

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ที่มีต่อวัสดุประกอบพอลิเมอร์
สำหรับการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง



T107844



นางสาวศิริวรรณ

ชมดี

นางสาวอติทยา

นิลจุ

รฟ.
๑๔๘๖๗
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107844
วัน,เดือน,ปี 14 พ.ค. 2553

b. 12211618
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**The effect of Calcium Copper Titanate (CCTO) to Polymer Composite
for using as Ultracapacitor**



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for

The Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang




Academic Year 2007


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ที่มีต่อวัสดุประกอบ
พอลิเมอร์สำหรับการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง

นักศึกษา 1. นางสาวศิริวรรณ ชมดี
2. นางสาวอติชยา นิลจู
ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2550
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. นราธิป วิทยากร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร. สามารถ คงทวีเลิศ	
กรรมการ ดร. ภิญญะ รุ่งโรจน์ชัยพร	
กรรมการ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย	


(ผศ.ดร. ชลชอ จารุสุทธิรักษ์)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ที่มีต่อวัสดุประกอบ
พอลิเมอร์สำหรับการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง**

นักศึกษา	1. นางสาวศิริวรรณ ชมดี 2. นางสาวอติตยา นิลจุ
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. นราธิป วิทยากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างเซรามิก กับพอลิเมอร์ ให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้น มีน้ำหนักเบา และช่วยลดความแข็งเปราะของเซรามิกลง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง โดยนำผงเซรามิกส์ (CCTO) ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดชนิดอัดแรง (compression molding) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด

พบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาค CCTO ได้จากเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction) เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบกับ HDPE สามารถขึ้นรูปได้ที่สัดส่วนของ CCTO มากที่สุดถึง 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของ CCTO สูงขึ้น จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของวัสดุประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอนุภาค CCTO กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีรูปแบบการเชื่อมต่อกันของวัสดุประกอบเป็นแบบ 0-3 เนื่องจากอนุภาคของ CCTO ถูกล้อมรอบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของวัสดุประกอบแต่ละอัตราส่วนมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากค่า T_m และ T_c ที่ตรวจวัดได้เป็นค่าของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ตรวจสอบยังไม่มีผลต่อการสลายตัวของอนุภาค CCTO และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของวัสดุประกอบแต่ละอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วน CCTO เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเพอร์โคเลชัน (percolation)

Special Project Title	The effect of Calcium Copper Titanate (CCTO) to Polymer Composite for using as Ultracapacitor
Name	Miss Siriwan Chomdee Miss Atitaya Ninju
Program	Chemistry
Academic Year	2007
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongkolchai
Special Project Co- Advisor	Dr. Narathip Witthayakorn

Abstract

The project aims to study the preparation of ceramics and polymer composite in order to make the higher and lighter dielectric constant and also reduce brittleness of the ceramics. The ultracapacitor application is prepared by mixing CCTO with HDPE by compression molding process. The composite specimens were tested physical, thermal and electrical properties to investigate the proper compositions.

The results were shown that CCTO could be synthesized by solid state reaction. Compression molding was able to be shaped CCTO and HDPE with the highest CCTO composition of 84.5 % by weight. The density of the composites was higher when the CCTO composite was greater. The morphology study of the composites indicated that the dispersion within polymer matrix was 0-3 composites. The melting point (T_m) and crystalline point (T_c) of the each composition of polymer matrix remained constant because the testing temperature was not enough to decomposition temperature of CCTO composites. Dielectric constant of each composition was also higher when CCTO composition was greater. This is corresponding to percolation theory.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชาโครงการพิเศษ ในหัวข้อเรื่อง ผลของ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตที่มีต่อวัสดุประกอบพอลิเมอร์สำหรับการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ พลังงานสูงดังต่อไปนี้

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ดร. นราธิป วิทยากร และ ดร. สามารถ คงทวีเลิศ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวกับการทดลอง ข้อเสนอแนะ การตอบ ข้อซักถามของผู้จัดทำ และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในการทำการทดลอง จนกระทั่ง โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการเบิกเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณนักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง และ สอนการใช้เครื่องมือต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณแม่บ้าน และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเรื่อง การเปิดและปิดห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และช่วยกันคิดแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง ทำให้การทำโครงการพิเศษนี้เป็นไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้จัดทำที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนกำลังใจในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้คงจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้ หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้ หากมี ข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ศิริวรรณ ชมดี

อหิตยา นิลจุ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง-จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ-ช
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ตัวเก็บประจุ (capacitor)	3
2.2 เซรามิก (ceramic)	6
2.3 พอลิเมอร์ (polymer)	10
2.4 วัสดุประกอบ (composites)	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	23
3.3 วิธีการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง	
4.1 ผลการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่าง แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) กับพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยการอัดชนิดอัดแรง (compression molding)	30
4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่าง แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	31
4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่าง แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	33
4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูง (HDPE)	38
4.6 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่าง แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูง (HDPE)	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	43
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	44
5.3 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47

สารบัญญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุอย่างง่าย	3
รูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุพลังงานสูง	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุพลังงานสูง	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์โรฟสไกต์ (perovskite) ของ CCTO	9
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าพลังงานสูญเสีย (dielectric loss) ของ CCTO กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความถี่ 1 kHz.	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	11
รูปที่ 2.7 รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุประกอบ 2 ชนิด	16
รูปที่ 2.8 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต	18
รูปที่ 2.9 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก	18
รูปที่ 4.1 ลักษณะของแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)	29
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO)	29
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO)	30
รูปที่ 4.4 ลักษณะชั้นงานวัสดุประกอบของแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สัดส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้จากวิธีการอัดรีดชนิดอัดแรง	31
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เติม CCTO ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	33
รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE บริสุทธิ์	34
รูปที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 40% CCTO โดยน้ำหนัก	34
รูปที่ 4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 50% CCTO โดยน้ำหนัก	35
รูปที่ 4.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 60% CCTO โดยน้ำหนัก	35
รูปที่ 4.10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 70% CCTO โดยน้ำหนัก	36
รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 80% CCTO โดยน้ำหนัก	36
รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 84.50% CCTO โดยน้ำหนัก	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.13 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของวัสดุประกอบ เมื่อมีการเติม
ผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 40 50 60 70 และ
80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 38
- รูปที่ 4.14 ค่าอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของวัสดุประกอบ เมื่อมีการเติม
ผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 40 50 60 70 และ
80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 39
- รูปที่ 4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานวัสดุประกอบที่เติม CCTO
ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 41
- รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ กับ เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบ
ของวัสดุประกอบตามทฤษฎีเพอร์โคเลชัน (percolation) 42



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบข้อดี- ข้อเสียของพอลิเอทิลีน	11
ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	15
ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารชนิดต่างๆ (dielectric constant)	19
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ CCTO และ HDPE	20
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบ ที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ในสัดส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	32
ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของชิ้นงานวัสดุประกอบแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	38
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ของวัสดุประกอบ ที่อัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

จากอดีตถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบันคือ แบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่มีข้อจำกัด คือ ใช้เวลานานในการชาร์จ มีความจุไฟฟ้าต่ำ ขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และมีอายุการใช้งานไม่เกิน 2-3 ปี ด้วยเหตุนี้จึงหันมาให้ความสนใจตัวเก็บประจุมากขึ้น เนื่องจากมีความจุไฟฟ้าสูง น้ำหนักเบา ใช้เวลาในการชาร์จเร็วกว่าแบตเตอรี่หลายเท่าตัว และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า แต่ตัวเก็บประจุยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของแหล่งจ่ายไฟที่เหมาะสมได้ เนื่องจากมีกำลังต่ำ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตัวเก็บประจุที่มีพลังงานสูง ซึ่งค่าความหนาแน่นของพลังงานกักเก็บของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (E) ซึ่งค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่เฉพาะวัสดุ โดยถ้าตัวแปรทั้งสองมีค่าสูง จะทำให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานกักเก็บสูงตามไปด้วย แต่เนื่องจากไม่มีวัสดุใดที่มีทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริกสูง จากเหตุผลดังกล่าวจึงนำเซรามิกแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CCTO) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการเก็บประจุสูง และมีช่วงอุณหภูมิในการใช้งานกว้าง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งมีค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก และความยืดหยุ่นสูง มาทำเป็นวัสดุประกอบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง นอกจากนี้วัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ยังช่วยลดความแข็งเปราะของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ซึ่งเป็นปัญหาพื้นฐานของเซรามิกทั่วไปอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)
2. 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. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมอุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับการทดลอง
3. ดำเนินการทดลองดังนี้
 - ทำการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)
 - ทำการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยการอัดชนิดอัดแรง (compression molding) ในอัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 - นำวัสดุประกอบที่เตรียมได้ไปสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า
4. สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

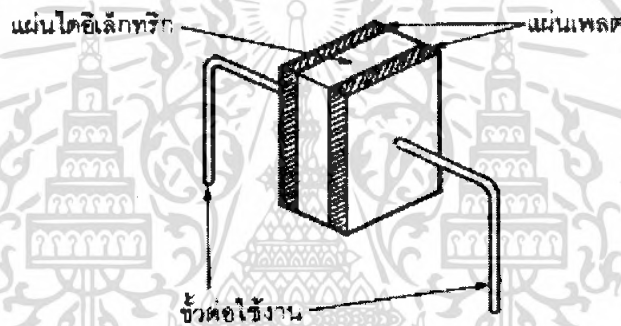
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ตัวเก็บประจุ (capacitor) [1]

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับตัวเก็บประจุ

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



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุอย่างง่าย [1]

2.2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

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

เท่ากับอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุเก็บได้ (Q) ต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) นั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

กรณีช่องว่างระหว่างแผ่น โลหะเป็นสุญญากาศ

$$C = Q/V = \epsilon_0 A/d \quad (2.1)$$

เมื่อ

C : ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็นฟารัด

V : ค่าความต่างศักย์ มีหน่วยเป็น โวลต์

Q : ประจุ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

A : พื้นที่ของเพลทโลหะ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

d : ค่าความห่างระหว่างเพลทโลหะทั้งสอง มีหน่วยเป็นเมตร

ϵ_0 : ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของฉนวนที่อยู่ระหว่างเพลททั้งสอง ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m)

กรณีช่องว่างระหว่างแผ่น โลหะถูกใส่ด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d \quad (2.2)$$

เมื่อ

ϵ_r : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

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

1. พื้นที่แผ่นเพลทที่วางขนานกัน ตัวเก็บประจุที่มีพื้นที่แผ่นเพลทมากก็ยิ่งมีความจุมาก
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท ยิ่งมีความห่างของแผ่นเพลทมากขึ้นค่าความจุก็จะลดลง
3. ชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่น ไดอิเล็กทริก ค่าความจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่น ไดอิเล็กทริก

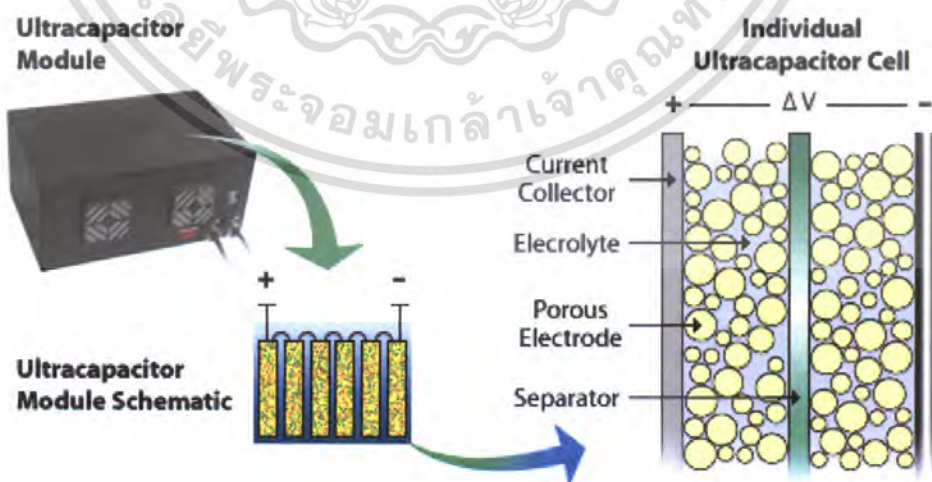
2.2.3 ตัวเก็บประจุพลังงานสูง (ultra capacitor) [2]

ตัวเก็บประจุพลังงานสูง คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมี (electrochemical capacitor) ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุธรรมดาทั่วไป ตัวเก็บประจุพลังงานสูงได้ถูกนำไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า และเป็นอุปกรณ์เสริมสำหรับแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุพลังงานสูง [2]

ตัวเก็บประจุพลังงานสูงเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ มีอิเล็กโทรด 2 อัน จุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง อิเล็กโทรดทำจากวัสดุที่มีรูพรุนขนาดนาโนเมตร พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดที่ใช้ในตัวเก็บประจุพลังงานสูง จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในแบตเตอรี่ 500-2000 m^2/g ประจุจะถูกเก็บในรูพรุนซึ่งอยู่ใกล้กับรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรด กับอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุพลังงานสูง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของตัวเก็บประจุพลังงานสูง คือ มีอัตราการเก็บประจุและการคายประจุสูง เกิดการเสียดสภาพเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน 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) ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้เซรามิกบางชนิดมีสมบัติพิเศษสามารถเปลี่ยนสัญญาณแรงดันทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแรงดันทางกลได้เช่นกัน

วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนในงานอุตสาหกรรมทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในเซรามิกเป็นพันธะแบบไอออนิก และโควาเลนต์ที่แข็งแรง ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอน และไอออนถูกจำกัดในการเคลื่อนที่ เป็นผลทำให้วัสดุเซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี และมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรง แต่ค่อนข้างเปราะ

2.2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยูสเซอร์ไปใช้ประโยชน์ตามการกำหนดไว้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานโดยทั่วไปเซรามิกที่มีสภาพยอมปานกลางมักจะมีค่า ϵ_r อยู่ในช่วง 50-100 ในการประยุกต์ใช้ของเซรามิกกลุ่มนี้โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ประเภทการใช้งานหลัก คือ

- ตัวเก็บประจุส่งกำลังสูงสำหรับช่วงความถี่ 0.5-50 MHz ซึ่งต้องการสภาพการสูญเสียที่ต่ำ และสัมประสิทธิ์ของสภาพยอมที่เป็นลบสามารถยอมรับได้เนื่องจากมีส่วนช่วยในการจำกัดกำลังที่ส่งผ่านถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น
- ตัวเก็บประจุเสถียรสำหรับการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปซึ่งต้องการให้ตัวเก็บประจุมีเสถียรภาพดีกว่า $\pm 1\%$ ในช่วงอุณหภูมิและความต่างศักย์ใช้งาน โดยมีช่วงความถี่การใช้งานในช่วง 1 kHz ถึง 100 MHz
- โพรงสั้นพ้องไมโครเวฟ (microwave resonant cavities) ซึ่งใช้งานในช่วงความถี่ 0.5-50 GHz ต้องการเสถียรภาพที่ดีกว่า $\pm 0.05\%$ ในช่วงอุณหภูมิการใช้งาน และมีตัวแปรการสูญเสียที่ดีกว่า 2×10^{-4}

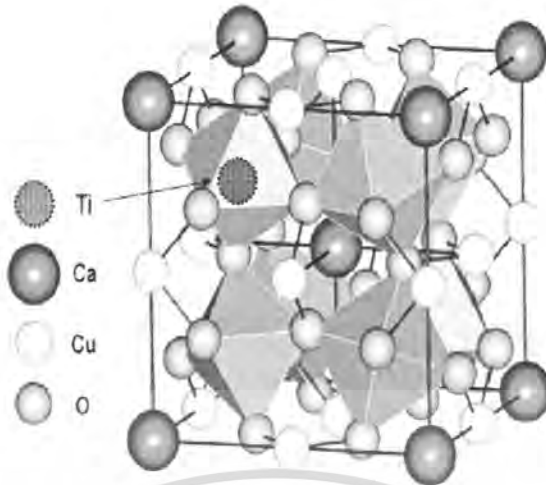
จะเห็นว่าข้อจำกัดจะเข้มงวดมากขึ้นจากประเภทที่ 1 ไปยังประเภทที่ 3 ซึ่งทำให้วัสดุประเภทที่ 3 สามารถใช้งานประเภทที่ 1 และ 2 ได้ แต่จะมีราคาสูงเกินความจำเป็น

3. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมสูง

วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 1000 นั้น ส่วนมากจะเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า และความถี่มากกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมต่ำกว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมีสมบัติที่พิเศษมากมายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในมุมมองการนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก

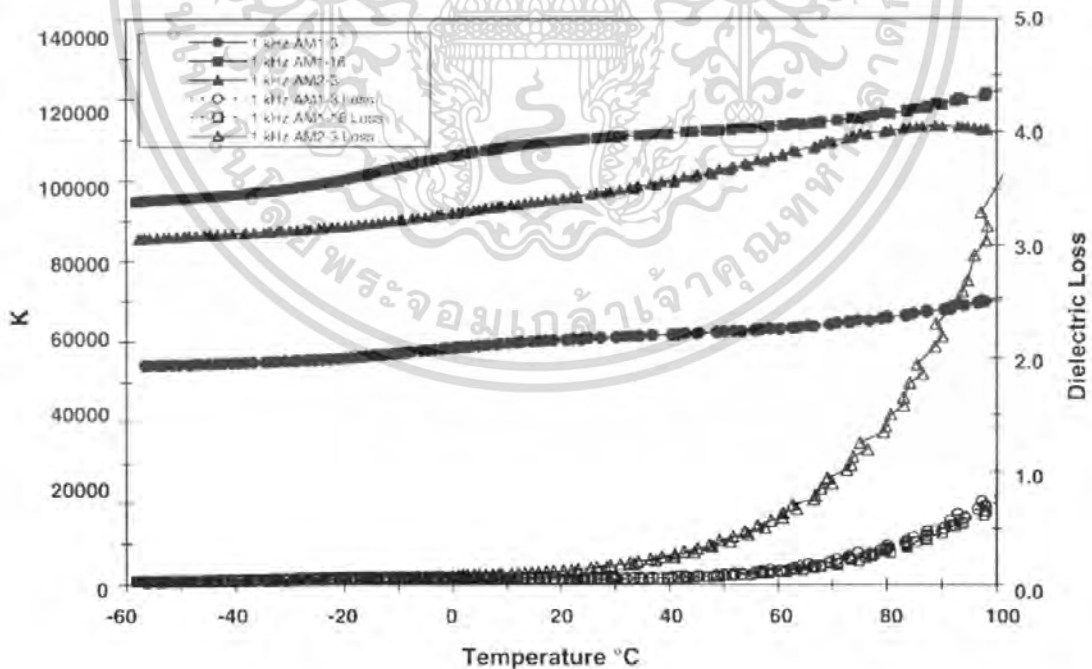
2.2.2.1 แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CCTO)

แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) เป็นเซรามิกซึ่งถูกค้นพบในปี 2002 พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ_r) มากที่สุดถึงประมาณ 80000 สำหรับผลึกเดี่ยวสำหรับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อมีค่าสูงขึ้นไปจะสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นและสามารถออกแบบแผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลงได้ จะเห็นได้ว่า CCTO มีสมบัติทางไดอิเล็กทริกดีกว่าเซรามิกชนิดอื่นมาก CCTO มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มหาศาลเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และยังครอบคลุมช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง (- 173 ถึง 327 °C) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ ใช้งานได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม CCTO แสดงให้เห็นสมบัติบางอย่างที่ยังไม่สามารถอธิบายให้เข้าใจได้พฤติกรรมดังกล่าวได้แก่ ขอบเกรน (grain boundary) การมีอยู่ของขอบทวิน (twin boundaries) จุดบกพร่องบนระนาบ (planar) การเข้าแทนที่ของไทเทเนียมไอออน และยังคงค้นหาอธิบายถึงพฤติกรรมดังกล่าวอยู่



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 อะตอมจะอยู่ที่กึ่งกลางและตรงมุมของยูนิตเซลล์



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และค่าพลังงาน

สูญเสีย (dielectric loss) ของ CCTO กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความถี่ 1 kHz. [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.5 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ CCTO เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่วงกว้างของอุณหภูมิการใช้งาน ด้วยเหตุนี้หากนำ CCTO ไปทำตัวเก็บประจุจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุให้ดียิ่งขึ้น

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

2.3 พอลิเมอร์ (polymer) [8]

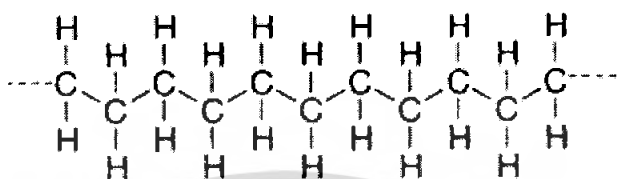
พอลิเมอร์ (polymer) หมายถึงสารที่ประกอบด้วย โมเลกุลขนาดใหญ่ และยาว มีน้ำหนักมาก (อาจมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหมื่น หรืออาจสูงถึงหลายล้าน) ซึ่งประกอบจากกลุ่มของอะตอมหรือ โมเลกุลเล็กๆที่เรียกว่า เมอร์ (mer) ที่ซ้ำๆกัน โดยเรียกว่า หน่วยซ้ำ (repeating unit) หน่วยซ้ำนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (primary bonds) ได้แก่พันธะโควาเลนต์ พอลิเมอร์เป็น โมเลกุลอิสระ ซึ่งหากต้องการลดขนาดของโมเลกุลลงต้องทำลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างหน่วยซ้ำ

พลาสติก (plastics) เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มี โมเลกุลหลักประกอบไปด้วยหน่วยอินทรีย์เคมี (organic chemical unit) กันหลายๆ หน่วย ซึ่งพลาสติกสามารถนำไปขึ้นรูปได้โดยการปั้น (mold) และการตัดขึ้นรูป (forming) โดยใช้ความร้อน ความดัน หรือใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน พลาสติกส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นสารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติแต่เกิดจากมอนอเมอร์ (monomer) ทำปฏิกิริยากันเป็นพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ของพลาสติกประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเป็นธาตุหลัก จับตัวกับธาตุอื่นๆ การรวมตัวของอะตอมจะก่อให้เกิดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น และมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน การรวมตัวกันจะขึ้นอยู่กับพลังงานเกาะตัว (energy bonds) และจะพยายามทำให้อะตอมในโมเลกุลมีเสถียรภาพโดยการให้พลังงานเกาะตัวจนหมด เช่น $H - F$ จะเป็น โมเลกุลที่มีเสถียรภาพสูงกว่า $C - H$

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

2.3.1 พอลิเอทิลีน (PE)

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติกซึ่งสามารถหลอมแล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน และไฮโดรเจน มอนอเมอร์ของเอทิลีน ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) มีน้ำหนักโมเลกุล 28 พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization) ได้พอลิเอทิลีนเป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [7]

พอลิเอทิลีน (PE) ผลิตขึ้นเพื่อการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 ที่ประเทศอังกฤษ มีน้ำหนักเบามากในรูปที่เป็นแผ่นบางๆ สามารถที่จะงอหรือพับได้ ถ้าจะขึ้นรูปต่างๆต้องทำให้หนาพอสมควร ฝึกขาดได้ยาก 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. แดกหัก ยากที่จะเชื่อมต่อ
4. ทนสารเคมี	4. ติดไฟได้
5. ใช้บรรจุอาหารได้ดี	
6. ขึ้นรูปใช้งานได้โดยกระบวนการทางเทอร์โมพลาสติกต่างๆไป	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 $0.94 - 0.965 \text{ g/cm}^3$ มีจุดหลอมตัว 135°C มีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำ มีความแข็ง จุดอ่อนตัว และความต้านทานแรงดึงสูง แต่มีความทนทานต่อแรงกระแทก ความยาว ๗ 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 $30-40^\circ\text{C}$

2.3.1.4.2 การสลายตัว (degradation)

HDPE ก่อนข้างคงตัวเมื่อให้ความร้อน แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงในก๊าซที่มีความเค็ยปานกลางหรือในสุญญากาศจะเกิดการแตก และเชื่อมระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยปฏิกิริยานี้จะเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 290-300 °C

2.3.1.4.3 การไหลของ HDPE ที่หลอมเหลว

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

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

2.3.1.5 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญในการหาสมบัติของ HDPE จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.940-0.965 g/cm³ พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้สมบัติดังต่อไปนี้ คือ ความแข็งแรงดึง (tensile strength) การคงรูปหรือความแข็งเกร็ง (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

2.3.1.7 การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบหรือกว้าง ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้าการกระจายตัวกว้างจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น เพราะส่วนที่เป็น โมเลกุลเล็กๆ จะเข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันจะทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้น และแบบยาวอยู่ด้วยกัน เวลาขึ้นงาน ได้รับความเย็นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง และความต้านทานต่อแรงเค้นของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปลำบากมาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมากมาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน

2.3.1.8 สารเติมแต่ง

พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเคมี หรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติก (plastic modifier) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เติมสารเสถียรภาพเพื่อเพิ่มความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต เติมสารเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต เติมสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสัน และอื่นๆ เป็นต้น

2.3.1.9 การประยุกต์ใช้งาน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ถูกนำมาแปรรูปให้ได้รูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ใช้งานภาชนะ 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

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
มอดูลัสการโค้งงอ (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 โดยวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาประกอบจะแสดงสมบัติที่สำคัญของตัวเอง ส่งผลให้วัสดุประกอบมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น วัสดุประกอบประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรก เรียกว่า ภูมิภาคต่อเนื่อง (matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่อง และล้อมรอบเฟสที่สองไว้ เฟสที่สอง จะถูกเรียกว่า ภูมิภาคกระจาย (dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง วัสดุประกอบจัดว่าเป็นวัสดุที่สำคัญมาก ในปัจจุบันเป็นที่นิยม และมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวัสดุประกอบมีข้อดีหลายประการดังนี้ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น มีความเหนียว มีค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ลดต้นทุนการผลิต และสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ เซรามิก เป็นต้น

สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบขึ้นกับปริมาณสารตัวเติม รูปร่างของวัสดุ และพื้นที่ผิวสัมผัส การจัดเรียงของภูมิภาคที่เป็นแอนไอโซโทรปิก (anisotropic phase) ให้อยู่ในทิศทางที่เหมาะสมและแน่นอนนั้นเป็นสิ่งสำคัญ และวัสดุที่มีความเป็นแอนไอโซโทรปิกมากจะยิ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุประกอบมากด้วย สารเสริมแรงประเภทเส้นใย และเป็นเกร็ดจะส่งผลกระทบต่อวัสดุประกอบมากกว่าสารเสริมแรงที่เป็นวงกลม กล่าวคือทรงกลมจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปร่างของช่องว่างภายในวัสดุประกอบที่สามารถลดการผ่านแรงในการเคลื่อนไหวที่

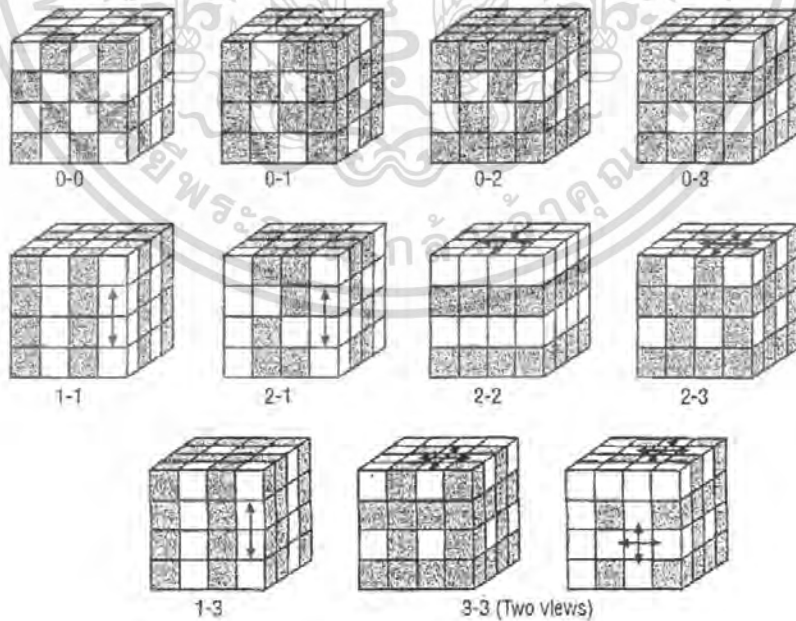
ส่งผ่าน ไปยังอนุภาคที่เป็นแอนไอโซทรอปิกได้ และมักมีการใช้ลักษณะรูปร่าง และการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของส่วนเสริมแรง เพื่อแบ่งประเภทของวัสดุประกอบ

สมบัติของวัสดุประกอบขึ้นกับ

- คุณสมบัติของวิภาคกระจายตัว และสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์
- ปริมาณของวิภาคกระจายตัว
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของวิภาคกระจายตัว
- ช่องว่าง (voids) หรือตำหนิ (flaws) ในชิ้นงานวัสดุประกอบ
- การยึดเกาะระหว่างวิภาคกระจายตัว และพอลิเมอร์เมทริกซ์
- กระบวนการผลิต
- ขนาดและรูปร่างของวิภาคกระจายตัว

2.4.1 วัสดุประกอบแบบ 0-3

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



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุประกอบ 2 ชนิด [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 พอลิเมอร์เมทริกซ์

เมทริกซ์เป็นส่วนที่ช่วยหล่อหุ้ม และยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งโดยทั่วไปเมทริกซ์มักจะมีคุณสมบัติความเหนียวสูง ความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง

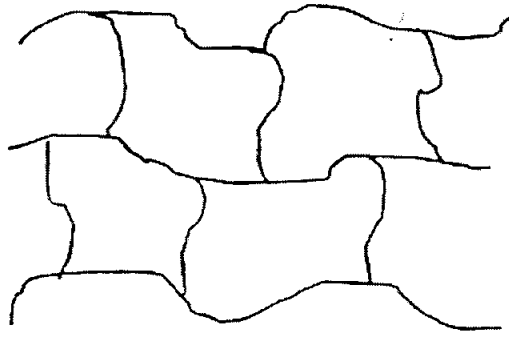
หน้าที่ของเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่

1. รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุประกอบ
2. รักษาการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายตัว และแยกไม่ให้อั้วภาคกระจายตัวมารวมกัน
3. ให้อั้วภาคประกอบสามารถทนต่อการเสียดสีภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่งๆ
4. สามารถกระจาย หรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังวัฏภาคกระจายตัว
5. ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

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

1. เทอร์โมเซต (thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลายคือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแหแต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อน หรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทนไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆจะไหม้เกรียม และมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

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



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 และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็就会有การจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมทริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองค์ประกอบเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับสภาวะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.9 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก [11]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพอลิเมอร์ เมทริกซ์ผสมกับเซรามิกคือ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ซึ่งเป็นวัสดุกระจายตัว เพื่อทำเป็นวัสดุประกอบซึ่งจัดอยู่ในประเภทคอมโพสิตแบบอนุภาค สำหรับ HDPE นั้นมีค่าสภาพยอม-สัมพัทธ์ต่ำ (มีความสามารถในการเก็บประจุต่ำ) ดังตารางที่ 2.3 โดยทำการปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำของพอลิเอทิลีนให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ดีขึ้น และทำการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของเซรามิกให้มีความยืดหยุ่นดีขึ้นทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง มีค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง 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
พอร์ซเลนค์	6
ไมกา	7
แบเรียมติทานเนต (BaTiO ₃)	1500 - 20000

สำหรับประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุพลังงานสูงนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการความหนาแน่นของพลังงานที่กักเก็บ (U) ดังสมการที่ 2.3

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (2.3)$$

จากสมการจะเห็นว่า มีตัวแปร 2 ตัวที่มีความสำคัญมาก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ_r) และค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength, E) ซึ่งถ้าสามารถหาวัสดุที่มีค่าความสามารถในการเก็บประจุ (ϵ_r) และค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (E) สูงๆ ได้ ก็จะสามารถนำวัสดุดังกล่าวนี้ไปประยุกต์เป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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
ความแข็งแรง	ต่ำ	สูง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Julie J. Mohamed, Sabar D. Hutagalung, M. Fadzil Ain, Karim Deraman, Zainal A. Ahmad, "Microstructure and dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramic", Materials Letters, 2006 แคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CCTO) เตรียมได้จากเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยทำการนำไปเผา (calcined) ที่อุณหภูมิ 900°C นาน 12 ชั่วโมง และซินเทอร์ (sintered) ที่อุณหภูมิระหว่าง $950-1050^\circ\text{C}$ นาน 3-12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD และโครงสร้างขนาดไมโครเมตรของ CCTO จะสังเกตได้จากการนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM โครงสร้างขนาดไมโครเมตรแสดงให้เห็นลักษณะการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ และรูพรุนขนาดใหญ่ ผลของการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างกันจะมีผลต่อความหนาแน่น รูปแบบเฟส โครงสร้างระดับไมโครเมตร และสมบัติไดอิเล็กทริก จากการทดลองพบว่าการควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาในการซินเทอร์เป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ได้โครงสร้างขนาดไมโครเมตร และสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ต้องการ การซินเทอร์ที่ 1050°C นาน 12 ชั่วโมง CCTO จะเกิดการหลอมเหลวของเกรน และมีเฟสใหม่เกิดขึ้น คือ Cu_2O ส่วนการซินเทอร์นาน 24 ชั่วโมง จะเกิดการหลอมเหลว และมีการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ ตัวอย่างที่ถูกซินเทอร์ที่ 1000 และ 1030°C นาน 12 ชั่วโมง จะมีเกรนที่ชัดเจน และมีโครงสร้างขนาดไมโครเมตรหนาแน่น ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) พบว่าการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1040°C นาน 10 ชั่วโมง จะให้ค่า ϵ_r สูงที่สุดประมาณ 3340

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ถูกสังเคราะห์โดยการใส่พอลิเมอร์ให้แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของเซรามิก 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 $5000 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ซึ่งค่านี้มีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบชนิดอื่นที่เคยมีมา ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากัน ทำให้วัสดุประกอบชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานในด้านอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) วัสดุประกอบ PZT/polymer เตรียมได้โดยการใส่ เรซินไฮโดรคาร์บอนเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของเซรามิก PZT ครอบคลุมในช่วงสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่ 68-87 % เนื่องจากการลดลงของสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกทำให้ความหนาแน่นของเซรามิกรูพรุนและวัสดุประกอบลดลง

Milind Arbatti, Xiaobing Shan, and Z.-Y. Cheng, “New High-Dielectric-Constant Polymer Ceramic Composites”, 2005 งานวิจัยนี้เป็นการทำวัสดุประกอบระหว่างผงเซรามิก กับพอลิเมอร์ โดยใช้เซรามิกตัวใหม่ที่เพิ่งค้นพบซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง คือ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) และใช้พอลิไวนิลอีนไดอีนฟลูออไรด์ไตรฟลูออโรเอทิลีน [P(VDF-TrFE)] 55/44 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง พบว่าความสามารถในการทำให้เปียก (wettability) ระหว่างโคพอลิเมอร์ดังกล่าว และ CCTO ไม่ดีทำให้ชิ้นงานจากการหล่อขึ้นรูปวัสดุประกอบมีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นรูปแบบแซนด์วิช (sandwich) โดยใช้เทคโนโลยีฮอตเพรส (hot-press technology) ซึ่งส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่ากระบวนการอบอ่อน (thermal annealing process) สามารถปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุประกอบได้ด้วยเช่นกัน 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 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 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 ทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงเวลาในการซินเทอร์ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของผลึก (Crystal Phase) ของ CCTO อย่างเห็นได้ชัด ส่วนผลจากการตรวจสอบด้วย SEM พบว่า การเพิ่มเวลาในการซินเทอร์ ทำให้ขนาดของเกรน (grain size) และสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าของ CCTO เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มเวลาในการซินเทอร์ทำให้ขอบเกรน (grain boundary) ลดลง ซึ่งอาจมาจากการเพิ่มเวลาในการซินเทอร์ทำให้เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างมากขึ้น ส่วนคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ CCTO จะร่วงไวด้อยกว่าการมองเห็นได้ชัด 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 จากการศึกษาเป็นการเตรียมวัสดุประกอบ 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

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรด Guarantee 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 Guarantee 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. ลูกบดชนิดเซอร์โคเนีย
17. กระจกทรงสาร
18. แท่งแก้วคนสาร

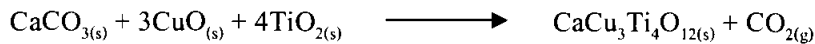
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) โดยเทคนิคปฏิกิริยา

สถานะของแข็ง (solid state reaction)

เตรียมสารละลายของแข็งของ CCTO ตามสมการ



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

$$D = M/V$$

(3.1)

เมื่อ	D	คือ ความหนาแน่น (g/cm ³)
	M	คือ มวล (g)
	V	คือ ปริมาตร (cm ³)

ตอนที่ 2 การขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเป็นวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

- นำผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ผสมกับผงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในอัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- นำส่วนผสมแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ผสมกับผงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) แต่ละอัตราส่วนใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วให้ความร้อนด้วยแท่นให้ความร้อนจนพอลิเมอร์หลอม คนให้เข้ากัน
- นำส่วนผสมทุกอัตราส่วนขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปชนิดอัดแรง (compression molding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุประกอบ

1. การหาความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานนั้นสามารถได้จากการใช้อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรได้โดยตรงในกรณีที่ชิ้นงานนั้นมีรูปร่างที่สม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติชิ้นงานที่เตรียมได้มีมวลไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้นำกฎอาร์คิมิดีสเข้ามาใช้หาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่น้ำโดยอาศัยสมการ

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

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 เพื่อให้ น้ำ แพร่เข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุนนาน 2 ชั่วโมง
3. รอนจนกระทั่งน้ำเย็นลง แล้วนำชิ้นงานไปชั่งในน้ำกลั่น ได้มวลมีค่าเป็น w_0
4. วัดค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นด้วยเทอร์โมมิเตอร์ขณะทำการชั่ง

* ชิ้นงาน 1 ชิ้นจะชั่งน้ำหนักชิ้นงานละ 5 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

2. การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (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. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (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 (C_p) หรือค่าความร้อนกับอุณหภูมิ หรือเวลา

1. การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมชิ้นงานให้มีความเรียบ มีพื้นที่ผิวมาก โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดเล็ก บาง และมีผิวเรียบ ใช้ตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัม
2. นำชิ้นงานที่เตรียมได้วัดสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC อุณหภูมิตั้งแต่ $50^\circ\text{C} - 450^\circ\text{C}$ อัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$

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

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

$$\epsilon_r = \frac{C}{A\epsilon_0} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง

ϵ_r คือ ค่าความสามารถในการกักเก็บประจุของชิ้นงานตัวอย่าง

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าประมาณ 8.854×10^{-15} F/mm

วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) แล้วนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า ในเชิงเปรียบเทียบของวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้สัดส่วนของ CCTO เท่ากับ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงผลการทดลองดังนี้

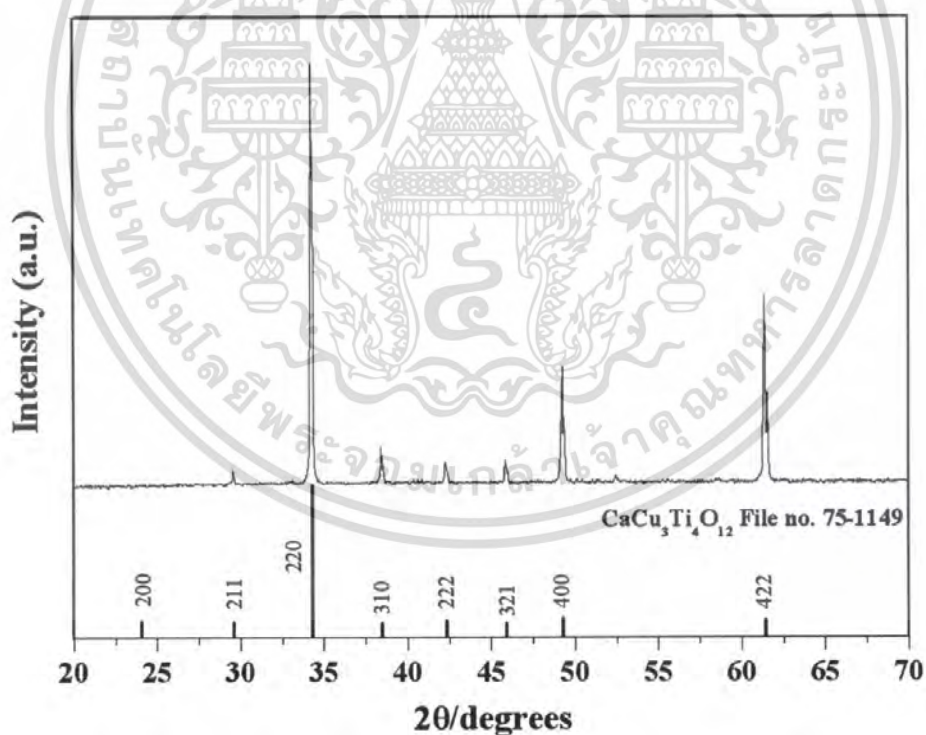
4.1 ผลการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)

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 จากนั้นนำผงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางเอกลักษณะด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลการทดลองดังรูป 4.2 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐาน พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐานหมายเลข 75-1149 ซึ่งระบุว่าสารตัวอย่างเป็นแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) มีสูตรโครงสร้างคือ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 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

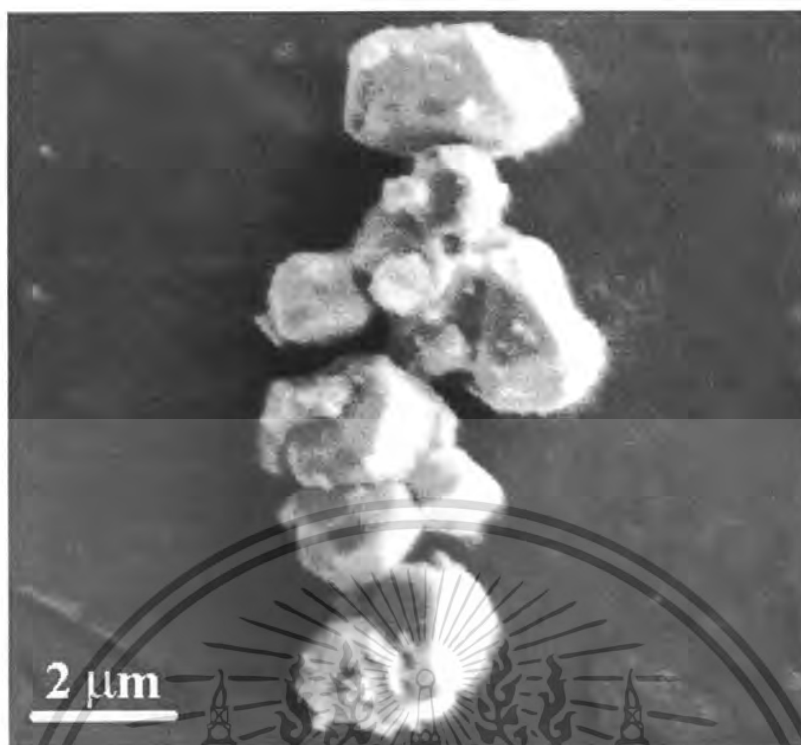


รูปที่ 4.1 ลักษณะของแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

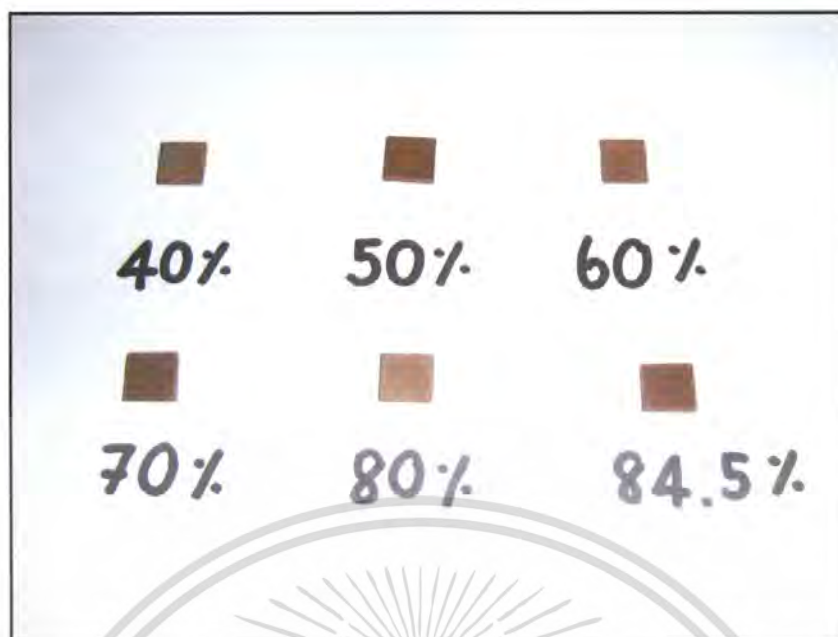


รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) [16]

4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยวิธีการอัดชนิดอัดแรง (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 4.4 โดยความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบจะลดลงเมื่อสัดส่วนของ CCTO เพิ่มมากขึ้น [16] นอกจากนี้วิธีการอัดชนิดอัดแรงยังสามารถเตรียมสัดส่วนของชิ้นงานวัสดุประกอบได้มากกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) ที่สามารถเตรียมสัดส่วนของวัสดุประกอบได้เพียง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [16] โดยวิธีการอัดชนิดอัดแรงนั้นสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีสัดส่วนของ CCTO ได้มากที่สุดถึง 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่สัดส่วน CCTO มากกว่า 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้น มีปริมาณ HDPE น้อยมาก ทำให้ไม่มีพอลิเมอร์เมทริกซ์เพียงพอต่อการห่อหุ้มอนุภาค CCTO ทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ลักษณะชิ้นงานวัสดุประกอบของแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สัดส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่ได้จากวิธีการอัดชนิดอัดแรง

4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

โดยทั่วไปความหนาแน่นของวัสดุประกอบทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการ[17]

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

เมื่อ	x	คือ สัดส่วน โดยปริมาตร
	$D_{\text{Composite}}$	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)

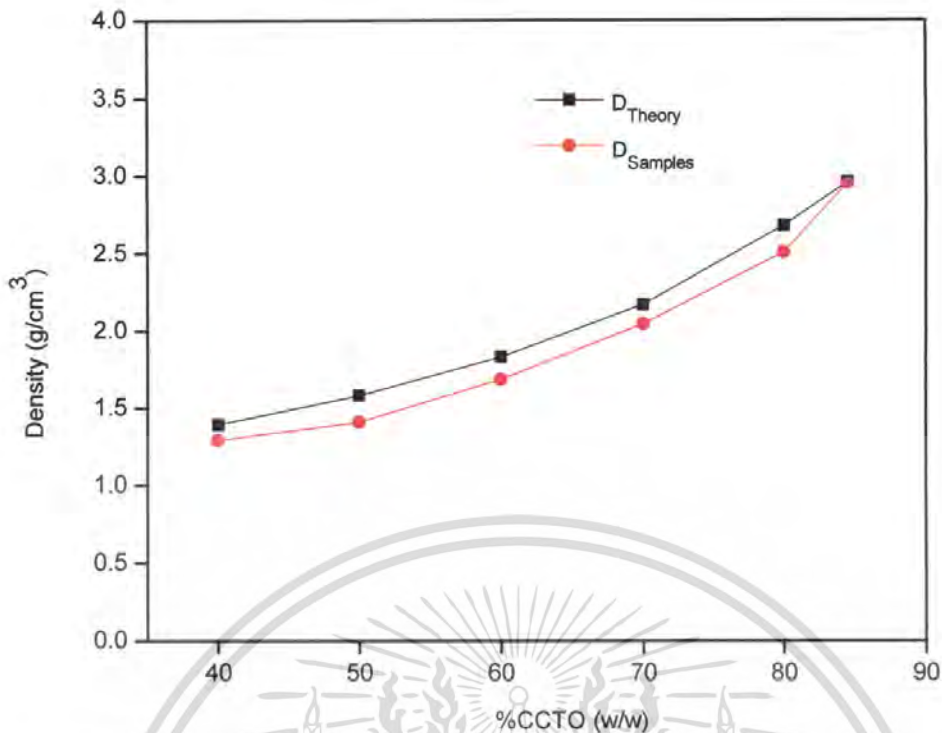
จากรูป 4.5 พบว่า เมื่อปริมาณ CCTO ในวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุประกอบก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค CCTO ที่เติมลงไปมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้มวลของวัสดุไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุประกอบจึงสูงขึ้นด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีซึ่งคำนวณได้จากสมการ 4.1 กับค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เตรียมขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เตรียมขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี เนื่องจากฟองอากาศที่อยู่ภายในชิ้นงานทำให้เกิดช่องว่าง การกระจายตัวของอนุภาค และขนาดอนุภาคของ CCTO และจากค่าความชันของเส้นกราฟความหนาแน่นทางทฤษฎี กับค่าความชันของเส้นกราฟตัวอย่างใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่า กระบวนการขึ้นรูปอัดชนิดอัดแรงเหมาะสมต่อการใช้ขึ้นรูปวัสดุประกอบ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในสัดส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นตัวอย่าง (g/cm^3)	ความหนาแน่นทาง ทฤษฎี (g/cm^3)	ร้อยละความ หนาแน่น*
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

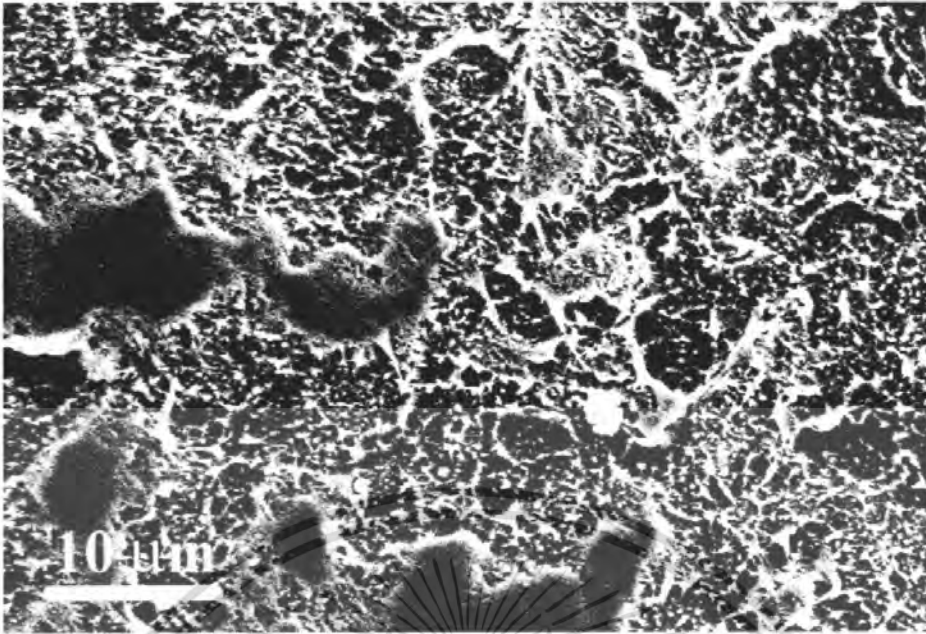
* เมื่อเทียบความหนาแน่นตัวอย่างกับความหนาแน่นทางทฤษฎี



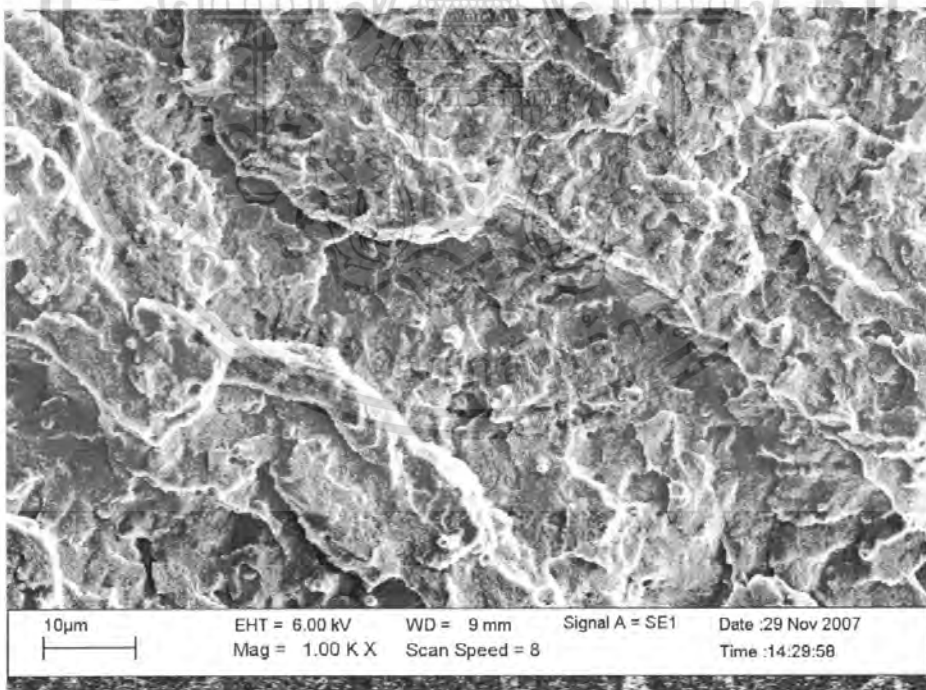
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบที่เติม CCTO ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) 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 4.6-4.11

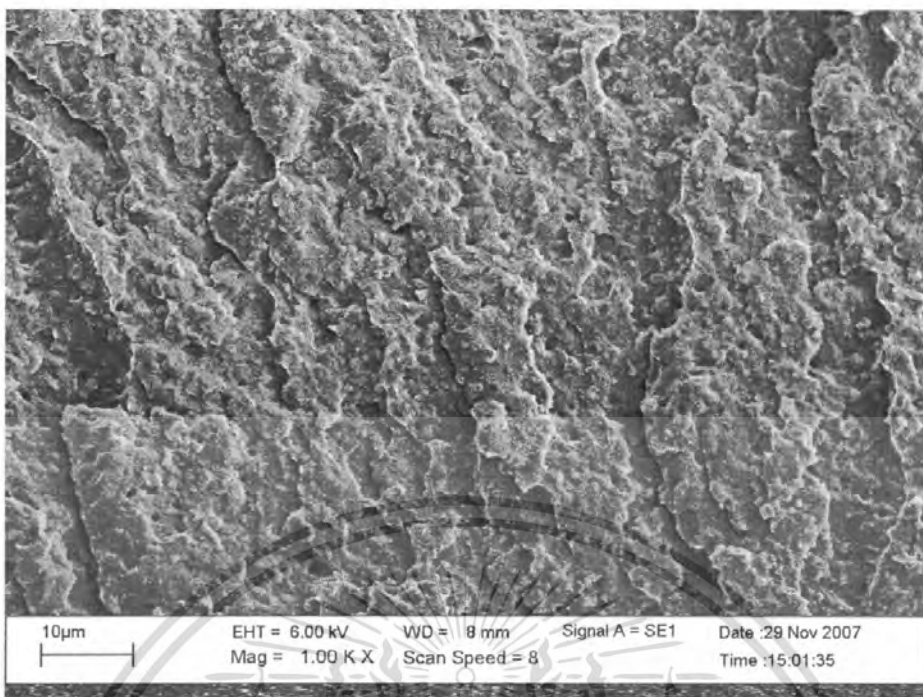


รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE บริสุทธิ์ [16]

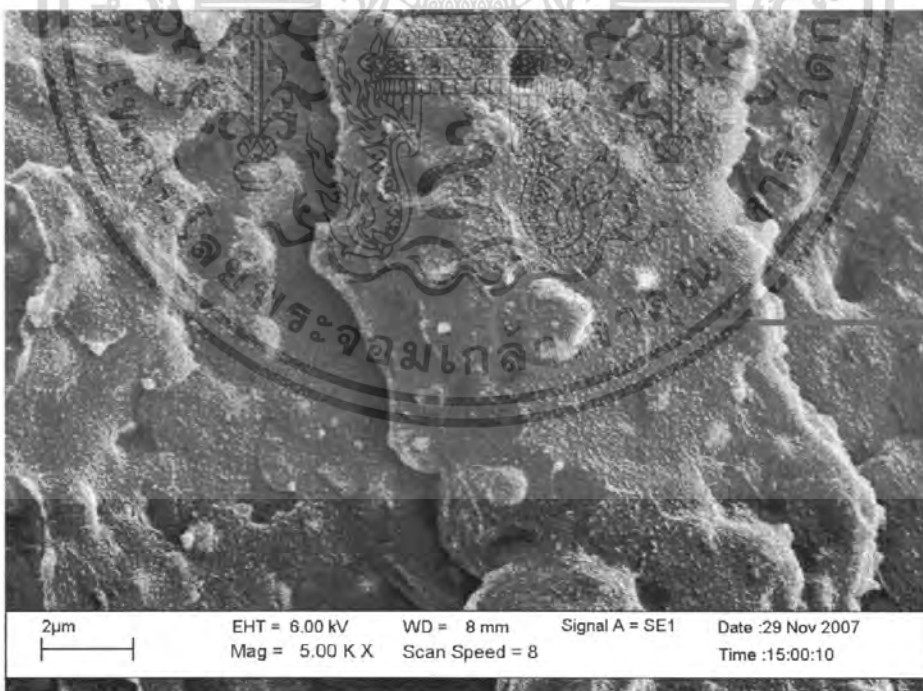


รูปที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 40% CCTO โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

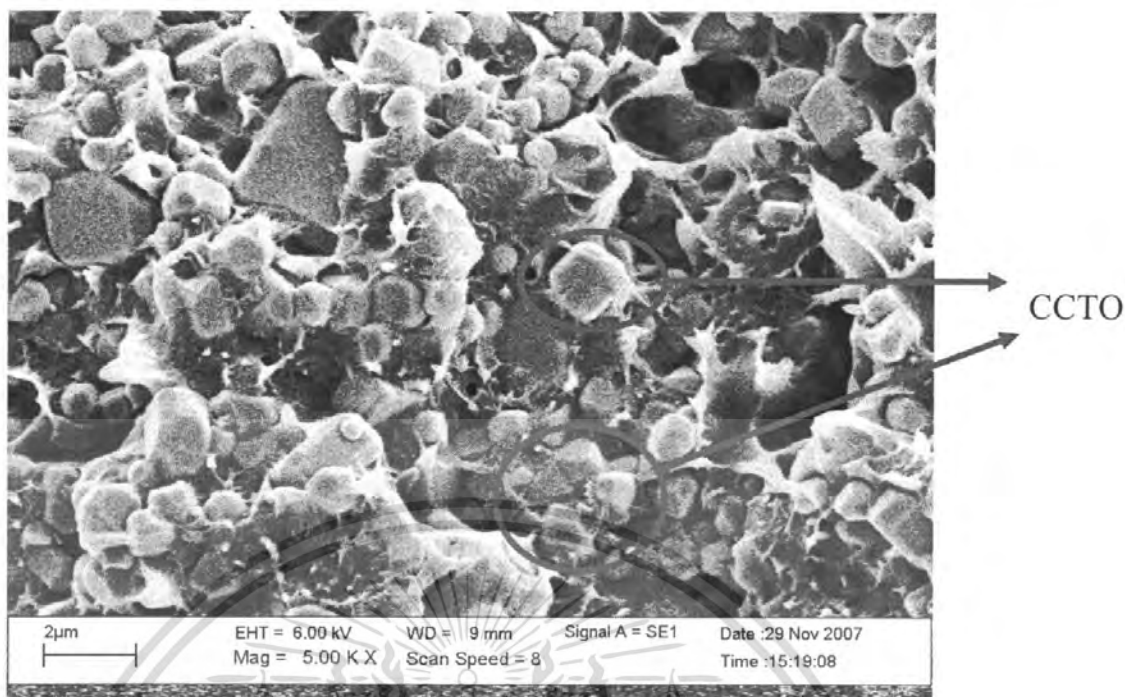


รูปที่ 4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 50% CCTO โดยนำหนัก

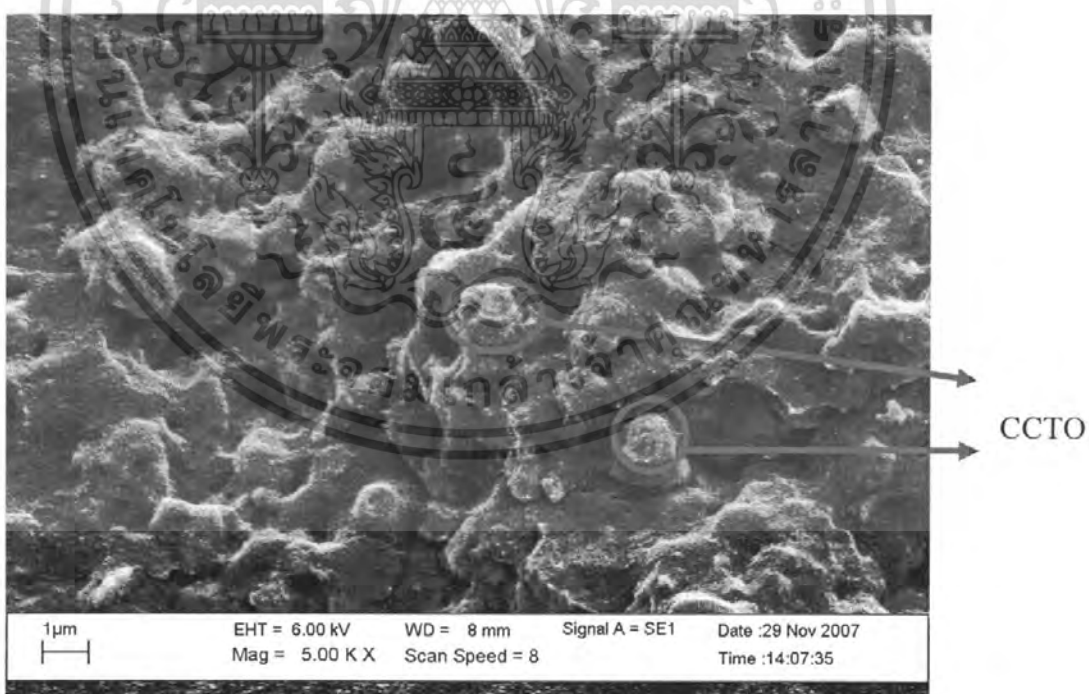


รูปที่ 4.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 60% CCTO โดยนำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

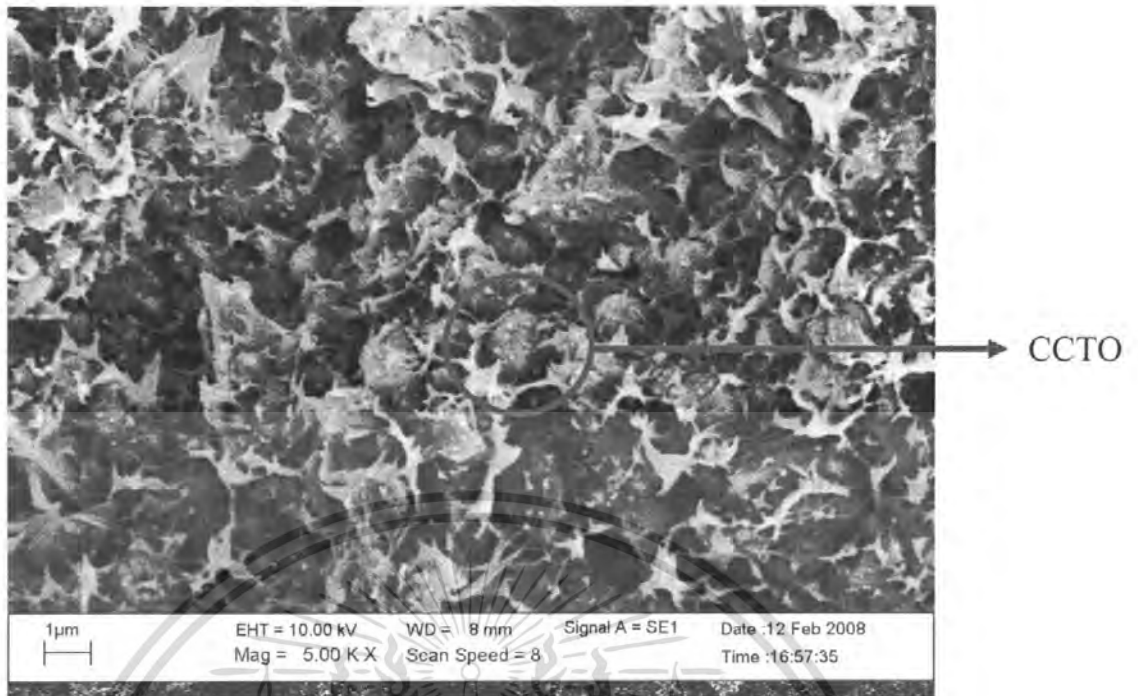


รูปที่ 4.10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 70% CCTO โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 80% CCTO โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ 84.50% CCTO โดยน้ำหนัก

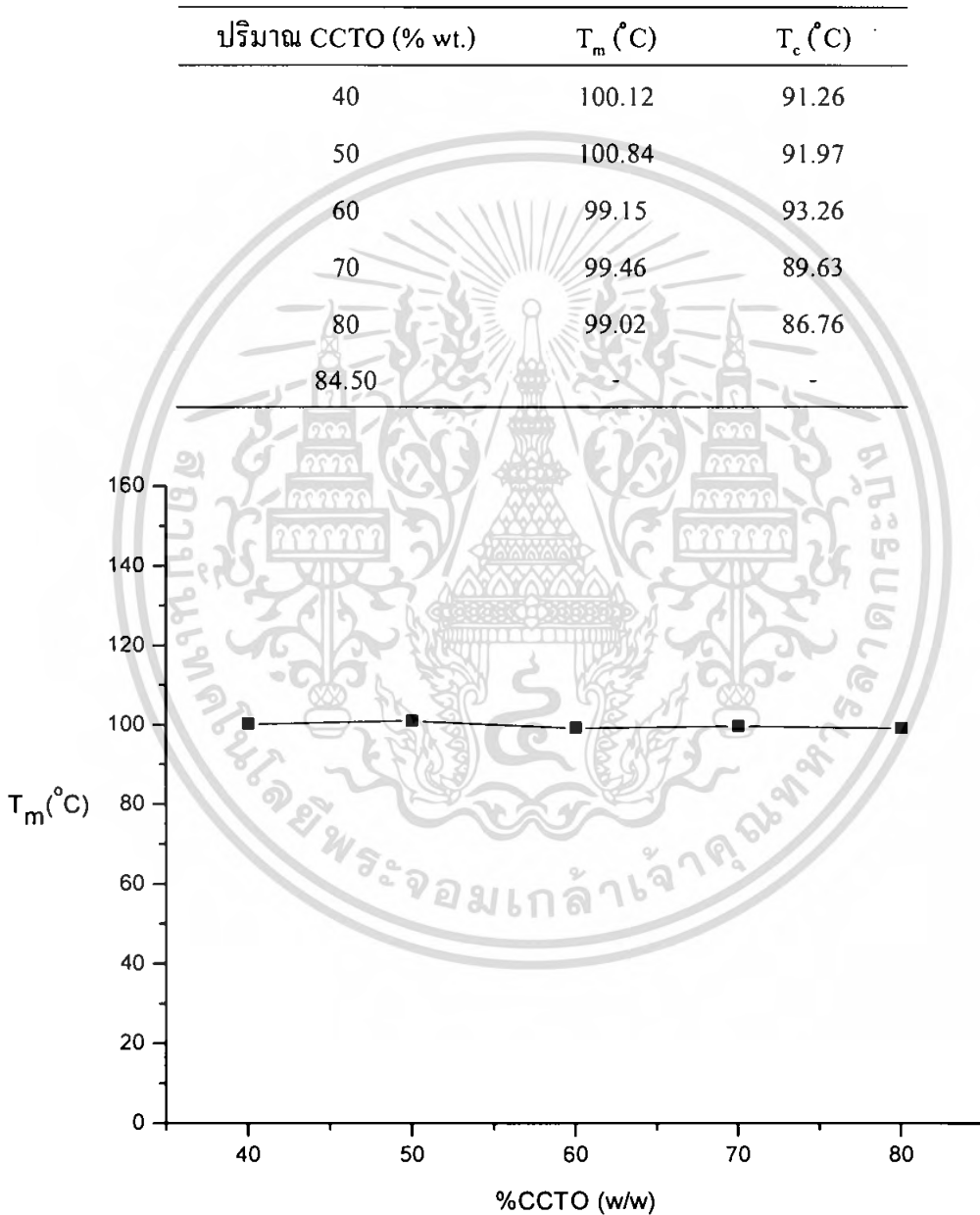
จากรูป 4.6 แสดงถึงสัณฐานวิทยาของ HDPE บริสุทธิ์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบที่อัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 4.7-4.12 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนเริ่มต้น คือ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีอนุภาคของ CCTO กระจายตัวอยู่ มีรูปแบบการเชื่อมต่อของ CCTO กับ HDPE เป็นแบบ 0-3 และเมื่อสัดส่วนของ CCTO เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของอนุภาค CCTO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ก็จะมากขึ้นด้วย จนกระทั่งสัดส่วนของ CCTO เพิ่มขึ้นถึง 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดที่สามารถเตรียมได้รูปแบบการเชื่อมการยังคงเป็นแบบ 0-3 เช่นเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเตรียมชิ้นงานวัสดุประกอบด้วยวิธีอัดชนิดอัดแรง (compression molding) ได้ชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีการกระจายตัวที่ดีพอๆกับวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) [16] แต่ใช้ปริมาณสารน้อยกว่า ประหยัดกว่า และขนาดอนุภาคของ CCTO หลังการขึ้นรูปไม่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาค นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีปริมาณสัดส่วน CCTO ได้มากกว่าวิธีการฉีดขึ้นรูปอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

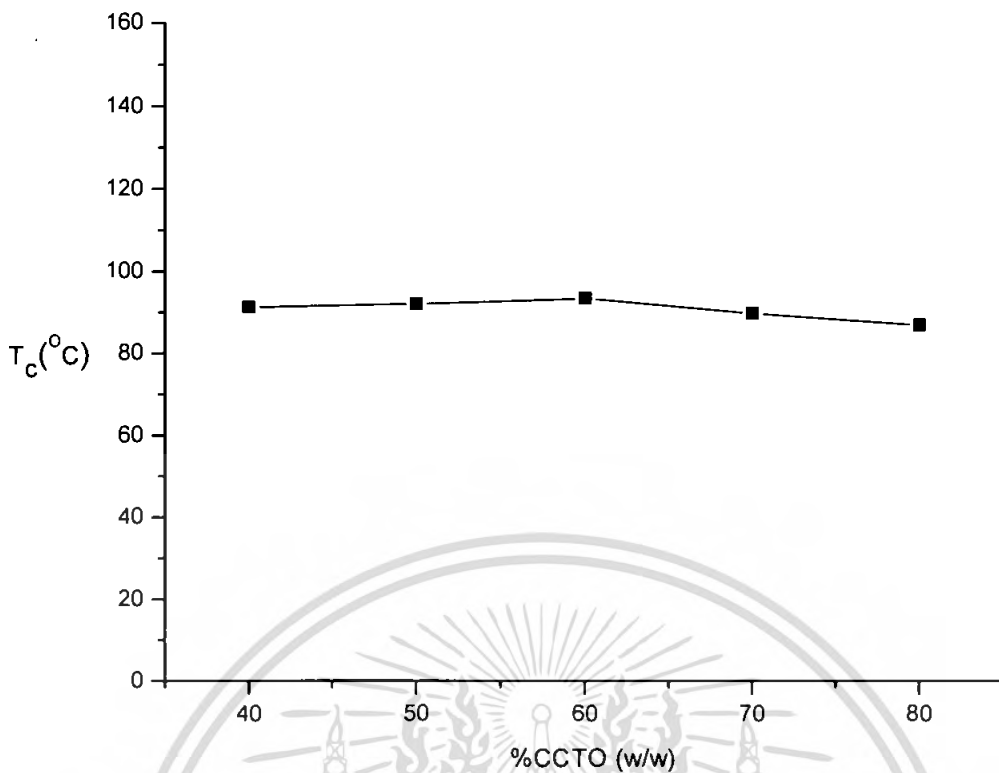
4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ตาราง 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของชิ้นงานวัสดุประกอบแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.13 แสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของวัสดุประกอบ เมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ในปริมาณ 40 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงค่าอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของวัสดุประกอบ เมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ในปริมาณ 40 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

นำวัสดุประกอบอัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์ที่เตรียมได้เรียบร้อยแล้ว มาทดสอบสมบัติทางความร้อน (differential scanning calorimeter, DSC) ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นทราบถึง T_m และ T_c วัสดุประกอบ

จากรูปที่ 4.13-4.14 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ที่ได้คาดว่าจะ เป็น T_m และ T_c ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (HDPE) เนื่องจาก CCTO มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง และอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) อยู่ระหว่าง $50-450^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ CCTO ยังไม่สลายตัว ดังนั้น T_m และ T_c ของวัสดุประกอบแต่ละอัตราส่วนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากการทดลองพบว่า T_m ของวัสดุประกอบที่ได้มีค่าน้อยกว่า T_m ของ HDPE บริสุทธิ์ (T_m ของ HDPE บริสุทธิ์เท่ากับ 135°C) ซึ่ง CCTO ที่เติมลงไปมีผลทำให้ค่า T_m และ T_c ของวัสดุประกอบลดลง เนื่องจากอนุภาค CCTO ไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ ทำให้การเกิดผลึกไม่สมบูรณ์ ดังนั้น ค่า T_m ของวัสดุประกอบจึงมีค่าต่ำกว่า ค่า T_m ของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ [9]

จากผลการทดลองปริมาณสัดส่วนของวัสดุประกอบที่ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถตรวจสอบสมบัติทางความร้อนได้ อาจเนื่องมาจากปริมาณของ HDPE ที่อยู่ในตัวอย่างน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้

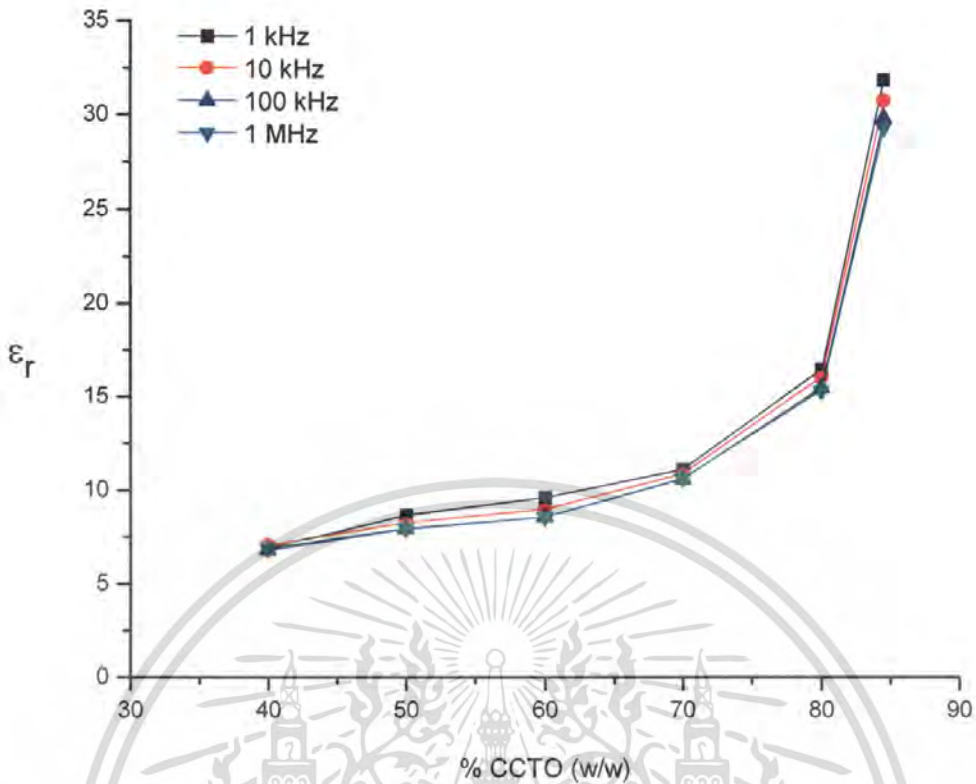
4.6 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของ ชั้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไทแทนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูง (HDPE)

ตาราง 4.3 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และค่าการ
สูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ของวัสดุประกอบที่อัตราส่วน 40 50 60 70 80 และ
84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

% wt	1 kHz			10 kHz		
	Cp(pF)	loss	ϵ_r	Cp(pF)	loss	ϵ_r
40	4.1645	-0.0435	6.9762	4.2172	0.0088	6.9762
50	5.1084	0.0274	8.2071	4.8417	0.0319	8.2071
60	6.5519	0.0415	8.9322	6.0868	0.0343	8.9322
70	7.6974	0.0081	10.8493	7.4995	0.0144	10.8293
80	11.6445	0.0163	16.0100	11.2973	0.0207	16.0100
84.50	18.5165	0.0168	31.9002	17.8601	0.0225	30.7694

% wt	100 kHz			1 MHz		
	Cp(pF)	loss	ϵ_r	Cp(pF)	loss	ϵ_r
40	4.0920	-0.0379	6.7690	4.1390	0.0062	6.8469
50	4.6534	-0.0312	7.8879	4.6849	0.0103	7.9413
60	5.8230	-0.0218	8.5450	5.8198	0.0103	8.5403
70	7.3258	-0.0202	10.5979	7.3511	0.0105	10.6346
80	10.9193	-0.0070	15.4743	10.8229	0.0194	15.3377
84.50	17.3271	0.0890	29.8419	17.0401	0.0226	29.3567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



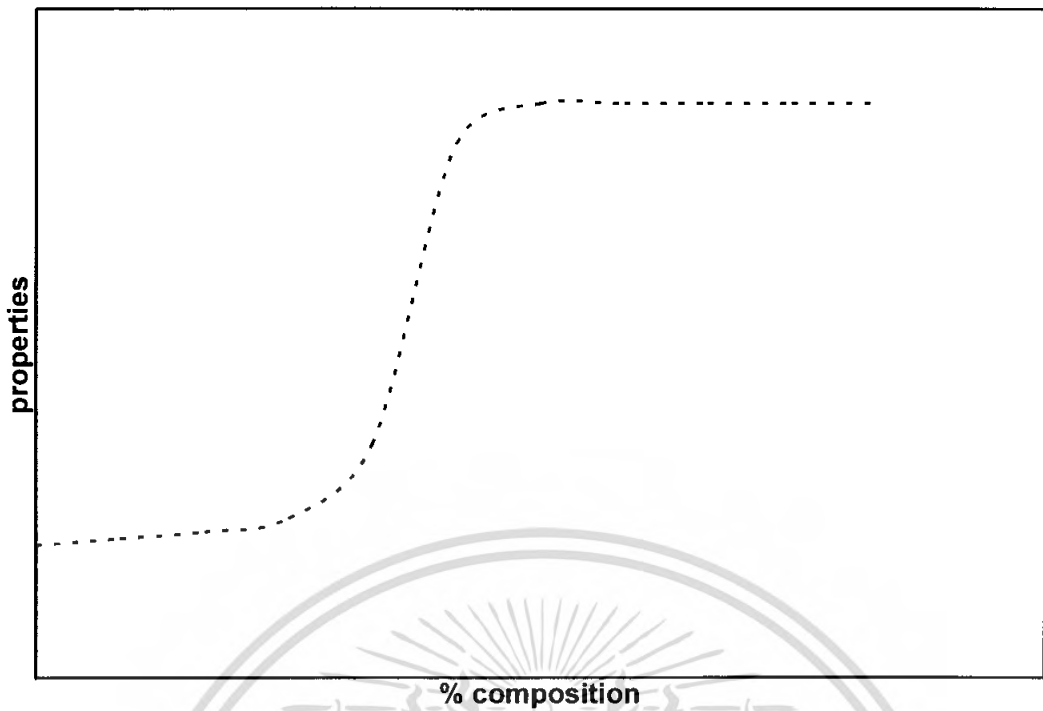
รูปที่ 4.15 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานวัสดุประกอบที่เติม CCTO ในปริมาณ 40 50 60 70 80 และ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

นำชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎีมากที่สุด มาทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าโดยทาภาวเงินลงบนพื้นผิวตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ค่าความถี่ 1 kHz 10 kHz 100 kHz และ 1 MHz ด้วยเครื่อง LCR meter ได้ผลการทดลองแสดงในตาราง 4.3

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของวัสดุประกอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันที่อัตราส่วน 40-80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออัตราส่วนของ CCTO เป็น 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยังมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่อีกด้วย ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) มีค่าค่อนข้างน้อย แสดงว่าชิ้นงานวัสดุประกอบในแต่ละสัดส่วนนั้นมีการสูญเสียพลังงานในรูปของพลังงานความร้อนน้อยมาก ซึ่งค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกบางค่าติดลบเนื่องจากค่าที่วัดได้มีค่าน้อยมากจนเครื่องมือไม่สามารถประมาณค่าได้

ในงานวิจัยนี้การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของคอมโพสิตจะเป็นไปตามทฤษฎีเปอร์โกลเดชัน (percolation) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ใช้กับการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ กับ เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบ ของวัสดุ ประกอบตามทฤษฎีเพอร์โคเลชัน (percolation) [16]

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุประกอบที่มีสัดส่วนของ CCTO 84.50 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก (50.40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด ซึ่งถือเป็นจุดที่สูงที่สุด ทำให้ที่อัตราส่วนนี้วัสดุประกอบมีคุณสมบัติดีที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1. ผลการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)

จากการสังเคราะห์ได้ CCTO ที่มีลักษณะเป็นผงของแข็งละเอียด สีน้ำตาล มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.62 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นเท่ากับ 5.0045 g/cm³

2. การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยการอัดชนิดอัดแรง (compression molding)

จากการทดลอง สามารถขึ้นรูปวัสดุประกอบระหว่าง CCTO กับ HDPE ได้มากที่สุดที่อัตราส่วน 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3. การหาความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

เมื่อปริมาณสัดส่วน CCTO ในวัสดุประกอบเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของวัสดุประกอบก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

4. การตรวจสอบมาตรฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

จากการกระจายตัวของ CCTO โดยเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานของ HDPE บริสุทธิ์ กับวัสดุประกอบที่สัดส่วนต่างๆ พบว่า อนุภาค CCTO ถูกล้อมรอบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเป็นวัสดุประกอบแบบ 0-3

5. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

เมื่อปริมาณสัดส่วน CCTO ในวัสดุประกอบมากขึ้น อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ก่อนข้างคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของ ชั้นงานวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไทแทนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูง (HDPE)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุประกอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันในอัตราส่วนต่างๆ และสูงขึ้น
มากที่อัตราส่วน 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยค่าที่ได้ค่อนข้างคงที่ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นตาม
ทฤษฎีเพอร์โคเลชัน (percolation)

5.2 วิจัยรณผลการทดลอง

ถึงแม้ว่าวัสดุประกอบที่สังเคราะห์จะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก น้อยกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็ก-
ทริกของ CCTO บริสุทธิ์ ก็ไม่ได้หมายความว่า สมบัติอื่นจะไม่ดีไปเสียหมด ยังมีสมบัติอื่นอีกที่ต้อง
คำนึงถึง เช่นค่าความต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength) กระบวนการ
ขึ้นรูป เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการตรวจสอบค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength)
ของชั้นงานวัสดุประกอบ
2. เปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูป ให้ได้ชั้นงานที่มีขนาดบางและมีพื้นที่มากขึ้น
3. ทำการคัดแยกขนาดของอนุภาค CCTO เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. วารสาร HOBBY ELECTRONICS ฉบับที่ 02 เดือน พฤษภาคม 2534
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
3. <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html>
4. วีระพงษ์ มงคลรัตนภรณ์, อนุพงษ์ พงษ์สุวรรณ, เรวัต เนื่องทวี. ความรู้เกี่ยวกับเซรามิก
5. S.K. Manik^a, S.K. Pradhan^{b*}, physica E 33 (2006), **Microstruture characterization of ball-mill-prepared nanocrystalline CaCu₃Ti₄O₁₂ by Ritveld method**, 160-168
6. B.A. Bender , M.-J. Pan, Materials Science and Engineering, B 117 (2005) 339-347
7. http://www.americanchemistry.com/s_plastics/hands_on_plastics/images/structure%20of%20polymers.gif
8. www.ri.ac.uk/DFRL/people2/f_cora/DFRL.html
9. ผศ.ดร.มาลินี ชัยสุขภักจสินธ์. 2546. เคมีพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
10. ร่มินทร์ ช้างเพชร, ประภฤษฎ์ แสงทองอโณทัย 2545. การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมโดยใช้สารกึ่งตัวนำ. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
11. ปิยวรรณ เจียวก๊ก, พงศ์ศักดิ์ แพน้อย. 2543, การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตไม้เทียมจากพอลิพรอพิลีนและไม้ยูคาลิปตัส. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
12. ดร.รัตติกร ยี่มนิรัญ. 2546. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา ว.วศ.210404 การประยุกต์ของวัสดุด้านไฟฟ้า. ภาควิชาฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
13. ศ.ดร.ทวี ต้นจศิริ. 2544. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องกระบวนการผลิตไดอิเล็กทริกเซรามิกส์. ระหว่างวันที่ 9-10 สิงหาคม 2544
14. Julie J. Mohamed, Sabar D. Hutagalung, M. Fadzil Ain, Karim Deraman, Zainal A. Ahmad, “**Microstructure and dielectric properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramic**”, Materials letters, 2006
15. Heng Chen, Xianlin Dong, Tao Zeng, Zhiyong Zhou and Hong Yang, “**The mechanical and electric properties of infiltrated PZT/polymer composites**”, Ceramics International, 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

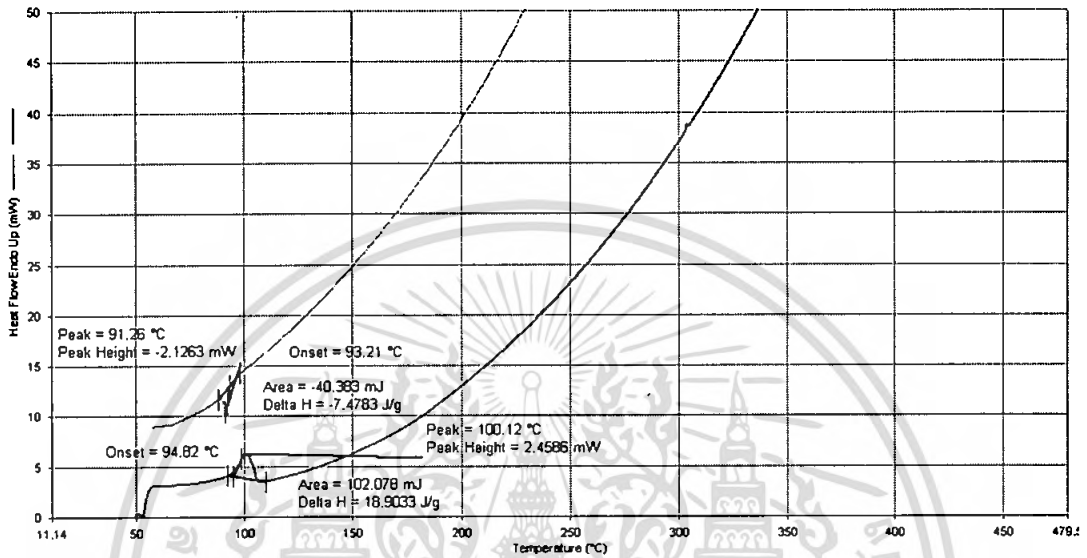
16. วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร, ศราวุธ วิสุทฐศิริ, อธิกา จันทร์ศิริ. 2549, การสังเคราะห์ การเตรียม และการหาลักษณะของวัสดุประกอบแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE). โครงการงานพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
17. D.Hull, T.W. CLYWE, **An Introduction To Composite Material**, 2nd edition, P.62



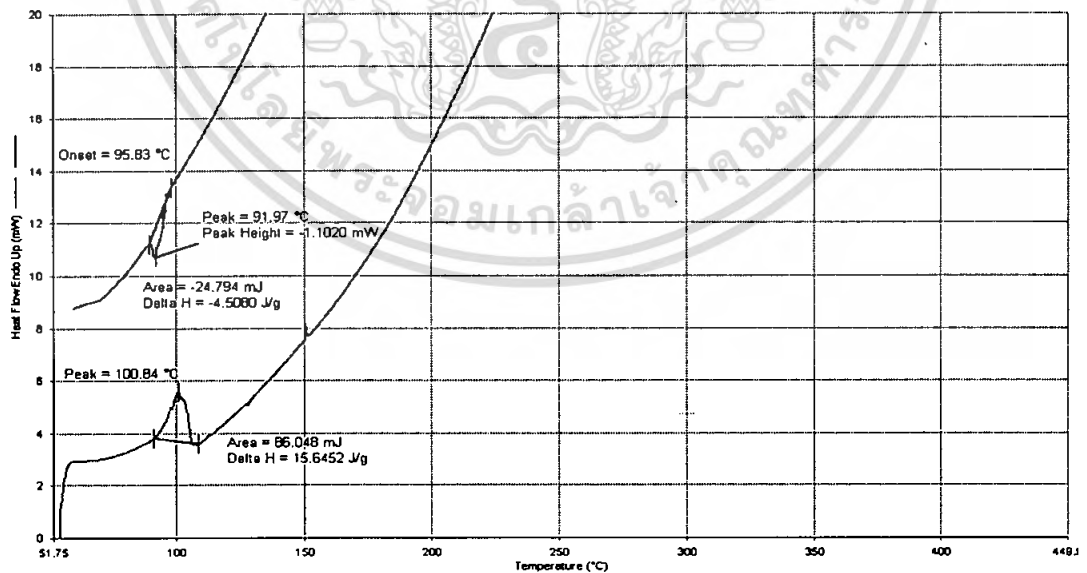
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

1. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

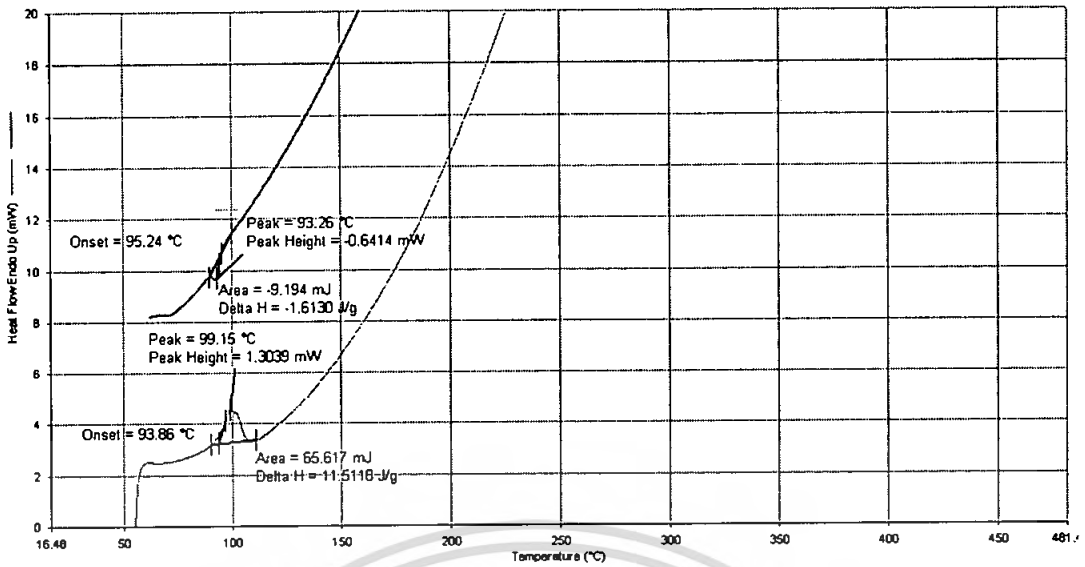


กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

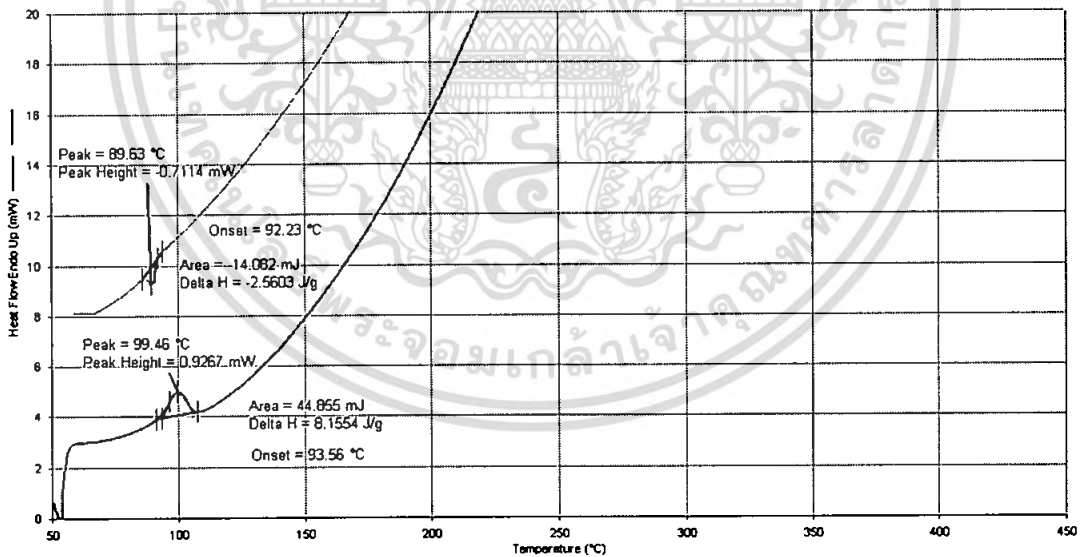


กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

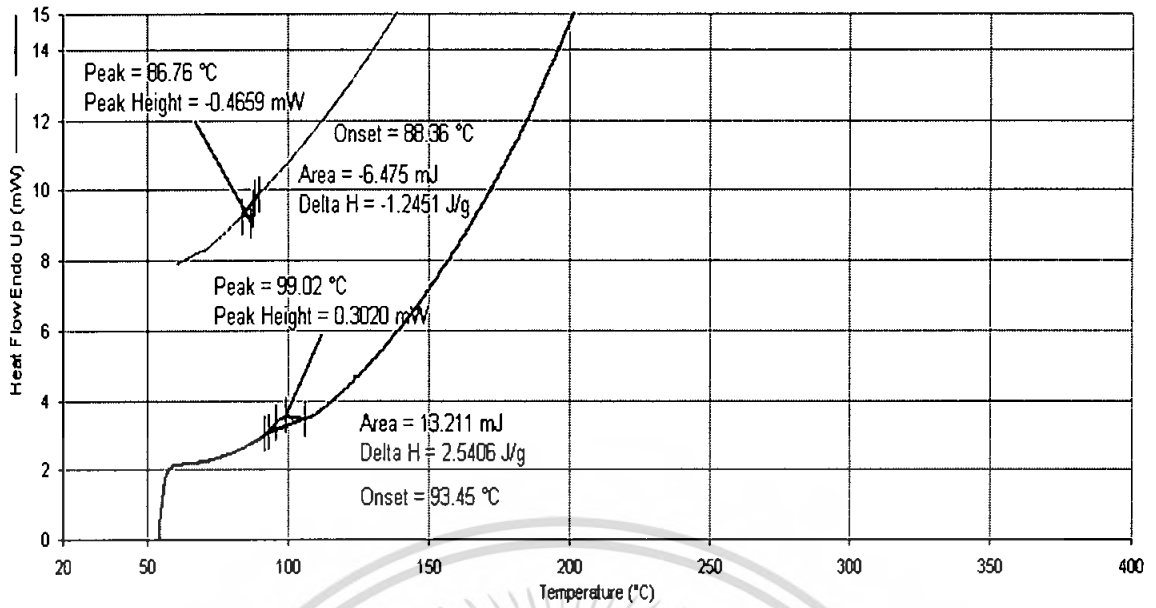


กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

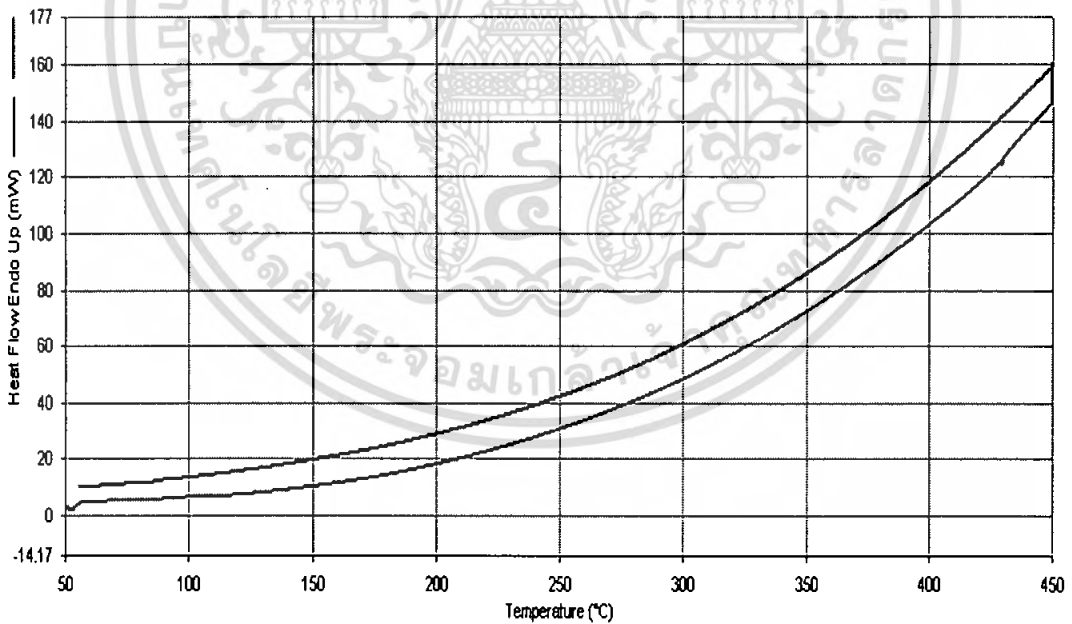


กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานวัสดุประกอบที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 84.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากกราฟไม่สามารถหา T_m และ T_c ได้เนื่องจาก HDPE เนื่องจาก HDPE ในสารตัวอย่างมีปริมาณน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้