

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์ การเตรียมและการหาลักษณะของวัสดุประกอบ
แบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต กับพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูง

3



T107791



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.....

107791

14 พ.ค. 2553

b. 12212A04

i.

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Synthesis, Preparation and Characterization
of 0-3 composite type between Calcium Copper
Titanate and High Density Polyethylene**



**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 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ การเตรียมและการหาลักษณะของวัสดุประกอบแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

นักศึกษา
1. นางสาววิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร
2. นายศรารุช วิสุทธีศิริ
3. นางสาวอชิกา จันทร์ศิริ

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2549

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.นราธิป วิทยากร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ	
กรรมการ ดร.นราธิป วิทยากร	
กรรมการ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ การเตรียมและการหาลักษณะของวัสดุประกอบแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

นักศึกษา	1. นางสาววิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร 2. นายศราวุธ วิสุทธีศิริ 3. นางสาวอชิกา จันทร์ศิริ
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.นราธิป วิทยาการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมคอมโพสิตระหว่างเซรามิกส์กับพอลิเมอร์ให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพื่อประยุกต์ใช้งานพัฒนาให้สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ดี มีน้ำหนักเบาและช่วยลดสมบัติความแข็งเปราะของเซรามิกส์ เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเก็บประจุในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำผงเซรามิกส์ (CCTO) มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สัณฐานวิทยาและหาความหนาแน่นเพื่อหาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม

พบว่าเมื่อปริมาณ CCTO ในคอมโพสิตมีปริมาณสูงขึ้นทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงดิ่งลดลง มีความแข็งกตมากขึ้นแต่เปราะ อ่อนหภูมิในการหลอมเหลวของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CCTO เพิ่มขึ้นเนื่องจาก CCTO มีอุณหภูมิในการสลายตัวที่สูง แต่อุณหภูมิในการหลอมเหลวของคอมโพสิตมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากปริมาณ CCTO ในคอมโพสิตมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และอุณหภูมิการตกผลึกของคอมโพสิตแต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากปริมาณ CCTO ในคอมโพสิตมีค่าไม่มากนักจึงเป็นอุณหภูมิการตกผลึกของ HDPE ที่เป็นเมตริกซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอมโพสิตแต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากปริมาณ CCTO ที่เติมลงไปยังมีค่าไม่มากพอที่จะส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกให้เพิ่มขึ้นอย่างมากตามทฤษฎีเพอร์โคเลชัน (percolation) แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอมโพสิตทุกอัตราส่วนมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอนุภาค CCTO กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นคอมโพสิตแบบ 0-3 เนื่องจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ล้อมรอบอนุภาค CCTO และจากการหาความหนาแน่นพบว่าความหนาแน่นของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ CCTO สูงขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	The Synthesis, Preparation and characteristic of 0-3 Composite type between Calcium Copper Titanate and High Density Polyethylene
Name	Miss Wilairat Taweewongsuntorn Mr. Sarawut Wisuththisiri Miss Athika Jansiri
Program	Chemistry
Academic Year	2006
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somsak Woramongkolchai
Special Project Co- Advisor	Dr.Naratip Vittayakorn

Abstract

This research aims to study the preparation of composite between ceramic and polymers with good dielectric properties, light weight and reducing brittleness of ceramic for using in electronic capacitor. The powder of CCTO was mixed with HDPE and then it was forming by injection moulding. The sample parts were tested by mechanical, thermal, electrical, morphology properties and its density for determination of appropriate ratio.

It was found that the increasing amount of CCTO would caused decreasing tensile-strength, greater hardness but brittleness. The trend of constant melting temperature of composite was rather higher when the amount of CCTO was increased because of CCTO has greater decomposition temperature but less amount in composite. The crystallization temperature of composite for each ratio was no significant according to the less amount of CCTO in composite. The dielectric constant of composite for each ratio was also no significant to reveal the electrical properties as percolation theory. It was constant for each ratio when the temperature was changed Morphology study was shown the CCTO dispersion in HDPE matrix of 0-3 composite type because matrix phase is surrounded to dispersed phase. And the higher the amount of CCTO, the greater the density of composite.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชาโครงการพิเศษ ในหัวข้อเรื่องการสังเคราะห์ การเตรียมและการหาลักษณะของวัสดุประกอบแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไอทาเนดกับ พอลิเมอร์โครงการพิเศษนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคล ดังต่อไปนี้

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ดร. นราธิป วิทยากร และ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวกับการทดลอง ข้อเสนอแนะ การตอบข้อซักถามของผู้จัดทำ และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในการทำการทดลอง จนกระทั่งโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการเบิกเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณนักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวกับการทดลอง และสอนการใช้เครื่องมือต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณแม่บ้าน และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเรื่อง การเปิดและปิดห้องปฏิบัติการในวันที่มีการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และช่วยกันคิดแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง ทำให้การทำโครงการพิเศษนี้เป็นไปได้อย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้จัดทำที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนกำลังใจทั้งใน การทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้คงจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้ หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร

ศราวุธ วิสุทธีศิริ

อริกา จันทร์ศิริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV ,V
สารบัญรูปภาพ	VII, VIII, IX
สารบัญตาราง	X
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)	3-11
- 2.2 เซรามิก (Ceramic)	11-20
- 2.3 พอลิเมอร์ (Polymer)	20-34
- 2.4 วัสดุประกอบ (Composites)	34-42
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43-45
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
- 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	46
- 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	46-47
- 3.3 วิธีการทดลอง	47-50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
- 4.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)	51-53
- 4.2 การทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Hardness)	54
- 4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	55-56
- 4.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	57-60
- 4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	61-66
- 4.6 การหาความหนาแน่น	67-68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
-	5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	69-70
-	5.2 ข้อเสนอแนะ	70
ภาคผนวก		71-81
เอกสารอ้างอิง		82-84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 2.1	โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุอย่างง่าย	3
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	5
รูปที่ 2.3	ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	5
รูปที่ 2.5	ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ	6
รูปที่ 2.4	สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแบบคงที่	6
รูปที่ 2.6	ตัวเก็บประจุชนิดไมก้า	7
รูปที่ 2.7	ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก	8
รูปที่ 2.8	ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์	8
รูปที่ 2.9	ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติกชนิดต่างๆ	9
รูปที่ 2.10	ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	10
รูปที่ 2.11	แสดงสัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	10
รูปที่ 2.12	การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุกับอุณหภูมิของ ไดอิเล็กทริก (ก) NPO ประเภท I (ข) X7R ประเภท II (ค) Z5U ประเภท II	15
รูปที่ 2.13	โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์(perovskite) ของ $BaTiO_3$	18
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า relative permittivity ของ $BaTiO_3$ กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	18
รูปที่ 2.15	โครงสร้างผลึกแบบเพอร์โรฟสไกต์ (perovskite) ของ CCTO	19
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) และค่าพลังงานสูญเสีย (dielectric loss) ของ CCTO กับการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 kHz.	20
รูปที่ 2.17	ลักษณะ โครงสร้างของพอลิเอทิลีนประเภทต่างๆ	23
รูปที่ 2.18	ลักษณะของหน่วยเซลล์ของพอลิเอทิลีน	24
รูปที่ 2.19	ผลของความหนาแน่นที่มีต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน	25
รูปที่ 2.20	การประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นและดัชนีการหักเหของแสง	29
รูปที่ 2.21	รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุผสม 2 ชนิด	36
รูปที่ 2.22	ชนิดของคอมโพสิต	37
รูปที่ 2.23	ประเภทของวัสดุคอมโพสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	38
รูปที่ 2.24	รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต	39
รูปที่ 2.25	รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.26	ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	41
รูปที่ 4.1	แสดงค่า Tensile strength ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์-ไททานเนต(CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	51
รูปที่ 4.2	แสดงค่า % Elongation at break ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	52
รูปที่ 4.3	แสดงค่า Modulus ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	53
รูปที่ 4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับปริมาณ CCTO ในคอมโพสิต	54
รูปที่ 4.5	แสดงค่า อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	55
รูปที่ 4.6	แสดงค่า อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของชิ้นงานคอมโพสิต ผงแคลเซียมคอปเปอร์-ไททานเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	56
รูปที่ 4.7	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต 0% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	57
รูปที่ 4.8	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต 10% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	58
รูปที่ 4.9	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต 30% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	58
รูปที่ 4.10	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต 40% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	59
รูปที่ 4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง properties กับ %composition ของคอมโพสิตระหว่าง ผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	60
รูปที่ 4.12	แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของHDPE (Pure)	61
รูปที่ 4.13	แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของHDPE (Pure) (ภาพ Back Scattering)	61
รูปที่ 4.14	แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของคอมโพสิต 10% CCTO	62
รูปที่ 4.15	แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของคอมโพสิต 10% CCTO (ภาพ Back Scattering)	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 4.16	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต 20%CCTO	63
รูปที่ 4.17	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต 20%CCTO (ภาพ Back Scattering)	63
รูปที่ 4.18	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต 30%CCTO	64
รูปที่ 4.19	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต 30%CCTO (ภาพ Back Scattering)	64
รูปที่ 4.20	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต 40%CCTO	65
รูปที่ 4.21	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของคอมโพสิต 40%CCTO (ภาพ Back Scattering)	65
รูปที่ 4.22	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของอนุภาคแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)	66
รูปที่ 4.23	แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของ คอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์-ไททาเนต ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่มีค่าสูงของตัวเก็บประจุประเภทต่างๆ	12-13
ตารางที่ 2.2 รหัสสำหรับช่วงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุสำหรับ ตัวเก็บประจุประเภท II ตามกฎเกณฑ์ของ EIA	14
ตารางที่ 2.3 อิทธิพลของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน ในเกรดต่างๆ	27
ตารางที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์เอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	31
ตารางที่ 2.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)	42
ตารางที่ 4.1 แสดงค่า อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) , อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เอนทัลปี ที่ใช้ในการหลอมเหลว ($\Delta H_{\text{หลอมเหลว}}$) , เอนทัลปีที่ใช้ในการตกผลึก ($\Delta H_{\text{ตกผลึก}}$) ของซินงานคอมโพลีตที่มีผสมเคลเซียมคอปเปอร์ไททานเตต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	55
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่น ของคอม โพลีตที่มีผสมเคลเซียมคอปเปอร์ไททานเตต ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาก้าวหน้าไปมาก มีวัสดุที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป การที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์พัฒนา ก้าวรุดหน้าไปอย่างรวดเร็วนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการค้นพบวัสดุที่มีสมบัติเด่นด้าน ไฟฟ้าหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุประเภทเซรามิกใหม่ (new ceramic) ทำให้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้สนใจการนำวัสดุประเภท เซรามิกใหม่มาใช้ในการทำตัวเก็บประจุเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บพลังงาน ประ กอบด้วยตัวนำ 2 ตัวแยกจากกัน โดยมีตัวที่เป็นฉนวนไฟฟ้า(แผ่นเซรามิก)คั่นอยู่ตรงกลาง ซึ่ง เซรามิกที่มีการนำมาใช้อย่างกว้าง ขวางได้แก่ แบเรียมไททาเนต(BaTiO_3 , BTO) เนื่องจากมี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงทำให้สามารถเก็บประจุได้ดี แต่มีข้อเสียคือสามารถใช้งานได้ดีใน ช่วงอุณหภูมิที่จำกัดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากช่วงที่กำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลง อย่างรวดเร็ว และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการค้นพบแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CCTO) ซึ่งเป็นเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าแบเรียมไททาเนตและมี ช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้างกว่าแบเรียมไททาเนตมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการ นำแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตไปใช้งานในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำตัวเก็บประจุ แต่เนื่อง จากแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตเป็นเซรามิกมีสมบัติแข็งเปราะไม่สามารถทำให้ เป็นชิ้นงานที่บางมากได้จึงมีการนำไปทำเป็นคอมโพสิตโดยนำไปผสมกับพอลิเมอร์ที่มี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำแต่สามารถทำเป็นชิ้นงานบางๆได้ คอมโพสิตที่ได้จะบางลงและมี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำ HDPE มาผสมกับ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตแล้วนำไปผลิตขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน แม้ว่าชิ้นงานจะไม่บาง เท่าที่ควรแต่ก็เป็นแนวทางในการศึกษาบทบาทของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตที่มีต่อ HDPE และสมบัติของคอมโพสิตที่เกิดขึ้นนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ด้วยเทคนิค ปฏิกริยาสถานะของแข็ง
2. เพื่อศึกษาการเตรียมคอมโพสิตแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สันฐานวิทยา และหาความหนาแน่นของคอมโพสิตแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- สามารถสังเคราะห์คอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)โดยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- เตรียมคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)
- หาปริมาณแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)ที่ใช้ในการผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)ที่ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอมโพสิตที่ได้มีค่าสูงที่สุด

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยในการดำเนินงาน

- สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทดลอง
- ดำเนินการทดลองดังนี้
 - ทำการสังเคราะห์แคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)
 - ทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)
 - นำคอมโพสิตที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก สันฐานวิทยาและหาความหนาแน่น
- สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวเก็บประจุให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- ช่วยลดต้นทุนในการทำตัวเก็บประจุเนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้มีราคาถูก
- เพิ่มความสามารถและความหลากหลายในการนำพอลิเมอร์ไปใช้งานในด้านไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น
- ช่วยพัฒนาความรู้เกี่ยวกับเซรามิก(ceramic)และการทำวัสดุประกอบ (composites)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)[10]

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าให้กับวงจรมีการนำไปใช้ในวงจรกรองแรงดัน วงจรกรองความถี่ ใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) เป็นต้น ตัวเก็บประจุนั้นพื้นฐานจะทำมาจากแผ่นตัวนำ 2 แผ่น โดยมีฉนวนคั่นกลางไว้ซึ่งเรียกกันว่าไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ ไมก้า เซรามิก หรืออากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุอย่างง่าย [10]

2.1.2 เก็บประจุกับสมบัติทางไฟฟ้า

แรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่สามารถถกคร่อมตัวเก็บประจุได้ในทันทีทันใด หากแต่ต้องใช้เวลาให้ค่อยๆเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้า ตัวอย่าง เมื่อป้อน 6 v ตัวเก็บประจุจะค่อยๆชาร์จประจุจาก 0 – 6 โวลต์ เมื่อแรงเคลื่อนถึงจุดสูงสุดแล้วกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถไหลเข้าไปตัวเก็บประจุได้อีกต่อไป หน่วยความจุ (unit of capacitance) มีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) มาจากการรับกระแสไฟฟ้า 1 แอมป์ในเวลา 1 วินาที แล้วทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดและมีประจุคงอยู่เท่ากับ 1 คูลอมบ์ ตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งของวงจรไฟฟ้าซึ่งประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อให้มีค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance,C) คงที่อยู่จำนวนหนึ่ง โดยปริมาณความจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุเท่ากับอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุเก็บได้ (Q) ต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) นั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

กรณีช่องว่างระหว่างแผ่น โลหะเป็นสุญญากาศ

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

เมื่อ

C : ค่าคาปาซิแตนซ์ มีหน่วยเป็นฟารัด

V : ค่าความต่างศักย์ มีหน่วยเป็น โวลต์

Q : ประจุ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

A : พื้นที่ของเพลทโลหะ มีหน่วยเป็นตารางนิ้ว

d : ค่าความห่างระหว่างเพลทโลหะทั้งสอง

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

กรณีช่องว่างระหว่างแผ่น โลหะถูกด้วยวัสดุ dielectric

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

เมื่อ

ϵ_r : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ

ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของตัวเก็บประจุหนึ่งฟารัด คือ ความสามารถของตัวเก็บประจุที่จะสามารถเก็บประจุได้ถึง 1 คูลอมบ์

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ให้ค่าของตัวเก็บประจุมากหรือน้อยมีอยู่ 3 ประการ คือ

1. พื้นที่แผ่นเพลทที่วางขนานกัน ตัวเก็บประจุที่มีพื้นที่แผ่นเพลทมากก็ยังมีค่าความจุมาก
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทยิ่งมีความห่างของแผ่นเพลทมากขึ้นค่าความจุก็จะลดลง
3. ชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่น ไดอิเล็กทริก ค่าความจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่น ไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การทำงานของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุมีภาวะการทำงานอยู่ 2 ภาวะคือ เก็บประจุ (Charge) และ คายประจุ (Discharge)

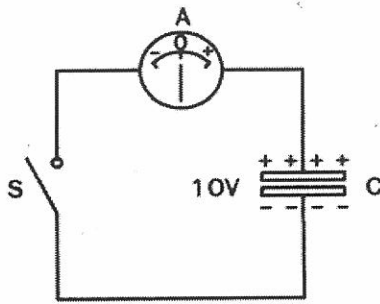
การเก็บประจุ คือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลทของตัวเก็บประจุ ซึ่งอธิบายโดยละเอียดดังในรูปที่ 2.2 เมื่อนำแบตเตอรี่อื่นๆต่อกับตัวเก็บประจุอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่จะเข้าไปอยู่ที่แผ่นเพลททำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไปผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลทตรงข้าม (เหมือนกับนำแผ่นแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาใกล้กันมันก็จะผลักกัน) ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลทจะมีประจุเป็น + และ - ปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลทนี้ถูกผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบยังอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไรแผ่นเพลทนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น(เมื่อเทียบกับอีกด้าน)



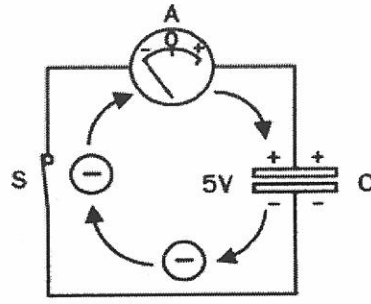
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [11]

ตัวเก็บประจุที่ถูกประจุแล้ว ถ้ายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน (ดังในรูปที่ 2.2) อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลทแต่ถ้ามีการต่อวงจรระหว่างแผ่นเพลททั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลททางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่นเพลททางด้านบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า "การคายประจุ" ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ยังไม่มีการคายประจุ



(ข) ขณะการคายประจุ

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ[11]

2.1.4 ชนิดของตัวเก็บประจุ

ชนิดของตัวเก็บประจุแบ่งตามวัสดุการใช้งานแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ

2.1.4.1 ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ (Fixed Capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ (Fixed Capacitor) จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุได้ ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีขั้วบวกและขั้วลบบอกไว้ ส่วนใหญ่จะเป็นแบบกลมดังนั้นการนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงการต่อขั้วให้กับตัวเก็บประจุด้วยจะสังเกตขั้วต่างๆ ขั้วไหนที่เป็นขั้วลบจะมีลูกศรชี้ไปที่ขั้วนั้นและในลูกศรจะมีเครื่องหมายลบบอกไว้ (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแบบคงที่[11]

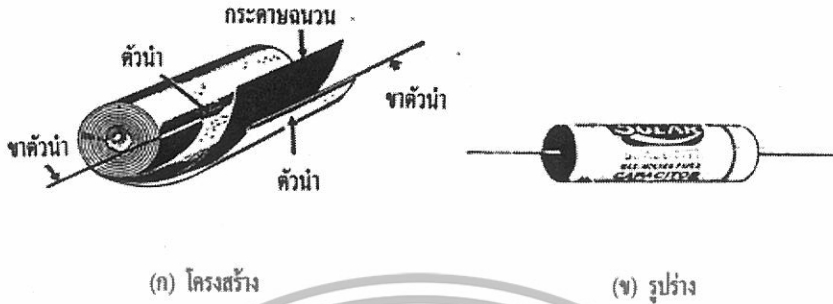
ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่(Fixed Capacitor) แบ่งได้ 5 ชนิดดังนี้

1) ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ (Paper capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบไข หรือน้ำมัน (Oil) เป็นฉนวนไดอิเล็กทริก โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นเพลท 2 แผ่นที่เป็นแผ่นดีบุกกรีดจนบางคั่นกลางด้วยกระดาษชุบไขแล้วนำมาม้วนเข้าเป็นท่อนกลม จากแผ่นเพลททั้งสองแต่ละข้างจะถูกต่อขาที่เป็นลวดตัวนำออกมาใช้งาน ตัวเก็บประจุจะถูกหุ้มห่อด้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดต่างๆ แล้วแต่บริษัทผู้ผลิต อย่างเช่น ปลอกกระดาษแข็ง กระเบื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

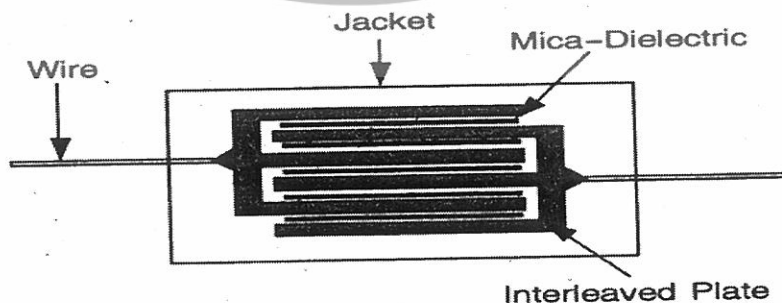
เคลือบ กระดาษอบน้ำผึ้ง เป็นต้น เพื่อป้องกันความชื้นและฝุ่นละออง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษนำไปใช้งานที่ต้องการค่าความต้านทานของฉนวนที่มีค่าสูง มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงได้ดี และมีค่าความจุที่ดีในย่านอุณหภูมิที่กว้าง



รูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ[11]

2) ตัวเก็บประจุแบบไมก้า (Mica capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดไมก้า เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้แผ่นไมก้าเป็นฉนวน ไดอิเล็กทริก ส่วนมากตัวเก็บประจุชนิดนี้จะถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมเพราะแผ่นไมก้าจะมีคุณสมบัติที่แข็งแกร่ง โครงสร้างจะประกอบด้วยแผ่นเพลทโลหะบางๆอาจใช้หลายๆแผ่นวางสลับซ้อนกัน แต่จะต้องกันด้วยฉนวนไมก้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งตัวเก็บประจุจะถูกหุ้มห่อด้วยฉนวนจำนวนเมกาลีเพื่อป้องกันการชำรุดสึกหรอ ตัวเก็บประจุแบบไมก้านี้จะมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิและความถี่ดี มีค่าตัวประกอบการสูญเสียต่ำ และสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในงานหลายอย่าง เช่น ในวงจรจูน วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรกรองสัญญาณ และวงจรขยายความถี่วิทยุกำลังสูง จะไม่มีการผลิตตัวเก็บประจุแบบไมก้าค่าความจุสูงๆออกมา เนื่องจากไมก้ามีราคาแพงจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงเกินไป



รูปที่ 2.6 ตัวเก็บประจุชนิดไมก้า[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก (Ceramic capacitor)

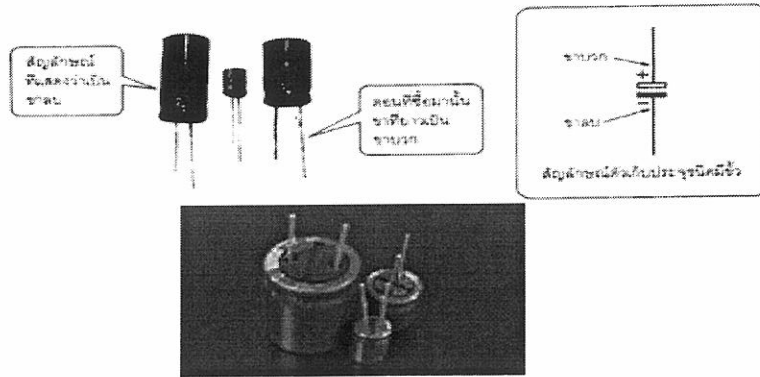
ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กทริกที่ทำมาจากฉนวนจำพวกกระเบื้องหรือที่เรียกว่า "เซรามิก" โดยทั่วไปตัวเก็บประจุชนิดนี้มีลักษณะกลมๆแบนๆ บางครั้งอาจพบแบบสี่เหลี่ยมแบนๆ ดังรูปที่ 2.7 ส่วนใหญ่ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าน้อยกว่า 1 ไมโครฟารัด และเป็นตัวเก็บประจุชนิดที่ไม่มีขั้ว (ไม่ต้องคำนึงเวลาใช้งาน) สามารถทนแรงดันได้ประมาณ 50-100 โวลต์ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่มีใช้กันในปัจจุบันอยู่ในช่วง 1พิโกฟารัด ถึง 0.1 ไมโครฟารัด



4) ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้น้ำยาอิเล็กโทรไลต์เป็นแผ่นข้างหนึ่งแทนโลหะ และอีกแผ่นหนึ่งเป็นแผ่นโลหะมีเยื่อบางๆ ที่เรียกว่า "ฟิล์ม" (Film) หุ้มอยู่ เยื่อบางๆนี้คือ ไดอิเล็กทริก หรือแผ่นกั้น ตัวเก็บประจุชนิดนี้ต้องระวังในการนำไปใช้งานด้วยเพราะมีขั้วที่แน่นอนพิมพ์ติดไว้ด้านข้างตัวถังอยู่แล้ว ถ้าป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุผิดขั้วอาจเกิดความเสียหายกับตัวมันและอุปกรณ์ที่ประกอบรวมได้ ขั้วของตัวเก็บประจุชนิดนี้สังเกตได้ง่ายๆ คือ ขาที่ยาวจะเป็นขั้วบวกและขาที่สั้นจะเป็นขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



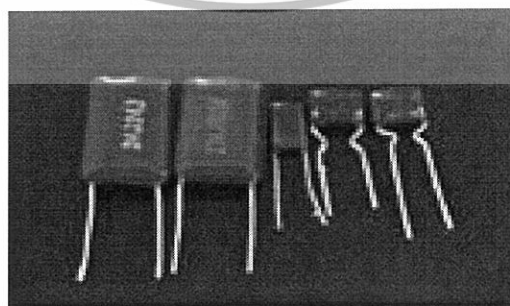
รูปที่ 2.8 ตัวเก็บประจุชนิดขั้วแบน [11]

5) ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติก (Plastic capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติก จะใช้ไดอิเล็กทริกที่เป็นแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น พอลิเอสเตอร์ (Polyester) ไมลาร์ (Mylar) พอลิสไตรีน (Polystyrene) และอื่นๆ โดยนำม้วนระหว่างแผ่นเพลททั้งสองแผ่นแล้วม้วนพันให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ดังจะแสดงในรูปที่ 2.9

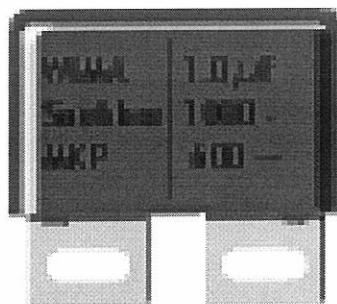


ตัวเก็บประจุแบบพอลิสไตรีน (Polyethylene capacitor)



ตัวเก็บประจุแบบไมลา (Mylar capacitor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

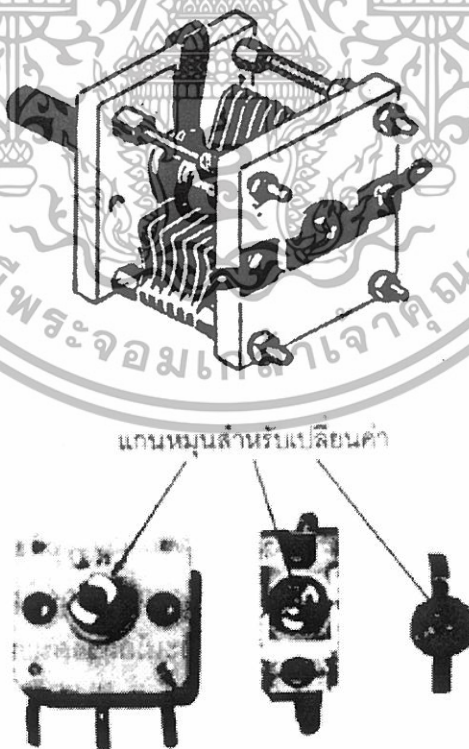


ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene)

รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติกชนิดต่างๆ[11]

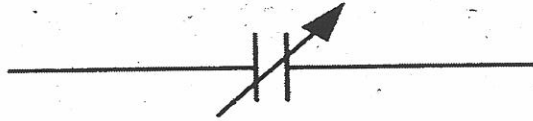
2.1.4.2 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable capacitor)

เป็นตัวเก็บประจุที่มีการเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ตัวเก็บประจุชนิดนี้ปกติแล้วจะประกอบด้วยอุปกรณ์ภายใน 2 ส่วน ได้แก่ แผ่นเพลทที่เคลื่อนที่ได้และแผ่นเพลทที่ติดตั้งอยู่กับที่ โดยแผ่นเพลททั้งสองจะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับวงจรภายนอก โดยทั่วไปจะมีค่าความจุไม่มากนักโดยประมาณไม่เกิน 1 ไมโครฟารัด(μF) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้[10],[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงสัญลักษณ์ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้[11]

2.2 เซรามิก (ceramic)[12]

เซรามิก เป็นพวกสารอนินทรีย์ (inorganic) ที่ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะและอโลหะมักพบอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์หรือไนไตรด์ โดยมีการยึดเหนี่ยวอะตอมของแต่ละธาตุเข้าไว้ด้วยกันด้วยแรงจากพันธะไอออนิกหรือโคเวเลนต์ร่วมกัน องค์ประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิด โดยทั่วไปเซรามิกจะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ มีความแข็งแรงน้อย เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดีเพราะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนได้ มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง ทนต่อสารเคมีและสภาวะแวดล้อมได้ดี เพราะมีพันธะทางเคมีที่แข็งแรง วัสดุเซรามิกได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก มีวัสดุหลายชนิดถูกใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ทางไฟฟ้าทั้งต่ำและสูง และยังได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitors) ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้บางชนิดมีสมบัติพิเศษสามารถเปลี่ยนสัญญาณแรงดันทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแรงดันทางกลได้เช่นกัน

วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม ที่สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนในงานอุตสาหกรรมทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในเซรามิกเป็นพันธะแบบไอออนิกและโคเวเลนต์ที่แข็งแรง ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดในการเคลื่อนที่เป็นผลทำให้วัสดุเซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีและมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงแต่ค่อนข้างเปราะ

2.2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก

ไดอิเล็กทริก(Dielectric) หมายถึง วัสดุที่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระสำหรับนำกระแสไฟฟ้า ทำให้สามารถต้านทานหรือคงสภาพภายใต้สนามไฟฟ้าได้โดยไม่ยอมให้มีกระแสไหล จะมีเพียงแต่การเคลื่อนย้ายหรือการปรับตำแหน่งของประจุอันเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้หน่วยย่อยของโครงสร้างระดับจุลภาคเช่น อะตอม ไอออน โมเลกุลหรือผงตัวนำในเนื้อวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดมีขั้วบวกและลบ(Polarized) ขึ้นมาในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้างกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติพื้นฐานของวัสดุไดอิเล็กทริก

- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ถ้าใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถผลิตตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กได้
- Dielectric breakdown strength เป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถของวัสดุในการที่จะเก็บพลังงานไว้ได้ที่ ความต่างศักย์สูงๆซึ่งถูกนิยามไว้เป็นโวลต์ต่อหน่วยความยาวหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นค่าที่บอกถึง ปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาความเป็นฉนวนไว้ได้โดยทั่วไปค่า dielectric strength จะมีหน่วยเป็น V / mil (1 mil = 0.001 นิ้ว) หรือ kV / mm
- Loss factor เป็นค่าปริมาณที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนของตัวเก็บประจุในวงจรกระแสไฟสลับ

1. ไดอิเล็กทริกประเภท I (Class I dielectric) จะรวมเซรามิกที่มีสภาพยอม (permittivity) ต่ำและปานกลาง โดยมีตัวแปรการสูญเสีย(dissipation factor) น้อยกว่า 0.003 สภาพยอมปานกลาง (medium-permittivity) หมายถึง ϵ_r อยู่ระหว่าง 15-500 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพยอมค่อนข้างคงที่ โดยจะอยู่ระหว่าง +100 และ -2000 M/K

2. ไดอิเล็กทริกประเภท II (Class II dielectric) ประกอบด้วยเซรามิกที่มีสภาพยอมสูง โดยทั่วไปเซรามิกเหล่านี้จะมีรากฐานมาจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก มีค่า ϵ_r อยู่ระหว่าง 2000 ถึง 20000 และมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สนามไฟฟ้าและความถี่มากกว่าไดอิเล็กทริกประเภท I ตัวแปรสูญเสียของเซรามิกประเภทนี้โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 0.03 ถึงแม้ว่าจะมีค่าสูงกว่านั้นในบางช่วงอุณหภูมิและบางครั้งมีค่าสูงขึ้นมาอีกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ คุณภาพหลักของไดอิเล็กทริกประเภทนี้จะอยู่ที่ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่มีค่าสูง

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่มีค่าสูงของตัวเก็บประจุประเภทต่างๆ [13]

ประเภท	$(C/V)/PF \text{ mm}^{-3}$	$(C/V)U_w/PC \text{ mm}^{-3}$	ความหนาแน่นพลังงานสูงสุด/ $nJ \text{ mm}^{-3}$
อิเล็กทรอนิกส์			
Wet aluminium	7000	4×10^5	10000
Wet tantalum	15000	4×10^6	33000
Solid tantalum	35000	1.3×10^6	24000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภท	$(C/V)/\rho F \text{ mm}^{-3}$	$(C/V)U_w/\rho C \text{ mm}^{-3}$	ความหนาแน่นพลังงาน สูงสุด/ mJ mm^{-3}
ฟิล์มพอลิเมอร์			
Paper foil/metal foil	10	5000	1300
Paper foil/metallized	40	15000	2800
Polystyrene/metal foil	6	2000	300
Polyester/metallized	30	11000	2000
Polymer chip	1000	50000	1300
ผลึกเชิงเดี่ยว			
Mica	5	2000	400
เซรามิกชั้นเดียว			
NPO	0.5	500	250
Z5U	5	5000	2500
Barrier layer	700	2000	3
เซรามิกหลายชั้น			
NPO	500	15000	230
X7R	10000	3.5×10^5	6000
Z5U	30000	11×10^6	17000

* NPO แสดงลักษณะของไดอิเล็กทริกประเภท I

นอกจากนี้ไดอิเล็กทริกประเภท II นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิด ทั้งนี้เนื่องจากไดอิเล็กทริกประเภทนี้นั้นมีรากฐานจากเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากกับสิ่งแวดล้อมและสภาพการใช้งาน การพัฒนาในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาได้นำไปสู่สมบัติที่มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยยังคงสามารถรักษาสภาพยอมที่มีค่าสูงซึ่งเป็นลักษณะเด่นของไดอิเล็กทริกประเภทนี้ สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์(The Electronics Industries Association : EIA) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดระบบในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่มีประโยชน์ในทางปฏิบัติกฎเกณฑ์ดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 รหัสสำหรับช่วงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุสำหรับตัวเก็บประจุ
ประเภท II ตามกฎเกณฑ์ของ EIA[13]

รหัส EIA	ช่วงอุณหภูมิ/°ซ	รหัส EIA	การเปลี่ยนแปลงค่าความจุ (%)
X7	-55 to +125	D	±3.3
X5	-55 to +85	E	±4.7
Y5	-55 to +85	F	±7.5
Z5	+10 to +85	P	±10
		R	±15
		S	±22
		T	+22 to -33
		U	+22 to -56
		V	+22 to -82

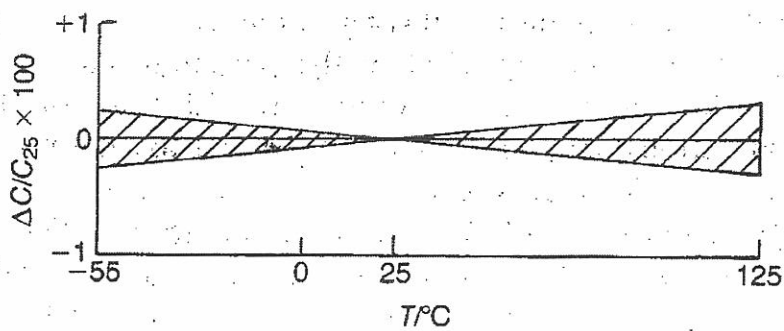
จากตาราง ไดอิเล็กทริกประเภท II ซึ่งมีการกำหนดกฎเกณฑ์ที่แตกต่างกันสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย เช่น

ถ้าต้องการตัวเก็บประจุที่ค่าความจุที่อุณหภูมิ 25°C เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±7.5% ในช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง +85°C ตามกฎเกณฑ์ของ EIA แล้วตัวเก็บตัวประจุนี้จะเป็นตัวเก็บประจุนิต Y5F

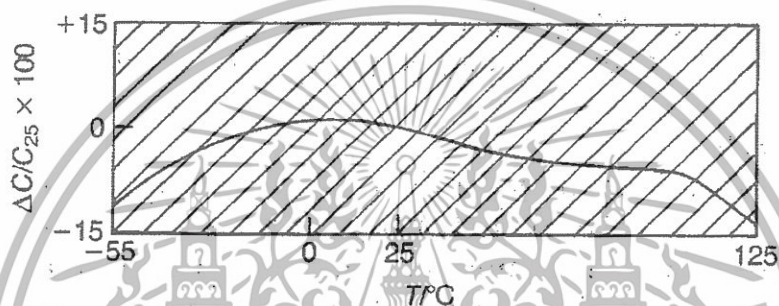
ตัวเก็บประจุนิต X7R หมายถึง ตัวเก็บประจุประเภท II ที่มีค่าความจุที่อุณหภูมิ 25°C เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±15% ในช่วงอุณหภูมิ -55°C ถึง +125°C ดังรูป 2.12 (ข)

ตัวเก็บประจุนิต Z5U หมายถึง ตัวเก็บประจุประเภท II ที่มีค่าความจุที่อุณหภูมิ 25°C เปลี่ยนแปลงไม่เกิน -22% ถึง -56% ในช่วงอุณหภูมิ +10°C ถึง +85°C ดังรูป 2.12 (ค)

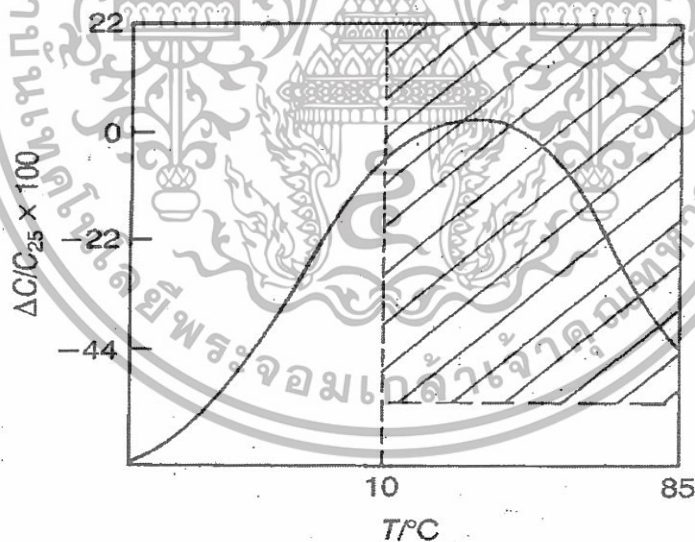
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุกับอุณหภูมิของไดอิเล็กทริก (ก) NPO ประเภท I
(ข) X7R ประเภท II (ค) Z5U ประเภท II [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไดอิเล็กทริกประเภท III (Class III dielectric) ในประเภทนี้จะประกอบด้วย ส่วนที่นำไฟฟ้า ซึ่งช่วยในการลดความหนาของไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุได้อย่างน้อย หนึ่งอันดับขนาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมบัติโดยทั่วไปจะคล้ายคลึงกับไดอิเล็กทริก ประเภท II แต่ความต่างศักย์ใช้งานจะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 25 V และความต้านทานจะลดลงอย่างมากถ้าความต่างศักย์สูงกว่านี้ ข้อดีของไดอิเล็กทริกประเภทนี้อยู่ที่โครงสร้างที่ง่าย เช่น แผ่นจานกลมและท่อกลมขนาดเล็กที่มีขั้วไฟฟ้าซึ่งสามารถให้ค่าความจุมากกว่า $1 \mu\text{F}$

2.2.2 ไดอิเล็กทริกเซรามิก(dielectric ceramic)

ไดอิเล็กทริกเซรามิก เป็นฉนวนไฟฟ้าประเภทเซรามิกที่สามารถเกิดโพลาริเซชันที่นำไปใช้ประโยชน์ในวงจรไฟฟ้าได้ ไดอิเล็กทริกเซรามิกและฉนวนนั้นมีสมบัติที่แตกต่างกันอย่างมาก จากสเตียไทต์(steatite)ซึ่งมีสภาพยอมสัมพัทธ์ประมาณ 6 จนถึงสารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ซับซ้อนที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 20000 ดังนั้นเพื่อความสะดวก ฉนวนจึงถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำถึงแม้ว่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของฉนวนจะมีค่าสูงเกินกว่าที่ใช้ในตัวเก็บประจุ สามารถแบ่งไดอิเล็กทริกเซรามิกออกได้เป็น 3 กลุ่ม

1. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมต่ำและฉนวน

ไดอิเล็กทริกเซรามิกในกลุ่มนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในลักษณะฉนวน ซึ่งในกรณีนี้ สมบัติเชิงกลอาจมีความสำคัญมากกว่าสมบัติ ไดอิเล็กทริกและเมื่อคำนึงถึงสมบัติไดอิเล็กทริก บ้างก็จะพิจารณาวัสดุที่มีราคาต่ำเป็นหลัก แต่ถ้าหากใช้เป็นวัสดุฐานรอง(substrate) สมบัติ ไดอิเล็กทริกก็จะถือเป็นตัวแปรสำคัญ นอกจากนี้ไดอิเล็กทริกเซรามิก กลุ่มนี้ก็มี ความสำคัญมากขึ้นถ้าต้องใช้ในกรณีที่ต้องการตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุต่ำในการใช้ที่ ความถี่สูง หรือในบางกรณีที่กระแสสูงต้องไหลผ่านตัวเก็บประจุที่มีความต้องการตัวเก็บ ประจุที่มีขนาดใหญ่ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนจะดีกว่า

2. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมปานกลาง

เซรามิกในกลุ่มนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเป็น ไดอิเล็กทริกประเภท I (Class I dielectric) ซึ่งจะต้องมีตัวแปรการสูญเสียที่ต่ำด้วย ซึ่งสามารถทำให้สามประกอบเฟอร์โร อิเล็ก

ทริกไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากมีการสูญเสียที่สูง($\tan \delta > 0.003$) โดยเฉพาะภายใต้ สนามไฟฟ้ากระแสสลับ แม้ว่าวัสดุสูญเสียต่ำ(low-loss material) ที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์เกินกว่า 500 นั้นสามารถหาได้แต่จะมีข้อเสีย คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นลบที่มีค่ามากกว่า -10000 M/K ดังนั้นในการใช้งานโดยทั่วไปเซรามิกที่มีสภาพยอมปานกลางมักจะมีค่า ϵ_r อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 50-100 ในการประยุกต์ใช้ของเซรามิกกลุ่มนี้โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ประเภทการใช้งานหลัก คือ

1. ตัวเก็บประจุส่งกำลังสูงสำหรับช่วงความถี่ 0.5-50 MHz ซึ่งต้องการสภาพการสูญเสียที่ต่ำ และสัมประสิทธิ์ของสภาพยอมที่เป็นลบสามารถยอมรับได้เนื่องจากมีส่วนช่วยในการจำกัดกำลังที่ส่งผ่านถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น

2. ตัวเก็บประจุเสถียรสำหรับการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปซึ่งต้องการให้ตัวเก็บประจุมีเสถียรภาพดีกว่า $\pm 1\%$ ในช่วงอุณหภูมิและความต่างศักย์ใช้งาน โดยมีช่วงความถี่การใช้งานในช่วง 1 kHz ถึง 100 MHz

3. โพรงสั้นพ้องไมโครเวฟ(microwave resonant cavities)ซึ่งใช้งานในช่วงความถี่ 0.5-50 GHz ต้องการเสถียรภาพที่ดีกว่า $\pm 0.05\%$ ในช่วงอุณหภูมิการใช้งานและมีตัวแปรการสูญเสียที่ต่ำกว่า 2×10^{-4}

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

3. ไดอิเล็กทริกเซรามิกที่มีสภาพยอมสูง

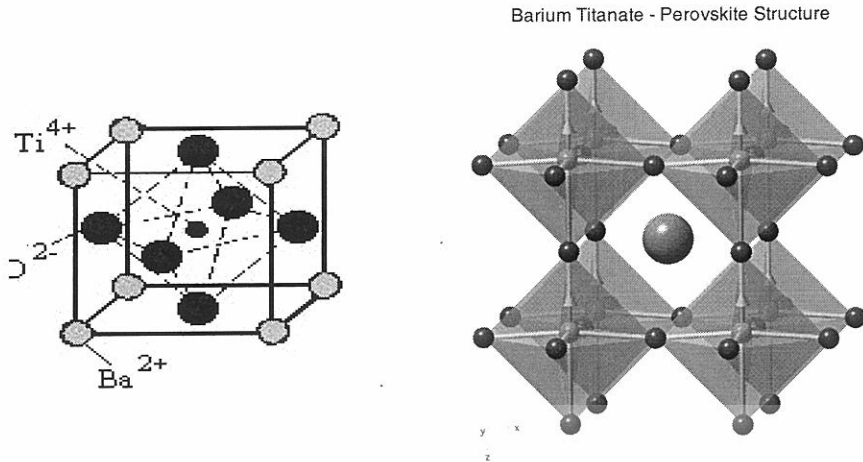
วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 1000 นั้น ส่วนมากจะเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ สนามไฟฟ้าและความถี่มากกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมต่ำกว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมีสมบัติที่พิเศษมากมายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ในมุมมองการนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกนั้นจะมีเซรามิกตัวหลัก คือ แบเรียมไททานเตต (Barium Titanate : $BaTiO_3$)

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงแบเรียมไททานเตตเนื่องจากนิยมนำไปทำตัวเก็บประจุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

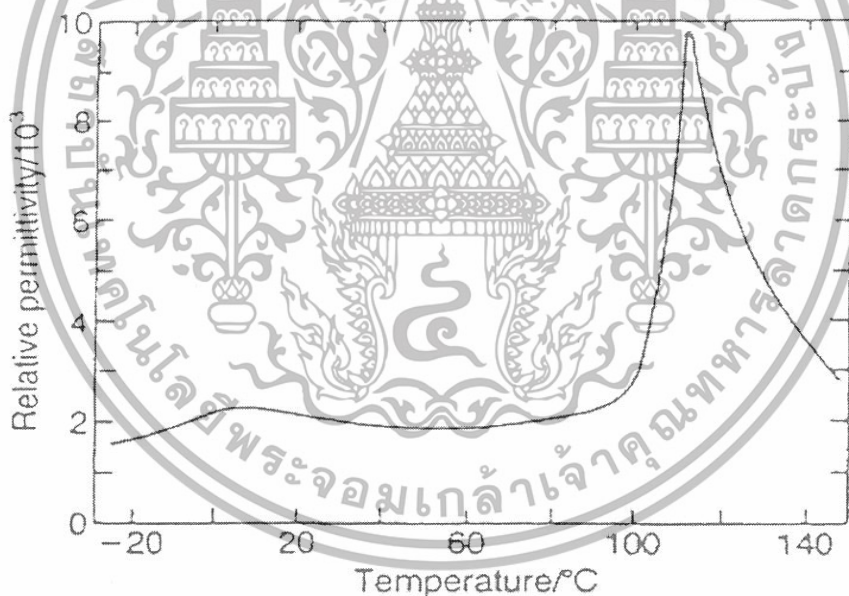
2.2.2.1 แบเรียมไททานเตต (Barium Titanate : $BaTiO_3$)

ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่ใช้กันโดยทั่วไปจะใช้แบเรียมไททานเตต($BaTiO_3$)เป็นไดอิเล็กทริกเนื่องจาก $BaTiO_3$ มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์(relative permittivity , ϵ_r)ที่สูง คือ มีค่าประมาณ 1500-20000 การที่วัสดุ $BaTiO_3$ มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงเพราะเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) สามารถเกิดขั้วขึ้นได้เอง $BaTiO_3$ มีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ไอออน Ba^{2+} อยู่ตรงมุมของยูนิตเซลล์ ไอออน O^{2-} อยู่ตรงกึ่งกลางหน้ายูนิตเซลล์ (face center) ส่วนไอออน Ti^{4+} อยู่ตรงใจกลางยูนิตเซลล์ (body center) ไอออน Ti^{4+} อยู่ในตำแหน่ง octahedral ล้อมรอบด้วยไอออน O^{2-} 6 ไอออนเนื่องจากไอออน Ti^{4+} มีขนาดเล็กกว่าช่อง octahedral จึงมีที่อยู่ได้หลายที่ในช่องว่างจึงเกิดขั้วไอออนิก (ionic polarization) ได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ของ BaTiO_3 [14]
 เนื่องจากอุณหภูมิและสนามไฟฟ้ามีผลต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3 บริสุทธิ์ดังนั้น
 เมื่อทำเป็นตัวเก็บประจุต้องปรับส่วนผสมและลดการขึ้นกับอุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อค่า
 สภาพยอมสัมพัทธ์ของ BaTiO_3 ดังแสดงในรูปที่ 2.14



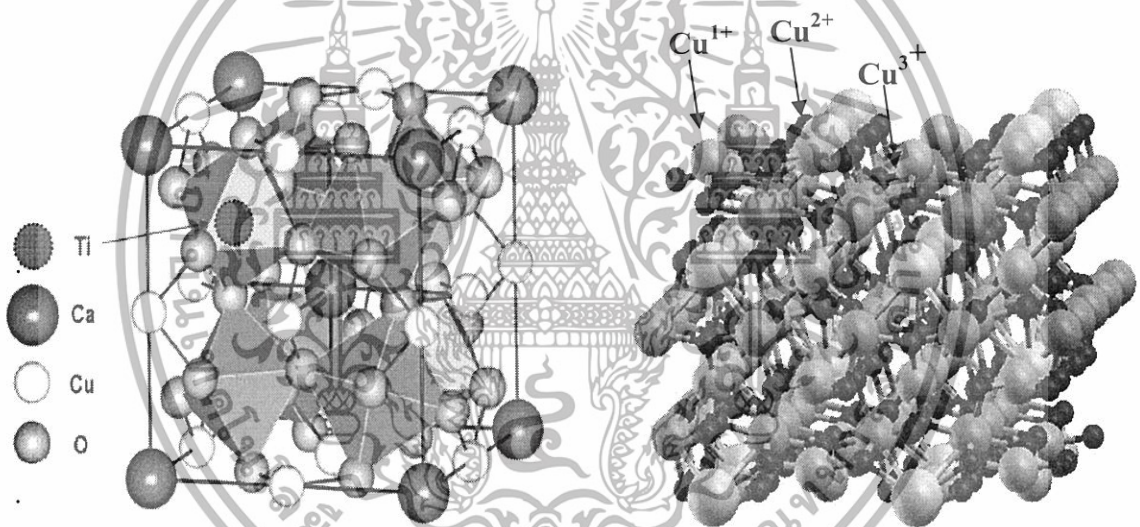
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า relative permittivity ของ BaTiO_3 กับ
 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [9]

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า relative permittivity ของ BaTiO_3 ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ
 อุณหภูมิเปลี่ยนไปถึงค่าหนึ่ง ด้วยเหตุนี้ทำให้ตัวเก็บประจุที่ใช้ BaTiO_3 เป็นไดอิเล็กทริกใช้
 งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัดจึงได้มีการพัฒนาโดยนำแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต
 ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CCTO) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

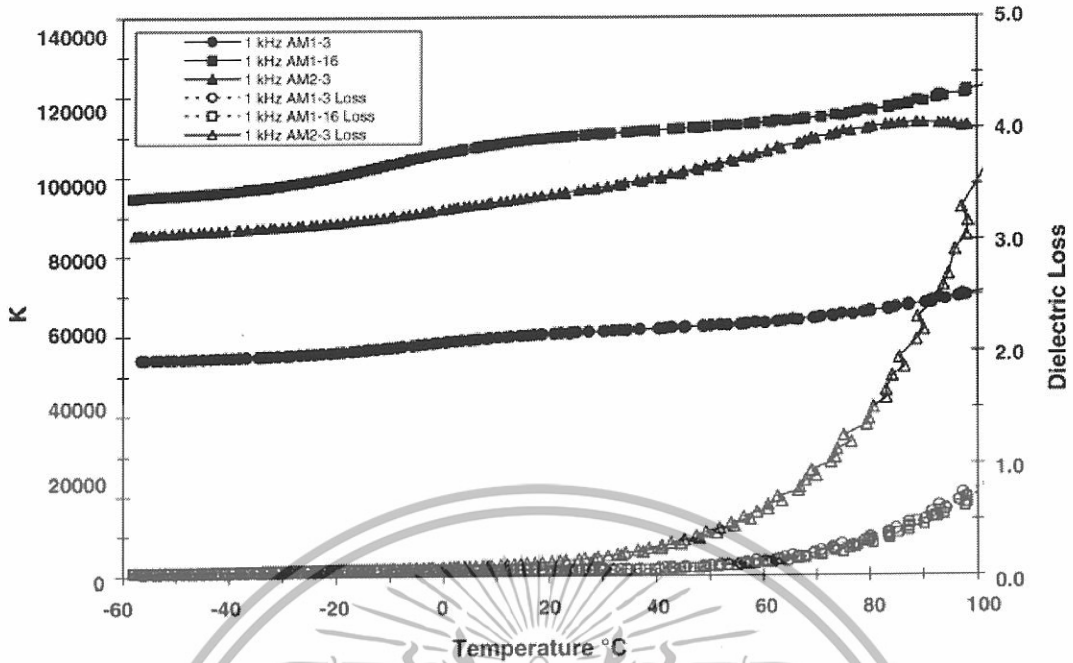
CCTO เป็นเซรามิกซึ่งถูกค้นพบเมื่อไม่นานมานี้[15] พบว่ามีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity, ϵ_r) มากที่สุดถึงประมาณ 80000 สำหรับผลึกเดี่ยว และประมาณ 10000 สำหรับ bulk material ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อมีค่าสูงขึ้นจะสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นและสามารถออกแบบแผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลงได้ จะเห็นได้ว่า CCTO มีสมบัติทางไดอิเล็กทริกดีกว่าเซรามิกชนิดอื่นมาก CCTO มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มหาศาลเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และยังครอบคลุมช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง (-173 ถึง 327 °C) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม CCTO แสดงให้เห็นสมบัติบางอย่างที่ยังไม่สามารถอธิบายให้เข้าใจได้พฤติกรรมดังกล่าวได้แก่ gain boundary การมีอยู่ของ twin boundaries จุดบกพร่องบนระนาบ (planar) การเข้าแทนที่ของ Ti-ions และยังคงค้นหาอธิบายถึงพฤติกรรมดังกล่าวอยู่



รูปที่ 2.15 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์โรฟสไกต์ (perovskite) ของ CCTO [15],[16]

จากรูป โครงสร้างของ CCTO เป็นแบบ Body-center cubic (BCC) โดยมีโครงสร้างเป็นแบบ BCC โดยมี Ti อะตอมอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอลแล้วล้อมรอบด้วยออกซิเจนอะตอม TiO₆ ออกตะฮีดรอลเอียงทำมุม 141° Cu อะตอมสร้างพันธะกับออกซิเจนอะตอม และ Ca อะตอมจะอยู่ที่กึ่งกลางและตรงมุมของยูนิตเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) และค่าพลังงานสูญเสีย (dielectric loss) ของ CCTO ที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 kHz. [4]

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของ CCTO เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่วงกว้างของอุณหภูมิการใช้งาน ด้วยเหตุนี้หากนำ CCTO ไปทำตัวเก็บประจุจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุให้ดียิ่งขึ้น

แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนียมออกไซด์ (CCTO) สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายเทคนิค ในโครงการพิเศษนี้จะสังเคราะห์จากเทคนิค solid solution โดยการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต คอปเปอร์ (II) ออกไซด์ และไททาเนียม (IV) ออกไซด์ แล้วนำส่วนผสมที่ได้ไปทำการ ball-mill เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วผ่านกระบวนการเผา (Calcination) ลักษณะของผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนียมออกไซด์ (CCTO) ที่ได้จะมีสีน้ำตาลค่อนข้างเป็นผงละเอียด

2.3 พอลิเมอร์ [2]

พอลิเมอร์ (polymer) หมายถึงสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดจากการรวมกันของโมเลกุลเล็กๆ จำนวนมากด้วยพันธะโควาเลนต์ คำนวณน้ำหนักโมเลกุลสูงหมายถึงมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 20,000 ขึ้นไป ซึ่งอาจมีจำนวนมอนอเมอร์เป็นล้าน พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลอิสระซึ่งหากต้องการลดขนาดของโมเลกุลลงต้องทำลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างมอนอเมอร์

พลาสติก (Plastics) เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีโมเลกุลหลักประกอบไปด้วยหน่วยอินทรีย์เคมี (organic chemical unit) กันหลายๆ หน่วย ซึ่งพลาสติกสามารถนำไปขึ้นรูปได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการบีบ (mold) และการตัดขึ้นรูป (forming) โดยใช้ความร้อน ความดัน หรือใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน

พลาสติกส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นสารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติแต่เกิดจาก monomer ทำปฏิกิริยากันเป็นพอลิเมอร์โดยพอลิเมอร์ของพลาสติกประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน เป็นธาตุหลักจับตัวกับธาตุอื่นๆ การรวมตัวของอะตอมจะก่อให้เกิดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น และมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน การรวมตัวกันจะขึ้นอยู่กับพลังงานเกาะตัว (energy bonds) และจะพยายามทำให้อะตอมในโมเลกุลมีเสถียรภาพโดยการให้พลังงานเกาะตัวจนหมด เช่น H – F จะเป็นโมเลกุลที่มีเสถียรภาพสูงกว่า C – H

ในปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น ใช้ทำเครื่องใช้ ไม้สอยประจำวัน อุปกรณ์การก่อสร้าง เครื่องมือการแพทย์ ฯลฯ เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ กันไปแล้วแต่ชนิดของพลาสติก โดยทั่วไป Plastics สามารถที่จะแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติได้ 2 ประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และ เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics)

พลาสติกชนิดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในการหลอมตัวและไม่ได้แข็งตัว โดยความร้อนหรือแรงกดดันเข้าช่วยแต่จะอ่อนตัวเมื่อความร้อนค่อยๆ สูงขึ้น และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นถึงแข็งตัว และอาจจะหลอม ละลายไปอีกเมื่อใช้ความร้อนเหมือนกับขี้ผึ้งหรือเทียนที่สามารถนำมาหลอมละลายเป็นแท่งได้อีกแล้วทิ้งไว้ให้เย็นก็จะแข็งตัว

วัตถุดิบสำหรับทำพลาสติกชนิดนี้เป็นผลผลิตที่ได้จากการเกษตรหลายชนิดด้วยกัน และมีวัตถุดิบอื่นมาจากแร่อินทรีย์วัตถุ ก๊าซ ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม หินปูน ซิลิกา กำมะถัน และอื่นๆ ในกรรมวิธีการผลิตนั้นยังมีส่วนผสมอย่างอื่นอีก เช่น ผงสี ตัวละลายผงพลาสติก และวัตถุที่เสริมให้แน่น (filler materials)

สำหรับความหนาแน่น (densities), ความแข็งแรงในการทนแรงดึง (tensile strengths), ความแข็ง (impact strengths) และ อุณหภูมิสูงสุดของการใช้ (maximum use temperatures) ของเทอร์โมพลาสติกบางตัว ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลาสติกชนิดต่าง ๆ มีข้อดีที่เหมาะสมสำหรับจะนำมาใช้ทดแทนวัสดุต่างๆ สำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรม เช่น plastic มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำมากคือ ถ้าเปรียบเทียบกับเหล็กแล้วจะมีค่าเป็น 1/7.8 เป็นต้น แต่ก็มีคุณสมบัติบางตัวที่ไม่ค่อยเอื้ออำนวยสำหรับการนำมาใช้งานมากนักคือค่า ความแข็งแรงในการทนแรงดึง และค่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดอาจจะต่ำไปหน่อย สำหรับเทอร์โมพลาสติกมีหลายชนิดที่สำคัญและใช้กันอยู่โดยทั่วไป ดังนี้ พอลิเอทิลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) อะคริโลไนไตรด์ บิวตะไดอิน สไตรีน (ABS) และพอลิคาร์บอเนต (PC) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมเซตติง (Thermosetting Plastics)

พลาสติกชนิดนี้หลอมตัวเป็นรูปร่างโดยความร้อนและความกด ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มานั้นจะมีความแข็งแรงอย่างถาวร และไม่สามารถนำมาหลอมละลายมาใช้ใหม่ได้อีก เทอร์โมเซตติงมีโมเลกุลเป็นร่างแหเป็นส่วนใหญ่

การผลิตพอลิเมอร์แบบนี้ต้องทำ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกสร้างโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลเส้นเชื่อมโยงไม่มากนัก คือมีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก ขั้นที่สองเรียกว่า “การบ่ม” เป็นการทำปฏิกิริยารสร้างโครงสร้างเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดร่างแหโดยสมบูรณ์ ซึ่งอาจทำได้โดยการผสมกับพอลิเมอร์อื่น หรือผสมตัวเร่งปฏิกิริยา หรือใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น

เมื่อบ่มเสร็จแล้วเทอร์โมเซตติงจะมีคุณสมบัติไม่หลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน แต่อาจสลายตัวฉะนั้นจึงไม่อาจที่จะอัดขึ้นหรือเข้าแบบหล่อใหม่ได้อีก

โดยทั่วไปแล้วข้อได้เปรียบของเทอร์โมเซตติงสำหรับการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมเป็นดังนี้

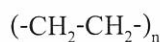
- มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง
- มีความแข็งแรงที่สูง
- มีความคงตัวในเรื่องของขนาดและรูปทรงสูง
- มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปภายใต้ load
- น้ำหนักเบา
- มีลักษณะของการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

เทอร์โมเซตติงมีหลายชนิดที่สำคัญและใช้กันอยู่โดยทั่วไปดังนี้

- ฟีนอลิก(Phenolics) (รู้จักกันดีในชื่อเบกเกตไลท์) พอลิเอสเตอร์(รู้จักกันดีในรูปผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส) และเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น

2.3.1 พอลิเอทิลีน (PE)

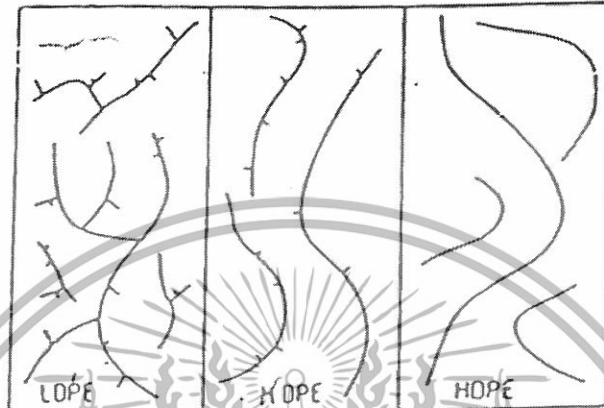
พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติกซึ่งสามารถหลอมแล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน มอนอเมอร์ของเอทิลีน($\text{CH}_2=\text{CH}_2$)มีน้ำหนักโมเลกุล 28 พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว(addition polymerization) ได้พอลิเอทิลีนเป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาว



พอลิเอทิลีน (PE) ผลิตขึ้นเพื่อการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 ที่ประเทศอังกฤษ มีน้ำหนักเบามากในรูปที่เป็นแผ่นบาง ๆ สามารถที่จะงอหรือพับได้ ถ้าจะขึ้นรูปต่างๆ ต้องทำให้หนาพอ สมควร ฝึกขาดได้ยาก เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ทนความร้อนได้น้อยแต่ทนความเย็นได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนจะมีอยู่ 3 ชนิด คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) โดยที่ LDPE จะมีโครงสร้างเป็น branched – chain ในขณะที่ HDPE จะมีโครงสร้างเป็นแบบ straight chain จากโครงสร้างที่เป็นอยู่ทำให้ HDPE มีค่า tensile strength สูงกว่า LDPE



รูปที่ 2.17 ลักษณะ โครงสร้างของพอลิเอทิลีนประเภทต่างๆ[17]

พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งได้หลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในโครงสร้างพฤติกรรมและการประยุกต์ใช้งาน ดังนี้

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โครงสร้างมีโซ่กิ่งยาว มีความหนาแน่นต่ำ 0.915-0.935 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีโซ่กิ่งที่มีสาขาน้อย มีความเป็นผลึกและความหนาแน่นสูงกว่า LDPE มีความหนาแน่น 0.941-0.967 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE) มีโซ่กิ่งน้อยและสั้นๆ มีความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE) มีความหนาแน่น 0.880-0.912 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูง (HMWPE) และสูงมาก (UHMWPE) มวลโมเลกุล 200,000-500,000 สำหรับ HMWPE และ 3,000,000 สำหรับ UHMWPE

ปกติความแข็งแรงของพอลิเอทิลีนมาจากส่วนที่เป็นผลึก ความยืดหยุ่นและการยึดตัวมาจากส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งจะพบทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกัน ค่าTgจะมีผลทางกายภาพน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าT_m ซึ่ง T_mของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ108 ถึง130 °Cโดยค่า T_m ต่ำมากเนื่องจากโครงสร้างของ back bone ที่ยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงระหว่างโมเลกุลที่ต่ำ

พอลิเอทิลีนมีรูปร่างโมเลกุลเป็น planar zigzag ทำให้มีการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลได้ดี เกิดส่วนที่เป็นระเบียบมากและอัดแน่น โดยส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเอทิลีนนี้อธิบายได้โดยใช้ unit cell ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่มีการจัดเรียงตัวต่อกันอย่างมีระเบียบใน 3 มิติ และสามารถจัดแสดงโครงสร้างหลักได้ โดยที่ unit cellในพอลิเอทิลีนเป็นแบบ orthorhombic unit cell มี a = 0.74 nm , b = 0.49 nm , c = 0.25 nm $\alpha=\beta=\gamma=90$ ดังรูปที่ 2.3 พอลิเมอร์ต่างชนิดกันจะมีหน่วยเซลล์ต่างกันทำให้มีความสามารถในการละลาย อุณหภูมิในการหลอมและสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน



รูปที่ 2.18 ลักษณะของหน่วยเซลล์ของพอลิเอทิลีน[17]

สมบัติทั่วไป

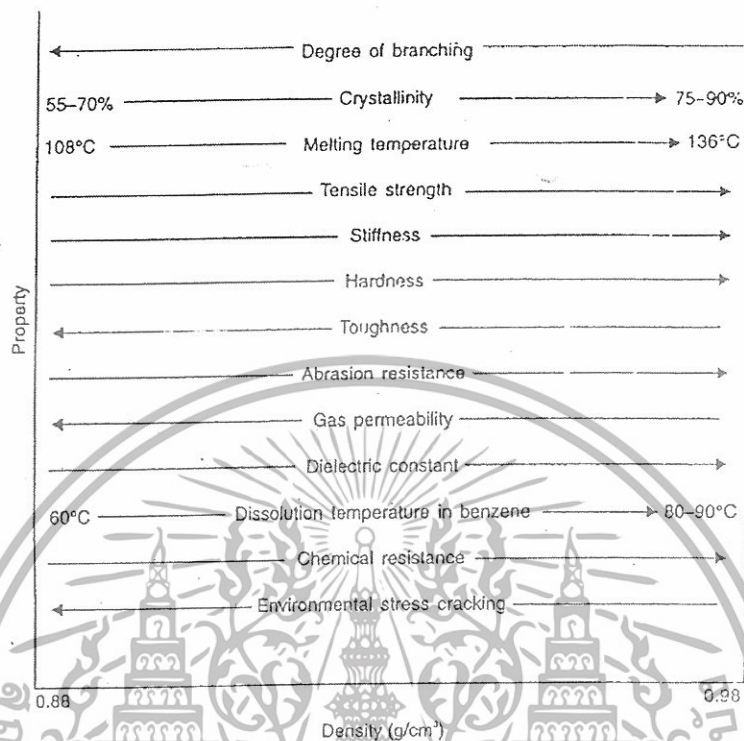
1) สมบัติเชิงกลและความร้อน

ปัจจัยหลักทางด้าน โครงสร้างในการหาสมบัติของพอลิเอทิลีน คือ ปริมาณของความเป็นกิ่งของสายโซ่ที่สั้นและยาว มวล โมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายตัวของพอลิเมอร์

ลักษณะสำคัญอย่างหนึ่ง ในการหาสมบัติและพฤติกรรมของพอลิเอทิลีนในเกรดที่ต่างกันคือกิ่งจำนวนและความยาวของกิ่ง ได้ถูกควบคุมโดยชนิดและตัวแปรต่างๆในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (อุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) หรือตัวริเริ่ม (Initiator) และสารช่วยให้เกิดการถ่ายโอนของสายโซ่ เป็นต้น) โซ่กิ่งจะขัดขวางสายโซ่ของพอลิเมอร์จากการอัดตัวที่เป็นระเบียบและเหนียวแน่น และมีผลต่อความหนาแน่นของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นพิจารณาจากปริมาณของความเป็นกิ่งของพอลิเมอร์ก่อนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันดับแรก โดยความหนาแน่นต่ำจะมีประมาณของความเป็นกิ่งสูง ผลของความหนาแน่นต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลของความหนาแน่นที่มีต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน[18]

การมีกิ่งจะทำให้ไปรบกวนความสามารถในการตกผลึกของพอลิเมอร์ ปริมาณของความเป็นผลึกของ LDPE จะอยู่ที่ 55-70 % เมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE ซึ่งจะอยู่ที่ 75-90 % ช่วงของ T_m ของพอลิเอทิลีน จะอยู่ระหว่าง 108-136 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นกับปริมาณของความเป็นผลึก ดังนั้นจุดหลอมเหลวที่ต่ำ คือ ลักษณะเฉพาะสำหรับโครงสร้างของพันธะ C-C ที่ยืดหยุ่นและปราศจากแรงระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง T_g ซึ่งคือ สัมพันธ์ต่อการไหลของส่วนที่ยาวในอสัณฐาน (Amorphous)

สมบัติอื่นๆ ที่ขึ้นกับความเป็นผลึก (Crystallinity) เช่น ความแข็งเหนียว (Stiffness) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และความต้านทานต่อสารเคมีจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณของความเป็นผลึก ส่วนการซึมผ่านของของเหลวและก๊าซ ความยืดหยุ่น (Flexibility) และความเหนียว (Toughness) จะลดลงภายใต้สภาวะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว แต่มีความเป็นผลึกไม่มีตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง และการละลายจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในขณะที่ทำให้ความร้อนในตัวทำละลายเท่านั้น ปริมาณของความเป็นผลึกที่มากจะทำให้อุณหภูมิของการละลายสูงขึ้น การละลายของ LDPE อยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ส่วนของ HDPE อยู่ที่ 80-90 องศาเซลเซียส

ผลของการมีกิ่งจะขึ้นกับขนาดของสายโซ่กิ่ง (Side chain branches) ซึ่งสายโซ่ที่สั้นมีผลต่อปริมาณของความเป็นผลึก และความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ส่วนโซ่กิ่งที่ยาวจะมีผลเด่นชัดในเรื่องการกระจายตัวของพอลิเมอร์ (Polydispersity) โซ่กิ่ง (Side chain) ของพอลิเมอร์บางครั้งมีความยาวเท่ากับสายโซ่หลัก และทำให้การกระจายตัวของมวลโมเลกุลมีช่วงกว้าง ถ้าพอลิเมอร์มีมวลโมเลกุลที่สูงขึ้นและมีลักษณะเป็นดั่งที่กล่าวมา จะทำให้การกระจายตัวของมวลโมเลกุล (MWD) มีลักษณะที่กว้าง

อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) ต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) คือ ค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1.9-100 แต่สำหรับพอลิเอทิลีนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 20-50 HDPE จะมีค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล 4-15 ค่าการกระจายตัวของโมเลกุลที่สูงของ LDPE เป็นผลมาจากโซ่กิ่งที่ยาวซึ่งในบางครั้งสมบัติที่แสดงไม่สามารถสรุปว่าเกิดจากการมีโซ่หรือมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง หากพอลิเมอร์มีค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุลต่ำลงจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature toughness) จุดอ่อนตัว (Softening point) และความต้านทานต่อการแตกหักจากความเค้นในสถานะแวดล้อม (Resistance to environment stress cracking)

สายโซ่ที่ยาวมีอิทธิพลต่อสมบัติการไหล (Flow properties) โมเลกุลของโซ่กิ่งที่ยาวจะอัดตัวกันแน่นมากและมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกี่ยวพันกับโมเลกุลอื่นน้อยลง ส่งผลให้ความหนืดขณะหลอมเหลว (Melt viscosity) น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีโซ่กิ่ง

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของการหลอมเหลว คือ มวลโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด ความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงกระแทกและอุณหภูมิที่จุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามสมบัติการไหล (Fluidity of the melt) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 อิทธิพลของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนในเกรดต่างๆ[18]

Property	LLDPE	LDPE	HDPE	UHMW-PE	Polymethylene
Density (g/cm ³)	0.910-0.925	0.915-0.935	0.941-0.967	0.930	0.980
Melting Temperature (°C)	125	106-112	130-133	132	136
Tensile strength (MPa)	14.0-21.0	6.9-17.2	18.0-30.0	20.0-41.0	34.5
Elongation at break (%)	200-1200	100-700	100-1000	300	500
Flexural Modulus(Mpa)	248-365	415-795	689-1654	-	-
Izoid impact strength (J/m ²)	-	0.67-21.00	27.00-160.00	No break	-
Hardness(Shore D)	41-53	45-60	60-70	-	-

2) การเสื่อมสภาพ

พอลิเอทิลีนมีความต้านต่อสารเคมีได้เหมือนพาราฟินส์ในทางตรงกันข้ามพอลิเอทิลีนจะไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังที่เกิดในตัวออกซิไดซ์ที่แรง (Strong oxidizing agent) ความต้านทานต่อออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เพราะพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งจะมีการซึมผ่านของก๊าซน้อยลงและมีจำนวนอะตอมเทอร์เชียรีคาร์บอน (Tertiary carbon atom) ในโมเลกุลน้อย (ซึ่งเป็นจุดที่ไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยา)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นกลไกแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) โดยปฏิกิริยานี้จะเป็นแบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (Auto catalyst) ในการเกิดออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ชนิดคือ

(1) เป็นการขาดของสายโซ่ ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจาก การลดลงของมวลโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ในปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงขึ้นจะเกิดจากการรวมตัวของอนุมูลอิสระทำให้เกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์

การที่ชั้นงานพอลิเอทิลีนได้รับความเค้นหรือความเครียด และอยู่ในของเหลวประเภทแอลกอฮอล์ ซัลเฟอร์เนตแอลกอฮอล์ ไฮโดรคาร์บอนเหลว เอสเทอร์ คีโตนและน้ำมัน เป็นต้น จะทำให้พอลิเมอร์เกิดรอยแตกในเวลาอันสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่อยู่ในสภาวะดังกล่าว

3) สารเติมแต่ง

ส่วนมากพอลิเอทิลีนมักถูกใช้โดยไม่มีการใส่สารเติมแต่ง (Additives) ใดๆ แต่บางทีสารเติมแต่ง จะถูกใส่ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะเรื่องการเป็นฉนวนไฟฟ้า พอลิเอทิลีนจะถูกผสมกับสารป้องกันการออกซิเดชัน (Antioxidant) ซึ่งจะป้องกันการเสียหายจากการออกซิเดชัน ฟีนอล(จำนวน0.1%)จะใช้เพื่อป้องกันการออกซิเดชันของสายโซ่จากการออกซิเดชัน โดยจะขัดขวางอนุมูลอิสระของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) ซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิเดชัน และรบกวนการเพิ่มขึ้นของกระบวนการออกซิเดชันโดยอนุมูลอิสระของอะโรมาติกจากฟีนอลจะเสถียรแต่จะไม่เสถียรต่อการเพิ่มขึ้นของ Oxidative chain

สารตัวเติมประเภทเสริมแรง เช่น เขม่าดำ (Carbon black) หรือสารคู่ควบ (Coupling agent) เช่น Silane และ Tiamate จะถูกเติมลงในพอลิเอทิลีนในบางครั้ง สัตว์เลี้ยงใช้ตัวอย่างรอบคอบเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เร่งการออกซิเดชัน โดยทั่วไปสัตว์จะเป็นองค์ประกอบพวกโพลีเอสเตอร์ แคลเซียม แมงกานีส เหล็ก และโครเมียม

การใหม่ของพอลิเอทิลีนจะใช้ฮาโลเจนเนตคอมพาวด์ (Halogenated compound) และแอนติโมนีไตรออกไซด์ (SbO_3) เป็นสารป้องกันการไหม้ไฟ (Flame retarder) เป็นต้น ส่วนสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น Antistatic agent ชนิดไกลลอส อัลคิล เอสเทอร์ ถูกใช้อย่างมาก เพื่อลดการดึงฝุ่น Antiblocking agent (ซิลิกา) ถูกใช้เพื่อป้องกันการติดกันระหว่างชั้นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) Slip agent ถูกใช้เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างชั้นฟิล์ม

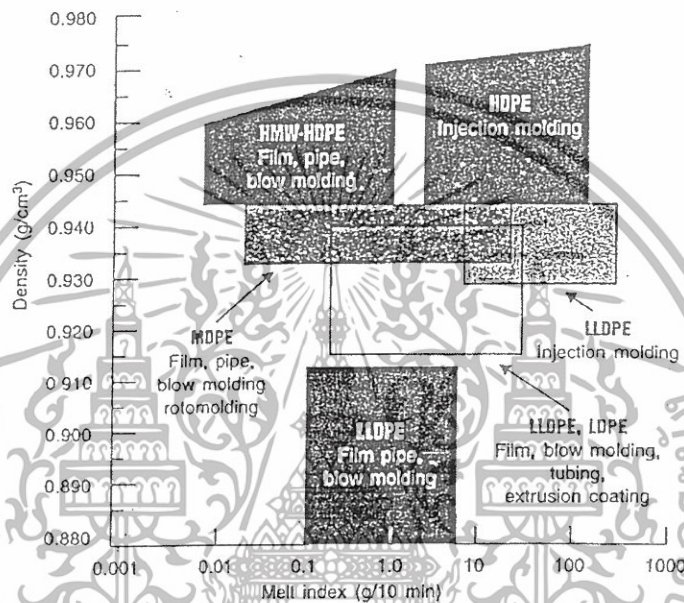
การเติมแป้ง 10-40% ลงใน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นวัสดุไบโอดีเกรเดชัน (Biodegradation material) ถูกใช้สำหรับถุง และใช้สำหรับคลุมพืชผล แป้งจะสลายตัวในดินที่ชื้น ในระยะเวลา 5 ปี ซึ่งจะเหลือเศษของพอลิเอทิลีน และถูกดูดซึมในดิน

ผลผลิตที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1.45 จะใช้ทำ Dielectric material ซึ่งได้จากพอลิเอทิลีนที่มีลักษณะเป็นเซลล์ (Cellular) สารที่ช่วยให้พองตัว (Blowing agent) เช่น 4,4-oxy-bis-benzenesulfonylhydrazide และ azocarbonamide ถูกใส่ลงในพอลิเมอร์ โดยจะสลายตัวในกระบวนการอัดรีด และเปลี่ยนเป็นก๊าซขึ้นไปที่ Cellular extruder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์การใช้งาน

พอลิเอทิลีนได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทนต่อสารเคมีและราคาถูก โดยส่วนใหญ่แล้ว พอลิเอทิลีนจะใช้ทำเป็นฟิล์มสำหรับบรรจุหีบห่อและอุตสาหกรรมเพาะปลูก พอลิเอทิลีนโดยเฉพาะชนิดความหนาแน่นสูงมันนำมาผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปและ นำมาใช้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ของเล่น หีบห่อต่างๆ รวมถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์ด้วย นอกจากนี้พอลิเอทิลีนยังมีสมบัติความเป็นฉนวนทำให้ถูกใช้ในสายเคเบิล ใช้หุ้มสายโทรเลขและใช้เป็นเรดาร์ทางอากาศ



รูปที่ 2.20 การประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นและดัชนีการหลอมเหลว[18]

ข้อดีของพอลิเอทิลีน

- ราคาถูก
- เป็นฉนวน
- ทนความชื้น
- ทนสารเคมี
- ใช้บรรจุอาหารได้ดี
- ขึ้นรูปใช้งานได้โดยกระบวนการทางเทอร์โมพลาสติกต่างๆไป

ข้อเสียของพอลิเอทิลีน

- ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน
- ไม่ทนสภาพดินฟ้าอากาศ
- แฉกหัก ยากที่จะเชื่อมต่อ
- ดัดไฟได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเมอร์นี้อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนเชิงเส้นตรง เพราะพอลิเมอร์นี้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด (มีโซ่สาขาบ้างเล็กน้อย) หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนการในการผลิตจะเป็นปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งและใช้ความดันต่ำ โดยมีบางกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายด้วยซึ่งอุณหภูมิของกระบวนการพอลิเมอร์ที่ได้จะไม่ละลายและอยู่ในรูปแขวนลอยจากนั้นจะเกิดเป็นเม็ดพอลิเอทิลีน กระบวนการแบบสารละลายนี้อาจทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายอย่างสมบูรณ์ออกมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง ใช้ในกระบวนการเป่า (Blow molding) และใช้ทำท่อ อีกชนิดหนึ่งมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) และการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational molding)

สมบัติทั่วไป

เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด โข่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูง (มากกว่า 90%) ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเมอร์ที่เตรียมได้โดยกระบวนการใช้ความดันสูง ซึ่งความหนาแน่นจะอยู่ประมาณ $0.94-0.965 \text{ g/cm}^3$ มีจุดหลอมตัว $135 \text{ }^\circ\text{C}$ มีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำ มีความแข็ง จุดอ่อนตัว ความต้านทานแรงดึงสูง แต่มีความทนทานต่อแรงกระแทก ความยาว ณ จุดขาด ความยืดหยุ่น และความใสต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

- สมบัติทางฟิสิกส์ เป็นสมบัติที่สามารถมองเห็นด้วยตา(Optical Properties)

เนื่องจาก HDPE มีความเป็นผลึกสูง และมีดัชนีหักเหจากส่วนหนึ่งเป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานต่างกันมาก ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางๆ ของ HDPE จะโปร่งแสงในขณะที่แผ่นฟิล์มบางของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะมีลักษณะโปร่งใส

- สมบัติทางเคมี

การละลาย ที่อุณหภูมิห้อง HDPE จะไม่ละลายในตัวทำละลายถึงแม้ว่าจะบวมตัวขึ้นก็ตาม แต่ HDPE จะละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างตัวทำละลาย 2 ชนิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า $30-40 \text{ }^\circ\text{C}$

การสลายตัว (Degradation) HDPE ค่อนข้างคงตัวเมื่อให้ความร้อน แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงในก๊าซที่มีความเฉื่อยปานกลางหรือในสุญญากาศจะเกิดการแตกและเชื่อมระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยปฏิกิริยานี้จะเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า $290-300 \text{ }^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของ HDPE ที่หลอมเหลว HDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1000 จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิระหว่าง 140-200 °C จะเป็นการไหลแบบนิวโตเนียน (non-Newtonian liquid) ความหนืดจะลดลงเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นและมีอัตราเฉือน (Shear rate) ต่ำมากแต่ที่อุณหภูมิ 300 °C HDPE จะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian liquid)

ตารางที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์เอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง[19]

สมบัติ	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
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

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

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

ค่าดัชนีการไหล (MI) ดัชนีการไหลเป็นการวัดน้ำหนักโมเลกุล ถ้าดัชนีการไหลสูง แสดงว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้าดัชนีการไหลต่ำ แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่ามีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ปกติ HDPE จะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40,000-300,000 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วง 0.02-100 กรัมต่อ 10 นาที

ดัชนีการไหลมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE เช่นความสามารถในการขึ้นรูปถ้าค่าดัชนีการไหลมาก การขึ้นรูปก็ง่ายเพราะความหนืดลดน้อยลง แต่สมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลเล็กลง สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้นลง ดังนั้นการรับแรงจึงไม่ดีเท่ากับโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาว แต่เมื่อดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมลดลง

การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล ของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบ-กว้าง ซึ่งขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่า ถ้าการกระจายตัวกว้างจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น เพราะส่วนที่เป็นโมเลกุลเล็กๆ จะเข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันจะทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้นและแบบยาวอยู่ด้วยกัน เวลาขึ้นงานได้รับความเย็นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง และความต้านทานต่อแรงเค้นของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปลำบากมาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมากมาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน

สารเติมแต่ง พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเคมีหรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อให้สมบัติต่างๆดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติก (plastic modifier) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เติมสารเสถียรภาพเพื่อเพิ่มความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต เติมสารเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต เติมสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสันและอื่นๆ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้งาน

HDPE ถูกนำมาแปรรูปให้ได้รูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ใช้ทำภาชนะรองเท้า 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

กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยา

1) กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

กระบวนการนี้เกิดพอลิเมอร์เซชันโดยกลไกแบบ Catalyst-monomer coordinate complex Coordinate catalyst เป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) สารประกอบของโลหะทรานซิชันในหมู่ที่ 4-8 ของตารางธาตุ (เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)

(2) สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก (Organometallic compound) ในหมู่ที่ 1-3 ของโลหะ (เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารวม) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์อะลูมิเนียมอัลคิล

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ซึ่งมีไฮโดรคาร์บอนเหลวความดันที่ใช้น้อยมากประมาณ 2-4 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 50-75 องศาเซลเซียส ที่สภาวะนี้พอลิเมอร์จะไม่เกิดการละลายและเกิดเป็นของเหลวชั้น หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดลงตัวเร่งจะถูกขจัดโดยแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอล หรือ โพรพานอล และถูกสกัดโดยกรดไฮโดรคลอริกใน แอลกอฮอล์ ทำการแยกพอลิเมอร์โดยการเหวี่ยงให้ตกตะกอนและทำให้แห้ง

ในกระบวนการนี้ มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์จะถูกควบคุมโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยอัตราส่วนของอุณหภูมิ-ไทเทเนียมในตัวเร่งหรือใช้สารช่วยให้เกิดการถ่ายโอนของสายโซ่ (Chain transfer agent) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไฮโดรเจน

โครงสร้างพอลิเมอร์ที่ได้จะมีหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ต่ออะตอมของคาร์บอน 1,000 อะตอมและไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่บิวทิล โดยพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.945 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2) กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillip process)

ในกระบวนการนี้ใช้สารประกอบโลหะทรานซิชัน เช่น โครเมียมออกไซด์โดยมี ซิลิกา หรือซิลิกาอะลูมินา (มีซิลิกา 75-90%) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเปลี่ยนแปลง 2 อย่างที่สำคัญ คือ กระบวนการจะเป็นแบบ Solution หรือ Slurry นั้นขึ้นกับอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นมีความสำคัญมากในการควบคุมมวลโมเลกุลของพอลิเอทิลีนในกระบวนการแบบ Solution จะทำให้อุณหภูมิ 130-160 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน จึงทำให้พอลิเมอร์สามารถละลายได้โดยตัวทำละลายที่ใช้คือ ไฮโดรคาร์บอนหลอมเหลว เช่น ไฮโคลเฮกเซน ส่วนในกระบวนการแบบ Slurry จะใช้อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน ดังนั้นความสามารถในการละลายจึงน้อยลง

ความดันที่ใช้โดยทั่วไป คือ 14-35 บรรยากาศ ซึ่งอยู่ระหว่างกระบวนการความดันสูงและกระบวนการซีเกลอร์

HDPE ที่ได้มีความหนาแน่นสูง (0.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และมีโครงสร้างเชิงเส้นที่เกือบสมบูรณ์ โดยมีหมู่เมทิล 3 หมู่ต่ออะตอมคาร์บอน 1,000 อะตอมและไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่เอทิลและบิวทิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์ (Standard oil company (Indian) process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก โดยกระบวนการนี้จะ เป็นแบบ Solution โดยใช้เมทัลออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โมลิบดีนัม ไตรออกไซด์บนตัวพวยง เช่น อะลูมินา อุณหภูมิที่ใช้ 200-300 องศาเซลเซียส และความดันที่ใช้โดยทั่วไป 40-100 บรรยากาศ พอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่น 0.96 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรและมีโครงสร้างเชิงเส้นที่เกือบสมบูรณ์เช่นเดียวกับกระบวนการฟิลลิปส์

4) กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ก๊าซเฟส (Union Carbide gas phase process)

HDPE ที่ผลิตโดยกระบวนการก๊าซเฟส เอทิลีนจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการเดียวกับ Fluidizing gas อุณหภูมิที่ใช้ 70-100 องศาเซลเซียส และความดันที่ใช้โดยทั่วไป 7-20 บรรยากาศ โดยจะใช้โลหะทรานซิชัน ที่มีประสิทธิภาพสูงแบบฟิลลิปส์ (โครเมียมออกไซด์) หรือ ซีเกลอร์ (ไทเทเนียม) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เม็ดของพอลิเอทิลีนจะเกิดบนอนุภาคของ ตัวเร่งซึ่งอยู่ใน Fluidized bed

พอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีความหนาแน่น 0.94-0.96 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร

5) กระบวนการเมทัลโลซีน (Metallocene-based process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งที่ใหม่ที่สุด โดยความแปลกใหม่ของ กระบวนการนี้ จะมีความแม่นยำในการควบคุมลักษณะที่เหมือนกันของความยาวสายโซ่ ปริมาณของความเป็นกิ่ง และ Stereoregularity ของพอลิเมอร์

กระบวนการเมทัลโลซีนเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมาก โดยปริมาณผลผลิต ที่ได้มากคือ ได้พอลิเมอร์ 1 ตันต่อกรัมต่อตัวเร่งต่อชั่วโมง

เมทัลโลซีนจะมีสูตร L_2MX_2 โดย M คือโลหะทรานซิชันหมู่ 4 เช่น ไทเทเนียม X คือหมู่แฮโลเจนหรือ อัลคิล ฟีนิล เบนซิล และ L ลิแกนด์

เมทัลโลซีนเชิงซ้อนที่ใช้จะมี 2 ประเภท คือ ระบบ Bicomponent และระบบ Single component โดยในระบบ Bicomponent นั้นผลผลิตจะมากที่สุดระหว่างอุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส แต่จะมีมวลโมเลกุลมากที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะใช้ไฮโดรเจนในการควบคุมมวล โมเลกุล ส่วนในระบบ Single component อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง -20-15 องศาเซลเซียส

2.4 คอมโพสิต[20]

Composite Materials : วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทขึ้นไป อาจเป็นการ ผสมหรือการสร้างพันธะ

1. เกิดจากการผสมระหว่างวัสดุ องค์ประกอบอยู่ในระดับที่สามารถมองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ประกอบด้วยซีเมนต์ ทราย หิน และ น้ำ

2. เกิดจากการสร้างพันธะขององค์ประกอบอยู่ในระดับ โมเลกุล ถ้าเป็นหลักเรียกว่าอัลลอย ถ้าเป็นพลาสติกเรียกว่าพอลิเมอร์ โดยทั่วไปคอมโพสิตหรือวัสดุเชิงประกอบนี้จะประกอบด้วยตัวเสริมแรงหรือมีลักษณะเป็นพวกเส้นใย อนุภาค แผ่นหรือชิ้นเล็กๆ และ/หรือเป็นสารตัวเติมกระจายอยู่ในเนื้อหลักหรืออาจเป็น พอลิเมอร์ โลหะ หรือ เซรามิก ตัวเสริมแรงเหล่านี้จะทำให้สมบัติทางกลโดยรวมของเนื้อหลักดีขึ้น วัสดุผสมที่ออกแบบเหมาะสมจะมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุเพียงชนิดเดียว

คอมโพสิตเป็นวัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุชนิดอื่นมาอยู่ด้วยกัน โดยมีโครงสร้างในแบบต่างๆ เป็นการนำมารวมกันโดยที่เนื้อของคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน มีสมบัติรวมของวัสดุที่นำมาอยู่ร่วมกันและไม่สามารถหาได้จากวัสดุชนิดเดียวที่มีปัญหาจากการที่สมบัติชนิดหนึ่งจะมีความสัมพันธ์ผกผันกับสมบัติอีกชนิดหนึ่ง

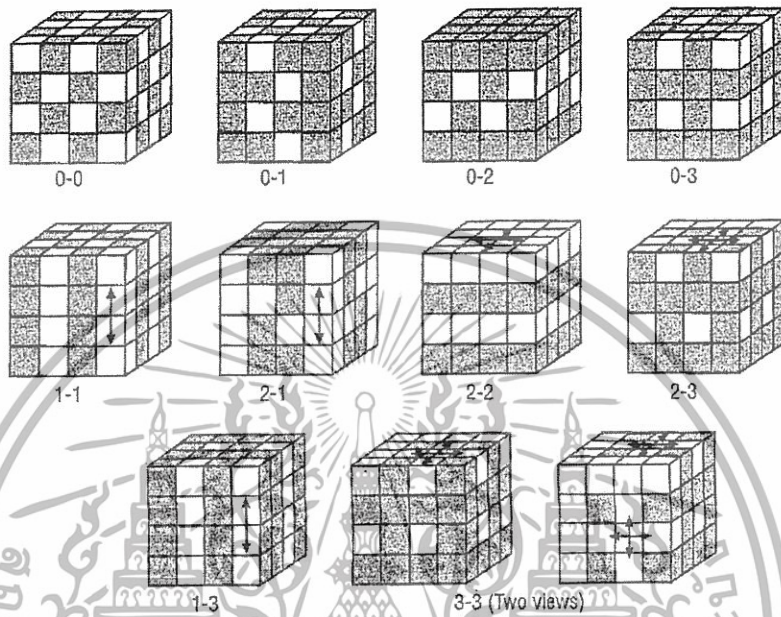
วัสดุแต่ละชนิดจะมีทั้งข้อดีข้อเสีย เช่น โลหะจะมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่เป็นสนิมง่ายและหนัก พอลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนไม่ได้ นำไฟฟ้าไม่ได้ เซรามิกมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอและการผุกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้ดี แต่เปราะ มีความเหนียวต่ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาวัสดุต่างชนิดมาผสมกันเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติพิเศษที่ได้จากข้อดีของวัสดุแต่ละชนิด เราเรียกวัดุดกลุ่มนี้ว่า คอมโพสิต หรือ วัสดุผสม (composite materials) เช่น คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุผสมที่จะให้ทั้งความแข็งแรง (จากคอนกรีตซึ่งเป็นเซรามิกส์) และความเหนียว (จากเหล็กซึ่งเป็นโลหะ) หรือไฟเบอร์กลาสซึ่งได้จากการนำเอาพอลิเมอร์ซึ่งมีน้ำหนักเบาผสมกับใยแก้ว ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฟเบอร์กลาส

เราอาจแบ่งกลุ่มวัสดุผสมออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (fiber-reinforced polymers, FRP) กลุ่มที่มีเซรามิกส์เป็นส่วนผสมหลัก (ceramic-matrix composite, CMC) และกลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (metal-matrix composite, MMC) นอกจากนี้ เรายังอาจแบ่งตามลักษณะของวัสดุที่เรานำมาผสมกันคือ กลุ่มที่ส่วนผสมเสริมมีลักษณะเป็นผง (particulate composites) กลุ่มที่มีส่วนผสมเสริมมีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous composites) ซึ่งอาจจะแบ่งย่อยออกไปเป็นกลุ่มเส้นใยสั้นและกลุ่มเส้นใยยาว กลุ่มสุดท้ายคือ กลุ่มวัสดุผสมชนิดซ้อนแผ่น (laminated composites)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 คอมโพสิตแบบ 0-3

คอมโพสิตแบบ 0-3 คือคอมโพสิตที่มีวัสดุผสม 2 องค์ประกอบที่มีการเชื่อมโยงแบบที่มีเมทริกซ์ล้อมรอบอนุภาคซึ่งมาจากแนวความคิดเรื่องสภาพการเชื่อมต่อ (connectivity) ถูกเสนอโดย R.E. Newham และคณะ ณ The Pennsylvania State University ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 2.21 รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุผสม 2 ชนิด [13]

2.4.2 พอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composites)

พอลิเมอร์คอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยแยกเป็นคนละวัฏภาคและทำให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยที่พอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นจะต้องมีส่วนประกอบอย่างน้อยหนึ่งส่วนเป็นพอลิเมอร์ซึ่งเรียกว่า เมทริกซ์ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์และอีกส่วนเป็นวัสดุอื่นเรียกว่า วัฏภาคกระจายตัว (Disperse phase) หรือส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

คอมโพสิตจัดว่าเป็นวัสดุที่สำคัญมาก ในปัจจุบันเป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการดังนี้ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น มีความเหนียว มีค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ลดต้นทุนการผลิตและสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ เซรามิก เป็นต้น

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นกับปริมาณสารตัวเติม รูปร่างของวัสดุและพื้นผิวสัมผัส การจัดเรียงของวัฏภาคที่เป็นแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic phase) ให้อยู่ในทิศทางที่เหมาะสมและแน่นอนนั้นเป็นสิ่งสำคัญ และวัสดุที่มีความเป็นแอนไอโซโทรปิกมากจะยิ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติของคอมโพสิตมากด้วย สารเสริมแรงประเภทเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

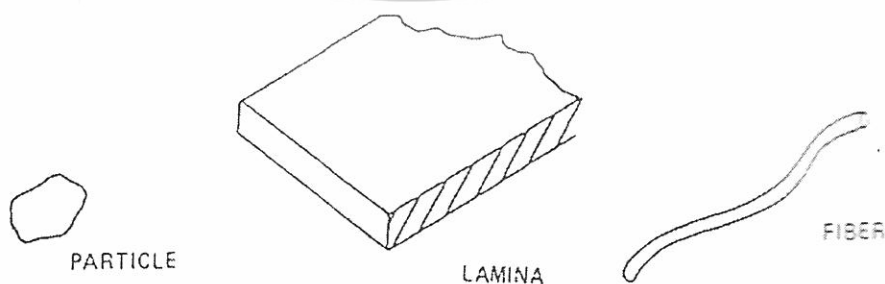
และเป็นเกร็ดจะส่งผลกระทบต่อคอมโพสิตมากกว่าสารเสริมแรงที่เป็นวงกลม กล่าวคือทรงกลมจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปร่างของช่องว่างภายในคอมโพสิตที่สามารถลดการผ่านแรงในการเคลื่อนไหวที่ส่งผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นแอนไอโซโทรปิกได้ และมักมีการใช้ลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของส่วนเสริมแรง เพื่อแบ่งประเภทของคอมโพสิต

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นกับ

- คุณสมบัติของวัฏภาคกระจายตัวและสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์
- ปริมาณของวัฏภาคกระจายตัว
- การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายตัว
- ช่องว่าง(Voids)หรือตำหนิ(Flaws)ในชิ้นงานคอมโพสิต
- การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคกระจายตัวและพอลิเมอร์เมทริกซ์
- กระบวนการผลิต
- ขนาดและรูปร่างของวัฏภาคกระจายตัว

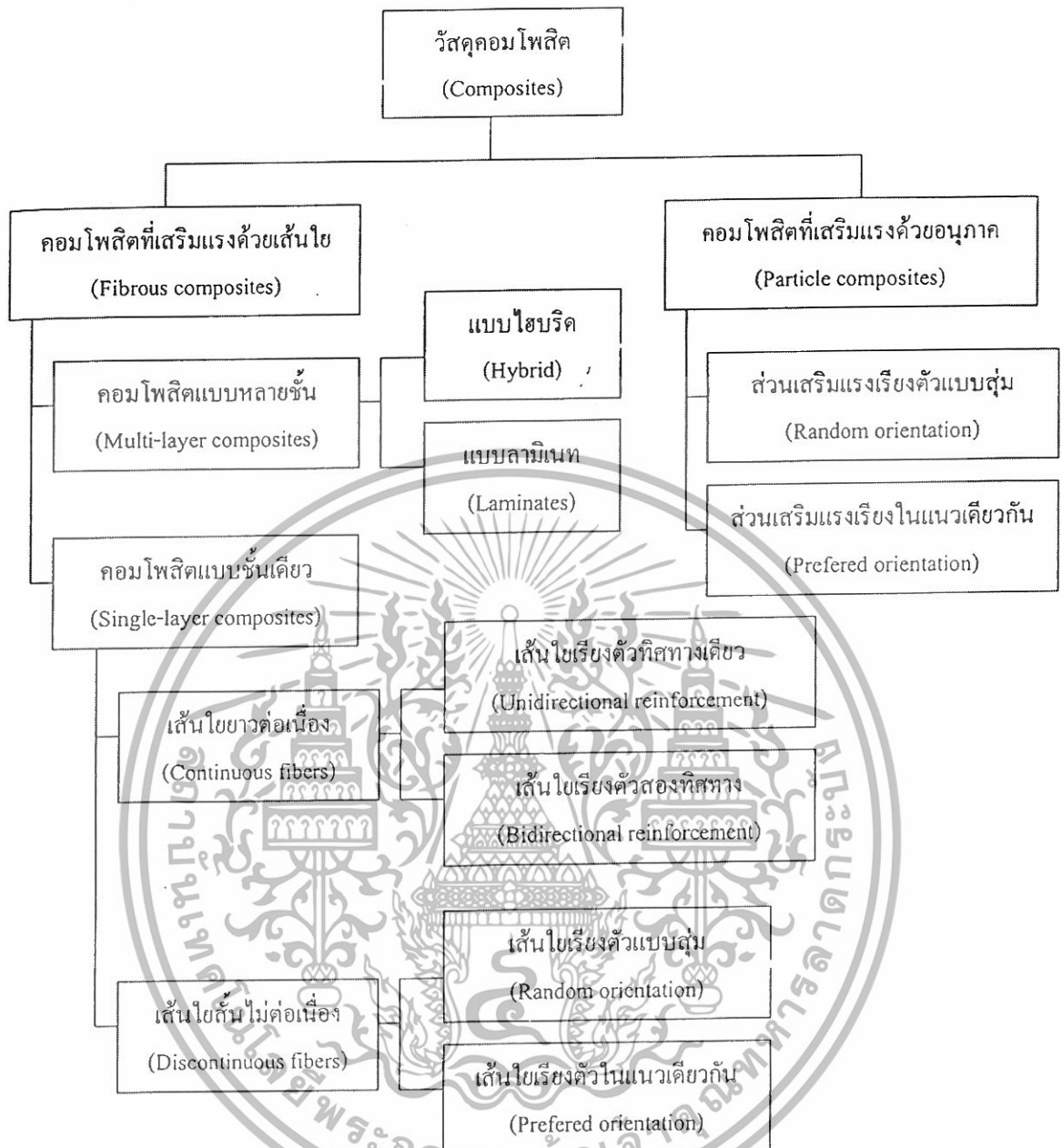
คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆแบ่งตามชนิดของวัฏภาคกระจายตัวดังนี้

1. คอมโพสิตแบบอนุภาค(Particulate composites) เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัวและขนาดต่างๆกัน อาจเป็นผง เม็ด หรือผลึก
2. คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites) เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมทริกซ์ในลักษณะคล้ายแซนวิชอัดด้วยความดันสูงซึ่งจะได้เป็นชั้นๆ
3. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์ซึ่งเส้นใยอาจเป็นเส้นใยคาร์บอน(Carbon fibers) เส้นใยอินทรีย์(Organic fibers) เส้นใยอารามิด(Aramid fibers) เส้นใยแก้ว(Glass fibers)(Aramid fibers)หรือเส้นใยธรรมชาติ (Nature fibers)



รูปที่ 2.22 ชนิดของคอมโพสิต[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง[20]

2.4.2.1 พอลิเมอร์เมทริกซ์

เมทริกซ์เป็นส่วนที่ช่วยห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกันซึ่งโดยทั่วไปเมทริกซ์มักจะมี ความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง หน้าที่ของเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่

- 1 รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุคอมโพสิต

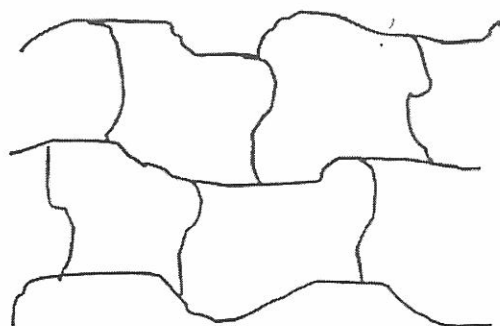
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. รักษาการกระจายตัวของวิภาคกระจายตัวและแยกไม่ให่วิภาคกระจายตัวมารวมกัน
 3. ทำให้คอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่งๆ
 4. สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังวิภาคกระจายได้
 5. ช่วยให้ทันทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ
- พอลิเมอร์เมทริกซ์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่เทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลายคือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแหแต่เมื่อผ่านกระบวนการ โดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทนไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมและมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงสร้างสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และด้านการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมทริกซ์มีความแข็งแรงมาก หรือมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงแต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้วน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงจะลดลงซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ มีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว

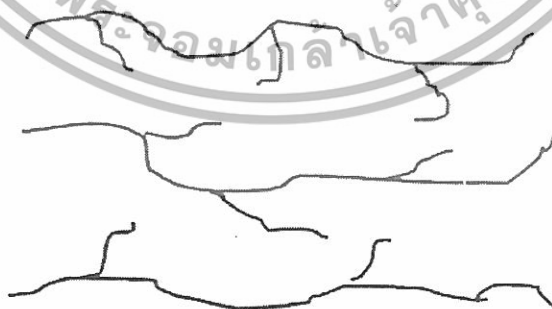
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต[20]

2 . เทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัญฐาน(Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน(Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัญฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยงและในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมีการจัดเรียงตัวที่ดีทำให้มีทรินซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองค์ประกอบความเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวกันของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับสภาวะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่นพอลิเอไมด์ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน

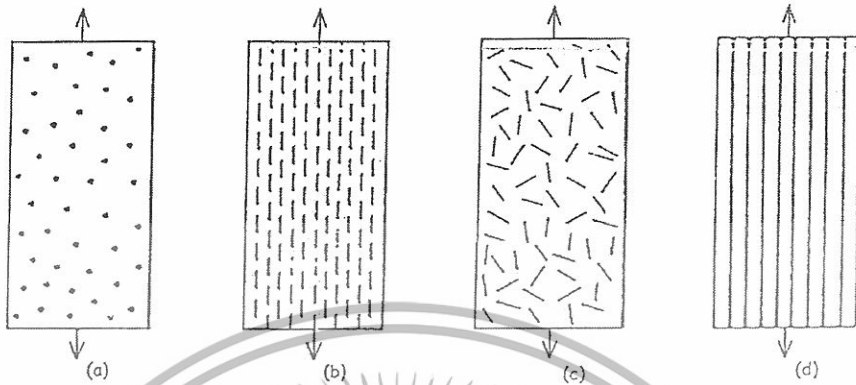


รูปที่ 2.25 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง(Reinforcement phase) มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใยหรืออนุภาคเล็กๆก็ได้



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน[20]

- (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
- (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำพอลิเมอร์คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงซึ่งเป็นเมทริกซ์มาผสมกับเซรามิกส์คือ CCTO ซึ่งเป็นวัสดุภาคกระจายตัวเพื่อทำเป็นวัสดุคอมโพสิตซึ่งจัดอยู่ในประเภทคอมโพสิตแบบอนุภาค สำหรับพอลิเอทิลีนนั้นมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ต่ำ (มีความสามารถในการเก็บประจุต่ำ) ดังตารางที่ 2.5 โดยทำการปรับปรุงคงไดอิเล็กทริกที่ต่ำของพอลิเอทิลีนให้มีค่าไดอิเล็กทริกที่ดีขึ้นและทำการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงเปราะของเซรามิกส์ให้มีความยืดหยุ่นดีขึ้นทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง มีค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่ายและลดต้นทุนการผลิต เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเก็บประจุในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) [9]

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
พอร์ซเลนส์	6
ไมกา	7
แบเรียมดีทานเนต(BaTiO_3)	1,500-20,000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Julie J. Mohamed^a, Sabar D. Hutagalung^a, M. Fadzil Ain^b, Karim Deraman^c, Zainal A. Ahmad^{a,*}[3] $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) เต็มที่ได้โดยเทคนิค solid state ตัวอย่างกลายเป็นแก้วที่ 900 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง และ เผาที่ 1,050 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง XRD ทำให้ทราบถึงโครงสร้างของ CCTO โครงสร้างขนาดไมโคร ตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค SEM XRD ให้ผลที่สามารถแยกแยะ ทั้งตัวอย่าง เสมือน CCTO เฟสเดียว ด้วยเหตุที่โครงสร้าง แสดงให้เห็น ถึง การเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ และรูพรุนขนาดใหญ่ การเผาได้ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 950-1,050 องศาเซลเซียส นาน 3-12 ชั่วโมง การเพิ่มอุณหภูมิของการเผาทำให้ความหนาแน่นและ secondary formation ของ Cu_2O รอยต่อของเกรนที่ชัดเจนและความหนาแน่นของโครงสร้างระดับไมโคร ที่มี ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงการเผาตัวอย่าง ที่ 1,040 องศาเซลเซียสนาน 10 ชั่วโมง จะให้ รูปแบบของขนาดเกรนที่ชัดเจน และให้ค่า ϵ_r ที่สูงที่สุด การควบคุมอุณหภูมิการเผาและระยะเวลาการเผา จะมีผลต่อลักษณะ โครงสร้างและสมบัติไดอิเล็กทริก ตัวอย่างที่ทำการเผา ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงจะเกิดการหลอมและอัตราการเติบโตของเกรนผิดปกติ ผลกระทบสภาวะการเผาที่แตกต่างกัน ที่มีต่อความหนาแน่น รูปแบบเฟส โครงสร้างระดับไมโคร และ คุณสมบัติไดอิเล็กทริก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผาทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้น ความชัดเจนของเกรนและความหนาแน่นของโครงสร้างระดับไมโคร ที่ได้รับ สำหรับตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง และตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1,040 องศาเซลเซียส นาน 3, 6, 10 ชั่วโมง การหลอมของเกรน ในตัวอย่าง ที่เผาที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง พบว่า จะมีเฟสใหม่เกิดขึ้น, Cu_2O ค่า ϵ_r ที่สูงที่สุด 33,210 กับ โครงแบบเกรนที่ชัดเจน ได้จากตัวอย่างที่มีการเผา ที่อุณหภูมิ 1,040 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง

Shuying Yang^{*}, Rogelio Benitez, Arturo Fuentes, Karen Lozano^{*}[23] งานวิจัยนี้ได้ทำคอมโพสิตระหว่าง Vapor grown carbon nanofiber reinforced (VGCNF) กับ พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้วิธี High shear mixing แล้วขึ้นรูปด้วยวิธี Hot pressing ได้ชิ้นงานเป็นแผ่นซีท นำไปตัดให้บางแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางไดอิเล็กทริก โดยได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆทาง dielectric คือศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r), loss factor, $\tan\delta$ และ Ionic conductivity ของ pure HDPE และ คอมโพสิต โดยความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง $0.01-10^7$ Hz และอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง $35-120$ °C พบว่าสมบัติไดอิเล็กทริกของ pure HDPE ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่อย่างเล็กน้อยโดยค่า ϵ_r ลดลงเล็กน้อยเมื่อความถี่และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับปริมาณ nanofiber ที่ใส่ลงไป ในคอมโพสิตเป็นอย่างมากพบว่าค่า ϵ_r , loss factor และ $\tan\delta$ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ nanofiber เพิ่มขึ้นและ ϵ_r , loss factor และ $\tan\delta$ ลดลงเมื่ออุณหภูมิและความถี่เพิ่มขึ้น ที่ความถี่สูงซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถเปลี่ยนตามสนามไฟฟ้าได้ทัน เนื่องสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้ไอออนเกิดการแพร่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าไม่ทัน ทำให้เกิดประจุสะสมลดลง จึงทำให้ค่า ϵ_r ลดลงตามมา งานวิจัยนี้ใช้ปรากฏการณ์ Percolation ในการวิเคราะห์ค่า ϵ_r ของคอมโพสิตว่าควรจะใช้ปริมาณ VGCNF เท่าใดจึงจะเหมาะสมและให้ได้ค่า ϵ_r สูงที่สุด

H.C. Pant, M.K. Patra, Aditya Verma, S.R. Vadera, N. Kumar *[24] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติไดอิเล็กทริกที่ได้จาก X-band ของคลื่นความถี่ไมโครเวฟของคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนต (barium titanate) กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ 2 ชนิดคือ พอลิแอนิลีน (polyaniline, PANI) และ มาลิกอิกเรซิน (maleic resin) โดยนำมาผสมกันด้วยวิธี mechanically grinding จากการสังเกตพบว่า คอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนตกับมาลิกอิกเรซินแสดงสมบัติเหมือนคอมโพสิตทั่วไปและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นไปตาม asymmetric Bruggeman model ในการเปรียบเทียบคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนตกับพอลิแอนิลีนแสดงให้เห็นพฤติกรรมที่แปลกออกไปในกรณีที่ความเข้มข้นของพอลิแอนิลีนต่ำๆ (5wt.%) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแบเรียมไททาเนตลดลงอย่างมาก ซึ่งการเกิดลักษณะดังกล่าวสามารถได้จากพื้นฐานการเกิดอนุภาคแบเรียมไททาเนตด้วยพอลิแอนิลีน การเปลี่ยนแปลงเป็นผลจากการเกิดการดูดซับบริเวณพื้นผิวสูงและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของแบเรียมไททาเนตกับพอลิแอนิลีนซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ได้

Lijie Dong, a,b Chuanxi Xiong, a,b,* Hongying Quanb and Guanghui Zhaoa [25] วัสดุประกอบพอลิเมอร์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงและค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกที่ต่ำถูกพัฒนาโดยการผสม polyvinyl-butyril (PVB) กับ เซรามิก lead zirconate titanates (PZT) การพึ่งพาของค่าไดอิเล็กทริกที่มีต่อค่าความถี่ และสัดส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ วัสดุประกอบแสดงให้เห็นค่าไดอิเล็กทริกที่สูงที่ซึ่งให้ความเสถียรของความถี่ที่ดีกว่าและค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่า ค่า

ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดมีค่า 155 และค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุดมีค่า 0.05 ซึ่งทำการวัดที่สัดส่วนโดยปริมาตรของ PVB 0.15 วัสดุประกอบของ PVB/PZT เตรียมได้จากการผสมที่ไม่ยุ่งยากและวิธี hot pressure พบว่า PVB/PZT คอมโพสิตมีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุประกอบพอลิเมอร์-เซรามิกชนิดอื่นๆ โดยมีค่าไดอิเล็กทริกสูงสุด มีค่า 155 ที่ปริมาตรโดยสัดส่วน ของ PVB 0.15 การที่มีอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ต่ำและความยืดหยุ่นที่ดีของวัสดุประกอบชนิดนี้ ทำให้เป็นที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Heng Chen *, **Xianlin Dong**, **Tao Zeng**, **Zhiyong Zhou**, **Hong Yang** [26] วัสดุประกอบพอลิเมอร์กับเซรามิก Lead zirconate titanate (PZT) ถูกสังเคราะห์โดยการใส่พอลิเมอร์ให้แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของ เซรามิก PZT การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงบทบาททางด้านคุณสมบัติเชิงกลและไฟฟ้าที่ขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก การลดลงของปริมาตรโดยสัดส่วนของเซรามิก ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุประกอบลดลง ขณะที่ hydrostatic figure of merit เพิ่มขึ้นสำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกค่าเดิม ค่า fracture strength ของวัสดุประกอบ PZT/polymer มีค่ามากกว่าเซรามิกPZT Hydrostatic figure of merit ของวัสดุประกอบที่สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก 68% มีค่ามากกว่า $5000 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ซึ่งค่านี้มีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบชนิดอื่นที่เคยมีมา ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากัน ทำให้วัสดุประกอบชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานในด้าน อุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) วัสดุประกอบ PZT/polymer เตรียมได้โดยการใส่ เรซินไฮโดรคาร์บอนเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของเซรามิก PZT ครอบคลุมในช่วงสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่ 68-87 % เนื่องจากการลดลงของสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกทำให้ความหนาแน่นของเซรามิกรูพรุนและวัสดุประกอบลดลง

Cao Li a, *, **Yi Gu a**, **Liu Xiaobo b**, **Zou Yaobang c**, **Tang Anbingc** [27] การบรรจุไททาเนียมในฟิล์มผสม polyarylene ether nitriles (PEN) ทำได้โดยกระบวนการ sol-gel อนุภาค TiO_2 ระดับนาโนพบว่ากระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ คุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่วัดได้พบว่ามีค่าไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างคงที่แบบความสัมพันธ์เส้นตรงเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิ gel จะมีผลในการลดค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริก อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีผลกระทบต่อค่าไดอิเล็กทริกเล็กน้อย ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้งานด้านไดอิเล็กทริกของฟิล์มผสม PEN/ TiO_2 จาก SEM แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคอินทรีย์(TiO_2) มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้อย่างกลมกลืน จาก TGA เผยให้เห็นถึงความเร็วอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TiO_2 และการเติม TiO_2 ลงไปทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มผสมสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรด Guarantee analysis บริษัท Sigma-Aldrich GmbH ความบริสุทธิ์ 98.5 %
2. คอปเปอร์(II)ออกไซด์ (CuO) เกรด ACS-for analysis 99% บริษัท Carlo erba reagenti ความบริสุทธิ์ 99.0 %
3. ไทเทเนียม(IV)ออกไซด์ (TiO_2) เกรด Guarantee analysis บริษัท Sigma-Aldrich GmbH ความบริสุทธิ์ 99.0 %
4. เอทานอล เกรดการค้า
5. เม็ดพลาสติก โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดการค้า บริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดแบบชนิดฉีด
2. เครื่องผสมแบบ (Ball Mill)
3. เต้าเผา
4. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal testing machine)
5. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ชนิดD (Durometer hardness shore D)
6. เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า LCR meter
7. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope,SEM)
9. เครื่องทดสอบความหนาแน่น
10. เครื่องตัดชิ้นงาน
11. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SARTORIUS
12. แท่นให้ความร้อน (Hot Plate)
13. ตู้อบ อุณหภูมิ 1000 °C
14. แท่งแม่เหล็กปั่นกววน
15. ขวดพลาสติกแข็ง
16. ปีกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. ลูกบดชนิด เซอโครเนียม
18. กระจกกรองสาร
19. แท่งแก้วคนสาร

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) โดยเทคนิค Solid

Solution

เตรียมสารละลายของแข็งของ CCTO ตามสมการ



ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนต 16.30 กรัม คอปเปอร์ออกไซด์ 38.85 กรัม และไทเทเนียม (IV)ออกไซด์ 52.03 กรัม แล้วนำสารมาผสมกันแล้วทำการ ball – mill เป็นเวลา 18 ชั่วโมง โดยเม็ด ball ที่ใช้เป็นเม็ดเซอโครเนียม และใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นกรองเอาสารที่ได้แล้ว นำไปประเหยเอทานอลออกให้หมด แล้วนำสารไปเผา(calcination) ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ใช้ heating rate 10 °C / min จะได้ผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट(CCTO) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลแล้วนำผงCCTOที่ได้ไปball – mill เป็นเวลา 18 ชั่วโมงอีกรอบเพื่อทำให้ผงCCTOมีขนาดเล็กลงใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นกรองเอาสารที่ได้ แล้วนำไปประเหยเอทานอลออกให้หมด แล้วทำการเก็บผงที่ได้ใส่ถุงพลาสติก ปิดผนึกเพื่อนำไปใช้เตรียมคอมโพสิตต่อไป

ตอนที่ 2 การขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

1. นำผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ผสมกับเม็ดพอลิเมอร์เอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในอัตราส่วน 10, 20, 30, และ 40 % โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมแบบชนิดสองลูกกลิ้ง โดยให้อุณหภูมิของลูกกลิ้งหน้าและหลังเท่ากับ 150 และ 140 °C ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างช่องว่างของลูกกลิ้งเท่ากับ 3.00 มิลลิเมตร
2. นำส่วนผสมแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट (CCTO) ผสมกับเม็ดพอลิเมอร์เอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ทุกอัตราส่วนมาขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

ตอนที่ 3 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า ตรวจสอบมาตรฐานวิทยา และหาความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตที่ได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) และ โปรแกรม WINDAP ในการคำนวณค่าต่างๆโดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปคัมเบลล์ โดยสภาวะที่ใช้ทดสอบ คือ

Test speed	: 110 mm/min
Gauge length	: 30 mm
Load cell	: 5.00 kN
Cell class	: 0.5

- นำชิ้นงานที่ได้จากวิธี injection moulding ที่แม่พิมพ์เป็นรูปคัมเบลล์มาทดสอบความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดโดยเครื่อง Universal testing machine ตามสภาวะที่กำหนด จำนวน 4 ชิ้น

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

ใช้การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 สัมผัสพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีความเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร อ่านค่าหลังจากกดไป 15 วินาที

- ส่วนขอบชิ้นงานที่เหลือนำไปวัดความแข็งกดโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness shore D) โดยใช้ตัวอย่างที่มีความหนาประมาณ 0.25 นิ้ว ทำการวัดประมาณ 10 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย

3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry , DSC ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Enthalpy) และความไม่เป็นระเบียบ (Entropy) โดยทำการหาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

(% Crystallinity) ของพอลิเมอร์โดยใช้อัตราการให้ความร้อน $20\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{นาที่}$ การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมชิ้นงานให้มีความเรียบ มีพื้นที่ผิวมาก โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดเล็กบาง และมีผิวเรียบ ใช้ตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัม จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้วัดสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) อุณหภูมิตั้งแต่ $50 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของ ชีงงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของชีงงานตัวอย่างที่เตรียมได้โดยเริ่มจากการทำ ขั้วไฟฟ้า ให้กับชีงงานตัวอย่าง จากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกด้วยการวัด ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์(ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางความร้อนของไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) โดยมีการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความถี่ของสัญญาณค่าต่างๆ ซึ่งการหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r)ของชีงงานตัวอย่างสามารถหาได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance : C) ของ ชีงงานตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง LCR- meter แล้วจึงนำค่า C ที่อ่านได้มาคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\epsilon_r = \frac{tC}{A \epsilon_0}$$

เมื่อ t คือ ความหนาของชีงงานตัวอย่าง

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ชีงงานตัวอย่าง

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าประมาณ 8.85×10^{-15} F/mm

ทำโดยนำชีงงานที่เตรียมได้มาขีดผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ แล้วทำการเคลือบด้วยsilver paint ที่ผิวหน้าทั้งสองด้าน จากนั้นวัด ค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter แล้วคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

5. การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชีงงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชีงงานวัสดุประกอบที่ได้อย่างละเอียดที่ อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) เพื่อดูการกระจายตัวของ CCTO ในพอลิเมอร์เอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูง ทำโดยตัดชีงงานตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กนำไปทำการเคลือบทองด้วยเทคนิค sputtering เป็นเวลานาน 8 นาที

จากนั้นนำชีงงานตัวอย่างไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM

6. การหาความหนาแน่นของชีงงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

การวัดความหนาแน่นของชีงงานนั้นสามารถได้จากการใช้อัตราส่วนของมวลต่อ ปริมาตรได้โดยตรงเนื่องจากชีงงานนั้นมีรูปร่างที่สม่ำเสมอ ทำโดยนำชีงงานที่ผ่านการขึ้น รูปแล้วมาทำการตัดให้มีรูปร่างที่สม่ำเสมอแล้วทำความสะอาด จากนั้นนำชีงงานไปชั่งหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก นำชิ้นงานไปวัดความกว้าง ความยาว และความหนา เพื่อหาปริมาตรแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาความหนาแน่นจากสูตร

$$D = M/V \quad ; \quad D \text{ คือ ความหนาแน่น}$$

M คือ น้ำหนัก

V คือ ปริมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

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

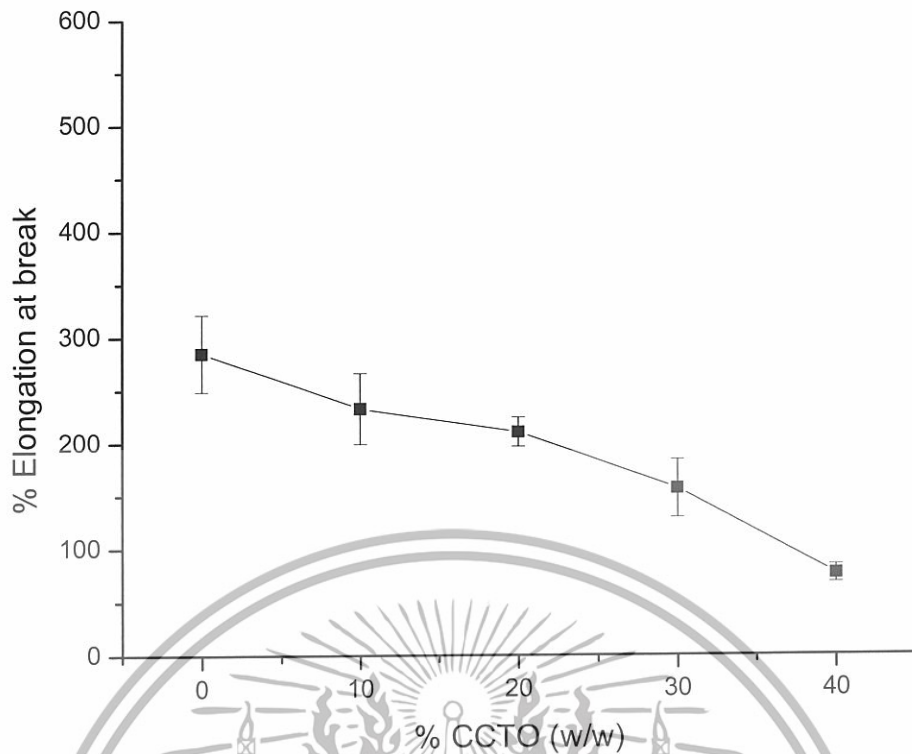
4.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



รูปที่ 4.1 แสดงค่า Tensile strength ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

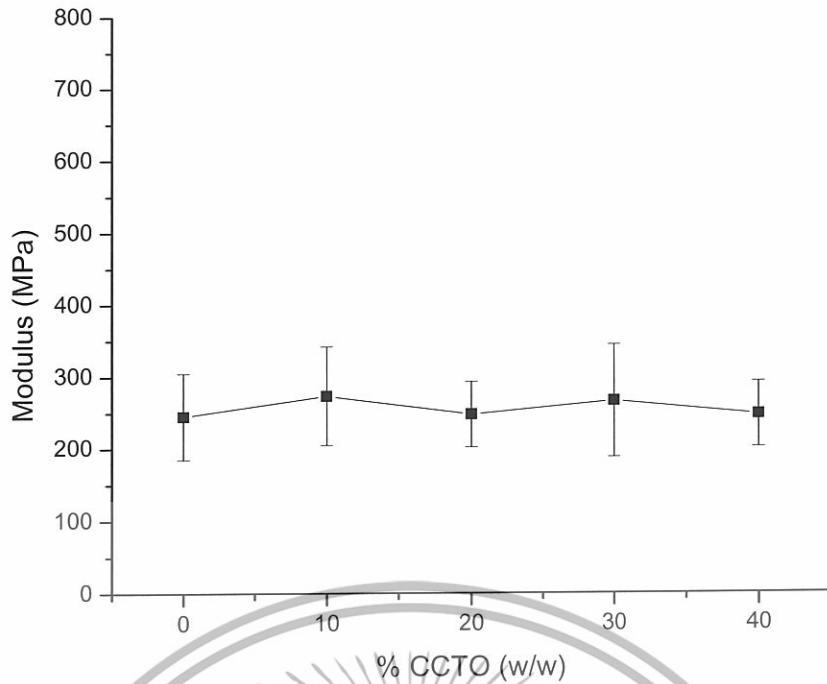
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) กับ HDPE ที่อัตราส่วนของCCTOต่างๆกันมีค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength) ใกล้เคียงกัน และต่ำลงเรื่อยๆเมื่อปริมาณCCTOมากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าCCTOมีความเปราะเมื่อเติมลงไปมากขึ้นจะทำให้คอมโพสิตเปราะมากขึ้นตามไปด้วยและเมื่อผสมCCTOลงในคอมโพสิต จะเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคทำให้คอมโพสิตมีลักษณะที่เปราะ หักง่ายดังนั้นความแข็งแรงดึงจึงลดลง[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงค่า % Elongation at break ของคอม โพลีดีเอเอ็มที่มีการเติมผงแคลเซียม-คอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่า % Elongation at break มีค่าลดลง อธิบายได้ว่าผง CCTO ที่เติมลงไปแยกออกเป็นอนุภาคจากเมทริกซ์ HDPE เมื่อเติมลงไป ในคอม โพลีดีเอเอ็ม จึงทำให้คอม โพลีดีเอเอ็ม ที่ได้มีการยึดเกาะกันไม่ดีและเมื่อผสม CCTO ลงไปในคอม โพลีดีเอเอ็ม จะเกิดรอยต่อระหว่างอนุภาคทำให้การถ่ายเทแรงด้อยลง ทำให้คอม โพลีดีเอเอ็ม มีความเปราะสูงขึ้น ดังนั้น การยึดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานคอม โพลีดีเอเอ็ม จึงมีค่าลดลง [20]

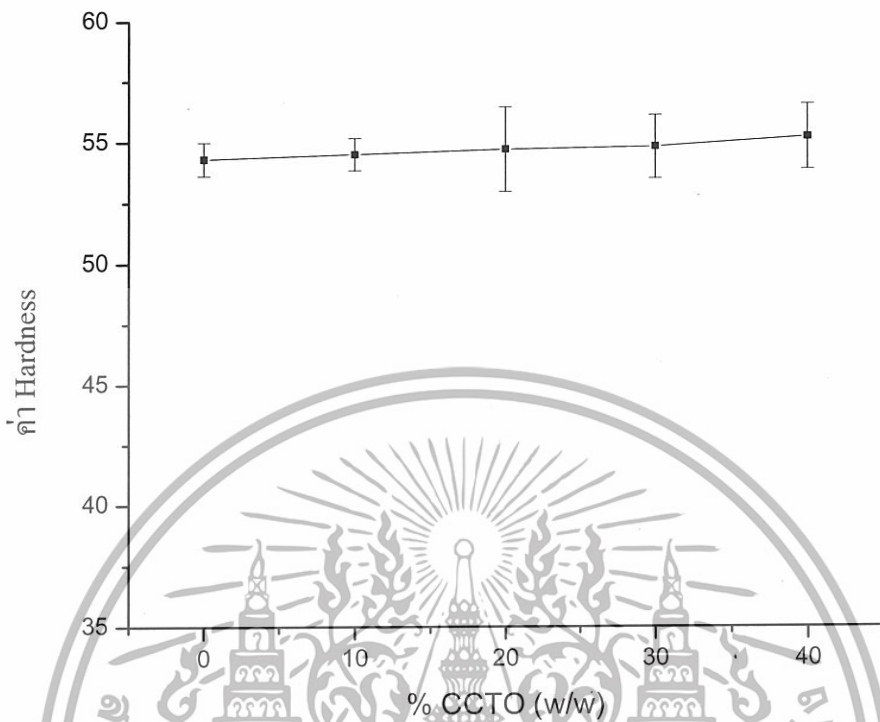


รูปที่ 4.3 แสดงค่า Modulus ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อเติมปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น ค่า Modulus มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากสัดส่วนของ CCTO ในคอมโพสิตยังมีไม่มากพอ ที่จะทำให้ค่า Modulus เปลี่ยนแปลงอย่างมาก แต่จากหลักการแล้วค่ามอดุลัสควรที่จะลดลงเนื่องจากมอดุลัสคือแรงต่อพื้นที่ที่ทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนแปงรูปร่าง ดังนั้นเมื่อปริมาณ CCTO มากขึ้น ชิ้นงานก็จะเปราะมากขึ้นทำให้แรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานลดลงค่ามอดุลัสจึงลดลงตามไปด้วยแต่ก็ลดลงไม่มากนัก[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



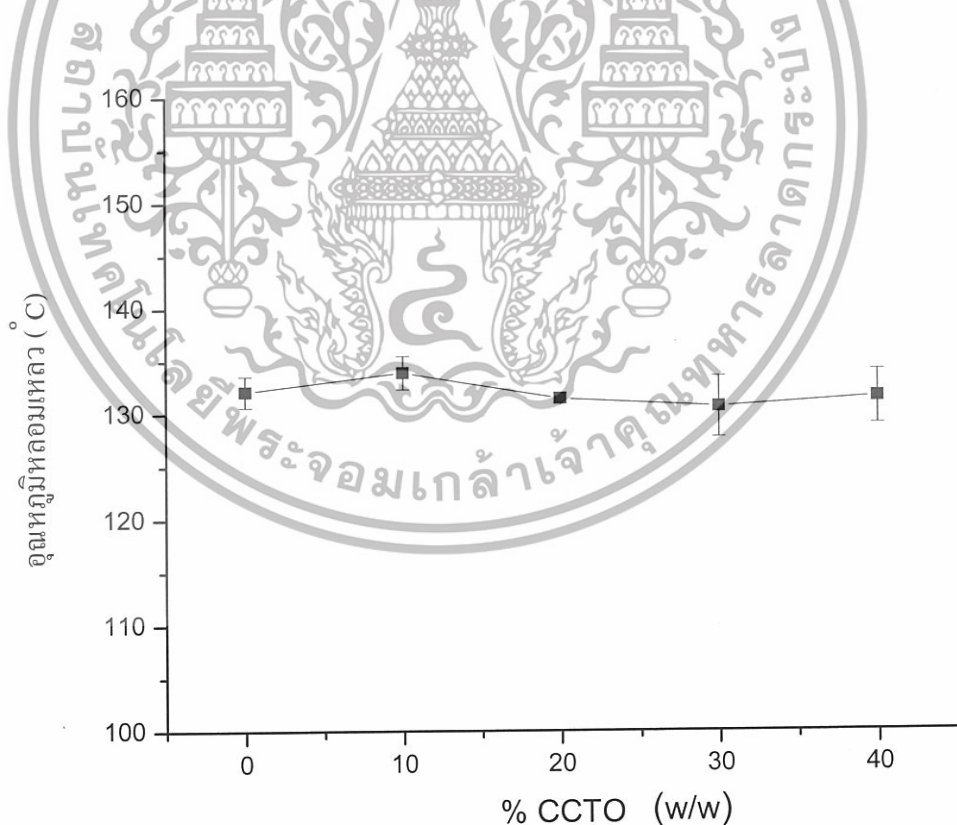
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกดกับปริมาณ CCTO ในคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงกดของคอมโพสิตเมื่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CCTO เพิ่มขึ้นจะมีค่าความแข็งแรงกดสูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจาก CCTO เป็นเซรามิกส์ที่มีความแข็งเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงกดสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าความแข็งแรงกดของคอมโพสิตก็ไม่สูงขึ้นมากนักเนื่องจากเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CCTO ที่มีในคอมโพสิตยังไม่สูงมาก[19]

4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

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

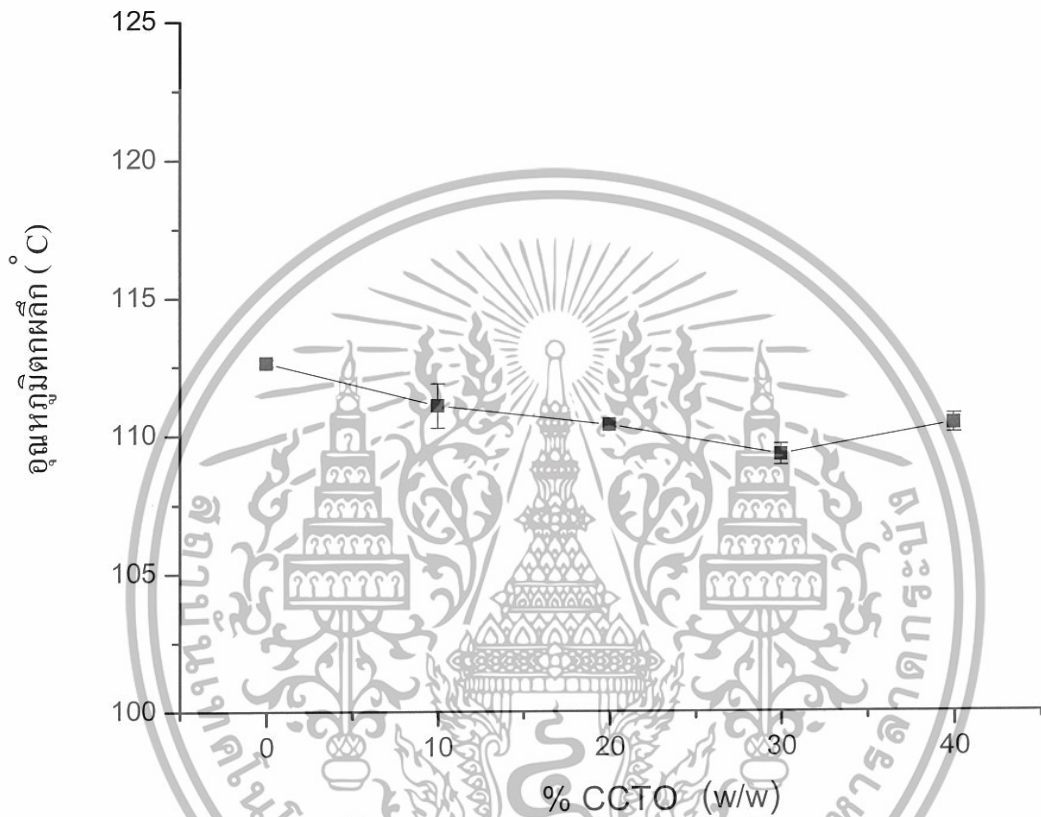
ปริมาณ CCTO (%)	T_m (°C)	T_c (°C)	$\Delta H_{\text{หลอมเหลว}}$ (J/g)	$\Delta H_{\text{ตกผลึก}}$ (J/g)
0	132.10	112.63	123.78	-121.05
10	133.85	111.07	94.60	-89.94
20	131.37	110.37	86.78	-97.38
30	130.58	109.29	102.41	-128.07
40	131.45	110.40	51.44	-50.92



รูปที่ 4.5 แสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

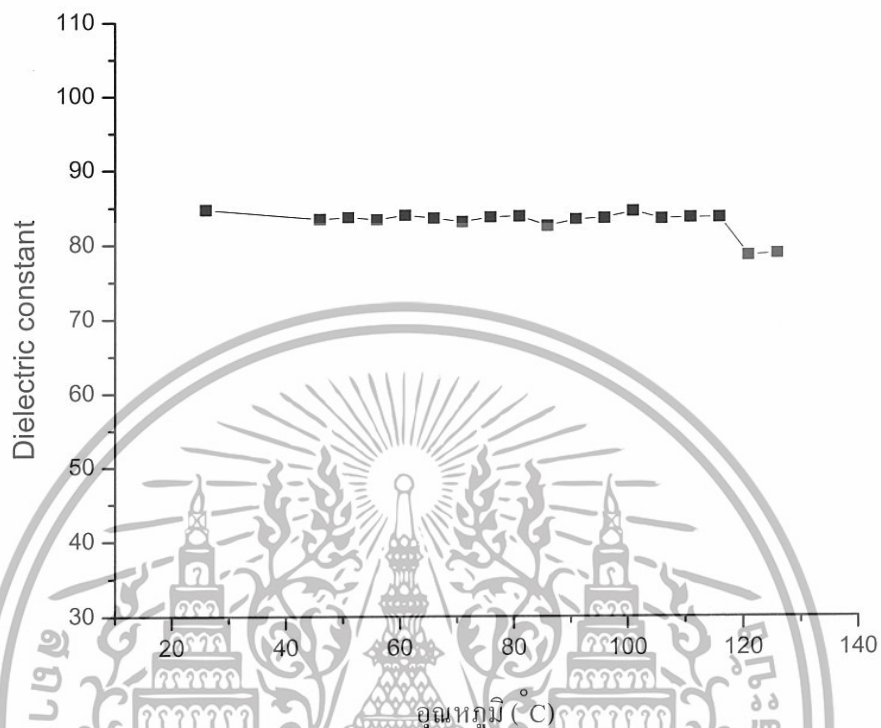
จากรูป 4.5 จะเห็นว่าเมื่อเติมปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากผง CCTO เป็นเซรามิกมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) สูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ที่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณ CCTO ในคอมโพสิตมีปริมาณไม่มากที่จะแสดงผลได้อย่างชัดเจน[17]



รูปที่ 4.6 แสดงค่าอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของคอมโพสิตเมื่อมีการเติมผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

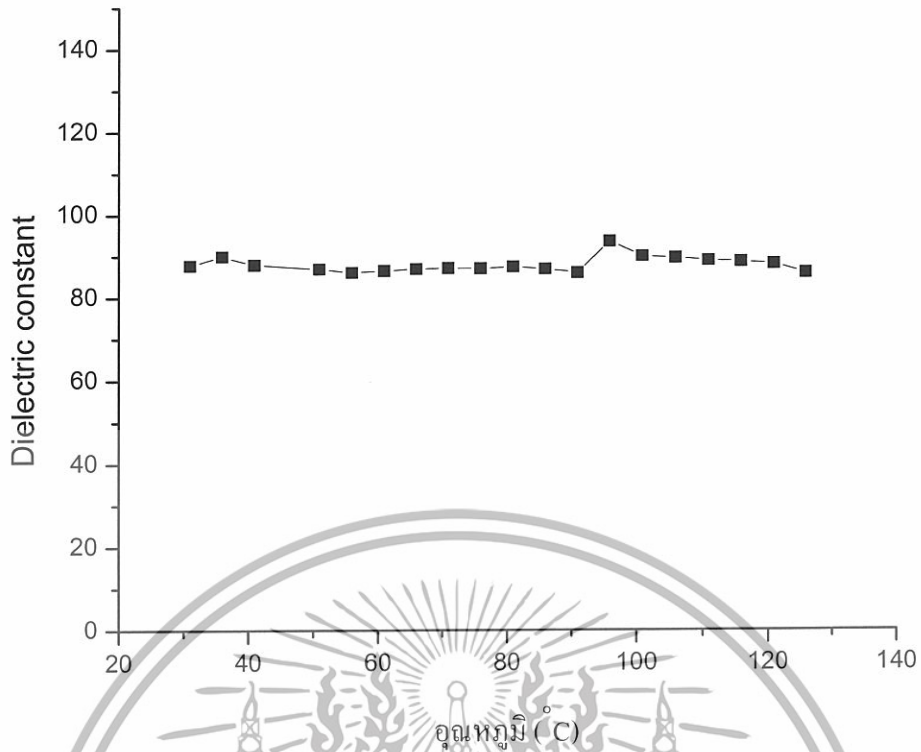
จากรูป 4.6 จะเห็นว่าเมื่อเติมปริมาณผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในคอมโพสิตมากขึ้น อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจาก CCTO มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงและอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่อง DSC อยู่ระหว่าง $50-450^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ CCTO ยังไม่สลายตัว ดังนั้น CCTO จะไม่ตกผลึก อุณหภูมิการตกผลึกของคอมโพสิตแต่ละอัตราส่วนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน[17]

4.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Dielectric constant) ของ
 ชีงงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิด
 ความหนาแน่นสูง (HDPE)

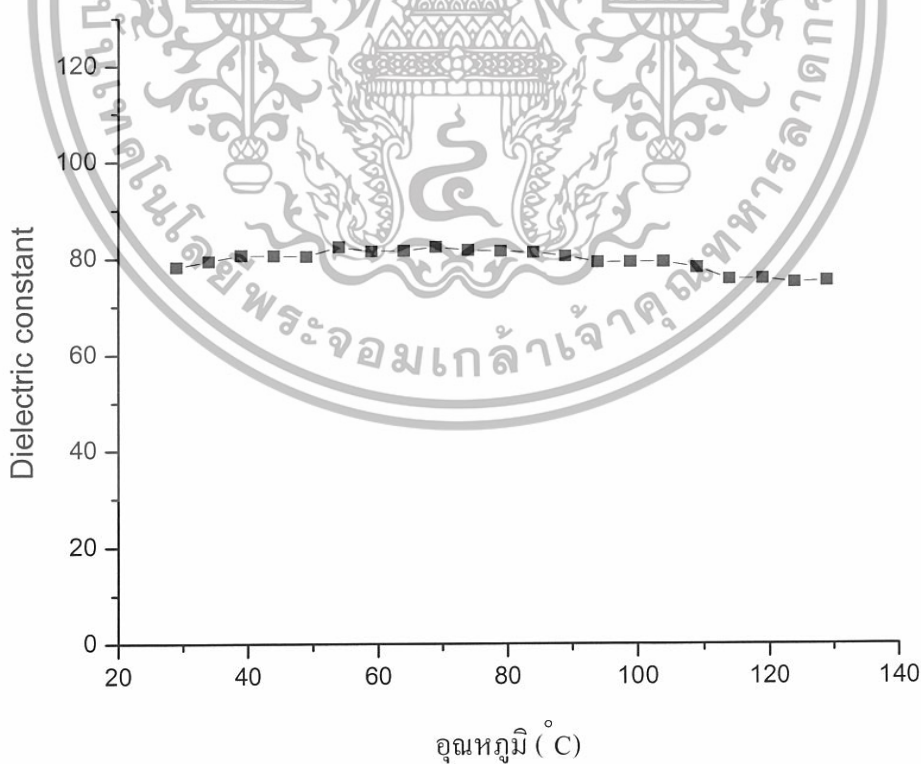


รูปที่ 4.7 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชีงงานคอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 0% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

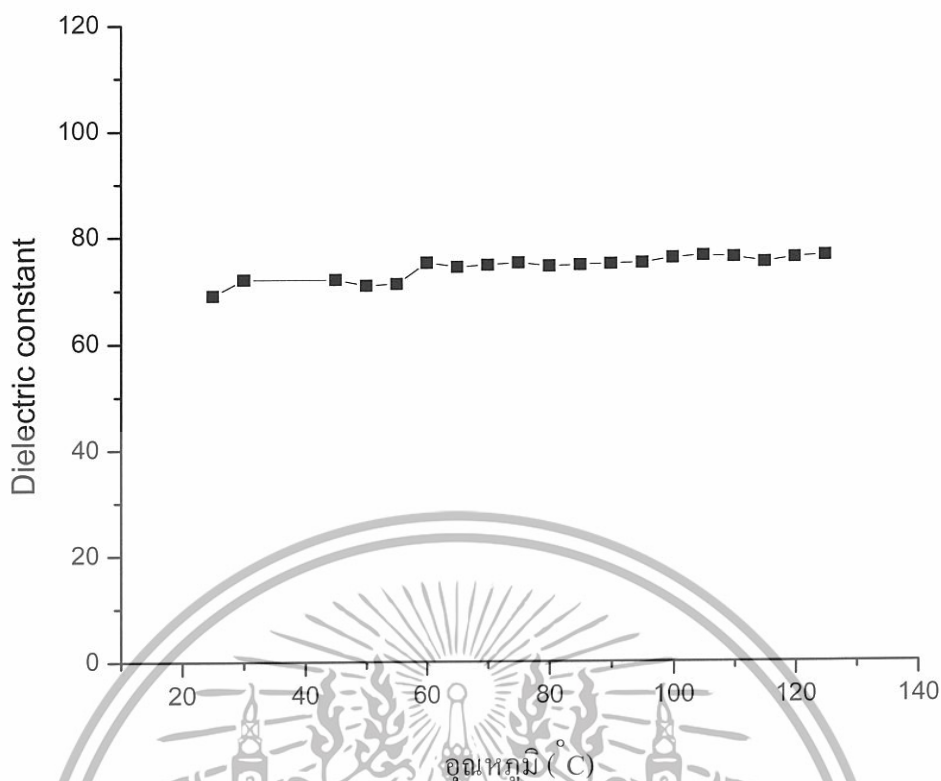


รูปที่ 4.8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ ไททาเนต 10% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน คอมโพสิต ที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ ไททาเนต 30% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

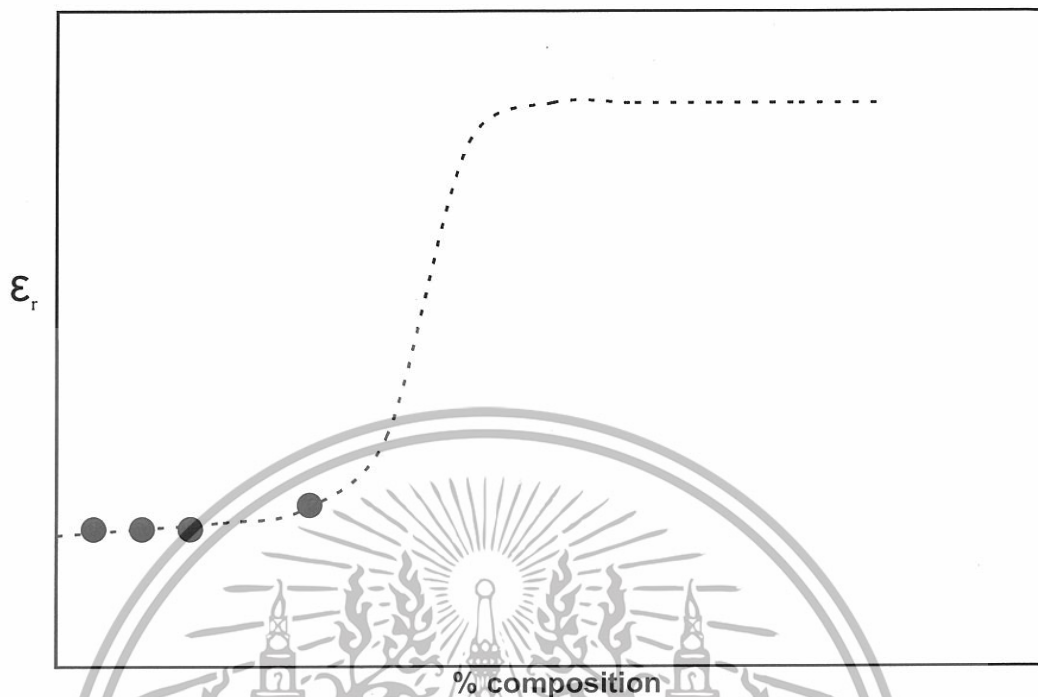


รูปที่ 4.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต 40% ที่ความถี่ 200 kHz ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.7-4.10 แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันที่ความถี่ 200 kHz ในขณะที่ความถี่ต่างๆมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่คลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากที่ 0-40 % ยังไม่ใช่สัดส่วนที่ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงอย่างมาก แต่จากรูปจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสมบัติของแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนต(CCTO) ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากนัก

ในงานวิจัยนี้การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของคอมโพสิตควรจะเป็นไปตามทฤษฎีเพอร์โคเลชัน(percolation theory) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ใช้กับการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูป

Percolation

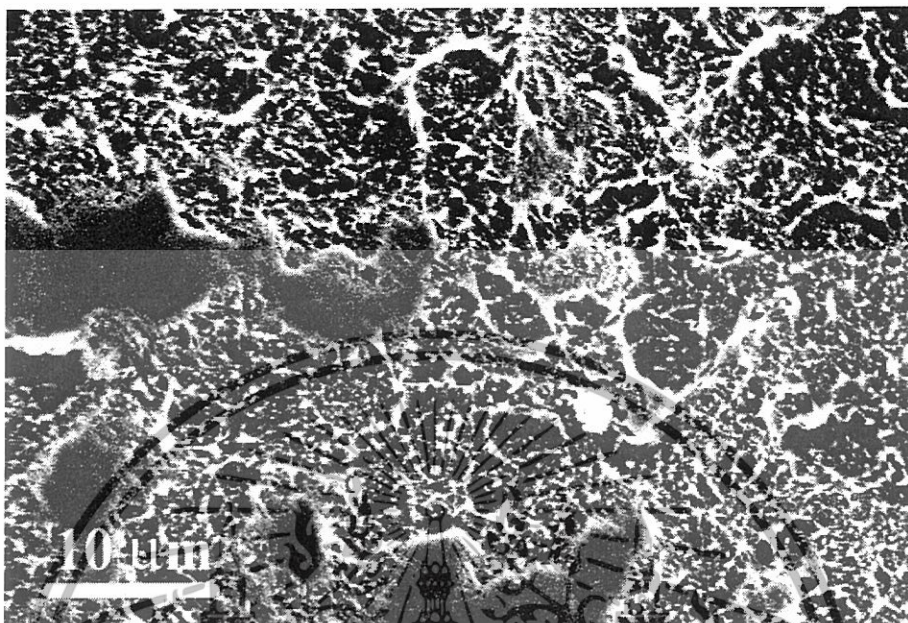


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์(ϵ_r) กับ %composition ของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)

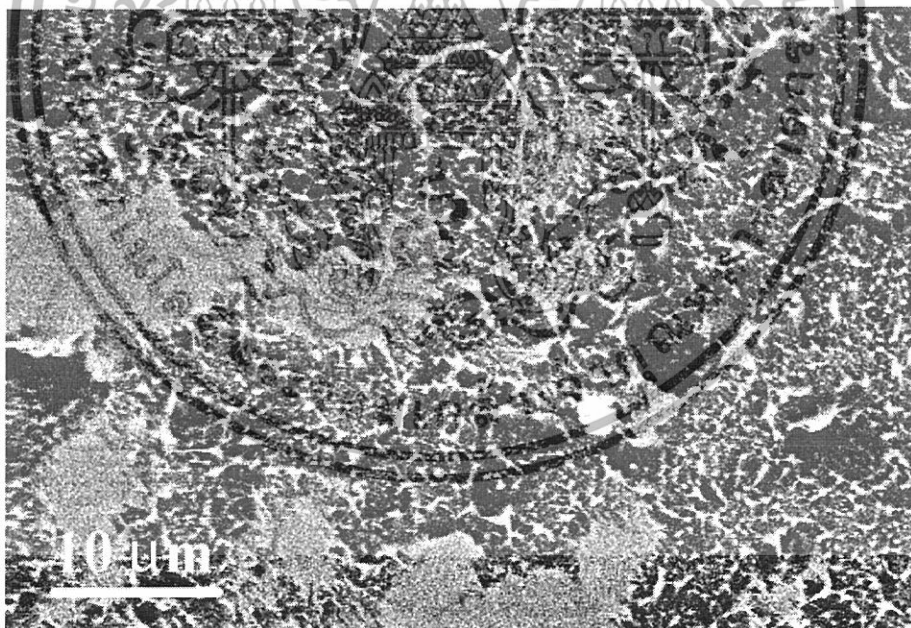
จากรูปแสดงให้เห็นว่า สัดส่วน 0-40 % composition ที่ทำในงานวิจัยนี้ยังไม่ใช่จุดที่ทำให้ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นคุณสมบัติด้านต่างๆและ ϵ_r ของคอมโพสิตจึงมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงควรทำการหา %composition ของCCTOที่เหมาะสม โดยการทำคอมโพสิต ที่มี %composition ของ CCTO เท่ากับ 50 60 70 ซึ่งคาดว่า properties และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ในช่วงนี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างรวดเร็ว และเป็นช่วงที่คาดว่า คอมโพสิตจะมีคุณสมบัติด้านต่างๆดีขึ้น รวมถึงอาจมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



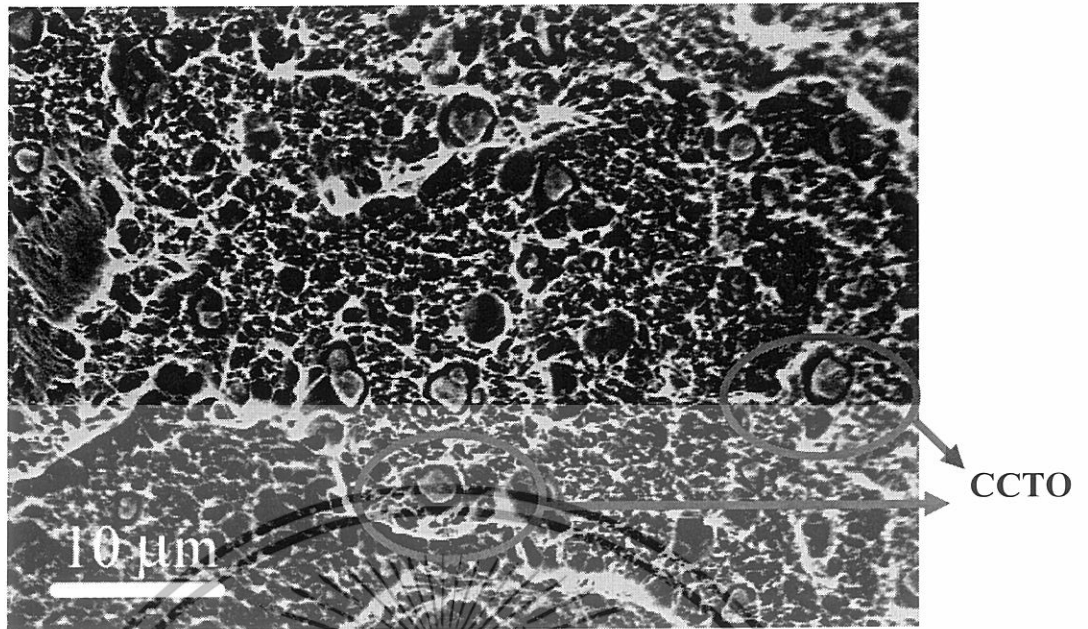
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE (Pure)



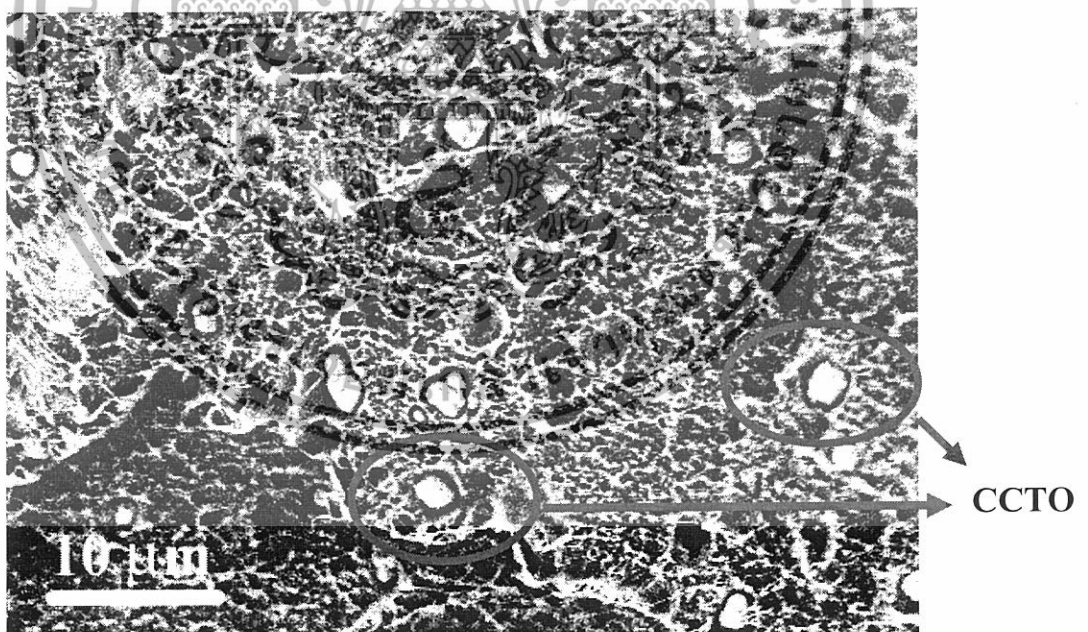
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE (Pure)

(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



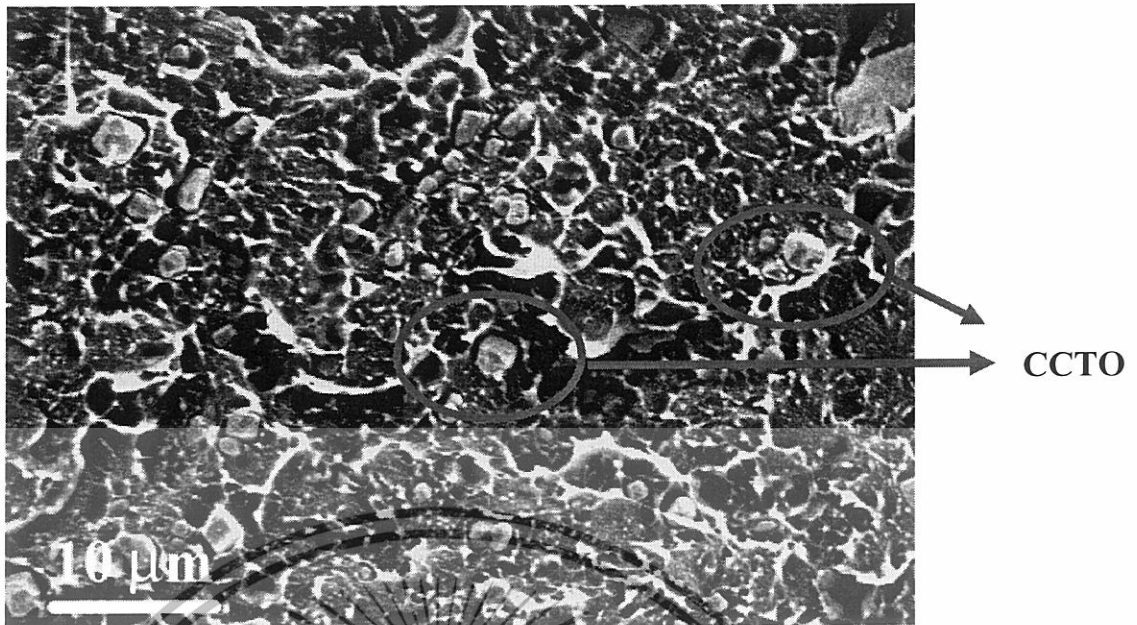
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 10% CCTO



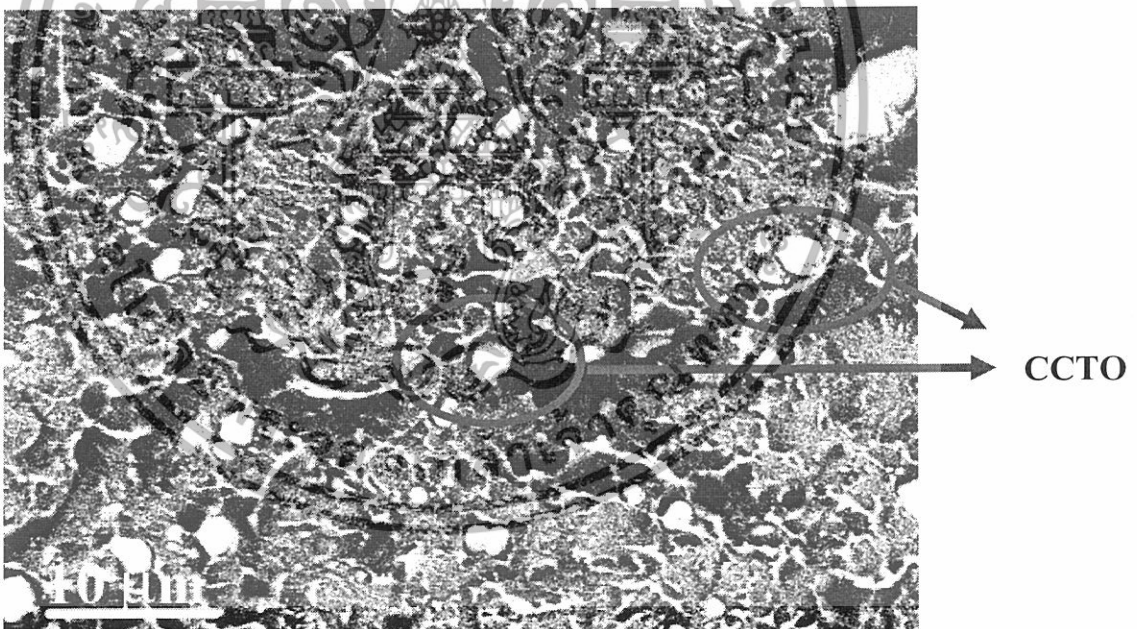
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 10% CCTO

(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

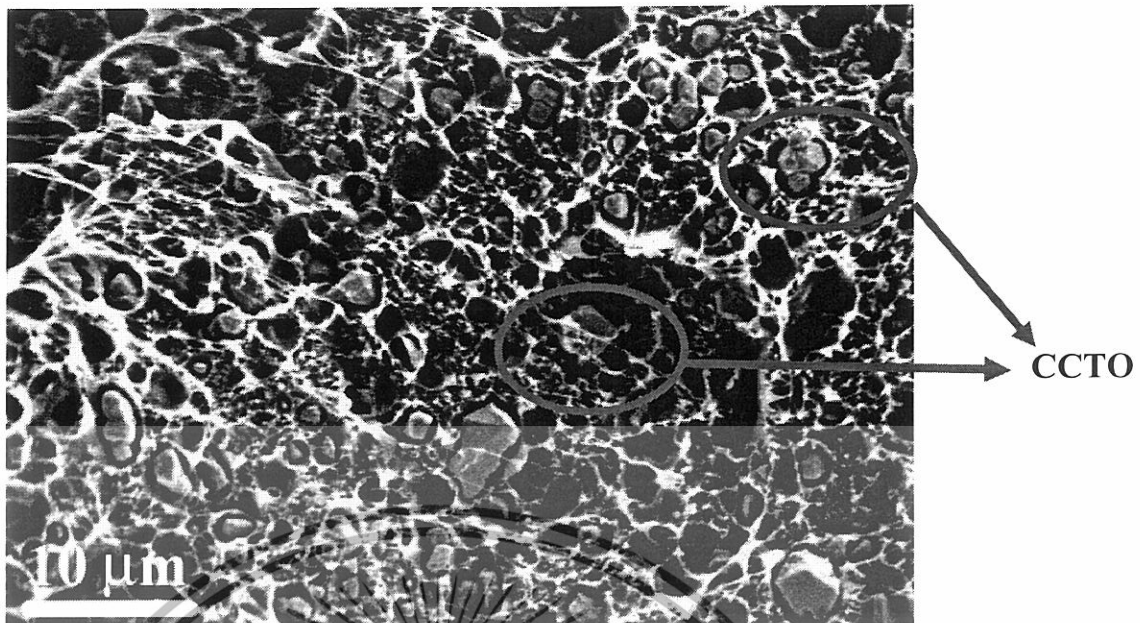


รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 20% CCTO

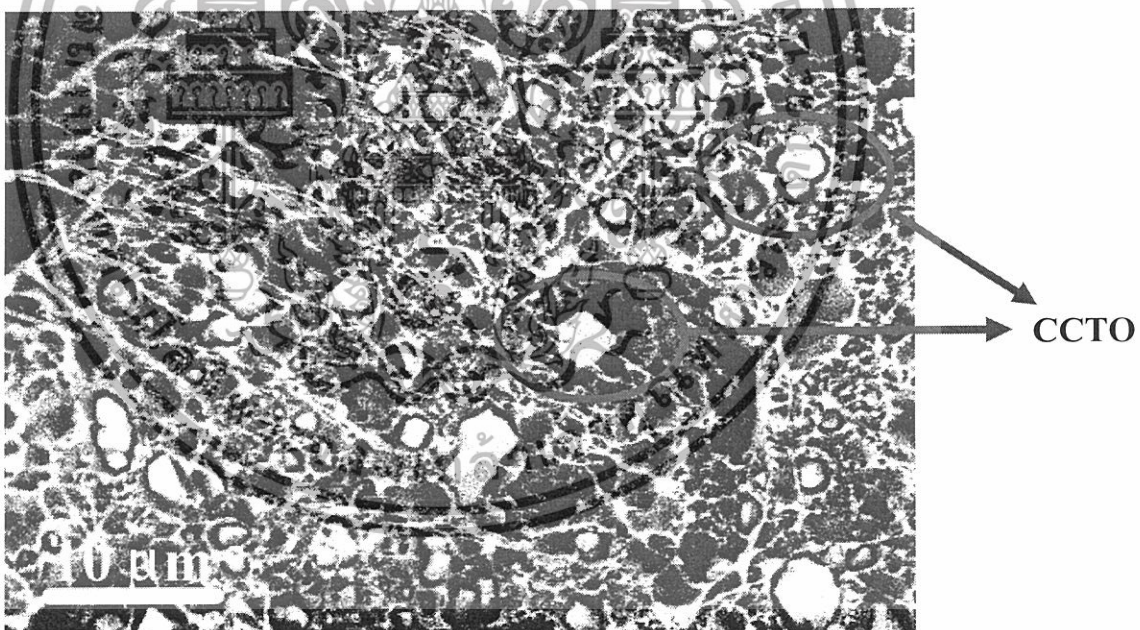


รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 20% CCTO
(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

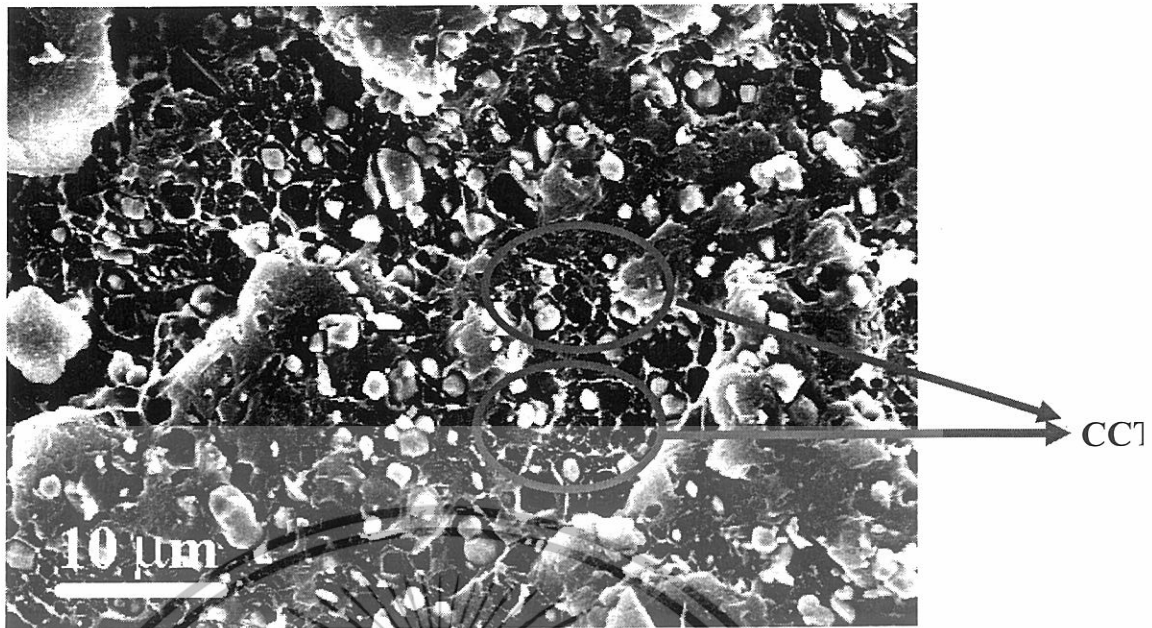


รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 30% CCTO

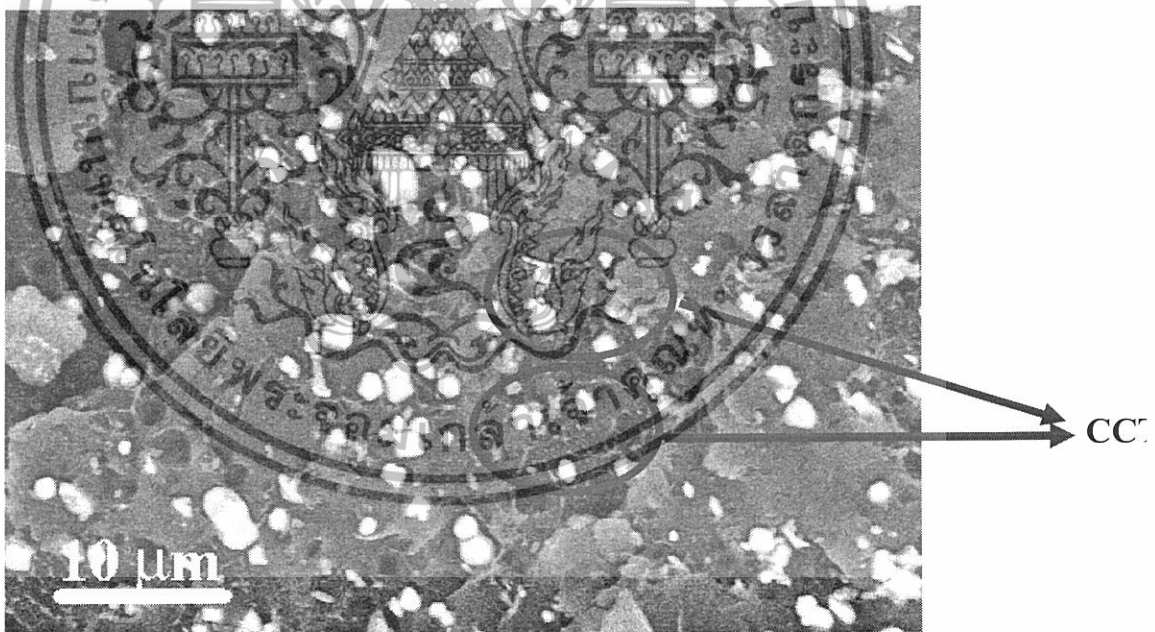


รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 30% CCTO
(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



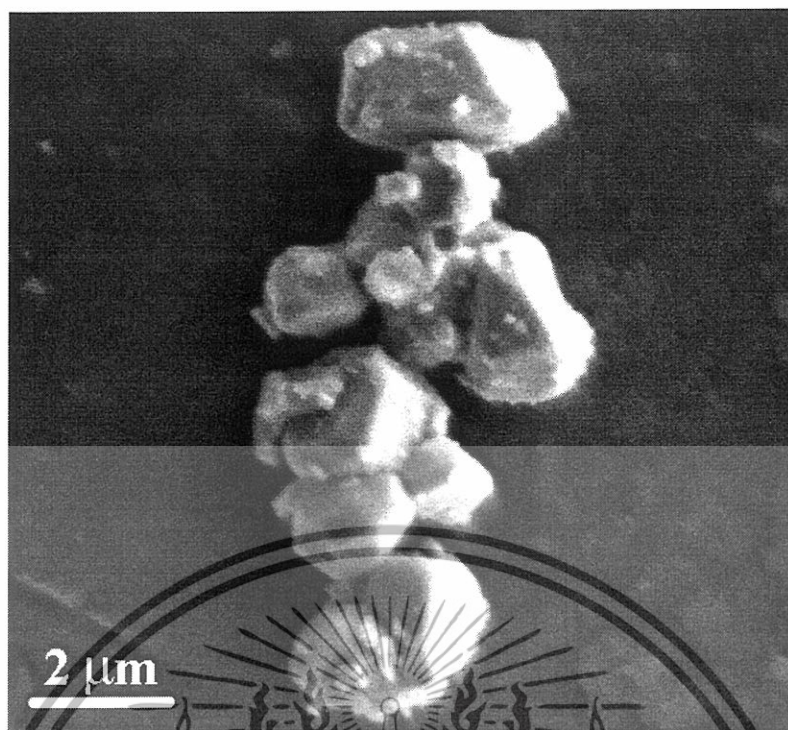
รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 40% CCTO



รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต 40% CCTO

(ภาพ Back Scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคแคลเซียมไททาเนต(CCTO)

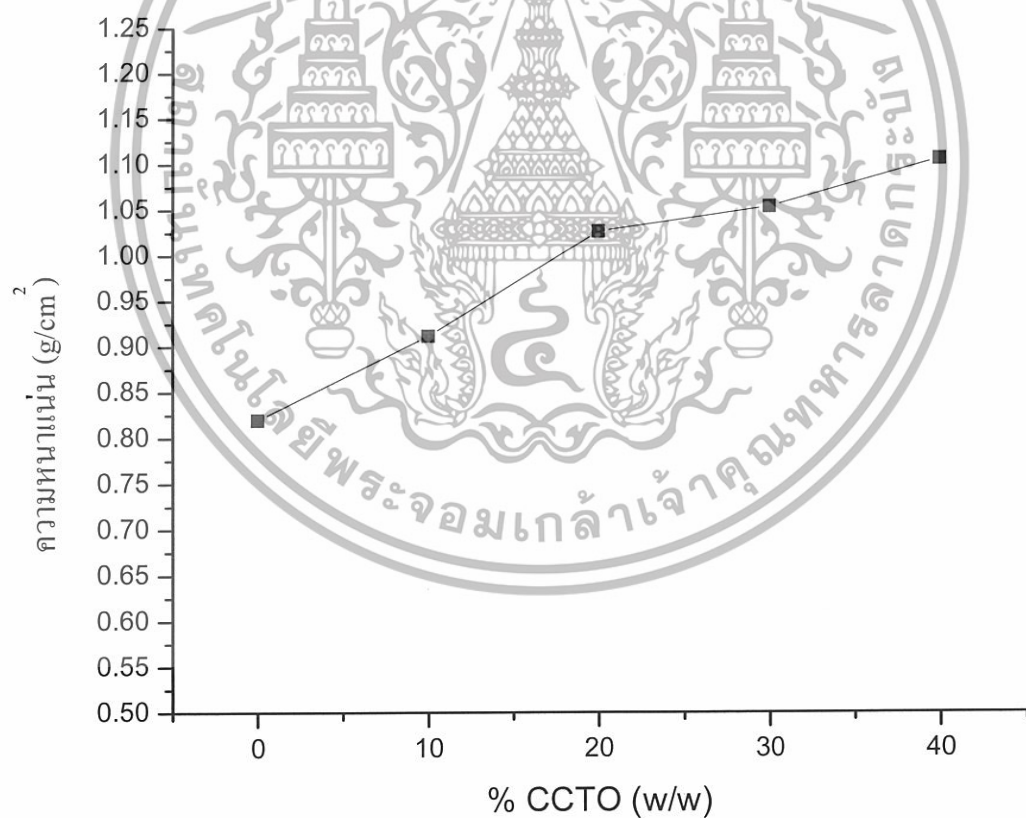
จากรูป 4.12-4.22 ได้แสดงการกระจายตัวของ CCTO โดยเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของ HDPE (Pure) และ คอมโพลีเมอร์ที่เปอร์เซ็นต์ CCTO ต่างๆ พบว่าอนุภาค CCTO ถูกล้อมรอบด้วยพอลิ-เมอร์เมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเป็นคอมโพลีเมอร์แบบ 0-3 โดยแต่ละรูปได้แสดงภาพแบบ Back Scattering ด้วยเพื่อให้เห็นความชัดเจนของการกระจายตัวของอนุภาค CCTO ได้ดียิ่งขึ้น โดยเมื่อปริมาณของ CCTO มีมากขึ้น จะทำให้เกิดการกระจายตัวอยู่ใน HDPE เมทริกซ์มากขึ้นแยกออกเป็นภูมิภาคอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่มีแนวโน้มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การหาความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่น ของคอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ใน ปริมาณ 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 4.23 แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ในปริมาณ 0% 10% 20% 30% 40% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่4.23 พบว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนCCTOในคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอมโพสิตก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอนุภาค CCTO ที่ใส่ลงไปมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้มวลของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอมโพสิตจึงสูงขึ้นด้วย[19]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

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

คอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต(CCTO) กับ HDPE ที่อัตราส่วนของ CCTO ต่างๆ กัน มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ใกล้เคียงกันและต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณ CCTO มากขึ้น

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) หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

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

การกระจายตัวของ CCTO โดยเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของ HDPE (Pure) กับคอมโพสิตที่เปอร์เซ็นต์ CCTO ต่างๆ พบว่าอนุภาค CCTO ถูกล้อมรอบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเป็นคอมโพสิตแบบ 0-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) การหาความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

เมื่อปริมาณสัดส่วน CCTO ในคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และความหนาแน่นของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 50% 60% 70% โดยน้ำหนัก เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการทำคอมโพสิตชนิดนี้ให้ได้คุณสมบัติข้างต้นดังกล่าว ได้ดีที่สุด
2. นำผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) มาผ่านการคัดขนาด แล้วนำมาทำคอมโพสิต จะได้คอมโพสิตที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น
3. ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และความหนาแน่น ของคอมโพสิตระหว่างผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
4. ทำการเติมสารที่สามารถเพิ่มความแข็งให้กับ HDPE เพื่อให้ HDPE กับ CCTO มีการยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตดีขึ้นตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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	Tensile strength (N/mm ²)	% Elongation at break (%)	Modulus (N/mm ²)
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

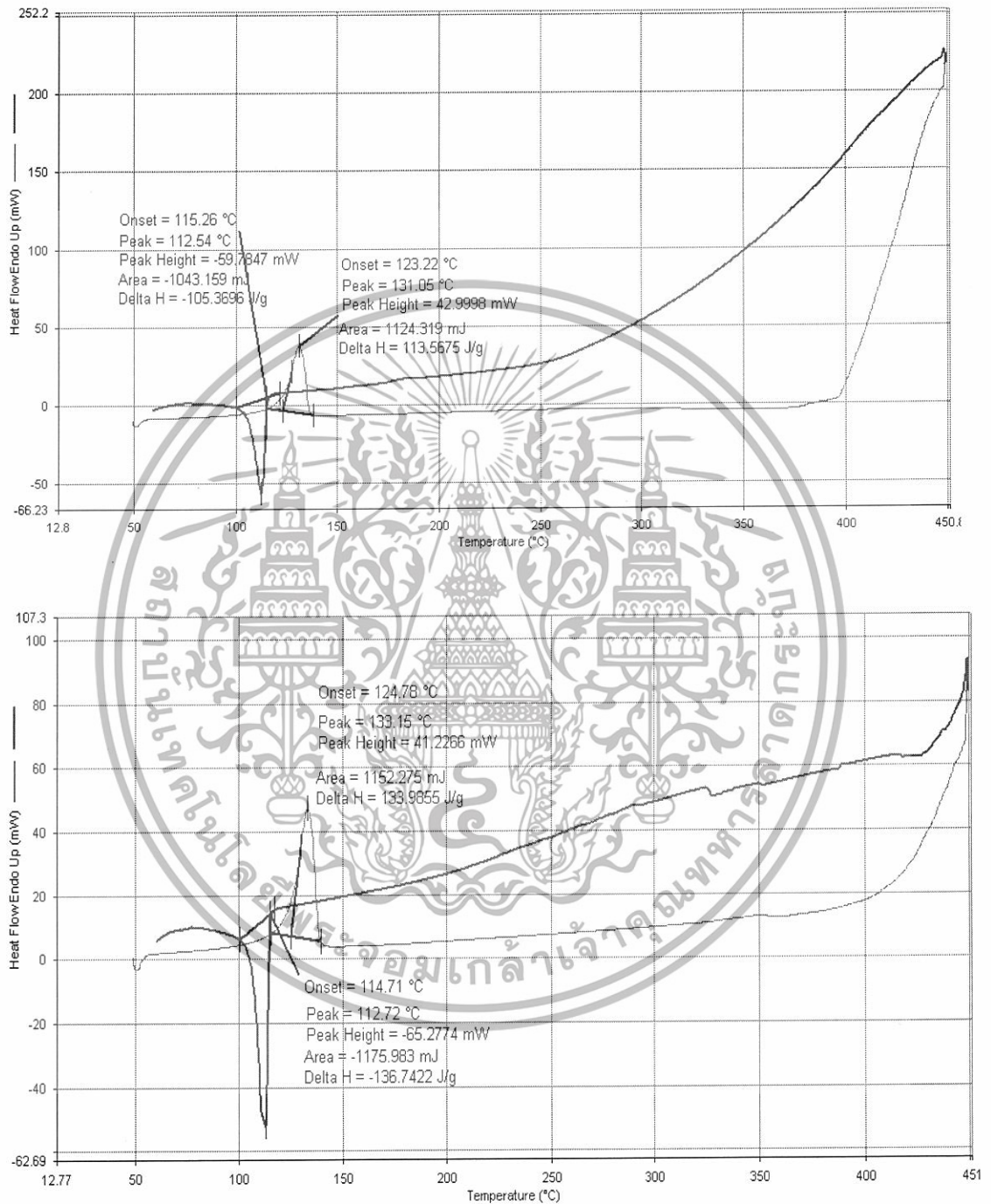
2. การทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Hardness) ของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

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

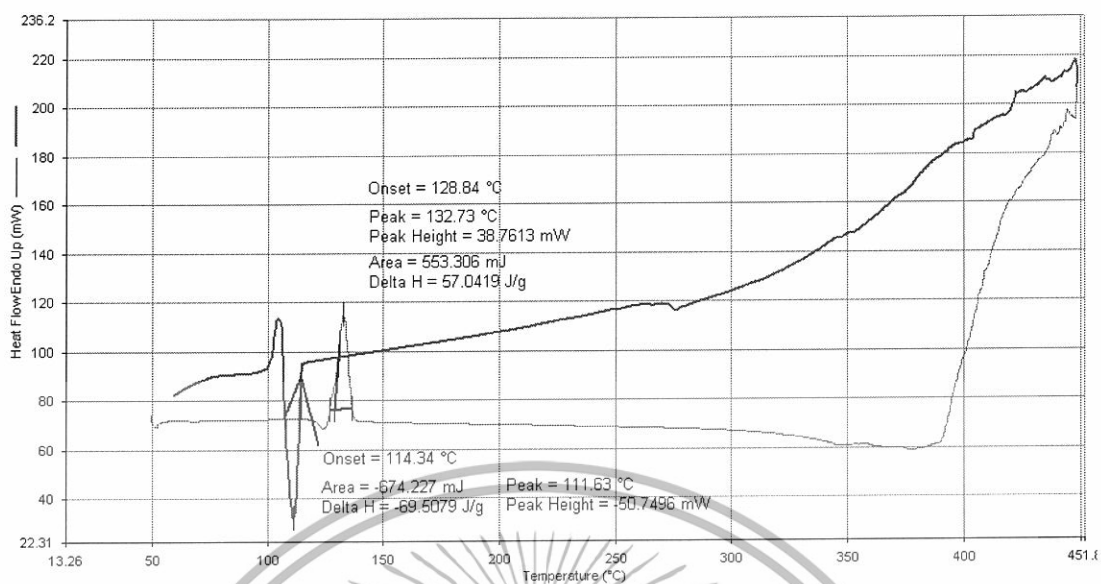
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



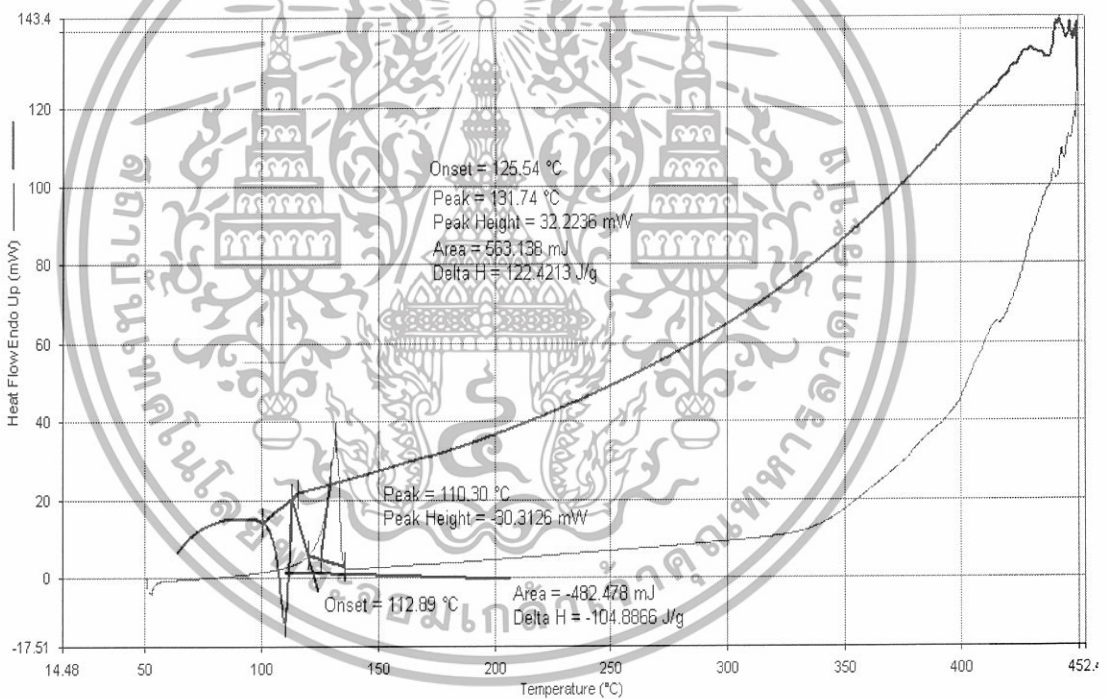
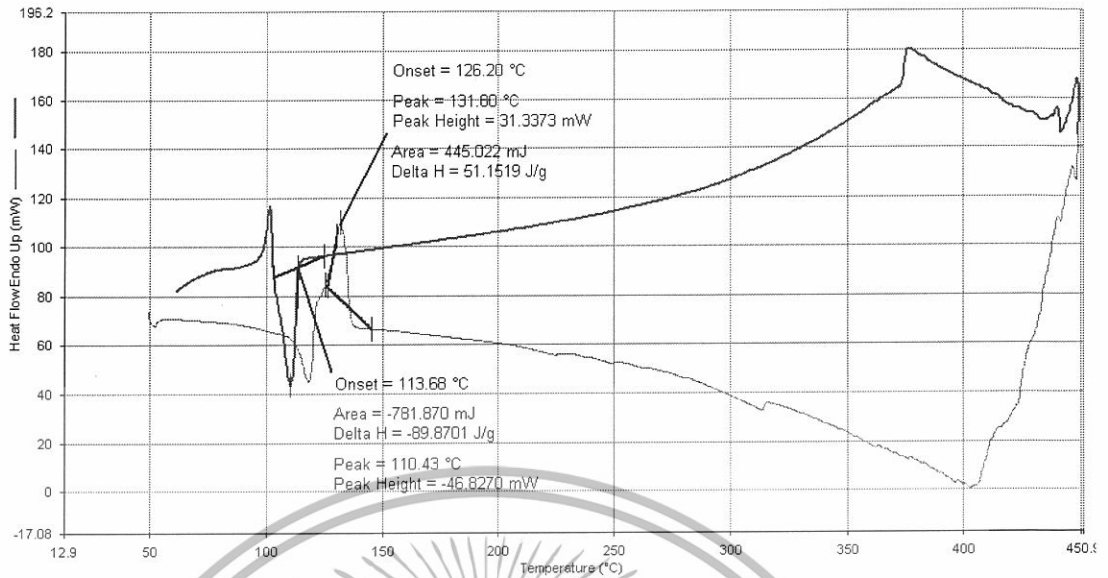
กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 0% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



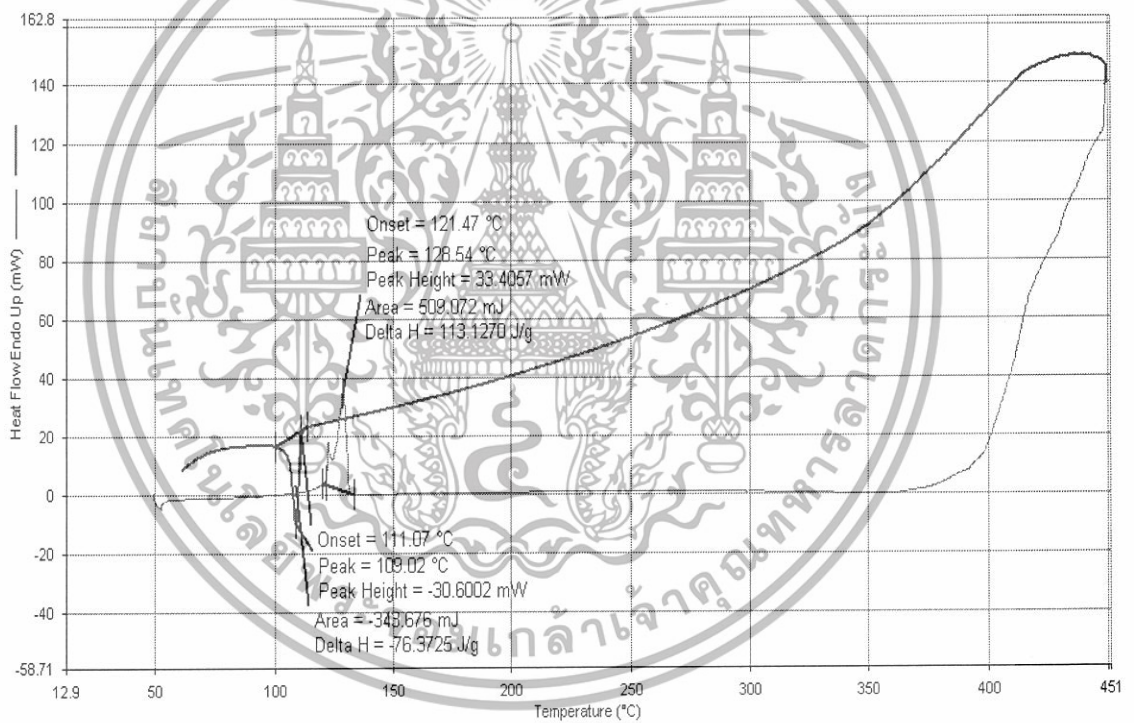
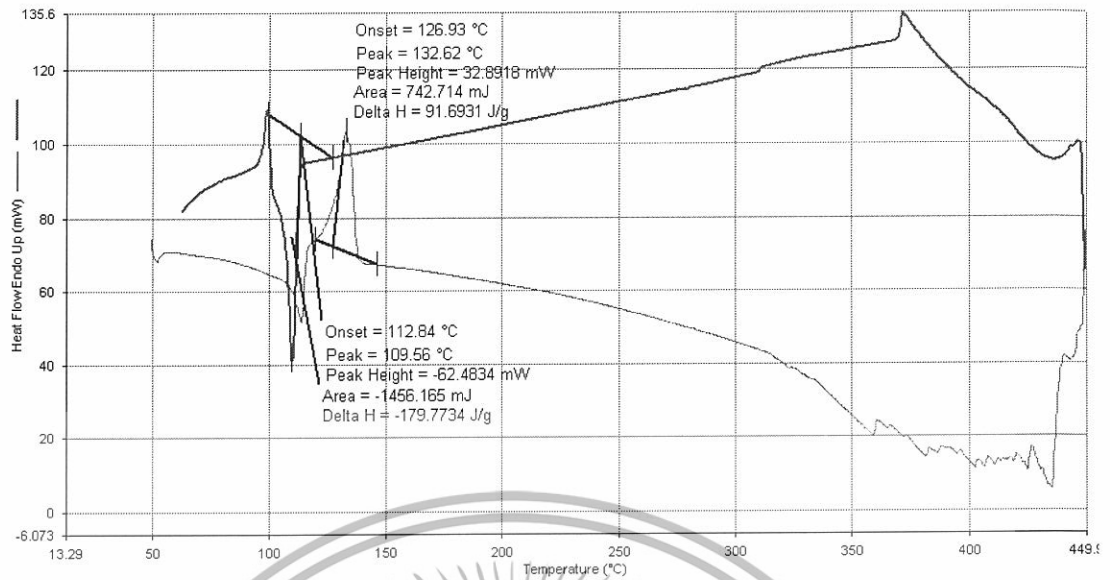
กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพลีทีที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



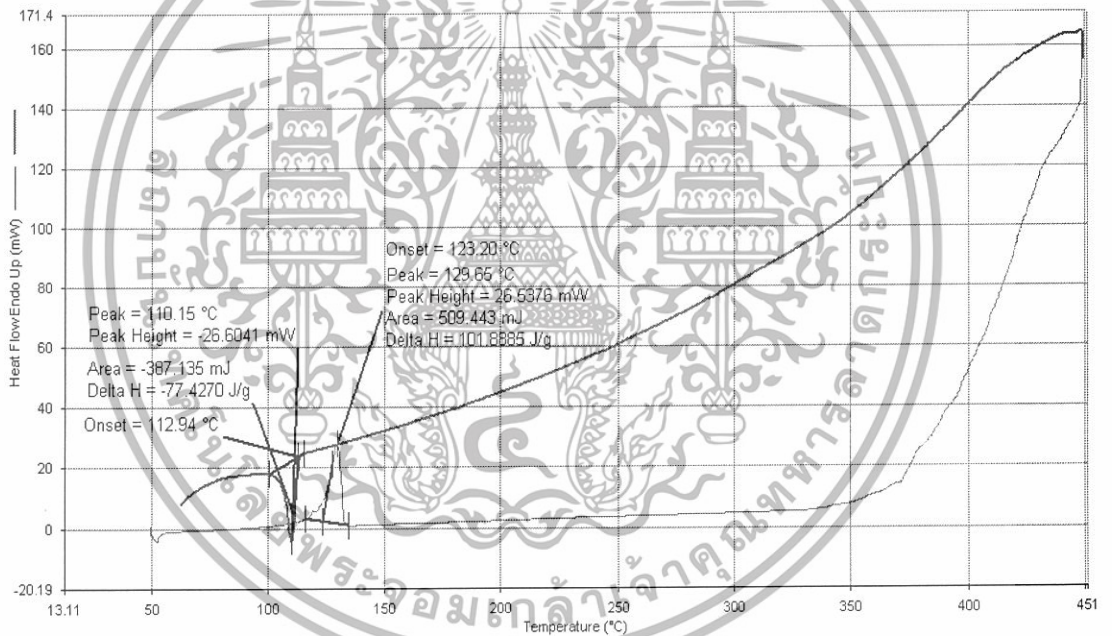
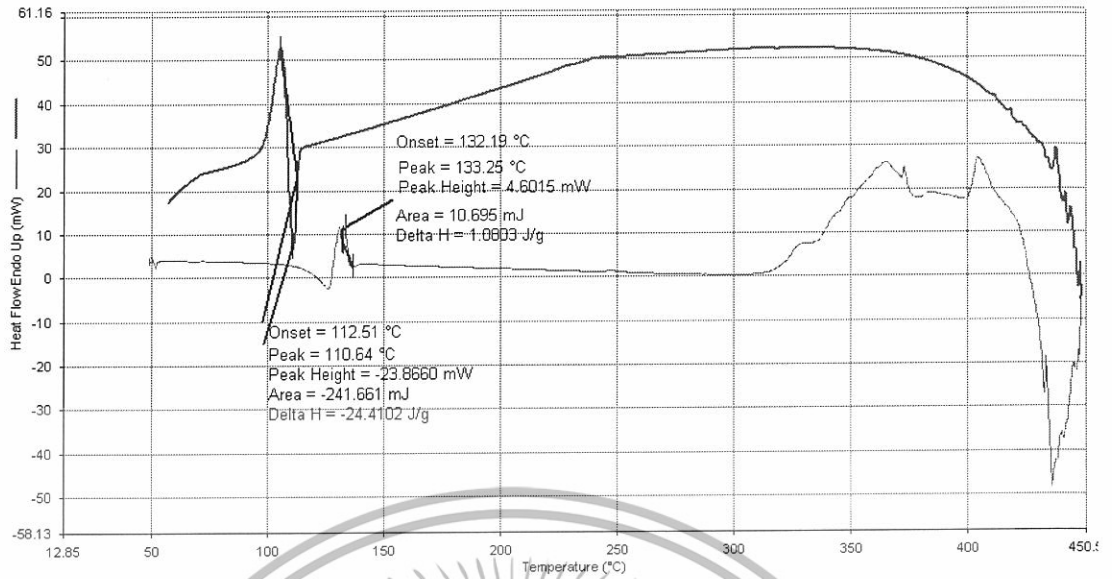
กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานคอมโพสิตที่มีผงแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักครั้งที่ 1, 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่า Relative permittivity (Dielectric constant) ของชิ้นงานคอมโพสิต

ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

Pure HDPE

Temp (°C)	1 kHz		10kHz		100kHz		200kHz					
	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K			
26	31.88	0.5228	25.1586	157.5	0.0914	124.2938	153.2	0.1588	120.9004	107.3	0.5444	84.6776
46	30.44	0.5934	24.0222	156.8	0.0857	123.7414	155.5	0.1555	122.7155	105.7	0.54	83.4149
51	31.52	0.5477	24.8745	156.3	0.0941	123.3468	155.7	0.1558	122.8733	106	0.5388	83.6517
56	30.24	0.5577	23.8644	155.7	0.094	122.8733	155.1	0.1543	122.3998	105.6	0.5371	83.3360
61	20.74	0.2089	16.3673	77.82	0.4764	61.4130	161.5	0.1823	127.4505	106.3	0.5403	83.8884
66	14.21	0.2364	11.2141	42.85	0.0527	33.8158	156.6	0.148	123.5835	105.8	0.5258	83.4939
71	4.363	2.607	3.4431	31.64	1.822	24.9692	154	0.1639	121.5317	105.2	0.5386	83.0204
76	0	9.502	0.0000	150.2	0.2422	118.5329	156.5	0.15	123.5046	106	0.5519	83.6517
81	9.193	2.064	7.2548	148.6	0.1468	117.2702	153.5	0.1159	121.1371	106.1	0.5384	83.7306
86	4.075	12.02	3.2159	86.04	0.1388	67.8999	154	0.1474	121.5317	104.5	0.5434	82.4679
91	2.321	14.75	1.8317	117.9	0.4102	93.0428	154.3	0.1397	121.7685	105.6	0.5577	83.3360
96	21.97	1.273	17.3380	67.39	0.3861	53.1820	156.2	0.1533	123.2679	105.8	0.5424	83.4939
101	2.18	1.978	1.7204	146.4	0.0045	115.5340	155.3	0.1411	122.5576	107	0.5387	84.4409
106	32.91	1.375	25.9715	94.97	0.0797	74.9472	153.8	0.1513	121.3739	105.7	0.5684	83.4149
111	21.05	0.5784	16.6120	120.8	0.2404	95.3314	164	0.1171	129.4234	105.9	0.6393	83.5728
116	25.46	0.8212	20.0922	130.2	0.3883	102.7495	166.7	0.1038	131.5541	105.9	0.6036	83.5728
121	15.23	1.607	12.0190	105.2	0.4555	83.0204	142.9	0.1468	112.7719	99.47	0.5136	78.4984
126	26.35	0.9434	20.7945	106.9	0.2449	84.3619	140.6	0.1456	110.9569	99.75	0.5151	78.7194

A = 4.725x10E-4 m²

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

d = 0.0033 m

10% CCTO

Temp (°C)	1 kHz			10kHz			100kHz			200kHz		
	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K
	31	14.2	0.6472	12.0756	146.1	0.0985	124.2428	152.2	0.1378	129.4302	103.2	0.5395
36	2974	3.669	2529.0758	159.4	0.0393	135.5530	158.2	0.1434	134.5325	105.8	0.5375	89.9718
41	-32.43	1.652	-27.5783	141	0.1636	119.9057	155	0.1295	131.8113	103.4	0.5378	87.9309
51	-4765	0.5531	-4052.1339	149.7	0.2123	127.3042	152.8	0.1377	129.9404	102.2	0.5607	86.9104
56			0.0000	96.89	0.1837	82.3948	151.4	0.1332	128.7499	101.2	0.5568	86.0600
61	6.192	0.107	5.2656	145	0.0907	123.3073	151.7	0.1352	129.0050	101.7	0.55	86.4852
66	7.413	0.7406	6.3040	144.1	0.1051	122.5420	152.4	0.1337	129.6003	102.2	0.5563	86.9104
71	-30.88	0.4072	-26.2602	130	0.539	110.5514	149.5	0.1495	127.1341	102.4	0.5562	87.0805
76	-22.79	0.6342	-19.3805	121.3	0.5077	103.1530	151	0.1408	128.4097	102.3	0.5285	86.9954
81	-29.18	0.6435	-24.8145	127.9	0.1714	108.7656	150.8	0.1355	128.2396	102.8	0.5328	87.4206
86	-40.33	0.3346	-34.2964	137.8	0.0123	117.1845	146.6	0.1742	124.6680	102.2	0.5494	86.9104
91	-82.66	0.1841	-70.2937	119.3	0.1051	101.4522	148.5	0.1472	126.2837	101.1	0.5459	85.9750
96	-36.97	0.3459	-31.4391	127.1	0.0604	108.0852	157.5	0.0778	133.9373	110	0.5292	93.5435
101	-34.62	0.2963	-29.4407	127.2	0.0661	108.1703	144.3	0.1669	122.7120	105.8	0.4985	89.9718
106	-26.45	0.1136	-22.4930	128.4	0.0772	109.1908	146.1	0.1437	124.2428	105.3	0.5173	89.5466
111	2714	3.884	2307.9730	149.1	0.2819	101.2821	144.2	0.1248	122.6270	104.5	0.5236	88.8663
116	-40.79	1.738	-34.6876	130.1	0.1797	110.6364	152.9	0.1379	130.0255	104.2	0.5246	88.6112
121	-45.64	2.16	-38.8120	127.4	0.2728	108.3404	147.7	0.1383	125.6034	103.6	0.5333	88.1010
126	-40.44	0.975	-34.3900	135.9	0.1154	115.5687	141.9	0.1513	120.6711	101	0.5073	85.8899

A = 4.3848x10E-4 m2

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

d = 0.0033 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30% CCTO

Temp (°C)	1 kHz			10kHz			100kHz			200kHz		
	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K
	29	10.69	1.573	8.6008	162.9	0.0898	131.0640	143.8	0.211	115.6967	97.3	0.4989
34	3317	1.882	2668.7491	81.74	0.2051	65.7653	50.33	3.255	40.4939	98.74	0.5184	79.4430
39	-25.28	1.818	-20.3395	111.5	0.4001	89.7092	150.4	0.1804	121.0069	100.3	0.8	80.6981
44	-52.48	0.165	-42.2237	152.3	0.0407	122.5356	153.2	0.2193	123.2597	100.2	0.5007	80.6176
49	-51.64	0.3667	-41.5478	150.6	0.1263	121.1678	99.56	0.5014	80.1027	100	0.5044	80.4567
54	-64.45	0.1546	-51.8543	135.7	0.0374	109.1798	153.8	0.1855	123.7424	102.4	0.4938	82.3877
59	-58.65	0.1589	-47.1879	134.6	0.2685	108.2947	152.5	0.215	122.6965	101.3	0.5031	81.5026
64	-56.7	0.3369	-45.6190	163.6	0.1001	131.6272	-62.38	3.755	-50.1889	101.4	0.5057	81.5831
69	-58.69	0.2649	-47.2200	167.3	0.1312	134.6041	154.8	0.1814	124.5470	102.4	0.492	82.3877
74	-80.39	0.1798	-64.6791	153.2	0.123	123.2597	149.1	0.2141	119.9610	101.6	0.4967	81.7440
79	-63.52	0.3048	-51.1061	135.3	0.2487	108.8579	148.3	0.1796	119.3173	101.3	0.4914	81.5026
84	-53.27	0.1836	-42.8593	161.4	0.1236	129.8571	148.7	0.2127	119.6391	101	0.4831	81.2613
89	-85.05	0.002	-68.4284	162.2	0.1213	130.5008	152.8	0.158	122.9379	100	0.4942	80.4567
94	3356	2.92	2700.1272	163	0.1595	131.1444			0.0000	98.45	0.4852	79.2096
99	-23.14	0.0978	-18.6177	156.6	0.1534	125.9952	141.2	0.1821	113.6049	98.52	0.4878	79.2660
104	-6.666	0.3943	-5.3632	153.3	0.2165	123.3401	143.9	0.1927	115.7772	98.57	0.4827	79.3062
109	-34.14	0.2364	-27.4679	133.4	0.1997	107.3293	148.9	0.1819	119.8000	97.04	0.4847	78.0752
114	3134	2.136	2521.5133	125.4	0.165	100.8927	140.1	0.18	112.7199	94.03	0.4673	75.6534
119	55.22	0.4791	44.4282	158	0.0753	127.1216	140.6	0.1623	113.1221	94.19	0.4692	75.7822
124	-16.26	0.1321	-13.0823	131.6	0.2025	105.8810	144.4	0.1795	116.1795	93.22	0.4791	75.0017
129	-22.26	0.2655	-17.9097	129	0.1981	103.7892	139	0.1816	111.8348	93.56	0.4775	75.2753

A = 4.775x10E-4 m2

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

d = 0.0034 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40% CCTO

Temp (°C)	1 kHz			10kHz			100kHz			200kHz		
	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K	C (pF)	loss	K
25	75.08	0.1395	57.3775	157.3	0.0925	120.2114	146.8	0.2103	112.1871	90.24	0.5644	68.9630
30	84.36	0.1644	64.4694	150.7	0.4041	115.1676	149.2	0.2077	114.0213	94.16	0.5394	71.9587
45	75.49	0.1345	57.6908	159.5	0.0962	121.8927	150.1	0.1929	114.7091	94.16	0.5516	71.9587
50	74.94	0.1287	57.2705	155.4	0.0951	118.7594	147.4	0.1919	112.6457	92.74	0.5424	70.8735
55	53.04	0.231	40.5341	121.2	0.2308	92.6282	137.7	0.1329	105.2328	93.12	0.5343	71.1639
60	56.11	0.337	42.8803	125.7	0.5737	96.0622	98.29	0.4884	75.1149	98.25	0.5196	75.0844
65	59.58	0.1103	45.5321	81.35	0.281	62.1691	99.75	1.322	76.2307	97.18	0.5117	74.2667
70	74.7	0.607	57.0871	112.5	0.7767	85.9745	127.4	0.1646	97.3613	97.64	0.5041	74.6182
75	81.33	0.4309	62.1538	96.77	0.2298	73.9533	96.77	0.2298	73.9533	98.17	0.5003	75.0232
80	56.59	0.3382	43.2471	145.5	0.0617	111.1937	149.5	0.259	114.2505	97.36	0.4998	74.4042
85	2854	0.9617	2181.0771	138.7	0.225	105.9970	148.4	0.1833	113.4099	97.66	0.4944	74.6335
90	96.13	0.141	73.4642	154.1	0.0148	117.7659	148.1	0.2073	113.1806	97.9	0.5075	74.8169
95	96.16	0.679	73.4872	163.1	0.1827	124.6439	144.8	0.1386	110.6587	98.12	0.5088	74.9850
100	69.2	0.0251	52.8839	409.5	0.5817	83.6818	149.9	0.1363	114.5562	99.34	0.4918	75.9174
105	88.34	1.21	67.5110	162.7	0.2691	124.3382	150.3	0.1756	114.8619	99.85	0.4983	76.3071
110	93.42	0.1616	71.3932	166.4	0.0826	127.1658	146.7	0.1953	112.1107	99.51	0.4821	76.0473
115	95.43	0.4293	72.9293	165.5	0.0191	126.4780	147.3	0.1907	112.5693	98.29	0.4926	75.1149
120	96.53	0.2937	73.7699	169.9	0.1538	129.8406	145.6	0.1776	111.2701	99.35	0.4857	75.9250
125	24.22	2.205	18.5094	168.2	0.072	128.5414	150.5	0.1408	115.0148	99.85	0.4873	76.3071

A.7314x10E-4 m2

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

d = 0.0032 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. A.P. Ramirez , M.A. Subramanian , G. Blumberg , D.Li , T. Vogt , S.M. Shapiro ,
Solid State Communications , 115 (2000) 217-220
2. ผศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์. 2546. **เคมีพอลิเมอร์**. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์.
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. Julie J. Mohamed^a, Sabar D. Hutagalung^a, M. Fadzil Ain^b, Karim Deraman^c, Zainal
A. Ahmad^{a*}. **Material letters. Microstructure and dielectric properties of
CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramic.**
4. B.A. Bender , M.-J. Pan , **Materials Science and Engineering**, B 117 (2005) 339-
347
5. <http://www.ccm.udel.edu/Research/MS.html>
6. Chen, I.M. et al., "Toughening of PET/HDPE Polyblends from Recycled
Beverage Bottles", **SPEANTEC** , 35 , 1989.
7. Xanthos, M. et al., **Compatibilization for Reuse of Commingled Post-Consumer
Plastics** , Proceeding of Compalloy 92, New Jersey, 1992.
8. <http://jcm.sagepub.com/>
9. ศ.ดร.ทวี ต้นชมศิริ .2544. **เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องกระบวนการผลิตไดโอดี
เล็กทรอนิกส์** .ระหว่างวันที่ 9-10 สิงหาคม 2544
10. **วารสาร HOBBY ELECTRONICS** ฉบับที่ 02 เดือน พฤษภาคม 2534
11. ภูสิทธิ์ บวรรัตนดิษฐ์, พันศักดิ์ พุฒิมานิตพงษ์. **ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น**
12. วีระพงษ์ มงคลรัตนภรณ์, อนุพงษ์ พงษ์สุวรรณ, เรวัต เนื่องทวี. **ความรู้เกี่ยวกับเซรามิก**
13. ดร.รัตติกร ยิ้มนิรัญ. 2546. **เอกสารประกอบการสอนรายวิชา ว.วศ.210404 การ
ประยุกต์ของวัสดุด้านไฟฟ้า. ภาควิชาฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์.
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**
14. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการปี 43** ฉบับที่ 139 เดือน กันยายน 2538
15. 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
16. www.ri.ac.uk/DFRL/people2/f_cor/DFRL.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. กมรัตน์ คุรัตน์ชัชวาล , ดวงดาว ปรีชาวงศ์. 2541 บทบาทของมัลติฟังก์ชันนัล มอนอเมอร์ที่มีผล”ต่อสมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง ขวด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ใช้แล้วกับพอลิพรอพิลีนผสมกับ ซานอ้อย . โครงการพิเศษ .คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
18. เนเรศ ประเสริฐวงษ์ , ธาราสรีย์ แสงภักดี , 2544 . การใช้สารช่วยผสมปรับปรุง สมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีกรเติม แคลเซียมคาร์บอเนต . โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
19. รมินทร์ ช้างเพชร , ประภุญณ์ แสงทองอินทัย 2545. การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมโดยใช้สารก่อกวน . โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
20. ปิยวรรณ เจียวัก , พงศ์ศักดิ์ แพน้อย . 2543 . การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตไม้ เทียมจากพอลิพรอพิลีนและไม้ยูคาลิปตัส. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
21. กรรณิการ์ ยี่มนาค,ขนิษฐา ผันเรือง . 2546 .การศึกษาการปรับปรุงฟิล์มพอลิเอ ทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลทเพื่อกันการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ .โครงการพิเศษ.ภาควิชาเคมี .คณะวิทยาศาสตร์ . สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
22. Zhi-Min Dang , Ce-Wen Nan., **Dielectric properties of LTNO ceramics and LTNO/PVDF composites**
23. Shuying Yang *, Rogelio Benitez, Arturo Fuentes, Karen Lozano *, Composites Science and Technology, **Dielectric analysis of VGCNF reinforced polyethylene composites**
24. H.C. Pant, M.K. Patra, Aditya Verma, S.R. Vadera, N. Kumar *, Acta Materialia 54 (2006)3163–3169, **Study of the dielectric properties of barium titanate-polymer composites**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. Lijie Dong,a,b Chuanxi Xiong,a,b,* Hongying Quanb and Guanghui Zhaoa,
Scripta Materialia 55 (2006) 835–837,**Polyvinyl-butyril/lead zirconate titanates
composites with high dielectric constant and low dielectric loss,**
26. Heng Chen *, Xianlin Dong, Tao Zeng, Zhiyong Zhou, Hong Yang, Ceramics
International, Ceramics International: **The mechanical and electric properties of
infiltrated PZT/polymer composites**
27. Cao Lia*, Yi Gu a, Liu Xiaobo b, Zou Yaobang c, Tang Anbing c, Thin Solid
Films: **Synthesis and dielectric property of polyarylene ether nitriles/titania
hybrid films**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้