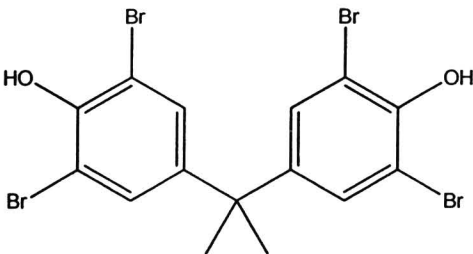
2.1.1 Single-Side Boards เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประเภทที่มีลายทองแดงหน้าเดียว ประกอบด้วยฉัพเตรทและชั้นของแผ่นตัวนำเพียงด้านเดียว เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปที่มีความหนาของแผ่นวงจรไม่มากนัก ที่ใช้กันอยู่มาก คือ ฟีนอลิกเรซินและอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งฟีนอลิกจะมีราคาถูกกว่า แต่มีข้อเสียคือ เปราะ มีความแข็งแรงต่ำและมีความต้านทานความชื้นต่ำ ทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนได้ง่าย จึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีความหนาแน่นของความถี่สูง ๆ

2.1.2 Double-Sided Boards เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีลายทองแดงสองด้าน ประกอบด้วยชั้นของแผ่นตัวนำสองด้าน คือ ด้านบนและด้านล่างประกบกับชั้นฉัพเตรท วัสดุที่นิยมนำมาใช้ คือ แผ่นใยแก้วกับอีพ็อกซีเรซิน แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะนี้เหมาะสำหรับงานที่มีความหนาแน่นของความถี่ปานกลางถึงความถี่สูงและยังสามารถใช้วิธีการ Plat Through Hole (PTH) เพื่อให้เส้นทั้งสองเชื่อมต่อกันได้

2.1.3 Multi-Layer Boards เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีลายทองแดงหลาย ๆ ชั้น แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ ประกอบด้วยชั้นของแผ่นตัวนำและฉนวนมากกว่าสองชั้นขึ้นไป โดยการอัดชั้นต่าง ๆ เข้าหากันด้วยความร้อนและเครื่องอัดแรงดันสูง เหมาะสำหรับงานที่มีความหนาแน่นของความถี่สูงถึงสูงมาก

2.1.4 Flexible Circuit PCB เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอ่อน เหมาะสำหรับใช้งานที่ต้องการมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ได้แก่ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อฮาร์ดดิสก์ที่มีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นส่วนประกอบมี 4 ชนิด ได้แก่ FR-3 FR-4 CEM-2 CEM-3 และCEM-4 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมใช้งานมากที่สุด คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 ใช้อีพ็อกซีเรซินผสมสารหน่วงการติดไฟชนิด Tetrabromobisphenol A ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของ Tetrabromobisphenol A

มีหน้าที่ยึดแผ่นใยแก้วสานไว้ด้วยกัน แผ่นใยแก้วสานเป็นใยแก้วชนิด E-Glass Fiber ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และนิยมใช้ (DICY) เป็นสารเชื่อมขวางสำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอีพ็อกซีเรซินเป็นส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นส่วนประกอบ [7]

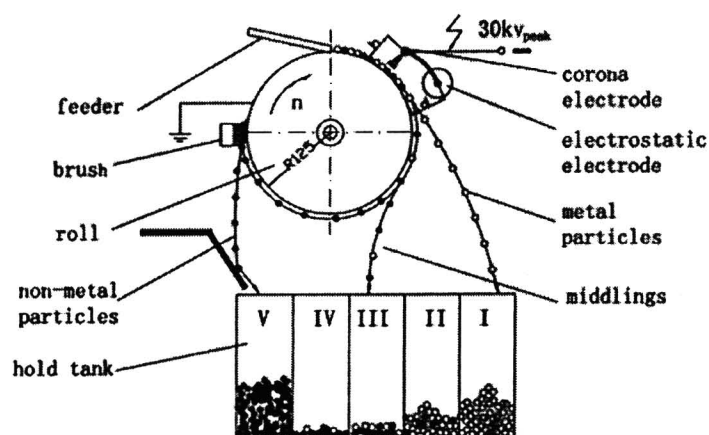
ชนิด	วัสดุเสริมแรง	พอลิเมอร์	สารหน่วงการติดไฟ
FR-3	กระดาษใยฝ้าย	อีพ็อกซีเรซิน	มี
FR-4	แผ่นเส้นใยแก้วสาน	อีพ็อกซีเรซิน	มี
CEM-2	กระดาษใยฝ้าย/แผ่นใยแก้วสาน	อีพ็อกซีเรซิน	ไม่มี
CEM-3	แผ่นใยแก้วสาน/แผ่นใยแก้วอัด	อีพ็อกซีเรซิน	มี
CEM-4	แผ่นใยแก้วสาน/แผ่นใยแก้วอัด	อีพ็อกซีเรซิน	ไม่มี

2.2 การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในปีพ.ศ. 2546 กรมควบคุมมลพิษได้มีการสำรวจปริมาณขยะจากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้น มีประมาณ 1,700,000 ชิ้น หรือคิดเป็นปริมาณ 58,000 ตัน ซึ่งขยะจากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดำเนินการสำรวจส่วนใหญ่สามารถขายเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ก็ยังมีขยะจากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์อีกจำนวนมากที่คาดว่าจะถูกทิ้งรวมไปกับขยะมูลฝอยทั่วไป โดยขยะจากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์มีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบหลัก

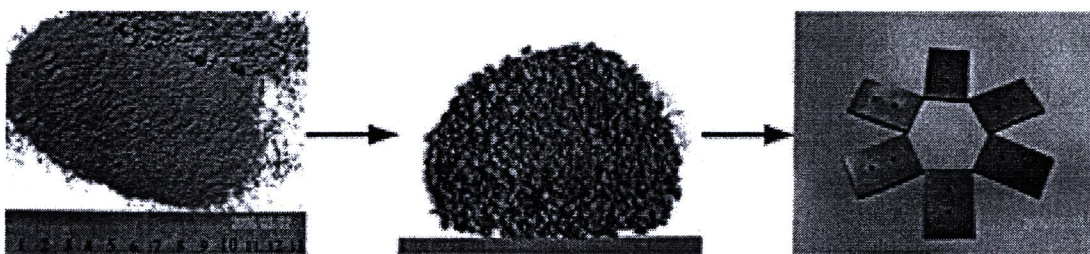
การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ การรีไซเคิลด้วยวิธีทางกล การรีไซเคิลด้วยวิธีทางความร้อน และการรีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมี [8]

การรีไซเคิลด้วยวิธีทางกลเป็นวิธีเบื้องต้นที่ง่ายที่สุด คือ การคัดแยกชิ้นส่วนและจัดลำดับตามความบริสุทธิ์ของสารหรือชิ้นส่วนที่ต้องการ เช่น IC สายไฟ เหล็กและพลาสติก เพื่อนำชิ้นส่วนกลับมารีไซเคิลและผลิตใหม่ เริ่มจากการเตรียมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลงและแยกโลหะออกก่อน การเตรียมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ การลดขนาดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องฉีก เป็นการลดขนาดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบหยาบ หลังจากนั้นนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านเครื่องฉีกเข้าเครื่องบด เพื่อให้ลักษณะของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นผง เครื่องมือที่ใช้แยกชนิดของโลหะออกจากส่วนที่ไม่ใช่โลหะ คือ Corona Electrostatic Separation ดังแสดงในภาพที่ 2-2 เป็นเทคนิคการแยกโลหะแต่ละชนิดและส่วนที่ไม่ใช่โลหะออกจากกัน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของโลหะ

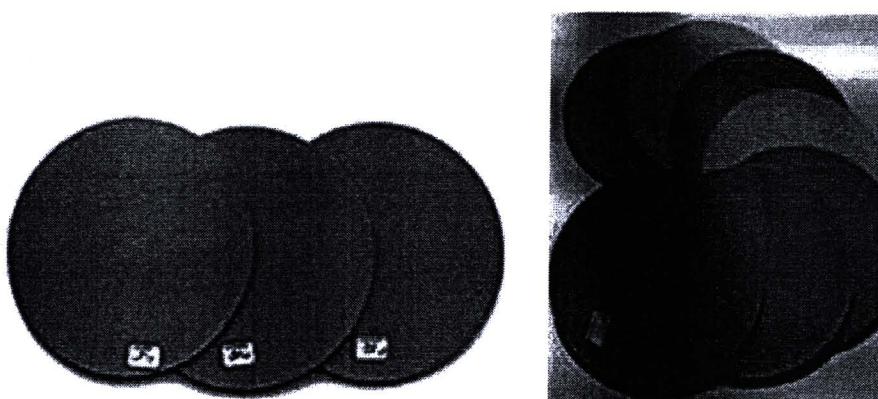


ภาพที่ 2-2 องค์ประกอบของเครื่อง Corona Electrostatic Separation [9]

ผงของพอลิเมอร์ที่ได้จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำมาผสมกับเรซินใหม่ในลักษณะของสารตัวเติม ดังแสดงในภาพที่ 2-3 พอลิเมอร์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางกลจะนำไปผสมกับเรซินใหม่และอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ ตามต้องการหรืออัดขึ้นรูปพอลิเมอร์เป็นแผ่นสำหรับเสริมแรง [8, 10-12] ดังแสดงในภาพที่ 2-4 แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการรีไซเคิลด้วยวิธีทางกล คือ กลิ่นของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ฝุ่น และเสียงดังของเครื่องมือที่ใช้ในการบด



ภาพที่ 2-3 พอลิเมอร์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางกลโดยผสมกับเรซินใหม่ [10]



ภาพที่ 2-4 แผ่นพอลิเมอร์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางกลโดยการอัดขึ้นรูป [1, 5]

การรีไซเคิลด้วยวิธีทางความร้อนเป็นวิธีการรีไซเคิลที่ง่ายที่สุดในการแยกโลหะออกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และสามารถนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี มีโครงสร้างโมเลกุลใกล้เคียงกับน้ำมัน การรีไซเคิลพอลิเมอร์ด้วยวิธีทางความร้อนจึงได้พลังงานความร้อนสูง เทียบเท่าถ่านหิน [8] แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการรีไซเคิลด้วยวิธีทางความร้อน คือ เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม เป็นมลพิษทางอากาศอย่างมากและใช้เงินลงทุนในการจัดการระบบทางด้านสิ่งแวดล้อมสูงมาก

การรีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมีสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ โลหะและพอลิเมอร์ การรีไซเคิลโลหะเริ่มจากการนำโลหะที่ได้จากการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระบวนการคืนสภาพ

(Recovery) ให้เป็นโลหะบริสุทธิ์ เช่น การคืนสภาพตะกั่วออกไซด์ด้วยคาร์บอน พลังงาน สารหนู และ ดีบุก ดังแสดงในสมการที่ (2-1) ถึง (2-4)



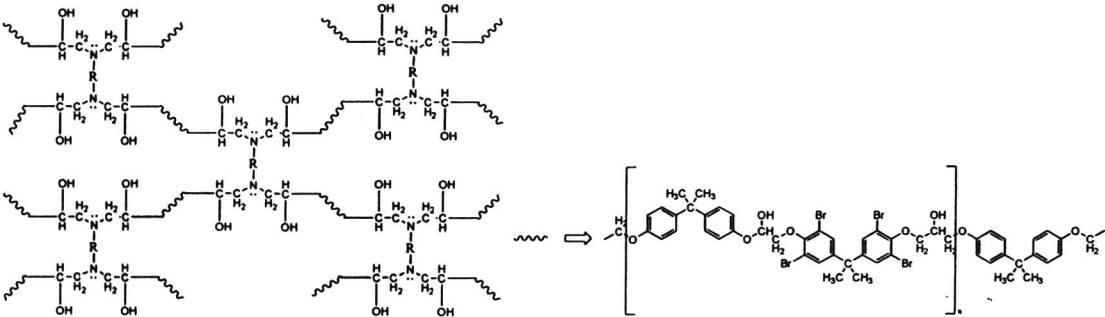
การคืนสภาพทองแดงออกไซด์ด้วยคาร์บอนและเหล็ก ดังแสดงในสมการที่ (2-5) และ (2-6)



เงิน ทอง และแพลเลเดียม สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยการ หลอมโลหะให้เป็นของไหลแล้วจึงแยกด้วยขั้วไฟฟ้า [8] การรีไซเคิลของส่วนที่ไม่ใช่โลหะสามารถ รีไซเคิลด้วยสารละลายกรด [13,14] หรือตัวทำละลาย [15-19] ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการรีไซเคิล ด้วยวิธีทางเคมี คือ เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมสูงมากและราคาของเครื่องมือที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มีราคาสูง

2.3 อีพ็อกซีเรซิน

อีพ็อกซีเรซินอาจจัดเป็นพอลิเอเทอร์ แต่เนื่องจากมีหมู่อีพอกไซด์อยู่ในโมเลกุลจึงเรียกว่า อีพ็อกซี อีพ็อกซีเรซินเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบ โครงร่างตาข่ายสามมิติ (3D-Network Polymerization) ดังแสดงในภาพที่ 2-5

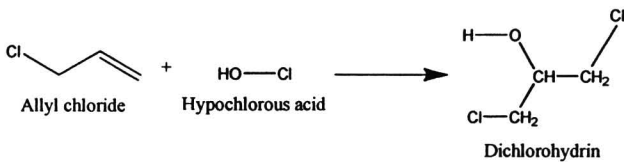


ภาพที่ 2-5 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบโครงร่างตาข่ายของอีพ็อกซีเรซิน

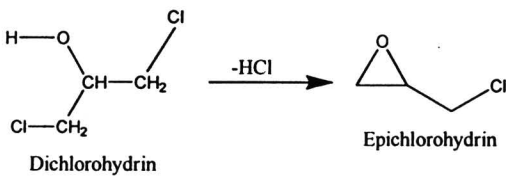
อีพ็อกซีเรซินมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีที่ดี เช่น ทนต่อแรงดึงและแรงคัดโค้ง อดความชื้นต่ำ รูปร่างคงที่ การหดตัวต่ำ ทนอุณหภูมิสูง ด้านการนำไฟฟ้า ทนต่อสารเคมี [20-22] สำหรับการใช้ งานของอีพ็อกซีเรซินจะต้องผสมกันระหว่างสาร 2 ชนิด ได้แก่ Diglycidylether of Bisphenol A กับ สารเชื่อมขวาง การเตรียม Diglycidylether of Bisphenol A สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับ Bisphenol A และ Epichlorohydrin สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง แอลลิลคลอไรด์ (Allyl chloride) กับกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid) ทำปฏิกิริยาเคมีกันที่ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยเตรียมแอลลิลคลอไรด์จากการคลอรีเนชัน (Chlorination) ของโพรพิลีน (Propylene) กับคลอรีน (Chlorine) ใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 2 atm.ดังแสดงในภาพที่ 2-6



เมื่อได้แอลลิลคลอไรด์แล้วนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับกรดไฮโปคลอรัสได้เป็น Dichlorohydrin ดังแสดงในภาพที่ 2-7



เมื่อได้ Dichlorohydrin แล้วนำไปกำจัดกรดออกก็จะได้ epichlorohydrin ดังแสดงในภาพที่ 2-8

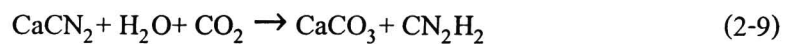


ในส่วนของ Bisphenol A เตรียมได้จากฟีนอล (Phenol) 2 โมล ทำปฏิกิริยากับอะซีโตน (Acetone) 1 โมล ดังแสดงในภาพที่ 2-9

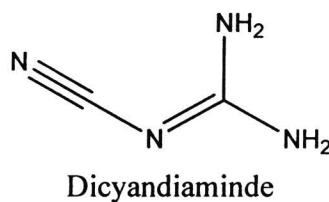
นำ Calcium carbide ที่ได้ทำปฏิกิริยาต่อกับไนโตรเจน (Nitrogen) ที่ความดัน 2 ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ได้ผลิตกันต์เป็น Calcium cyanamide ดังแสดงในสมการที่ (2-8)



นำ Calcium cyanamide ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้ผลิตกันต์เป็น Cyanamide ดังแสดงในสมการที่ (2-9)



Cyanamide สามารถเกิด Self-Condensations เป็น Dicyandiamide ได้หรือนำ Cyanamide ไปทำปฏิกิริยากับเบสก็สามารถเกิดเป็น Dicyandiamide ได้เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างโมเลกุลของ Dicyandiamide

2.5 เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 เป็นเส้นใยแก้วสานชนิด E-Glass Fiber เส้นใยแก้วชนิดนี้เป็นสารประกอบของ Alumino-Borosilicate ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หรืองานที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะและยังสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี เพราะเส้นใยแก้วชนิด E-Glass Fiber มีปริมาณของอัลคาไลน์ออกไซด์ (Alkaline oxide) น้อยหรือไม่มีเลยและมีราคาถูก ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [6] องค์ประกอบของเส้นใยแก้วชนิด E-Glass Fiber ดังแสดงในตารางที่



ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของเส้นใยแก้วชนิด E-Glass Fiber [7]

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Silicon dioxide	51-56
Calcium oxide	16-25
Aluminum oxide	12-16
Boron oxide	5-10
Iron oxide	0.05-0.4
Magnesium oxide	0-5
Sodium oxide + Potassium oxide	0-2
Fluorides	0-1
Titanium oxide	0-0.8

2.6 เทคนิคการสกัด

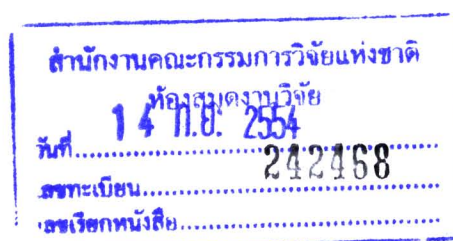
กระบวนการแยกเกิดขึ้นได้เมื่อมีการแพร่กระจายของสารที่สนใจระหว่างเฟสสองเฟส ถ้ามีสาร 2 ชนิด ที่มีอัตราส่วนการแพร่กระจายระหว่างเฟส (Phase) สองเฟสต่างกัน จะทำให้สามารถแยกสารทั้งสองชนิดออกจากกันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าอัตราส่วนของการแพร่กระจายของสารทั้งสองชนิดต่างกันมากกว่า 10^3 เท่า จะสามารถแยกสารทั้งสองออกจากกันได้โดยทำการแยกเพียงครั้งเดียว การแยกที่ทำได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้การแยกเพียงครั้งเดียว เรียกว่า Single-Stage Process ถ้าสารละลายแต่ละตัวมีค่าอัตราส่วนการแพร่กระจายแตกต่างกันไม่มาก การแยกให้สมบูรณ์สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการแยกหลาย ๆ ครั้ง เรียกว่า Multi-Stage Process อัตราส่วนของการแพร่กระจายของตัวถูกละลายระหว่างเฟสทั้งสอง เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการกระจาย [23] ดังแสดงในสมการที่ (2-10)

$$K_d = \frac{C_s}{C_m} \quad (2-10)$$

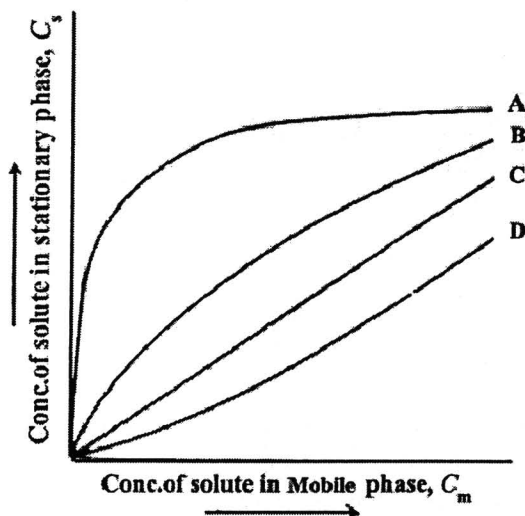
เมื่อ

C_s คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสอยู่กับที่

C_m คือ ความเข้มข้นของตัวทำละลายในเฟสเคลื่อนที่



ในอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่าง C_s กับ C_m จะเป็นสัดส่วนโดยตรงทุกๆ ความเข้มข้น แต่ในกรณีทั่วๆ ไป C_s กับ C_m จะเป็นสัดส่วนโดยตรงเฉพาะช่วงความเข้มข้นหนึ่ง ๆ เท่านั้น ความสัมพันธ์ของ C_s กับ C_m จะให้กราฟที่มีลักษณะแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของตัวถูกละลายและเฟสทั้งสอง ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 กราฟการแพร่กระจายของตัวถูกละลายระหว่างเฟสสองเฟส [23]

กราฟ C มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงเพราะเป็นกรณีของอุดมคติซึ่งเกิดสมมูล เนื่องจากการแพร่กระจายระหว่างเฟสทั้งสองนั้นเท่านั้น ไม่มีสมมูลอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น เกิดการรวมตัว การแตกตัว ในกรณีที่มีสมมูลอย่างอื่นเกิดขึ้นในการแพร่กระจายด้วย จะทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเหมือนกราฟ B หรือ D ตัวอย่างเช่น มีน้ำเป็นเฟสอยู่กับที่และเบนซีน (Benzene) เป็นเฟสเคลื่อนที่ได้ เมื่อมีกรดอินทรีย์ (Organic acid) เป็นตัวถูกละลาย พบว่าในเบนซีนจะมีกรดอินทรีย์ที่ไม่แตกตัวละลายอยู่ได้มาก แต่สำหรับกราฟ A เป็นกราฟที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวถูกละลายกระจายโดยการดูดซับไว้ที่เฟสของแข็งกับละลายอยู่ในเฟสของเหลว ถ้าตัวถูกละลายมีปริมาณน้อย ๆ พบว่าความสัมพันธ์ยังคงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย คือ ปริมาณน้อยจะถูกดูดซับที่ผิวของเฟสของแข็งได้น้อย ปริมาณมากจะถูกดูดซับได้มาก แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายให้สูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง พบว่าความสัมพันธ์จะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายแต่อย่างใด ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่ผิวของเฟสของแข็งจะคงที่ เพราะของแข็งมีปริมาณคงที่ จึงทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะดังกราฟ A เรียกว่ากราฟของ Adsorption Isotherm และความสัมพันธ์ของตัวถูกละลายในเฟสทั้งสอง ดังแสดงในสมการที่ (2-11)

$$C_s = kC_m^n \quad (2-11)$$

ตามภาพที่ 2-12 จะเห็นได้ว่า ในช่วงของความเข้มข้นต่ำ ๆ ความสัมพันธ์ของ C_s กับ C_m ก่อนข้างเป็นเส้นตรง ดังนั้น การใช้ความเข้มข้นต่ำ ๆ จึงประมาณได้ว่า C_s กับ C_m มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ซึ่งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยมากจากการประมาณค่านี้ ความผิดพลาดในการแยกทั้งหมดเกิดขึ้น เนื่องจากกระบวนการแยกไม่สามารถทำให้สารที่สนใจกระจายไปอยู่ในเฟสใดเฟสหนึ่งได้โดยสมบูรณ์ เพราะเกิดสมดุลของการกระจายระหว่างเฟสสองเฟสของสารที่สนใจขึ้น ซึ่งทำให้อัตราส่วนของสารที่สนใจทำการแยกออกมาได้ต่อสารที่มีอยู่ทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 1 ดังแสดงในสมการที่ (2-12)

$$Q_m = \frac{M}{M_0} \quad (2-12)$$

เมื่อ

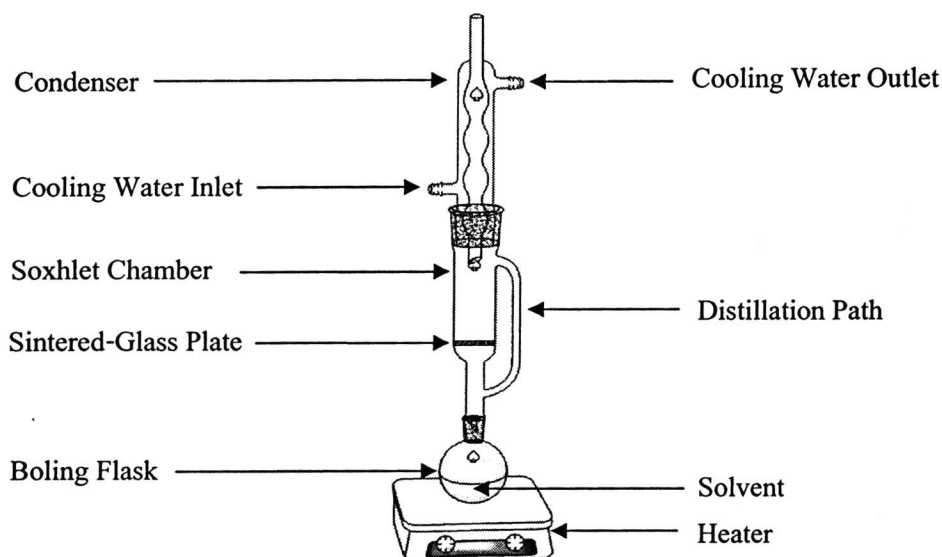
- Q_m คือ อัตราส่วนของสารที่สนใจที่แยกออกมาได้ต่อสารที่สนใจที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น
 M คือ สารที่สนใจที่แยกออกมาได้
 M_0 คือ สารที่สนใจที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น

เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้แยกสารประกอบที่สนใจออกจากสารผสม โดยอาศัยหลักการกระจายตัวของตัวถูกละลายหรือสารที่สนใจระหว่างตัวทำละลาย 2 ชนิด ที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายแต่ละชนิดจะมีค่าเท่ากับเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย อัตราส่วนความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายที่ 1 ต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายที่ 2 ที่สมดุล คือ ค่าคงที่ของสมดุลที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายหรือสัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (Distribution Coefficient) ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะตัวถูกละลายชนิดหนึ่ง ๆ สำหรับตัวทำละลายคู่หนึ่ง ๆ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น วิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลว 2 ชนิด เรียกว่า Liquid-Liquid Extraction โดยปกติของเหลวชนิดหนึ่ง คือน้ำ ส่วนของเหลวอีกชนิดคือ ตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งตัวทำละลายทั้งสองจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน น้ำเป็นตัวทำละลายที่สามารถละลายไอออนต่าง ๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีขั้ว ตัวทำละลายอินทรีย์สามารถละลายสารประกอบที่เป็นกลางหรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดไม่มีขั้ว

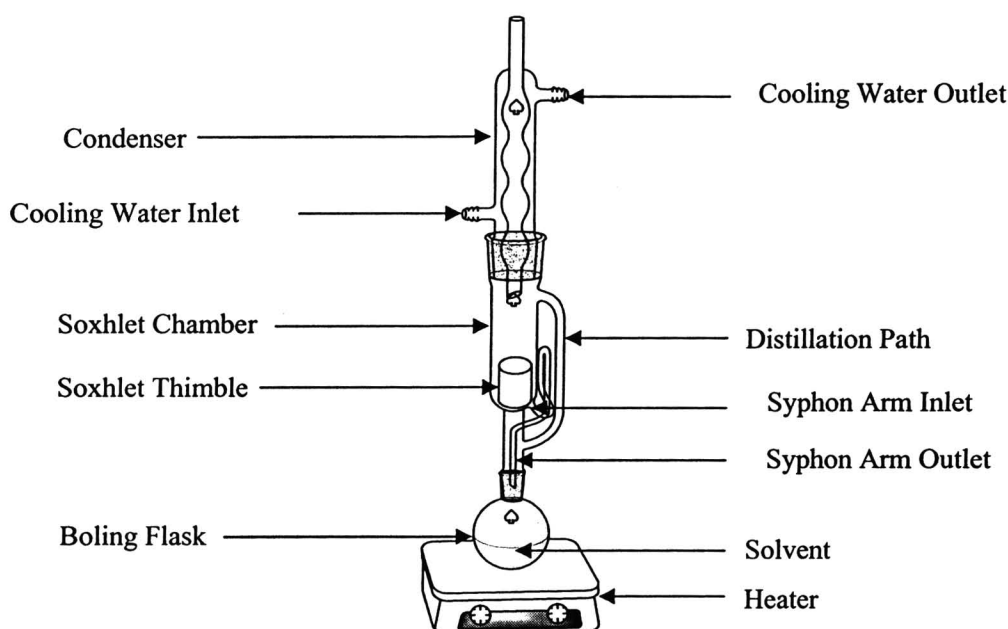
ในกรณีที่สารสกัดใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลวชนิดเดียว สารสกัดที่สนใจออกจากสารตัวอย่างของแข็ง จะเรียกวิธีสกัดนี้ว่า Solid-Liquid Extraction ตัวทำละลายของเหลวที่ใช้ในการสกัดจะเป็นตัวทำละลายอินทรีย์หรือน้ำขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่างที่ต้องสกัด การสกัดจะทำได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการละลายของตัวถูกละลายในตัวสกัดหรือตัวทำละลายของเหลวและเวลาที่ใช้ในการสกัด เวลาที่ใช้จะสั้นหรือนานขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวถูกละลายที่อยู่ในสารตัวอย่างของแข็ง ถ้าตัวถูกละลายเพียงดูดซับที่ผิวของของแข็ง การสกัดจะใช้เวลาน้อย แต่ถ้าตัวถูกละลายอยู่ภายในของแข็ง จะต้องใช้เวลามากกว่า และถ้าปรากฏว่าการกระจายของตัวทำละลายสู่ภายในของแข็งเกิดขึ้นได้ช้ามาก จำเป็นต้องบดของแข็งให้ละเอียดก่อนทำการสกัด วิธีการสกัดของแข็งสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

2.6.1 ถ้าตัวถูกละลายอยู่ในสารตัวอย่างของแข็งเพียงแค่ดูดซับที่ผิวและการละลายของตัวถูกละลายในตัวสกัดมีค่าสูง การสกัดสามารถทำได้ง่าย ๆ คือ นำสารตัวอย่างใส่ลงในบีกเกอร์ (Beaker) หรือขวดปากกว้างแล้วเติมตัวสกัดหรือตัวทำละลายลงไป จากนั้นกวนสารที่อยู่ในบีกเกอร์ ถ้าใช้ขวดปากกว้างที่มีฝาปิดสนิทได้ก็สามารถใช้การเขย่า เมื่อคนหรือเขย่าเป็นเวลานานพอจนแน่ใจว่าตัวถูกละลายละลายในตัวสกัดหมดแล้ว ให้ใช้วิธีกรองเอาของแข็งออกจากสารละลาย ด้วยเทคนิคนี้ก็สามารถแยกตัวถูกละลายออกจากสารตัวอย่างของแข็งได้ เทคนิคนี้เหมาะสำหรับใช้ในการแยกสารประกอบประเภทเกลือของสารอินทรีย์และเป็นเทคนิคที่สำคัญในกระบวนการชะล้าง (Leaching Operation)

2.6.2 ถ้าตัวถูกละลายเป็นสารประกอบอินทรีย์หรือสารทางชีววิทยา ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีการละลายในตัวสกัดต่ำ ทำให้การสกัดจะสมบูรณ์ได้ต้องใช้เวลานาน ๆ จำเป็นต้องใช้เทคนิคของการสกัดอย่างต่อเนื่อง เครื่องมือที่ใช้สำหรับการสกัดอย่างต่อเนื่องมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ Continuous Infusion Extractor และ Discontinuous Infusion Extractor หรือเครื่องมือสกัดชอกเลต ดังแสดงในภาพที่ 2-13 และ 2-14



ภาพที่ 2-13 Continuous Infusion Extractor



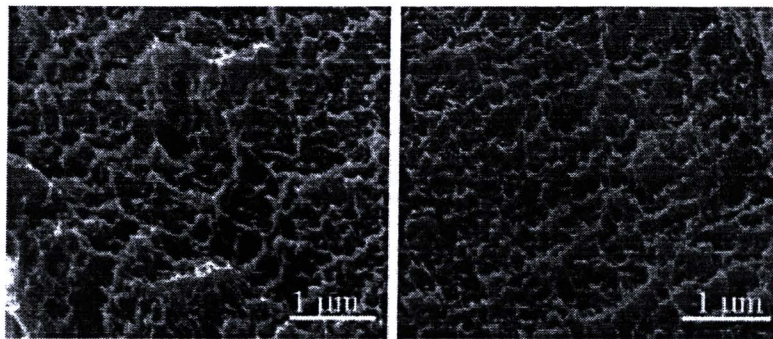
ภาพที่ 2.14 Discontinuous Infusion Extractor หรือเครื่องสกัดชอกเลต

2.7 การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก

ความเสียหายหรือการแตกหักที่เกิดขึ้นกับวัสดุ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) โดยการแตกหักแบบเปราะจะได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจาก การแตกหักดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวร (Plastic Deformation) น้อยมาก จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วและมีผลกระทบที่ค่อนข้างรุนแรง การป้องกันหรือหลีกเลี่ยงได้ยาก ส่วนการแตกหักแบบเหนียวนั้น โดยทั่วไปจะมี

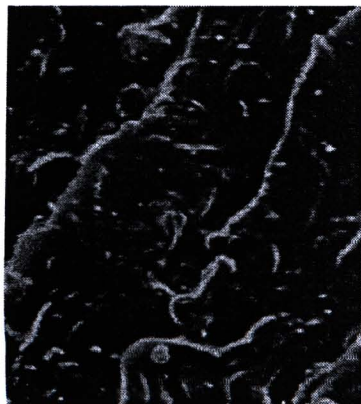
ลักษณะพื้นผิวของการแตกหักที่ค่อนข้างหยาบและจะเกิด Plastic Deformation จำนวนมากก่อนการแตกหัก ทำให้เรามีเวลาเพียงพอที่จะทำการเปลี่ยนแปลง แก๊ซหรือป้องกันอุปกรณ์ เครื่องมือนั้น ๆ ก่อนความเสียหายเกิดขึ้น

การแตกหักแบบเปราะ สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้อีก 2 ประเภท คือ การแตกแบบเปราะ-เปราะและการแตกแบบเปราะ-เหนียว พื้นผิวการแตกหักแบบเปราะจะมีลักษณะเรียบเสมอและมีการเกิด Plastic Deformation น้อยมาก ในขณะที่การแตกแบบเหนียวจะมีรูปแบบการแตกหักที่มีลักษณะแบบ Dimple Rupture ดังแสดงในภาพที่ 2-15



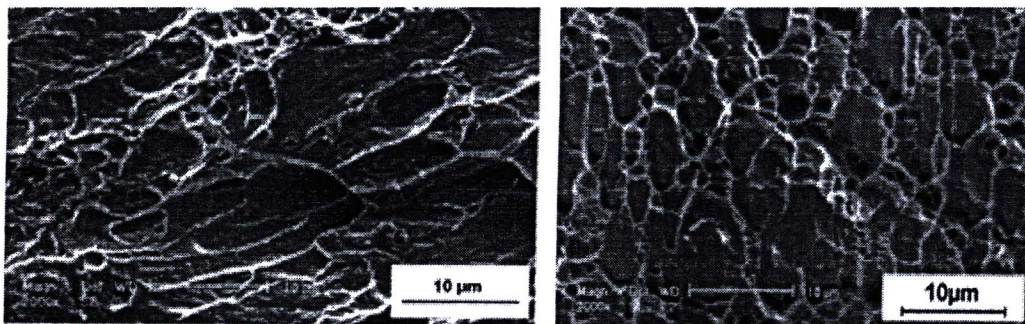
ภาพที่ 2-15 ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแบบ Dimple Rupture [24]

ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิด Plastic Deformation ค่อนข้างมากในระหว่างการแตกหัก การแตกแบบเปราะโดยทั่วไปจะแสดงพื้นผิวของการแตกหักที่ค่อนข้างเรียบส่งผลให้มีพื้นที่ผิวการแตกหักน้อย พลังงานพื้นผิว (Surface Energy) ระหว่าง 2 พื้นผิว มีพลังงานต่ำ พื้นผิวการแตกหักแบบเปราะมีลักษณะเป็นกลุ่มโครงสร้าง (Facet) เหมือนเส้นลายน้ำ (River Line Pattern) หรือ Stress Line Pattern ดังแสดงในภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแบบ Stress Line Pattern [25]

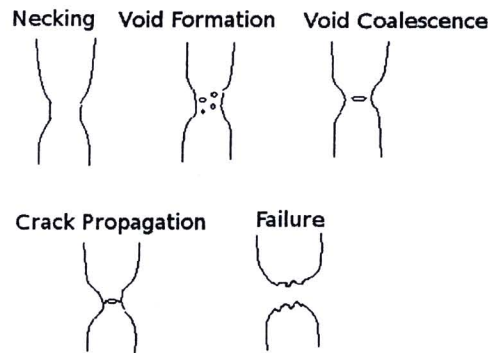
ซึ่งจะมีทิศทางตามความเค้นและชี้ไปที่จุดต้นกำเนิดของรอยแตก การแตกหักแบบเปราะอาจมีบางส่วนที่เกิดการแตกหักแบบเหนียวร่วมด้วย สังเกตได้จากการเกิด Ductile Dimple ร่วมกับ Stress Line เรียกการแตกหักในกรณีนี้ว่า Quasi-Cleavage Fracture ดังแสดงในภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 ลักษณะพื้นผิวการแตกหักแบบ Quasi-Cleavage Fracture [26]

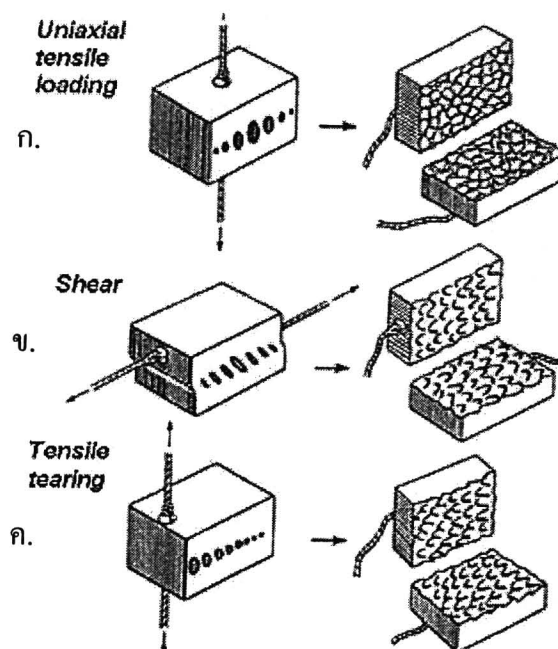
กลไกของการเกิด Stress Line เกิดจากระนาบอะตอมของวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวเอียงกันเล็กน้อย และมีพลังงานพื้นผิวดำต่ำสุด เมื่อรอยแตกขยายเข้ามาในบริเวณระนาบดังกล่าว รอยแตกจะเกิดในระนาบที่มีพลังงานพื้นผิวน้อยที่สุดและเกิดเป็นลักษณะขั้นบันไดบริเวณรอยต่อของระนาบ สาเหตุของการแตกหักแบบเปราะเกิดจากการสะสมความเค้น (Stress Concentration) ตรงบริเวณที่มีข้อบกพร่อง (Defects) เช่น รอยแตก (Crack) รูพรุน (Porosity) และ Inclusion ข้อบกพร่องต่าง ๆ จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของบริเวณ Dislocation จึงเกิดการสะสมความเค้นในระดับที่มากกว่าบริเวณอื่น เกิดเป็นรอยแตกภายในโครงสร้างและเกิดการแตกหักในที่สุด

การแตกหักแบบเหนียว เป็นการศึกษารอยแตกของวัสดุที่ผ่านแรงดึง เมื่อชิ้นงานถูกดึงผ่านจุด Ultimate Tensile Strength จะเกิดลักษณะคอคอด (Necking) ของชิ้นงาน ภายในบริเวณคอคอดจะเกิดช่องว่างเล็ก ๆ (Microvoid) และช่องว่างดังกล่าวจะรวมตัวกันเกิดเป็นรอยแตกที่ใหญ่ขึ้น รอยแตกนี้จะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงที่มากระทำ และเมื่อรอยแตกขยายตัวจนถึงขอบของชิ้นงาน จะเกิดระนาบของแรงเฉือน มีระนาบทำมุมกับทิศของแรงที่มากระทำประมาณ 45 องศา และระนาบของแรงเฉือนจะเชื่อมต่อกับรอยแตกจนทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานในที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ลักษณะการเกิดคอคอด [27]

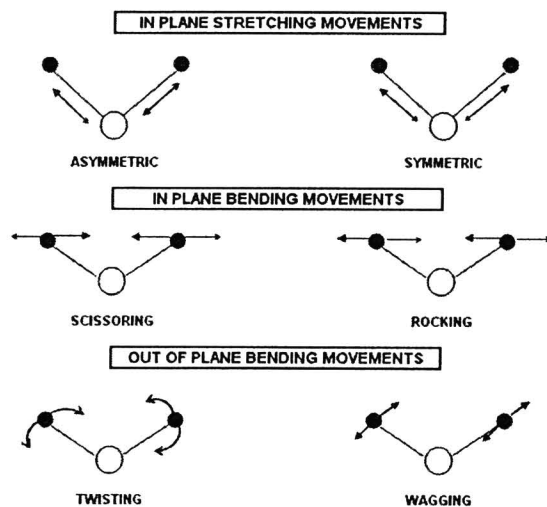
วัสดุที่มีความเหนียวจะเกิดช่วง Plastic deformation ที่ค่อนข้างมาก ผิวรอยแตกที่ขรุขระจะมีพื้นที่มากกว่าผิวรอยแตกที่เรียบ แสดงว่าการแตกหักแบบเหนียวจึงต้องใช้พลังงานในการแตกหักมากกว่าการแตกหักแบบเปราะหรือมีพลังงานพื้นผิวมากกว่านั่นเอง กลไกการเกิด Microvoid เริ่มจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Decohesion) ระหว่างวัสดุพื้น (Matrix) กับ Inclusion หรือ second phase particle แรงภายนอกที่มากระทำจะทำให้เกิด Microvoid และเมื่อวัสดุได้รับแรงอย่างต่อเนื่อง Microvoid จะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นและรวมเป็นขนาดใหญ่ (Microvoid Coalescence) เป็นผลทำให้เกิดรอยแตกขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างและทำให้เกิดการแตกหักในที่สุด ลักษณะของ Microvoid สามารถบอกถึงลักษณะของแรงที่มากระทำได้ ลักษณะของ Microvoid ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวการแตกหักทั้งสองด้านมีลักษณะเป็นหลุมกลม (Equiaxed Shape) แสดงว่าแรงที่มากระทำนั้นเป็นแรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับชิ้นงาน ลักษณะของ Microvoid มีการบิดเบี้ยวเป็น Parabola และพื้นผิวการแตกหักทั้งสองด้าน มีปลายของ Microvoid ชี้ไปในทิศทางที่ตรงกันข้าม แสดงว่าแรงที่มากระทำนั้นเป็นแรงเฉือน และลักษณะของ Microvoid มีการบิดเบี้ยวเป็น Parabola แต่พื้นผิวการแตกหักทั้งสองด้าน มีปลายของ Microvoid ชี้ไปในทิศทางเดียวกัน แสดงว่าแรงที่มากระทำนั้นเป็นแรง Tensile Tearing [27-29] ดังแสดงในภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 Microvoid ที่เกิดจากแรงกระทำลักษณะแตกต่างกัน ก. แรงดึง ข. แรงเฉือน ค. Tensile Tearing [29]

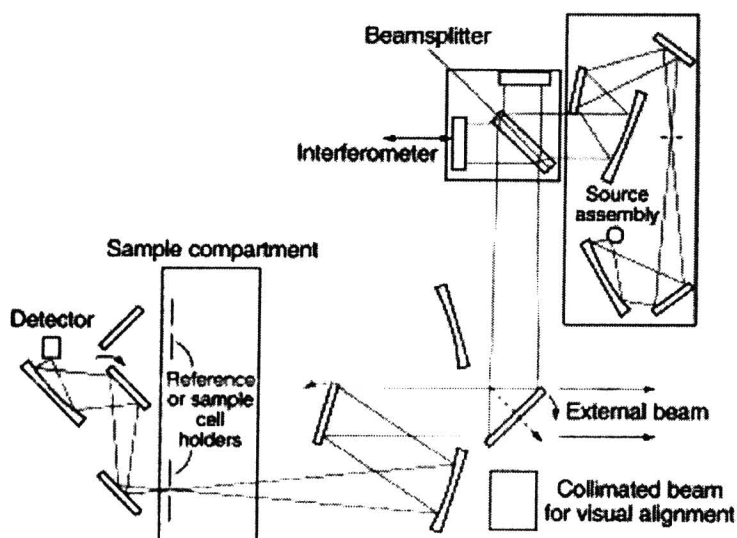
2.8 การวิเคราะห์

2.8.1 อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Infrared Spectroscopy, IR) เป็นเทคนิคการพิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีพลังงานพอดีและเกิดการควบคู่ระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารตัวอย่าง ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุลเปลี่ยนไป โมเลกุลจึงเกิดการสั่นและการหมุน พลังงานของการสั่นและหมุนของโมเลกุลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โดยทั่วไปของอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีจะเกี่ยวข้องกับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 2.5 – 25 ไมโครเมตร หรือ $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ [30-31] ดังแสดงในภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 รูปแบบการสั่นและการหมุนโมเลกุลของสารตัวอย่าง [31]

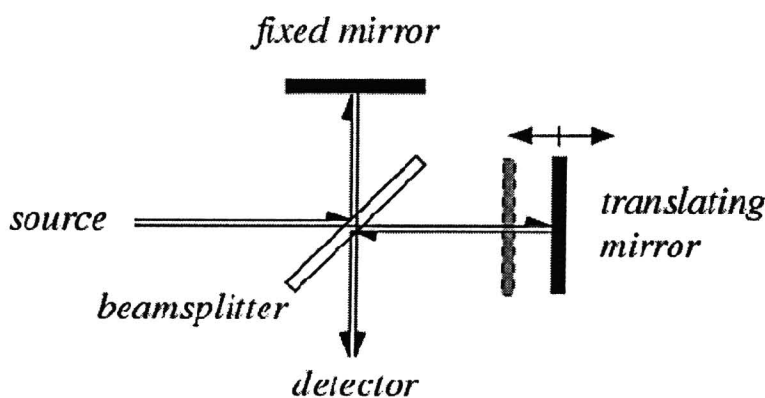
ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Spectrometer, FTIR) คือ เครื่องมือทดสอบสำหรับเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี มีส่วนประกอบสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-21 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโตรมิเตอร์ [31]

2.8.1.1 แหล่งกำเนิดแสง ทำจากปรอทซึ่งมีความเข้มของแสงสูงหรือทำจากหลอดที่ถูกให้ความร้อนแล้วแปลงสเปกตรัม (Spectrum) ออกมาอย่างต่อเนื่อง

2.8.1.2 มิเชลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) องค์ประกอบสำคัญของมิเชลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ คือ กระจกเงาสองบาน กระจกเงาบานแรกถูกยึดอยู่กับที่ ในขณะที่กระจกเงาบานที่สองสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-22 ส่วนประกอบของมิเชลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ [31]

2.8.1.3 ตัวกระจายแสง (Beam Splitter) ทำหน้าที่กระจายลำแสงออกเป็นส่วน ๆ ถูกติดตั้งให้ทำมุม 45 องศากับเส้นทางเดินของลำแสง ลำแสงบางส่วนจะถูกส่งผ่านออกไปในขณะที่ลำแสงบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับไปกระทบกับกระจกเงาทั้งสองบานซึ่งถูกติดตั้งให้ตั้งฉากกับลำแสงทั้งสอง ทำให้เกิดการสะท้อนกลับป้อนกลับของลำแสงและเกิดการรวมตัวกันของลำแสงที่ตัวกระจายแสง ทำให้เกิดปรากฏการณ์อินเทอร์เฟอเรนซ์ (Interference Effect) หลังจากนั้นลำแสงจะส่องผ่านสารตัวอย่างเข้าสู่เครื่องรับสัญญาณเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

2.8.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ใช้ในการเลือกชนิดและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตและการเลือกใช้งานพอลิเมอร์ สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สภาวะทรานสิชัน (Transition State) พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline Polymer) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะทรานสิชันที่บริเวณอุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก (Melting Temperature, T_m) พอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงสร้างผลึกหรือพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous Polymer) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะทรานสิชันที่บริเวณอุณหภูมิกลายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) และพอลิเมอร์ที่มีทั้งโครงสร้างผลึกและโครงสร้างอสัณฐานผสมกันอยู่ (Semi-Crystalline Polymer) จะเกิดการเปลี่ยนสภาวะทรานสิชัน 2 อุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิกลายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก [31-32]

อุณหภูมิคล้ายแก้วเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์จะแสดงคุณสมบัติอยู่ระหว่างสมบัติคล้ายแก้ว (Glassy) และสมบัติคล้ายยาง (Rubbery) เมื่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ โมเลกุลของพอลิเมอร์จะเคลื่อนไหวได้เพียงเล็กน้อย ส่งผลให้พอลิเมอร์แสดงคุณสมบัติคล้ายแก้ว และเมื่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์มีค่ามากกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ โมเลกุลของพอลิเมอร์จะเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์แสดงคุณสมบัติคล้ายยาง ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์หรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์แสดงดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ปัจจัยที่ผลต่ออุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์

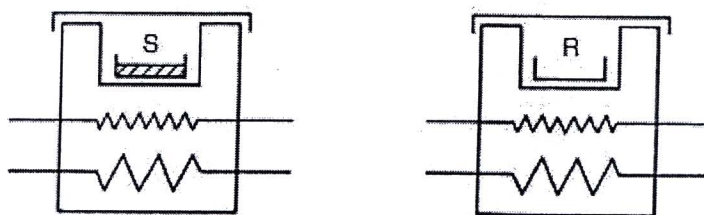
ความแข็งแรงของ โมเลกุลหลัก (Main Chain Rigidity) เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของสายโมเลกุลข้างเคียง (Rigid Side Chains) เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของสายโมเลกุลข้างเคียง (Bulky Side Chains) เพิ่มขึ้น เกิดแทคติซิตี (Tacticity) แบบซินดิโอแทกติก (Syndiotactic) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight, MW) เพิ่มขึ้น การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Distribution, MWD) เพิ่มขึ้น ความมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น พลังงานดึงดูดสารชนิดเดียวกัน (Cohesive Energy) เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์เซชันแบบ โครงร่างตาข่ายสามมิติเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึก (Crystallinity) เพิ่มขึ้น	อุณหภูมิคล้ายแก้ว เพิ่มขึ้น
ความยืดหยุ่นของ โมเลกุลหลัก (Main Chain Flexibility) เพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นของสายโมเลกุลข้างเคียง (Flexible Side Chain) เพิ่มขึ้น เกิดแทคติซิตีแบบ ไอโซแทกติก (Isotactic) ความสมมาตร (Symmetry) เพิ่มขึ้น การเติมสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) เพิ่มขึ้น โครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่ง (Branched Polymer) เพิ่มขึ้น	อุณหภูมิคล้ายแก้ว ลดลง

อุณหภูมิหลอมเหลวของผลึก จะมีความเด่นชัดมากกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง ๆ การหลอมเหลวของผลึกจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิกว้าง เนื่องจากความแน่นอนของอุณหภูมิหลอมเหลวของแต่ละบริเวณที่เป็นผลึกขึ้นอยู่กับขนาดและ

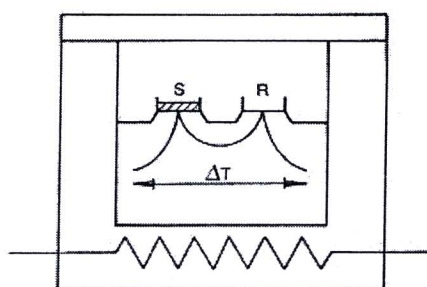
ความสมบูรณ์ของผลึก พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่และความสมบูรณ์ของผลึกมาก จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง อุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกจะขึ้นอยู่กับการผ่านกระบวนการทางความร้อนของพอลิเมอร์ เช่น อัตราการตกผลึก การใช้เวลาในการตกผลึกนาน ๆ หรือการให้อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกเล็กน้อยระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นควบคุมอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์ให้เย็นลงช้า ๆ หรือแอนนิลลิ่ง (Annealing) จะทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่และผลึกมีความสมบูรณ์สูง ผลึกของพอลิเมอร์ประกอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรงภายใต้ความเค้นเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดกับผนังของแม่พิมพ์ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เมื่อได้รับความร้อนทำให้โมเลกุลเกิดการขดตัวกลับ (Recoiling) และเกิดโครงสร้างผลึกที่มีขนาดใหญ่และสมบูรณ์มากขึ้น และไม่มีความเค้นสะสมอยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย อัตราการตกผลึกจะค่อย ๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิกลายแก้วของพอลิเมอร์

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) เป็นเทคนิคการวัดอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flow, dQ/dt) ที่ให้กับสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงเป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อเอนทัลปี (Enthalpy) อุณหภูมิและความจุความร้อน เครื่อง DSC สามารถวัดได้ทั้งปริมาณความแตกต่างของกำลังและความแตกต่างของอุณหภูมิ เปรียบเทียบกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงที่เนื่องต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยสารตัวอย่างและสารอ้างอิงจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่ทำจากอลูมิเนียม (Aluminium Pan) มีขนาดและน้ำหนักเท่ากัน แต่สารอ้างอิงนิยมใช้เป็นภาชนะอลูมิเนียมเปล่าที่ไม่มีการบรรจุสารใด ๆ หลักการทำงานของเครื่อง DSC จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เท่ากันตลอดการวัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตัวอย่างจะมีความร้อนไหลเข้าหรือออกจากสารตัวอย่าง ความร้อนที่ไหลเข้าออกสารตัวอย่างมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความร้อนที่ไหลเข้าออกสารอ้างอิง เครื่อง DSC สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการวัด คือ เครื่อง DSC ที่เป็นระบบวัดความแตกต่างของกำลัง (Power Compensated) สารตัวอย่างกับสารอ้างอิงจะมีเครื่องให้อุณหภูมิแยกกัน เครื่องนี้จะทำการวัดความแตกต่างระหว่างกำลังการให้ความร้อนที่ให้กับสารตัวอย่างและสารอ้างอิงเพื่อให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงใกล้เคียงหรือเท่ากันตลอดการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-23 ในส่วนของเครื่อง DSC ที่เป็นระบบวัดความแตกต่างของอุณหภูมิหรือฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) สารตัวอย่างกับสารอ้างอิงจะมีเครื่องให้อุณหภูมิเครื่องเดียวกัน เครื่องนี้จะทำการวัดความแตกต่างของความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิง เพื่อให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงใกล้เคียงหรือเท่ากันตลอดการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-24 เมื่อสาร

ตัวอย่างกับสารอ้างอิงมีอุณหภูมิแตกต่างกัน (ΔT) เครื่องมือจะแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิออกมาเป็นเส้นทางเดินของอุณหภูมิ



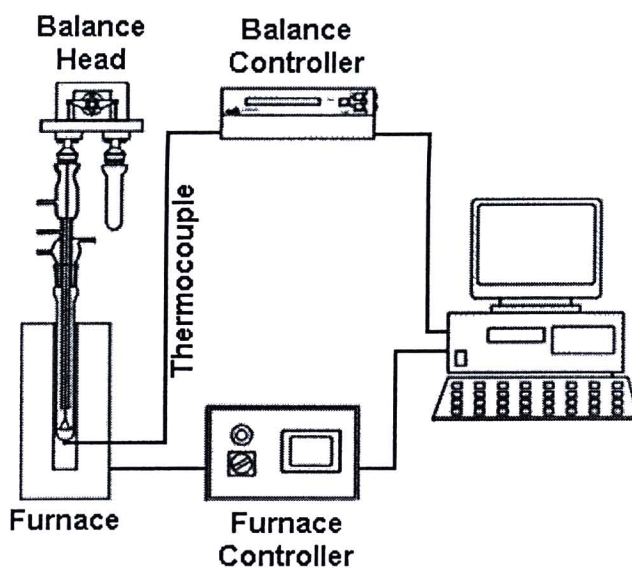
ภาพที่ 2-23 ส่วนประกอบของเครื่อง DSC ระบบวัดความแตกต่างของกำลัง [32]



ภาพที่ 2-24 ส่วนประกอบของเครื่อง DSC ระบบวัดความแตกต่างของฟลักซ์ความร้อน [32]

ในการทดสอบสารตัวอย่างหนึ่งชนิด ควรทำการทดสอบ 3 ครั้ง ครั้งแรกทดสอบภาชนะบรรจุสารตัวอย่างเปล่าเทียบกับภาชนะอ้างอิง ครั้งที่สองทดสอบภาชนะบรรจุสารตัวอย่างที่มีสารตัวอย่างเทียบกับภาชนะอ้างอิง ครั้งที่สามทดสอบภาชนะบรรจุสารเทียบค่า (Calibrant) เทียบกับภาชนะอ้างอิง

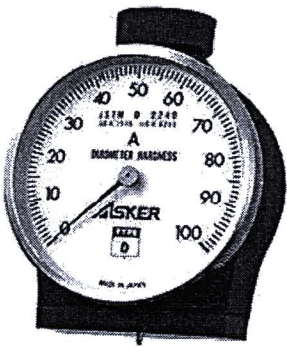
เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) เป็นเทคนิควิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อน การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) และความเสถียรของสารตัวอย่าง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องของน้ำหนักของสารตัวอย่างที่หายไป เมื่อได้รับความร้อนด้วยอัตราคงที่ค่าหนึ่งหรือวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างที่หายไปเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่ ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง TGA ได้แก่ อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก ที่วางสารตัวอย่าง เตาเผา ชุดควบคุมและบันทึกผล ดังแสดงในภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-25 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA [32]

2.8.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ การทดสอบสมบัติเชิงกลระยะสั้นและการทดสอบสมบัติเชิงกลระยะยาว การทดสอบสมบัติเชิงกลระยะยาวเหมาะสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น การทดสอบการคืบตัว การทดสอบความเสียหายจากการคืบตัว และการทดสอบความล้า การทดสอบสมบัติเชิงกลระยะสั้นเหมาะสำหรับเปรียบเทียบสมบัติเบื้องต้นสำหรับการเลือกใช้วัสดุ ตัวอย่างเช่น การทดสอบความแข็งแรง การทดสอบแรงกระแทกและการทดสอบแรงดึง [31, 33-36]

การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าการต้านทานการเกิดรอยกดที่พื้นผิวของวัสดุ การทดสอบความแข็งอาศัยหลักการเกี่ยวกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด หัวกดที่ใช้ทดสอบมีทั้งหัวบอล หัวระนาบ กรวยปลายมนหรือปิรามิด ทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชร ในการทดสอบจะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดลงบนเครื่องมือทดสอบให้คงที่ การทดสอบความแข็งมีหลายวิธี แต่ละวิธีก็จะมีวิธีการทดสอบและอุปกรณ์แตกต่างกันไป เช่น การทดสอบความแข็งแบบ Brinell การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell การทดสอบความแข็งแบบ Vickers การทดสอบความแข็งแบบ Knoop และการทดสอบความแข็งด้วย Durometer ดังแสดงในภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 เครื่องมือวัดความแข็งแบบ Durometer [36]

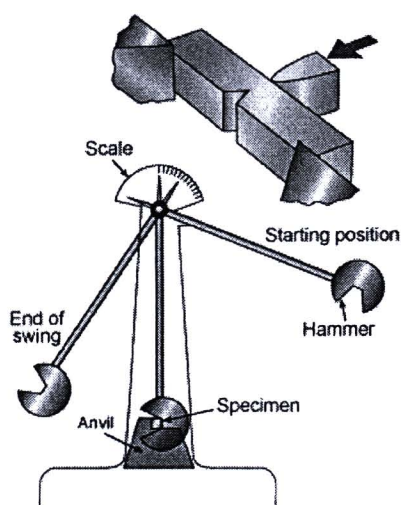
การทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) เป็นการวัดการส่งถ่ายของพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของวัสดุ แสดงถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลันโดยวัดงานที่ใช้ในการแตกหักภายใต้การกระแทกอย่างฉับพลัน หาได้จากการปล่อยก้อนที่รู้น้ำหนักแน่นอนลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยความสูงค่าหนึ่ง แล้วคำนวณค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกหรือความต้านทานการกระแทกของวัสดุจากผลต่างของระดับพลังงานศักย์ของก้อนก่อนและหลังการกระแทก ดังแสดงในสมการที่ (2-13)

$$E = mgr(\cos \beta - \cos \alpha) \tag{2-13}$$

เมื่อ

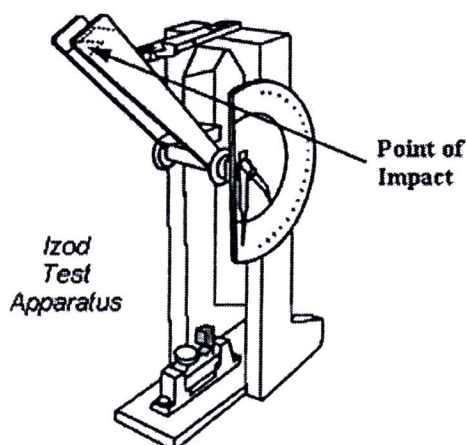
- E คือ พลังงานที่ได้จากการปล่อยก้อน
- m คือ น้ำหนักของก้อน
- g คือ อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก
- r คือ ความยาวแขนของก้อน
- α คือ มุมยกก้อนเริ่มต้นก่อนกระแทกของก้อน
- β คือ มุมยกก้อนสุดท้ายหลังกระแทก

การทดสอบแรงกระแทกที่นิยมใช้ ได้แก่การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test) และแบบไอซอด (Izod Impact Test) การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีชิ้นงานตัวอย่างจะต้องทำการบากที่ตรงกลางของชิ้นงานไว้ที่ด้านหนึ่ง การวางชิ้นงานทดสอบจะต้องวางในแนวนอนและให้ฝั่งตรงข้ามรอยบากหันไปทางที่จะทำการกระแทก ดังแสดงในภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี [33]

การทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอดใช้วิธีการทดสอบ เครื่องมือทดสอบ และการเตรียมชิ้นงาน ตัวอย่างคล้ายกันกับการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี แต่การวางชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด จะวางชิ้นงานตัวอย่างในแนวตั้งและให้ฝั่งที่มีรอยบากหันไปทางที่จะทำการกระแทก ดังแสดงในภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-28 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด [33]

การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) เป็นการดึงชิ้นงานทดสอบให้ตกอยู่ภายใต้สภาวะการยืดและทำให้เกิดการเสียรูป ในระหว่างที่เกิดการเสียรูป ถ้าอะตอมของชิ้นงานทดสอบจะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมไม่มาก เมื่อเอาแรงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบออก อะตอมของชิ้นงานทดสอบจะ

เคลื่อนที่กลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้ชิ้นงานทดสอบกลับเข้าสู่รูปทรงเดิม จะเกิดการเสียรูปแบบคืนตัว (Elastic Deformation) แต่ถ้าอะตอมของชิ้นงานทดสอบเคลื่อนที่ออกไปจากตำแหน่งเดิมอย่างถาวรจากตำแหน่งเดิมและจะคงอยู่ที่ตำแหน่งใหม่นี้แม้ว่าจะเอาแรงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบออกไป จะเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) และความเครียด (Strain) ความเค้นแรงดึงเป็นปริมาณแรงที่ใช้ดึงชิ้นงานทดสอบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในสมการที่ (2-14)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-14)$$

เมื่อ

σ	คือ	ความเค้นแรงดึง (MPa)
F	คือ	แรงดึง (N)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัด (m^2)

ความเครียดเป็นการบิดเนื่องจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานทดสอบในทิศทางเดียวกันกับแรงดึงเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ ผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับระยะทดสอบสุดท้ายเรียกว่า ระยะยืด (Elongation) ดังนั้น ถ้านำระยะยืดหารด้วยความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบก็จะได้ความเครียด ดังแสดงในสมการที่ (2-15)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2-15)$$

เมื่อ

ϵ	คือ	ความเครียด
ΔL	คือ	ผลต่างความยาวของชิ้นงานทดสอบ
L_0	คือ	ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ช่วงยืดหยุ่นของชิ้นงานตัวอย่างจะใช้กฎของฮุกส์ (Hook's Law) ในการอธิบายพฤติกรรมและความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีลักษณะ

เป็นสัดส่วนกับความเค้น ในกราฟความเค้นกับความเครียดช่วงยืดหยุ่นเป็นช่วงเริ่มแรกของกราฟ จนถึงช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Yield Strength) ช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่นเป็นตำแหน่งซึ่งความเค้นเพิ่มขึ้นและเริ่มเข้าสู่การเสียรูปแบบถาวร ดังแสดงในภาพที่ 2-29 และจากกราฟเดียวกันนี้สามารถ คำนวณหาค่ามอดูลัส (Modulus) จากความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในสมการที่ (2-16)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

(2-16)

เมื่อ

- E

คือ

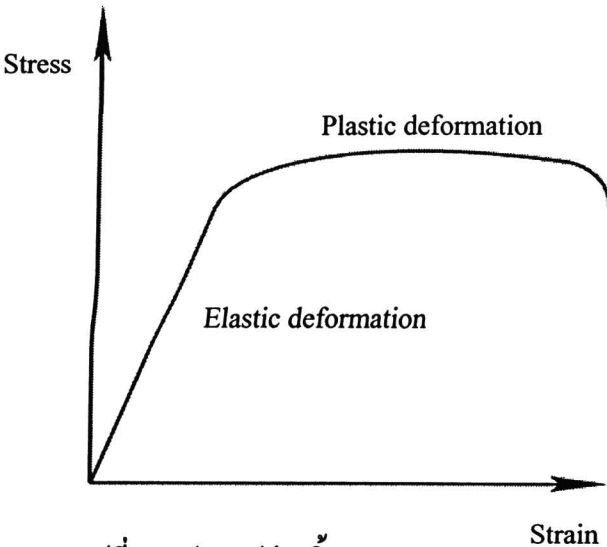
มอดูลัส (MPa)
- σ

คือ

ความเค้น (MPa)
- ϵ

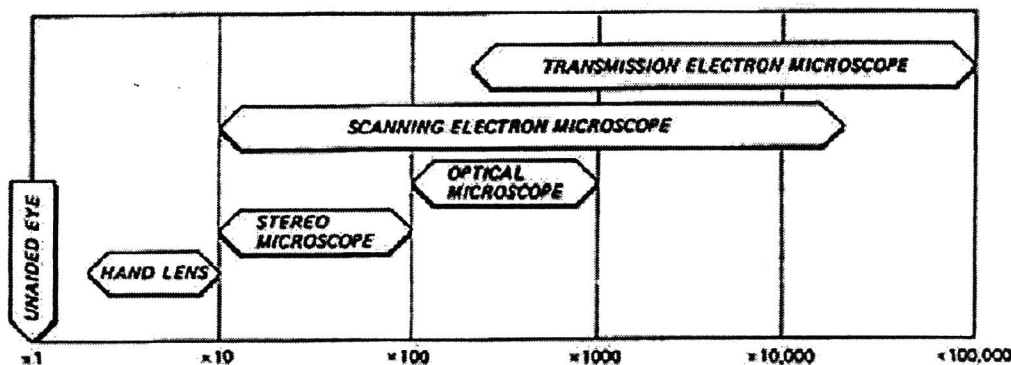
คือ

ความเครียด



ภาพที่ 2-29 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานทดสอบของกราฟความเค้นความเครียด

2.8.4 การตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก นิยมใช้กล้องกำลังขยายขนาดต่าง ๆ สำหรับการตรวจสอบชิ้นงาน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก มีความละเอียดแตกต่างกันตาม กำลังขยายที่ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 2-30

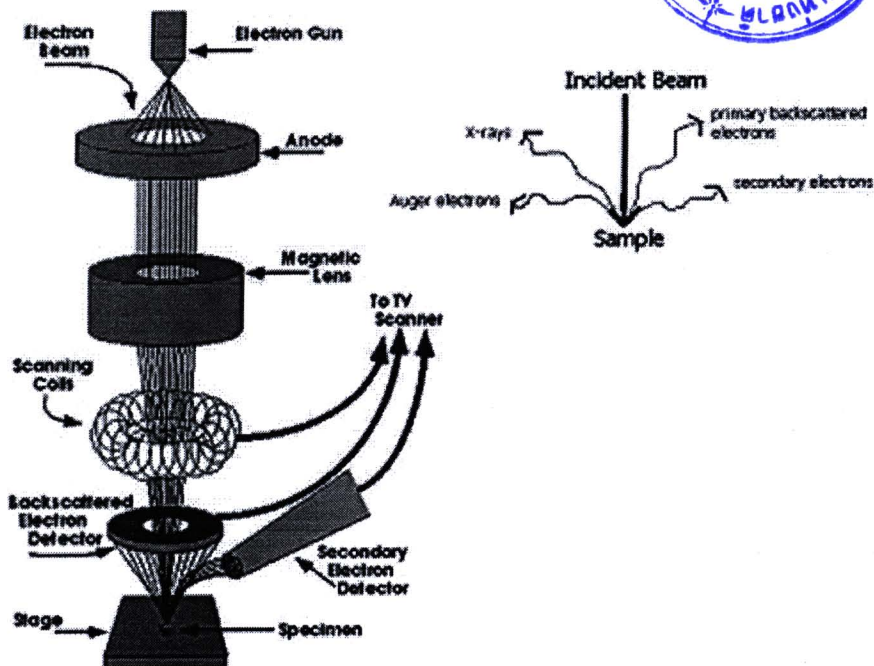


ภาพที่ 2-30 การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับช่วงกำลังขยายต่าง ๆ [29]

ลักษณะพื้นผิวการแตกหักที่หยาบหรือมีขนาดใหญ่จะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ส่วนการตรวจสอบในระดับจุลภาคนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่มีกำลังขยายสูงเพื่อตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวการแตกหัก โดยสามารถตรวจสอบประเภทของการแตกหักจากลักษณะรอยแตกในระดับจุลภาคและเชื่อมโยงกับโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ แต่ถ้าต้องการความละเอียดในการวิเคราะห์มากขึ้น เช่น การเรียงตัวของโครงสร้างผลึก ขนาดของโครงสร้างผลึก นิยมใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก โดยชิ้นงานที่จะตรวจสอบควรทำความสะอาดและยึดเข้ากับตัวจับชิ้นงานอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันชิ้นงานหลุดระหว่างการตรวจสอบในระบบสุญญากาศ ในบางกรณีอาจจะต้องมีการหุ้มชิ้นงานระหว่างการตรวจสอบ ชิ้นงานทดสอบต้องปราศจากความชื้น เนื่องจากการทดสอบในระบบสุญญากาศ และวัสดุที่จะตรวจสอบต้องมีสภาพการนำไฟฟ้า หากวัสดุที่นำมาตรวจสอบไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะต้องทำการเคลือบผิวด้วยวัสดุนำไฟฟ้า (Sputtering) โดยนิยมเคลือบผิวด้วยทอง

หลักการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะใช้อิเล็กตรอนเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสร้างเป็นภาพขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ 2-31



ภาพที่ 2-31 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : Iowa State University SEM Homepage

Electron Gun ทำหน้าที่ผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ออกมาและลำอิเล็กตรอนจะเดินทางผ่าน Electromagnetic Field และ Electromagnetic Lenses ซึ่งทำหน้าที่บีบให้ลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสและตกกระทบบนผิวของชิ้นงานทดสอบ หลังจากนั้นจะเกิดการกระเจิงของลำอิเล็กตรอนทำให้เกิด X-Ray, Primary Backscattered Electron, Secondary Electron และ Auger Electron ตามลำดับ ในระบบสุญญากาศจะมีอุปกรณ์จับสัญญาณ (Detector) ต่าง ๆ เพื่อแปลงเป็นข้อมูลหรือภาพ [37]

2.9 งานวิจัยเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์

Ozaki, et al. [15] ทำการทดลองการรีไซเคิลเส้นใยพีนอลด้วยเมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical) ในสภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน พบว่าได้ผลผลิตร้อยละ 98 ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียสและได้ผลิตภัณฑ์เป็น พีนอล *o*-methyphenol, *p*-methylphenol, 2,4-dimethylphenol, 2,6-dimethylphenol และ 2,4,6-trimethylphenol

Tagaya, et al. [16] ทำการทดลอง จำลองการรีไซเคิลพีนอลิกเรซิน ใช้สารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ bis(*p*-hydroxyphenyl)methane และ bis(*o*-hydroxyphenyl)methane โดยรีไซเคิลด้วยน้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต (Subcritical) และสภาวะเหนือวิกฤตในสภาวะบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิ

523-703 องศาเซลเซียส เวลา 0.25-1.5 ชั่วโมง การรีไซเคิล bis(*p*-hydroxyphenyl)methane และ bis(*o*-hydroxyphenyl)methane ได้สารผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล, *o*-cresol, *p*-cresol, 2,4-dimethylphenol, *p*-dihydroxybenzene, *p*-hydroxybenzaldehyde และ Xanthene พบว่าผลของการเติม Hydrogen donor acid salt และ Alkali salt ได้ผลผลิตร้อยละเพิ่มขึ้น

Weirong, et al. [13] ทำการทดลองการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินชนิด Bisphenol F ที่ใช้สารเชื่อมขวางชนิด 1,8-*p*-menthane diamine รีไซเคิลด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 4 โมลา อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วขึ้นรูปเรซินจากการรีไซเคิล โดยผสมกับอีพ็อกซีเรซินชนิด Bisphenol F และใช้ Phthalic anhydride เป็นสารเชื่อมขวาง การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินใช้เวลา 150 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของเรซินจากการรีไซเคิลผสม Bisphenol F สูงกว่าอีพ็อกซีเรซินและเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของรีไซเคิลเรซิน เรซินจากการรีไซเคิลผสม Bisphenol F มีค่าการต้านแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) และแรงดึง (Tensile Strength) ได้ดีกว่าอีพ็อกซีเรซินและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของรีไซเคิลเรซิน

Tagaya, et al. [17] ทำการทดลองการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ร่วมกับ Sodium chloride ที่สภาวะกึ่งวิกฤตและสภาวะเหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ 5 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล, *o*-cresol, *p*-cresol, 2,6-dimethylphenol, และ 2,5-dimethylphenol

Sato, et al. [18] ทำการทดลองรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินชนิด Bisphenol A โดยใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิด ได้แก่ Tetralin และ Decalin ร่วมกับการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ Calcium carbonate, Sodium carbonate และเหล็กออกไซด์ผสมกำมะถัน อุณหภูมิ 430-450 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล, Isopropylphenol และ Bisphenol A ในส่วนของการใช้ตัวทำละลาย Decalin และตัวเร่งปฏิกิริยา Sodium carbonate อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ Bisphenol A มากที่สุด และตัวทำละลาย Tetralin ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ผสมกำมะถัน อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ ฟีนอลและ Isopropylphenol มากที่สุด

Dang, et al. [14] ทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของเรซินจากการรีไซเคิลผสมอีพ็อกซีเรซินชนิด Bisphenol F รวมทั้งศึกษาการเสื่อมสภาพของเส้นใยแก้ว ในการทดลองเป็นการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินชนิด Bisphenol F โดยที่เลือกใช้สารเชื่อมขวางชนิด 4,4'-diamino diphenyl methane ผสมเส้นใยแก้วชนิด E-Glass Fiber รีไซเคิลด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 4 โมลา อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วขึ้นรูปเรซินจากการรีไซเคิลผสม Bisphenol F และใช้ Phthalic anhydride เป็นสารเชื่อมขวาง การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินใช้เวลา 400 ชั่วโมง จากผลการทดลอง

พบว่า อุณหภูมิคล้ายแก้วของเรซินจากการรีไซเคิลผสม Bisphenol F สูงกว่าอีพ็อกซีเรซินและมี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเรซินจากการรีไซเคิล เรซินจากการรีไซเคิลผสม Bisphenol F มี
ค่าการต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) สูงกว่าอีพ็อกซีเรซินเมื่ออัตราส่วน
ของเรซินจากการรีไซเคิลลดลง และจากการทดลองการเสื่อมสภาพของเส้นใยแก้วพบว่า เส้นใย
แก้วเปล่าที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลมีน้ำหนักลดลงมากกว่าเส้นใยแก้วจากการรีไซเคิล