สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การเตรียมและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมไดอิเล็กทริกเซรามิกส์กับพอลิเมอร์

Preparation and electrical properties of dielectric ceramics/polymer composites

จัดทำโดย

รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ดร. นราธิป วิทยากร

ดร. สามารถ คงทวีเลิศ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาสาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TA
418.9
.C6
ส283ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 84731
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2551

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ม.ร. 120022888

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยในโครงการนี้ ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ นักวิจัย อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในทุกด้านของการดำเนินงานของโครงการ

รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ดร. นราธิป วิทยากร

ดร. สามารถ คงทวีเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

1. ชื่อโครงการ การเตรียมและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมไดอิเล็กตริกเซรามิกส์กับพอลิเมอร์

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ

รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

3. ระยะเวลาดำเนินงาน 1 ปี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมระหว่าง เซรามิกไดอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์ โดยเซรามิกไดอิเล็กทริกที่เลือกใช้คือ เซรามิก CCTO ซึ่งเป็นเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมาก และพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ได้แก่ HDPE โดยเซรามิกCCTO ได้ทำการสังเคราะห์ผงผลึกด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยงานวิจัยพบว่าสามารถเตรียมผงผลึกที่มีความบริสุทธ์สูงที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ มากว่า 800 °ซ โดยแช่อุณหภูมิมากกว่า 2 ชั่วโมง งานวิจัยพบว่าเซรามิกที่ได้มีโครงสร้างเป็นเพอร์รอฟสไกด์เสมือน จากนั้นนำมาผสมกับ HDPE โดยผสมในอัตราส่วน 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตรของ CCTO พบว่าวัสดุผสมที่ได้มีลักษณะการกระจายตัวแบบ 0-3 โดยพบการกระจายตัวของ CCTO และมี HDPE เป็นเนื้อ matrix กระจายอยู่ล้อมรอบCCTO งานวิจัยยังพบอีกว่า ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของ CCTO เพิ่มสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อนำเซรามิก CCTO มาทำเป็นวัสดุผสม และการกระจายตัวของ CCTO เกิดการกระจุกตัวเมื่อสัดส่วน CCTO เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงของเฟส CCTO เข้าด้วยกัน สัดส่วน ของ CCTO ที่สามารถเจือเข้าไปใน HDPE อยู่ที่ประมาณ 42.5 % โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
บทนำ	1
ทฤษฎีและหลักการ	9
วิธีการทดลอง	30
ผลการทดลอง	35
สรุปผลการทดลอง	60
เอกสารอ้างอิง	69

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

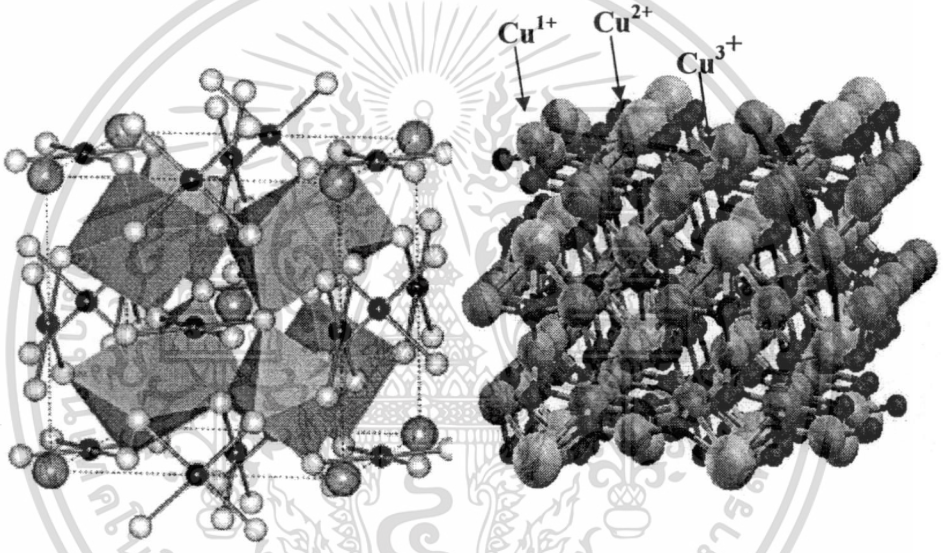
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์มาใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในด้านชีวิตความเป็นอยู่ (เครื่องใช้และ อุปกรณ์ต่างๆ) การเกษตรกรรม (ถุงไซเลจ ฟิล์มคลุมดิน ท่อน้ำซึม ตาข่ายป้องกันแสง และอื่นๆ) อุตสาหกรรมต่างๆ (วาล์ว ข้อต่อ ปั๊ม แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง) ตลอดจนนำมาใช้ทางด้านการนำไฟฟ้าแต่ก็มีจุดด้อยบางประการตรงที่ไม่สามารถใช้ได้กับที่อุณหภูมิสูงๆได้ ตลอดจนสารเติมนำไฟฟ้ามีราคาแพง อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กตรอนิกส์นั้นมีค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมตัวเก็บประจุ เนื่องจากว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่มีอยู่มีสมบัติในการกักเก็บประจุได้ไม่สูงมากนัก แต่หากพิจารณาการขึ้นรูปของพอลิเมอร์เป็นที่ทราบกันดีว่าพอลิเมอร์นั้นสามารถขึ้นรูปตามที่เราต้องการได้ง่าย และกระบวนการขึ้นรูปไม่ยุ่งยาก และยิ่งไปกว่านั้น พอลิเมอร์มีความหนาแน่นที่ต่ำ เมื่อเทียบกับเซรามิกส์ ในขณะที่เซรามิกส์ได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ เครื่องปั้นดินเผา และ อุปกรณ์ทางอิเล็กโทรนิกส์และไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็น ตัวเก็บประจุไฟฟ้าและ ตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรควบคุมในรถยนต์ เทอร์มิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในรถยนต์ เซนเซอร์ที่สามารถใช้ตรวจวัดความชื้นในอาหารหรือผลไม้ หรือเซนเซอร์ที่ใช้ควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในรถยนต์ แอกทัวเอเทอร์ที่ใช้ในการผลิตทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความละเอียดสูง ทรานสดิวเซอร์ที่สามารถใช้ในการตรวจหาฝูงปลาในทะเลและในอุปกรณ์ตรวจสอบตำหนิหรือรอยร้าวในวัสดุแบบไม่ทำลาย หม้อแปลงไฟฟ้า บัซเซอร์ในลำโพง ตัวบังคับการสั่นของหัวเข็มในเครื่องมือขุดหินปูน อุปกรณ์ทำความสะอาดเครื่องมือทางการแพทย์ด้วยอัลตร้าโซนิกส์ หัวตรวจวัดอัลตร้าซาวด์ หัวตรวจวัดความดันโลหิต และหุ่นยนต์ขนาดจิ๋วสำหรับใช้ในการตรวจอวัยวะภายในแบบไร้สาย เป็นต้น,แม้ว่าเซรามิกส์สมัยใหม่ที่ใช้จะมีข้อดีอยู่หลายอย่าง แต่ก็มีข้อเสียคือ เปราะ และ แตกหักง่าย ความหนาแน่นสูง จึงมีปัญหาเรื่องน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นถ้าสามารถบูรณาการข้อดีของพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นในการขึ้นรูปได้ดี สามารถขึ้นรูปได้โดยอาศัยกระบวนการแปรรูปทางพอลิเมอร์ได้หลากหลาย และ มีความสามารถในการต้านทานสูง ผสม เมื่อนำมารวมเข้ากับเซรามิกส์ที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง จะทำให้ข้อเสียของวัสดุทั้งสองลดลง อีกทั้งยังก่อให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี ตลอดจนสามารถการตอบสนองต่อนโยบายหนึ่งของรัฐบาลที่ต้องการที่จะพัฒนาประเทศให้เป็นศูนย์กลางของภูมิภาคในด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ช่วยลดสินค้านำเข้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์จากประเทศผู้ผลิตทั่วโลกเข้ามาใช้ยังประเทศ ช่วยให้เกิดการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า ผลที่ตามมาคือสามารถส่งออกผลิตภัณฑ์ไปยังประเทศทั่วโลกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตลาดสมัยใหม่เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวเก็บประจุส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้นประกอบด้วยเซรามิกส์ที่มีโครงสร้างแบบเพอร์รอบสไกด์ ไม่ว่าจะเป็น $BaTiO_3$ (BT)[1], $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$(PMN-PT)[2], $BaSrTiO_3$ (BST) และ ($CaCu_3Ti_4O_{12}$, CCTO)[3, 4] ซึ่งมีโครงสร้างเพอร์รอบไกด์ $AA'_3M_4O_{12}$ซึ่งMO_6 ออกตะฮิดรอลเกิดการบิดตัวเป็นลักษณะสี่เหลี่ยม เกิดโคออดิเนชั่นกับ A′(รูปที่ 1)

โดยพบว่าสารประกอบดังกล่าวมีสมบัติที่น่าสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าเซรามิกส์ตัวอื่นๆและมีความพยายามอย่างยิ่งยวดที่จะพัฒนาปรับปรุงในเซรามิกส์เหล่านี้มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่สูงขึ้นไปกว่าปัจจุบันเพื่อตอบสนองความต้องการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กตรอนิกในปัจจุบันให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานและมีน้ำหนักเบาโดยงานวิจัยส่วนใหญ่ทำการเจือสารต่างๆลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติ ให้เหมาะสมกับการใช้งาน



รูปที่ 1 แสดง โครงสร้างของ $CaCu_3Ti_4O_{12}$ โดย อะตอม คอบเปอร์ (Cu) เป็นทรงกลมสีดำ ในขณะที่ ออกซิเจน(O) เป็นทรงกลมสีขาว และ แคลเซียม (Ca) อยู่ ณ ตำแหน่ง ตรงกลางของลูกบาศก์[5]

หากพิจารณาค่าความจุไฟฟ้า (C) ของวัสดุ พบว่าเป็นไปตามสมการ [6]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$$

โดยที่ ε_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A คือพื้นที่ของวัสดุไดอิเล็กตริก

d คือความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก

เป็นที่ทราบกันดีว่าจากสมการหาต้องการค่าความจุไฟฟ้าสูง ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต้องมีค่าสูงซึ่งค่านี้เป็นค่าเฉพาะของวัสดุแต่ละตัวและมีการวิจัยกันอย่างสูง ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรนึงคือความหนาของตัวเก็บประจุและพื้นที่หน้าตัดของตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของเซรามิกส์ เนื่องจากว่าเซรามิกส์ส่วนใหญ่เกิดพันธะแบบไอออนิก ซึ่งมีสมบัติที่เปราะ ดังนั้นเมื่อความหนาของเซรามิกส์ลงมากการขึ้นรูปของเซรามิกส์ให้เป็นชิ้นงานตามก็เป็นไปได้ยาก และยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเซรามิกส์มีความหนาลดลง การทนต่อการเบรกดาวร์จะต่ำ(low dielectric breakdown)[7]

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว วัสดุผสมระหว่างเซรามิกส์ไดอิเล็กตริกกับพอลิเมอร์จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะลดข้อจำกัดดังกล่าว และสามารถประยุกค์ใช้ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุแบบ มัลติเลเยอร์คาร์ปาซิเตอร์ (Multilayer Capacitor) เนื่องจากพอลิเมอร์มีข้อดีตรงที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถขึ้นรูปและทำเป็นฟิล์มบางได้ดีกว่าเซรามิกส์ กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตได้ในปริมาณที่สูง และมีไดอิเล็กตริกเบรกดาวร์สูง

พอลิเอทิลีน (Polyethylene) เป็นพอลิเมอร์ตัวหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมสูงมาก เนื่องจากมีราคาถูก ขึ้นรูปง่าย พอลิเอทิลีนเกิดจากพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerisation) ของเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีลักษณะเป็นไขจนถึงน้ำหนักโมเลกุลและความเป็นผลึกสูง มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2

$$+CH_2-CH_2+_n$$

รูปที่ 2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน

ลักษณะโดยทั่วไปคือเหนียว ดูดซึมความชื้นได้น้อยมาก ทนทานต่อสารเคมีได้มาก เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม มีสัมประสิทธ์ของความเสียดทานต่ำ สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆได้ง่าย พอลิเอทิลีนได้จากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีน โดยพอลิเอทิลีนที่ผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

พอลิไวนิลลิดีนฟลูโอไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทผลึก (Crystalline polymer) มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกกร่อน และต้านทานต่อการคืบ ได้ดีกว่า พอลิเททระฟลูโอโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE) เปอร์ฟลูโอโรแอลคอกซี (perfluoroalkoxy, PFA) และ ฟลูโอริเน็ทเต็ด เอทิลีน พรอพิลีน (Fluorinated ethylene-propylene, FEP) รวมทั้งมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี [6]ถ้าทำการแปรรูป PVDF อย่างดี จะทำให้สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และ สภาพยอมทางไฟฟ้าสูงสุดในบรรดาพอลิเมอร์ใดๆที่นำมาใช้ ยิ่งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่านั้น PVDF ยังมีค่าการสูญเสียความร้อนทางไดอิเล็กตริกที่ค่อนข้างต่ำ หากพิจารณาข้อดีข้อเสียของวัสดุทั้งสองชนิดพบว่าหาทำการผสม พอลิเมอร์ เข้ากับ ไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ มีความเป็นไปได้สูงที่เราจะได้ พอลิเมอร์ที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่สูง และเป็นที่ทราบกันดีว่าพอลิเมอร์นั้นสามารถที่จะขึ้นรูปเป็นแผ่นบางได้ง่ายกว่าเซรามิกส์ ดังนั้นหากทำการเตรียมในอัตราส่วนที่เหมาะสม มีความเป็นไปได้สูงที่เราจะได้ พอลิเมอร์ไดอิเล็กตริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์สูง จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติไดอิเล็กตริกของ เซรามิกส์ไดอิเล็กตริก และ พอลิเมอร์

ลักษณะ และสมบัติทั่วไป	เซรามิกส์ไดอิเล็กทริก	พอลิเมอร์
สภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)[4, 5]	~10^5	20-100
การสูญเสียทางความร้อนทางไดอิเล็กตริก (Dielectric loss)[8]	0.08	0.002
การเปลี่ยนแปลงกับความถี่[9]	ต่ำ	สูง
การเตรียมเป็นฟิล์มบาง[7]	ขั้นตอนการเตรียมยุ่งยาก	วิธีการเตรียมไม่ยุ่งยาก ง่ายต่อการขึ้นรูป
การทนต่อความต่างศักย์ (dielectric breakdown strength)[6, 7]	ต่ำ	สูง

พบว่ามีความเป็นไปได้สูงมากจะเตรียมได้พอลิเมอร์ที่จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่โดดเด่น แม้อาจจะไม่สูงเท่ากับเซรามิกส์แต่ การขึ้นรูป และเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มบางสามารถเตรียมได้ง่ายกว่า และมีน้ำหนักเบากว่าเซรามิกส์มาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ กับ ไดอิเล็กทริกเซรามิกส์ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่ให้สมบัติไดอิเล็กตริกสูงที่สุด และ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมแผ่น ฟิล์มบาง เพื่อประยุกต์เป็นไดอิเล็กตริกพอลิเมอร์เพื่อทดแทน วัสดุไดอิเล็กตริกเดิม โดยศึกษาผลของอัตราส่วน กระบวนการเตรียมฟิล์มบางแบบต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติไดอิเล็กตริก ความเป็นเนื้อเดียวของวัสดุผสม ลักษณะการยึดติดกันระหว่างเฟสทั้งสอง เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างคงความรู้ใหม่ และยังเป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาความรู้ ความเข้าใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
2. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)
3. เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. สามารถสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)โดยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)
2. เตรียมวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในอัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. หาปริมาณแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ที่ใช้ในการผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุประกอบที่ได้มีค่าสูงที่สุด

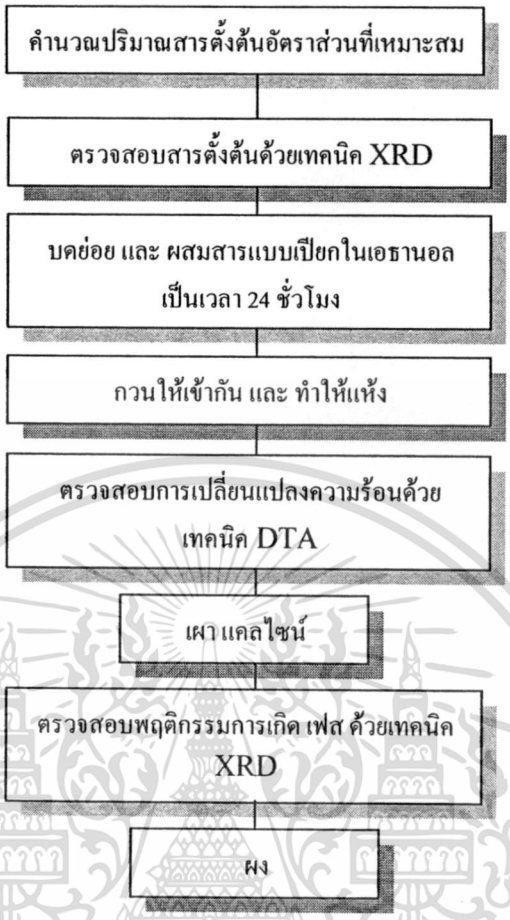
1.4 ขั้นตอนในการวิจัย และการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลประกอบการทำวิจัย
2. จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์
3. ศึกษา ทำการสังเคราะห์ $CaCu_3Ti_4O_{12}$, $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$Pb(Zr_{1/2}Ti_{1/2})O_3$, $BaTiO_3$-$Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ ด้วยวิธี มิกค์ออกไซด์ โดยชั่งตามอัตราส่วนที่คำนวณได้ดังสมการตามลำดับ

$$CaCO_3 + 3CuO + 4TiO_2 \longrightarrow CaCu_3Ti_4O_{12} + CO_2 \text{ ----------(1)}$$

4. ทำการเตรียม เซรามิกส์ ไดอิเล็กทริกส์ ดังแผนผังที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนในการเตรียมผง

5. ทำการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของผงสารตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมได้จากการเผาแคลไซน์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และคำนวณหาความบริสุทธิ์จากสมการ

ปริมาณของเพสหลักที่ปรากฏ (wt%) = $I_P/(I_P+I_I)x100$

โดยที่ I_p แทนค่าความเข้มสูงสุดของพีค X-ray ของเฟสหลัก
I_I แทนค่าความเข้มสูงสุดของพีค X-ray ของเฟสแปลกปลอม

6. ศึกษาชนิดของพอลิเมอร์ เช่น PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นอสัญฐานสูง และ PVDF ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการเตรียมวัสดุผสมด้วยเทคนิคการผสมแบบเปิด (Intensive Mixer, Two-roll Mill and Compression Molding) ระหว่าง พอลิเมอร์ และ เซรามิกส์ไดอิเล็กตริก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักโดยแปรค่า พอลิเมอร์:เซรามิกส์ เท่ากับ 10:0, 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 9:1, 10:0 เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมต้นแบบในการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุนำไฟฟ้าระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิกส์
8. ทำการตรวจสอบความบริสุทธ์ของสารตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
9. การเตรียมวัสดุผสมสามารถทำได้ตามแผนภาพที่ 3

รูปที่ 3 แผนผังแสดงขั้นตอนในการเตรียมวัสดุผสม

10. หาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง ศึกษาเทคนิคในการขึ้นรูป ฟิล์มบางที่เหมาะสม ทั้งนี้เทคนิคการเคลือบแบบตัวทำละลาย (Solvent Coating) โดยใช้ สารไดเมทิลอะเซตาไมด์ (Dimethyl Acetamide) เป็นตัวทำละลายสำหรับ PVDF หรือ ใช้กระบวนการเป่าฟิล์มบางโดยใช้ กระบวนการอัดรีดแบบเป่า (Extrusion Blown-film Process) เป็นเทคนิคที่คาดว่าจะนำมาใช้แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปริมาณของ เซรามิกส์ ที่เหมาะสมใน พอลิเมอร์ เป็นสำคัญ จึงจะเลือกใช้กระบวนการได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM โดยเน้นตรงบริเวณรอยต่อ รวมทั้งการเข้ากันของวัสดุทั้งสองว่าการรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และนำผลที่ได้มาอธิบาย สมบัติเชิงกล ของวัสดุนำไฟฟ้าที่ได้
12. ทำการหาความหนาแน่นของวัสดุผสมทั้งสองที่ได้โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของ Archimedes ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นมากพอ หรืออาจใช้วิธีการวัดขนาดของวัสดุที่ได้ แล้วคำนวณหาปริมาตร เมื่อทราบน้ำหนักของวัสดุ ก็สามารถหาความหนาแน่นของวัสดุผสมได้เช่นกัน
13. ทำการวัดค่าความจุ (C หรือ Capacitance) และการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan\delta$) ของสารตัวอย่างที่เตรียมเทียบกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 200 ^{0}ซ และทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากค่าความจุที่ได้จากสมการ

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r A/d$$

โดยที่

C คือ ค่าความจุที่วัดได้ (Capacitance)

ε_o คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่าประมาณ 8.854×10^{-15} F/mm

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง

A คือ พื้นที่ขั้วไฟฟ้าบนผิวของสารตัวอย่าง

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

14. ศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก ต่อ อัตราส่วน และ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวเก็บประจุให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. ช่วยลดต้นทุนในการทำตัวเก็บประจุ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้มีราคาถูก
3. เพิ่มความสามารถ และความหลากหลายในการนำพอลิเมอร์ไปใช้งานในด้านไฟฟ้าได้ดีขึ้น
4. ช่วยพัฒนาความรู้เกี่ยวกับเซรามิก (ceramic) และการทำวัสดุประกอบ (composites)

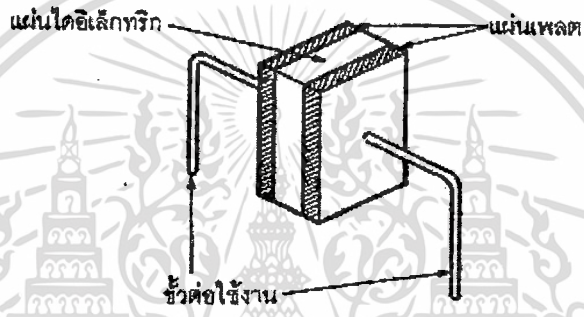
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ตัวเก็บประจุ (capacitor) [10]

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (capacitor) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าให้กับวงจร มีการนำไปใช้ในวงจรกรองแรงดัน วงจรกรองความถี่ และใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณ (coupling) เป็นต้น ตัวเก็บประจุพื้นฐานนั้นจะทำมาจากแผ่นตัวนำ 2 แผ่น โดยมีฉนวนคั่นกลางไว้ซึ่งเรียกกันว่า ไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ ไมก้า เซรามิก หรืออากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุอย่างง่าย [11]

2.2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่สามารถตกคร่อมตัวเก็บประจุได้ในทันทีทันใด หากแต่ต้องใช้เวลาให้ค่อยๆเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้า ตัวอย่าง เมื่อป้อน 6 โวลต์ ตัวเก็บประจุจะค่อยๆชาร์จประจุจาก 0 – 6 โวลต์ เมื่อแรงเคลื่อนถึงจุดสูงสุดแล้วกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถไหลเข้าไปตัวเก็บประจุได้อีกต่อไป หน่วยความจุ (unit of capacitance) มีหน่วยเป็นฟารัด (farad) มาจากการรับกระแสไฟฟ้า 1 แอมป์ในเวลา 1 วินาที แล้วทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด และมีประจุคงอยู่เท่ากับ 1 คูลอมบ์ ตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งของวงจรไฟฟ้าซึ่งประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อให้มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) คงที่อยู่จำนวนหนึ่ง โดยปริมาณความจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุเก็บได้ (Q) ต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) นั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

กรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะเป็นสุญญากาศ

$$C = Q/V = \varepsilon_0 A/d \qquad (2.1)$$

เมื่อ

C : ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็นฟารัด

V : ค่าความต่างศักย์ มีหน่วยเป็นโวลต์

Q : ประจุ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

A : พื้นที่ของเพลทโลหะ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

d : ค่าความห่างระหว่างเพลทโลหะทั้งสอง มีหน่วยเป็นเมตร

ε_0 : ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของฉนวนที่อยู่ระหว่างเพลททั้งสอง ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m)

กรณีช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะถูกใส่ด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/d \qquad (2.2)$$

เมื่อ

ε_r : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

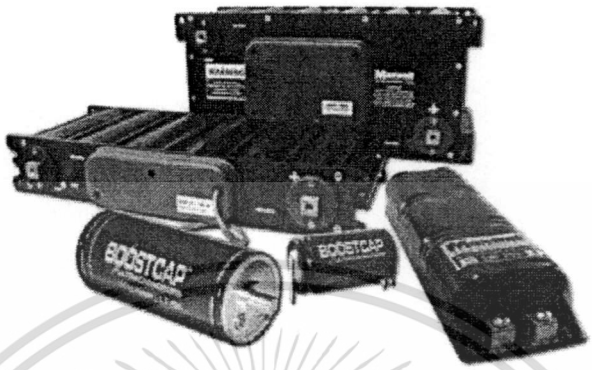
ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของตัวเก็บประจุหนึ่งฟารัด คือ ความสามารถของตัวเก็บประจุที่จะสามารถเก็บประจุได้ 1 คูลอมบ์ จากสมการจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ทำให้ค่าของตัวเก็บประจุมากหรือน้อยมีอยู่ 3 ประการ คือ

1. พื้นที่แผ่นเพลทที่วางขนานกัน ตัวเก็บประจุที่มีพื้นที่แผ่นเพลทมากก็ยิ่งมีความจุมาก
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท ยิ่งมีความห่างของแผ่นเพลทมากขึ้นค่าความจุก็จะลดลง
3. ชนิดของสารที่ใช่ทำแผ่นไดอิเล็กทริก ค่าความจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

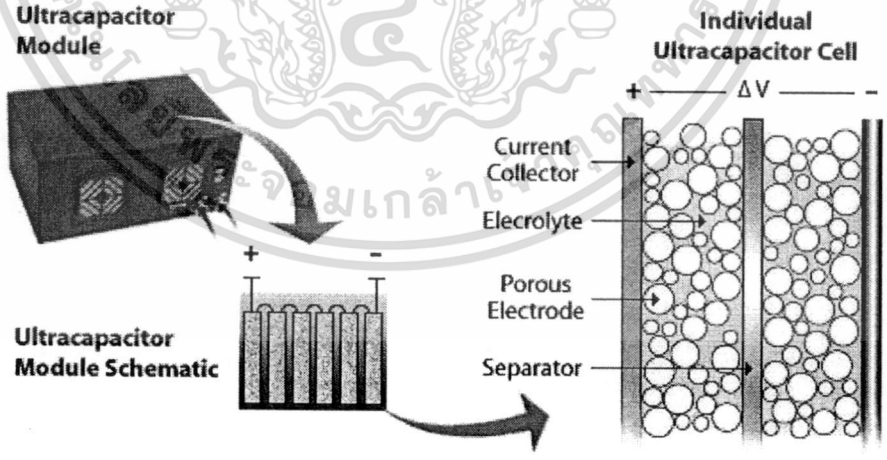
2.2.3 ตัวเก็บประจุพลังงานสูง (ultra capacitor) [12]

ตัวเก็บประจุพลังงานสูง คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมี (electrochemical capacitor) ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุธรรมดาทั่วไป ตัวเก็บประจุพลังงานสูงได้ถูกนำไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า และเป็นอุปกรณ์เสริมสำหรับแบตเตอร์รี่ในรถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุพลังงานสูง

ตัวเก็บประจุพลังงานสูงเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งคล้ายกับแบตเตอร์รี่ มีอิเล็กโทรด 2 อัน จุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง อิเล็กโทรดทำจากวัสดุที่มีรูพรุนขนาดนาโนเมตร พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในตัวเก็บประจุพลังงานสูง จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในแบตเตอร์รี่ 500-2000 m^2/g ประจุจะถูกเก็บในรูพรุนซึ่งอยู่ใกล้กับรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรด กับอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุพลังงานสูง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของตัวเก็บประจุพลังงานสูง คือ มีอัตราการเก็บประจุและการคายประจุสูง เกิดการเสียสภาพเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน วัสดุที่นำมาใช้มีความเป็นพิษต่ำ มีประสิทธิภาพสูง ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้ระบบควบคุมที่ซับซ้อน

2.2 เซรามิก (ceramics) [4]

เซรามิก เป็นพวกสารอนินทรีย์ (inorganic) ที่ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะและอโลหะ มักพบอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ หรือไนไตรด์ โดยมีการยึดเหนี่ยวอะตอมของแต่ละธาตุเข้าไว้ด้วยกันด้วยแรงจากพันธะไอออนิก หรือโควาเลนต์ร่วมกัน องค์ประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิด โดยทั่วไปเซรามิกจะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี เพราะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนได้ มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง ทนต่อสารเคมีและสภาวะแวดล้อมได้ดี เพราะมีพันธะทางเคมีที่แข็งแรง วัสดุเซรามิกได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก มีวัสดุหลายชนิดถูกใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าทั้งต่ำและสูง และยังได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitors) ชนิดต่างๆที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้เซรามิกบางชนิดมีสมบัติพิเศษสามารถเปลี่ยนสัญญาณแรงดันทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแรงดันทางกลได้เช่นกัน

วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนในงานอุตสาหกรรมทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในเซรามิกเป็นพันธะแบบไอออนิก และโคเวเลนต์ที่แข็งแรง ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอน และไอออนถูกจำกัดในการเคลื่อนที่เป็นผลทำให้วัสดุเซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี และมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรง แต่ค่อนข้างเปราะ

2.2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material)

ไดอิเล็กทริก (dielectric) หมายถึง ฉนวนที่มีความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าได้ หรือวัสดุที่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระสำหรับนำกระแสไฟฟ้า ทำให้สามารถต้านทาน หรือคงสภาพใต้สนามไฟฟ้า จะมีเพียงแต่การเคลื่อนย้าย หรือการปรับตำแหน่งของประจุอันเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้หน่วยย่อยของโครงสร้างระดับจุลภาคเช่น อะตอม ไอออน โมเลกุล หรือผงตัวนำในเนื้อวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดมีขั้วบวก และลบ (polarized) ขึ้นมาในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติพื้นฐานของวัสดุไดอิเล็กทริก

- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ถ้าใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถผลิตตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กได้
- ค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength) เป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถของวัสดุในการที่จะเก็บพลังงานไว้ได้ที่ความต่างศักย์สูงๆ ซึ่งถูกนิยามไว้เป็นโวลต์ต่อหน่วยความยาว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นค่าที่บอกถึง ปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาความเป็นฉนวนไว้ได้ โดยทั่วไปค่า Dielectric breakdown strength จะมีหน่วยเป็น V/ mil (1 mil = 0.001 นิ้ว) หรือ kV / mm
- ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) เป็นค่าปริมาณที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนของตัวเก็บประจุในวงจรกระแสไฟสลับ

2.2.2 ไดอิเล็กทริกเซรามิก (dielectric ceramic)

ไดอิเล็กทริกเซรามิก คือ ฉนวนไฟฟ้าประเภทเซรามิกที่สามารถเกิดโพลาไรเซชันที่นำไปใช้ประโยชน์ในวงจรไฟฟ้าได้ ไดอิเล็กทริกเซรามิกและฉนวนนั้นมีสมบัติที่แตกต่างกันอย่างมากจากสเตียไทต์ (steatite) ซึ่งมีสภาพยอมสัมพัทธ์ประมาณ 6 จนถึงสารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ซับซ้อนที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 20000 ดังนั้นเพื่อความสะดวกฉนวนจึงถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำ ถึงแม้ว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของฉนวนจะมีค่าสูงเกินกว่าที่ใช้ในตัวเก็บประจุ สามารถแบ่งไดอิเล็กทริกเซรามิกออกได้เป็น 3 กลุ่ม

1. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมต่ำ

ไดอิเล็กทริกเซรามิกในกลุ่มนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในลักษณะฉนวน ซึ่งในกรณีนี้สมบัติเชิงกลอาจมีความสำคัญมากกว่าสมบัติไดอิเล็กทริก และเมื่อคำนึงถึงสมบัติไดอิเล็กทริกจะพิจารณาวัสดุที่มีราคาต่ำเป็นหลัก แต่ถ้าหากใช้เป็นวัสดุฐานรอง (substrate) สมบัติไดอิเล็กทริกก็จะถือเป็นตัวแปรสำคัญ นอกจากนี้ไดอิเล็กทริกเซรามิก กลุ่มนี้ก็มีความสำคัญมากขึ้นถ้าต้องใช้ในกรณีที่ต้องการตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุต่ำในการใช้ที่ความถี่สูง หรือในบางกรณีที่กระแสสูงต้องไหลผ่านตัวเก็บประจุ ก็มีความต้องการตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนจะดีกว่า

2. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมปานกลาง

เซรามิกในกลุ่มนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นไดอิเล็กทริกประเภท I (class I dielectric) ซึ่งจะต้องมีตัวแปรการสูญเสียที่ต่ำด้วย ซึ่งสาเหตุนี้ทำให้สารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากมีการสูญเสียที่สูง ($\tan\delta > 0.003$) โดยเฉพาะภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ แม้ว่าวัสดุสูญเสียต่ำ (low-loss material) ที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์เกินกว่า 500 นั้นสามารถหาได้แต่จะมีข้อเสีย คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นลบที่มีค่ามากกว่า -10000 M/K ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานโดยทั่วไปเซรามิกที่มีสภาพยอมปานกลางมักจะมีค่า ε_r อยู่ในช่วง 50-100 ในการประยุกต์ใช้ของเซรามิกกลุ่มนี้โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ประเภทการใช้งานหลัก คือ

- ตัวเก็บประจุส่งกำลังสูงสำหรับช่วงความถี่ 0.5-50 MHz ซึ่งต้องการสภาพการสูญเสียที่ต่ำ และสัมประสิทธิ์ของสภาพยอมที่เป็นลบสามารถยอมรับได้เนื่องจากมีส่วนช่วยในการจำกัดกำลังที่ส่งผ่านถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น
- ตัวเก็บประจุเสถียรสำหรับการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปซึ่งต้องการให้ตัวเก็บประจุมีเสถียรภาพดีกว่า ± 1% ในช่วงอุณหภูมิและความต่างศักย์ใช้งาน โดยมีช่วงความถี่การใช้งานในช่วง 1 kHz ถึง100 MHz
- โพรงสั่นพ้องไมโครเวฟ (microwave resonant cavities) ซึ่งใช้งานในช่วงความถี่ 0.5-50 GHz ต้องการเสถียรภาพที่ดีกว่า ± 0.05% ในช่วงอุณหภูมิการใช้งาน และมีตัวแปรการสูญเสียที่ดีกว่า 2×10^{-4}

จะเห็นได้ว่าข้อจำกัดจะเข้มงวดมากขึ้นจากประเภทที่ 1 ไปยังประเภทที่ 3 ซึ่งทำให้วัสดุประเภทที่ 3 สามารถใช้งานประเภทที่ 1 และ 2 ได้ แต่จะมีราคาสูงเกินความจำเป็น

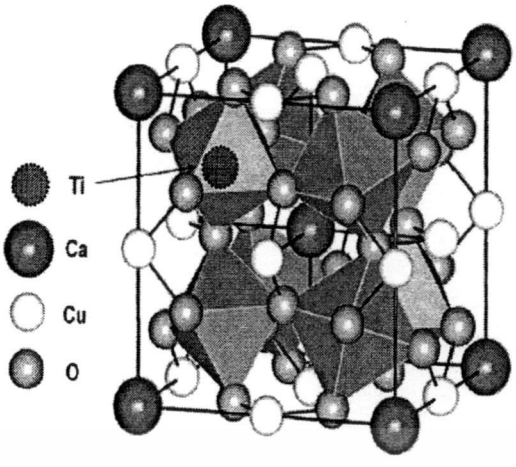
3. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมสูง

วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 1000 นั้น ส่วนมากจะเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า และความถี่มากกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมต่ำกว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมีสมบัติที่พิเศษมากมายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในมุมมองการนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก

2.2.2.1 แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($CaCu_3Ti_4O_{12}$, CCTO)

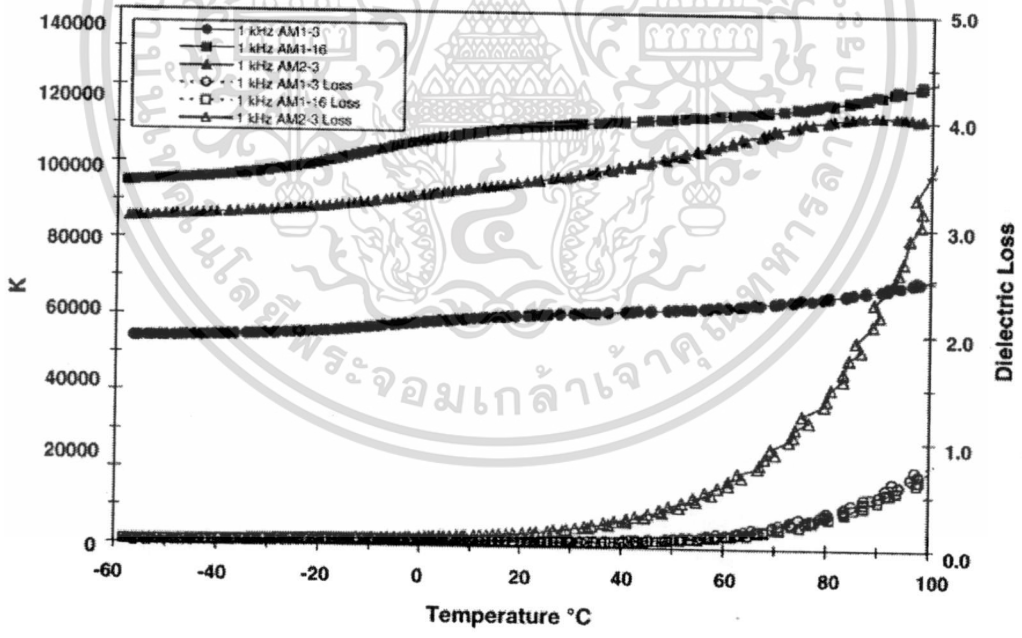
แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต $CaCu_3Ti_4O_{12}$ (CCTO) เป็นเซรามิกซึ่งถูกค้นพบในปี 2002 พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ε_r) มากที่สุดถึงประมาณ 80000 สำหรับผลึกเดี่ยว สำหรับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อมีค่าสูงขึ้นจะสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นและสามารถออกแบบแผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ให้เล็กลงได้ จะเห็นได้ว่า CCTO มีสมบัติทางไดอิเล็กทริกดีกว่าเซรามิกชนิดอื่นมาก CCTO มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มหาศาลเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และยังครอบคลุมช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง (- 173 ถึง 327 °C) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ ใช้งานได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม CCTO แสดงให้เห็นสมบัติบางอย่างที่ยังไม่สามารถอธิบายให้เข้าใจได้พฤติกรรมดังกล่าวได้แก่ ขอบเกรน (gain boundary) การมีอยู่ของขอบทวิน (twin boundaries) จุดบกพร่องบนระนาบ (planar) การเข้าแทนที่ของไทเทเนียมไอออน และยังคงค้นหาคำอธิบายถึงพฤติกรรมดังกล่าวอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์โรฟสไกต์ (perovskite) ของ CCTO [5]

จากรูป 2.4 โครงสร้างของ CCTO มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบ Body-center cubic (BCC) โดยมี Ti อะตอมอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอลแล้วล้อมรอบด้วยออกซิเจนอะตอม TiO_6 ออกตะฮีดรอลเอียงทำมุม 141° Cu อะตอมสร้างพันธะกับออกซิเจนอะตอม และ Ca อะตอมจะอยู่กึ่งกลางและตรงมุมของยูนิตเซลล์



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าพลังงานสูญเสีย (dielectric loss) ของ CCTO กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความถี่ 1 kHz. [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.5 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ CCTO เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่วงกว้างของอุณหภูมิการใช้งาน ด้วยเหตุนี้หากนำ CCTO ไปทำตัวเก็บประจุจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุให้ดียิ่งขึ้น

แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายเทคนิค ในโครงงานพิเศษนี้จะสังเคราะห์จากเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-siate reaction) โดยการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต คอปเปอร์(II)ออกไซด์ และไททาเนียม(IV)ออกไซด์ แล้วนำส่วนผสมที่ได้ไปทำการบดย่อยผสมด้วยลูกบอล (ball-mill) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วผ่านกระบวนการเผา (calcination) ลักษณะของผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลค่อนข้างละเอียด

2.3 พอลิเมอร์ (polymer) [8]

พอลิเมอร์ (polymer) หมายถึงสสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ และยาว มีน้ำหนักมาก (อาจมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหมื่น หรืออาจสูงถึงหลายๆล้าน) ซึ่งประกอบจากกลุ่มของอะตอมหรือโมเลกุลเล็กๆที่เรียกว่า เมอร์ (mer) ที่ซ้ำๆกัน โดยเรียกว่า หน่วยซ้ำ (repeating unit) หน่วยซ้ำนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (primary bonds) ได้แก่พันธะโควาเลนต์ พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลอิสระ ซึ่งหากต้องการลดขนาดของโมเลกุลลงต้องทำลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างหน่วยซ้ำ

พลาสติก (plastics) เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีโมเลกุลหลักประกอบไปด้วยหน่วยอินทรีย์เคมี (organic chemical unit) กันหลายๆ หน่วย ซึ่งพลาสติกสามารถนำไปขึ้นรูปได้โดยการปั้น (mold) และการตัดขึ้นรูป (forming) โดยใช้ความร้อน ความดัน หรือใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน พลาสติกส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นสารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติแต่เกิดจากมอนอเมอร์ (monomer) ทำปฏิกิริยากันเป็นพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ของพลาสติกประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเป็นธาตุหลัก จับตัวกับธาตุอื่นๆ การรวมตัวของอะตอมจะก่อให้เกิดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น และมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน การรวมตัวกันจะขึ้นอยู่กับพลังการเกาะตัว (energy bonds) และจะพยายามทำให้อะตอมในโมเลกุลมีเสถียรภาพโดยการให้พลังการเกาะตัวจนหมด เช่น H – F จะเป็นโมเลกุลที่มีเสถียรภาพสูงกว่า C – H

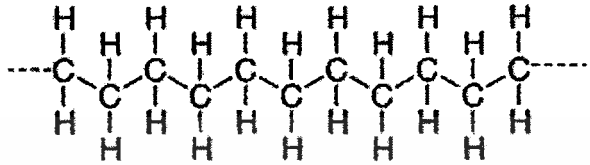
ในปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น ใช้ทำเครื่องใช้ไม้สอยประจำวันอุปกรณ์การก่อสร้าง เครื่องมือการแพทย์ ฯลฯ เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ กันไปแล้วแต่ชนิดของพลาสติก โดยทั่วไปพลาสติกสามารถที่จะแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติได้ 2 ประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติง (thermosetting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3.1 พอลิเอทิลีน (PE)

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติกซึ่งสามารถหลอมแล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน และไฮโดรเจน มอนอเมอร์ของเอทิลีน ($CH_2 = CH_2$) มีน้ำหนักโมเลกุล 28 พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization) ได้พอลิเอทิลีนเป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [7]

พอลิเอทิลีน (PE) ผลิตขึ้นเพื่อการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 ที่ประเทศอังกฤษ มีน้ำหนักเบามากในรูปที่เป็นแผ่นบางๆ สามารถที่จะงอหรือพับได้ ถ้าจะขึ้นรูปต่างๆต้องทำให้หนาพอสมควร ฉีกขาดได้ยาก เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ทนความร้อนได้น้อยแต่ทนความเย็นได้ดี

โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนจะมีอยู่ 3 ชนิด คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบข้อดี- ข้อเสียของพอลิเอทิลีน

ข้อดีของพอลิเอทิลีน	ข้อเสียของพอลิเอทิลีน
1. ราคาถูก	1. ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน
2. เป็นฉนวน	2. ไม่ทนสภาพดินฟ้าอากาศ
3. ทนความชื้น	3. แตกหัก ยากที่จะเชื่อมต่อ
4. ทนสารเคมี	4. ติดไฟได้
5. ใช้บรรจุอาหารได้ดี	
6. ขึ้นรูปใช้งานได้โดยกระบวนการทางเทอร์โมพลาสติกทั่วๆไป	

84731

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเมอร์ชนิดนี้อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนเชิงเส้นตรง เพราะพอลิเมอร์นี้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด (มีโซ่สาขาบ้างเล็กน้อย) หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนการในการผลิตจะเป็นปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งและใช้ความดันต่ำ โดยมีบางกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายด้วย ซึ่งอุณหภูมิของกระบวนการพอลิเมอร์ที่ได้จะไม่ละลายและอยู่ในรูปแขวนลอย จากนั้นจะเกิดเป็นเม็ดพอลิเอทิลีน กระบวนการแบบสารละลายนี้อาจทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายอย่างสมบูรณ์ออกมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง ใช้ในกระบวนการเป่า (blow molding) และใช้ทำท่อ อีกชนิดหนึ่งมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด (injection molding) และการขึ้นรูปแบบหมุน (rotational molding)

2.3.1.2 สมบัติทั่วไปของ HDPE

เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด สายโซ่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมาก เป็นเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูง (มากกว่า 90%) ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเมอร์ที่เตรียมได้โดยกระบวนการใช้ความดันสูง ซึ่งความหนาแน่นจะอยู่ประมาณ 0.94 - 0.965 g/cm^3 มีจุดหลอมตัว 135 °C มีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำ มีความแข็ง จุดอ่อนตัว และความต้านทานแรงดึงสูง แต่มีความทนทานต่อแรงกระแทก ความยาว ณ จุดขาด ความยืดหยุ่น และความใสต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

2.3.1.3 สมบัติทางกายภาพ

เป็นสมบัติที่สามารถมองเห็นด้วยตา (optical properties) เนื่องจาก HDPE มีความเป็นผลึกสูง และมีดัชนีหักเหจากส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานต่างกันมาก ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางๆ ของ HDPE จะโปร่งแสง ในขณะที่แผ่นฟิล์มบางของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะมีลักษณะโปร่งใส

2.3.1.4 สมบัติทางเคมี

2.3.1.4.1 การละลาย

ที่อุณหภูมิห้อง HDPE จะไม่ละลายในตัวทำละลายถึงแม้ว่าจะบวมตัวขึ้นก็ตาม แต่ HDPE จะละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างตัวทำละลาย 2 ชนิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30-40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.4.2 การสลายตัว (degradation)

HDPE ค่อนข้างคงตัวเมื่อให้ความร้อน แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงในก๊าซที่มีความเฉื่อยปานกลางหรือในสุญญากาศจะเกิดการแตก และเชื่อมระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยปฏิกิริยานี้จะเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 290-300 °C

2.3.1.4.3 การไหลของ HDPE ที่หลอมเหลว

HDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1000 จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิระหว่าง 140-200 °C จะเป็นการไหลแบบนันนิวโตเนียน (non-newtonian liquid) ความหนืดจะลดลงเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น และมีอัตราเฉือน (shear rate) ต่ำมาก แต่ที่อุณหภูมิ 300 °C HDPE จะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (newtonian liquid)

สิ่งที่กำหนดสมบัติของ HDPE นั้นขึ้นกับ 4 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น ดัชนีการไหล (MI) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) และสารเติมแต่ง ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1.5 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญในการหาสมบัติของ HDPE จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.940-0.965 g/cm³ พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้สมบัติดังต่อไปนี้ คือ ความแข็งแรงดึง (tensile strength) การคงรูปหรือความแข็งแกร่ง (rigidity) ความแข็ง (hardness) ความทนทานต่อความร้อน และอุณหภูมิ (heat resistance) ความทนทานต่อสารเคมี ความทนทานต่อการซึมผ่านของก๊าซ มีลักษณะเป็นผิวเรียบ มันวาว และมีสมบัติทางกายภาพต่างๆดีขึ้น

2.3.1.6 ค่าดัชนีการไหล (MI)

ดัชนีการไหลเป็นการวัดน้ำหนักโมเลกุล ถ้าดัชนีการไหลสูงแสดงว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้าดัชนีการไหลต่ำ แสดงว่ามีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ปกติ HDPE จะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40000-300000 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วง 0.02-100 กรัมต่อ 10 นาที

ดัชนีการไหลมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE เช่นความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าค่าดัชนีการไหลมาก การขึ้นรูปก็ง่ายเพราะความหนืดลดน้อยลง แต่สมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลเล็กลง สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้นลง ดังนั้นการรับแรงจึงไม่ดีเท่ากับโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาว แต่เมื่อดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.7 การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบหรือกว้าง ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้าการกระจายตัวกว้างจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น เพราะส่วนที่เป็นโมเลกุลเล็กๆจะเข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันจะทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้น และแบบยาวอยู่ด้วยกัน เวลาชิ้นงานได้รับความเย็นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง และความต้านทานต่อแรงเค้นของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปลำบากมาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมากมาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน

2.3.1.8 สารเติมแต่ง

พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเคมี หรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อให้สมบัติต่างๆดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติก (plastic modifier) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เติมสารเสถียรภาพเพื่อเพิ่มความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต เติมสารเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต เติมสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสัน และอื่นๆเป็นต้น

2.3.1.9 การประยุกต์ใช้งาน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ถูกนำมาแปรรูปให้ได้รูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ใช้ทำภาชนะ รองเท้า เครื่องใช้ในครัวเรือน ประตู และหน้าต่าง เป็นต้น โดยกระบวนการแปรรูปที่มีการใช้ HDPE มีด้วยกันหลายกระบวนการ เช่น ทำแผ่นฟิล์ม (film) ฉีดขึ้นรูป (injection molding) เป่าขึ้นรูป (blow molding) ทำท่อ (pipe extrusion) ทำแผ่น (sheet extrusion) เคลือบผิว (coating) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [10]

สมบัติ	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ปริมาณความเป็นผลึก (%)	75-90
การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)	4-15
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.941-0.967
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	130-133
ความแข็งแรงดึง (MPa)	18-30
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	100-1000
มอดุลัสการโค้งงอ (MPa)	689-1654
ความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod)(J/m)	27-160
ความแข็ง (Shore D)	60-70
การแพร่กระจายความร้อน (m^2 / s) x 10^{-7}	1.57
ดัชนีการหลอมไหล	0.3-0.4

2.4 วัสดุประกอบ (composite) [11]

วัสดุประกอบเกิดจากการนำวัสดุที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมารวมกัน ส่วนประกอบแต่ละเฟสต้องมีความแตกต่างทางเคมี และแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นรอยต่อระหว่างเฟสขึ้น โดยวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาประกอบจะแสดงสมบัติที่สำคัญของตัวมันเอง ส่งผลให้วัสดุประกอบมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น วัสดุประกอบประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรกเรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่อง และล้อมรอบเฟสที่สองไว้ เฟสที่สองจะถูกเรียกว่า วัฏภาคกระจาย (dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง วัสดุประกอบจัดว่าเป็นวัสดุที่สำคัญมาก ในปัจจุบันเป็นที่นิยม และมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวัสดุประกอบมีข้อดีหลายประการดังนี้ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น มีความเหนียว มีค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ลดต้นทุนการผลิต และสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ เซรามิก เป็นต้น

สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบขึ้นกับปริมาณสารตัวเติม รูปร่างของวัสดุ และพื้นผิวสัมผัส การจัดเรียงของวัฏภาคที่เป็นแอนไอโซโทรปิค (anisotropic phase) ให้อยู่ในทิศทางที่เหมาะสมและแน่นอนนั้นเป็นสิ่งสำคัญ และวัสดุที่มีความเป็นแอนไอโซโทรปิคมากจะยิ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุประกอบมากด้วย สารเสริมแรงประเภทเส้นใย และเป็นเกร็ดจะส่งผลกระทบต่อวัสดุประกอบมากกว่าสารเสริมแรงที่เป็นวงกลม กล่าวคือทรงกลมจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปร่างของช่องว่างภายในวัสดุประกอบที่สามารถลดการผ่านแรงในการเคลื่อนไหวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

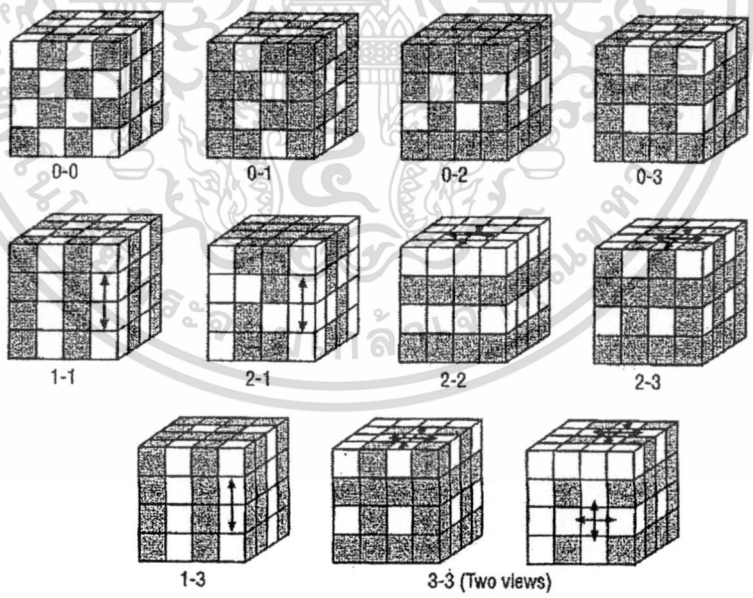
ส่งผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นแอนไอโซโทรปิคได้ และมักมีการใช้ลักษณะรูปร่าง และการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของส่วนเสริมแรง เพื่อแบ่งประเภทของวัสดุประกอบ

สมบัติของวัสดุประกอบขึ้นกับ

- คุณสมบัติของวัฏภาคกระจายตัว และสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์
- ปริมาณของวัฏภาคกระจายตัว
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายตัว
- ช่องว่าง (voids) หรือตำหนิ (flaws) ในชิ้นงานวัสุประกอบ
- การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคกระจายตัว และพอลิเมอร์เมทริกซ์
- กระบวนการผลิต
- ขนาดและรูปร่างของวัฏภาคกระจายตัว

2.4.1 วัสดุประกอบแบบ 0-3

วัสดุประกอบแบบ 0-3 คือวัสดุประกอบที่มีวัสดุผสม 2 องค์ประกอบที่มีการเชื่อมโยงแบบที่มีวัฏภาคต่อเนื่อง (matrix) ล้อมรอบอนุภาค ซึ่งมาจากแนวความคิดเรื่องสภาพการเชื่อมต่อ (connectivity) ถูกเสนอโดย R.E. Newnham และคณะ ณ The Pennsylvania State University ประเทศสหรัฐอเมริกา [13]



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุประกอบ 2 ชนิด [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 พอลิเมอร์เมทริกซ์

เมทริกซ์เป็นส่วนที่ช่วยห่อหุ้ม และยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งโดยทั่วไปเมทริกซ์มักจะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง

หน้าที่ของเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่

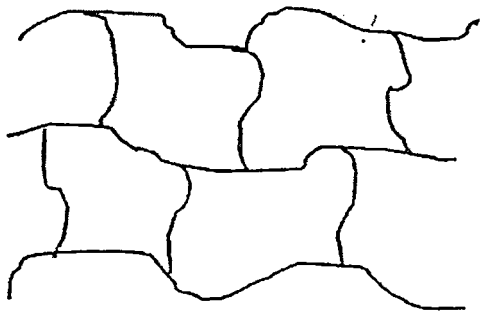
1. รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุประกอบ
2. รักษาการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายตัว และแยกไม่ให้วัฏภาคกระจายตัวมารวมกัน
3. ทำให้วัสดุประกอบสามารถทนต่อการเสียสภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่งๆ
4. สามารถกระจาย หรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังวัฏภาคกระจายได้
5. ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

พอลิเมอร์เมทริกซ์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมเซต (thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic)

1. เทอร์โมเซต (thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลิตผลที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลายคือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแหแต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อน หรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลิตผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆจะไหม้เกรียม และมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ (matrix) ส่วนใหญ่ ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ และไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมทริกซ์มีความแข็งมาก หรือมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมาก น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงจะลดลงซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ มีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต [11]

2. เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำ หรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมีการจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมทริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองศาความเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับสภาวะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่นพอลิเอไมด์ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน

รูปที่ 2.9 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ผสมกับเซรามิกคือ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัว เพื่อทำเป็นวัสดุประกอบซึ่งจัดอยู่ในประเภทคอมโพสิตแบบอนุภาค สำหรับ HDPE นั้นมีค่าสภาพยอม-สัมพัทธ์ที่ต่ำ (มีความสามารถในการเก็บประจุต่ำ) ดังตารางที่ 2.3 โดยทำการปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำของพอลิเอทิลีนให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ดีขึ้น และทำการปรับปรุงสมบัติความแข็งเปราะของเซรามิกให้มีความยืดหยุ่นดีขึ้นทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง มีค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และลดต้นทุนการผลิต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารชนิดต่างๆ (dielectric constant) [13]

สารไดอิเล็กทริก	ε_r
อากาศ (ที่ความดันบรรยากาศ)	1.00059
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4)	2.24
น้ำมันหม้อแปลง	2.2
พาราฟิน	2-2.5
พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	2.3
ไนลอน	3.5
พอร์ชเลนด์	6
ไมกา	7
แบเรียมติตาเนต ($BaTiO_3$)	1500 - 20000

สำหรับประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุพลังงานสูงนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการความหนาแน่นของพลังงานที่กักเก็บ (U) ดังสมการที่ 2.3

$$U = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r E^2 \qquad (2.3)$$

จากสมการจะเห็นว่ามีตัวแปร 2 ตัวที่มีความสำคัญมาก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ε_r) และค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength, E) ซึ่งถ้าสามารถหาวัสดุที่มีค่าความสามารถในการเก็บประจุ (ε_r) และค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (E) สูงๆได้ ก็จะสามารถนำวัสดุดังกล่าวนี้ไปประยุกต์เป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมีประสิทธิภาพได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ CCTO ซึ่งเป็นเซรามิกที่มีค่าความสามารถในการเก็บประจุสูง และ HDPE ซึ่งมีค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริกสูงมาทำเป็นวัสดุประกอบ

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ CCTO และ HDPE

สมบัติ	HDPE	CCTO
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.941-0.967	5.049
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r)	2.3	80,000-100,000
ค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (E)	สูง	ต่ำ
ความยืดหยุ่น	สูง	ต่ำ
ความแข็งเปราะ	ต่ำ	สูง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Julie J. Mohamed, Sabar D. Hutagalung, M. Fadzil Ain, Karim Deraman, Zainal A. Ahmad, "Microstructure and dielectric properties of $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ceramic", Materials letters, 2006 แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($CaCu_3Ti_4O_{12}$,CCTO) เตรียมได้จากเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยทำการนำไปเผา (calcined) ที่อุณหภูมิ 900°C นาน 12 ชั่วโมง และซินเทอร์ (sintered) ที่อุณหภูมิระหว่าง 950-1050°C นาน 3-12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD และโครงสร้างขนาดไมโครเมตรของ CCTO จะสังเกตได้จากการนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM โครงสร้างขนาดไมโครเมตรแสดงให้เห็นลักษณะการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ และรูพรุนขนาดใหญ่ ผลของการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างกันจะมีผลต่อความหนาแน่น รูปแบบเฟส โครงสร้างระดับไมโครเมตร และสมบัติไดอิเล็กทริก จากการทดลองพบว่า การควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาในการซินเทอร์เป็นสิ่งที่สำคัญ เพื่อให้ได้โครงสร้างขนาดไมโครเมตร และสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ต้องการ การซินเทอร์ที่ 1050 °C นาน 12 ชั่วโมง CCTO จะเกิดการหลอมเหลวของเกรน และมีเฟสใหม่เกิดขึ้น คือ Cu_2O ส่วนการซินเทอร์นาน 24 ชั่วโมง จะเกิดการหลอมเหลวและมีการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ ตัวอย่างที่ถูกซินเทอร์ที่ 1000 และ 1030 °C นาน 12 ชั่วโมง จะมีเกรนที่ชัดเจน และมีโครงสร้างขนาดไมโครเมตรหนาแน่น ส่วนค่าคงที่ไดอิ-เล็กทริก (ε_r) พบว่าการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1040°C นาน 10 ชั่วโมง จะให้ค่า ε_r สูงที่สุดประมาณ 3340 Heng Chen, Xianlin Dong, Tao Zeng, Zhiyong Zhou and Hong Yang, "The mechanical and electric properties of infiltrated PZT/polymer composites", Ceramics International, 2007 วัสดุประกอบพอลิเมอร์กับเซรามิก Lead zirconate titanate (PZT) ถูกสังเคราะห์โดยการใส่พอลิเมอร์ให้แทรกซึมเข้าไปในรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรุนของเซรามิก PZT การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงบทบาททางด้านคุณสมบัติเชิงกลและไฟฟ้าที่ขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก การลดลงของปริมาตรโดยสัดส่วนของเซรามิก ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุประกอบลดลง ขณะที่ hydrostatic figure of merit เพิ่มขึ้นสำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกค่าเดิม ค่า fracture strength ของวัสดุประกอบ PZT/polymer มีค่ามากกว่าเซรามิก PZT Hydrostatic figure of merit ของวัสดุประกอบที่สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก 68% มีค่ามากกว่า $5000x10^{-15}$ m^2/N ซึ่งค่านี้มีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบชนิดอื่นที่เคยมีมา ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากัน ทำให้วัสดุประกอบชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานในด้าน อุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) วัสดุประกอบ PZT/polymer เตรียมได้โดยการใส่ เรซินไฮโดรคาร์บอนเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของเซรามิก PZT คลอบคลุมในช่วงสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่ 68-87 % เนื่องจากการลดลงของสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกทำให้ความหนาแน่นของเซรามิกรูพรุนและวัสดุประกอบลดลง Milind Arbatti, Xiaobing Shan, andZ.-Y. Cheng, "New High-Dielectric-Constant Polymer Ceramic Composites", 2005 งานวิจัยนี้เป็นการทำวัสดุประกอบระหว่างผงเซรามิก กับพอลิเมอร์ โดยใช้เซรามิกตัวใหม่ที่เพิ่งค้นพบซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง คือ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) และใช้พอลิไวนิลอีดีนฟลูออไรด์ไตรฟลูออโรเอทิลีน [P(VDF-TrFE)] 55/44 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง พบว่าความสามารถในการทำให้เปียก (wettability) ระหว่างโคพอลิเมอร์ดังกล่าว และ CCTO ไม่ดีทำให้ชิ้นงานจากการหล่อขึ้นรูปวัสดุประกอบมีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นรูปแบบแซนวิช (sandwich) โดยใช้เทคโนโลยีฮอตเพรส (hot-press technology) ซึ่งส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่ากระบวนการอบอ่อน (thermal annealing process) สามารถปรับปรุงค่าคงที่ไดอิลีกตริกของวัสดุประกอบได้ด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าวัสดุประกอบมีความยืดหยุ่น และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ 1 kHz มากถึง 300 ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่า 700 ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส Chih-Ming Wang, Kuo-Sheng Kao, Shih-Yuan Lin, Ying-Chung Chen, Shang-Chih Weng, "Processing and properties of $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ceramics", Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2008 จากการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการยอมรับปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction) ในการสังเคราะห์ CCTO เนื่องจากการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ที่สูงของ CCTO จะได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าว เมื่อนำตัวอย่างผลึกของ CCTO ที่ผ่านการซินเทอร์ (sinter) ที่อุณหภูมิ 1100 °C โดยเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาอยู่ในช่วง 3 ถึง 48 ชั่วโมง มาตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffraction) และ SEM (Scanning Electron Microscope) ผลจาก XRD ทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงเวลาในการซินเทอร์ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของผลึก (Crystal Phase) ของ CCTO อย่างเห็นได้ชัด ส่วนผลจากการตรวจสอบด้วย SEM พบว่าการเพิ่มเวลาในการซินเทอร์ ทำให้ขนาดของเกรน (grain size) และสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าของ CCTO เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มเวลาในการซินเทอร์ทำให้ขอบเกรน (grain boundary) ลดลง ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจมาจากการเพิ่มเวลาในการซินเทอร์ ทำให้เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างมากขึ้น ส่วนคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ CCTO จะว่องไวต่อกระบวนการอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่า loss tangent จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการซินเทอร์มากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ CCTO ขึ้นอยู่กับขนาดเกรน และขอบของเกรน B. Shri Prakash, K.B.R. Varma, "Dielectric behavior of CCTO/epoxy and Al-CCTO/epoxy composites, Composites Science and Technology, 2007 จากการทดลองเป็นการเตรียมวัสดุประกอบ 2 วัฏภาค ระหว่าง epoxy กับ CCTO ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง โดยมีการนำทฤษฎีรูปแบบต่างๆ มาใช้อธิบายพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริก ของวัสดุดังกล่าว ซึ่งในบรรดาทฤษฎีรูปแบบทั้งหลายที่นำมาทำนายสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุประกอบ พบว่า "Yamada Model" มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้วัสดุประกอบ 2 วัฏภาคดังกล่าวยังเป็นพื้นฐานของวัสดุประกอบ 3 วัฏภาค ที่มีการผสมโลหะลงไป ซึ่งพบว่าการผสมโลหะ Al ลงไป ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นถึง 700 ที่อุณหภูมิ 300 K ซึ่งมีกระบวนการง่าย สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ดี เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุ ปี 1980 T. R. Shrout [13] ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ เซรามิกส์ PZT กับ พอลิเมอร์โดยทำการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของเซรามิกส์ในพอลิเมอร์แบบ 1-3 พบว่าสามารถเตรียมวัสดุผสมได้ความหนาแน่นต่ำอยู่ที่ประมาณ 2900 kg/m^3 และได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 500 พร้อมทั้งวัดสมบัติพิโซอิเล็กตริกด้วย ได้ค่า d_{33} = 300×10^{-12} C/N. และ piezoelectric voltage coefficient (g_{33}) จาก 22×10^{-3} Vm/N (สำหรับ เซรามิกส์ PZT) ถึง ~70×10^{-3} Vm/N. ในปี1988 A. M. Varaprasad and R. Krishnan [14] ศึกษา วัสดุผสมระหว่าง เซรามิกส์ $Pb_{0.94}La_{0.04}Zr_{0.51}Ti_{0.49}O_3$ กับ ซิลิโคนยาง โดยทำการศึกษาวิธีการเตรียม โครงสร้าง และ สมบัติไดอิเล็กตริก พิโซอิเล็กตริก โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ PZT พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมกับสมบัติทางไฟฟ้า อยู่ที่อัตราส่วนของ PZT:Silion เท่ากับ 50: 50 โดยพบว่าสามารถเพิ่มค่า g_{33} coefficient ได้มากกว่า PZT เดิมสูงถึง 5 เท่าในปี 1989 R. Sekar [15] และคณะได้ทำการศึกษา วัสดุผสม $BaTiO_3$: poly(vinylidene fluoride) โดยทำการเตรียม BT จากวิธี Hot pressing โดยเน้นศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ 70:30 โดยศึกษาจาก X-ray diffractograms ที่อยู่ในช่วง 99°–103° พบว่าไม่พบอุณหภูมิ คูรีย์ มีการแสดงสมบัติไดอิเล็กตริกที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิมากนัก(broad transition)โดยแสดงการเปลี่ยนเฟส ที่อุณหภูมิ 150°ซ ยิ่งไปกว่านั้นผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า BTมีโครงสร้าง เป็นแบบ ลูกบาศก์ เนื่องจากการเตรียมแบบ hot-pressed. ในปีเดียวกัน A. K. Tripathi [16]ได้ทำการเตรียม $BaTiO_3$:PVDF ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก และศึกษา การเปลี่ยน เฟส ในวัสดุผสม พบว่า BT เกิดการเปลี่ยนเฟสจาก ลูกบาศก์ และยิ่งไปกว่านั้นยังพบอีกว่า เมื่อทำการเตรียมเซรามิกส์แบบ Hot pressed XRD ชี้ให้เห็นว่าเกิดเฟสของ เตตระโกนอลและ ออโทรอมบิกในเซรามิกส์อีกด้วยและ ยังพบอีกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีผลต่ออุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2002 S. U. Adikary [17] และ คณะ ได้ศึกษา $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$/P(VDF-TrFE) 70/30 วัสดุผสม โดยได้ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกพบว่า วัสดุผสมดังกล่าวมีลักษณะของฟีคไดอิเล็กตริกที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิมากนัก แสดงสมบัติคล้ายกับเซรามิกส์ รีแลกเซอร์ (relaxor ferroelectric) และพบว่าสามารถวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้ที่ 160 ที่ 1 kHz ในสัดส่วนของ เซรามิกส์: พอลิเมอร์ เท่ากับ 50:50

ในปี 2005 W. Son [18] และคณะได้ทำการศึกษา วัสดุผสม 65PMN–35PT/P(VDF–TrFE) แบบ 0–3 สามารถเตรียมได้ในอัตราส่วน 0.4 ของ PMN-PT และวัดสมบัติไดอิเล็กตริกได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ 115 ที่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง งานวิจัยพบว่า ค่า โพลาไรเซชั่นขึ้นกับปริมาณของ เซรามิกส์ PMN-PT ที่ผสมอยู่อย่างมาก

ในปีเดียวกันนี้ Kwok-ho Lam [19] ทำการศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุผสมระหว่าง เซรามิกส์ [$(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO_3$, BNBT]กับ พอลิเมอร์ [P(VDF-TrFE) 70/30 mol%] โดยทำการเตรียมแบบ 0–3 โดยที่เลือกใช้ ในอัตราส่วนนี้เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่อยู่บริเวณ MPB ของระบบซึ่งทำการเตรียมโดยการหล่อ(casting) โดยทำให้เซรามิกส์เกิดการกระจายตัวที่สมบูรณ์ในพอลิเมอร์ โดยทำการเตรียมในอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.05 ถึง 0.30 และทำการอัดร้อนอีกครั้ง โดยทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นพิโซอิเล็กตริก โดยทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการโพล (poling) พบว่าเมื่อปริมาณ เซรามิกส์เพิ่มสูงขึ้นการโพลมีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังพบว่าวัสดุผสม BNBT แบบ 0–3 นั้นให้ค่าสมบัติทางไฟโรอิเล็กตริกส์ได้ดีว่าวัสดุผสม PZT/P(VDF-TrFE) แบบ 0–3

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจึงมีความเป็นไปได้สูงที่วัสดุผสมพอลิเมอร์กับเซรามิกส์ไดอิเล็กตริก เช่น CCTO,BT-BMN, PZT-PNN จะให้สมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น และ สามารถต่อยอดองค์ความรู้ใหม่ๆในสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิเมอร์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกรด Guaruntee analysis บริษัท Riedel-dehaeh ความบริสุทธิ์ 98.5 %
2. คอปเปอร์(II)ออกไซด์ (CuO) เกรด ACS-for analysis 99% บริษัท Fluka ความบริสุทธิ์ 99.0 %
3. ไทเทเนียม(IV)ออกไซด์ (TiO_2) เกรด Guaruntee analysis บริษัท Carlo erba reagenti ความบริสุทธิ์ 99.0 %
4. เอทานอล เกรดการค้า
5. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ชนิดผง เกรดการค้า บริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดชนิดอัดแรง (compression molding)
2. เครื่องผสมแบบบดย่อย (ball- mill)
3. เตาเผาอุณหภูมิ 1000 °C
4. เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า LCR meter
5. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (differential scanning calorimeter, DSC)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)
7. เครื่องทดสอบความหนาแน่น
10. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SARTORIUS
11. แท่นให้ความร้อน (hot plate)
12. ตู้อบ
13. แท่งแม่เหล็กปั่นกวน
14. ขวดพลาสติกแข็งพร้อมฝาปิด
15. บีกเกอร์
16. ลูกบดชนิดเซอร์โครเนีย
17. กระชอนกรองสาร
18. แท่งแก้วคนสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

<u>ตอนที่ 1</u> การเตรียมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) โดยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction)

เตรียมสารละลายของแข็งของ CCTO ตามสมการ

$$CaCO_{3(s)} + 3CuO_{(s)} + 4TiO_{2(s)} \longrightarrow CaCu_3Ti_4O_{12(s)} + CO_{2(g)}$$

ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต 16.30 กรัม คอปเปอร์ออกไซด์ 38.85 กรัม และไทเทเนียม (IV)ออกไซด์ 52.03 กรัม แล้วนำสารมาผสมกันแล้วทำการบดย่อยด้วยลูกบอล (ชนิดเซอร์โครเนีย) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นกรองเอาสารที่ได้ แล้วนำไประเหยเอทานอลออกให้หมด นำสารไปเผา (calcination) ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 °C/min จะได้ผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล แล้วนำผง CCTO ที่ได้ไปบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นเวลา 18 ชั่วโมงอีกรอบ เพื่อทำให้ผง CCTO มีขนาดเล็กลงใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นกรองเอาสารที่ได้ นำไประเหยเอทานอลออกให้หมด อบให้แห้ง แล้วทำการหาความหนาแน่นของผง CCTO ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการแทนที่น้ำ และคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการ

$$D = M/V \qquad (3.1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)

M คือ มวล (g)

V คือ ปริมาตร (cm^3)

<u>ตอนที่ 2</u> การขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเป็นวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

1. นำผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ผสมกับผงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในอัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. นำส่วนผสมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ผสมกับผงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) แต่ละอัตราส่วนใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วให้ความร้อนด้วยแท่นให้ความร้อนจนพอลิเมอร์หลอม คนให้เข้ากัน
3. นำส่วนผสมทุกอัตราส่วนขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปชนิดอัดแรง (compression molding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตอนที่ 3</u> การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุประกอบ

1. การหาความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานนั้นสามารถได้จากการใช้อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรได้โดยตรงในกรณีที่ชิ้นงานนั้นมีรูปร่างที่สม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติชิ้นงานที่เตรียมได้มีมวลไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้นำกฎอาร์คิมิดิสเข้ามาใช้หาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่น้ำโดยอาศัยสมการ

$$\rho = (w_0/w_1 - w_0)\rho_0 \qquad (3.2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (จากการทดลอง)

ρ_0 คือ ความหนาแน่นของน้ำกลั่น ณ อุณหภูมิที่ทดลอง (ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของน้ำกับอุณหภูมิ)

w_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำเมื่อรูพรุนถูกแทนที่ด้วยน้ำตามลำดับ

w_1 คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ

หลักการวัดค่าความหนาแน่นสามารถทำได้ดังนี้ คือ

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาทำความสะอาด แล้วนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก* ได้มวลมีค่าเป็น w_1
2. แล้วนำชิ้นงานที่ได้มาต้มในน้ำกลั่น เพื่อให้น้ำแพร่เข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุนนาน 2 ชั่วโมง
3. รอจนกระทั่งน้ำเย็นลง แล้วนำชิ้นงานไปชั่งในน้ำกลั่นได้มวลมีค่าเป็น w_0
4. วัดค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นด้วยเทอร์โมมิเตอร์ขณะทำการชั่ง

* ชิ้นงาน 1 ชิ้นจะชั่งน้ำหนักชิ้นงานละ 5 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานวัสดุประกอบที่ได้อย่างละเอียดที่อุณหภูมิต่ำ (cryogenic fracture) เพื่อดูการกระจายตัวของ CCTO ใน HDPE

1. ตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กแล้ว ไปทำการเคลือบทองด้วยเทคนิค sputtering เป็นเวลานาน 8 นาที
2. นำชิ้นงานตัวอย่างไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM

3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (enthalpy) และความไม่เป็นระเบียบ (entropy) เทคนิคนี้ตรวจวัดความแตกต่างของเอนทัลปีของสารตัวอย่าง และสารอ้างอิง เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% crystallinity) ของพอลิเมอร์ได้ โดยแสดงในรูปของเทอร์โมแกรมระหว่าง ΔT ค่าความจุความร้อน (Cp) หรือค่าความร้อนกับอุณหภูมิ หรือเวลา

1. การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมชิ้นงานให้มีความเรียบ มีพื้นที่ผิวมาก โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดเล็ก บาง และมีผิวเรียบ ใช้ตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัม
2. นำชิ้นงานที่เตรียมได้วัดสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC อุณหภูมิตั้งแต่ 50 °C – 450 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min

4. การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้โดยเริ่มจากการทำขั้วไฟฟ้าให้กับชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) และค่าการสูญเสียทางความร้อนของไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) โดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณค่าต่างๆ ซึ่งการหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) ของชิ้นงานตัวอย่างสามารถหาได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง LCR meter แล้วจึงนำค่าความจุไฟฟ้าที่อ่านได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก จากสมการ

$$\varepsilon_r = tC / A\varepsilon_0 \qquad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง

ε_r คือ ค่าความสามารถในการกักเก็บประจุของชิ้นงานตัวอย่าง

ε_o คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าประมาณ 8.854×10^{-15} F/mm

วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

1. นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาขัดผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 1000
2. ทากาวเงินที่ผิวหน้าทั้งสองด้าน
3. วัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter
4. คำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

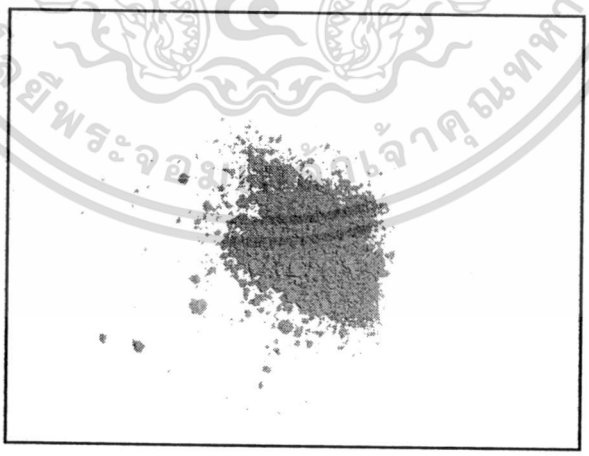
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สัณฐานวิทยาและหาความหนาแน่นในเชิงเปรียบเทียบของคอมโพสิตแบบ 0–3ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) โดยใช้สัดส่วนเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ CCTO 10, 20, 30, 40 % แสดงผลการทดลองได้ดังนี้

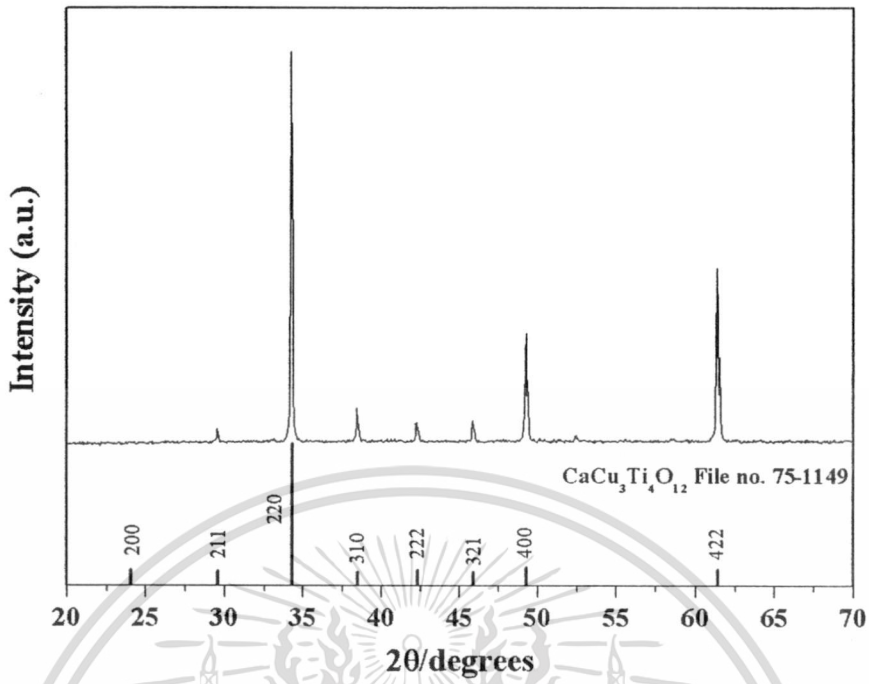
เมื่อนำแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) คอปเปอร์(II)ออกไซด์ (CuO) และไทเทเนียม (IV)ออกไซด์ (TiO_2) ไปบดย่อยผสมด้วยลูกบอลชนิดเซอร์โคเนีย เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา และหลังจากการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลดังรูปที่ 4.1 จากนั้นนำผงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางเอกลักษณ์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลการทดลองดังรูป 4.2 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐาน พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐานหมายเลข 75-1149 ซึ่งระบุว่าสารตัวอย่างเป็นแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) มีสูตรโครงสร้าง คือ $CaCu_3Ti_4O_{12}$ มีโครงสร้างแบบ Body-center cubic จากนั้นนำผง CCTO ไปตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา ทำให้ทราบว่าอนุภาค CCTO ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.62 ไมโครเมตร ดังรูป 4.3

เมื่อทำการวัดความหนาแน่นของ CCTO ที่สังเคราะห์ได้จากการแทนที่น้ำ พบว่า CCTO ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 5.0045 g/cm^3

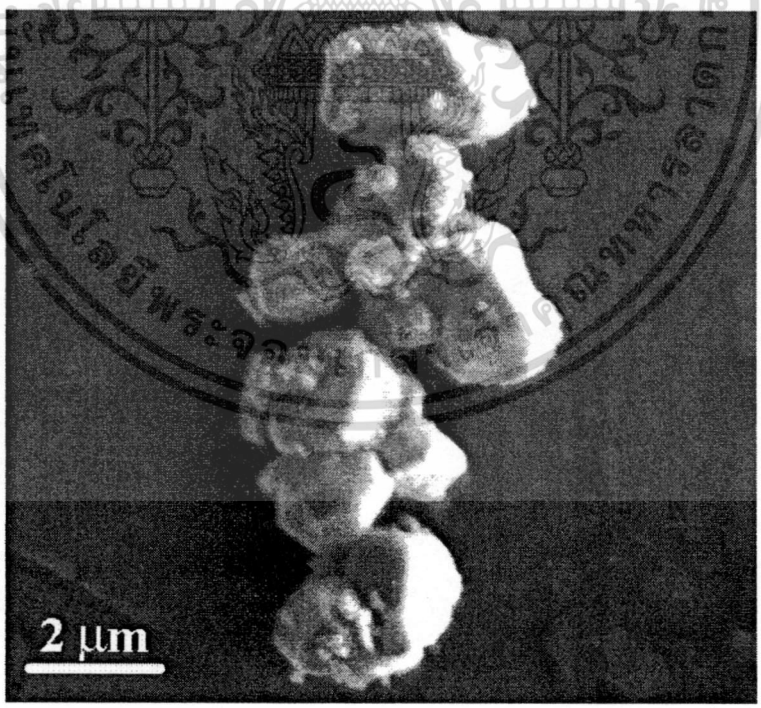


รูปที่ 4.1 ลักษณะของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



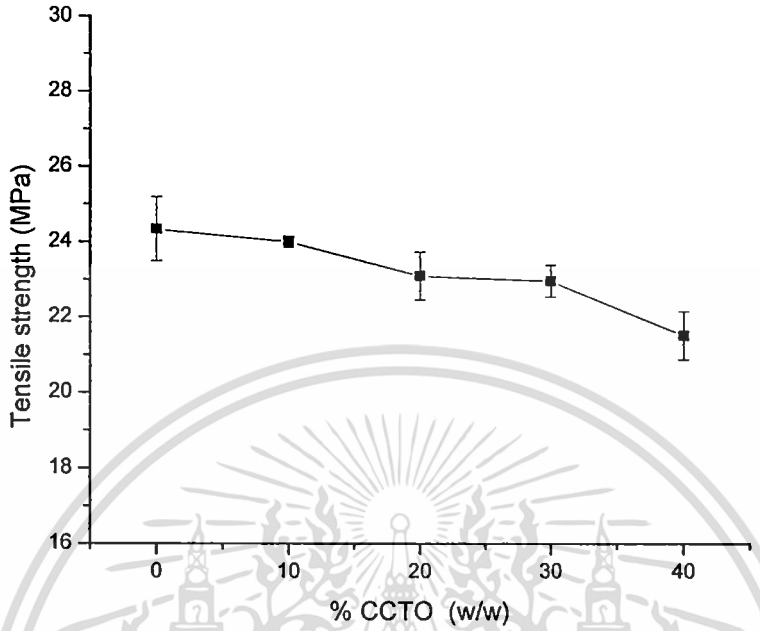
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)



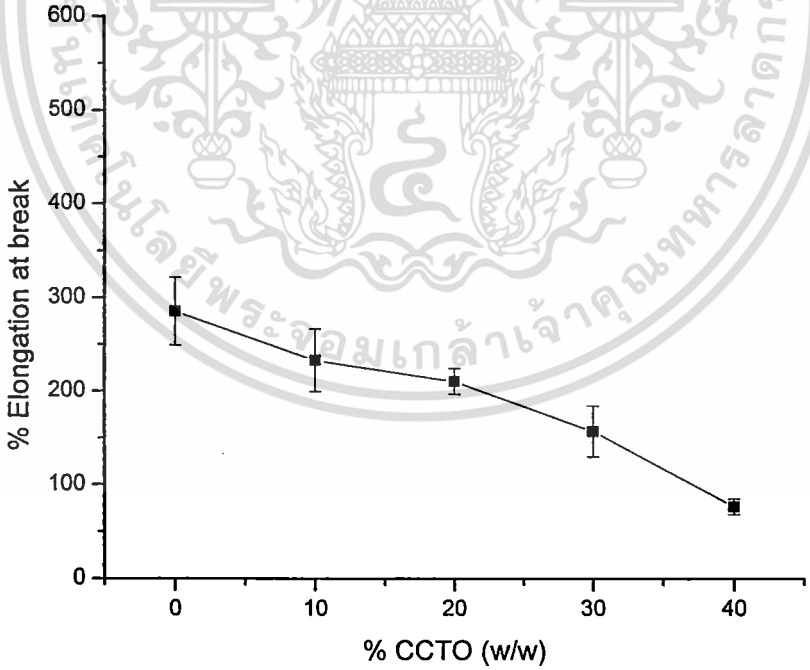
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



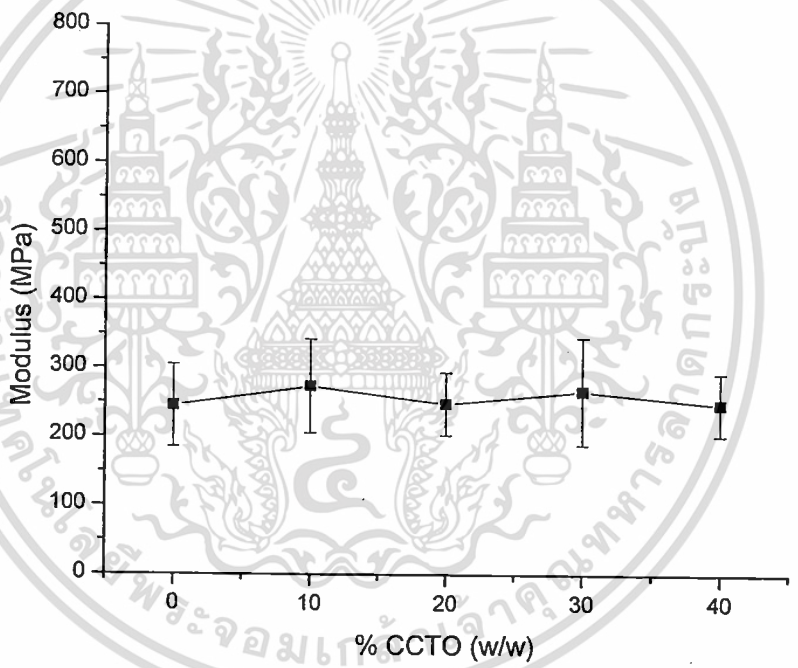
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Tensile strength ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.5 แสดงค่า % Elongation at break ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) กับ HDPE ที่อัตราส่วนของCCTOต่างๆกันมีค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength) ใกล้เคียงกันและต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณCCTOมากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าCCTOมีความเปราะเมื่อเติมลงไปมากขึ้นจะทำให้คอมโพสิตเปราะมากขึ้นตามไปด้วยและเมื่อผสมCCTOลงไปในคอมโพสิตจะเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคทำให้คอมโพสิตมีลักษณะที่เปราะ หักง่ายดังนั้นความแข็งแรงดึงจึงลดลง จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่า % Elongation at break มีค่าลดลง อธิบายได้ว่าผง CCTO ที่เติมลงไปแยกออกเป็นวัฏภาคจากเมตริกซHDPEเมื่อเติมลงไปในคอมโพสิตจึงทำให้คอมโพสิตที่ได้มีการยึดเกาะกันไม่ดีและเมื่อผสมCCTOลงไปในคอมโพสิตจะเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคทำให้การถ่ายเทแรงด้อยลง ทำให้คอมโพสิตมีความเปราะสูงขึ้นดังนั้นการยืดตัว ณ . จุดขาดของชิ้นงานคอมโพสิตจึงมีค่าลดลง

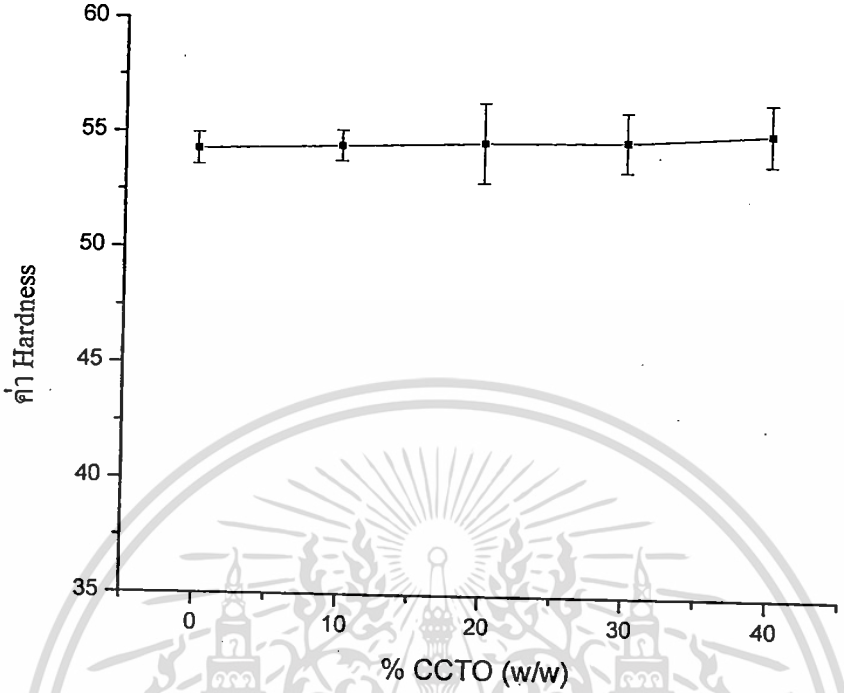


รูปที่ 4.6 แสดงค่า Modulus ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า เมื่อเติมปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น ค่าModulus มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากสัดส่วนของ CCTO ในคอมโพสิตยังมีไม่มากพอ ที่จะทำให้ค่า Modulus เปลี่ยนแปลงอย่างมาก แต่จากหลักการแล้วค่ามอดุลัสควรที่จะลดลงเนื่องจากมอดุลัสคือแรงต่อพื้นที่ที่ทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นเมื่อปริมาณ CCTOมากขึ้น ชิ้นงานก็จะเปราะมากขึ้นทำให้แรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานลดลง ค่ามอดุลัสจึงลดลงตามไปด้วยแต่ก็ลดลงไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Hardness)ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



รูปที่4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดกับปริมาณCCTO ในคอมโพสิต

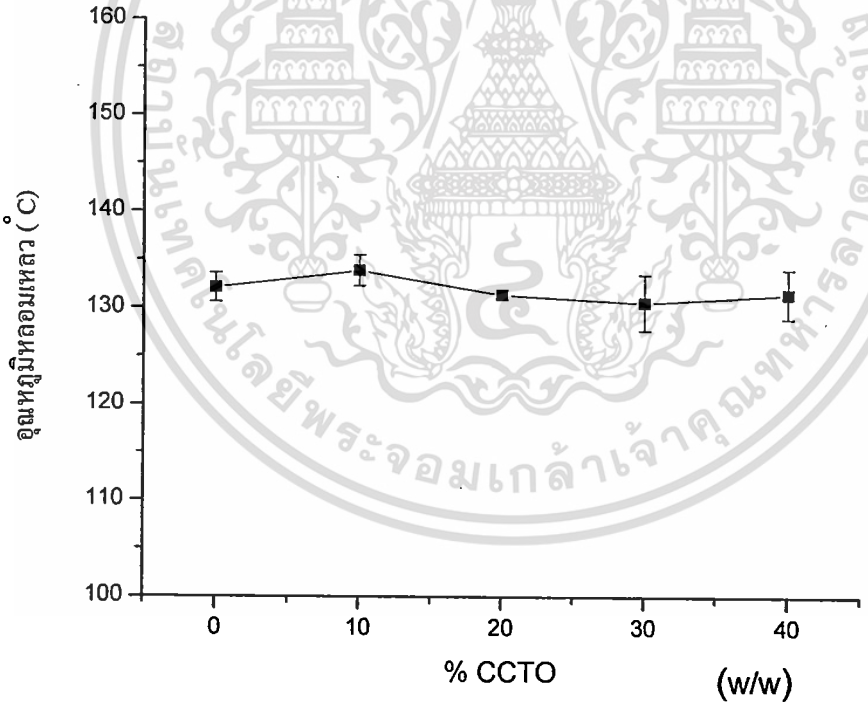
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าความแข็งกดของคอมโพสิตเมื่อเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของCCTO เพิ่มขึ้นจะมีค่าความแข็งกดสูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากCCTOเป็นเซรามิกส์ที่มีความแข็งเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้คอมโพสิตมีความแข็งกดสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าความแข็งกดของคอมโพสิตก็ไม่สูงขึ้นมากนักเนื่องจากเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของCCTOที่มีในคอมโพสิตยังไม่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) , อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) , เอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมเหลว ($\Delta H_{หลอมเหลว}$) , เอนทาลปีที่ใช้ในการตกผลึก($\Delta H_{ตกผลึก}$) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

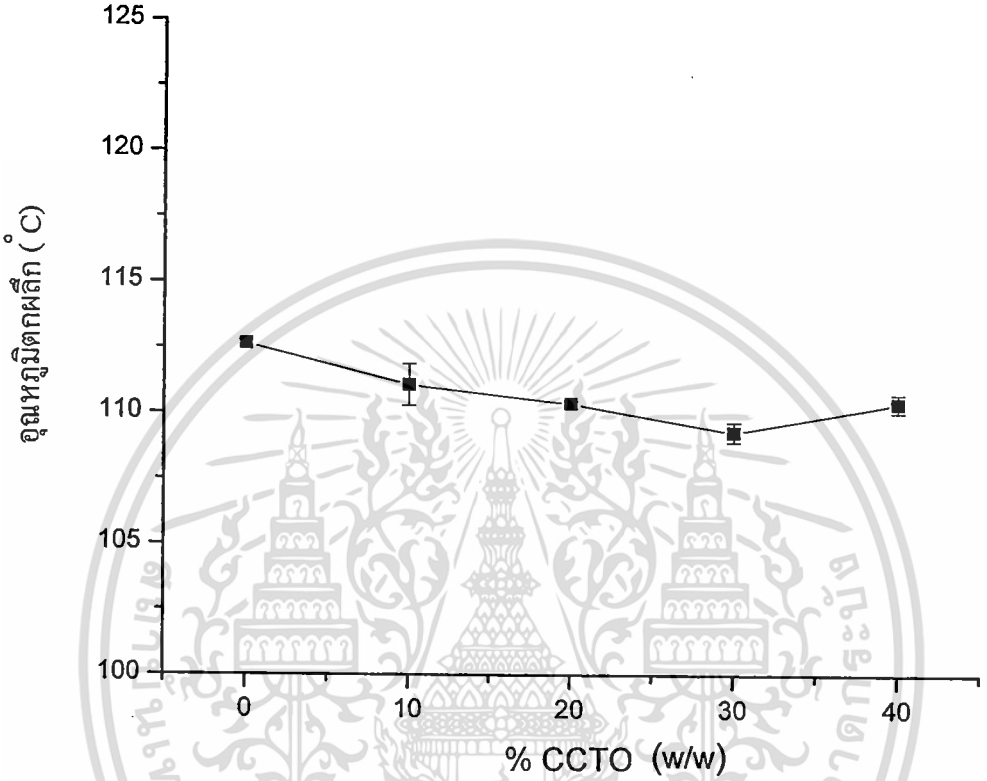
ปริมาณ CCTO (%)	T_m (°C)	T_c (°C)	$\Delta H_{หลอมเหลว}$ J/g	$\Delta H_{ตกผลึก}$ J/g
0	132.10	112.63	123.78	-121.05
10	133.85	111.07	94.60	-89.94
20	131.37	110.37	86.78	-97.38
30	130.58	109.29	102.41	-128.07
40	131.45	110.40	51.44	-50.92



รูปที่ 4.8 แสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.8 จะเห็นว่าเมื่อเติมปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลว(T_m) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากผง CCTO เป็นเซรามิกมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลว(T_m) สูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิการหลอมเหลว(T_m) ที่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณCCTOในคอมโพสิตมีปริมาณไม่มากที่จะแสดงผลได้อย่างชัดเจน

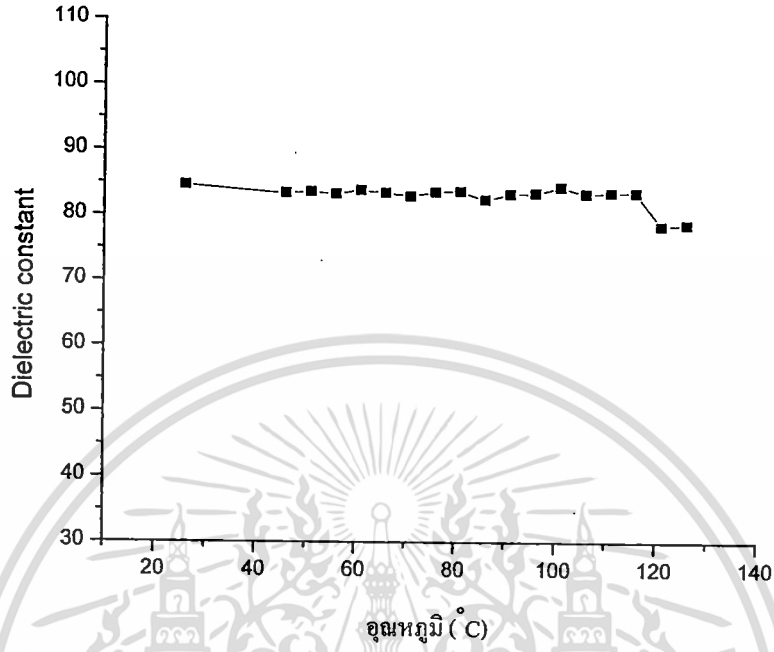


รูปที่ 4.9 แสดงค่า อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

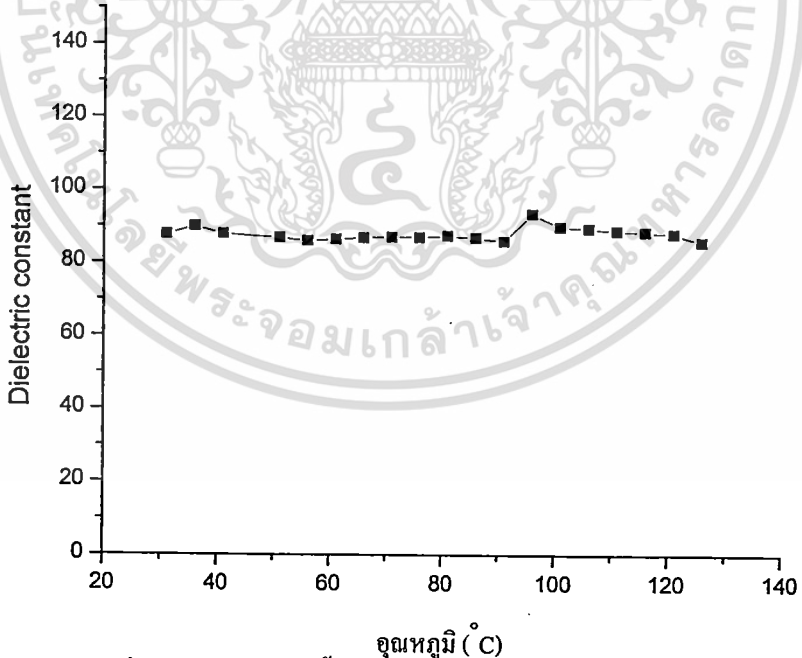
จากรูป 4.9 จะเห็นว่าเมื่อเติมปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น อุณหภูมิการตกผลึก (T_c)มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจาก CCTO มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงและอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องDSC อยู่ระหว่าง 50-450 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ CCTO ยังไม่สลายตัว ดังนั้น CCTOจะไม่ตกผลึก อุณหภูมิการตกผลึกของคอมโพสิตแต่ละอัตราส่วนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Dielectric constant) ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

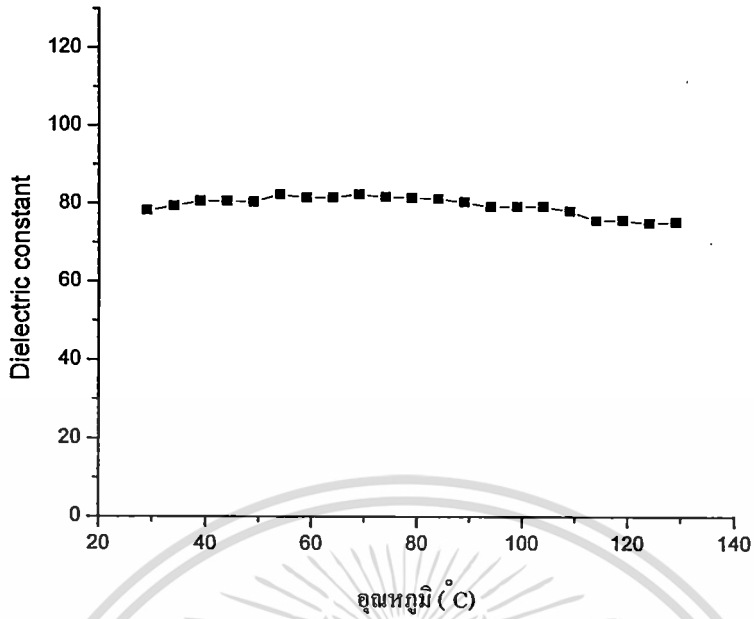


รูปที่ 4.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานคอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไท-ทาเนต 0% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

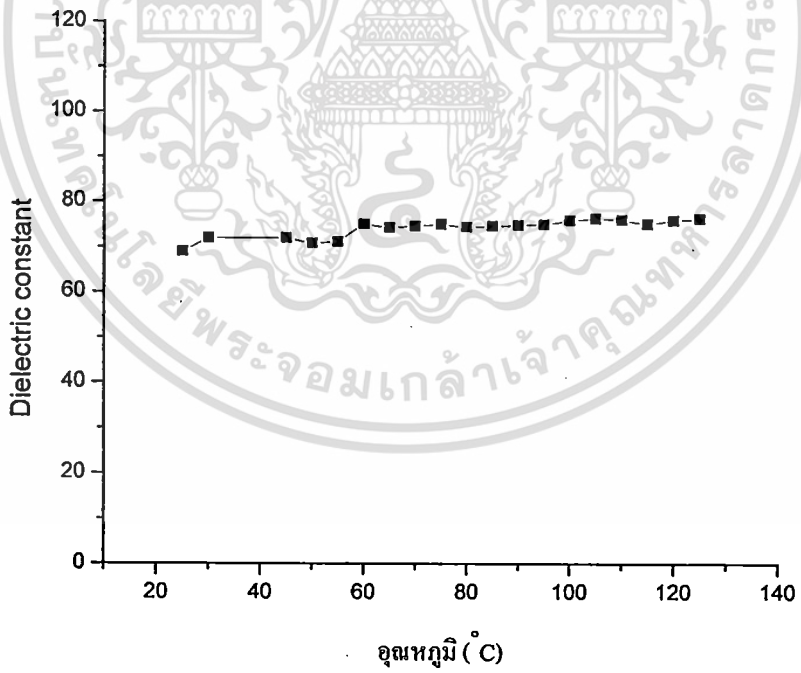


รูปที่ 4.11 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 10% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 30% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

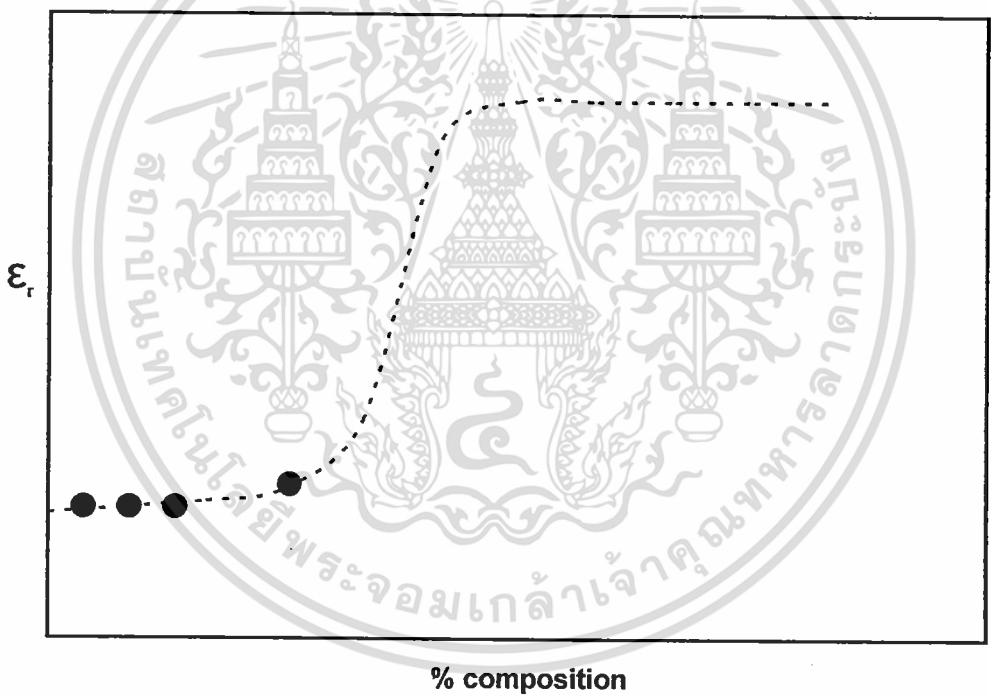


รูปที่ 4.13 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 40% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10-4.13 แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกันที่ความถี่ 200 kHz ในขณะที่ความถี่ต่ำๆมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่คลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากที่ 0-40 % ยังไม่ใช่สัดส่วนที่ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงอย่างมาก แต่จากรูปจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสมบัติของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากนัก

ในงานวิจัยนี้การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของคอมโพสิตควรจะเป็นไปตามทฤษฎีเพอร์โคเลชัน(Percolation theory) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ใช้กับการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูป 4.14



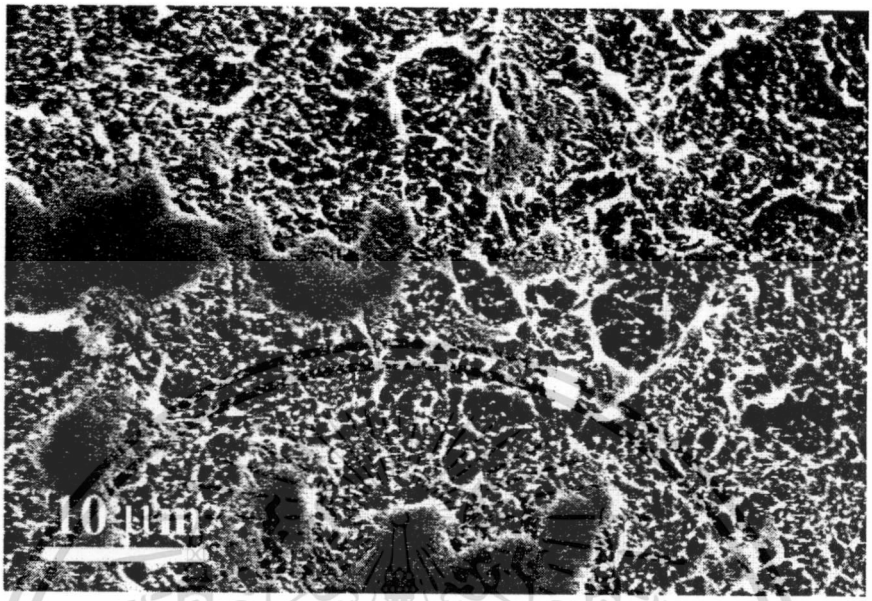
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์(ε_r) กับ %composition ของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

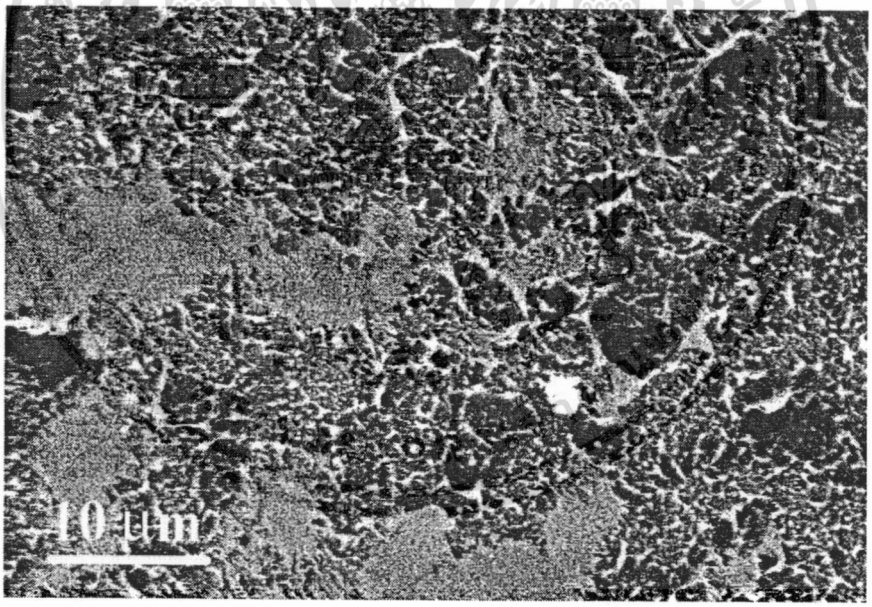
จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วน 0-40 % composition ที่ทำในงานวิจัยนี้ยังไม่ใช่จุดที่ทำให้ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นคุณสมบัติด้านต่างๆและ ε_r ของคอมโพสิตจึงมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงควรทำการหา %composition ของCCTO ที่เหมาะสม โดยการทำคอมโพสิต ที่มี %composition ของ CCTO เท่ากับ 50 60 70 ซึ่งคาดว่า properties และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ในช่วงนี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างรวดเร็ว และเป็นช่วงที่คาดว่า คอมโพสิตจะมีคุณสมบัติด้านต่างๆดีขึ้น รวมถึงอาจมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ที่เพิ่มขึ้นมาอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope,SEM)



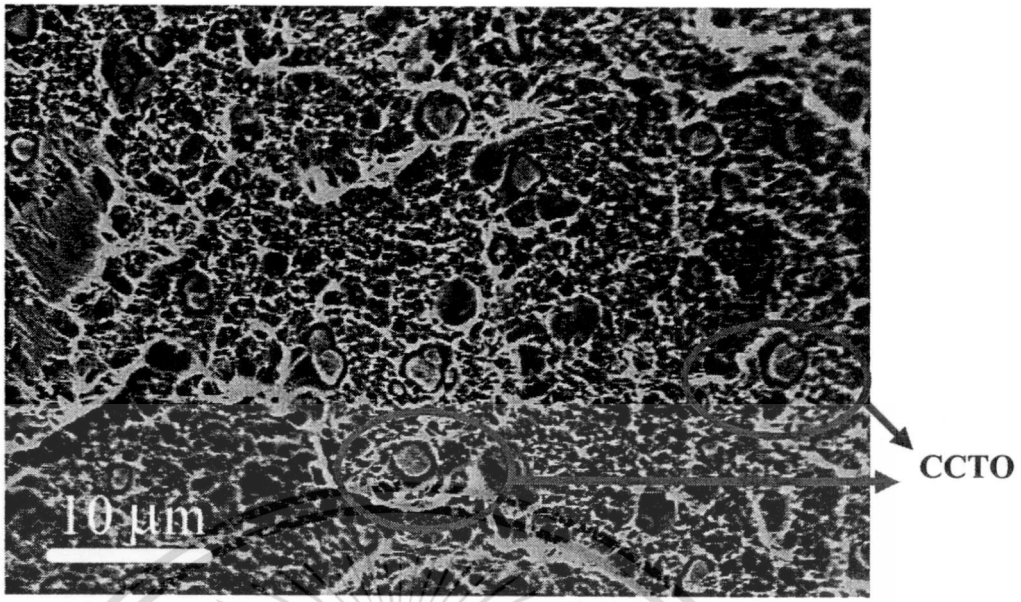
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของHDPE (Pure)



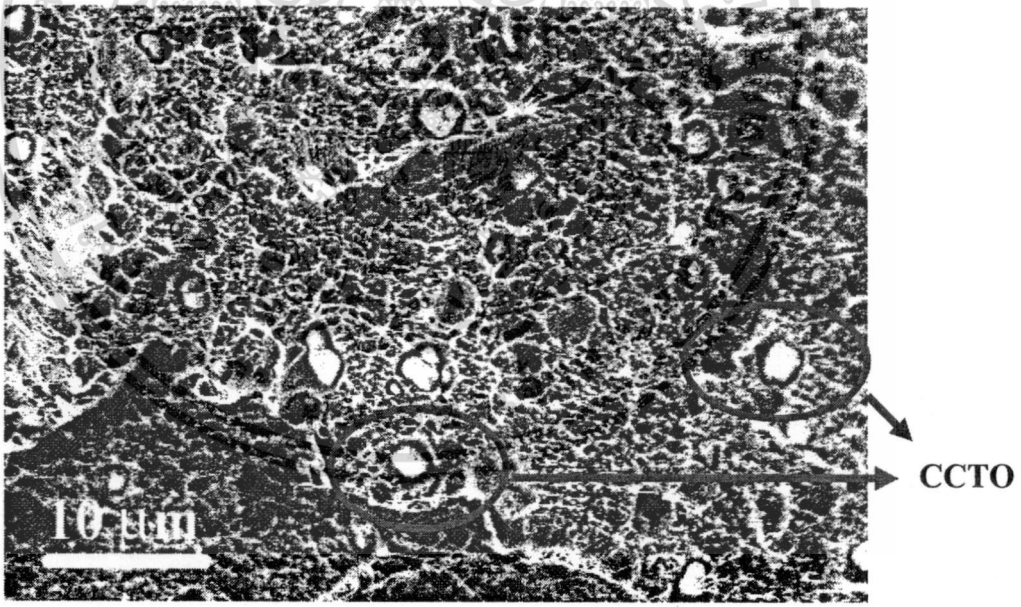
รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของHDPE (Pure)

(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



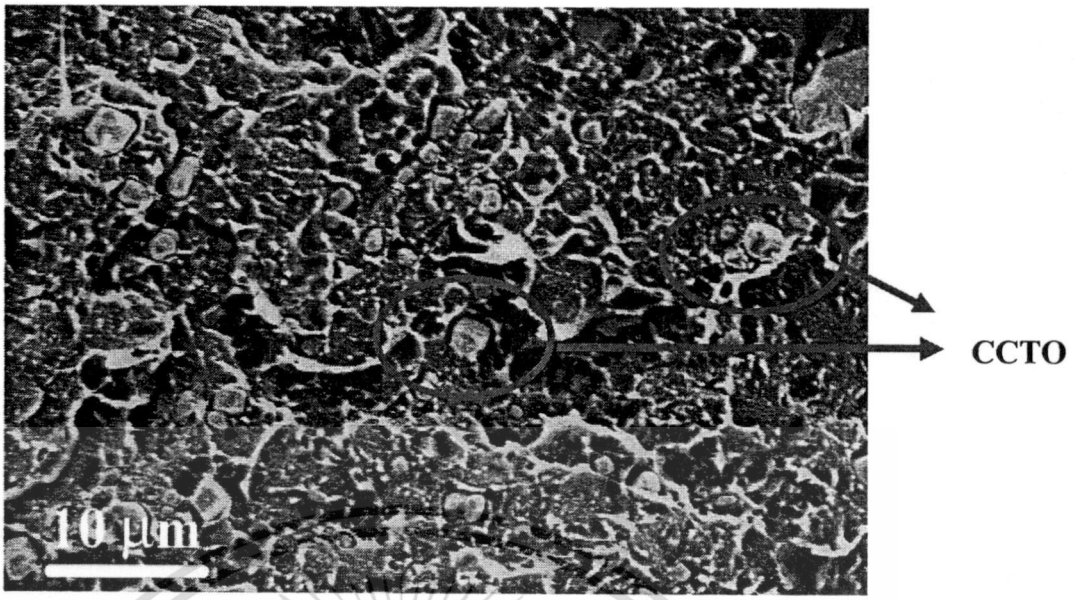
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 10%CCTO



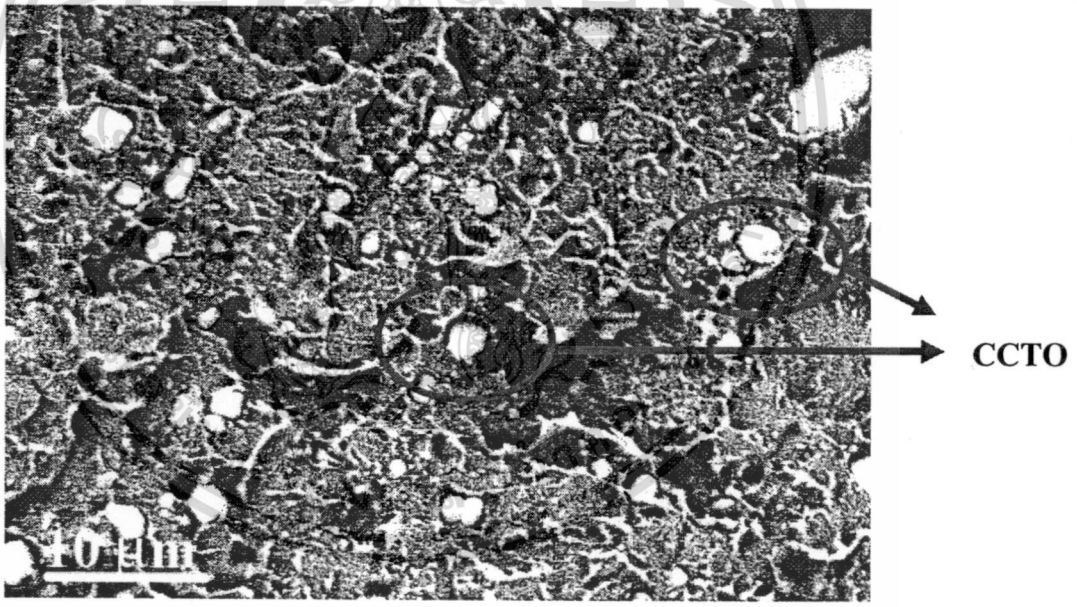
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 10%CCTO

(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

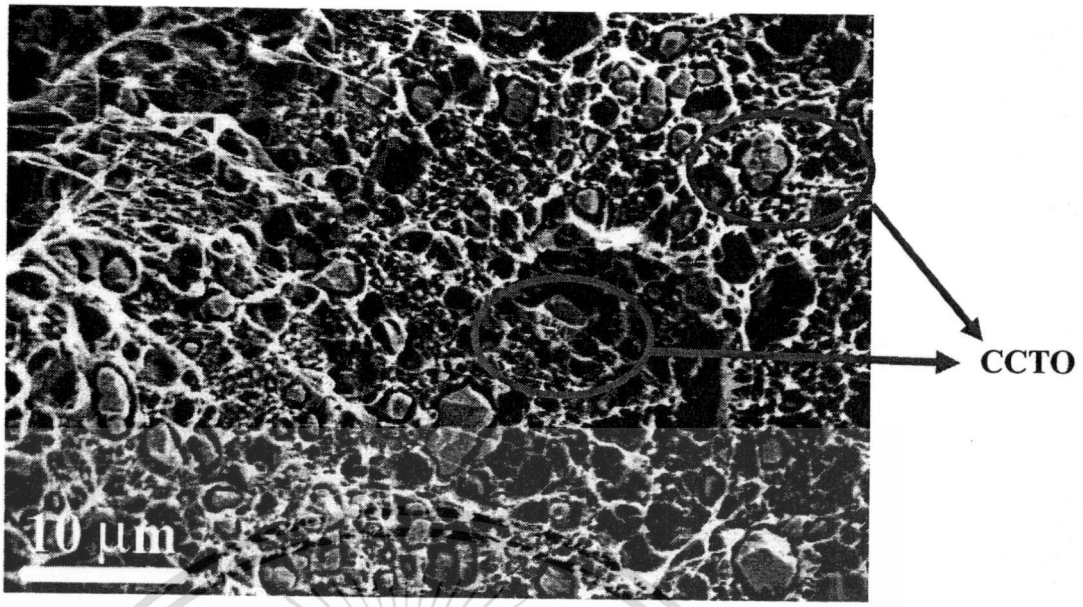


รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 20%CCTO

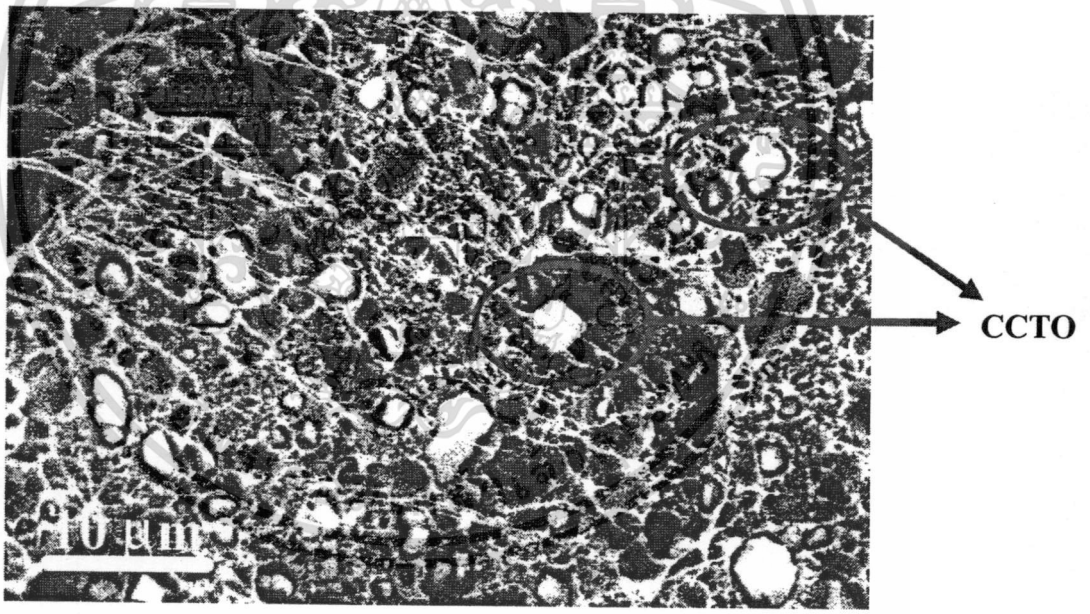


รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 20%CCTO
(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



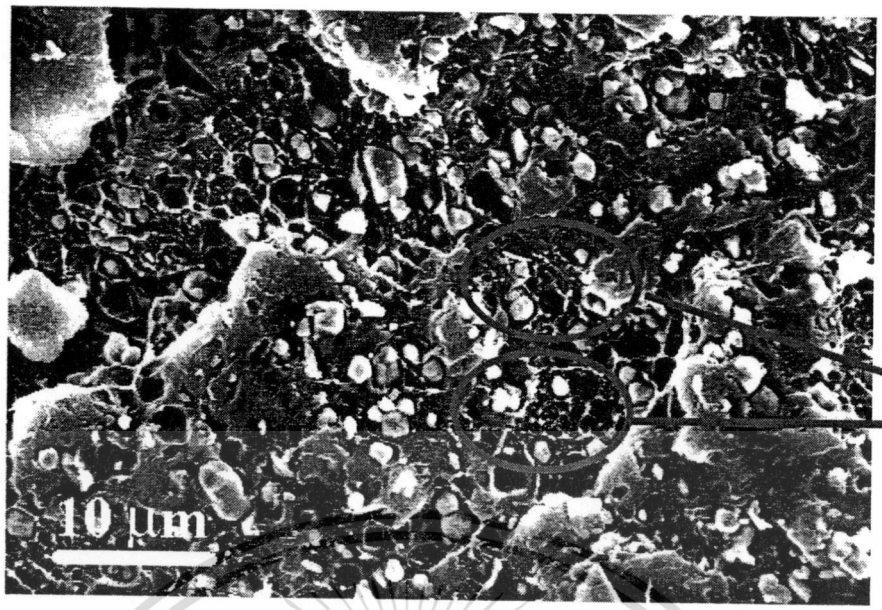
รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 30%CCTO



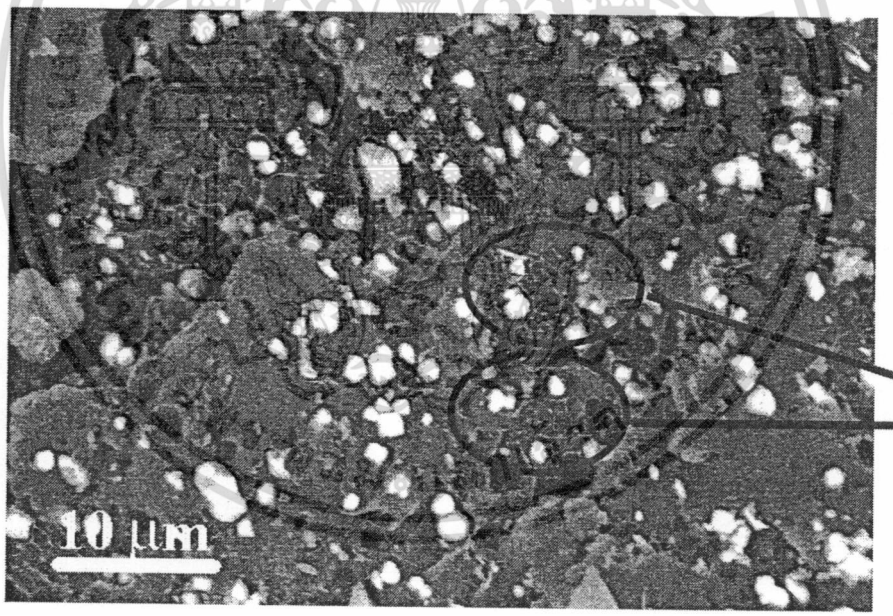
รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 30%CCTO

(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 40%CCTO



รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 40%CCTO

(ภาพ Back Scattering)

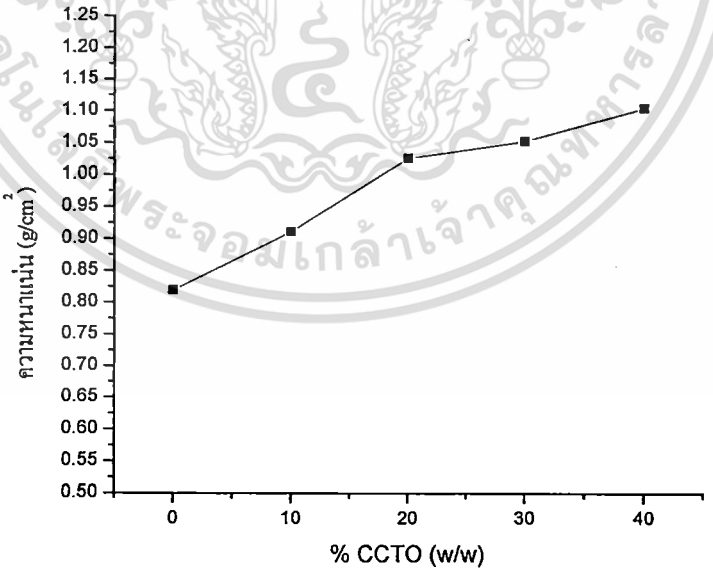
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.15-4.24 ได้แสดงการกระจายตัวของCCTOโดยเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE (Pure) และ คอมโพสิตที่เปอร์เซนต์CCTOต่างๆ พบว่าอนุภาค CCTOถูกล้อมรอบด้วยพอลิ-เมอร์เมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเป็นคอมโพสิตแบบ 0-3 โดยแต่ละรูปได้แสดงภาพแบบ Back Scattering ด้วยเพื่อให้เห็นความชัดเจนของการกระจายตัวของอนุภาคCCTO ได้ดียิ่งขึ้น โดยเมื่อปริมาณของCCTOมีมากขึ้น จะทำให้เกิดการกระจายตัวอยู่ใน HDPE เมตริกซ์มากขึ้นแยกออกเป็นวัฏภาคอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่มีแนวโน้มลดลง

4.6 การหาความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่น ของคอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่น (g/cm^3)
Pure HDPE	0.8196
10% CCTO	0.9116
20% CCTO	1.0262
30% CCTO	1.0531
40% CCTO	1.1054



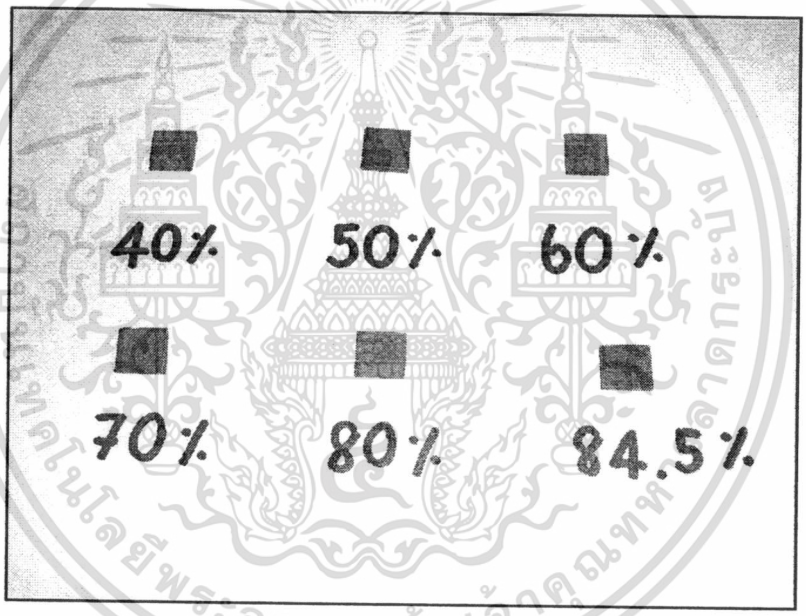
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่4.25 พบว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนCCTOในคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอมโพสิตก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอนุภาค CCTO ที่ใส่ลงไปมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้มวลของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอมโพสิตจึงสูงขึ้นด้วย

4.6 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยการอัดชนิดอัดแรง (compression molding)

เมื่อทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผง CCTO ที่เตรียมได้เรียบร้อยแล้ว นำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบระหว่าง CCTO กับ HDPE ที่อัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการอัดชนิดอัดแรง (compression molding) จะได้ชิ้นงานออกมามีลักษณะเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น และมีสีน้ำตาล ลักษณะชิ้นงานแต่ละอัตราส่วนที่ขึ้นรูปได้แสดงดังรูป 4. 26



รูปที่ 4.26 ลักษณะชิ้นงานวัสดุประกอบของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สัดส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้จากวิธีการอัดชนิดอัดแรง

โดยความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบจะลดลงเมื่อสัดส่วนของ CCTO เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้วิธีการอัดชนิดอัดแรงยังสามารถเตรียมสัดส่วนของชิ้นงานวัสดุประกอบได้มากกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) ที่สามารถเตรียมสัดส่วนของวัสดุประกอบได้เพียง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยวิธีการอัดชนิดอัดแรงนั้นสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีสัดส่วนของCTTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มากที่สุดถึง 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่สัดส่วน CCTO มากกว่า 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้น มีปริมาณ HDPE น้อยมาก ทำให้ไม่มีพอลิเมอร์เมทริกซ์เพียงพอต่อการห่อหุ้มอนุภาค CCTO ทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันได้

4.7 ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)ด้วยการอัดชนิดอัดแรง (compression molding)

โดยทั่วไปความหนาแน่นของวัสดุประกอบทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการ[17]

$$D_{Composite} = x D_{HDPE} + (1-x) D_{CCTO} \quad (4.1)$$

เมื่อ x คือ สัดส่วนโดยปริมาตร

$D_{Composite}$ คือ ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ (จากทางทฤษฎี)

D_{HDPE} คือ ความหนาแน่นของ HDPE (0.941 g/cm^3)

D_{CCTO} คือ ความหนาแน่นของ CCTO ที่ได้จากการสังเคราะห์ (5.0045 g/cm^3)

โดยค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบนั้นจะอยู่ระหว่างค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบที่นำมาทำเป็นวัสดุประกอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าความหนาแน่นของ CCTO (5.0045 g/cm^3) และ HDPE (ประมาณ 0.941 g/cm^3)

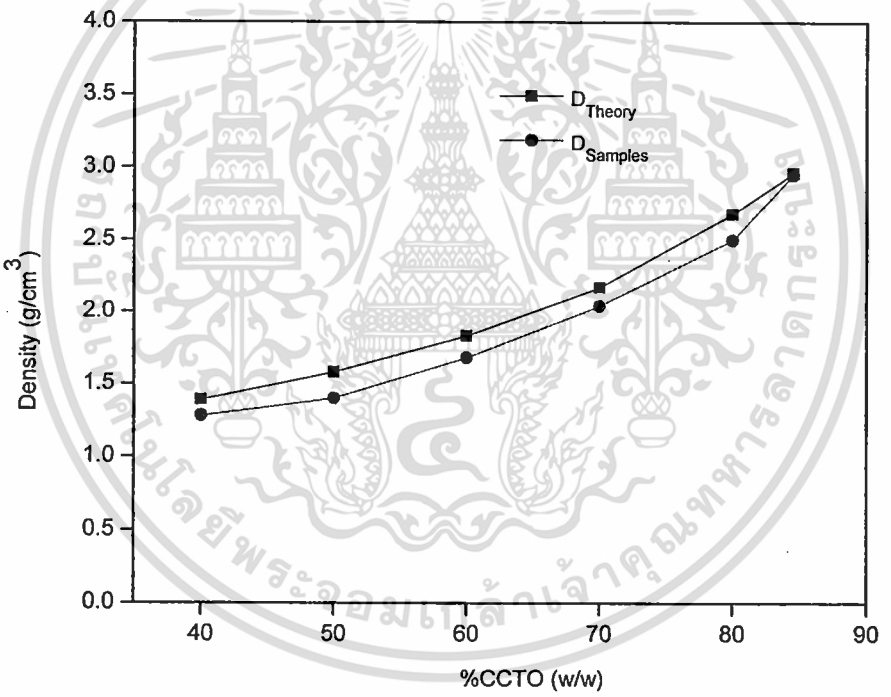
จากรูป 4.27 พบว่า เมื่อปริมาณ CCTO ในวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุประกอบก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค CCTO ที่เติมลงไปมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้มวลของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุประกอบจึงสูงขึ้นด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีซึ่งคำนวณได้จากสมการ 4.1 กับค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เตรียมขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เตรียมขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี เนื่องมาจากฟองอากาศที่อยู่ภายในชิ้นงานทำให้เกิดช่องว่าง การกระจายตัวของอนุภาค และขนาดอนุภาคของ CCTO และจากค่าความชันของเส้นกราฟความหนาแน่นทางทฤษฎี กับค่าความชันของเส้นกราฟตัวอย่างใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่า กระบวนการขึ้นรูปอัดชนิดอัดแรงเหมาะสมต่อการใช้ขึ้นรูปวัสดุประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในสัดส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นตัวอย่าง (g/cm^3)	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm^3)	ร้อยละความหนาแน่น*
40%CCTO	1.28	1.39	92.89
50%CCTO	1.40	1.58	88.61
60%CCTO	1.68	1.83	91.80
70%CCTO	2.04	2.17	94.01
80%CCTO	2.50	2.68	93.28
84.50%CCTO	2.95	2.96	99.66

* เมื่อเทียบความหนาแน่นตัวอย่างกับความหนาแน่นทางทฤษฎี

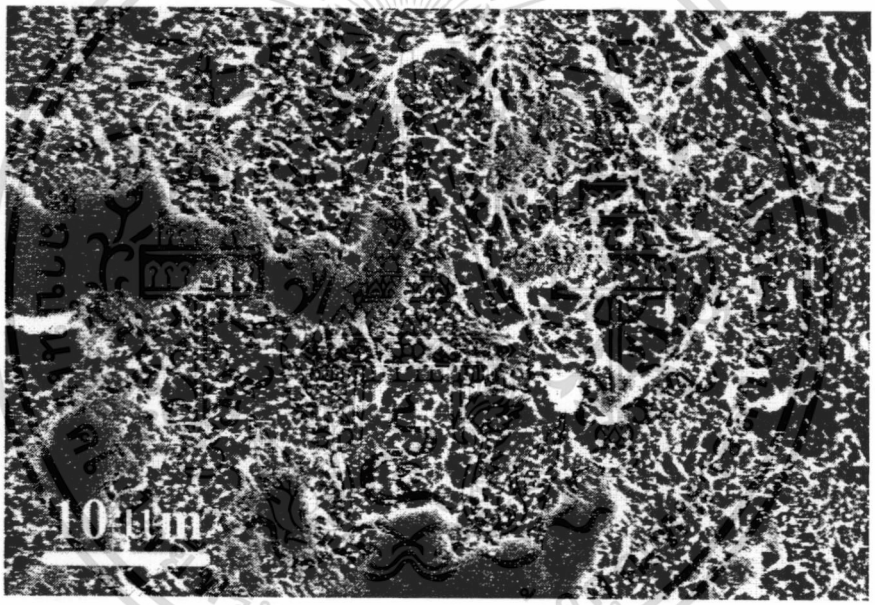


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เติม CCTO ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

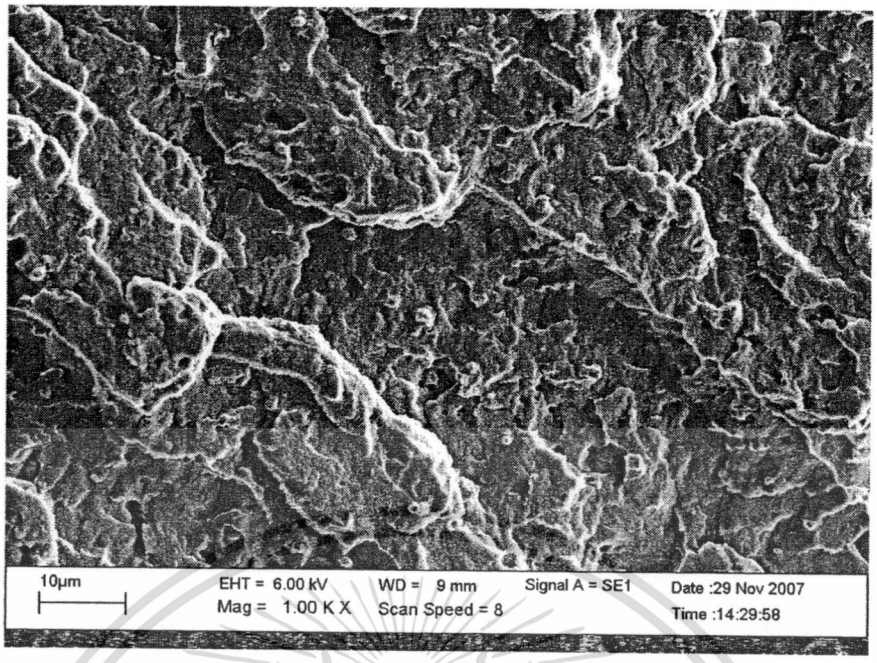
4.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)ด้วยการอัดชนิดอัดแรง (compression molding) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

หลังจากเตรียมวัสดุประกอบระหว่าง CCTO และ HDPE ที่อัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว นำวัสดุประกอบแต่ละอัตราส่วนที่ได้ มาทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อศึกษารูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุประกอบ และขนาดอนุภาคของ CCTO หลังการขึ้นรูปโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ได้ผลการทดลองดังรูป 4.28-4.34

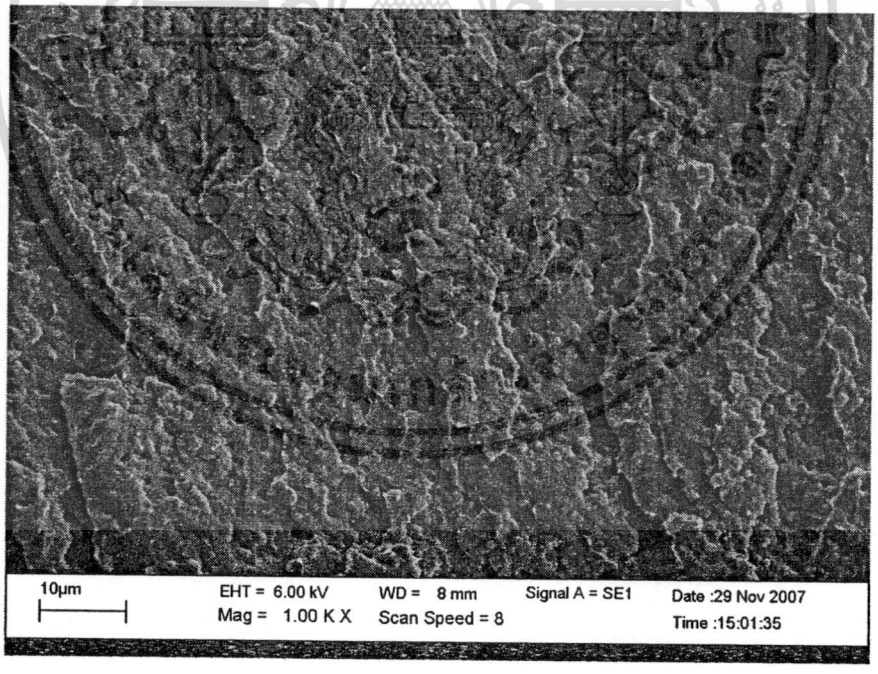


รูปที่ 4.28 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

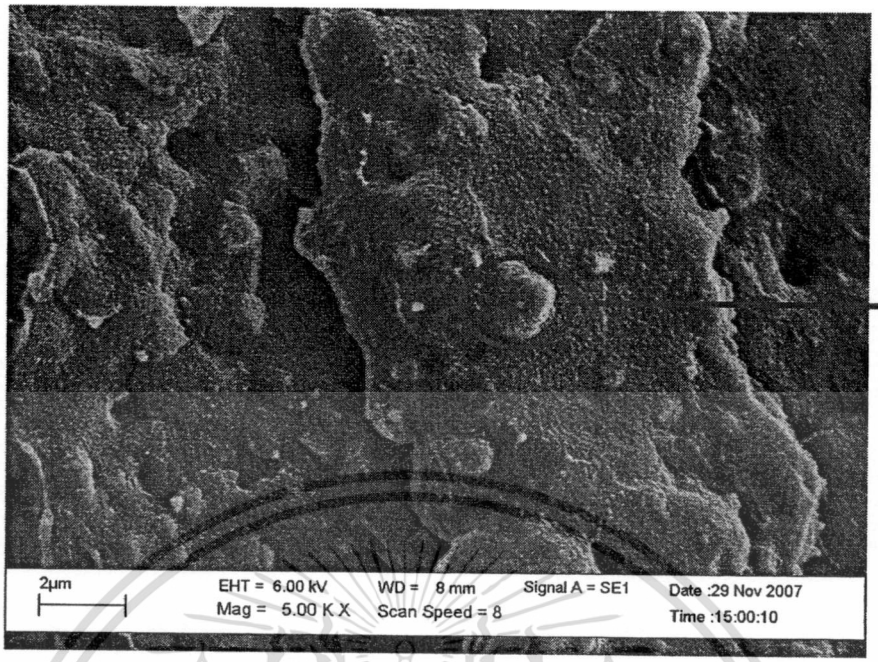


รูปที่ 4.29 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 40% CCTO โดยน้ำหนักด้วยการอัดชนิดอัดแรง

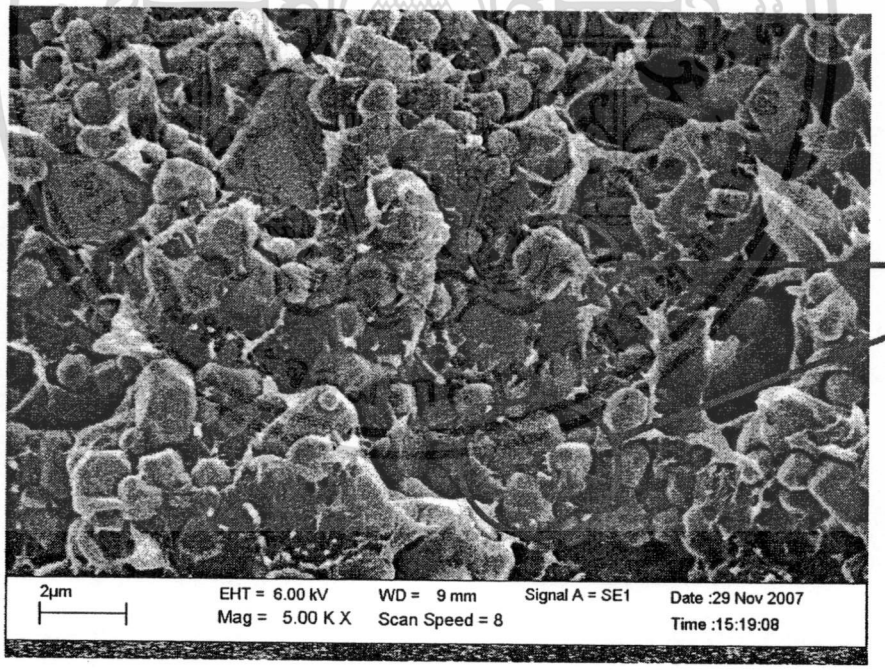


รูปที่ 4.30 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 50% CCTO โดยน้ำหนักด้วยการอัดชนิดอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

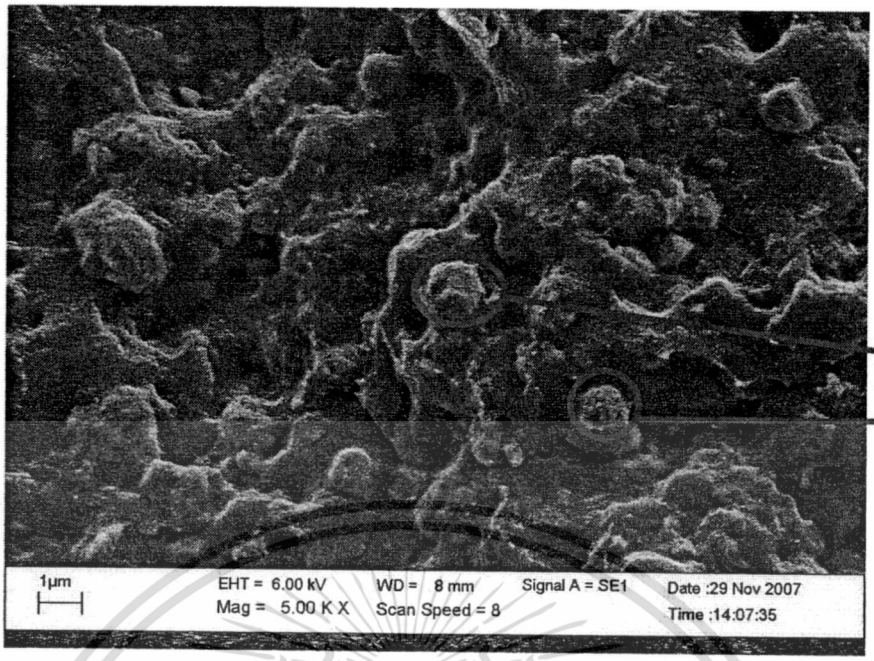


รูปที่ 4.31 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 60% CCTO โดยน้ำหนักด้วยการอัดชนิดอัดแรง

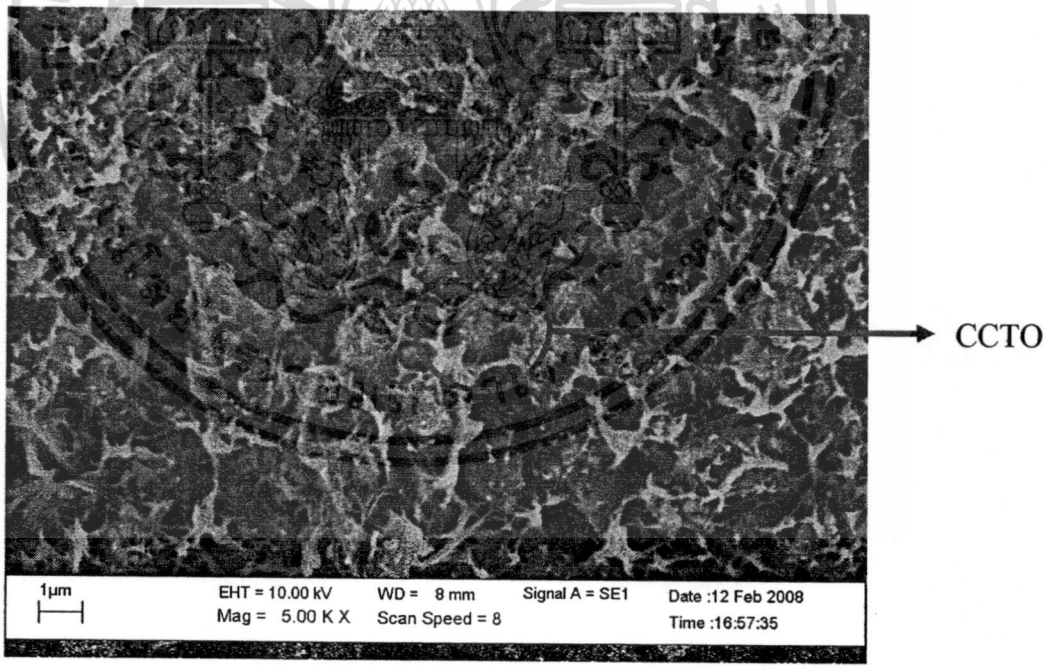


รูปที่ 4.32 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 70% CCTO โดยน้ำหนักด้วยการอัดชนิดอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 80% CCTO โดยน้ำหนักด้วยการอัดชนิดอัดแรง



รูปที่ 4.34 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 84.50% CCTO โดยน้ำหนักด้วยการอัดชนิดอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.28 แสดงถึงสัณฐานวิทยาของ HDPE บริสุทธิ์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบที่อัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 4.29-4.34 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนเริ่มต้น คือ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีอนุภาคของ CCTO กระจายตัวอยู่ มีรูปแบบการเชื่อมต่อของ CCTO กับ HDPE เป็นแบบ 0-3 และเมื่อสัดส่วนของ CCTO เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของอนุภาค CCTO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ก็จะมากขึ้นด้วย จนกระทั่งสัดส่วนของ CCTO เพิ่มสูงขึ้นถึง 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดที่สามารถเตรียมได้ รูปแบบการเชื่อมการยังคงเป็นแบบ 0-3 เช่นเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเตรียมชิ้นงานวัสดุประกอบด้วยวิธีอัดชนิดอัดแรง (compression molding) ได้ชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีการกระจายตัวที่ดีพอๆกับวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) แต่ใช้ปริมาณสารน้อยกว่า ประหยัดกว่า และขนาดอนุภาคของ CCTO หลังการขึ้นรูปไม่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาค นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีปริมาณสัดส่วน CCTO ได้มากกว่าวิธีการฉีดขึ้นรูปอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1) ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

คอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) กับ HDPE ที่อัตราส่วนของ CCTOต่างๆกันมีค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength) ใกล้เคียงกันและต่ำลงเรื่อยๆเมื่อปริมาณ CCTOมากขึ้น

2) ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Hardness)ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

คอมโพสิตมีความแข็งแรงกดมากขึ้น เมื่อเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตในปริมาณที่มากขึ้น

3) ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

เมื่อปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลว(T_m) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับอุณหภูมิการตกผลึก (T_c)มีค่าใกล้เคียงกัน

4) ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

5) ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope,SEM)

การกระจายตัวของCCTOโดยเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE (Pure) กับคอมโพสิตที่เปอร์เซนต์CCTOต่างๆ พบว่าอนุภาค CCTOถูกล้อมรอบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเป็นคอมโพสิตแบบ 0-3

6) การหาความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปริมาณสัดส่วนCCTOในคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สัณฐานวิทยาและความหนาแน่นของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 50% 60% 70% โดยน้ำหนัก เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการทำคอมโพสิตชนิดนี้ให้ได้คุณสมบัติข้างต้นดังกล่าว ได้ดีที่สุด

2. นำผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO)มาผ่านการคัดขนาด แล้วนำมาทำคอมโพสิต จะได้คอมโพสิตที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของคอมโพสิตมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

3. ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สัณฐานวิทยาและความหนาแน่น ของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

4. ทำการเติมสารที่สามารถเพิ่มความมีขั้วให้กับ HDPE เพื่อทำให้ HDPE กับ CCTO มีการยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของคอมโพสิตดีขึ้นตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

- สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ injection moulding

อุณหภูมิ nozzle	=	170 °C
อุณหภูมิตรงกลางสกรู	=	160 °C
อุณหภูมิตอนต้นสกรู	=	150 °C
ความดันที่ใช้ในการฉีด	=	40 psi
ความดันย้ำครั้งที่ 1	=	38 psi
ความดันย้ำครั้งที่ 2	=	38 psi
เวลาที่ใช้ในการฉีด	=	10 วินาที
เวลาที่ใช้ในการฉีดย้ำ	=	5 วินาที
เวลาที่ใช้ในการเย็นตัว	=	100 วินาที

1. การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ปริมาณ CCTO	Tensile strength (N/mm²)	% Elongation at break (%)	Modulus (N/mm²)
pure	24.34	285.1	244.8
10%CCTO	24.01	232.6	273.2
20% CCTO	23.11	210.4	247.4
30% CCTO	22.98	156.8	265.8
40% CCTO	21.53	76.2	246.8

ตารางแสดงค่า Tensile properties ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติม ผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

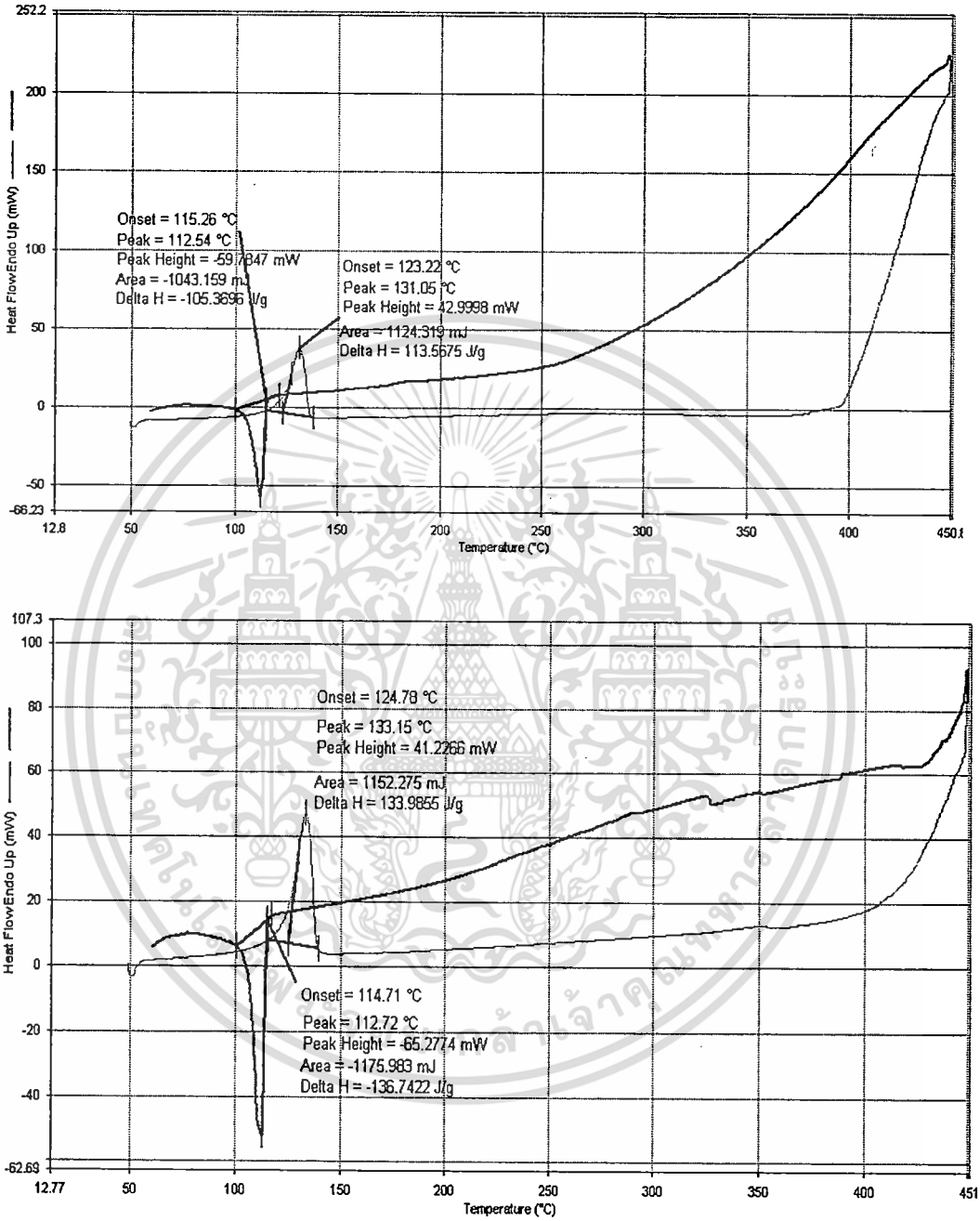
2. การทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Hardness)ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ครั้งที่	ค่า Hardness				
	Pure HDPE	10%CCTO	20%CCTO	30%CCTO	40%CCTO
1	54	55	55	53	54
2	55	54	55	54	57
3	55	55	55	56	55
4	55	55	56	56	53
5	54	55	56	54	55
6	54	55	56	56	57
7	53.5	53	55	56	54
8	55	55	56	54	54
9	54	54	51	55	55
10	55	55	54	55	57
11	53	54	55	52	54
12	55	54	56	55	56
13	54	55	51	56	56
mean	54.35	54.54	54.69	54.77	55.15

ตารางแสดง ค่า Hardness ของคอมโพสิต เมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

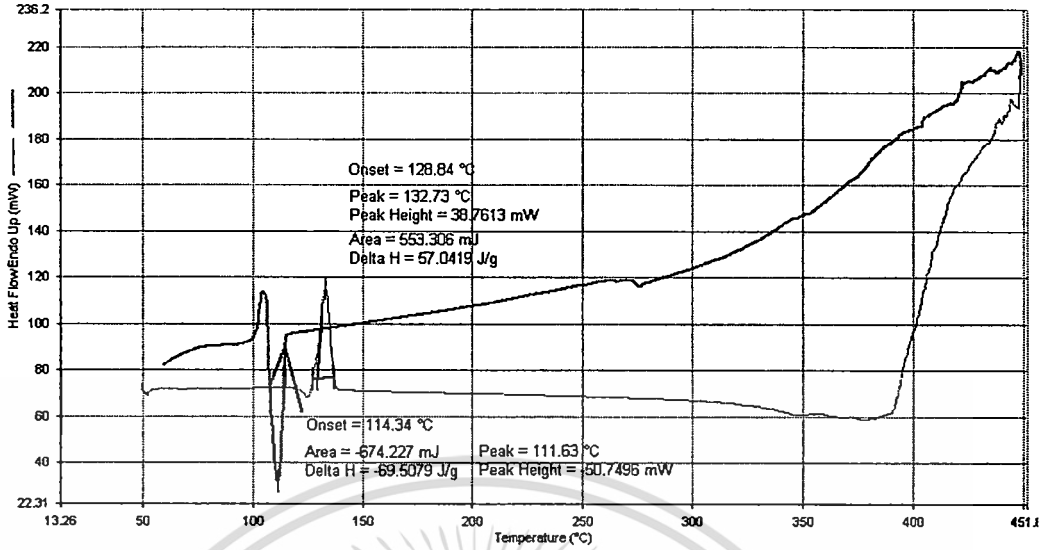
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

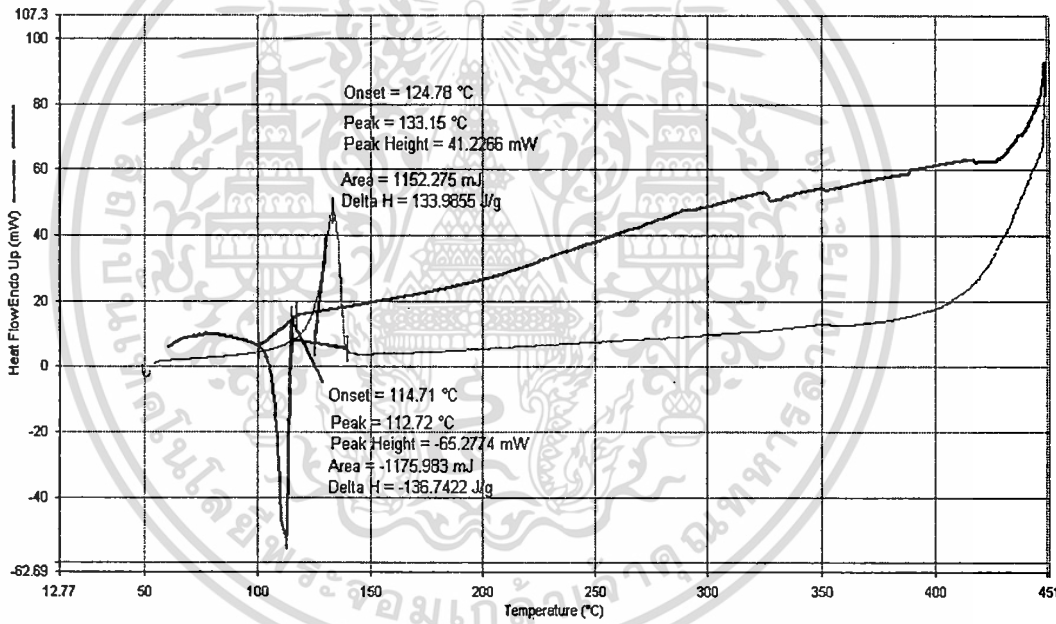
3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

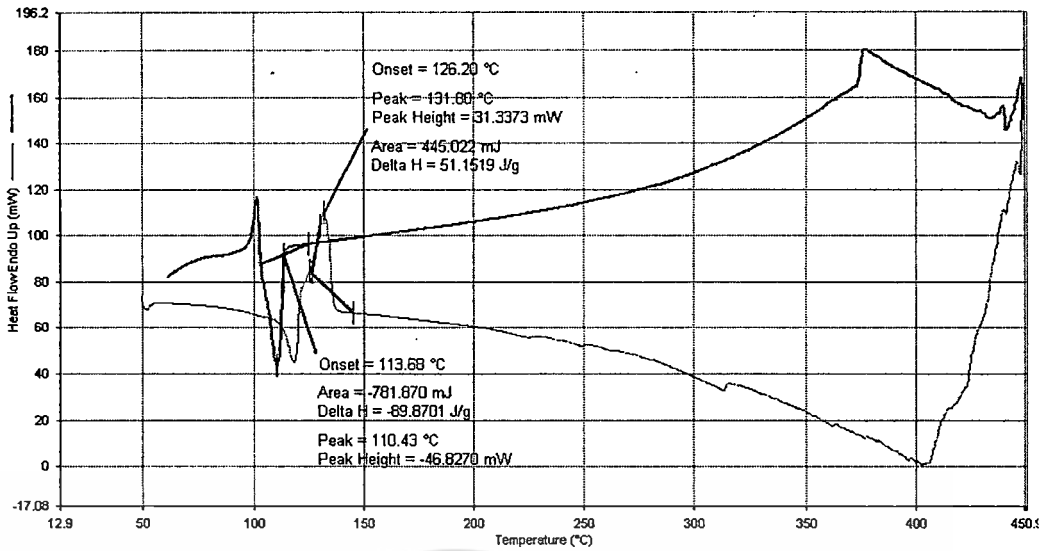
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

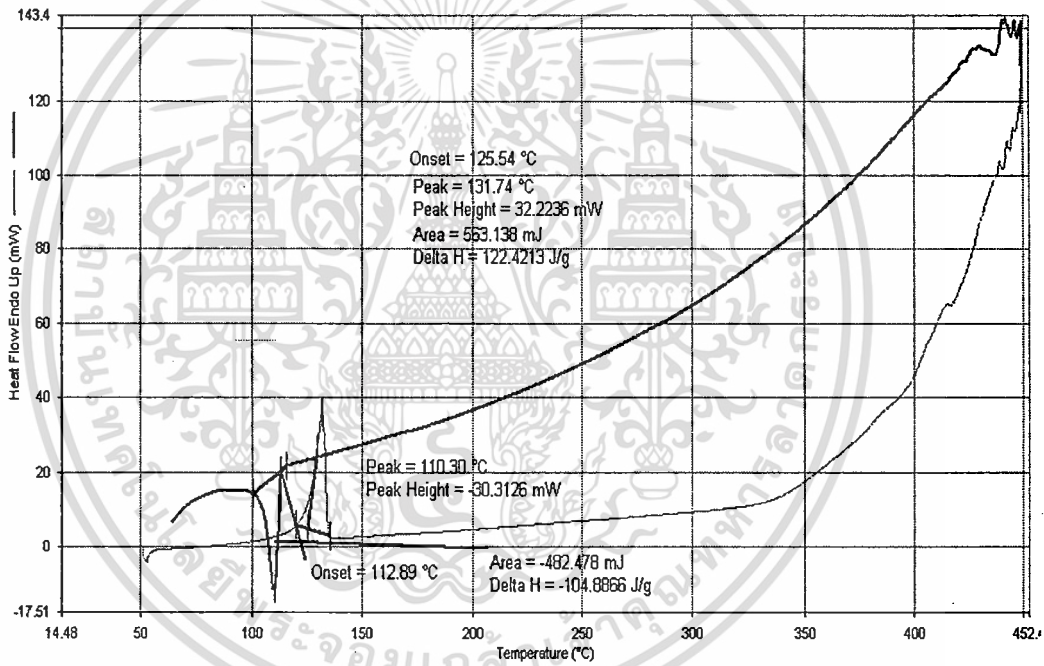




กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

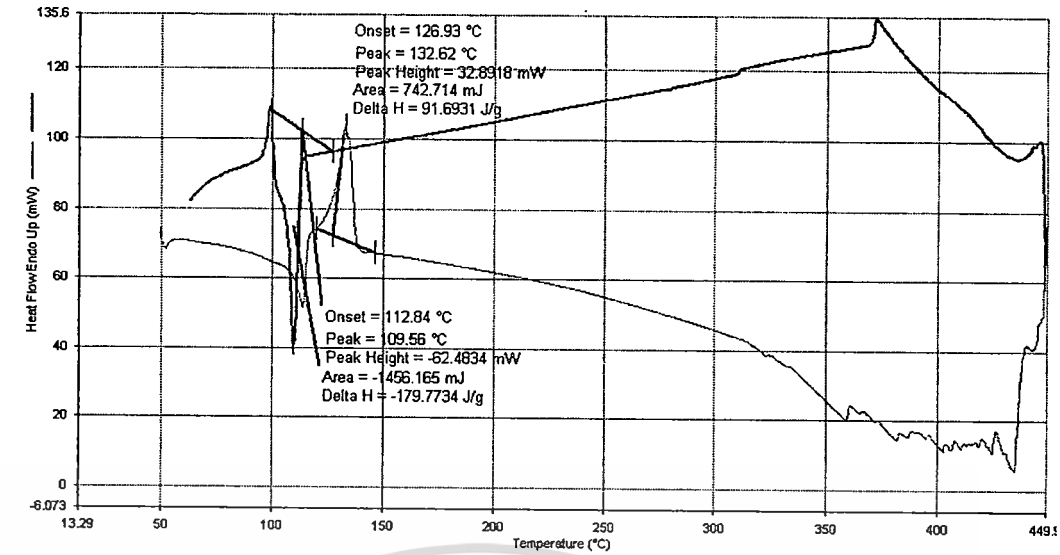
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

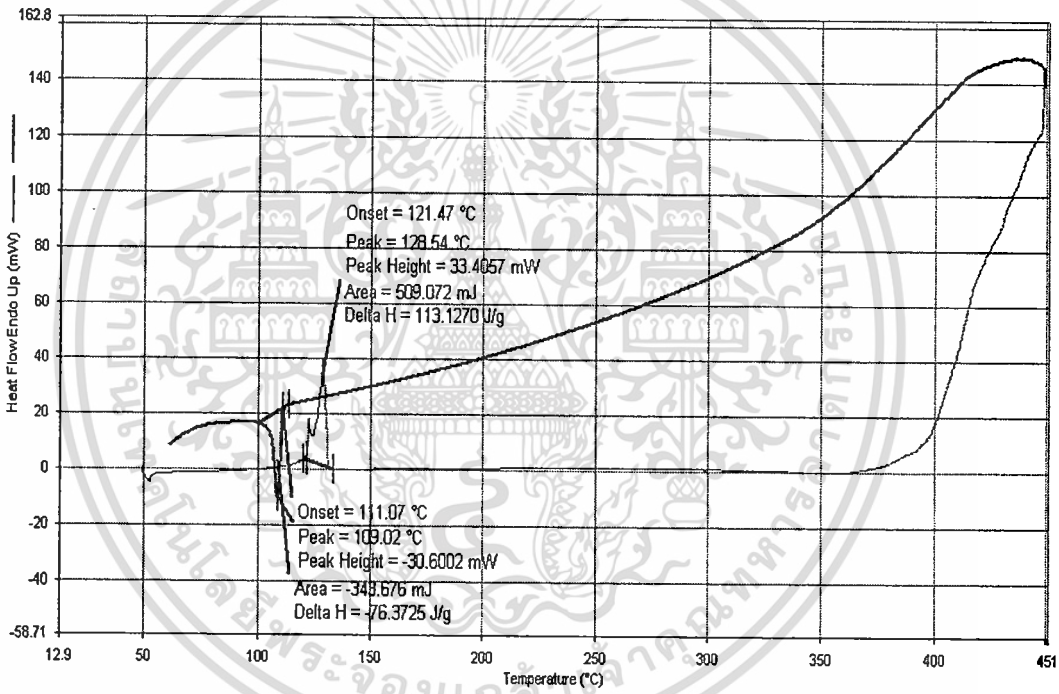




กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

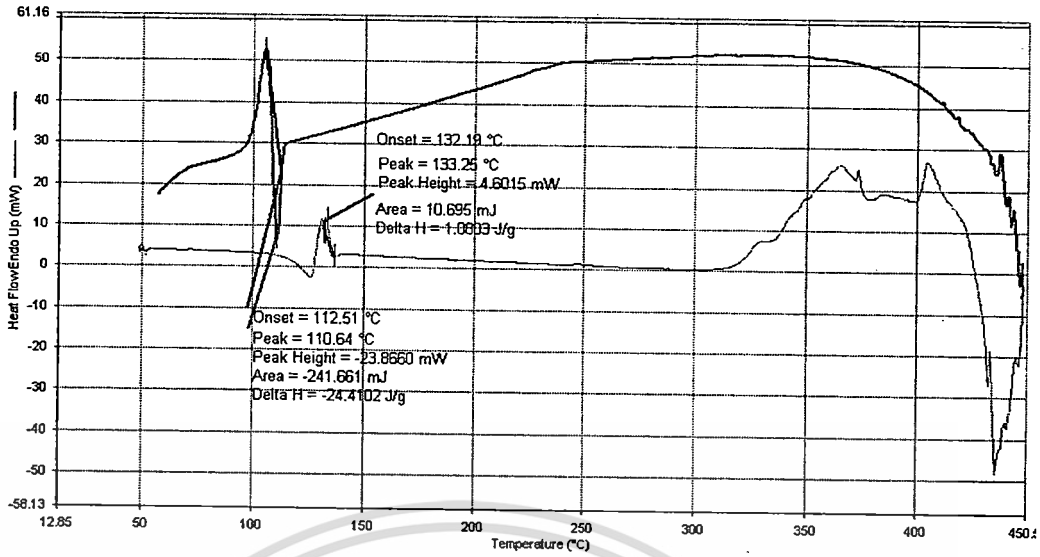
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

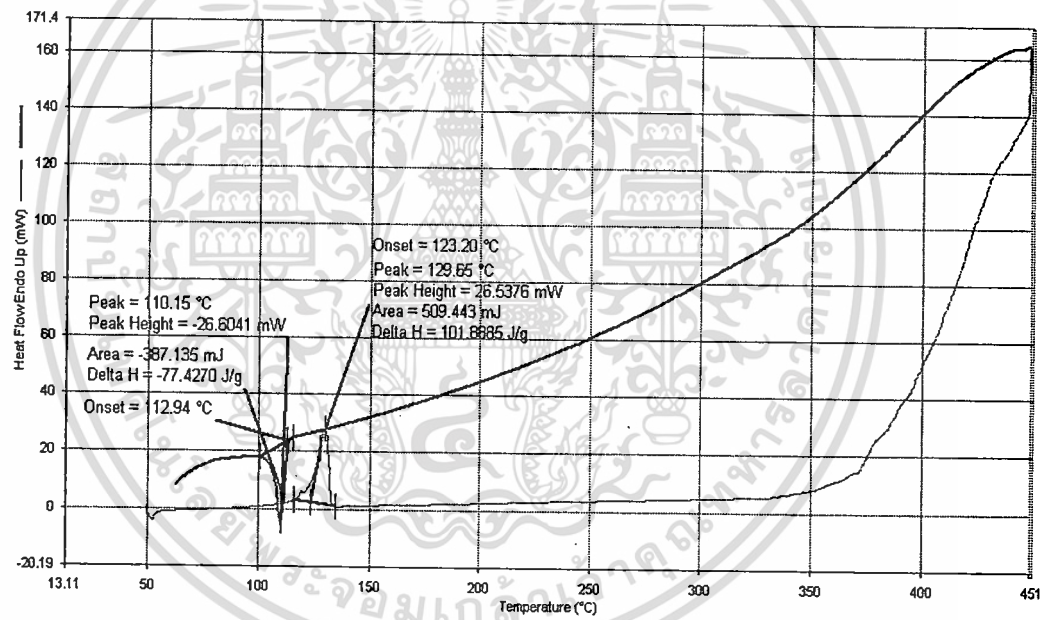




กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 40% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] B. Jaffe, W. R. Cook, Piezoelectric ceramic, R.A.N. Publishers, 1971.
[2] L. E. Cross, Ferroelectrics 151 (1994) 305.
[3] G. H. Haertling, J. Am. Ceram. Soc. 82 (1999) 797-818.
[4] A. P. Ramirez, M. A. Subramanian, M. Gardel, G. Blumberg, D. Li, T. Vogt, S. M. Shapiro, Solid State Communications 115 (2000) 217-220.
[5] M. A. Subramanian, A. W. Sleight, Solid State Sciences 4 (2002) 347-351.
[6] Y. Xu, Ferroelectric Materials and Their Application, Elsevier Science Publishers B.V., 1991.
[7] R. C. Buchanan, Ceramic Materials for Electronics Processing, Properties, and Applications, Marcel Dekker Inc., 1991.
[8] M. A. Subramanian, D. Li, N. Duan, B. A. Reisner, A. W. Sleight, Journal of Solid State Chemistry 151 (2000) 323-325.
[9] M. A. Subramanian, W. J. Marshall, T. G. Calvarese, A. W. Sleight, Journal of Physics and Chemistry of Solids 64 (2003) 1569-1571.
[10] J. Belsick, Y. Yamashita, M. Harata, Ceramic/ceramic composite for multilayer capacitor application, in: Applications of Ferroelectrics, 1990., IEEE 7th International Symposium on, Urbana-Champaign, IL 1990, pp. 44-47.
[11] J. C. William D., Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, 2007.
[12] M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon, Materials: Engineering, Science, Processing and Design Butterworth-Heinemann, 2007.
[13] T. R. Shrout, L. J. Bowen, W. A. Schulze, Materials Research Bulletin 15 (1980) 1371-1379.
[14] A. M. Varaprasad, R. Krishnan, Sensors and Actuators 14 (1988) 361-368.
[15] R. Sekar, A. K. Tripathi, P. K. C. Pillai, Materials Science and Engineering B 5 (1989) 33-36.
[16] A. K. Tripathi, R. Sekar, P. K. C. Pillai, Materials Letters 9 (1989) 24-28.
[17] S. U. Adikary, H. L. W. Chan, C. L. Choy, B. Sundaravel, I. H. Wilson, Composites Science and Technology 62 (2002) 2161-2167.
[18] W. Sun, B. Lu, Materials Science and Engineering: B In Press, Corrected Proof.
[19] K.-h. Lam, X. Wang, H. L.-w. Chan, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 36 (2005) 1595-1599.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้