



การใช้ซีโอไลต์ (Zeolites) เป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน
ในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงขี้เลื่อยไม้

นางสาวกุลนิดา เทพทิม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

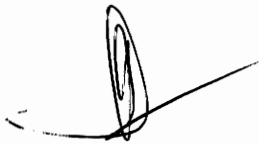
การใช้ซีโอไลต์(Zeolites)เป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน
ในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลีเยอไมต์

นางสาวกุลนิตา เทพทิม วศ.บ. (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

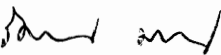
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



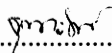
(ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์



(รศ.ดร.รัตนวรรณ มกรพันธุ์)

กรรมการ



(ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ซีโอไลต์(Zeolites) เป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน ในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นางสาวกุลนิกา เทพทิม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

การใช้ซีโอไลต์เป็นสารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้ ศึกษาโดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผงซีลี้อยไม้ 0 50 และ 100 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน และทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนสเต็มเรทของตะกั่ว สเต็มเรทของสังกะสี และซีโอไลต์เป็น 2.4 และ 4.8 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน รวมทั้งทำการศึกษาผลกระทบของการใช้ สเต็มเรทของสังกะสี ร่วมกับ ซีโอไลต์ในอัตราส่วนต่างๆเพื่อเพิ่มความเสถียรทางความร้อนของวัสดุผสมอีกด้วย โดยทำการขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ หลังจากนั้นทำการอบชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียสในระยะเวลาต่างๆ แล้วทำการเปรียบเทียบระดับสี และทดสอบสมบัติต่างๆด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) Fourier transform infrared analysis (ATR-FTIR) UV-Vis Spectrophotometer (UV-Vis) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) พบว่า การใช้สเต็มเรทของตะกั่ว สเต็มเรทของสังกะสี และซีโอไลต์ในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้สามารถช่วยในการปรับปรุงการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ โดยสเต็มเรทของตะกั่ว ทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีเสถียรภาพทางความร้อนดีที่สุดสังเกตได้จากค่าดัชนีความเหลืองที่ต่ำ อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีที่ช้า และปริมาณหมู่พอลิอินที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม วัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้ที่ใช้สเต็มเรทของตะกั่วนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าวัสดุผสมที่ใช้ซีโอไลต์ การเติมผงซีลี้อยไม้ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลง และปริมาณหมู่พอลิอินเพิ่มขึ้น แต่การเติมซีโอไลต์ในวัสดุผสมส่งผลให้เกิดรูพรองขึ้น เมื่อใช้สเต็มเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลต์ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยยิ่งปริมาณซีโอไลต์มากขึ้นยิ่งส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น แต่การใช้สเต็มเรทของสังกะสีร่วมกับซีโอไลต์นั้นส่งผลให้สีในขั้นเริ่มต้น(Initial color)ไม่ดี แต่สามารถช่วยลดอัตราเร็วในการเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี โดยการใช้สเต็มเรทของสังกะสี ร่วมกับ

ซีโอไลท์ที่อัตราส่วน 1:1 (2.4:2.4 phr) ให้ผลดีที่สุด เนื่องจากการใช้ซีโอไลท์ในปริมาณที่มากกว่า 2.4 phr ทำให้เกิดรูพรองขึ้นในชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลีเยอไมต์

คำสำคัญ : พอลิไวนิลคลอไรด์(พลาสติกพีวีซี) / ผงซีลีเยอไมต์ / กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด / สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน / วัสดุเชิงประกอบ /

Thesis Title	Use of Zeolites as a Co-Thermal Stabilizer in PVC/Wood Sawdust Composites
Thesis Credits	15
Candidate	Miss Kulnida Taptim
Thesis Advisor	Prof. Dr. Narongrit Sombatsompop
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2549

Abstract

Zeolites were used as a co-stabilizer in wood/PVC composites. The wood contents of 0, 50 and 100 phr of 100 PVC with varying dosages of Pb and Zn stearates and zeolite stabilizes of 2.4 and 4.8 phr. In addition, this work also studied the effect of Zn stearate and Zeolite ratio on the stabilization of the wood/PVC composites. The wood/PVC composites were processed using a twin screw extruder and then heated in an oven at 177°C for various times. The color changes and thermal properties of the composite samples were monitored through a number of techniques, such as Thermogravimetric Analysis (TGA), Fourier Transform Infrared Analysis (ATR-FTIR), UV-Vis Spectrophotometer (UV-Vis) and Scanning Electron Microscope (SEM). The results suggested that the Pb stearate, Zn stearate and zeolite could improve the thermal stability of PVC in wood/PVC composites, and the Pb stearate was found to be the most effective stabilize by observing the CIE yellowness index, lower rate of color change, and less polyene index production. However, the decomposition temperature of Pb-stabilized composites was lower than that of zeolite-stabilized composites. The addition of wood sawdust resulted in a decrease in the decomposition temperature and an increase in the polyene index. The addition of zeolite in the composites resulted in production of pores. Additions of Zn stearate and zeolite resulted in an increase in the decomposition temperature, this being more affected by the zeolite volume. The composites with Zn stearate /zeolite stabilizer had worse initial color, but less deteriorating rate under thermal ageing condition. This work recommended the use of Zn stearate : zeolite ratio of 1:1 (or 2.4:2.4 phr). Using zeolite of greater than 2.4 resulted in production of pores in the composite samples.

Keywords : Polyvinylchloride(PVC) / Wood Sawdust / Thermal Stabilizer / Composites

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความรู้ และคำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา ระหว่างการทำงานวิจัย ตลอดจนได้ประสบการณ์ใหม่ๆ ในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (นครปฐม) สำหรับความรู้ และคำแนะนำในการวางแผนการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ อาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ รศ.ดร.รัตนวรรณ มกรพันธุ์ อาจารย์วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำ และความกรุณาในการสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ บริษัท วินิไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท วิ.พี. วัสดุ จำกัด บริษัท PQ Chemicals (Thailand) Ltd. สำหรับการให้ความอนุเคราะห์วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และทดสอบ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน รวมถึงสมาชิกกลุ่มวิจัย P-PROF ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกาย และกำลังใจในการทำงาน สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว สำหรับกำลังใจ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑
สารบัญ	๓
รายการตาราง	๗
รายการรูปประกอบ	๘
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์	5
2.2 สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน	15
2.3 เส้นใยธรรมชาติ	23
2.4 วัสดุคอมโพสิต	28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3. การออกแบบและวิธีการทดลอง	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.2 การออกแบบการทดลอง	39
3.3 วิธีการทดลอง	43
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	56
4.1 อิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี	56

	หน้า
4.2 อิทธิพลของสารผสมซีโอไลต์ และ สเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกัน การเสื่อมสภาพ ทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี	68
5. สรุปผลการทดลอง	76
5.1 อิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี	76
5.2 อิทธิพลของสารผสมซีโอไลต์ และ สเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกัน การเสื่อมสภาพ ทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี	77
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	82
ก การศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี - ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณหมู่พอลิอินจากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR	82
ข การศึกษาอิทธิพลของสารผสมซีโอไลต์ และ สเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกัน การเสื่อมสภาพ ทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี - ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณหมู่พอลิอินจากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR	90
ประวัติผู้ทำวิจัย	94

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ชื่อ สูตรทางเคมี และปริมาณ PbO ในสารประกอบตะกั่ว	19
2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อ	24
2.3 ส่วนประกอบ และสมบัติในเส้นใยธรรมชาติ	28
3.1 อัตราส่วนผสมของพีวีซีคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	43
4.1 สีของชิ้นงานที่ไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ทั้งกรณีที่มีการเติมและไม่เติมสารป้องกัน การเสื่อมสภาพทางความร้อนปริมาณ 2.4 phr ซึ่งไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ภายหลัง การอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส	57
4.2 สีของชิ้นงานที่ไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ทั้งกรณีที่มีการเติม และไม่เติมสารป้องกัน การเสื่อมสภาพทางความร้อนปริมาณ 4.8 phr ซึ่งไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ภายหลัง การอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส	57
4.3 ค่า Hue ของชิ้นงานที่ไม่เติม และที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ทั้ง 3 ชนิดซึ่งไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ ณ เวลาการอบต่างๆที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส	61
4.4 อุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงขี้เถ้าไม้ ณ น้ำหนักที่สูญเสียไป 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานทั้งหมด	68
4.5 สีของชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ และเติมซีโอโลต์และสเตียเรทของสังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนซึ่งไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ภายหลังการอบ ที่ 177 องศาเซลเซียส	69
4.6 ค่า Hue ของชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอโลต์ร่วมกับสเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกัน การเสื่อมสภาพทางความร้อนทั้งสามชนิดซึ่งไม่เติมผงขี้เถ้าไม้ ณ เวลาการอบต่างๆ ที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส	71
4.7 อุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่างที่เติมและไม่เติมผงขี้เถ้าไม้	74

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ในทวีปต่างๆ	1
2.1 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์	7
2.2 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ตำแหน่งต่างๆ	8
2.3 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยกลไกการเกิดอนุมูล	9
2.4 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยกลไกไอออน	9
2.5 การเกิดการเร่งการเสื่อมสภาพเนื่องจากไฮโดรเจนคลอไรด์	10
2.6 ปฏิริยาการเร่งการเสื่อมสภาพที่คล้ายกันของไฮโดรเจนคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์	11
2.7 การเกิดปฏิริยาการเสื่อมสภาพแบบเทอร์โมออกซิเดทีบ	12
2.8 การเกิดร่างแหระหว่างสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ และการเกิดวงแหวนเบนซีน	13
2.9 ลักษณะโครงสร้างผลึกของซีโอไลท์	18
2.10 การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ 175 องศาเซลเซียส ในโลหะคลอไรด์ต่างชนิดกัน	23
2.11 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	25
2.12 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	26
2.13 สูตรโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	27
3.1 ตัวอย่างของพีวีซีเรซิน	36
3.2 ตัวอย่างของผงซีโอไลต์	37
3.3 ตัวอย่างของพีวีซีคอมปาวด์	37
3.4 ตัวอย่างของซีโอไลต์	38
3.5 ตัวอย่างของสเตียเรทของตะกั่ว (Pb stearate)	39
3.6 ตัวอย่างของสเตียเรทของสังกะสี (Zn stearate)	39
3.7 แผนการดำเนินงานการศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารป้องกัน การเสื่อมสภาพทางความร้อน	40
3.8 แผนการดำเนินงานการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสี	41
3.9 เครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง	44
3.10 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่	45
3.11 หัวขึ้นรูปแบบดายสี่เหลี่ยม	45
3.12 ระบบหล่อเย็นแบบอ่างน้ำ	46
3.13 ตู้อบ	46

รูป(ต่อ)	หน้า
3.14 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	47
3.15 ระบบสีของมันเชล	48
3.16 วงสีของมันเชล	49
3.17 การเปลี่ยนแปลงของสีเนื่องจากค่า Value และค่า Chroma	50
3.18 เครื่อง Fourier transform infrared analyzer	51
3.19 เครื่อง Perkin-Elmer Thermal analyzer	52
3.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
3.21 เครื่องเคลือบทองแบบสุญญากาศ	53
4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานตัวอย่างที่เดิมสีโอลิต์ ในปริมาณ (a) ปริมาณ 2.4 phr และ (b) ปริมาณ 4.8 phr	58
4.2 ผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อ ค่าดัชนีความเหลือง ของชิ้นงานพีวีซีซึ่งไม่เติมผงขี้เถ้า 50 ไม่น เวลาการอบต่างๆ ที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส(* ชิ้นงานพีวีซีเป็นสีน้ำตาล)	61
4.3 ผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อ ค่าปริมาณหมู่พอลิอินของชิ้นงานตัวอย่างพีวีซี และชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซี และผงขี้เถ้า 50 ไม่น	63
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงาน ของชิ้นงานพีวีซีที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน 2.4 phr	66
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงาน พีวีซีของชิ้นงานพีวีซีที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน 4.8 phr	66
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานพีวีซี ของชิ้นงานพีวีซีที่เติมผงขี้เถ้า 50 phr และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ทางความร้อน 2.4 phr	67
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานพีวีซี ของชิ้นงานพีวีซีที่เติมผงขี้เถ้า 50 phr และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ทางความร้อน 4.8 phr	67
4.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานตัวอย่างที่เดิมสีโอลิต์ และสเดียรท ของสังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนอัตราส่วนสีโอลิต์ ต่อสเดียรทของสังกะสี (a) 2.4 : 2.4 phr และ (b) 3.6 : 1.2 phr	70

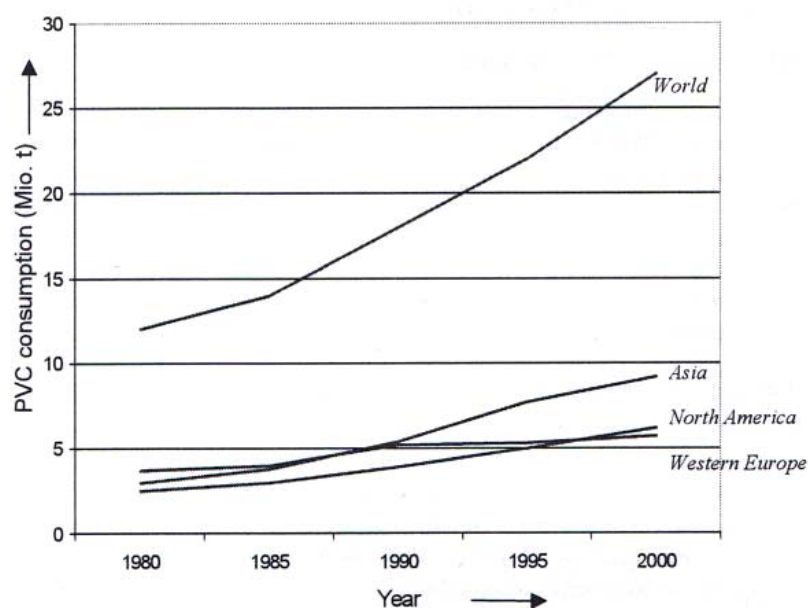
รูป(ต่อ)	หน้า
4.9 ผลของการใช้ชีโอไลท์ร่วมกับสเดียรเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกัน การเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อค่าดัชนีความเหลืองของชิ้นงาน ตัวอย่างพีวีซีที่อบ ณ อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส	71
4.10 ผลของชนิด และ ปริมาณของการเติมชีโอไลท์ และ สเดียรเรทของสังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อค่าปริมาณหมู่พอลิอิน	73
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่ให้แก่ ชิ้นงานตัวอย่างพีวีซีกรณีที่มีการเติมชีโอไลท์ และสเดียรเรทของสังกะสี ในอัตราส่วนต่างๆ	75
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่ให้ แก่ชิ้นงานตัวอย่างพีวีซีกรณีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ 50 phr และชีโอไลท์ และสเดียรเรทของสังกะสีในอัตราส่วนต่างๆ	75
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน	83
ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมชีโอไลท์ 2.4 phr	83
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมชีโอไลท์ 4.8 phr	84
ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมสเดียรเรทของสังกะสี 2.4 phr	84
ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมสเดียรเรทของสังกะสี 4.8 phr	85
ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมสเดียรเรทของตะกั่ว 2.4 phr	85
ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมสเดียรเรทของตะกั่ว 4.8 phr	86
ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยู่ที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน	86
ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยู่ที่ไม่เติมชีโอไลท์ 2.4 phr	87

รูป(ต่อ)	หน้า
ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมซีโอไลท์ 4.8 phr	87
ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมสเดียรทของสังกะสี 2.4 phr	88
ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมสเดียรทของสังกะสี 4.8 phr	88
ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมสเดียรทของตะกั่ว 4.8 phr	89
ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมสเดียรทของตะกั่ว 2.4 phr	89
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 1.2 : 3.6 phr	91
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 2.4 : 2.4 phr	91
ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 3.6 : 1.2 phr	92
ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 1.2 : 3.6 phr	92
ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 2.4 : 2.4 phr	93
ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซี และผงซีลี้อยไม้ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 3.6 : 1.2 phr	93

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) เป็นวัสดุในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายรองจากพอลิเอทิลีน โดยนิยมนำใช้กันมานานกว่า 70 ปีแล้ว และมีแนวโน้มปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ในทวีปต่างๆ [1]

เนื่องจากพอลิไวนิลคลอไรด์มีข้อดีหลายประการ กล่าวคือ พอลิไวนิลคลอไรด์มีสมบัติทั้งทางกลที่ดี มีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี อีกทั้งยังมีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าสูง จึงมีการนำพอลิไวนิลคลอไรด์มาผลิตเป็นวัสดุผสมกับผงซีลีเนียมเพื่อนำไปผลิตเป็นไม้แผ่นชนิดต่างๆ ใช้ทดแทนแผ่นไม้จากธรรมชาติ เนื่องจากพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมกับผงซีลีเนียมนี้มีสมบัติเด่นหลายประการ คือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปและดัดแปลงรูปทรงได้ง่าย ราคาถูก ทนทานต่อแมลง เช่น มด ปลวก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีคลอไรด์ (Cl) เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบ เมื่อใช้งานไปสักระยะหนึ่งกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ค่อย ๆ ถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งเป็นสาเหตุให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีอายุการใช้งานสั้นลง จากการศึกษพบว่า อายุการใช้งานของพอลิไวนิลคลอไรด์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่ามากกว่า 15 ปี [2] แต่ในกรณีที่เมื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ได้รับความร้อน หรือแสง เกิดการเร่งให้พอลิไวนิลคลอไรด์

เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ผู้ผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์จึงจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (stabilizers) เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์จากแสงแดด และความร้อน ซึ่งโดยมากสารป้องกันการเสื่อมสภาพจะเป็นส่วนประกอบระหว่างเกลือกับโลหะ เช่น ตะกั่ว (lead) แบเรียม (barium) หรือ แคดเมียม (cadmium) ซึ่งพบว่า สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเกิดเป็นโลหะคลอไรด์ (metal chloride) ขึ้น ซึ่งโลหะคลอไรด์นี้เองมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งซีโอไลต์ (Zeolites) นี้เองจะสามารถจับกรดไฮโดรคลอริกและโลหะคลอไรด์[6] เพื่อช่วยการทำงานของสารป้องกันการเสื่อมสภาพอื่นๆ ได้ดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำซีโอไลต์เข้ามาใช้เป็นสารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ใ้ร่วมกับ สารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดอื่น เพื่อให้ได้ผลทางด้านป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนดีขึ้น และเพื่อลดปริมาณการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่มีส่วนประกอบเป็นตะกั่ว เนื่องจากสารประกอบของตะกั่ว นั้น ไม่ปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ใช้ และยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะ โดยในที่นี้ใช้สเตียเรทของตะกั่ว และสเตียเรทของสังกะสี เปรียบเทียบกับการใช้ซีโอไลต์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสี ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยศึกษาผลซึ่งเกิดจากปริมาณและอัตราส่วนการเติม พร้อมทั้งศึกษาถึงปริมาณการเติมของผงซีโอไลต์ ที่มีสมบัติป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนของวัสดุผสมพอลิไวนิลคลอไรด์และผงซีโอไลต์ และสามารถทำให้เข้าใจกลไกการทำงานของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดต่างๆ เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางในการเลือกใช้และพัฒนาสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ใช้ในพอลิไวนิลคลอไรด์ได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ซีโอไลต์ แทนการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นโลหะหนัก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณของซีโอไลต์ที่เหมาะสมในการทำวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ และผงซีโอไลต์ เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการป้องกันการเสื่อมสภาพของ ซีโอไลต์ และสเตียเรทของสังกะสี กับสเตียเรทของตะกั่ว
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ และผงซีโอไลต์
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลของผงซีโอไลต์ที่มีต่อวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ และผงซีโอไลต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมวัสดุผสมพอลิไวนิลคลอไรด์และผงซีลี้อยู่ไม้ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็งในเกรดอัดรีด และผงซีลี้อยู่ไม้ยางพาราที่มีอนุภาคอยู่ในช่วง 150 - 250 ไมครอน
- 1.3.2 สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยคือ สเตียเรทของตะกั่ว สเตียเรทของสังกะสี และซีโอไลท์
- 1.3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ และปริมาณผงซีลี้อยู่ไม้

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

- 1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดต่างๆ
- 1.4.2 จัดเตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ทำการเตรียมวัสดุผสมพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยู่ไม้ ที่มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดต่างๆ และทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน
- 1.4.4 สรุปและประเมินผลของความเป็นไปได้ในการนำสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนแต่ละชนิดมาใช้งาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี - การศึกษาความเป็นไปได้ในการซีโอไลท์ แทนการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีส่วนผสมของตะกั่วจะนำไปสู่การพัฒนาการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ
- 1.5.2 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์ - การศึกษาส่วนผสมของวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ และซีลี้อยู่ไม้ยางพาราที่ใช้ป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่เหมาะสม เพื่อทำการผลิตในภาคอุตสาหกรรม
- 1.5.3 ด้านสิ่งแวดล้อม - การศึกษาส่วนผสมของวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ และผงซีลี้อยู่ไม้ยางพาราที่ใช้ป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่เหมาะสม เพื่อทำการผลิตและนำมาใช้ทดแทนไม้จริง และยังใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ไม่มีส่วนผสมของตะกั่วอีกด้วย

- 1.5.4 ด้านวิชาการทั่วไป - คาดว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำมาตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการ เพื่อเป็นความรู้ทางด้านการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนในพอลิไวนิลคลอไรด์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์

2.1.1 โครงสร้างและสมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดไวนิลซึ่งเป็นเรซินที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน พอลิไวนิลคลอไรด์มีลักษณะสายโซ่ตรง มีอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส มีสมบัติที่ดีคือ ไม่ติดไฟ ทนต่อสารเคมี ไม่ละลายในตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้ว สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่างๆ ได้ง่าย จึงสามารถใช้ประโยชน์ได้มาก พอลิไวนิลคลอไรด์มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังนี้ $-(CH_2-CHCl)_n-$ หน่วยซ้ำแต่ละหน่วยส่วนใหญ่จะเชื่อมต่อกันแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) มีเล็กน้อยที่มีลักษณะเป็นแบบหัวต่อหัว (head-to-head) พอลิไวนิลคลอไรด์เกรดการค้ามีจำนวนหน่วยซ้ำในสายโซ่โมเลกุลประมาณ 500 - 1500 หน่วย ทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 31,000 - 94,000 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลนั้นสัมพันธ์กับค่า K value บ่งบอกความหนืดของพอลิไวนิลคลอไรด์เกรดต่างๆ โดยค่า K value ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ Fikentscher K value ค่าจะอยู่ในช่วง 50-80 พอลิไวนิลคลอไรด์นั้นคล้ายกับพอลิเมอร์ทั่วไปที่สมบัติขึ้นกับค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุล และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลซึ่งการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนักต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (M_w/M_n) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2-25 ซึ่งอุณหภูมิขณะทำการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนักของพอลิไวนิลคลอไรด์ และส่งผลต่อปริมาณ สเตอริโอเรกูลาริตี (degree of stereoregularity) อีกด้วย โดยน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนักจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการพอลิเมอไรเซชันอุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันที่ใช้กันทั่วไปประมาณ 40-75 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พอลิไวนิลคลอไรด์เกรดการค้ามีปริมาณโครงสร้างแบบซินดิโอเทคติก (syndiotactic) ขึ้นๆ เนื่องจากปริมาณสเตอริโอเรกูลาริตีจะต่ำถ้าทำการพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ พอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีคลอรีนอะตอม ซึ่งเป็นอะตอมขนาดใหญ่ส่งผลให้พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน (amorphous) โดยมีโครงสร้างแบบผลึก (crystalline) อยู่ ประมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมด ซึ่งสัดส่วนระหว่างโครงสร้างแบบอสัณฐาน และโครงสร้างแบบผลึกนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต สมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตและการใช้งานที่ควรคำนึงถึงคือ

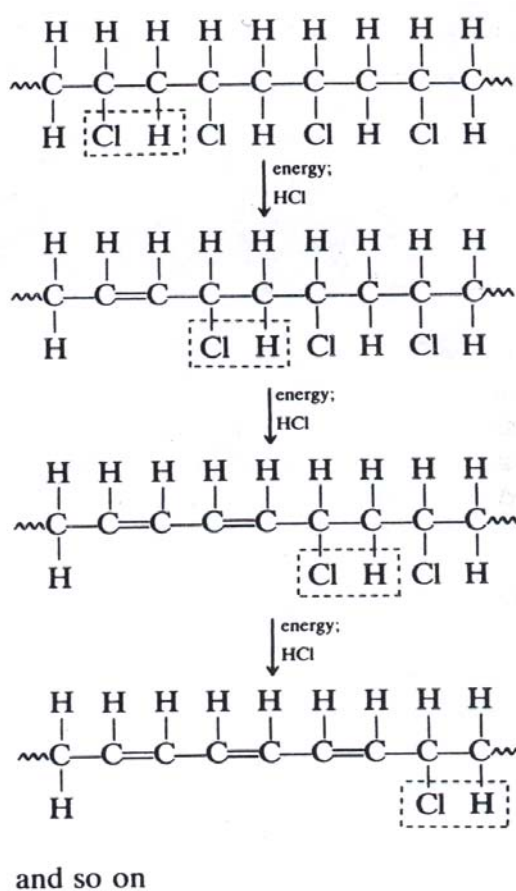
- ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) โดยจะกล่าวถึงการเลือกใช้โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) หรือโคพอลิเมอร์ (copolymer) ซึ่งโฮโมพอลิเมอร์นิยมใช้มากในกระบวนการผลิตแบบหลอมเหลว
- น้ำหนักโมเลกุล (viscosity number; K value) น้ำหนักโมเลกุลนั้นส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต และสมบัติทางกลของพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีปริมาณปลายสายโซ่ (end-group) จะมีมาก
- ลักษณะอนุภาค (particle characteristics) ของพอลิไวนิลคลอไรด์ รูปร่าง โครงสร้าง ขนาด และการกระจายของขนาดของอนุภาค ส่งผลต่อการการจัดเรียงของอนุภาค ซึ่งเป็นปัจจัยทางการขนส่ง, การวัดตวง, การป้อนลงกรวยป้อนเม็ด (hopper) และกระบวนการผลิต ลักษณะของอนุภาคเป็นปัจจัยสำคัญของอัตรา และความสม่ำเสมอในการดูดซับของสารเติมแต่งแบบของเหลวอีกด้วย ดังนั้นเหตุผลหลักในการเลือกใช้พอลิไวนิลคลอไรด์เกรดต่างๆคือ การเลือกลักษณะอนุภาคให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตซึ่งทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์แบบผงถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย
- ความบริสุทธิ์ (purity) เนื่องจากสิ่งเจือปนบางชนิดอาจทำให้การเสื่อมสภาพเกิดได้ง่ายขึ้น

คลอรีนอะตอมที่อยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์นี้เอง ที่ส่งผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์สูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่ปัญหาความเป็นพิษของพอลิไวนิลคลอไรด์เนื่องมาจากคลอรีนอะตอมในสายโซ่ก็เป็นอุปสรรคใหญ่ในการทำการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์มาเป็นเวลานาน จึงมีความจำเป็นในการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนโดยในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้อุณหภูมินั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนจะช่วยหยุดยั้งการเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้

2.1.2 การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์เกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส โดยการแสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพทางความร้อนคือ มีการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) เกิดการเปลี่ยนแปลงสีการเสื่อมลงของลักษณะทางกายภาพ เคมี และสมบัติทางไฟฟ้าดังที่กล่าวมาแล้วว่าพอลิไวนิลคลอไรด์มีคลอรีนอะตอมอยู่ในสายโซ่ การเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์จึงเกิดโดยการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากสายโซ่ จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน

(Dehydrochlorination) ส่งผลให้สายโซ่หลักเกิดความไม่อิ่มตัว (Unsaturation) โดยเกิดเป็นพันธะคู่ที่ต่อเนื่องกัน (Conjugated double bonds) ในสายโซ่ของพอลิไวนิลคลอไรด์ เมื่อเกิดพันธะคู่ที่ต่อเนื่องกันมีมากกว่า 6 พันธะคู่ ($n \geq 6$) ส่งผลทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์ เปลี่ยนสีจากสีเหลือง เป็นสีน้ำตาล และยังมีพันธะคู่ภายในสายโซ่โมเลกุลมากขึ้นยิ่งส่งผลให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีสีคล้ำมากขึ้น จนกลายเป็นสีดำ นอกจากนั้นแล้วไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดขึ้นยังสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอัตโนมัติ (autocatalysis) ได้คล้ายกับกรดแก่อื่นๆอีกด้วย โดยการหลุดออกของไฮโดรเจนคลอไรด์ในสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์นั้นมีหลายแบบเช่น แบบสุมโดยตำแหน่งที่จะหลุดนั้นไม่แน่นอน โดยมีปฏิกิริยาการเกิดการเสื่อมสภาพ เป็นดังนี้[3]

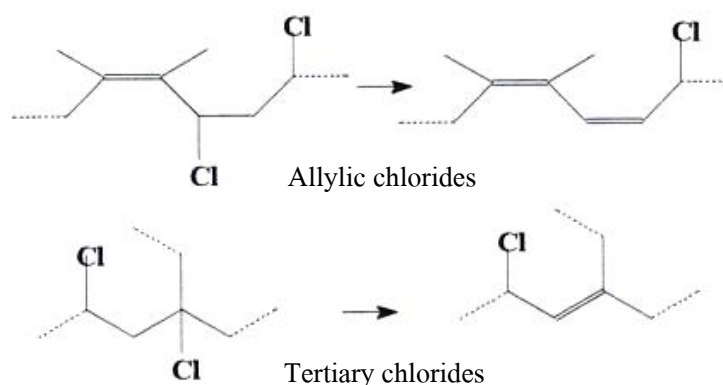


รูปที่ 2.1 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ [3]

แต่พอลิไวนิลคลอไรด์เกรดทางการค้าานั้นจะมีจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันในสายโซ่ด้วยกันหลายตำแหน่ง เช่น ส่วนที่หลุดจากตัวเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ปลายสายโซ่ที่มีพันธะไม่อิ่มตัว กิ่งก้านของสายโซ่ โครงสร้างแบบหัวต่อหัว (Head-to-head structure) ในสายโซ่ และโครงสร้างที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้[4] ดังนั้นสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีการเชื่อมต่อแบบหัวต่อหางจึงสามารถต้านทานการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันได้ดีกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์เกรด

ทางการค้า แต่มีการผลิตที่ยากกว่ามากจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมโดยการเริ่มเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันนั้นถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง ซึ่งโดยทั่วไปเรียกคลอรีนอะตอมที่ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันได้ง่ายว่า ลาไบล์ของคลอรีนอะตอม (labile of chlorine) โดยลาไบล์ของคลอรีนอะตอมนี้อยู่ที่ปลายสายโซ่ กลางสายโซ่ที่เป็นตำแหน่งที่มีหมู่คาร์บอนเกาะอยู่ 3 อะตอม (tertiary chlorine atom) ซึ่งตำแหน่งที่มีหมู่คาร์บอนเกาะอยู่ 3 อะตอมที่กิ่งของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลนี้เองที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันได้มากถึง 70-80 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนที่เหลือประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ เกิดขึ้นจากกลางสายโซ่ที่มีคลอรีนอะตอมอยู่แบบอัลไลริก (allylic chlorine) แต่ถ้าในสายโซ่ที่มีหน่วยซ้ำธรรมดา จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันที่ตำแหน่งต่างๆ แบบสุ่ม (random) โดยมีปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันของตำแหน่งที่กล่าวมาข้างต้นดังนี้

Dehydrochlorination of structural irregularities

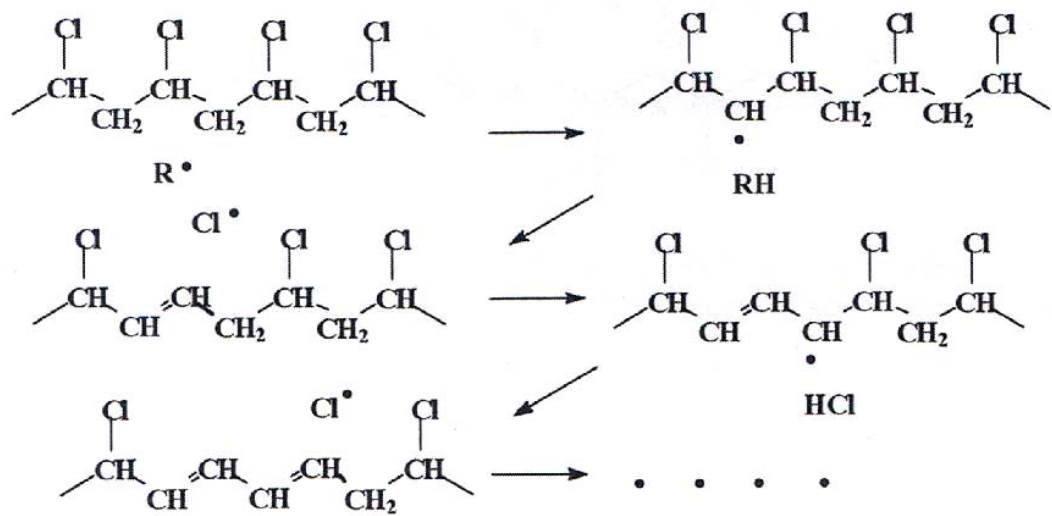


Dehydrochlorination of normal monomer units

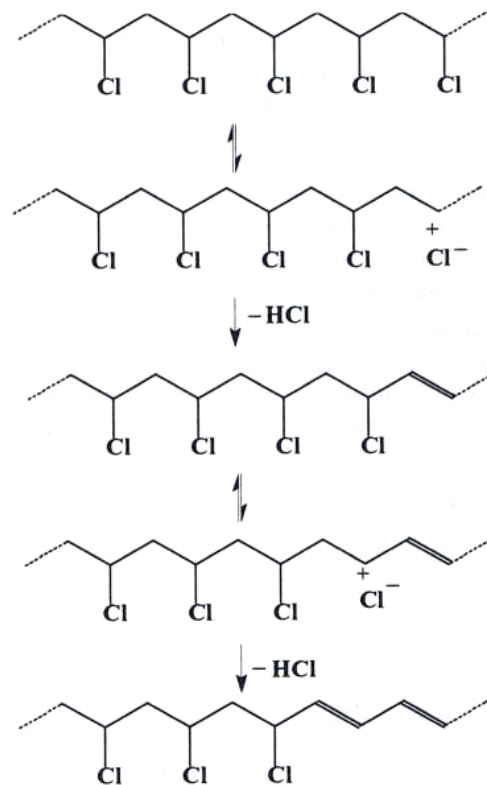


รูปที่ 2.2 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ตำแหน่งต่างๆ[4]

และการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์แบบสุ่มนั้น มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย และอธิบายไว้หลาย ทฤษฎี เช่นการเสื่อมสภาพโดยกลไกการเกิดอนุมูล (radical mechanism) ดังรูปที่ 2.3 หรือการเสื่อมสภาพโดยกลไกไอออน (ion pair mechanism) ดังรูปที่ 2.4



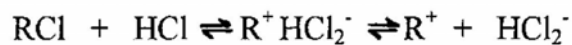
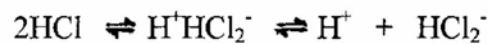
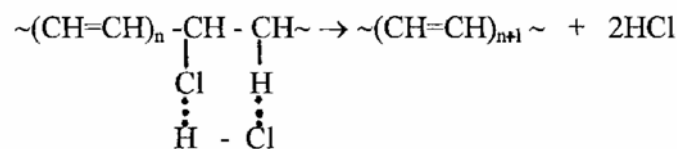
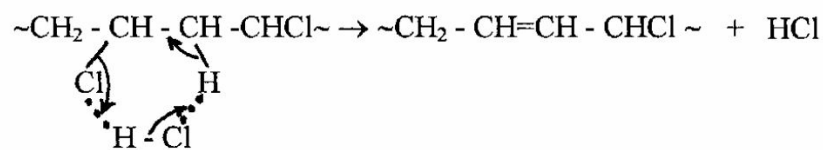
รูปที่ 2.3 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยกลไกการเกิดอนุมูล[4]



รูปที่ 2.4 การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยกลไกไอออน[4]

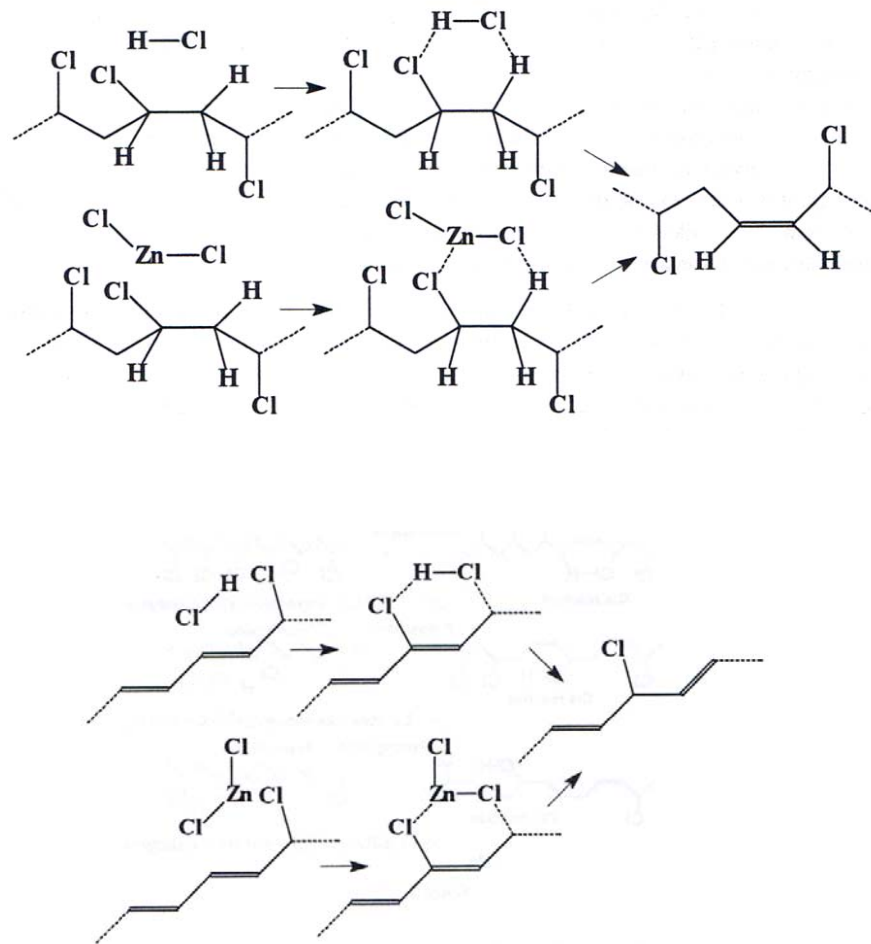
แต่ทั้ง 2 กลไกที่กล่าวมาข้างต้นนั้นไม่สามารถอธิบายการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนคลอไรด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสายโซ่หลักได้ และไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าอนุมูล (radical) ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพนั้น มีอยู่จริงหรือไม่ จึงไม่เป็นที่นิยมนำกล่าวถึงหรือนำมาใช้อ้างอิง

ดังที่กล่าวมาข้างต้นในส่วนของไฮโดรเจนคลอไรด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาเองสามารถเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทำให้ไฮโดรเจนคลอไรด์ถูกปลดปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องโดยมีปฏิกิริยาการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนคลอไรด์ดังนี้



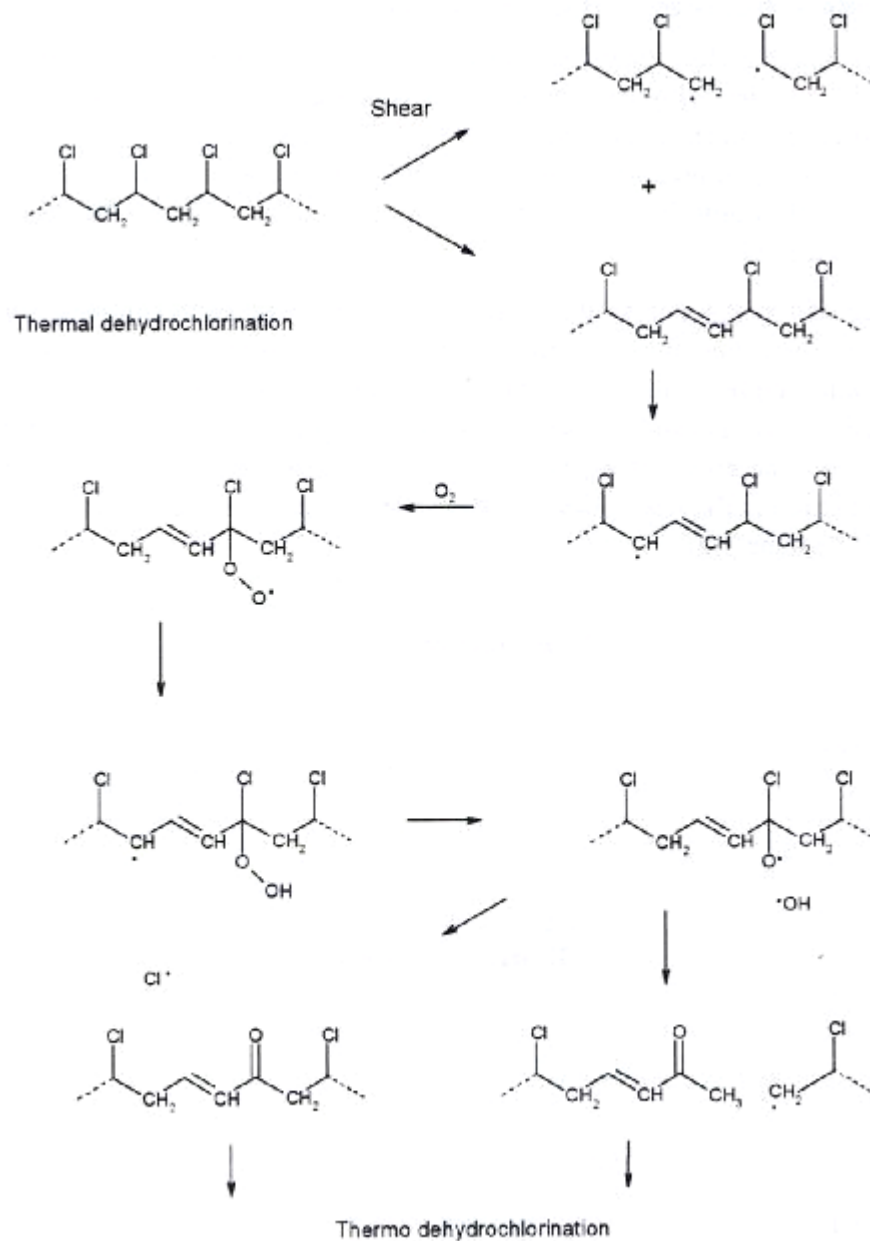
รูปที่ 2.5 การเกิดการเร่งการเสื่อมสภาพเนื่องจากไฮโดรเจนคลอไรด์[5]

เมื่อเปรียบเทียบการเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของไฮโดรเจนคลอไรด์นั้น มีลักษณะคล้ายการเร่งการเสื่อมสภาพที่เกิดจากกรด เช่น โลหะคลอไรด์ (metal chloride) ซึ่งในที่นี้จะแสดงเป็นซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) ดังรูปที่ 2.6



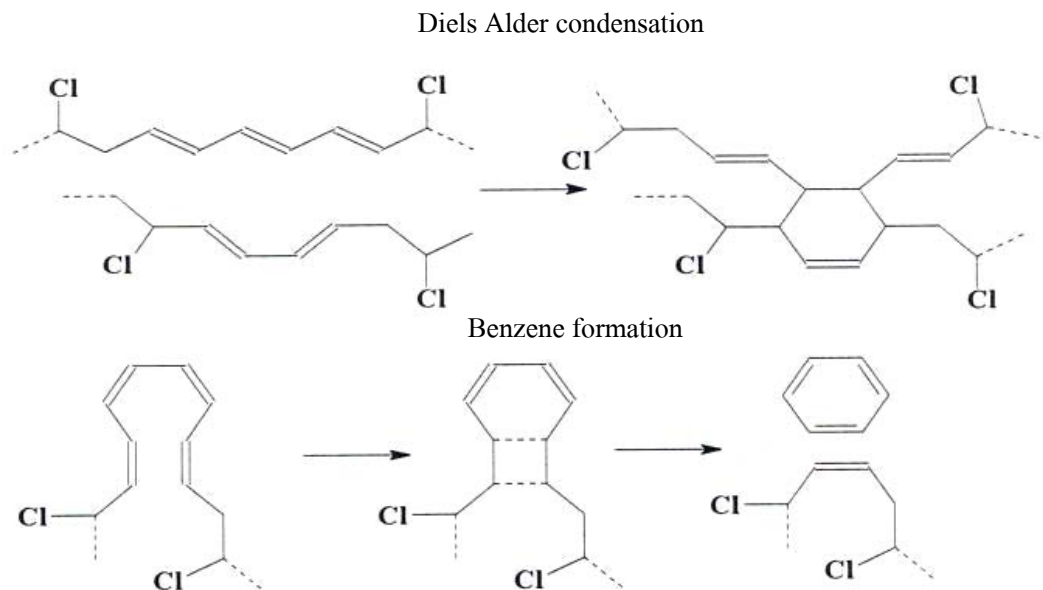
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาการเร่งการเสื่อมสภาพที่คล้ายกันของไฮโดรเจนคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์[4]

ในระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนขึ้นเนื่องจากความร้อนพอลิไวนิลคลอไรด์ยังสามารถเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและความเค้นทางกล ได้อีกด้วยโดยปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพแบบเทอร์โมออกซิเดทีป (thermo-oxidative degradation) โดยหลักการของการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเทอร์โมออกซิเดทีป คือเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนขึ้นเหมือนการเสื่อมสภาพทางความร้อนทั่วไป แรงเฉือน (shear) เป็นสาเหตุในการทำให้สายโซ่ขาดออกจากกันแล้วเกิดอนุมูลขึ้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเหมือนการเสื่อมสภาพทางความร้อน แล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของอนุมูลของพอลิอินทำให้เกิด อนุมูลเปอร์ออกซี (peroxy radical) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxides) แล้วไฮโดรเปอร์ออกไซด์จึงสลายไปเป็น อนุมูลอัลคอกซีและไฮดรอกซี (alkoxy and hydroxyl radical) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนขึ้นได้อีกแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพแบบเทอร์โมออกซิเดทีฟ[4]

พอลิไวนิลคลอไรด์เมื่อเริ่มปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพจะมีพันธะคู่เพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่ง เมื่อเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันมากขึ้นระดับหนึ่ง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากหลังจากเกิดการเสื่อมสภาพไประยะหนึ่งแล้วความหนืดขณะหลอมเหลวเพิ่มมากขึ้น ค่าของแรงบิด (torque) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตมากขึ้นด้วยซึ่งเกิดเนื่องจากการเกิดร่างแห (crosslink) ซึ่งถูกเร่งปฏิกิริยาโดยไฮโดรเจนคลอไรด์ และยังมีการเกิดวงแหวนเบนซีน (benzene) ขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 160 -170 องศาเซลเซียส โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



รูปที่ 2.8 การเกิดร่างแหระหว่างสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ และการเกิดวงแหวนเบนซีน[4]

ดังนั้นพอลิไวนิลคลอไรด์จึงจำเป็นต้องเติมสารที่สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพโดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพนั้นต้องเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์เพื่อยับยั้งการหลุดออกของไฮโดรเจนคลอไรด์ และยังสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมา เพื่อยับยั้งการเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเนื่องจากไฮโดรเจนคลอไรด์ซึ่งกล่าวในหัวข้อที่ 2.3

2.1.3 การเลือกส่วนประกอบต่างๆ ในพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์

— พอลิไวนิลคลอไรด์ สมบัติหลักในการเลือกใช้คือ การเลือกใช้ชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมี เช่น น้ำหนักโมเลกุล ชนิดของอนุภาคซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะกระบวนการผลิต และคุณภาพ (ความบริสุทธิ์) เป็นปัจจัยหลัก โดยการใช้ชนิดของพอลิเมอร์นั้นสำคัญที่สุด ซึ่งชนิดของพอลิไวนิลคลอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยถ้าเป็นพอลิไวนิลคลอไรด์เพส (paste) ส่วนใหญ่ควรเลือกใช้พอลิไวนิลคลอไรด์เกรดอิมัลชัน (emulsion) และเติมเกรดัสเพนชัน (suspension) เป็นสารตัวเติม แต่ถ้าเป็นพอลิไวนิลคลอไรด์แบบแข็งที่ใช้ในกระบวนการอัดรีด กระบวนการฉีดขึ้นรูป กระบวนการรีด นั้นควรใช้พอลิไวนิลคลอไรด์เกรดัสเพนชัน และผสมเกรดอิมัลชันเล็กน้อย

— สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ถึงแม้ว่าการศึกษาเรื่องการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ และผลกระทบต่อสารป้องกันการเสื่อมสภาพมีกันอย่างกว้างขวาง แต่การป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนก็ยังเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมสารป้องกันการ

เสื่อมสภาพทางความร้อนลงในพอลิไวนิลคลอไรด์อยู่ที่ 0.5 - 8 phr ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทั้งหมด, ธรรมชาติของสารป้องกันการเสื่อมสภาพนั้นๆ กระบวนการขึ้นรูป และการนำไปใช้งาน โดยชนิดของสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เลือกใช้จะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วย สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์แบบยืดหยุ่น(flexible PVC) เช่น ผลิตภัณฑ์แผ่นฟิล์ม, ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์, พอลิไวนิลคลอไรด์เพส นั้นควรเลือกใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดที่เป็น แบเรียม/แคดเมียม, แบเรียม/แคดเมียม/สังกะสี เป็นส่วนใหญ่ แต่พอลิไวนิลคลอไรด์แบบยืดหยุ่นที่เป็นผลิตภัณฑ์สายหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล ต้องมีสมบัติความเป็นฉนวนควรใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดที่เป็นตะกั่วหรือบางกรณีใช้ระบบของ แบเรียม/ตะกั่ว และยังมีระบบแบเรียม/แคดเมียม/สังกะสี ที่ใช้ในส่วนประกอบที่เป็นฉนวนและต้องการความใสควบคู่กันไป ในส่วนของพอลิไวนิลคลอไรด์แบบแข็ง (rigid PVC) เช่นท่อ หรือโพรไฟล์อื่นๆ ควรใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดที่เป็นตะกั่ว, อินทรีย์ของดีบุก (organotin) และยังมีแบเรียม/แคดเมียมที่มีฟอสเฟต ก็ถูกใช้ในบางครั้ง รวมถึง อีพอกไซด์ (epoxy) ที่สามารถใช้เป็นได้ทั้งสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และแสงแดดได้อีกด้วย

— พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) นั้นใช้ในพอลิไวนิลคลอไรด์แบบแข็งเพื่อช่วยปรับปรุงความนุ่ม (softness) และความยืดหยุ่น (flexibility) อัตราส่วนของพลาสติไซเซอร์จะ สูงมากในพอลิไวนิลคลอไรด์ที่นุ่ม ดังนั้นการพิจารณาค่าต้นทุนจะเน้นหนักทางด้าน การเลือกพลาสติไซเซอร์ ในกระบวนการผลิต และการเลือกใช้ต้องคำนึงถึงราคา และต้องใช้พลาสติไซเซอร์ที่หาได้ทั่วไปซึ่งที่ใช้กันส่วนมากคือพลาสติไซเซอร์ในตระกูลฟทาเลท (phthalate)

— สารหล่อลื่น (lubricant) สารหล่อลื่นที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์นั้นมี 2 ชนิด คือ สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant) และสารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant) โดยสารหล่อลื่นภายนอกนั้นทำหน้าที่ลดแรงเสียดทาน และความเหนียวของพื้นผิวในกระบวนการผลิต ในส่วนของสารหล่อลื่นภายในนั้นช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค และโมเลกุลขณะกระบวนการผลิต การเลือกใช้สารหล่อลื่นมีปัจจัยสำคัญคือ ชนิดของสารหล่อลื่นต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิไวนิลคลอไรด์และสารหล่อลื่นชนิดนั้นจะต้องใช้ร่วมกับสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้แต่โดยทั่วไปแล้วสารหล่อลื่นภายนอกนั้นไม่สามารถเข้ากันได้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งแตกต่างจากสารหล่อลื่นภายใน

— สารช่วยปรับปรุง (modifiers) แบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆคือ สารช่วยผลิต (processing aids) สารปรับปรุงด้านแรงกระแทกช่วยเพิ่มความเหนียว (toughness) ของพอลิไวนิลคลอไรด์

— สารตัวเติม (filler) สารตัวเติมนั้นอาจเติมเพื่อเพิ่มน้ำหนักหรือช่วยลดราคาค่าต้นทุนเช่นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งการเติมสารตัวเติมบางชนิดอาจส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการเช่น ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) การยืดตัวก่อนแตกหัก (elongation at break) การหดตัวในแม่พิมพ์ และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน หรือสามารถเพิ่มความแข็ง (hardness) ได้

แต่จุดมุ่งหมายสำคัญของการใช้สารตัวเติมก็ต้องไม่ทำให้สมบัติต่างๆเปลี่ยนแปลงไปมาก แต่ต้องทำให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมสารตัวเติมจึงสามารถลดราคาต้นทุนของผลิตภัณฑ์ ข้อควรคำนึงในการใช้สารตัวเติมคือ สารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะลดความเงาของพื้นผิว และมีการดูดซับน้ำที่สูง แต่สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กนั้นสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้อีกด้วย

2.2 สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน

พอลิไวนิลคลอไรด์เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ง่าย การเสื่อมสภาพนั้นส่งผลให้สมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์ต่ำลง พอลิไวนิลคลอไรด์จึงจำเป็นต้องใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพที่จะเกิดขึ้น

2.2.1 หลักการและการทำงานของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน

การเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์นั้นเกิดจากหลายลักษณะตั้งแต่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชัน ออกซิเดชัน เกิดการขาดออกจากกันของสายโซ่ เกิดร่างแห เกิดปฏิกิริยาควบแน่น ดังที่กล่าวมาข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพเพื่อควบคุมการเสื่อมสภาพ โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนต้องป้องกันการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันเป็นหลักสำคัญโดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพมี 2 แบบ คือ สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ขัดขวางหรือหน่วงการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชัน ซึ่งเป็นแบบป้องกัน (Preventive function) และสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ทำปฏิกิริยากับพอลิอิน (Polyene) และเข้าไปทำลายเกลือคาร์บอนเนียม (Carbonium salt) ซึ่งเป็นแบบรักษา (Curative function) โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพทั้ง 2 แบบนั้นทำหน้าที่ต่างกันดังนี้ สารป้องกันการเสื่อมสภาพแบบการป้องกันเข้าไปทำหน้าที่ ดูดซับไฮโดรเจนคลอไรด์ (Absorption of HCl) กำจัดส่วนที่เหลือจากตัวเริ่มปฏิกิริยา (Elimination of initiation sites) ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สามารถเกิดขึ้นเอง (Prevention of autoxidation) และ ลดการเกิดกลไกการแตกหักผ่านสารหล่อลื่นภายใน (Reduction in mechanochemical fragmentation through internal lubricant) ในส่วนของสารป้องกันการเสื่อมสภาพแบบการรักษาเข้าไปทำหน้าที่ เพิ่มเข้าไปในส่วนโครงสร้างที่เป็นพอลิอิน (Addition to polyene sequences) และทำลายเกลือคาร์บอนเนียม (Destruction of carbonium salts)[1] สิ่งสำคัญของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ก็ต้องกระจายได้ดีในพอลิไวนิลคลอไรด์, สามารถเข้ากันได้ดีกับส่วนประกอบต่างๆในกระบวนการผลิต ต้องไม่ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำหน้าที่

ที่ปริมาณต่ำ ราคาถูก สำหรับการใช้งานสารป้องกันการเสื่อมสภาพต้องไม่เป็นพิษ และไม่มีกลิ่น หรือไม่ส่งผลกระทบต่อความใส สี หรือลักษณะของพอลิไวนิลคลอไรด์

สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และระบบป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นชนิดภายนอก (external) ซึ่งทำการผสมกับพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการผสมทางกายภาพ ถ้าใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดภายใน (internal) ต้องเติมลงในพอลิไวนิลคลอไรด์ตั้งแต่กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งหน้าที่ของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนแบบภายในนั้นช่วยลดการเกิดโครงสร้างที่ไม่ปกติ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์ไม่เสถียร หรือเข้าไปปรับโครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์ให้สมดุล โดยลดการส่งผ่าน และเพิ่มปริมาณโมโนเมอร์ (monomer) เพื่อลดลาไบ์ของคลอรีนอะตอม หรือทำไอออนิกพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งวิธีการเหล่านี้ทำได้ยาก ทางอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดภายนอกมากกว่า โดยประเภทของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน นั้นไม่แบ่งออกอย่างเป็นทางการเนื่องจากมีทั้งจุดประสงค์, สมบัติ, ชนิดที่หลากหลาย และยังมีการใช้งานผสมกันเอง จึงแบ่งสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนตามชนิดทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

- i สารประกอบของตะกั่ว (lead compound)
- ii สารประกอบอินทรีย์ของดีบุก (organotin compound)
- iii สารประกอบของโลหะอื่นๆ (compounds of other metals)
- iv สารป้องกันการเสื่อมสภาพอินทรีย์ (organic stabilizers)

2.2.1.1 ซีโอไลท์

ซีโอไลท์ เป็น ผลึกของไฮดรรัส อลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline hydrous aluminumsilicate) ของอัลคาไลน์(alkali) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ (alkali earth metals) ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเทียม และ แบเรียม ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลท์ ประกอบด้วยโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงตาข่าย 3 ทิศทาง (three dimensional network) ของ ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_4) และ อลูมิเนียมออกไซด์ (AlO_4)

มีสูตรโมเลกุลทั่วไปดังนี้
$$\text{M}_{x/n}[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \text{W}_2\text{O}$$

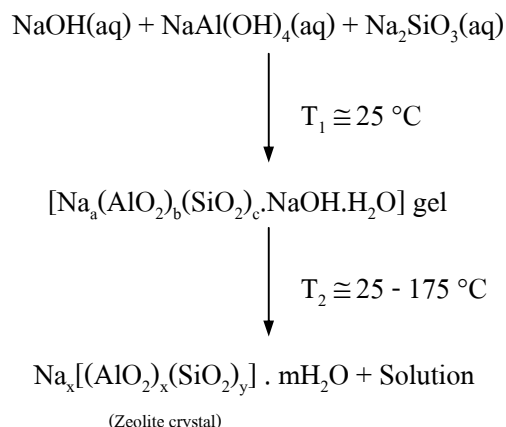
โดยที่ M เป็นอัลคาไลน์ (alkali) หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ (alkali earth) แคทไอออน

n เป็นวาเลนซ์ของแคทไอออน

อัตราส่วน x/y เป็นจำนวนตัวเลขตั้งแต่ 1-5

W เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

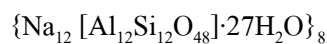
โครงสร้างของซีโอไลต์เป็นแบบเปิดประกอบไปด้วยช่องคล้ายท่อ (channels) และช่องว่าง (interconnected void) จำนวนมากซึ่งมีแคทไอออน และ โมเลกุลของน้ำเกาะเชื่อมอยู่ภายใน แคทไอออนนี้สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออน (ion exchanger) อื่นได้ โดยซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยน Na^+ ที่มีในซีโอไลต์กับโลหะหนักเช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม สังกะสี ไอออน ซีโอไลต์เมื่อได้รับความร้อน โมเลกุลของน้ำภายในช่องว่างจะหลุดออกมา และน้ำจะระเหยออกมาต่อเนื่องโดยโครงสร้างของโมเลกุล (dehydrated structure) ไม่เปลี่ยนแปลงหรือยุบสลาย และ หลังจากให้น้ำระเหยแล้ว ช่องว่างในโครงสร้างโมเลกุลสามารถถูกเติมน้ำได้เช่นเดิม (reversible dehydration) ซีโอไลต์แสดงคุณสมบัติเป็นสารดูดซับ (adsorbant) ที่ดี สามารถแยกก๊าซ และ ไขมันของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น ขบวนการดูดซับ (absorption) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีโอไลต์ และขนาดโมเลกุลของสารดูดซับ ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic zeolite) เป็นซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี โดยมีการควบคุมสภาวะเพื่อให้เกิดผลึกจำนวนมากขึ้นอย่างสม่ำเสมอ โดยสภาวะที่ใช้ในปฏิกิริยามีดังนี้ สารเริ่มต้น ซึ่งได้แก่ตัวร่วมในการตกตะกอนที่เป็นเจล (Coprecipitated gel) หรือ ของแข็งอสัณฐาน (amorphous solids) เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) เมตาคาโอลิน (metakaolin) ส่วนต่อมาก็คือสารที่ทำให้ความเป็นด่างในปฏิกิริยา ซึ่งอยู่ในรูปของโลหะอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali metal hydroxide) หรือเบสแก่อื่นๆเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น การที่จะใช้สารใดขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ที่จะเตรียม รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิ และความดันที่มีสภาวะอัมตั่วด้วยไอน้ำ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 175 หรือ 300 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้นั้นมีตั้งแต่ 2-3 ชั่วโมงจนถึงหลายวัน ปฏิกิริยาการเตรียมซีโอไลต์เป็นดังนี้



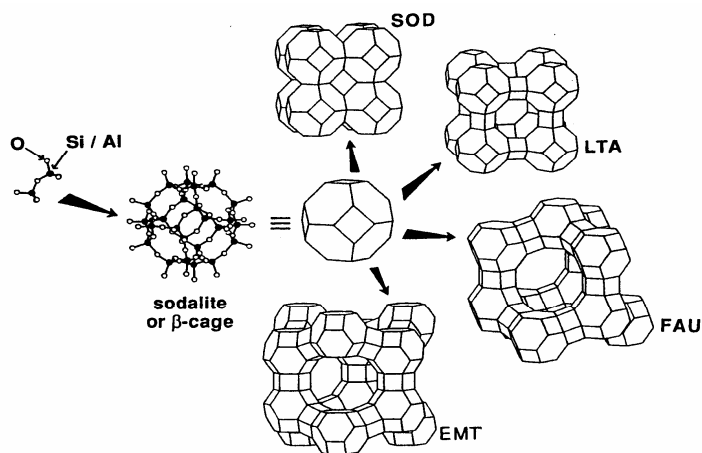
ซีโอไลต์นั้น ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพร่วม (Co-stabilizer) ที่ดีมากสำหรับใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ มีความสามารถที่ไม่เหมือนกับสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดอื่นๆ โดยเป็น สาร

ป้องกันการเสื่อมสภาพร่วม ในส่วนผสมโลหะ และ ระบบที่ใช้สารดินบุกในการทำให้เกิดความเสถียร (tin stabilization system) สำหรับ พอลิไวนิลคลอไรด์ได้ จากการที่ปัจจุบันต้องการ ลดการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ที่มีโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (lead) แบเรียม (barium) และ แคดเมียม (cadmium) โดยการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ผสมระหว่าง สเตียเรทของสังกะสี (Zinc stearate) และ ซีโอไลต์ จะทำให้ความเป็นพิษของสังกะสีคลอไรด์ลดลง และยังพบว่า ซีโอไลต์ สามารถใช้ร่วมกับ ระบบการทำให้เสถียรอื่นๆ สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็งนั้นส่วนใหญ่ใช้กับสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เป็นดินบุก ซึ่งซีโอไลต์นั้นก็ใช้ได้ผลด้วย โดยซีโอไลต์สามารถแทนที่ได้มากถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เป็นดินบุก และซีโอไลต์ยังช่วยลดความหนืด ในกระบวนการผลิต สารประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ได้อีกด้วย

ซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ โซเดียม อลูมิโนซิลิเกต (Sodium aluminosilicate) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้



โดยเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ ผลึกของซีโอไลต์ (Crystalline zeolite) คล้ายกับที่พบในเหมืองแร่ธรรมชาติ และสารสังเคราะห์ที่ได้นั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซีโอไลต์นั้นมีความสามารถทำให้กรดกลายเป็นกลางได้รวมทั้ง ไฮโดรเจนคลอไรด์ซึ่งเป็นกรด ที่ได้จากการเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) ของพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วย ซีโอไลต์ มีรูปร่างเป็นรูพรุนเล็กที่ไม่ต่อเนื่อง ซีโอไลต์มีลักษณะเป็นผงสีขาวมีขนาดอนุภาคประมาณ 3-5 ไมครอน มีความถ่วงจำเพาะ 2.0 ความหนาแน่นประมาณ 480 กรัมต่อลิตร ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น และมีความบริสุทธิ์สูง มีการจัดรูปโครงสร้างผลึกหลายชนิดดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์[7]

ซีโอไลต์สามารถลดความเข้มข้นไฮโดรเจนคลอไรด์ได้ ซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญมากเนื่องจากถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนคลอไรด์สูง ไฮโดรเจนคลอไรด์นี้เองที่เร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยในระบบการป้องกันการเสื่อมสภาพที่มีสเตียเรทของสังกะสีซึ่งมีหมู่ของกรดสเตียริก (Stearic acid) ที่เข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อไปหยุดการเกิดพันธะคู่ที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งส่วนหนึ่งของปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิด ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride) ขึ้น และซิงค์คลอไรด์นี้สามารถเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้เช่นเดียวกับไฮโดรเจนคลอไรด์ ซีโอไลต์นี้เองที่สามารถทำหน้าที่จับไฮโดรเจนคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ แล้วทำการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาในพอลิไวนิลคลอไรด์นั้นหมดไป

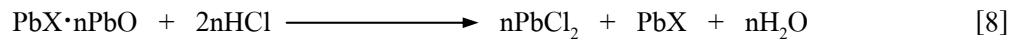
2.2.1.2 สเตียเรทของตะกั่ว

สารประกอบตะกั่วที่ใช้นั้นถูกใช้เพื่อเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมาเป็นเวลานานกว่า 30 ปี และเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่เก่าแก่ที่สุด สารประกอบตะกั่วนี้มี 2 ประเภทคือ litharge (PbO) และ basic white lead carbonate ($2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$) ซึ่งใช้เป็นเม็ดสีทั่วไป โดยทั้ง 2 เป็นฉนวนทางไฟฟ้าได้ ซึ่ง litharge เป็นเม็ดสีเหลืองใช้เป็นสารเติมแต่งได้ แต่ 2PbCO_3 เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ดีมาก แต่ไม่เหมาะกับการกระบวนการผลิต และการใช้งาน เนื่องจาก 2PbCO_3 จะทำให้เกิด CO_2 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นรูพรุนขึ้นภายใน ซึ่งสารประกอบตะกั่วที่ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีหลายชนิดดังตารางที่ 2.1

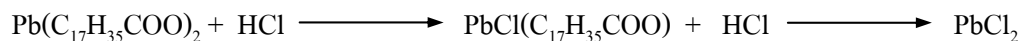
ตารางที่ 2.1 ชื่อ สูตรทางเคมี และปริมาณ PbO ในสารประกอบตะกั่ว [8]

Name	Formula	Typical PbO Content
tribasic lead sulfate	$3\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	89.1
dibasic lead phosphate	$2\text{PbO} \cdot \text{PbHPO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	90.0
dibasic lead phthalate	$2\text{PbO} \cdot \text{Pb}(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4$	79.8
basic lead carbonate	$2\text{PbO} \cdot \text{PbCO}_3$	87.0
dibasic lead stearate	$2\text{PbO} \cdot \text{Pb}(\text{OOC}_{17}\text{H}_{35})_2$	55.3
normal lead stearate	$\text{Pb}(\text{OOC}_{17}\text{H}_{35})_2$	29.0

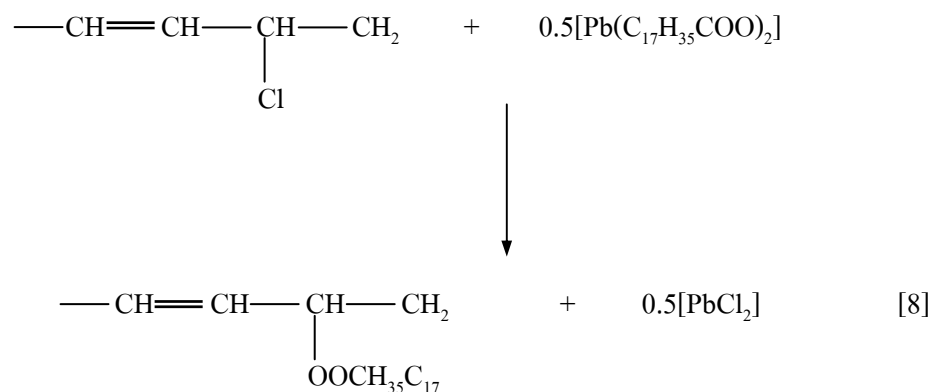
สารประกอบตะกั่วนั้นใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยสารประกอบตะกั่วสามารถทำให้เป็นกลางไฮโดรเจนคลอไรด์ซึ่งจะเกิดเรทคลอไรด์ (PbCl_2) ดังปฏิกิริยา



สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนของตะกั่วผลิตได้จากหมู่ตะกั่วออกไซด์ (lead oxide) ทำให้เกิดสารประกอบตะกั่วพื้นฐานต่างๆ ในส่วนสเต็มเรทของตะกั่วเกิดการค้าผลิตผ่านปฏิกิริยากรด-เบสในน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้ตะกั่วออกไซด์ และกรดสเต็มเรท ซึ่งการทำงานของสารประกอบตะกั่วขึ้นอยู่กับปริมาณตะกั่วออกไซด์ดังตารางที่ 2.1 โดยสเต็มเรทของตะกั่วหลอมเหลวที่ 110 องศาเซลเซียส สเต็มเรทของตะกั่วมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $[\text{Pb}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2]$ โดยสเต็มเรทของตะกั่ว นั้นทำหน้าที่เป็น สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน โดยสเต็มเรทของตะกั่วสามารถเข้าแทนที่ลาไบ์ของคลอรีนอะตอม (labile of chlorine) ที่เป็นตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันได้ง่ายในสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์เกิดการเสถียรมากยิ่งขึ้น และ สเต็มเรทของตะกั่วสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) เกิดเรทคลอไรด์ (PbCl_2) และ เรทคลอไรด์นี้ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาของการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้อีก ดังที่กล่าวมาข้างต้นดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของสารประกอบตะกั่วด้วยสารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนอื่นๆอีก โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



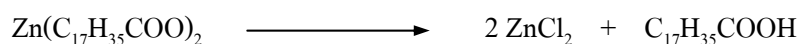
และ



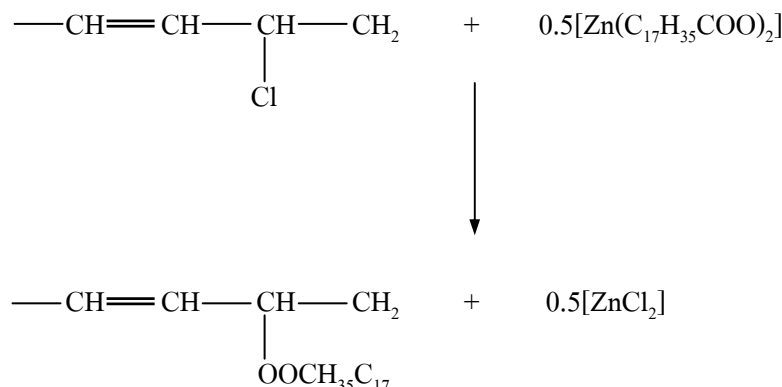
สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยตะกั่วมีข้อดีคือ มีปฏิกิริยาที่ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Stabilization) ที่ดี ซึ่งเป็นแบบระยะยาว (long-term) ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการหล่อลื่นส่งผลทำให้ช่วยลดการเสียดสีในกระบอกอัดรีด และเกลียวหนอน, ระบบที่ผสมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยตะกั่วกับสารหล่อลื่นชนิดอื่นๆ สามารถใช้ในการผลิตได้หลายสถานะ, แต่ไม่ลดอุณหภูมิที่เกิดจากแรงบิดซึ่งไม่เหมือนกับสารป้องกันการเสื่อมสภาพของเหลวชนิดอื่น, มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนตัวอื่น รวมทั้งมีสมบัติทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่ดี ในส่วนของข้อเสียของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยตะกั่ว คือมีดัชนีการสะท้อน (Refractive index) ประมาณ 1.8-2.5 ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยตะกั่ว นั้นมีลักษณะทึบและเนื่องจากสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยตะกั่ว นั้นทำให้เกิด หมู่ออกไซด์ของตะกั่ว ที่สามารถทำปฏิกิริยากับ สารเติมแต่งตัวอื่นๆ ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยโลหะตัวอื่นๆ ซึ่งตะกั่วเองนั้นเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ประกอบด้วยตะกั่ว นั้นมีอนุภาคที่เล็กมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดฝุ่นผงได้ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้เนื่องจากการผสม และการใช้งาน [6]

2.2.1.3 สเตียเรทของสังกะสี

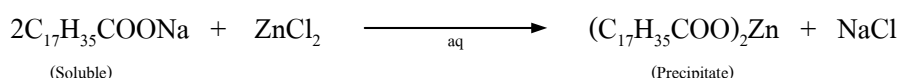
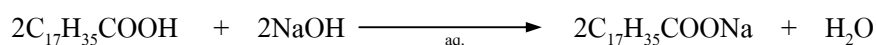
สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารประกอบของสังกะสี ซึ่งสังกะสีเป็นโลหะในกลุ่ม IIB ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้ สเตียเรทของสังกะสีมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $[Zn(C_{17}H_{35}COO)_2]$ โดยโครงสร้างของ สเตียเรทของสังกะสี นั้นมี 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นไขมัน และ ส่วนที่เป็นโลหะ โดยส่วนที่เป็นไขมันนั้นทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ดี รวมทั้งยังสามารถต่อต้านการซึมผ่านของน้ำได้ดีอีกด้วย และ ส่วนที่เป็นโลหะนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้ดี ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการป้องกันการเสื่อมสภาพในพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ แต่จะมีจุดๆหนึ่งที่สเตียเรทของสังกะสีไม่สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพได้จึงทำให้เกิดสีดำขึ้นในพอลิไวนิลคลอไรด์อย่างทันทีทันใดและทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแหขึ้นในบางครั้งจึงเรียกจุดๆนี้ว่า การไหม้ของสังกะสี (Zinc burning) ซึ่งแตกต่างจากสารประกอบของโลหะจากกลุ่มอื่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่ได้จากกลุ่ม IIB นั้นจะเป็นสีขาวในขณะที่เป็นสารประกอบ ซึ่งต่างจากกลุ่ม IA และ IIA ซึ่งเป็นสีชมพู หรือสีแทน โดยสเตียเรทของสังกะสี นั้นมีข้อดีคือไม่เป็นพิษ โดยเกลือของสังกะสีนั้นไม่เป็นอันตรายจึงสามารถใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารได้ มีความสามารถในการละลายสูง และ ความหนืดขณะหลอมเหลวต่ำ โดยมีปฏิกิริยาในการป้องกันการเสื่อมสภาพ ดังนี้



และ



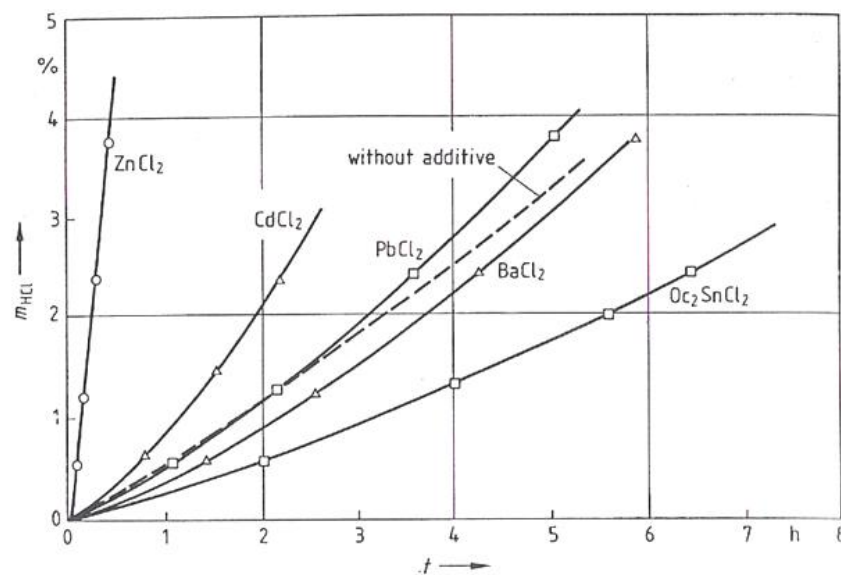
หลังจากที่สเตียเรทของสังกะสีทำปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพกับสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ และไฮโดรเจนคลอไรด์แล้วจะเกิดซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) ขึ้น โดยซิงค์คลอไรด์นั้นเป็นกรดซึ่งสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งอธิบายปฏิกิริยาไว้ในรูปที่ 2.6 ดังนั้นสเตียเรทของสังกะสีจึงเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนแบบให้สีเริ่มต้นที่ดี แต่ให้สีในระยะยาวที่ไม่ดีการผลิตสเตียเรทของสังกะสีทำโดยกระบวนการตกผลึก โดยมี 2 ขั้นตอนคือ ทำการตกผลึกสารละลายสบู่ (soluble soap) แล้วทำการเติมปฏิกิริยาคำยเกลือของโลหะ (metal salt) ซึ่งในที่นี้เป็นเกลือของสังกะสี โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



2.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน

เนื่องจากปฏิกิริยาการป้องกันการเสื่อมสภาพของสารประกอบของโลหะชนิดต่าง ๆ นั้น ทำให้เกิดผลพลอยได้จากปฏิกิริยาที่เป็นโลหะคลอไรด์ ซึ่งมีความเป็นกรดสามารถเข้าเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน ในที่นี้จึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดว่าการลดการป้องกันการเสื่อมสภาพ (destabilizing) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารที่ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการลดการป้องกันการเสื่อมสภาพ (destabilization) ซึ่งสารดังกล่าวต้องไม่เข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์โดยตรง โดยเรียกสารดังกล่าวนี้ว่า

สารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพ (costabilizer) การเติมสารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพเพื่อช่วยปรับปรุง สีเริ่มต้น(initial color)และการป้องกันการเสื่อมสภาพแบบระยะยาว ตัวอย่างของสารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น พอลิออล (polyol) สารประกอบอีพอกซี (epoxy) ซีโอโลไท์ ในส่วนของโลหะคลอไรด์ ที่เกิดขึ้นจากสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนต่างชนิดกัน มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้ต่างกัน โดย สารที่มีความเป็นกรดมากกว่า จะเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างซิงค์คลอไรด์ และเรทคลอไรด์ ปรากฏว่าซิงค์คลอไรด์มีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์มากกว่าเรทคลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ 175 องศาเซลเซียส ในโลหะคลอไรด์ต่างชนิดกัน; m_{HCl} : ไฮโดรเจนคลอไรด์ที่ถูกปลดปล่อย, t : เวลา [1]

2.3 เส้นใยธรรมชาติ

2.3.1 ไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง

ต้นไม้สามารถจำแนกได้เป็นไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็งซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ด การสลับใบ ลักษณะทางกายภาพ และชนิดของเซลล์ที่แตกต่างกันโดยไม้เนื้ออ่อนนั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าไม้เนื้อแข็งซึ่งชนิดของเซลล์ที่มีในไม้เนื้ออ่อน ตัวอย่างของไม้เนื้ออ่อน เช่น ไม้แดง ไม้ยางพารา ไม้จำปา ไม้มะยม ไม้ตระกูลไม้มสน และไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้บีช ไม้เบิซ ไม้เมเบิล ไม้โอ๊ค ไม้สัก ไม้ประดู่ ไม้เต็งรัง โดยแสดงการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อ [9]

Properties	Softwood	Hardwood
Aspect ratio	4	3
Moisture absorption (times wt of fiber)	5.5	4
Acidity	4.7	5
Specific gravity	0.4	0.2 - 0.4
Ash content (%)	0.5	0.7
Bulk density (lb/ft ³)	7 - 17	11 - 12
Typical pH in solution	3.4	3.3 - 3.7
Moisture content (max, %)	8	3 - 7

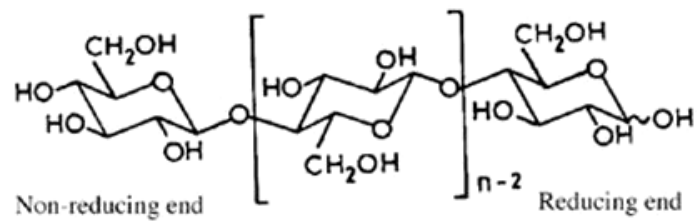
2.3.2 สมบัติและองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ หรือเนื้อไม้นั้นเป็นสารเสริมแรงประเภทอินทรีย์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีกว่าสารเสริมแรงประเภทอนินทรีย์ คือมีราคาถูกซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่โรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง, ไม่ทำให้เครื่องมือในการผลิตเกิดรอยขีดข่วน, ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ, มีความหนาแน่นต่ำ, สามารถทำการปรับปรุงผิวได้, ในส่วนของข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติคือ ไม่สามารถเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกที่เป็นประเภทไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ (ประมาณ 190 องศาเซลเซียส) เกิดการแยกเฟสออกจากเทอร์โมพลาสติกที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ได้ในปริมาณจำกัดในวัสดุผสมเทอร์โมพลาสติก โดยส่วนประกอบหลักในเส้นใยธรรมชาติมี 4 ส่วน คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) สารสกัด (Extractives) และเถ้า (Ash) ส่วนประกอบต่างๆ ของไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เนื่องมาจากชนิดอายุ สถานที่เพาะปลูก สภาพอากาศ และอื่นๆ โดยผงขี้เลื่อยไม้ที่ได้จากไม้ยางพารามีประมาณส่วนประกอบดังนี้

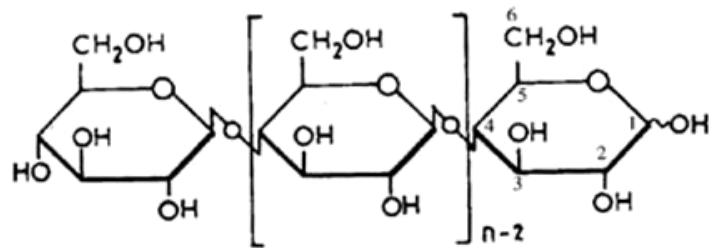
2.3.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส คือพอลิเมอร์กลูแคนที่เข้ากันได้กับน้ำ (hydrophilic glucan polymer) ประกอบด้วยโครงสร้างมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรงไม่มีกิ่งก้านของหน่วย 1,4- β anhydroglucose ซึ่งมี

หมู่แอลกอฮอล์ไฮดรอกซิล (alcoholic hydroxyl) โดยหมู่ไฮดรอกซิล นี้ที่เองทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ทั้งในและระหว่างโมเลกุลด้วยกันจึงเกิดเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้น และเกิดพันธะเซลลูโลสด้วยกันอีกด้วย จึงเกิดการอัดตัวเป็นโครงสร้างผลึกเรียกว่าไมโครไฟบริล (microfibrils) โดยมีอัตราของการพอลิเมอไรเซชันมากกว่า 30,000 ดังนั้นธรรมชาติของเส้นใยธรรมชาติจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำ มีสมบัติทนแรงดึงที่ดี ทนต่อตัวทำละลายได้ดี โดยเซลลูโลสมีประมาณ 44-50 เปอร์เซ็นต์ ในไม้แห้ง โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.11



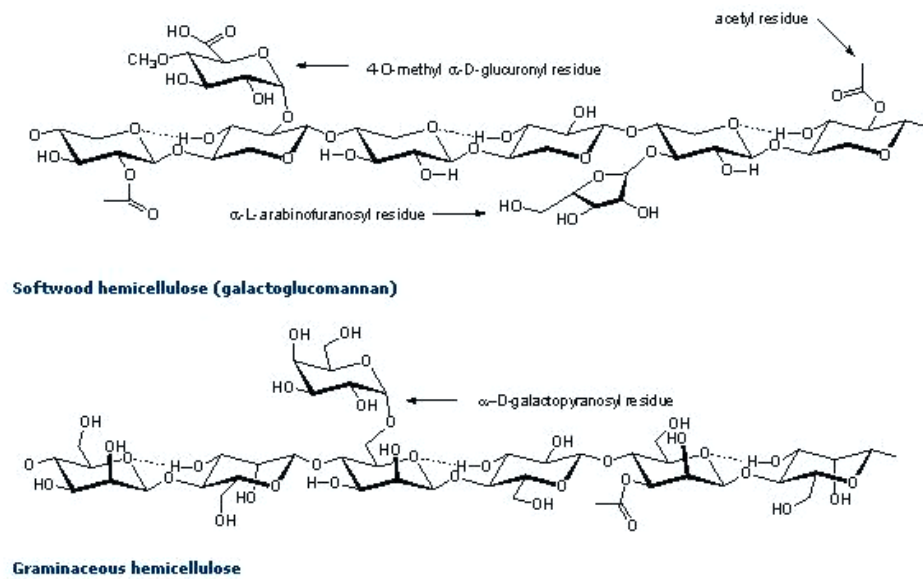
Sometimes shown as



รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส[9]

2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

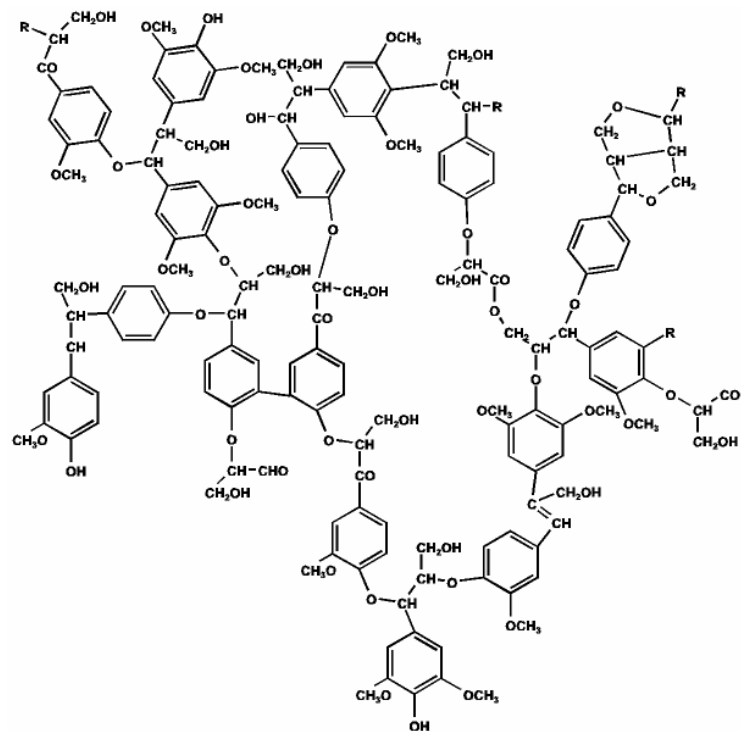
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งประกอบด้วย 5- และ 6-วงแหวนคาร์บอน วงแหวนน้ำตาล สายโซ่เป็นแบบสั้นและมีกิ่งก้านสาขา โดยมีหมู่ห้อย (side group) ที่ทำให้เฮมิเซลลูโลสไม่เป็นผลึก ทำให้อัตราของการพอลิเมอไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสต่ำกว่า 100 มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถเข้ากันได้กับน้ำได้ดี ละลายในสารละลายอัลคาไล และไฮโดรไลส์ (hydrolyzed) ได้ในกรด เฮมิเซลลูโลสมีประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ ในไม้แห้ง ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส[9]

2.3.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (Lignin) เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ทางชีวภาพของผนังเซลล์ของพืช พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) เช่น เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ถูกผลิตขึ้นและเกิดการเติมลิกนินระหว่างเส้นใย พอลิแซ็กคาไรด์ เพื่อประสานเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน กระบวนการเกิดของลิกนินนี้เอง ทำให้น้ำแข็งแข็งขึ้น และคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) นั้นป้องกันการถูกทำลายได้ทั้งทางเคมี และทางกายภาพ ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ทางชีวเคมี ซึ่งเป็นโครงสร้างที่จำจนวัสดุต่างๆ ในพืช และเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งต้านทานการเสื่อมสภาพ และมีสีเข้ม แม้ว่าโครงสร้างของลิกนินจะไม่แน่นอนทั้งหมดทั้งที่ฟังก์ชัน และหน่วย แต่ลิกนินนั้นมีคาร์บอนสูง ไฮโดรเจนต่ำ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวและมีวงแหวนอะโรมาติก (aromatic) มาก โดยส่วนที่เชื่อมต่อกับเซลลูโลส ในเส้นใยธรรมชาตินี้มี 2 ชนิดคือ ส่วนที่ไวต่ออัลคาไล และส่วนต้านทานอัลคาไลโดยการเชื่อมโยงที่เกิดจากเอสเทอร์ (ester) นั้นเชื่อมระหว่างลิกนินไฮดรอกซิล กับคาร์บอกซิลของเฮมิเซลลูโลส และการเชื่อมโยงที่เกิดจากอีเทอร์ (ether) นั้นเชื่อมระหว่างลิกนินไฮดรอกซิล กับไฮดรอกซิลของเซลลูโลส โดยลิกนินประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ในไม้แห้ง ส่วนใหญ่พบที่ชั้นผิวของผนังเซลล์ โครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก (aromatic) แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน[9]

2.3.2.4 สารสกัด (Extractives) และเถ้า (Ash)

สารสกัด (Extractives) มีในไม้แห้งประมาณ 0-10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลากหลายชนิด โดยสารสกัดมักจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นสารประกอบที่ชอบสารอินทรีย์ (oleophilic) จึงสามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ ในส่วนของเถ้า (Ash) มีในไม้แห้งประมาณ 0.2-2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยแคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และเหล็ก โดยส่วนประกอบต่างๆในเส้นใยธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบ และสมบัติในเส้นใยธรรมชาติ[9]

Component	%Composition	Polymeric Nature	Water Affinity	Degradation	Role
Cellulose	44-50	Linear, crystalline	Hydrophilic	>200°C	Strength
Hemicelluloses	20-25	Branched, Amorphous	Hydrophilic	160°C	
Reinforcement					
Lignin	20-30	Amorphous	Hydrophobic	110°C	Stiffness
Extractive	0-10	Polymeric	Hydrophobic		100-200°C
Encrusting					

2.4 วัสดุคอมโพสิต (composite material)

2.4.1 ความหมายและสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต คือวัสดุที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุ หรือเฟสตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป ทำให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างจากวัสดุ หรือเฟสเดิม โดยที่การรวมกันของวัสดุนี้ต้องไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาค โดยเฟสที่ไม่ต่อเนื่องในวัสดุคอมโพสิต จะถูกเรียกว่าวัสดุเสริม (reinforcement) และวัสดุหรือเฟสที่ต่อเนื่องจะถูกเรียกว่าวัสดุหลัก (matrix) ปกติธรรมชาตินั้นทำให้เกิดวัสดุคอมโพสิตขึ้น เช่น ต้นไม้ที่เส้นใยเซลลูโลส อยู่ร่วมกับลิกนิน ในส่วนของวัสดุผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก และไม้นั้น เป็นที่รู้จักกันมานาน โดยผลิตภัณฑ์ของวัสดุผสมไม้กับพลาสติกเติบโตเป็นทวีคูณระหว่างปีค.ศ. 1997-2000 โดยเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้ส่วนมากมี 3 ชนิดคือ พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) โดยใช้ผงไม้เติมลงในพลาสติกซึ่งผงไม้ตัวเองช่วยลดต้นทุน แต่ไม่มีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเทอร์โมพลาสติกมากมายนัก

2.4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

- สมบัติ และปริมาณของวัสดุเสริมแรง
- สมบัติ และปริมาณของวัสดุหลัก
- สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพลิเมอร์ ดังนั้นหากคอมโพสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับโพลิเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อโพลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต จะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 0-30 เปอร์เซ็นต์
- การจัดเรียงตัว (orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาดังแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Manzoor และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เติมซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โดยเครื่อง UV-visible spectroscopy โดยจะเกิดการถ่ายเทประจุ $\text{H}^+\text{ZnCl}_2^-$ กับสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีพันธะคู่ที่ต่อเนื่องกัน (Conjugated double bonds) โดยซิงค์คลอไรด์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์คลอไรด์ อัตราการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ปริมาณของพันธะคู่ที่ต่อเนื่องกันนั้นขึ้นอยู่กับผลกระทบจากซิงค์คลอไรด์ เนื่องจากเมื่อซิงค์คลอไรด์ดึงคลอไรด์ ออกจากสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ ทำให้เกิดการหลุดออกของคลอไรด์อย่างต่อเนื่อง (Zip opening) จากสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ ขณะที่เวลาในการเสื่อมสภาพมากขึ้น ปริมาณของพันธะคู่มากขึ้น ทำให้สายโซ่นั้นแตกออกเป็นสายโซ่เล็กๆ และสายโซ่ที่สั้นมากๆ จะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) และอาจเกิดการระเหยออกมา โดยสิ่งที่ระเหยออกมาจะมีทั้ง 1,1 ไดคลอเอทิลีน (1,1 dichlorethylene) ฟอรัลดีไฮด์ (formaldehyde) เฮกซานอล (hexanal) ไซโคลเฮกซาโนน (cyclohexanone) ฟีนอล (phenol) ไตรเมทิลเบนซีน (trimethylbenzene) 1-โนนานอล (nonanol) 1-เดกานอล (1-decanol) และการระเหยลดลงถ้าใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

İsmet และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาการใช้ Al 4180 เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์โดยในที่นี้คือส่วนผสมของสเดียรท และไฮดรอกไซด์ของโลหะ (metal hydroxide) โดยที่ Al 4180 เป็นส่วนผสมของ Al(III), Zn(II), Pb(II), Ca(II) และ metal hydroxides เช่น $\text{Al}(\text{OH})_3$ พบว่า เกิดการรวมตัวกันของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนบางชนิด ทำให้เกิดการเร่งของปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิ 160-180 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเกิดไฮโดรเจนคลอไรด์ในปริมาณมากขึ้นด้วย

Balköse และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาการใช้สเดียรทของแคลเซียม/สังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนในพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของสเดียรทของแคลเซียม/สังกะสี ทำการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยการหล่อบนกระจก หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่างที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูประเหยออกไป แล้วทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการวิเคราะห์สเดียรทของแคลเซียม/สังกะสี ด้วย X-ray diffraction และ X-ray emission และทำการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ด้วย Infrared และ Ultraviolet Spectroscopy, Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Thermalgravimetric Analysis (TGA) พบว่า ซิงค์คลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ เกิดจากปฏิกิริยาของสเดียรทของคลอไรด์ กับพอลิไวนิลคลอไรด์ และไฮโดรเจนคลอไรด์ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันของพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งซิงค์คลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์นั้น แพร่ออกจากผิวของชิ้นงานตัวอย่างไปสู่น้ำขณะจุ่มชิ้นงานตัวอย่างในน้ำถ้าปฏิกิริยาระหว่างซิงค์คลอไรด์ กับสเดียรทของแคลเซียมเกิดดี ส่งผลให้ไม่มีการแพร่ของแคโทไอออนของสังกะสี (Zn^{2+} cation) เกิดขึ้นเล็กน้อยดังนั้นสัดส่วนของสเดียรทของแคลเซียม/สังกะสีที่ทำให้เกิดการแพร่ของแคโทไอออนน้อยที่สุดคือที่ 4:1

Benaniba และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพแบบ thermo-oxidative ของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยใช้โลหะคาร์บอกซิเลต (metal carboxylate) หลายชนิดรวมกันสเดียรทของแบเรียม/แคดเมียม และสเดียรทของแคลเซียม/สังกะสี ร่วมกับน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำกรอพิออกไซด์ (epoxidized sunflower oil, ESO) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชิ้นงานตัวอย่างที่เติมน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำกรอพิออกไซด์ หรือเติมสเดียรทของแบเรียม/แคดเมียมเพียงอย่างเดียว หรือเติมสเดียรทของแบเรียม/แคดเมียมร่วมกับน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำกรอพิออกไซด์โดยทำการทดสอบความเสถียรทางความร้อนโดยใช้ potentiometric titration การเปรียบเทียบระดับที่ thermogravimetric analysis (TGA) และ differential thermogravimetric analysis (DTG) เพื่อดูการเสื่อมสภาพทางความร้อน พบว่าน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำกรอพิออกไซด์สามารถทำ

หน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันดับ2 (secondary stabilizer) ที่ดีเมื่อใช้ร่วมกับสเทียเรทของโลหะ เช่นสเทียเรทของแบบริยม/แคพเมียม และสเทียเรทของแคลเซียม/สังกะสี แต่น้ำมันดอกทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์จะไม่แสดงผลใดๆถ้าไม่ใช้ร่วมกับสเทียเรทของโลหะ โดยกลไกระหว่างน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์ และสเทียเรทของโลหะนั้นเข้าไปช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน กับน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์ และสเทียเรทของโลหะซึ่งสามารถลดผลกระทบจากการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า

Benaniba และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการใช้้ำมันทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์ (epoxidized sunflower oil, ESO) เป็นสารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่ใช้ในพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยใช้สเทียเรทของแคลเซียม/สังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนโดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์ ทำการผสมสารประกอบและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง แล้วทำการทดสอบสมบัติการป้องกันการเสื่อมสภาพด้วยเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงสี เครื่องUV-visible spectrophotometer เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วงความถี่เครื่องด้าน UV เครื่อง Fourier transform infrared analyzer เพื่อตรวจสอบฟังก์ชันภายใน และเครื่อง Thermogravimetric (TG) พบว่า น้ำมันทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์มีสมบัติเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันดับที่สอง (secondary stabilizer) ของพอลิไวนิลคลอไรด์ เมื่อใช้ร่วมกับสเทียเรทของแคลเซียม/สังกะสี โดยสมบัติของน้ำมันทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์ ขึ้นกับปริมาณการอีพอกซิไดซ์ของน้ำมัน โดยน้ำมันทานตะวันที่ทำการอีพอกซิไดซ์ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ (dehydrochlorination) และยังหน่วงการเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอีกด้วย

Kalouskova และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลของสเทียเรทของตะกั่วที่มีต่อความเสถียรของพอลิไวนิลคลอไรด์ในระหว่างการทำกรอบขึ้นงานตัวอย่าง ทำการผสมสารประกอบด้วยเครื่องบดแบบลูกกลิ้งแล้วขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วย เครื่องอัดขึ้นรูปโดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ สเทียเรท ของตะกั่ว หลังจากนั้นทำการอบขึ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส แล้วทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยการสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสี และเครื่อง Fourier Transform Infrared analyzer เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันภายใน พบว่า การเติมสเทียเรทของตะกั่ว ส่งผลให้อัตราของการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ลดลงครึ่งหนึ่งของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ไม่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดใดเลย โดยระหว่างเกิดการเสื่อมสภาพสเทียเรทของตะกั่ว ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ ทำให้ไฮโดรเจนคลอไรด์เป็นกลาง และยังแสดงให้เห็นว่าหมู่ของสเทียเรทสามารถทำปฏิกิริยากับสายโซ่ของพอลิไวนิลคลอไรด์อีกด้วย ดังนั้นการเติมสเทียเรทของตะกั่วจึงช่วยเพิ่มความเสถียรทางด้านความร้อน และสีของชิ้นงานอีกด้วย หลังจากสเทียเรทของตะกั่วหมดไป เกิด

การปลดปล่อยของไฮโดรเจนคลอไรด์ และเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) ของพันธะเอสเทอร์ จึงการปลดปล่อยหมู่ของสเตียเรทออกจากสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์

González-Ortiz และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ ขณะกระบวนการผลิต และหลังกระบวนการผลิต โดยใช้ไดเอทิล เฮกซิล ฟทาเลท (di(ethyl hexyl)phthalate, DEHP) เป็นพลาสติกไซเซอร และน้ำมันถั่วเหลืองที่ทำการอีพอกซิไดซ์ (epoxidized soybean oil, ESO) และใช้สเตียเรทของแคลเซียม/สังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณไดเอทิล เฮกซิล ฟทาเลท และน้ำมันถั่วเหลืองที่ทำการอีพอกซิไดซ์ ทำการเตรียมสารประกอบ 4 ขั้นตอนดังนี้ 1. ให้ความร้อนแก่สเตียเรท 2. ทำการผสมส่วนผสมทุกส่วนแบบแห้ง (dry-blend) 3. ทำส่วนผสมข้างต้นให้เป็นเม็ด 4. อัดรีดเม็ดผสมให้เป็นชิ้นงานแบบรีบบิ้น หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติขณะกระบวนการผลิตด้วย ก. วิเคราะห์สมบัติทางกล ข. สังเกตเปรียบเทียบสีของชิ้นงานตัวอย่าง ทำการทดสอบสมบัติหลังกระบวนการผลิตด้วย ก. วัดไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ซึ่งหลุดออกจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่าง ข. สังเกตเปรียบเทียบสีที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการให้ความร้อน พบว่า สมบัติความเค้น ความเครียดนั้น ขึ้นกับผลจากพลาสติกไซเซอรของไดเอทิล เฮกซิล ฟทาเลท และน้ำมันถั่วเหลืองที่ทำการอีพอกซิไดซ์ ซึ่งไม่ขึ้นกับสัดส่วนของสเตียเรท สำหรับการเติมไดเอทิล เฮกซิล ฟทาเลทเมื่อสัดส่วนสเตียเรทของแคลเซียม/สังกะสีเพิ่มมากขึ้น ช่วยให้สีขึ้นเริ่มต้นดีขึ้น และการเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่ทำการอีพอกซิไดซ์ความเสถียรของสีหลังการผลิต ขณะที่ให้ความร้อนจะดีขึ้น สเตียเรทของสังกะสีช่วยให้สีขึ้นเริ่มต้นดี แต่จะทำให้ไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกมาเพิ่มขึ้น

Atakul และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสเตียเรทของแคลเซียม/สังกะสี และ ซีโอไลท์ จากธรรมชาติ ที่มีต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ ร่วมกับไดออกทิล ฟทาเลท (dioctyl phthalate, DOP) แล้วใช้สเตียเรทของแคลเซียม/สังกะสีและซีโอไลท์จากธรรมชาติ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน โดยทำการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันที่อุณหภูมิ 140 และ 160 องศาเซลเซียส ของพอลิไวนิลคลอไรด์ทั้งที่เติมและไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และใช้ PVC Thermomat ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์จากพอลิไวนิลคลอไรด์ออกสู่อากาศที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส พบว่า การเติมซีโอไลท์จะช่วยให้การดูดซับไฮโดรเจนคลอไรด์ ส่งผลให้ช่วยลดการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน โดยชิ้นงานตัวอย่างมีระยะเวลาก่อนการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพ (induction time) ที่แตกต่างกันดังนี้ ชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเท่ากับ 1.01 ชั่วโมง, ชิ้นงานตัวอย่างที่เติมสเตียเรทของสังกะสีเท่ากับ 1.15 ชั่วโมง, ชิ้นงานตัวอย่างที่เติมสเตียเรทของแคลเซียมเท่ากับ 7 ชั่วโมง และชิ้นงานตัวอย่างที่เติมซีโอไลท์เท่ากับ 2.1 ชั่วโมง จึง

สรุปได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เดิมสเดิยเรทของแคลเซียมมีระยะเวลาก่อนการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพมากที่สุดเนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์ นั้นเป็นอัลคาไรด์ เอิร์ท คลอไรด์ (alkaline earth chloride) ซึ่งไม่ช่วยเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน ในส่วนของชิ้นงานตัวอย่างที่เดิมซีโอไลท่นั้นมีระยะเวลาก่อนการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพมากกว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่เดิมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเนื่องจากซีโอไลท์สามารถดูดซับไฮโดรเจนคลอไรด์ได้ ซึ่งเป็นการช่วยลดการเร่งการเกิดปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติที่เกิดจากไฮโดรเจนคลอไรด์ และเมื่อใช้สเดิยเรทของสังกะสีร่วมกับซีโอไลท์ ส่งผลให้มีระยะเวลาก่อนการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเท่ากับ 1.25 ชั่วโมง แสดงให้เห็นได้ว่าซีโอไลท์ช่วยการทำงานของสเดิยเรทของสังกะสี

Karayildirim และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ สารเติมแต่งบางชนิดที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากสารเติมแต่งบางชนิดสามารถจับกับไฮโดรเจนคลอไรด์ได้ เช่น โคลนแดง (red mud, RM), หินปูน (CaCO_3) และโดโลไมท์ (dolomite) ซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำการศึกษาโดยใช้ thermogravimetric analysis (TGA) และ mass spectrometry (MS) พบว่าการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากความร้อนถูกหน่วงโดยโลหะคาร์บอเนต (metal carbonate) ที่สามารถดูดซับไฮโดรเจนคลอไรด์เกิดเป็นอัลคาไรด์ เมทอลคลอไรด์ (alkaline metal chloride) ขึ้น แต่คลอไรด์ของแคลเซียม และแมกนีเซียม (CaCl_2 , MgCl_2) นั้นไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ ในทางตรงข้ามคลอไรด์ของเหล็ก (FeCl_2) จากโคลนแดง นั้นสามารถเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันแต่หน่วงการเสื่อมสภาพขึ้นที่ 2 ของพอลิไวนิลคลอไรด์ ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โม่เลกุล (crosslink) ของโครงสร้างไฮโดรคาร์บอน แทนการเกิดพันธะคู่ภายใน (polyene) ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน

Starnes Jr และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ LSN117 ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุก ไดออกทิล บิส ไอโซออกทิล ไทโอไกลคอลเลท (dioctyl tin bis isooctyl thioglycollate) ที่มีต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ทำการพลาสติกไซซ์แล้ว ซึ่งสารป้องกันการเสื่อมสภาพประเภทอินทรีย์ของดีบุก มีหมู่คาร์บอนิล และ คาร์บอกซิเลท และยังมี เหล็ก สังกะสี แคลเซียม ทองแดง ดีบุก เสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส โดยการใช้ความร้อนในตู้อบซึ่งมีอากาศไหลเวียนเป็นเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง แล้วทำการวัดไฮโดรเจนคลอไรด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมา พบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ที่ไม่เติม LSN117 มีเวลาที่เริ่มเกิดไฮโดรเจนคลอไรด์ของอุณหภูมิ 140 และ 160 องศาเซลเซียส คือ 14.3 และ 2.5 ชั่วโมงตามลำดับ ในส่วนของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เติม LSN117 ที่อบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ไม่มีไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกมาที่เวลา 30.3 ชั่วโมง แต่ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส มีไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกมาที่เวลา

14.3 ชั่วโงง กราฟการเสื่อมสภาพบ่งชี้ได้ว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ที่เติม LSN117 นั้นเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ไม่เติม LSN117 แต่การศึกษานี้ยังไม่คำนึงถึงสมบัติทางกลของพอลิไวนิลคลอไรด์

Wang และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาผลจากการป้องกันการเสื่อมสภาพของสเดิยเรทของแคลเซียม/สังกะสี ใช้ร่วมกับ เพนเทรีไตรทอล (Pentaerythritol, PeE) และสารประกอบประเภทดีบุก (organic tin) ที่มีต่อพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่าการเติมสเดิยเรทของแคลเซียม/สังกะสี ร่วมกับเพนเทรีไตรทอล (Pentaerythritol, PeE) และสารประกอบประเภทดีบุก (organic tin) ช่วยปรับปรุงความเสถียรของสีและความเสถียรทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ให้ดีขึ้น แต่ให้ผลดีเล็กน้อยเมื่อใช้เพนเทรีไตรทอลเพียงอย่างเดียว โดยเพนเทรีไตรทอลนั้นทำหน้าที่เป็นตัวรับโลหะคลอไรด์ แล้วทำให้เป็นสารประกอบที่เฉื่อย (inert complex) ในส่วนของสารประกอบประเภทดีบุก สามารถยึดอายุการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ และยังช่วยปรับปรุงความเสถียรของสีด้วยการแทนที่อะตอมของคลอรีนด้วยหมู่เมอแคปไทด์ (mecaptide group) ที่เสถียรกว่าและทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ ไฮโดรเจนคลอไรด์ เกิดเมอแคปแทน (mercaptan) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเติมกับพันธะคู่ซึ่งต่างจากเพนเทรีไตรทอล เนื่องจากสารประกอบประเภทดีบุกนั้นไม่ได้ทำปฏิกิริยาเสริมกับสเดิยเรทของแคลเซียม/สังกะสี

Steenwijk และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาสารป้องกันการเสื่อมสภาพแบบระยะยาวของ พอลิโออล (polyol) ที่เติมในโลหะหนัก และสังกะสีอิสระของพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่าพอลิโออล เช่น ซอบิทอล (Sorbitol) ไชลิทอล (xylitol) มาเคดรี (markedly) สามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชั้นใด โดยพอลิไวนิลคลอไรด์ทั้งแบบที่ผ่านกระบวนการผลิต และไม่ผ่านกระบวนการผลิต หลังจากที่ทำให้เสื่อมสภาพที่ 200 องศาเซลเซียส พบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านกระบวนการผลิต ซอบิทอล สามารถเปลี่ยนเป็น โมโน และ ไดไฮโดรคลอรีนที่ 1, 4-ซอบิแทน และไอโซซอไบด์ โดยปกติไฮโดรเจนคลอไรด์ ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพนั้นเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชั้น แต่จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิล ที่มีในพอลิโออลธรรมชาติสามารถจับไฮโดรเจนคลอไรด์ และทำให้เกิดการป้องกันการเสื่อมสภาพแบบระยะยาวได้

Steenwijk และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาสีของชิ้นงานตัวอย่างเริ่มต้นของ การเติมพอลิโออลลงในพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้โลหะหนัก และสังกะสี อิสระเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน โดยใช้ค่า W(Lab) พบว่า สีของชิ้นงานตัวอย่างเริ่มต้นถูกปรับปรุงโดยการเติมพอลิโออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 1° (primary) โดยพอลิโออลสามารถจับไฮโดรเจนคลอไรด์ โดยใช้หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 1° ในทางตรงข้ามการเติมพอลิโออลมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 2° (secondary) หรือ 3°

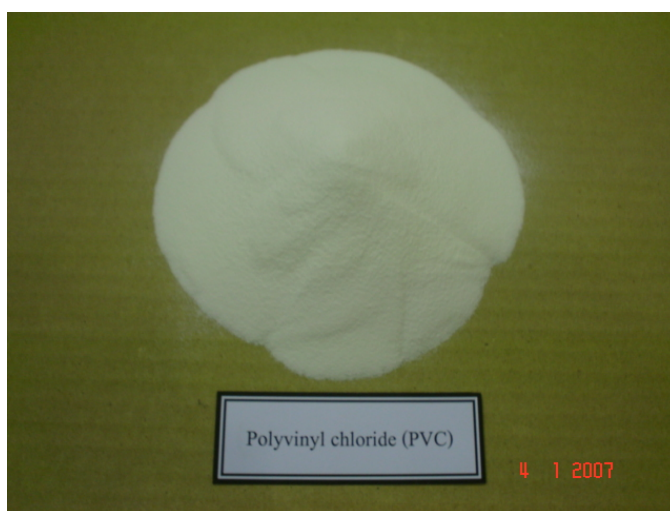
(tertiary) สามารถเร่งการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ ดังนั้นการเติมพอลิออก
ในพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้โลหะหนักเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน สามารถเป็นสาร
ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเพื่อช่วยพัฒนาการเสื่อมสภาพแบบระยะยาวโดยทำให้ไม่
เกิดการเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนคลอไรด์ แต่จะทำให้สีของชิ้นงานตัวอย่างเริ่มต้นไม่ดี

บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พลาสติกพีวีซี

พลาสติกพีวีซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท วินิไทย จำกัด (มหาชน) เป็นเกรดที่ใช้ในการอัดรีด มีค่า K value = 58 ทำการสังเคราะห์จากกระบวนการสารแขวนลอย (Suspension polymerization) พลาสติกพีวีซีชนิดนี้เหมาะแก่การผสมแบบแห้ง (dry blend) ตัวอย่างของพีวีซีเรซินที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของพีวีซีเรซิน

3.1.2 ผงขี้เลื่อยไม้

ผงขี้เลื่อยไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงขี้เลื่อยจากไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท วิ.พี. วัสดุ จำกัด ผงขี้เลื่อยไม้ที่ใช้มีขนาดประมาณ 150-250 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของผงขี้เลื่อยไม้

3.1.3 สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

สารเติมแต่งชนิดอื่นๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีดังนี้ พลาสติกพีวีซีเกรด SIAMVIC[®] 374 MB มีค่า K value = 74 , สารหล่อลื่น (lubricant) เกรด Finalux[®] G-741, สารช่วยผลิต (processing aids) เกรด PA-20 และ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เกรด Omyacarb[®] -2T ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท วี.พี. วัสดุ จำกัด โดยจะระบุปริมาณที่ใช้ต่อไปในหัวข้อ 3.3.1.1 ตัวอย่างของพีวีซีคอมปาวด์ที่ผสมแสดง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของพีวีซีคอมปาวด์

3.1.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน

สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) สเตียเรทของตะกั่ว (Pb stearate) และ สเตียเรทของสังกะสี (Zn stearate)

3.1.4.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท PQ Chemicals (Thailand) Ltd. มีลักษณะเป็นผงสีขาว ขนาดอนุภาคประมาณ 3-5 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะ 2.0 ความหนาแน่นประมาณ 480 กรัมต่อลิตร ไม่เป็นพิษ และไม่มึนกลืน ลักษณะของซีโอไลต์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของซีโอไลต์

3.1.4.2 สเตียเรทของตะกั่ว (Pb stearate) และ สเตียเรทของสังกะสี (Zn stearate)

สเตียเรทของตะกั่ว (Pb stearate) และ สเตียเรทของสังกะสี (Zn stearate) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Evergreen Chemical (Thailand) จำกัด สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะเป็นผงสีขาว แสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของสเตียเรทของตะกั่ว (Pb stearate)



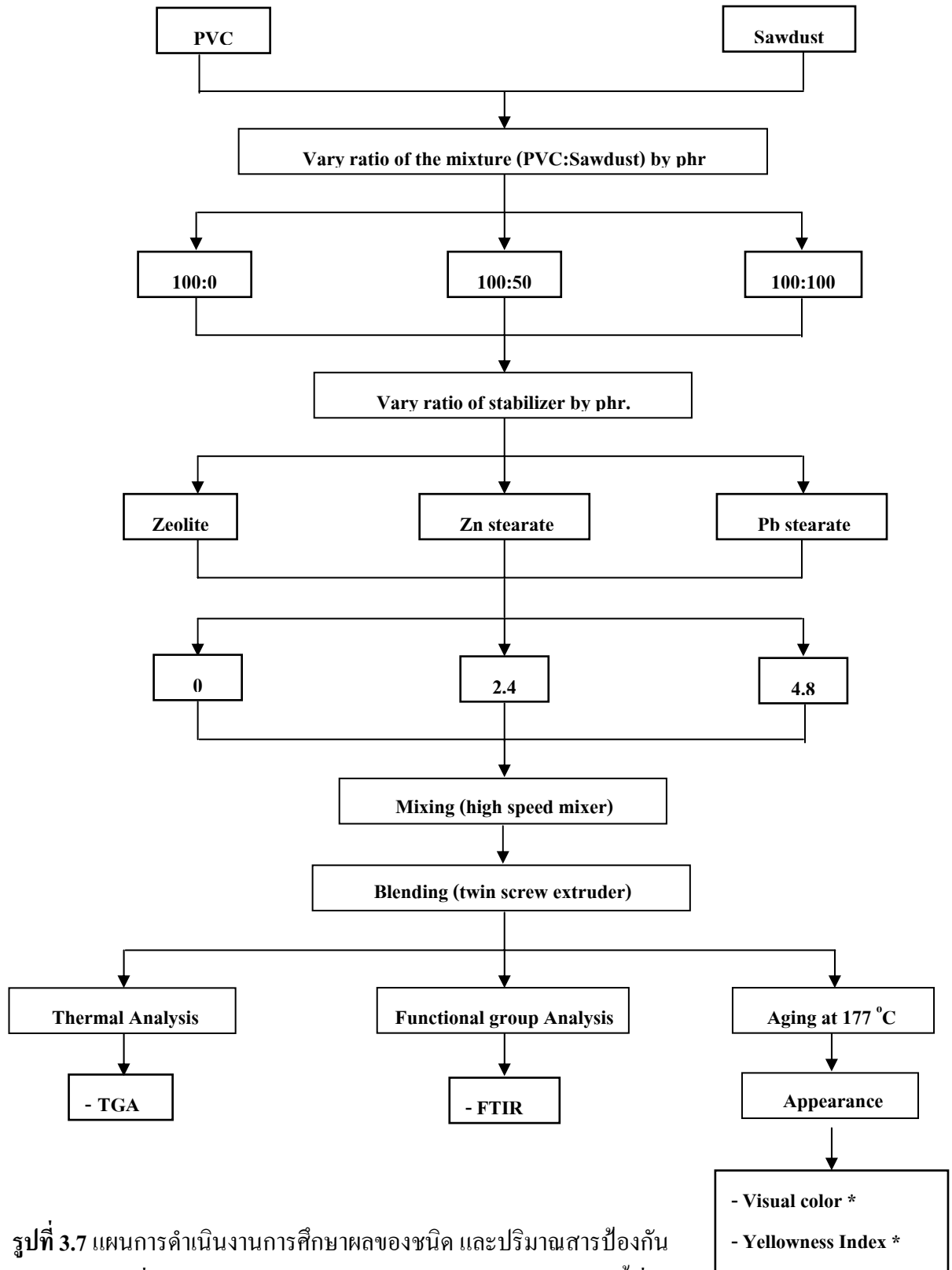
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของสเตียเรทของสังกะสี (Zn stearate)

3.2 การออกแบบการทดลอง

แผนการดำเนินงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้ 2 ส่วน ดังนี้

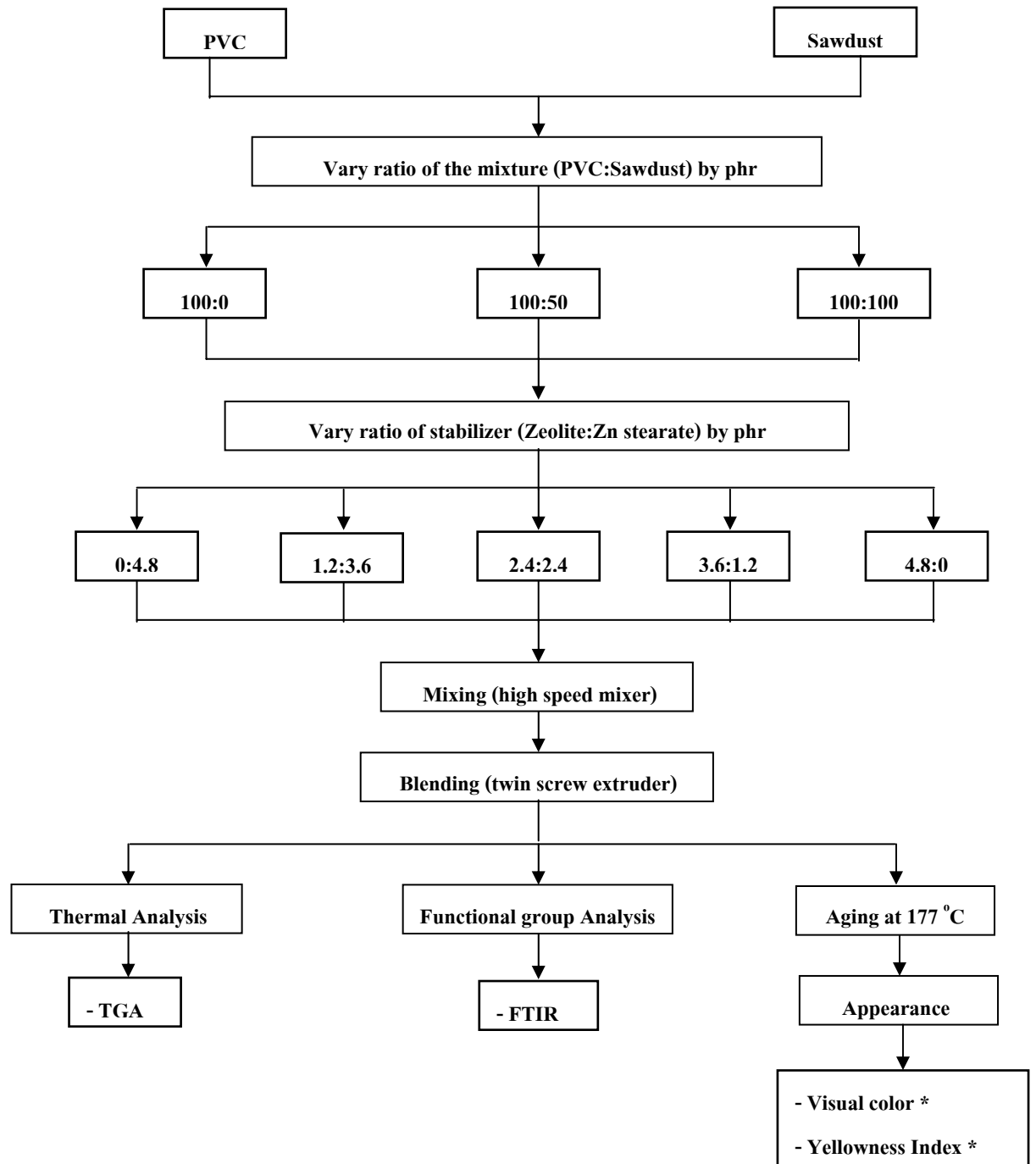
- 3.2.1 การศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี และพีวีซีที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้
- 3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้ซีโอไลต์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซีและพีวีซีที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้

3.2.1 การศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี และพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่



รูปที่ 3.7 แผนการดำเนินการศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน (* ไม่แสดงผลของการเติมผงซีลี้อยู่)

3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้ซีโอไลต์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซีและพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่



รูปที่ 3.8 แผนการดำเนินการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสี

(* ไม่แสดงผลของการเติมผงซีลี้อยู่)

รูปที่ 3.7 เป็นแผนการดำเนินงานการศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี และพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณผงซีลี้อยู่ตั้งแต่ 0, 50 และ 100 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนตั้งแต่ 2.4 และ 4.8 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน ทำการผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูงแล้ว จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) และตรวจสอบสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) และนำชิ้นงานตัวอย่างส่วนหนึ่งไปอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ จากนั้นนำมาวัดดัชนีความเหลืองด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และบันทึกภาพสีของชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัล รูปที่ 3.8 เป็นแผนการดำเนินงานของการศึกษาอิทธิพลของการใช้ซีโอไลต์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี และพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณผงซีลี้อยู่ 0 และ 50 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณซีโอไลต์ต่อสเตียเรทของสังกะสีในอัตราส่วน 0 : 4.8, 1.2 : 3.6, 2.4 : 2.4, 3.6 : 1.2 และ 4.8 : 0 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน ทำการผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูงแล้ว จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) และตรวจสอบสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) และนำชิ้นงานตัวอย่างส่วนหนึ่งไปอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ จากนั้นนำมาวัดดัชนีความเหลืองด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และบันทึกภาพสีของชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัล เช่นเดียวกับกรณีของการศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี และพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มี ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี และพีวีซีที่มีการเติมผงจีเลียวไม์

3.3.1.1 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

- การผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง

นำผงจีเลียวไม์ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วทำการผสมกับพลาสติกพีวีซี และส่วนผสมอื่นๆ ตามอัตราส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 3.1 นำวัตถุดิบทั้งหมดทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง (high speed mixer) รุ่น LMXS ของ บริษัท Lab Tech Engineering จำกัด (ประเทศไทย) ซึ่งมีความเร็วรอบ 4×10^3 rpm โดยปั่นผสมเป็นเวลา 5 นาที แสดงดังรูปที่ 3.9 เพื่อให้วัตถุดิบทั้งหมดเข้ากันได้ดีก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของพีวีซีคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Ingredients	Concentration (phr)
Suspension PVC grade SIAMVIC [®] 258RB	100.0
Emulsion PVC grade SIAMVIC [®] 374 MB	4.0
External lubricant (Finalux [®] G-741)	0.6
Calcium carbonate (CaCO ₃) (Omyacarb [®] -2T)	12.0
Processing aids (PA-20)	6.0
Wood Sawdust	Varied (0, 50, 100)
Stabilizer (Zeolites, Lead stearate or Zinc stearate)	Varied (0, 2.4, 4.8)



รูปที่ 3.9 เครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง

- การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

หลังจากทำการผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงแล้ว นำวัตถุดิบที่ได้มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) รุ่น HAAKE Polylab Rheomex CTW 100p ของบริษัท HAAKE จำกัด (ประเทศเยอรมัน) แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตตั้งแต่ช่วงป้อนวัตถุดิบถึงหัวขึ้นรูป มีดังนี้คือ 165 175 175 และ 185 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรู 40 รอบ/นาที ซึ่งวัตถุดิบถูกหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วผ่านหัวขึ้นรูปโดยใช้หัวขึ้นรูปแบบดายสี่เหลี่ยม (slit) ขนาด 18.2 x 2 x 16 ลูกบาศก์มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.11 หลังจากขึ้นงานตัวอย่างผ่านหัวขึ้นรูปแล้ว ชิ้นงานตัวอย่างส่งผ่านเข้าสู่ระบบควบคุมขนาด และหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 3.12 จึงได้ชิ้นงานตัวอย่างตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.10 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่



รูปที่ 3.11 หัวขึ้นรูปแบบคายสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.12 ระบบหล่อเย็นแบบอ่างน้ำ

3.3.1.2 การทดสอบชิ้นงานตัวอย่างเมื่อผ่านการอบด้วยความร้อน

— การอบชิ้นงานตัวอย่าง

หลังจากที่ได้ชิ้นงานตัวอย่างตามขนาดที่ต้องการแล้วนำไปอบด้วยตู้อบของบริษัท Binder จำกัด (ประเทศอเมริกา) แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 270 และ 360 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D2115-92 [25] ซึ่งพลาสติกพีวีซีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสี เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพันธะคู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล ถ้าพันธะคู่เกิดมากขึ้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตัวอย่างจากสีขาวเป็นสีเหลือง และจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลหรือดำ ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 ตู้อบ

— การตรวจสอบสีของชิ้นงานตัวอย่าง

การตรวจสอบสีของชิ้นงานตัวอย่าง และลักษณะภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างถูกนำเสนอโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล Sony Cyber shot รุ่น DHC-R1 ความละเอียดที่ 10 ล้านพิกเซล บันทึกที่ระยะห่าง 1 เมตร ใช้พื้นรองสีขาว ซึ่งถ่ายตั้งฉากกับชิ้นงาน

— การทดสอบหาค่าดัชนีความเหลือง

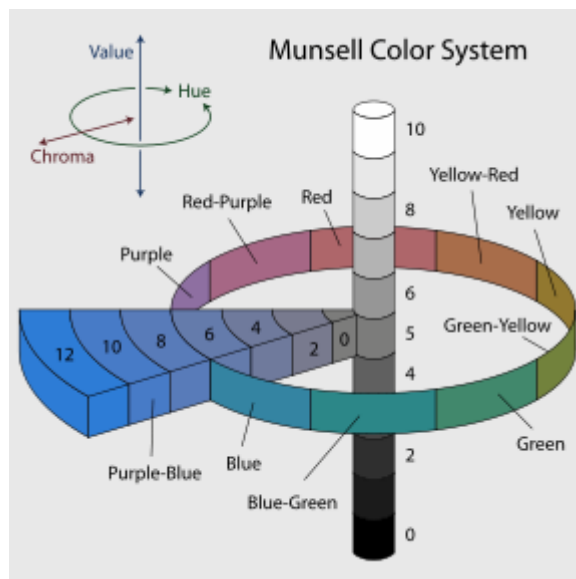
ทดสอบค่าดัชนีความเหลือง โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV-Vis 3100 บริษัท Shimatsu จำกัด (ประเทศญี่ปุ่น) แสดงดังรูปที่ 3.14 ในโหมด color ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน CIE LAB System มี Illuminant D65/10° โดยหลังจากการวัดได้ค่า Hue ซึ่งรายงานผลเป็นระบบ Munsell และค่า Tristimulus values X, Y และ Z แล้วนำค่า Tristimulus values X, Y และ Z มาคำนวณค่า Yellowness Index ด้วยสมการที่ 3.1 [24]

$$YI = \frac{100(1.28X_{CIE} - 1.06Z_{CIE})}{Y_{CIE}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.14 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

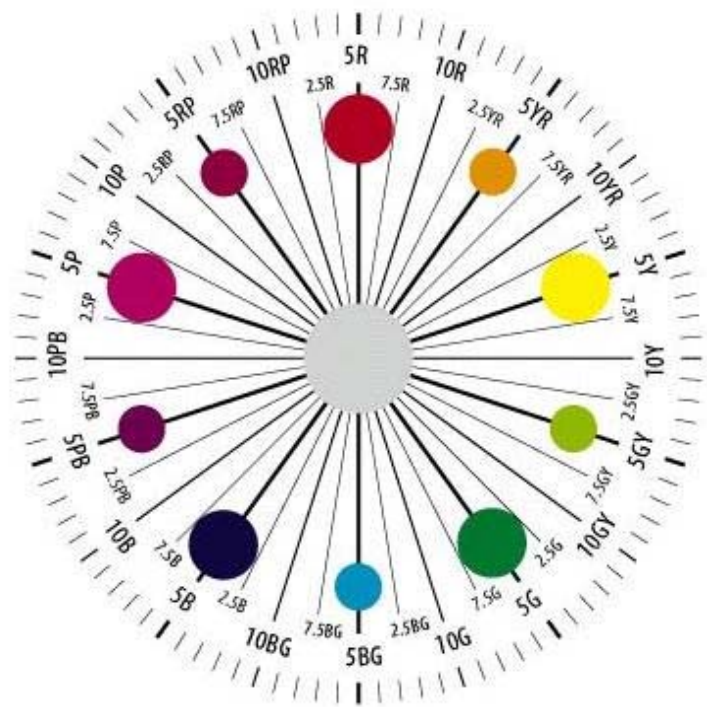
ทฤษฎีสีของมันเชลหรือระบบสีของมันเชล (The Munsell Colors System) นั้นเป็นทฤษฎีสีที่มีลักษณะกระจาย ออกจากแกนกลาง (Axis) ที่เป็นรูปทรงกระบอกตามแนวตั้งกำหนดเป็นแกนของค่า น้ำหนักของสีกลาง (Neutral Grey Value) ส่วนบนสุดของแกนกำหนดเป็นค่าน้ำหนักของสีขาว และ ส่วนล่างสุดของแกนกำหนดเป็นค่าน้ำหนักของสีดำระหว่างสีขาวและสีดำ คือน้ำหนักของสีเทา จากเทาแก่ไปเทาอ่อน คือค่าValue จากแกนกลางกระจายออกโดยรอบเป็นรัศมีวงกลมเป็นตำแหน่งของ Hue คือสีต่างๆ ประเภท Chromatic color โดย Hue จะมีจุดเริ่มจากสีเทาในแกนกลางซึ่งสีเหล่านั้นจะ มีความไม่สดใส (Low Chroma) พุ่งออกมาถึงเส้นรอบวง และสีมีความจัดหรือความสดใสเพิ่มขึ้น จนถึงสูงสุด (High Chroma) แสดงค่าของ Hue อย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ระบบสีของมันเชล

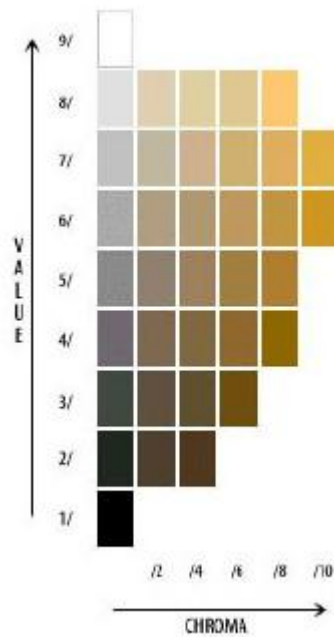
จากรูปแบบทฤษฎีสีของมันเชล แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ใน 3 มิติ (Three Dimension) คือ Hue / Value / Chroma ซึ่งความสัมพันธ์นี้ทำให้ได้สีที่แตกต่างกันออกมามากมายนับไม่ถ้วนมีรายละเอียด ดังนี้ Hue คือคุณสมบัติที่ระบุว่าเป็นสีใดสีหนึ่ง และมีความแตกต่างจากสีอื่น และสีนั้นเป็นสีประเภท Chromatic Color เช่น สีแดง สีเขียว สีเหลือง เป็นต้น มันเชลได้กำหนด Hue หรือ สีหลักในวงจรสีของเขาไว้จำนวน 5 สี คือ แดง (Red) เหลือง (Yellow) เขียว (Green) น้ำเงิน (Blue) และม่วง (Purple) และได้วางตำแหน่งสีทั้ง 5 สีนั้นเรียงลำดับเป็นรูปวงกลมตามเข็มนาฬิกาวันระยะห่างแต่ละสีเท่ากัน เริ่มจาก แดง, เหลือง, เขียว, น้ำเงิน และ ม่วงแดง มันเชลได้กำหนดว่าสีหลักเหล่านี้แต่ละสีผสมกัน เรียงลำดับไปไปยังอีกสีหนึ่งได้สีใหม่เพิ่มขึ้นมาอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เมื่อสีหลักแต่ละสีถูกผสมเข้าด้วยกันจึงเกิดเป็นสีรองขึ้นอีก 5 สีดังนี้เมื่อสีแดงผสมกับสีเหลืองในปริมาณต่าง ๆ ก็จะได้ Hue เพิ่มขึ้นมา ได้สีตั้งแต่ แดง ส้ม เหลือง และทำในลักษณะเดียวกันนี้กับสีหลักอื่น ๆ คือ เหลือง กับเขียว , เขียวกับน้ำเงิน , น้ำเงินกับม่วง และม่วงกับแดง ในที่สุดก็จะมาบรรจบกันที่จุดเริ่มต้นคือสีแดงจากการ

ผสมกันของสีหลัก 5 สี จึงเกิดสีใหม่เพิ่มขึ้นอีก 5 สี เป็นสีรองแทรกระหว่างสีหลักในวงสีของมันเชล คือ ส้ม (Yellow Red) เขียวเหลือง (GreenYellow) เขียวน้ำเงิน (Green Blue) ม่วงน้ำเงิน (Purple Blue) และม่วงแดง (Red Purple)สีหลัก และสีรองรวมกันเป็น 10 Hue เรียง อยู่ในวงสี ซึ่งมันเชลได้กำหนดอักษรย่อของแต่ละสีดังนี้ R , YR , Y , GY , G , BG , B , PB, P , และ RP แล้วได้แบ่งส่วนของวงสีออกเป็น 100 ส่วน และใช้ตัวเลขกับชื่อย่อสีกำกับแต่ละสีของสีหลัก และสีรอง เช่น 5R หมายถึงสีแดงจัด ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงสีของมันเชล

Value คือคุณสมบัติของค่าน้ำหนัก อ่อน แก่ ของสีประเภท Acromatic Color คือสีดำ สีเทา สีขาว โดยมีค่าน้ำหนักเริ่มจาก 1 คือน้ำหนักของสีดำ จนถึงค่า 9 เป็นค่าน้ำหนักของสีขาว และระหว่างสีดำกับสีขาว แบ่งเป็นน้ำหนักของสีเทา สีดำ สีขาว และสีเทานี้ เรียกว่า สีกลาง (Neutral) คือเป็นสีที่ไม่มีสมบัติของ Hue อยู่เลย แต่ค่าน้ำหนัก (Value) ของสีกลางนี้ มันเชล นำไปผสม กับสี (Hue) หรือสี Acromatic Color ทำให้ได้ค่าน้ำหนักอ่อน แก่ของสี Chroma คือคุณสมบัติของสี (Hue) ที่ถูกผสมกับสีกลาง (Neutral) ในระดับใดระดับหนึ่ง (0 - 9) ทำให้ค่า Chroma ของสีนั้นอ่อนลง (Weak) และใส่น้ำหนักจนกระทั่งสีนั้นมีค่าความจัดของสีสูง (High Chroma) หรือมีความอิ่มตัวของสีสดใส (Saturation) ค่าจากความอ่อนจนถึงสดใสที่สุดของสี ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงของสีเนื่องจากค่า Value และค่า Chroma

มันเชล ได้กำหนด สัญลักษณ์หรืออักษรและตัวเลขกำกับสีแต่ละสีที่ถูกผสมตามทฤษฎีสีของมันเชล ไว้ดังนี้ H V/C (H = Hue V = Value C = Chroma) เช่น ตัวอย่างถ้าระบุสีดังนี้ 5 YR 6/12 แปลค่าตาม สัญลักษณ์ก็ คือหมายความว่าสีนั้นก็คือ สีเหลืองแดง(Yellow-Red)ในตำแหน่งที่ 5YR (ดูวงสีมันเชล ประกอบ) ค่าน้ำหนัก Value สีเทา ในตำแหน่งที่ 6 และค่า Chroma ในตำแหน่งที่ 12

3.3.1.3 การตรวจสอบทางเคมี และอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่างภายหลังกระบวนการขึ้นรูป

— การตรวจสอบหาปริมาณหมู่พอลิอิน

การหาปริมาณหมู่พอลิอินสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Analyzer รุ่น Nexus 470 ของบริษัท Thermo-Nicolet จำกัด (ประเทศอเมริกา) โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier-Transform Infrared Analysis (ATR-FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบ ผิวหน้าสามารถวิเคราะห์ความลึกของผิวประมาณ 0.2–3 ไมโครเมตร เทคนิคนี้ลำแสงอินฟราเรดจะตกกระทบกับผลึก (crystal) เป็นมุมที่มากกว่ามุมวิกฤติของผลึกซึ่งลำแสงอินฟราเรดตกกระทบเป็นมุม 50 องศา ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุโดยใช้หลักการการสะท้อน (Reflection) เนื่องจากการสะท้อนจะมีการดูดซับแสง โดยวัดการสั่นของพันธะทางเคมี มี 2 ประเภท คือ การยืด (Stretching) และ การงอ (Bending) ซึ่งการสั่นของพันธะทางเคมีจะเป็นลักษณะเฉพาะของ

แต่ละพันธะทางเคมี ในงานวิจัยนี้ใช้โหมดการทดสอบแบบ ATR การเตรียมชิ้นงานทำโดยเตรียมชิ้นงานขนาด 1×4 ตารางเซนติเมตร จัดด้วยกระดาษทรายขัดไม้เบอร์ 2 แล้วขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายขัดไม้เบอร์ 0 เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ ปริมาณหมู่พอลิอินสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 [25]

$$\text{Polyene index} = \frac{\%R_{\text{baseline}} - \%R_{1650}}{\%R_{\text{baseline}} - \%R_{870}} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\%R_{\text{baseline}}$ คือ เปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนกลับ ณ เส้นอ้างอิง (Base Line)
 $\%R_{1650}$ คือ เปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนกลับ ณ เลขคลื่น 1650 cm^{-1} (C = C stretching)
 $\%R_{870}$ คือ เปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนกลับ ณ เลขคลื่น 870 cm^{-1} (C – H bending)



รูปที่ 3.18 เครื่อง Fourier transform infrared analyzer

— การตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่าง

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนซึ่งในงานวิจัยนี้วิธีตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) (Perkin-Elmer Thermal analyzer) รุ่น TGA7 ของบริษัท Perkin Elmer จำกัด (ประเทศอเมริกา) แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้น้ำหนักประมาณ 7 มิลลิกรัม จากนั้นทำการทดสอบด้วยการให้ความร้อน 3 ช่วง ในบรรยากาศไนโตรเจน โดยช่วงแรกเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ช่วงที่ 2 ทำการคงอุณหภูมิไว้ที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำที่มีในชิ้นงานตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณน้ำที่มีในผงขี้เลื่อยไม้นั้น ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่าง โดยถ้ามีปริมาณความชื้นมาก ยิ่งทำให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวลดต่ำลง[29] ช่วงที่ 3 เพิ่มอุณหภูมิจาก 100 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งในช่วงที่ 3 นี้เองพบการสลายตัวของชิ้นงาน

ตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ ทำการรายงานผลอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่าง ณ การสูญเสีย น้ำหนัก 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของชิ้นงานทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจาก ณ การสูญเสียน้ำหนัก 10 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการเสื่อมสภาพ โดยน้ำหนักหลังจาก 10 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักของชิ้นงานทั้งหมดนั้นลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิที่คงที่ จึงรายงานผลที่การสูญเสียน้ำหนัก 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของชิ้นงานทั้งหมด



รูปที่ 3.19 เครื่อง Perkin-Elmer Thermal analyzer

— การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างที่มีโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนประกอบ เมื่อทำการผลิตที่อุณหภูมิสูงมีผล ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดเป็นรูฟองอากาศขึ้น จึงต้องมีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีโอไลต์ที่ไม่ทำให้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานตัวอย่าง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น JSM-5800 ของบริษัท JEOL จำกัด (ประเทศญี่ปุ่น) แสดงดังรูปที่ 3.18 ทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างโดยหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว แล้วตัดชิ้นงานลงบนแท่นอะลูมิเนียม (stub) โดยใช้กาวคาร์บอน แล้วนำไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองแบบสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.19 ที่ความดัน 10^{-4} Pa ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบ 30 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 วินาที ส่องโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.21 เครื่องเคลือบทองแบบสุญญากาศ

3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้ชีโலைท์ ร่วมกับ สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซีและพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่

3.3.2.1 การผสมและขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

- การผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง

การผสมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลของชีโலைท์ และสเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี นั้นมีสัดส่วนในการผสมดังตารางที่ 3.1 โดยมีปริมาณพลาสติกพีวีซี ต่อ ผงซีลี้อยู่ 100:0, 100:50 และ 100:100 ซึ่งมีการแปรผันปริมาณชีโலைท์ และสเตียเรทของสังกะสี ในสัดส่วน 0:4.8, 1.2:3.6, 2.4:2.4, 3.6:1.2 และ 4.8:0 ส่วนในพลาสติกพีวีซี 100 ส่วน โดยมีรายละเอียด การผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.1.1

- การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

หลังจากทำการการผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูงแล้วนำวัตถุดิบที่ได้ ขึ้นรูปให้เป็นชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่เช่นเดียวกันกับหัวข้อการขึ้นรูปชิ้นงานเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.1.1

3.3.2.2 การทดสอบชิ้นงานตัวอย่างเมื่อผ่านการอบด้วยความร้อน

- การอบชิ้นงานตัวอย่าง

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ มาทำการอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 270 และ 360 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D2115-92 เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.1.2 การอบชิ้นงานตัวอย่าง

3.3.2.2 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของชิ้นงาน

- การตรวจสอบสีของชิ้นงานตัวอย่าง

การตรวจสอบสีของชิ้นงานตัวอย่าง และลักษณะภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างถูกนำเสนอโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลดังหัวข้อ 3.3.1.2

- การทดสอบหาค่าดัชนีความเหลือง

ทำการทดสอบค่าดัชนีความเหลืองของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบแล้ว โดยใช้เครื่องมือ และการคำนวณ เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.1.2 การทดสอบหาค่าดัชนีความเหลือง

3.3.2.3 การตรวจสอบทางเคมี และอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่างภายหลังกระบวนการขึ้นรูป

- การตรวจสอบหาค่าดัชนีพอลิอิน

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบ ตรวจสอบหาค่าดัชนีพอลิอินโดยใช้เครื่องมือ และการคำนวณ เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.1.3 การตรวจสอบหาพอลิอิน

- การตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกพีวีซี

การตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกพีวีซีทำโดยการทดสอบเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.1.3 การตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกพีวีซี

- การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ ก่อนการอบโดยคัดเลือกเฉพาะชิ้นงานตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของซีโอไลต์สูง เนื่องจากเหตุผล และการใช้เครื่องมือเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

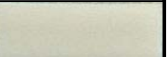
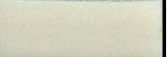
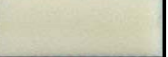
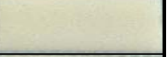
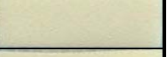
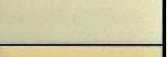
4.1 อิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

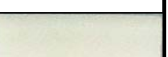
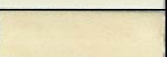
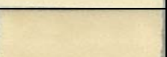
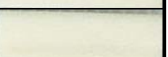
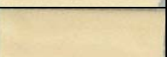
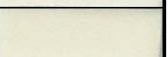
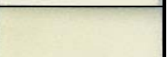
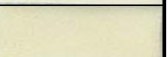
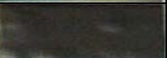
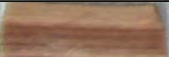
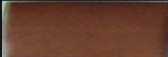
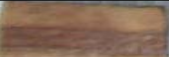
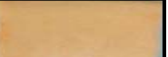
4.1.1.1 สีของชิ้นงานพีวีซี

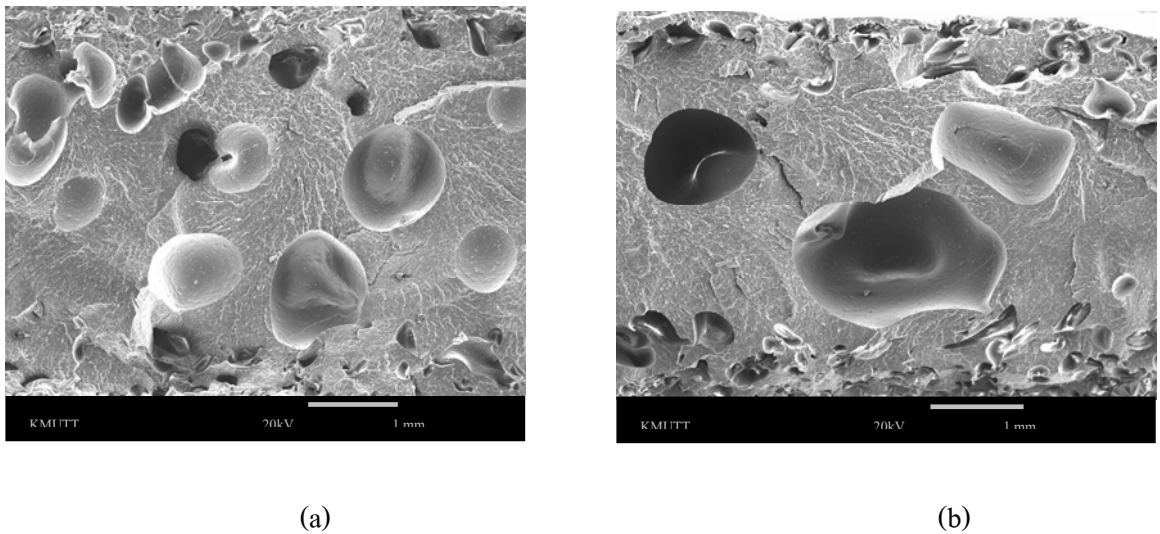
หลังจากอบชิ้นงานพีวีซีที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 270 และ 360 นาที สีของชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมผงซีลี้อยู่ไม่แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และชิ้นงานพีวีซีที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ปริมาณ 2.4 phr ซึ่งในที่นี้มี 3 ชนิด คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) สเตียเรทของสังกะสี (Zn stearate) และ สเตียเรทของตะกั่ว (Pb stearate) ตามลำดับ โดยชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดไม่เติมผงซีลี้อยู่ไม่ โดยการสังเกตสีของชิ้นงานตัวอย่างนั้นเน้นการรายงานการเปลี่ยนสีที่เห็นได้ชัดเจน พบว่า ชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนนั้น เริ่มต้นมีสีน้ำตาลเข้ม เช่นเดียวกับ ชิ้นงานพีวีซีที่เติม ซีโอไลต์เริ่มต้นมีสีน้ำตาลอ่อน และมีสีเข้มขึ้นเมื่อเวลาในการอบเพิ่มขึ้น แต่ในส่วน of ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของสังกะสี และ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของตะกั่ว นั้น ชิ้นงานเริ่มต้นมี สีขาว และ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาล ที่เวลา 120 นาที และ 360 นาที ตามลำดับ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของตะกั่ว นั้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ได้ดีที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของสังกะสี ชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลต์ และชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำที่สุด สีของ ชิ้นงานที่มีสีเข้มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน เนื่องมาจากเมื่อให้อุณหภูมิแก่พลาสติกพีวีซี พลาสติกพีวีซี ปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของพลาสติกพีวีซีมีคาร์บอนพันธะคู่ (conjugated double bond , $-C=C-$) เกิดขึ้น และเมื่อความยาวของคาร์บอนพันธะคู่แบบคอนจูเกตมี มากขึ้นนั้น ส่งผลทำให้สีของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง[3] และจากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นชิ้นงานพีวีซี ที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และชิ้นงานพีวีซีที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนทั้ง 3 ชนิดปริมาณ 4.8 phr พบว่า โดยทั่วไปที่เกิดขึ้นมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนปริมาณ 2.4 phr แต่ในส่วน of ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของสังกะสี และชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของตะกั่ว นั้น ชิ้นงานพีวีซีเริ่มต้นมีสีขาว และ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาล ที่เวลา 90 นาที และ 360 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 สีของชิ้นงานที่ไม่เติมผงจีเลียวไม์ทั้งกรณีที่มีการเติมและไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ปริมาณ 2.4 phr ซึ่งไม่เติมผงจีเลียวไม์ภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

Aging time (min)	No Stabilizer	Zeolite	Zn stearate	Pb stearate
0				
30				
45				
60				
90				
120				
180				
270				
360				

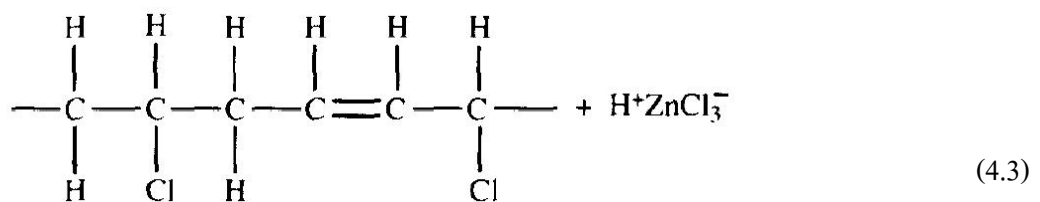
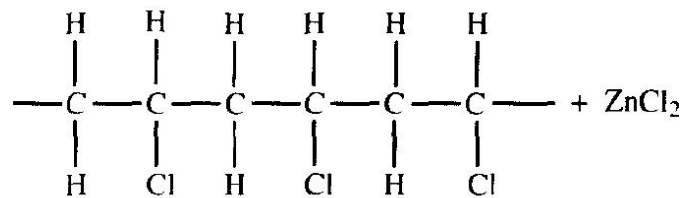
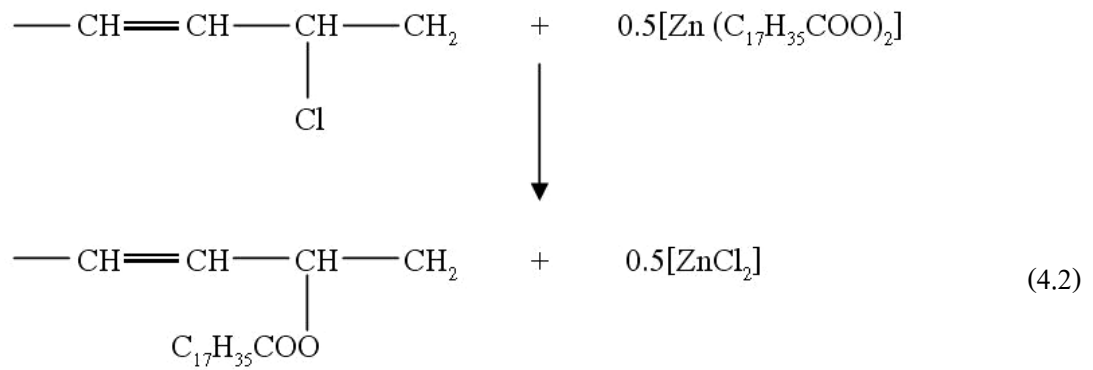
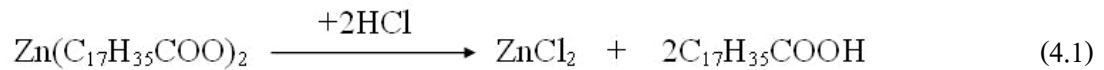
ตารางที่ 4.2 สีของชิ้นงานที่ไม่เติมผงจีเลียวไม์ทั้งกรณีที่มีการเติม และไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนปริมาณ 4.8 phr ซึ่งไม่เติมผงจีเลียวไม์ภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

Aging time (min)	No Stabilizer	Zeolite	Zn stearate	Pb stearate
0				
30				
45				
60				
90				
120				
180				
270				
360				



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคภายในชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอโลต์ ในปริมาณ (a) ปริมาณ 2.4 phr และ (b) ปริมาณ 4.8 phr

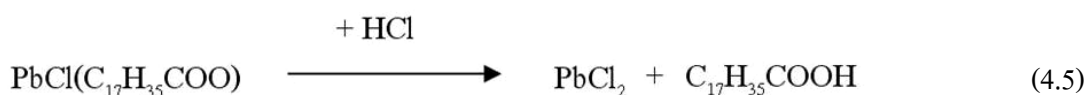
เมื่อเปรียบเทียบทางด้านปริมาณการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอโลต์ปริมาณ 4.8 phr มีสีที่อ่อนกว่าชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอโลต์ปริมาณ 2.4 phr ในทุกๆ เวลาการอบ เนื่องจากซีโอโลต์สามารถทำหน้าที่ดูดซับไฮโดรเจนคลอไรด์ [6,7] ดังนั้นเมื่อเติมซีโอโลต์ปริมาณมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการจับไฮโดรเจนคลอไรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพลาสติกพีวีซีได้มากขึ้น ในส่วนของชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอโลต์ ในปริมาณ 2.4 และ 4.8 phr จะมีฟองอากาศภายในชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีของซีโอโลต์ ที่มีโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนประกอบ และชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเต็มเรทของสังกะสีปริมาณ 4.8 phr เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลเร็วกว่าชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเต็มเรทของสังกะสีปริมาณ 2.4 phr เนื่องมาจากการทำงานของ สเต็มเรทของ สังกะสีซึ่งเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพีวีซีโดยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์และยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่หลักเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา unzipping ให้เกิดช้าลงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 [16] มีปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โดยซิงค์คลอไรด์ ที่เกิดขึ้นสามารถเร่งปฏิกิริยาการหลุดของไฮโดรเจนคลอไรด์ในพลาสติกพีวีซีได้ดังสมการที่ 4.3 [16] ซึ่งมีผลให้การเติมสเต็มเรทของสังกะสีในปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนเกิดได้เร็วขึ้น โดยปฏิกิริยาการยับยั้ง หรือการเร่งการเสื่อมสภาพของพีวีซี อันเนื่องมาจากสเต็มเรทของสังกะสี นั้นขึ้นกับเวลา ถ้าระยะในการทำเข้าปฏิกิริยาของสเต็มเรทของสังกะสีอยู่ในช่วงต้นปฏิกิริยาโดยรวมทั้งหมดเกิดแบบยับยั้งการเสื่อมสภาพ ในทางตรงกันข้ามยิ่งเวลาที่นานมากขึ้นปฏิกิริยาโดยรวมทั้งหมดจึงเกิดแบบเร่งการเสื่อมสภาพ



ที่มา : Beneniba at al. (2003)

ในส่วนของการเติมสเตียเรทของตะกั่วที่ปริมาณ 4.8 phr เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลช้ากว่า ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของตะกั่วปริมาณ 2.4 phr เนื่องจากเติมสเตียเรทของตะกั่วสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ และสามารถทำปฏิกิริยากับสายโซ่หลักเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา unzip เช่นเดียวกับสเตียเรทของสังกะสีดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 [8] ดังนั้นการเติมสเตียเรทของตะกั่วมากขึ้น จึงมีผลทำให้การเสื่อมสภาพทางความร้อนเกิดได้ช้าลง และสาเหตุที่ทำให้ผลที่ได้ตรงข้ามกับ

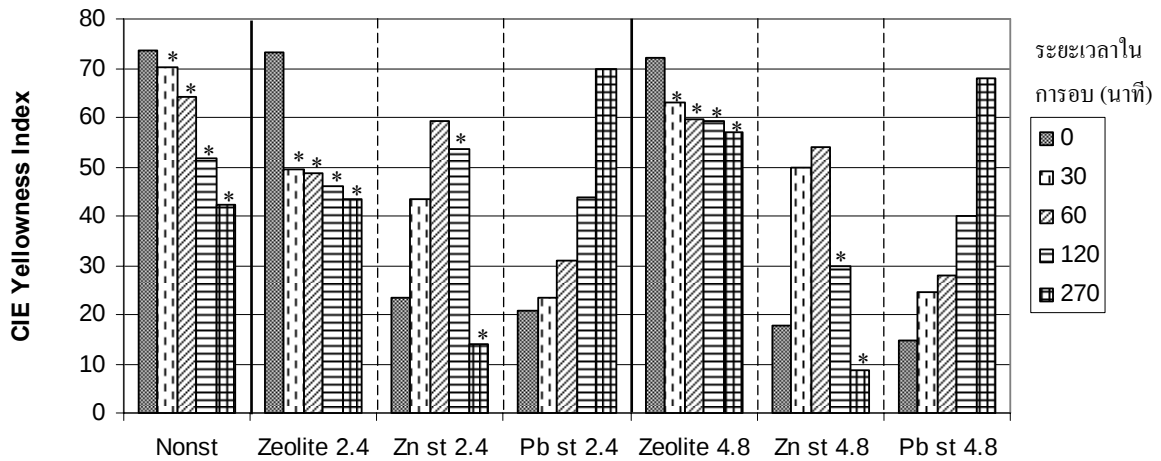
การเติมสเดิยเรทของสังกะสี เนื่องจาก ตะกั่วคลอไรด์ (PbCl_2) เร่งปฏิกิริยาการหลุดของไฮโดรเจนคลอไรด์ได้น้อยกว่าสังกะสีคลอไรด์ (ZnCl_2) [1]



ในส่วนของชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่เมื่อก่อนและหลังการอบมีสีใกล้เคียงกันเนื่องจากผงซีลี้อยู่ไม่ที่มีสีน้ำตาลจึงไม่นำมาเสนอในหัวข้อสีของชิ้นงานพีวีซีนี้

4.1.1.2 ดัชนีความเหลือง

หลังจากนำชิ้นงานพีวีซีอบที่อุณหภูมิคงที่ 177 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 30, 60, 120 และ 270 นาที แล้ว ทดสอบหาค่าดัชนีความเหลือง (CIE Yellowness Index) แสดงดังรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าดัชนีความเหลืองของชิ้นงานพีวีซีกรณีที่มีการเติม และไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความเหลืองในงานวิจัยนี้มี 3 ลักษณะด้วยกัน คือ ลักษณะที่หนึ่ง คือ ลักษณะที่ทำให้ค่าดัชนีความเหลืองลดลง ซึ่งในที่นี้เป็นชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลต์ปริมาณ 2.4 และ 4.8 phr เนื่องจากชิ้นงานเปลี่ยนจากเจดสีเหลืองเข้มขึ้นจนกลายเป็นสีน้ำตาล ซึ่งสีน้ำตาลจะเป็นเจดสีที่เป็นสีแดง จึงทำให้ค่าดัชนีความเหลืองลดลงลักษณะที่สองคือลักษณะของชิ้นงานพีวีซีที่ค่าดัชนีความเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกดัชนีความเหลืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอบมากขึ้น และในช่วงที่สองเวลาการอบที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าดัชนีความเหลืองลดลง ซึ่งในที่นี้เป็นชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเดิยเรทของสังกะสีปริมาณ 2.4 และ 4.8 phr พบว่า ในช่วงแรกชิ้นงานเปลี่ยนจากเจดสีขาวเป็นสีเหลืองเมื่อใช้เวลานานขึ้น และในช่วงที่สองชิ้นงานเปลี่ยนจากเจดสีเหลืองเข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาล ลักษณะสุดท้าย คือค่าดัชนีความเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบเพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้เป็นลักษณะของชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเดิยเรทของตะกั่วปริมาณ 2.4 และ 4.8 phr แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนเป็นเจดสีน้ำตาลจากผลการวัดค่าดัชนีความเหลืองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า สเดิยเรทของตะกั่วมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้ดีที่สุด รองลงมาคือสเดิยเรทของสังกะสีซีโอไลต์ และกรณีไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อค่าดัชนีความเหลืองของชิ้นงานพีวีซีซึ่งไม่เติมผงซีลี้อยู่ใน ระยะเวลาการอบต่างๆที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส (* ชิ้นงานพีวีซีเป็นสีน้ำตาล)

ตารางที่ 4.3 ค่า Hue ของชิ้นงานที่ไม่เติม และที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนทั้ง 3 ชนิด ซึ่งไม่เติมผงซีลี้อยู่ใน ระยะเวลาการอบต่างๆที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

Formula	Hue value at vary time in oven (min)				
	0	30	60	120	270
No stabilizer	2.5YR 5.6/5.1	0.1YR 4.3/3.5	9.8R 3.9/3.7	9.7R 3.4/3.3	7.7R 2.8/1.7
Zeolite 2.4	4.5YR 7.3/3.6	3.0YR 6.7/3.5	2.8YR 6.7/3.0	2.7YR 5.7/3.7	2.4YR 3.8/3.9
Zn st. 2.4	7.9Y 7.8/1.0	2.5Y 8.1/2.6	0.1Y 7.6/4.0	0.7GY 3.3/1.3	6.4YR 2.7/0.6
Pb st. 2.4	8.5Y 7.5/0.6	5.9Y 7.7/1.0	5.0Y 7.1/1.5	4.8Y 7.4/2.5	9.0YR 6.5/4.8
Zeolite 4.8	5.5YR 7.6/3.3	3.0YR 6.5/3.3	2.4YR 6.1/3.6	2.3YR 4.7/3.6	1.4YR 2.4/0.3
Zn st. 4.8	9.5Y 8.2/0.7	1.8Y 8.2/3.3	0.6Y 8.0/3.6	3.1GY 4.4/1.5	4.9YR 2.4/0.2
Pb st. 4.8	9.0Y 7.7/0.5	4.5Y 8.5/1.1	4.6Y 8.4/1.4	3.9Y 8.4/2.4	0.8Y 7.3/4.8

จากตารางที่ 4.3 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า Hue ของชิ้นงานตัวอย่างต่างๆ เมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีของชิ้นงานตัวอย่างเปลี่ยนแปลงเป็นสีเข้มขึ้น โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนนั้น เริ่มต้นมีเฉดสีเหลือง-แดง(YR) และเปลี่ยนเป็นเฉดสีแดง(R) ที่เวลา 60 นาที ในกรณีชิ้นงานที่เติมซีโอไลท์ 2.4 phr นั้นก่อนผ่านการอบมีเฉดสีเหลือง-แดง(YR)

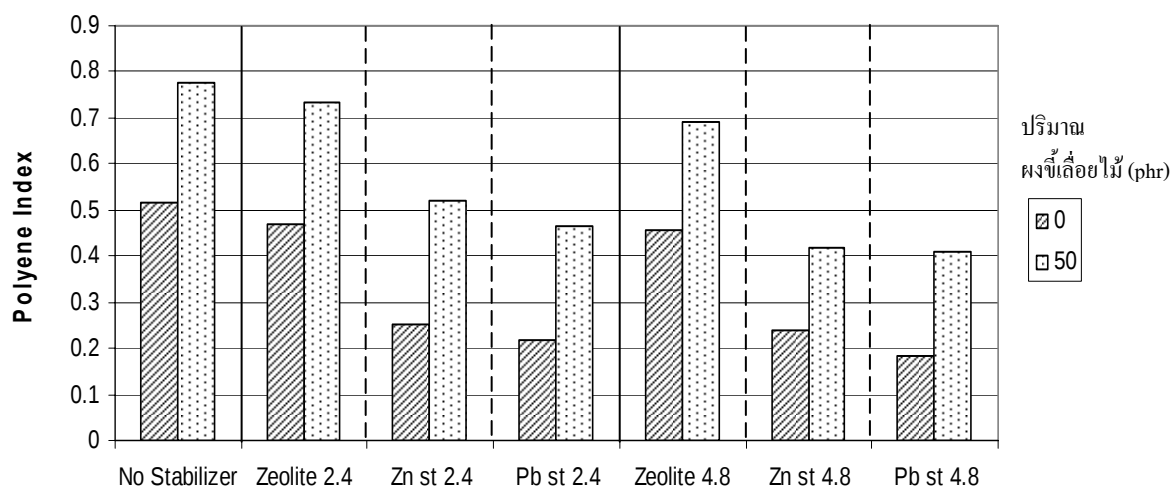
เช่นเดียวกันกับชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และที่เวลาการอบนานมากขึ้นยิ่งส่งผลให้มีเจดสีเหลือง-แดง(YR) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งให้ผลคล้ายกับชิ้นงานที่เติมซีโอไลท์ 4.8 phr กรณีชิ้นงานที่เติมสเดียรทของสังกะสีในปริมาณ 2.4-4.8 phr เริ่มต้นมีเจดสีเหลือง(Y) และเปลี่ยนเป็นเจดสีเขียวเหลือง(GY) ที่ระยะเวลาการอบ 120 นาที ซึ่งที่เวลาการอบ 270 นาที นั้นจึงเปลี่ยนเป็นเจดสีเหลือง-แดง(YR) กรณีชิ้นงานที่เติมสเดียรทของตะกั่ว 2.4 phr เริ่มต้นมีเจดสีเหลือง(Y) และเป็นเจดสีเหลืองเข้มขึ้นจนกระทั่งการอบ 270 นาที ก็ยังคงเจดสีเหลืองอยู่ ซึ่งต่างจากการเติมสเดียรทของตะกั่ว 4.8 phr นั้นเริ่มต้นเป็นเจดสีเหลือง(Y) และมีเจดสีเหลืองมากขึ้นเมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้น และที่เวลา 270 นาที สังเกตการณ์เกิดเจดสีเหลือง-แดง(YR) ขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงของค่า Hue มีแนวโน้มคล้ายกับค่าดัชนีความเหลือง ซึ่งกล่าวไว้ข้างต้น

4.1.2 ลักษณะทางเคมี

4.1.2.1 ปริมาณหมู่พอลิอิน

หลังจากทำการทดสอบชิ้นงานพีวีซีด้วยเครื่อง Fourier transform infrared analyzer (FTIR) แล้วทำการคำนวณหาปริมาณหมู่พอลิอิน (Polyene Index) จากสมการที่ 3.2 ซึ่งค่าปริมาณหมู่พอลิอินแสดงถึงปริมาณคาร์บอนพันธะคู่ (C=C) ในโครงสร้างของพีวีซี คือถ้าชิ้นงานพีวีซีมีค่าปริมาณหมู่พอลิอินมากแสดงว่าชิ้นงานพีวีซินั้นเสื่อมสภาพทางความร้อนมาก โดยทำการทดสอบชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสมพีวีซี และผงซีลี้อยู่ในอัตราส่วน 100:50 ส่วนโดยน้ำหนักทั้งกรณีที่มีการเติมและไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าทั้งกรณีชิ้นงานพีวีซี และวัสดุผสมพีวีซี และผงซีลี้อยู่ไม่มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันคือชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีค่าปริมาณหมู่พอลิอินสูงที่สุด รองลงมาคือ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเดียรทของสังกะสี และชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเดียรทของตะกั่ว ตามลำดับ แสดงว่าชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนมากที่สุด รองลงมาคือ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเดียรทของสังกะสี และ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเดียรทของตะกั่ว ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนผลการทดลองที่ได้จาก สีของชิ้นงาน และดัชนีความเหลืองของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบและจากการสังเกตพบว่าค่าปริมาณหมู่พอลิอิน กรณีชิ้นงานที่เติมผงซีลี้อยู่ไม่มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่เติมผงซีลี้อยู่ในทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องมาจากผงซีลี้อยู่ไม่มีหมู่ไฮดรอกซิล(OH group) ซึ่งไปเหนี่ยวนำอะตอมคลอรีนในสายโซ่พีวีซีให้หลุดได้ง่ายขึ้น [26] และเมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนพบว่าเมื่อปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าปริมาณหมู่พอลิอินมีแนวโน้มลดลงในทุกกรณี ซึ่งผลที่ได้นี้แตกต่างจากกรณีการเปรียบเทียบสีของชิ้นงาน และค่าดัชนีความเหลืองภายหลังการอบให้

ความร้อน ซึ่งพบว่าในกรณีการเติมสเต็มเรทของสังกะสี เมื่อปริมาณสเต็มเรทของสังกะสีมากขึ้นจาก 2.4 phr เป็น 4.8 phr มีผลทำให้ พีวีซีเกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้นสีเข้มเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการวัดค่าปริมาณหมู่พอลิอินทรีย์จากชิ้นงานพีวีซีที่ไม่ผ่านการอบให้ความร้อน ดังนั้นปริมาณของซิงค์คลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสเต็มเรท ของสังกะสีกับพีวีซี จึงยังมีปริมาณไม่มาก และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีต่อชิ้นงานพีวีซีและชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม่ว่าให้ผลที่แตกต่างกันหรือไม่ โดยพิจารณาจากส่วนต่างของความสูงระหว่างของค่าปริมาณหมู่พอลิอินทรีย์ของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม่ว่า เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 2.4 และ 4.8 phr พบว่า การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ส่วนต่างความสูงของค่าปริมาณหมู่พอลิอินทรีย์ระหว่างกรณีชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม่ว่ามีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้น จึงมีโอกาสดำเนินการปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพีวีซีเนื่องจากความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป และการเหนี่ยวนำของผงซีลี้อยไม่ว่าได้มากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนคลอไรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (auto-catalyst) การสลายตัวของพีวีซีมีปริมาณลดลง



รูปที่ 4.3 ผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อค่าปริมาณหมู่พอลิอินทรีย์ของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม่ว่า

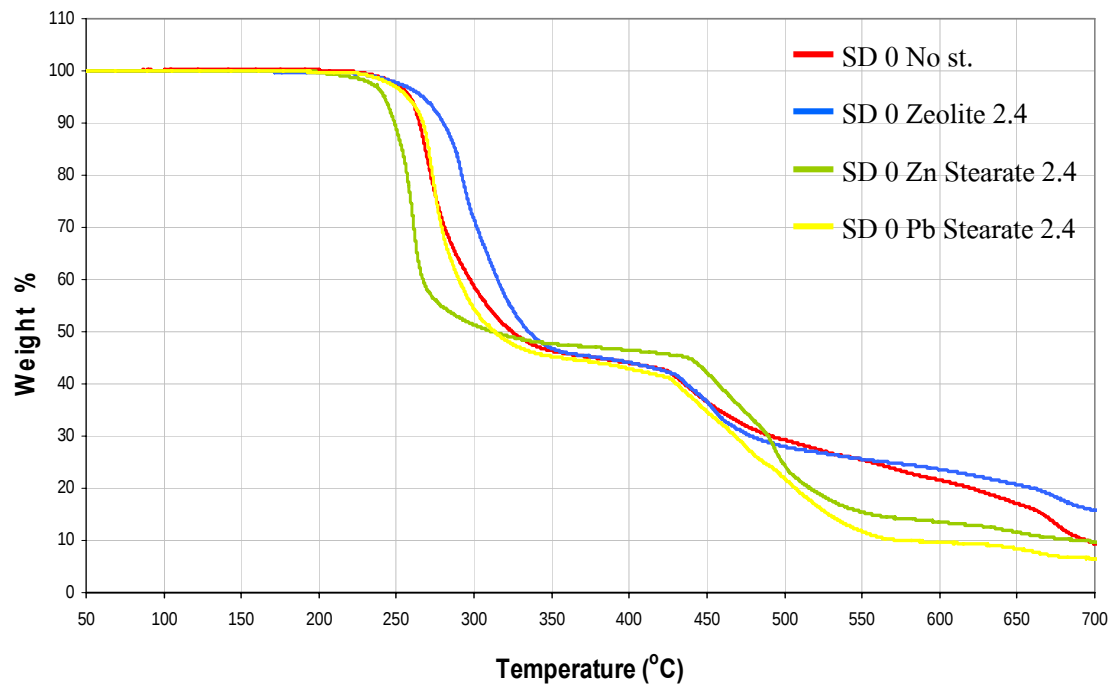
4.1.2.2 อุณหภูมิการสลายตัว

อุณหภูมิการสลายตัวได้มาจากการทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานพีวีซี ที่อุณหภูมิ 100-700 องศาเซลเซียส โดยการสลายตัวของพีวีซีนั้นมี 2 ขั้นคือขั้นแรก เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรคลอรีนชัน โดยเกิดการหลุดออกของโมเลกุลไฮโดรเจนคลอไรด์

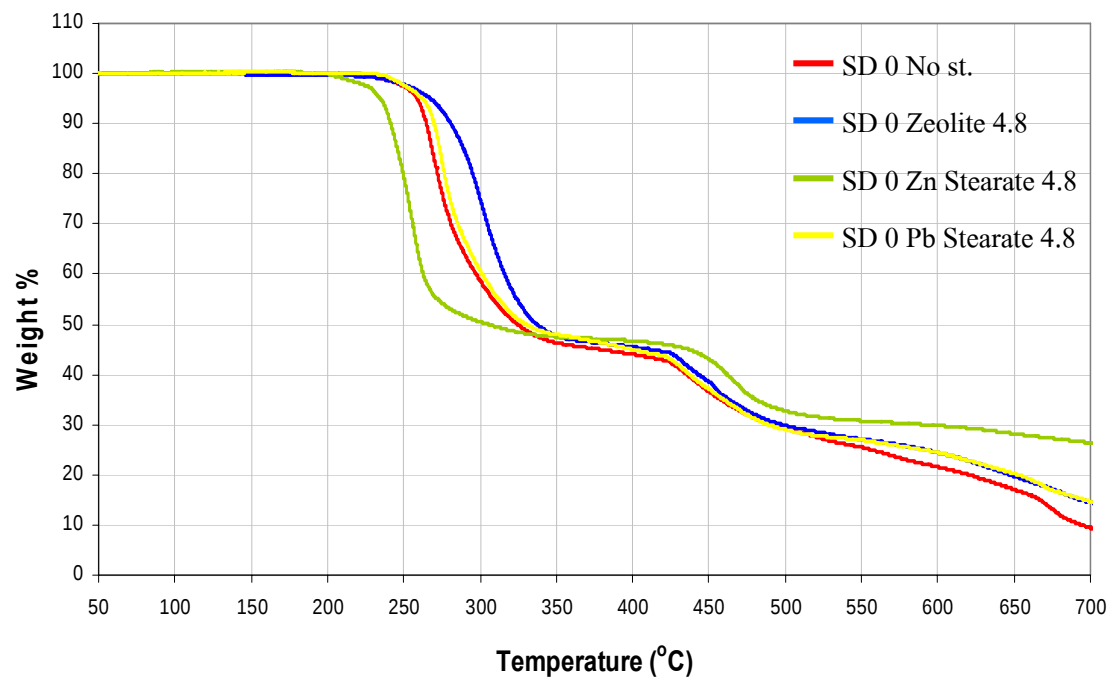
ไรด์ส่งผลให้น้ำหนักของชิ้นงานลดลง จนเมื่อไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกหมดจึงทำให้เกิดน้ำหนักคงที่ ขั้นที่ 2 เกิดการแตกออกของสายโซ่หลักแล้วเกิดการกลายเป็นไอส่งผลให้เกิดการลดลงของน้ำหนักขึ้น และส่วนที่เหลือเกิดเป็นเถ้า ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงกราฟ TGA เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานพีวีซีที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.4 และ 4.8 phr ตามลำดับ พบว่า ชิ้นงานเริ่มเกิดการสลายตัว เรียงตามลำดับจากเริ่มสลายตัวเร็วที่สุดไปช้าที่สุด ดังนี้ ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของสังกะสี ชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของตะกั่ว และชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลต์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

- กรณีชิ้นงานพีวีซีที่เติมสเตียเรทของสังกะสีมีการสลายตัวเร็วที่สุด เนื่องจากสเตียเรทของสังกะสีทำปฏิกิริยาแล้วเกิดซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ซึ่งซิงค์คลอไรด์นี้เองสามารถเร่งให้ไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดจากโมเลกุลพีวีซีได้ง่ายขึ้นโดยการทดสอบ TGA พบว่าการเรียงลำดับการเกิดการเสื่อมสภาพแตกต่างจากกรณีการตรวจสอบสี และปริมาณพอลิอิน ทั้งนี้เนื่องมาจากในการทดสอบ TGA เป็นวิธีการที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไปจนกระทั่งถึงช่วงอุณหภูมิสูงๆ อุณหภูมิที่สูงยิ่งมีผลไปเร่งให้พีวีซีเกิดการสลายตัวเกิดไฮโดรเจนคลอไรด์เนื่องจากความร้อนได้มากขึ้น ประกอบกับซิงค์คลอไรด์ทำหน้าที่เร่งให้ไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกจากพีวีซีอีกด้วยจึงส่งผลทำให้ปริมาณไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูง และนำไปสู่การทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น และเมื่อปริมาณของสเตียเรทของสังกะสีเพิ่มมากขึ้น พบว่ามีผลทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้น ณ อุณหภูมิสูง
- กรณีชิ้นงานพีวีซีที่ไม่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน มีการสลายตัวเร็วเป็นอันดับที่ 2 เนื่องจากไม่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ช่วยในการยับยั้งให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้ช้าลง แต่จากรูปที่ 4.4 พบว่า กราฟ TGA ของกรณีชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ และชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมสเตียเรทของตะกั่ว มีอัตราการสลายตัวของพีวีซีที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5 พบว่า กราฟ TGA ของชิ้นงานพีวีซีทั้ง 2 สูตร เริ่มมีแนวโน้มอัตราการสลายตัวของพีวีซีแตกต่างกันมากขึ้น กรณีการเติมสเตียเรทของตะกั่ว 4.8 phr มีผลทำให้พีวีซีมีอัตราการสลายตัวที่ช้าลงมากยิ่งขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสเตียเรทของตะกั่ว มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการสลายตัวของพีวีซี ณ อุณหภูมิสูงได้เมื่อปริมาณของสเตียเรทของตะกั่วมีปริมาณมาก
- กรณีชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมซีโอไลต์ มีการสลายตัว หรือการลดลงของน้ำหนักชิ้นงานช้าที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากซีโอไลต์เป็นสารอนินทรีย์ จึงอาจสามารถดูดซับความร้อนไว้ มีผลทำให้ชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลต์เกิดการลดลงของน้ำหนักชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่าชิ้นงานพีวีซีสูตรอื่นมากที่สุด

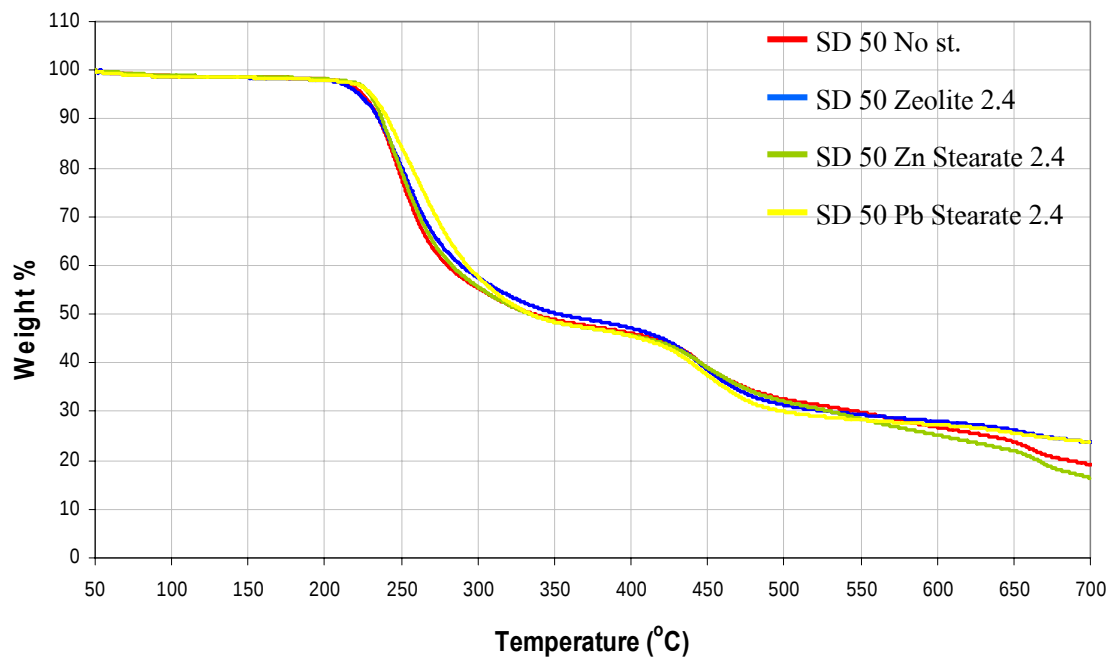
สำหรับชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมขึ้นเลื่อยปริมาณ 50 phr กรณีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 2.4 phr กราฟ TGA มีแนวโน้มใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 แต่เมื่อปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพปริมาณเพิ่มขึ้น หรือ 4.8 phr พบว่า กราฟ TGA เริ่มมีแนวโน้มแตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพมีผลต่อการเสื่อมสภาพของพีวีซีในวัสดุผสมพีวีซีและผงขี้เลื่อยไม้ เช่นเดียวกับกรณีชิ้นงานพีวีซีแต่ผลที่เกิดขึ้นไม่ชัดเจน อาจเนื่องมาจากในวัสดุผสมมีผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งเหนียวน่าทำให้ ไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกจากพีวีซีได้ง่ายขึ้น ปริมาณไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น การเนี่ยงทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้นทำให้สารป้องกันการเสื่อมสภาพถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย การเสื่อมสภาพของพีวีซี จึงไม่ขึ้นกับชนิดของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมาก ส่งผลให้เกิดการกราฟของพีวีซีที่มีการเติมขึ้นเลื่อยปริมาณ 50 phr และเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนทุกชนิดมีลักษณะใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 4.6 และเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างรูปที่ 4.4 และ 4.6 พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับคำอธิบายข้างต้น ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานพีวีซี ณ น้ำหนักที่สูญเสียไป 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 จากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 พบว่า ชิ้นงานพีวีซีที่เติมผงขี้เลื่อยไม้ 50 phr และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิใกล้เคียงกัน น้ำหนักของชิ้นงานก็มีค่าใกล้เคียงกันด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานพีวีซีที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก จากตารางที่ 4.3 พบว่า ชิ้นงานพีวีซีที่เติมผงขี้เลื่อยไม้มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้นเพราะผงขี้เลื่อยไม้มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถเร่งการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ในพลาสติกพีวีซีได้มากขึ้น สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนส่วนใหญ่ จึงทำหน้าที่ในการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ ทำให้มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเข้ายับยั้งการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ในพลาสติกพีวีซีได้น้อยลงจึงเกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติกพีวีซีมากขึ้น ส่งผลให้พลาสติกพีวีซีที่เติมผงขี้เลื่อยไม้ 50 phr มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำลง และสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดต่างๆ ให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกันมาก



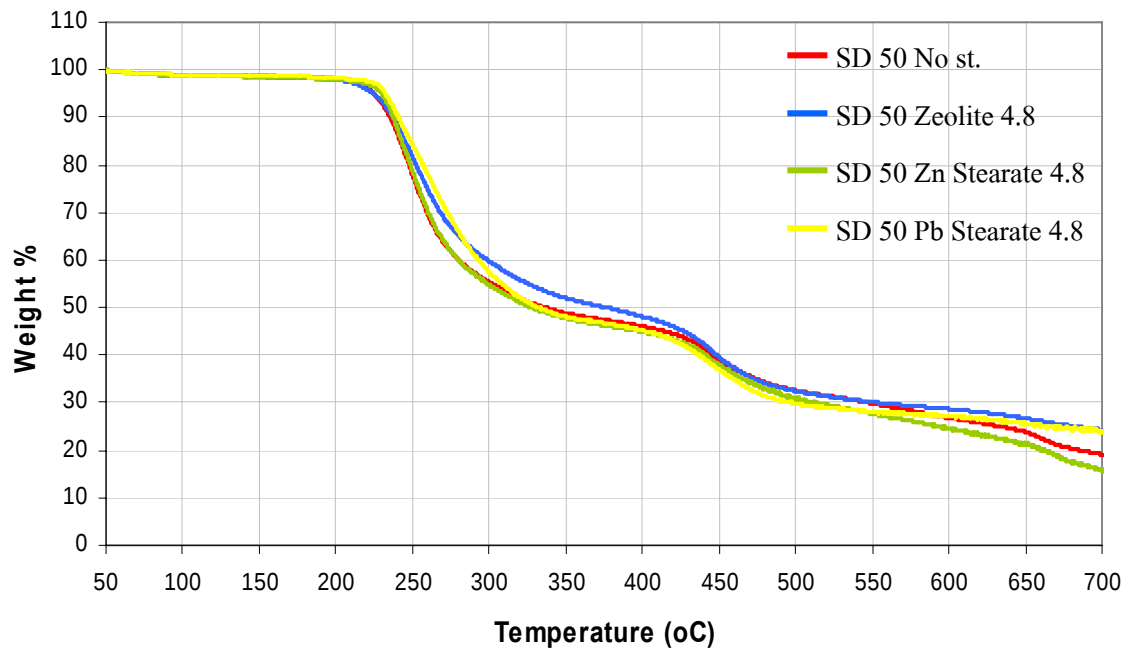
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ให้แก่งานของชั้นงานพีวีซี ที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน 2.4 phr



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ให้แก่งานพีวีซี ของชั้นงานพีวีซีที่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน 4.8 phr



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของชั้นงานพีวีซี ที่เติมผงซีลี้อยู่ 50 phr และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน 2.4 phr



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก กับ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของชั้นงานพีวีซี ที่เติมผงซีลี้อยู่ 50 phr และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน 4.8 phr

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงขี้เถ้าไม้ ณ น้ำหนักที่สูญเสียไป 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นงานทั้งหมด

Formula	Decomposition Temperature (°C) at 10% wt. loss	
	Sawdust 0 phr	Sawdust 50 phr
No Stabilizer	264	235
Zeolite 2.4	280	235
Zn Stearate 2.4	248	237
Pb Stearate 2.4	267	241
Zeolite 4.8	280	237
Zn Stearate 4.8	241	237
Pb Stearate 4.8	269	240

4.2 อิทธิพลของสารผสมซีโอไลต์ และสเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี

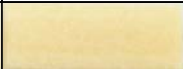
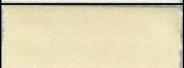
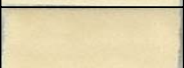
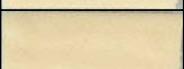
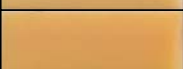
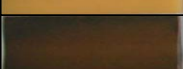
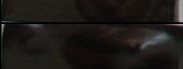
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

4.2.1.1 สีของชิ้นงานพีวีซี

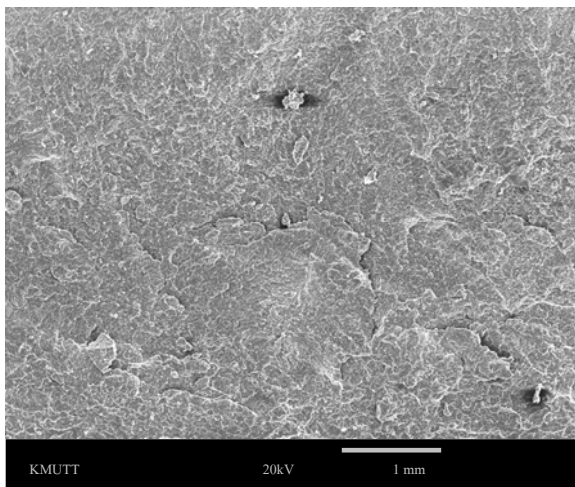
หลังจากการอบชิ้นงานพีวีซีที่ใช้ซีโอไลต์ร่วมกับสเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนในอัตราส่วน 0 : 4.8, 1.2 : 3.6, 2.4 : 2.4, 3.6 : 1.2 และ 4.8 : 0 phr ที่อุณหภูมิคงที่ 177 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 270 และ 360 นาที สีของชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมผงขี้เถ้าไม้แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า กรณีอัตราส่วนระหว่างซีโอไลต์ ต่อ สเตียเรทของสังกะสี คือ 0 : 4.8 phr ชิ้นงานเริ่มต้นมีสีขาว และเริ่มมีการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลทันที ที่เวลา 120 นาทีซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ González-Ortiz L. J. et al. (2005)[18] ที่พบว่า เมื่อสเตียเรทของสังกะสีทำปฏิกิริยากับพีวีซีทำให้เกิดซิงค์คลอไรด์ จนถึงปริมาณหนึ่งมีผลทำให้สีของชิ้นงานเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแบบทันทีทันใด กรณีอัตราส่วนระหว่างซีโอไลต์ ต่อ สเตียเรทของสังกะสี คือ 1.2 : 3.6, 2.4 : 2.4 และ 3.6 : 1.2 phr ชิ้นงานเริ่มต้นมีสีเหลือง และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาล ที่เวลา 120 , 180 และ 270 นาที ตามลำดับ และกรณีอัตราส่วนระหว่าง

ซีโอไลท์ ต่อ สเตียเรทของสังกะสี คือ 4.8 : 0 phr ชิ้นงานเริ่มต้นมีสีน้ำตาลอ่อน และมีสีเข้มขึ้นเมื่อเวลาในการอบเพิ่มขึ้น จากผลที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ซีโอไลท์ หรือ สเตียเรทของสังกะสีเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งมีผลทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน เกิดการเปลี่ยนสีของชิ้นงานเป็นสีน้ำตาลได้รวดเร็วกว่ากรณีการใช้ ซีโอไลท์ ร่วมกับสเตียเรทของสังกะสี และเมื่อพิจารณากรณีการใช้ซีโอไลท์ร่วมกับสเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน พบว่าเมื่อสัดส่วนของซีโอไลท์มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลทำให้สีของชิ้นงานพีวีซีเริ่มต้นมีสีเหลืองมากขึ้น แต่สามารถทนต่อความร้อนได้นานขึ้นก่อนที่จะชิ้นงานเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีน้ำตาล ทั้งนี้เนื่องมาจากซีโอไลท์สามารถจับโลหะคลอไรด์ได้ ดังนั้นซีโอไลท์จึงสามารถเข้าจับซิงค์คลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง สเตียเรทของสังกะสีกับพีวีซี และกรดไฮโดรคลอริก และเมื่อปริมาณของซิงค์คลอไรด์ซึ่งมีส่วนที่เข้าไปเร่งปฏิกิริยาอันซิป (unzip) ของพลาสติกพีวีซีมีปริมาณลดลง จึงมีผลทำให้สีของชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลได้ช้าลงตามด้วย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการใช้ซีโอไลท์ในการปรับปรุงการทำงานของสเตียเรทของสังกะสี ในช่วงแรกของการได้รับความร้อน การเติมซีโอไลท์ ปริมาณมากขึ้น มีผลทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อได้รับความร้อนไปได้ระยะเวลาหนึ่งพบว่าซีโอไลท์มีส่วนช่วยทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้ช้าลงเนื่องจากซีโอไลท์สามารถจับซิงค์คลอไรด์

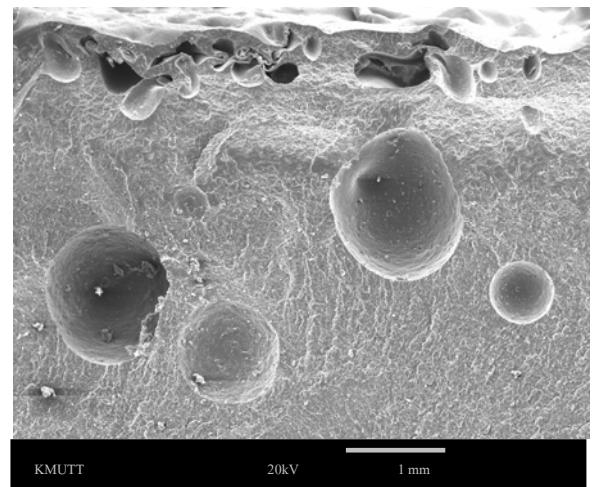
ตารางที่ 4.5 สีของชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมผงซีลี้อยู่ และเติมซีโอไลท์และสเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนซึ่งไม่เติมผงซีลี้อยู่ภายหลังการอบที่ 177 องศาเซลเซียส

Aging time (min)	Zeolite : Zn stearate (phr:phr)				
	0 : 4.8	1.2 : 3.6	2.4 : 2.4	3.6 : 1.2	4.8 : 0
0					
30					
45					
60					
90					
120					
180					
270					
360					

สำหรับลักษณะภายในของชิ้นงานพีวีซีพบว่าชิ้นงานพีวีซีสูตรที่มีการเติมซีโอไลท์ ปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้มีฟองอากาศอยู่ภายในชิ้นงานปริมาณมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 ชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ และสเตียเรทของสังกะสี ในปริมาณ 3.6 : 1.2 phr จะมีฟองอากาศภายในชิ้นงานมากกว่ากรณีชิ้นงาน ที่เติมซีโอไลท์และสเตียเรทของสังกะสีปริมาณ 2.4:2.4 phr ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีของซีโอไลท์ที่มีโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนประกอบ ในส่วนของชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงขี้เถ้าไผ่ก่อนและหลังการอบมีสีใกล้เคียงกันเนื่องจากผงขี้เถ้าไผ่ที่มีสีน้ำตาลจึงไม่ได้นำมาเสนอในหัวข้อสีของชิ้นงานตัวอย่างนี้



(a)



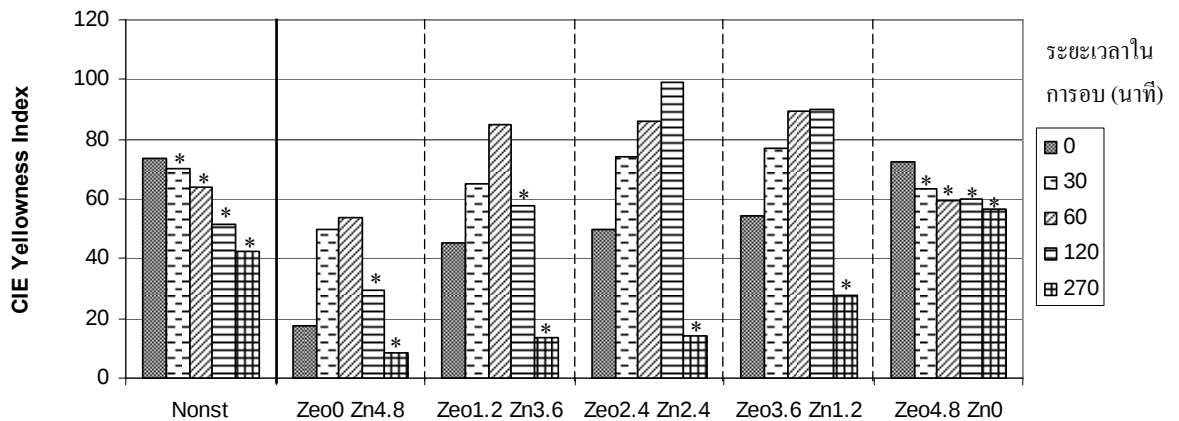
(b)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ และสเตียเรทของสังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนอัตราส่วนซีโอไลท์ต่อสเตียเรทของสังกะสี (a) 2.4 : 2.4 phr และ (b) 3.6 : 1.2 phr

4.2.1.2 ดัชนีความเหลือง

หลังจากนำชิ้นงานพีวีซีที่ใช้ซีโอไลท์ และสเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนในอัตราส่วน 0 : 4.8, 1.2 : 3.6, 2.4 : 2.4, 3.6 : 1.2 และ 4.8 : 0 phr มาอบที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 30, 60, 120 และ 270 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าดัชนีความเหลือง (CIE Yellowness Index) มีผลแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์เพียงชนิดเดียวมีค่าดัชนีความเหลืองลดลงเมื่อเวลาในการอบนานขึ้น เนื่องจากชิ้นงานพีวีซีเปลี่ยนจากเจดสีเหลืองเข้มขึ้นจนกลายเป็นสีน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อน และสีน้ำตาลจัดเป็นเจดสีที่เป็นสีแดง ในส่วนของชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเตียเรทของสังกะสี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีค่าดัชนีความเหลืองเปลี่ยนแปลงเป็น 2

ช่วง ในช่วงแรกค่าดัชนีความเหลืองมีค่าเพิ่มมากขึ้น และมีค่าลดลงในช่วงหลัง เนื่องจากในช่วงแรก ชิ้นงานเปลี่ยนจากเคลสีขาวจนเป็นสีเหลือง และในช่วงที่สองเปลี่ยนจากเคลสีเหลืองเข้มขึ้นจนเป็นสี น้ำตาล ชิ้นงานพีวีซีที่มีอัตราส่วนซีโอไลท์ต่อเสถียรของสังกะสี 1.2:3.6, 2.4:2.4 และ 3.6:1.2 phr มีค่าดัชนีความเหลืองลดลงเมื่ออบชิ้นงานผ่านไปเป็นเวลา 120 , 270 และ 270 นาที ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของสีชิ้นงานตัวอย่างที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1.1



รูปที่ 4.9 ผลของการใช้ซีโอไลท์ ร่วมกับเสถียรของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อค่าดัชนีความเหลืองของชิ้นงานพีวีซีที่อบ ณ อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส (* ชิ้นงานพีวีซีเป็นสีน้ำตาล)

ตารางที่ 4.6 ค่า Hue ของชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับเสถียรของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนทั้งสามชนิดซึ่งไม่เติมผงซีลี้อยู่ ณ เวลาการอบต่างๆที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

Formula	Hue value at vary time in oven (min)				
	0	30	60	120	270
No stabilizer	2.5YR 5.6/5.1	0.1YR 4.3/3.5	9.8R 3.9/3.7	9.7R 3.4/3.3	7.7R 2.8/1.7
Zeo0 Zn4.8	9.5Y 8.2/0.7	1.8Y 8.2/3.3	0.6Y 8.0/3.6	3.1GY 4.4/1.5	4.9YR 2.4/0.2
Zeo1.2 Zn3.6	5.6Y 7.8/2.8	9.6YR 7.1/5.1	8.1YR 6.5/5.7	3.2YR 3.5/2.1	9.1R 2.7/0.2
Zeo2.4 Zn2.4	4.9Y 7.6/3.1	1.0Y 7.4/4.4	7.4YR 6.6/6.0	7.2YR 5.8/6.6	3.2R 2.7/0.4
Zeo3.6 Zn1.2	4.0Y 7.7/3.6	7.0YR 6.9/5.4	5.4YR 6.3/5.9	4.7YR 5.5/6.4	8.3R 2.6/0.9
Zeo4.8 Zn0	5.5YR 7.6/3.3	3.0YR 6.5/3.3	2.4YR 6.1/3.6	2.3YR 4.7/3.6	1.4YR 2.4/0.3

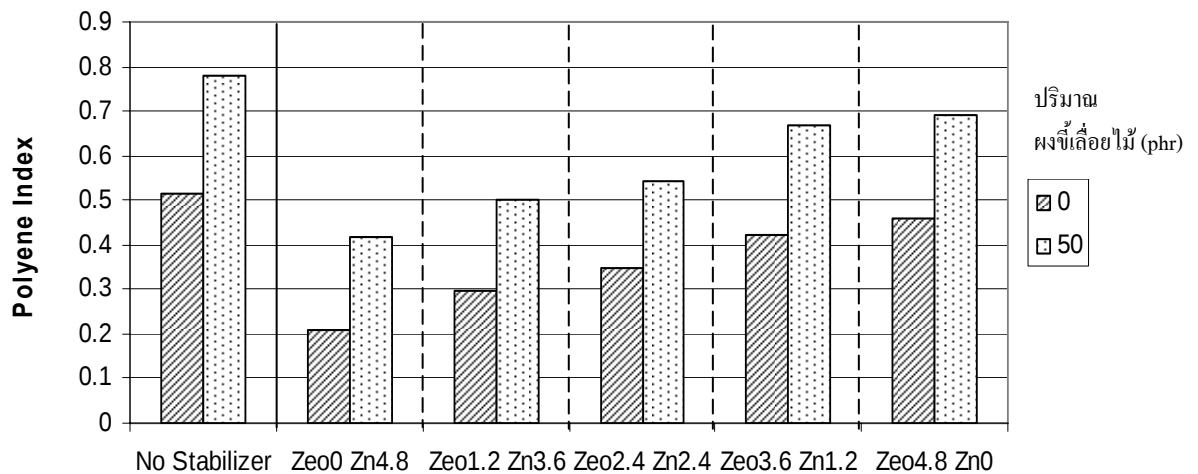
จากตารางที่ 4.6 ชี้นงานที่ไม่ได้มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนเริ่มต้นมีสีเหลือง-แดง (YR) เปลี่ยนเป็นสีแดง(R) ที่เวลา 60 นาที กรณีชี้นงานที่เดิมสเดียเรทของสังกะสีในปริมาณ 4.8 phr เริ่มต้นมีเจดสีเหลือง(Y) และเปลี่ยนเป็นเจดสีเขียวเหลือง(GY) ที่ระยะเวลาการอบ 120 นาที ซึ่งที่เวลาการอบ 270 นาที นั้นจึงเปลี่ยนเป็นเจดสีเหลือง-แดง(YR) ในกรณีชี้นงานที่เดิมซีโอไลท์ 4.8 phr นั้นก่อนผ่านการอบมีเจดสีเหลือง-แดง(YR) เช่นเดียวกันกับชี้นงานตัวอย่างที่ไม่ได้มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และที่เวลาการอบนานมากขึ้นยังส่งผลให้มีเจดสีเหลือง-แดง(YR) เพิ่มมากขึ้น และกรณีที่เดิมซีโอไลท์ ร่วมกับสเดียเรทของสังกะสีพบว่า ที่อัตราส่วน 1.2 : 3.6 ก่อนการอบมีเจดสีเหลือง(Y) เมื่ออบไปแล้ว 30 นาทีเปลี่ยนเป็นเจดสีเหลือง-แดง(YR) และเปลี่ยนเป็นเจดสีแดงที่เวลา 270 นาที เช่นเดียวกับที่อัตราส่วน 3.6 : 1.2 และที่อัตราส่วน 2.4 : 2.4 ก่อนการอบมีเจดสีเหลือง(Y) เมื่ออบไปแล้ว 60 นาทีเปลี่ยนเป็นเจดสีเหลือง-แดง(YR) และเปลี่ยนเป็นเจดสีแดงที่เวลา 270 นาที พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า Hue ของชี้นงานตัวอย่างต่างๆ เมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้สีของชี้นงานตัวอย่างเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับค่าดัชนีความเหลืองซึ่งกล่าวไว้ข้างต้น

4.2.2 ลักษณะทางเคมี

4.2.2.1 ปริมาณหมู่พอลิอิน

รูปที่ 4.10 แสดงค่าพอลิอินของชี้นงานพีวีซี และชี้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ 50 phr ทั้งกรณีไม่ได้มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน และกรณีที่เดิมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนในอัตราส่วน 0:4.8, 1.2:3.6, 2.4:2.4, 3.6:1.2 และ 4.8:0 phr เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณหมู่พอลิอินของชี้นงานพีวีซีที่ไม่ได้มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน กับ ชี้นงานพีวีซีที่ใช้ซีโอไลท์ร่วมกับสเดียเรทของสังกะสี พบว่า ชี้นงานพีวีซีที่ไม่ได้มีสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีค่าปริมาณหมู่พอลิอินสูงกว่าชี้นงานพีวีซีที่ใช้ซีโอไลท์ร่วมกับสเดียเรทของสังกะสี ทั้งกรณีชี้นงานพีวีซี และชี้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ 50 phr และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนซีโอไลท์ต่อสเดียเรทของสังกะสีอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการเติมซีโอไลท์ปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ชี้นงานพีวีซี และชี้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ 50 phr มีปริมาณพอลิอินมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่พบในหัวข้อ 4.1.2.1 ซึ่งพบว่าสเดียเรทของสังกะสีมีประสิทธิภาพในการทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้ช้ากว่ากรณี การเติมซีโอไลท์ และผลที่ได้สอดคล้องกับการตรวจสอบสีของชี้นงานพีวีซี และค่าดัชนีความเหลือง ณ เวลาในการอบที่ 0 นาทีอีกด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการมีผงซีลี้อยู่ด้วยนั้น พบว่าการเติมผงซีลี้อยู่ลงในพีวีซีมีผลทำให้ปริมาณของพอลิอินเกิดมากขึ้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่มีใน

ผงซีลี้อยู่ไม่เหนียวทำให้ไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกจากพีวีซีได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างพอลิอินของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานพีวีซีที่มีผงซีลี้อยู่ 50 phr พบว่า ค่าความแตกต่างเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพซึ่งการใช้ สเตียเรทของสังกะสี 4.8 phr มีผลทำให้ค่าความแตกต่างพอลิอินของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานพีวีซีที่มีผงซีลี้อยู่ 50 phr ลดต่ำลงมากที่สุด ส่วนกรณีการใช้ซีโอไลต์ 4.8 phr มีค่าความแตกต่างของพอลิอินของชิ้นงานทั้ง 2 กรณีลดต่ำลงน้อยที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.1.2.1 ที่พบว่า การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพมีผลทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างพอลิอินของชิ้นงานพีวีซี และชิ้นงานพีวีซีที่มีผงซีลี้อยู่ 50 phr ลดต่ำลง โดยสเตียเรทของสังกะสี มีผลทำให้ค่าความแตกต่างของพอลิอินลดต่ำลงกว่ากรณีการใช้ซีโอไลต์



รูปที่ 4.10 ผลของชนิด และ ปริมาณของการเติมซีโอไลต์ และ สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่มีต่อค่าปริมาณหมู่พอลิอิน

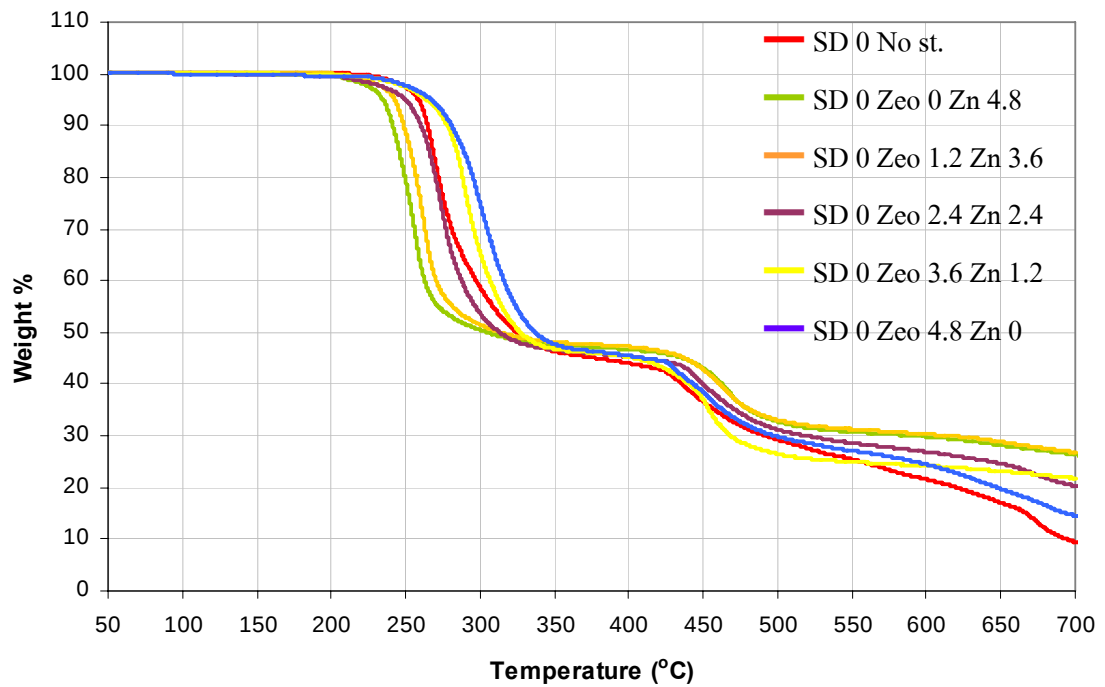
4.2.2.2 อุณหภูมิการสลายตัว

รูปที่ 4.11 แสดงกราฟ TGA ของชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมซีโอไลต์ และสเตียเรทของสังกะสี ณ อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสูตรที่เริ่มเกิดการสลายตัวเร็วที่สุด คือชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมสเตียเรทของสังกะสี 4.8 phr รองลงมาคือ ชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมซีโอไลต์ต่อสเตียเรทของสังกะสี 1.2 : 3.6 phr และ 2.4 : 2.4 phr ชิ้นงานพีวีซีที่ไม่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมซีโอไลต์ต่อสเตียเรทของสังกะสี 3.6 : 1.2 phr และ 4.8 : 0 phr ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.2.2 คือ กรณีชิ้นงานที่มีการเติมสเตียเรทของสังกะสีเพียงอย่างเดียว เกิดการสลายตัวเร็วที่สุดเนื่องจาก สเตียเรทของสังกะสีทำปฏิกิริยากับพีวีซี เกิดซิงค์คลอไรด์ ซึ่งไปเร่งทำให้พีวีซีเกิดการ

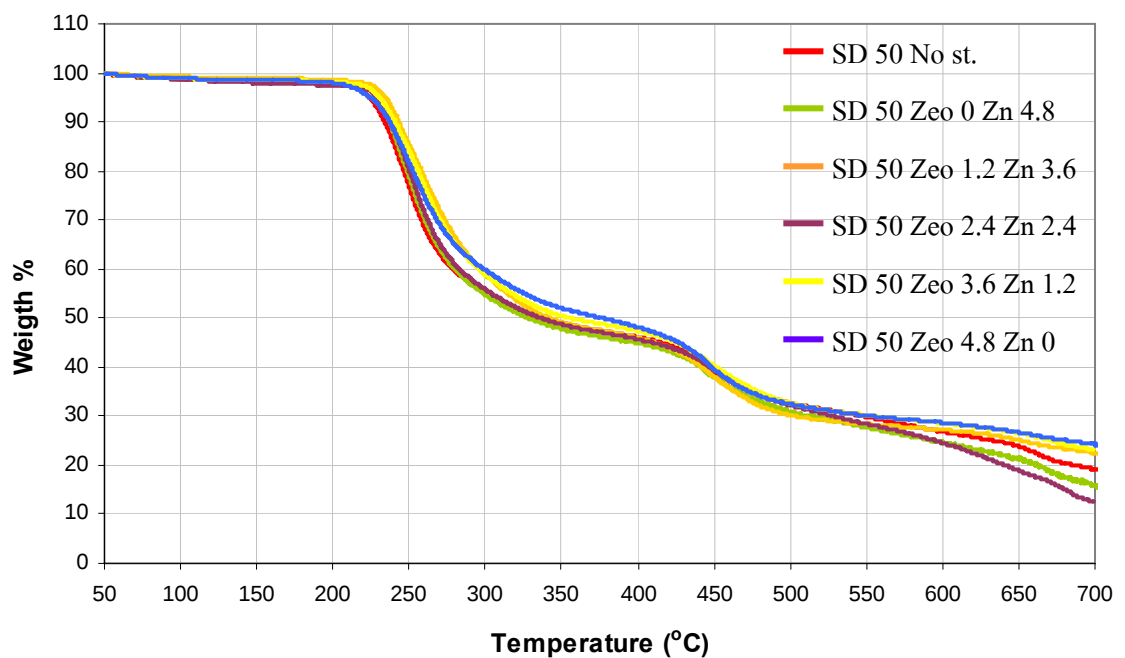
สลายตัวได้เร็วขึ้น แต่เมื่อขึ้นงานพีวีซีมีอัตราส่วนของซีโอไลท์มากขึ้น พบว่าขึ้นงานพีวีซีเริ่มมีแนวโน้มการสลายตัวเกิดได้ช้าลงเนื่องจากซีโอไลท์เข้าไปจับกับซิงค์คลอไรด์ จึงช่วยทำให้ซิงค์คลอไรด์มีปริมาณลดลง และซีโอไลท์เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งสามารถดูดซับความร้อนเอาไว้จึงส่งทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ TGA ของขึ้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ 50 phr กรณีที่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพซีโอไลท์ต่อสเต็มเรทของสังกะสีในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการสลายตัวของขึ้นงานของทุกสูตรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากการมีผงซีลี้อยู่ด้วยมีผลทำให้ ไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกจากพีวีซีได้ง่ายขึ้นประกอบกับการทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ไฮโดรเจนคลอไรด์มีปริมาณสูงซึ่งไฮโดรเจนคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้พีวีซีเกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น จึงทำให้การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพไม่สามารถเห็นผลได้ในการทดลองด้วยเทคนิค TGA ในส่วนของ ตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของขึ้นงานพีวีซี และขึ้นงานพีวีซีที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ 50 phr กรณีที่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพซีโอไลท์ต่อ สเต็มเรทของสังกะสีในอัตราส่วนต่างๆ โดยค่าอุณหภูมิการสลายตัวได้มาจากกราฟ TGA ณ น้ำหนักที่สูญเสียไป 10 เปอร์เซนต์ ของน้ำหนักขึ้นงานทั้งหมด พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของขึ้นงาน มีแนวโน้มสอดคล้องกับรูปที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวของขึ้นงานตัวอย่างที่เติมและไม่เติมผงซีลี้อยู่

Formula	Decomposition Temperature (°C) at 10% wt. loss	
	Sawdust 0 phr	Sawdust 50 phr
No Stabilizer	264	235
Zeo0 Zn4.8	241	237
Zeo1.2 Zn3.6	248	242
Zeo2.4 Zn2.4	260	238
Zeo3.6 Zn1.2	278	240
Zeo4.8 Zn0	280	237



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานพีวีซีกรณีที่มีการเติมซีโอไลต์ และสเต็มเรทของสังกะสีในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานพีวีซีกรณีที่มีการเติมผงซีโอไลต์ 50 phr และซีโอไลต์ และสเต็มเรทของสังกะสีในอัตราส่วนต่างๆ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 อิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี

5.1.1 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดลองพบว่า การใช้สเตียเรทของตะกั่ว สเตียเรทของสังกะสี และซีโอไลต์ในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยู่ไม่สามารถช่วยในการปรับปรุงการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ โดยการเติมสเตียเรทของตะกั่วมีเสถียรภาพทางความร้อนดีที่สุด รองลงมาคือ สเตียเรทของสังกะสี และซีโอไลต์ ตามลำดับ สังเกตได้จากค่าดัชนีความเหลือง อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบ และปริมาณหมู่พอลิอิน ซึ่งสเตียเรทของตะกั่วมีค่าดัชนีความเหลืองต่ำที่สุด มีปริมาณหมู่พอลิอินที่น้อยกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดอื่นๆ และมีอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีที่ช้าที่สุด โดยเมื่อเติมสเตียเรทของตะกั่วในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีลดลง ในส่วนของซีโอไลต์นั้นเมื่อเติมในปริมาณมากขึ้นก็ส่งผลให้อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีลดลงด้วยเช่นกัน แต่ซีโอไลต์ที่มากขึ้นนี้เองที่ส่งผลให้เกิดรูพรุนที่มากขึ้น ในส่วนของสเตียเรทของสังกะสีนั้นเมื่อการเติมในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบเพิ่มขึ้นด้วย สังเกตได้จากอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบที่เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณจาก 2.4 phr เป็น 4.8 phr และเมื่อเติมซีลี้อยู่ลงในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยู่ไม่ ส่งผลให้ปริมาณหมู่พอลิอินในส่วนของพอลิไวนิลคลอไรด์เพิ่มขึ้นด้วย

5.1.2 สมบัติทางความร้อน

จากผลการทดลองพบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้สเตียเรทของสังกะสีเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้สเตียเรทของตะกั่ว และซีโอไลต์ตามลำดับ และการเติมผงซีลี้อยู่ของวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยู่ไม่ นั้นส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลง โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนทั้งสามชนิดให้อุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกัน

5.2 อิทธิพลของสารผสมซีโอไลท์ และ สเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี

5.2.1 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดลองพบว่า การใช้สเตียเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลท์ ส่งผลให้สีในขั้นเริ่มต้น (Initial color) ของพอลิไวนิลคลอไรด์น้อยกว่าการใช้สเตียเรทของตะกั่ว หรือใช้สเตียเรทของสังกะสี แต่ดีกว่าการใช้ซีโอไลท์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้สเตียเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลท์ส่งผลให้วัสดุผสมมีสีเหลืองก่อนการอบ มีค่าดัชนีความเหลือง และปริมาณหมู่พอลิอินสูงกว่าการใช้สเตียเรทของสังกะสี หรือการใช้สเตียเรทของตะกั่วเพียงอย่างเดียว แต่การใช้สเตียเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลท์ ในวัสดุผสมนั้นสามารถช่วยลดอัตราเร็วในการเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี สังเกตได้จากอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบที่ช้าลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลท์มากยิ่งขึ้นยิ่งส่งผลให้อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบช้าลง ซึ่งการใช้สเตียเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลท์ที่อัตราส่วน 1:1 (2.4:2.4 phr) จะให้ผลดีที่สุด เนื่องจากการใช้ซีโอไลท์ในปริมาณที่มากกว่า 2.4 phr ทำให้เกิดรูพรองขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง และเมื่อเติมซีลี้อยลงในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้ ส่งผลให้ปริมาณหมู่พอลิอินในส่วน of พอลิไวนิลคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อ 5.1.1 ในส่วนของผลของการเติมผงซีลี้อยไม้

5.2.2 สมบัติทางความร้อน

จากผลการทดลองพบว่า การใช้สเตียเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลท์ในพอลิไวนิลคลอไรด์ นั้นส่งผลโดยเมื่อปริมาณของซีโอไลท์เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวยิ่งเพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อใช้สเตียเรทของสังกะสี ร่วมกับซีโอไลท์ในวัสดุผสมพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงซีลี้อยไม้ ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวต่ำลง

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ควรศึกษาผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานตัวอย่าง
- 5.3.2 ศึกษาวัสดุผสมพลาสติกซีลี้อยไม้ กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ และสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อนชนิดอื่นๆที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

1. Gächter, R., Müller H., and Klemchuk, P.P., 1990, **Plastics Additives handbook : stabilizers, processing aids, colorants for thermoplastics**, Hanser, Munich, pp. 271-323.
2. Musashino create Co., Ltd., [Online], Available :
<http://www.vec.gr.jp/english/library/contents2.html> [1998, May 26]
3. Titow, W.V., 1990, **PVC Plastics : Properties, Processing and Applications**, Elsevier Applied Science, New York, pp.3-174.
4. Bacalogulu, R.,PVC Stabilizers [Online], Available :
<http://www.kunststoffweb.de/bookshop/pdfs/45019lp.pdf> [2007, March 15]
5. Troitskii, B.B. and Troitskaya, L.S., 1999, “Degenerated branching of chain in poly(vinyl chloride) thermal degradation”, **European Polymer Journal**, Vol. 35, pp.2215-2224.
6. สุนี ลาวัณยากุล, 2536, “ซีโอไลต์”,วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, เล่ม 131 ,หน้า 28-30
7. PQ Corporation, Advera[®] Specialty Zeolites [Online], Available :
<http://www.pqcorp.com/literature/AdveraZC111.pdf> [2005, January 15]
8. Edenbaum, J., 1992, **Plastics Additives and Modifiers Handbook**, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 272-296, 327-337.
9. Amar, K., Manjusri, M. and Lawrence, T., 2005, **Natural Fibers, Biopolymer, and Biocomposites**, Taylor and Francis Group, New York, pp.1-37, 347-361.
10. แม้น อมรสิทธิ์, 2547, **วัสดุวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ, หน้า 538 – 545.

11. บุญรักษา กาญจนวรรณิชย์ [Online], Available :
http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool50.html [2549, ตุลาคม 2]
12. Manzoor, W., Yousaf, S. M. and Ahmad, Z., 1996, "Degradation of PVC: Effect of zinc chloride on the concentration of polyenes", **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 51, pp. 295-299.
13. İsmet Gökçel, H., Balköse, D. and Köktürk, U., 1999, "Effects of mixed metal stearates on thermal stability of rigid PVC", **European Polymer Journal.**, Vol. 35, pp. 1501-1508.
14. Balköse, D., Gökçel, H.I. and Göktepe S.E., 2001, "Synergism of Ca/Zn soaps in poly(vinyl chloride) thermal stability", **European Polymer Journal.**, Vol. 37, pp. 1191-1197.
15. Benaniba, M.T., Belhaneche-Bensemra, N. and Gelbard, G., 2001, "Stabilizing effect of epoxidized sunflower oil on the thermal degradation of poly(vinyl chloride)", **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 47, pp. 501-505.
16. Beneniba, M.T., Belhaneche-Bensemra, N. and Gelbard, G., 2003, "Stabilization of PVC by epoxidized sunflower oil in the presence of zinc and calcium stearates", **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 82, pp. 245-249.
17. Kalouskova, R., Novotna, M. and Vymazal, Z., 2004, "Investigation of thermal stabilization of poly(vinyl chloride) by lead stearate and its combination with synthetic hydrotalcite", **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 85, pp. 903-909.
18. González-Ortiz, L. J., Arellano, M., Jasso, C.F., Mendizábal, E. and Sánchez-Peña, M.J., 2005, "Thermal stability of plasticized poly(vinyl chloride) compounds stabilized with pre-heated mixtures of calcium and/or zinc stearates", **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 90, pp. 154-161.

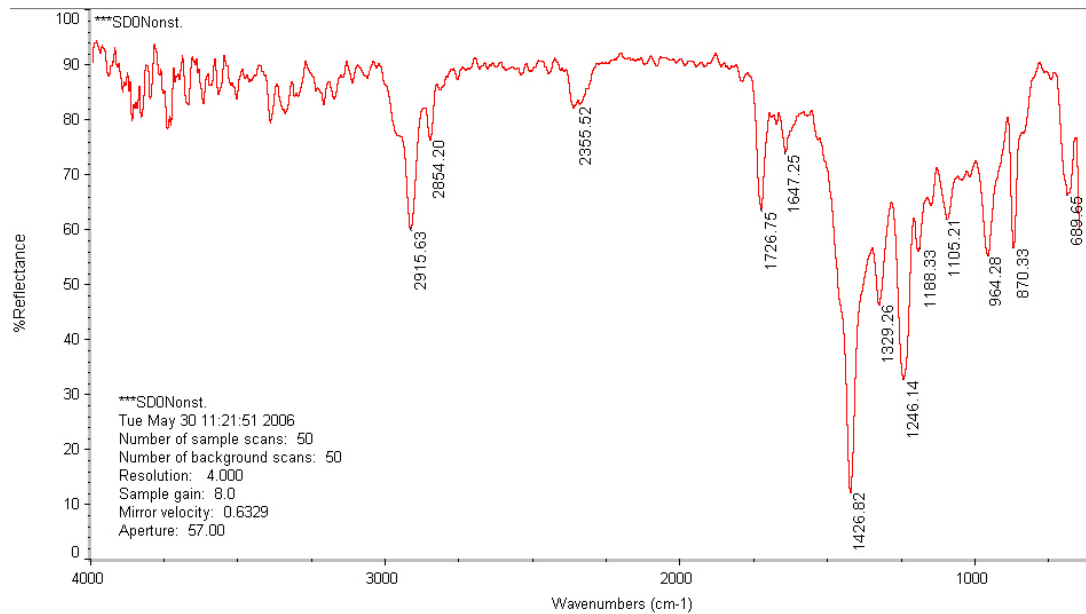
19. Atakul, S., Balköse, D and Ülkü, S., 2005, “Synergistic Effect of Metal Soaps and Natural Zeolite on poly(vinyl chloride) Thermal Stability”, **Journal of Vinyl and Additive Technology.**, Vol. 35, pp. 47-56.
20. Karayildirim, T., Yanik, J., Yuksel, M., Saglam, M., Vasile, C. and Bockhorn, H., 2006, “The effect of some fillers on PVC degradation”, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.**, Vol. 75, pp. 112-119.
21. Starnes Jr W. H., Du B., Kim S., Vadim G.Z., Xianlong G. and Elizabeth K. C., 2006, “Thermal stabilization and plasticization of poly(vinyl chloride) by ester thiols: Update and current status”, **Thermochimica Acta.**, Vol. 442, pp. 78-80.
22. Wang, M., Xu, J., Wu, H. and Guo, S., 2006, “Effect of pentaerythritol and organic tin with calcium/zinc stearates on the stabilization of poly(vinyl chloride)”, **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 91, pp. 2101-2109.
23. Steenwijk J., Daan S., Jacco van H., John W.G. and Leonardus W.J., 2006, “The effect of (natural) polyols on the initial colour of heavy metal- and zinc-free poly(vinyl chloride)”, **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 91, pp. 2233-2240.
24. Steenwijk J., Langerock R., Daan S. van E., Jacco van H., Geus J.W. and Jenneskens L.W., 2006, “Long-term heat stabilisation by (natural) polyols in heavy metal- and zinc- free poly(vinyl chloride)”, **Polymer Degradation and Stability.**, Vol. 91, pp.52-59.
25. The American Society for Testing and Materials “Standard Practice for Oven Heat Stability of Poly(Vinyl Chloride) Compositions ASTM”, **An American National Standard**, D2115-92, pp.506-508.
26. Sombatsompop, N. and Sungsanit, K., 2003, “Structural Changes and Mechanical Performance of Recycled Poly(vinyl chloride) Bottles Exposed to Ultraviolet Light at 313 nm”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 92, pp. 84–94.

27. Sombatsompop, N. and Sungsanit, K., 2004, "Structural Changes of PVC in PVC/LDPE Melt-Blends: Effects of LDPE Content and Number of Extrusions", **Polymer Engineering and Science.**, Vol. 44, pp. 487-495.
28. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, "Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites", **Polymer International**, Vol. 52, pp. 1847-1855.
29. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of moisture content on mechanical properties, thermal and structural stability and extrudate texture of Poly(vinyl chloride/wood sawdust composites)", **Polymer International**, Vol. 53, pp. 1210-1218.

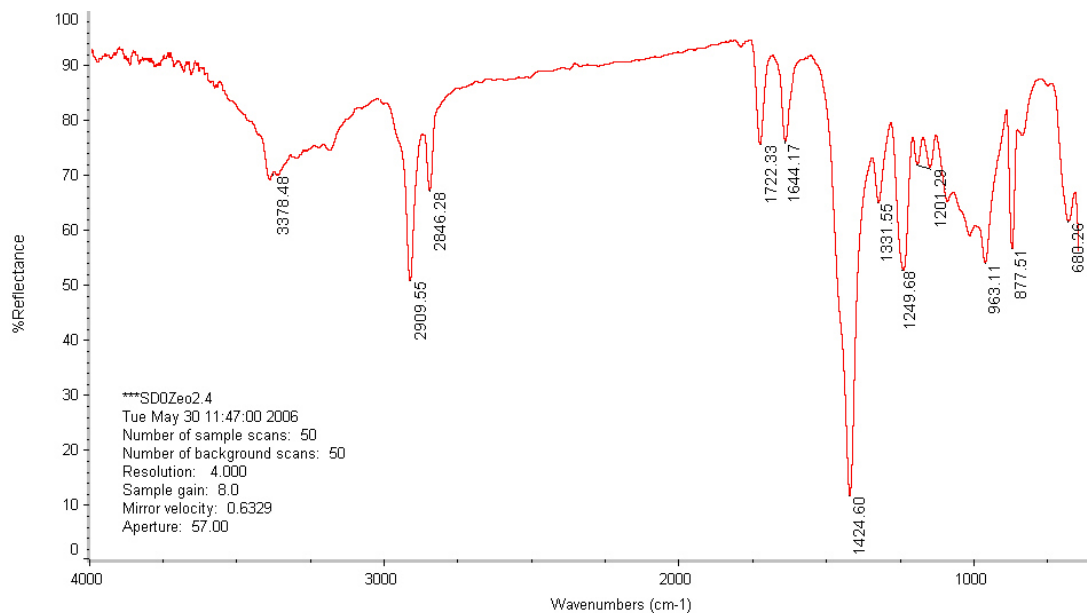
ภาคผนวก ก

**การศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน
ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี**

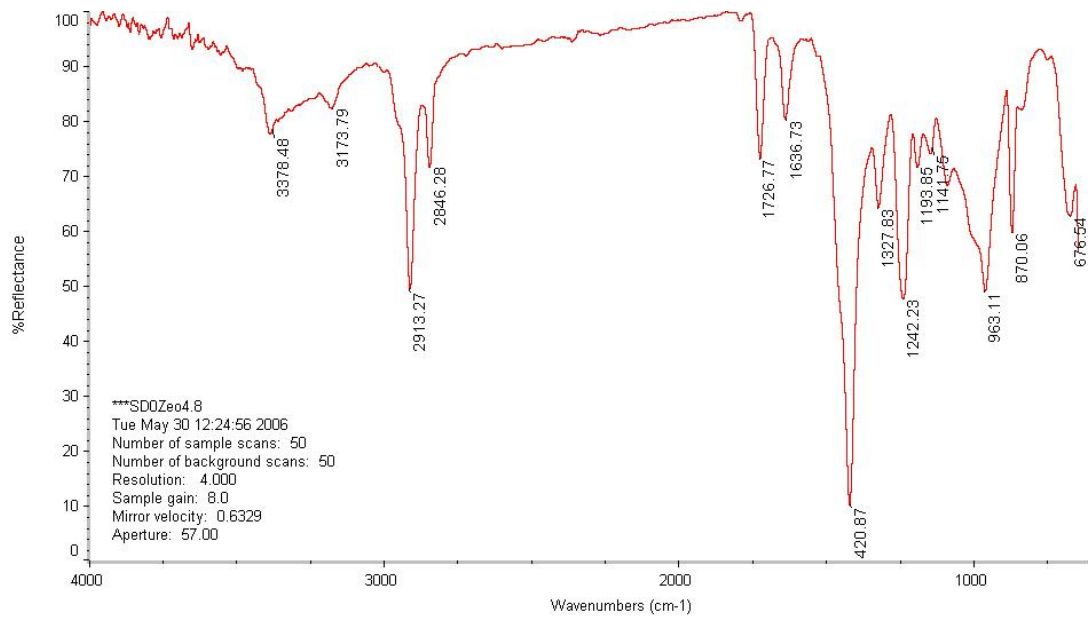
- ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณหมู่พอลิอินจากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR



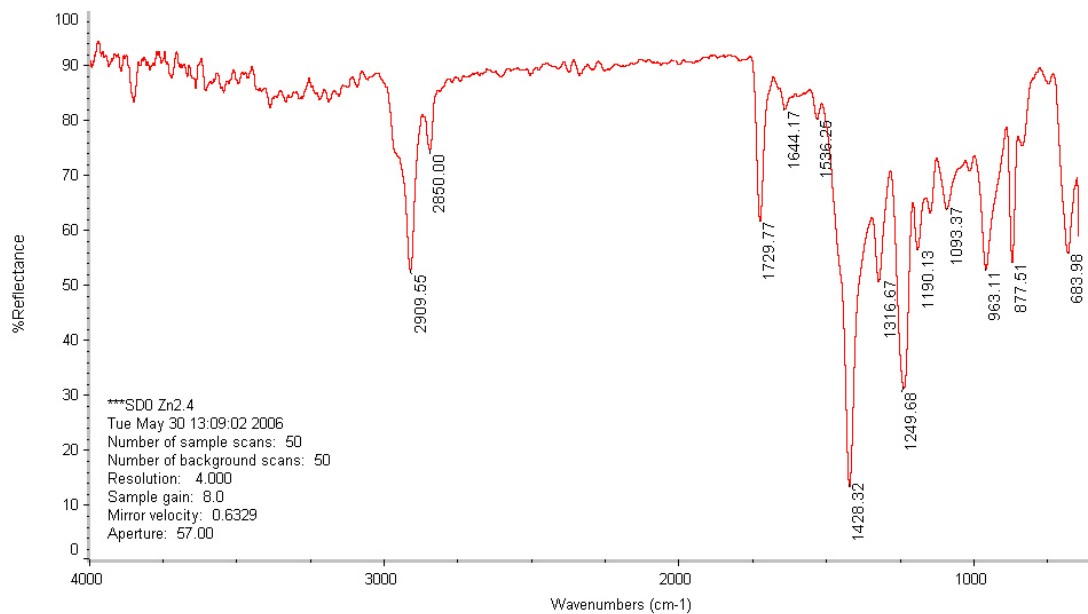
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่ไม่เติมสาร
ป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน



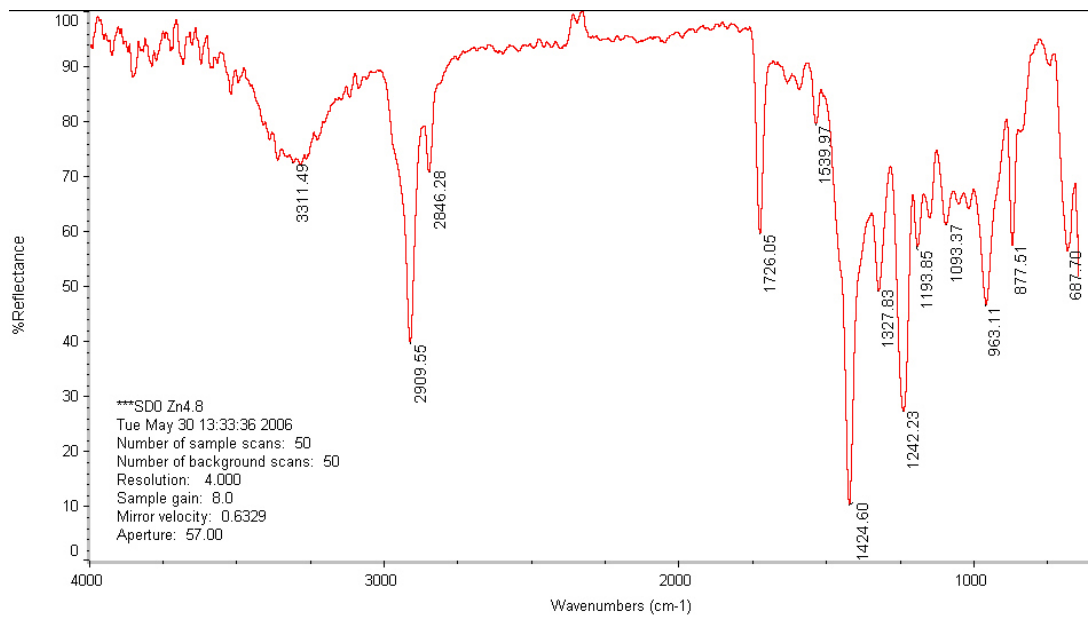
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์
2.4 phr



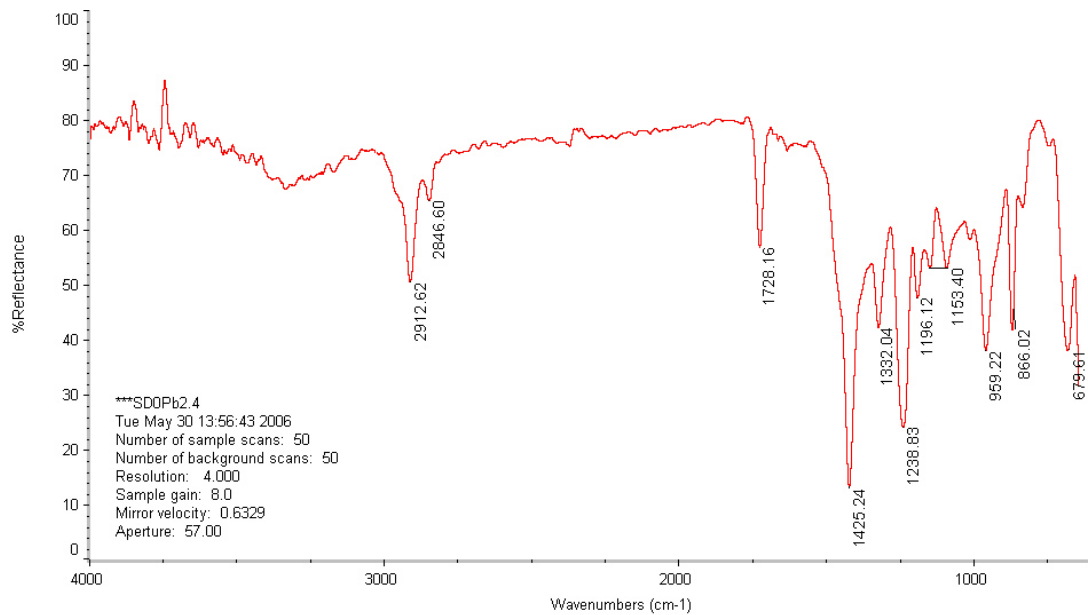
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เติมซีโอไลท์ 4.8 phr



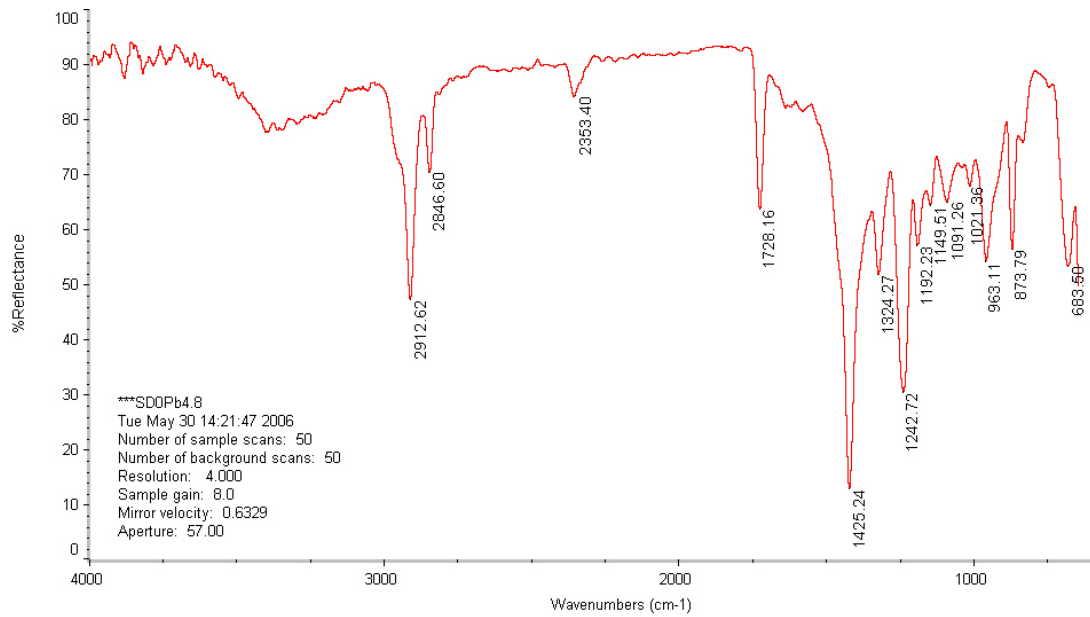
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เติม สเตียเรทของสังกะสี 2.4 phr



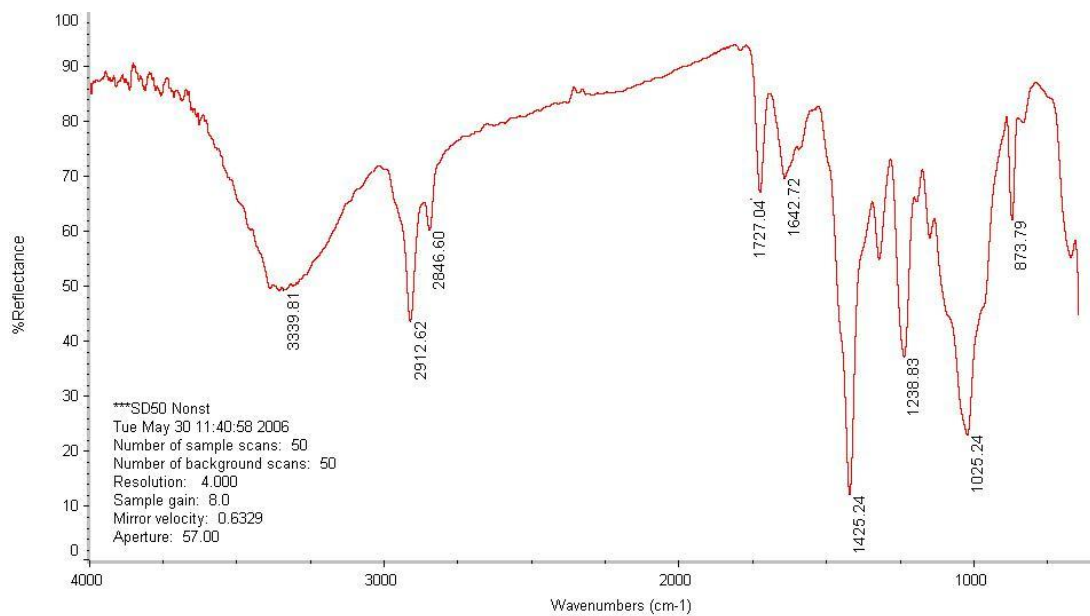
รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เดิม
สเต็มเรทของสังกะสี 4.8 phr



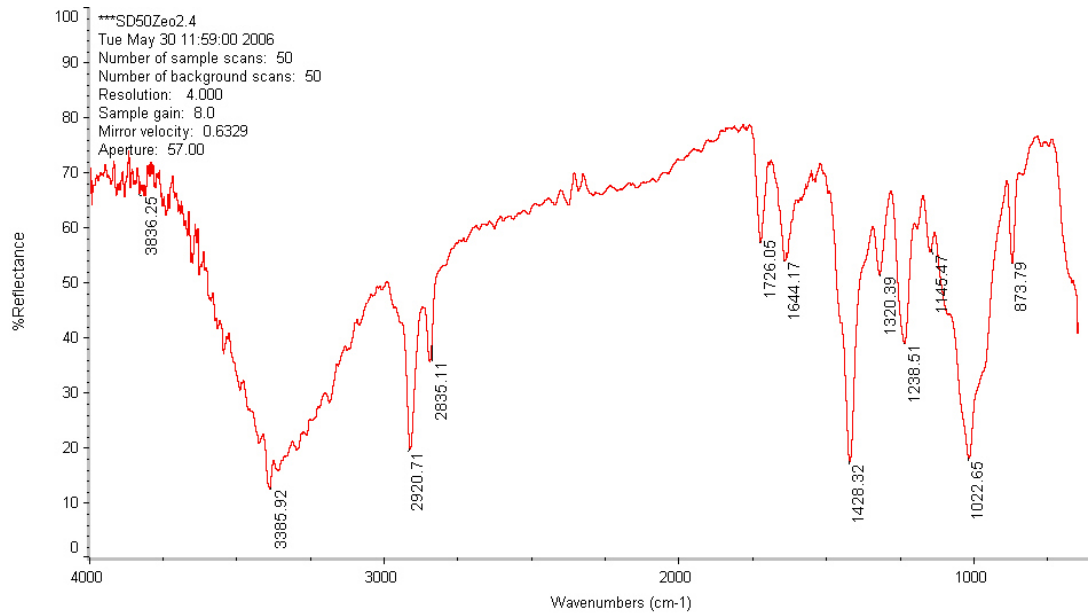
รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เดิม
สเต็มเรทของตะกั่ว 2.4 phr



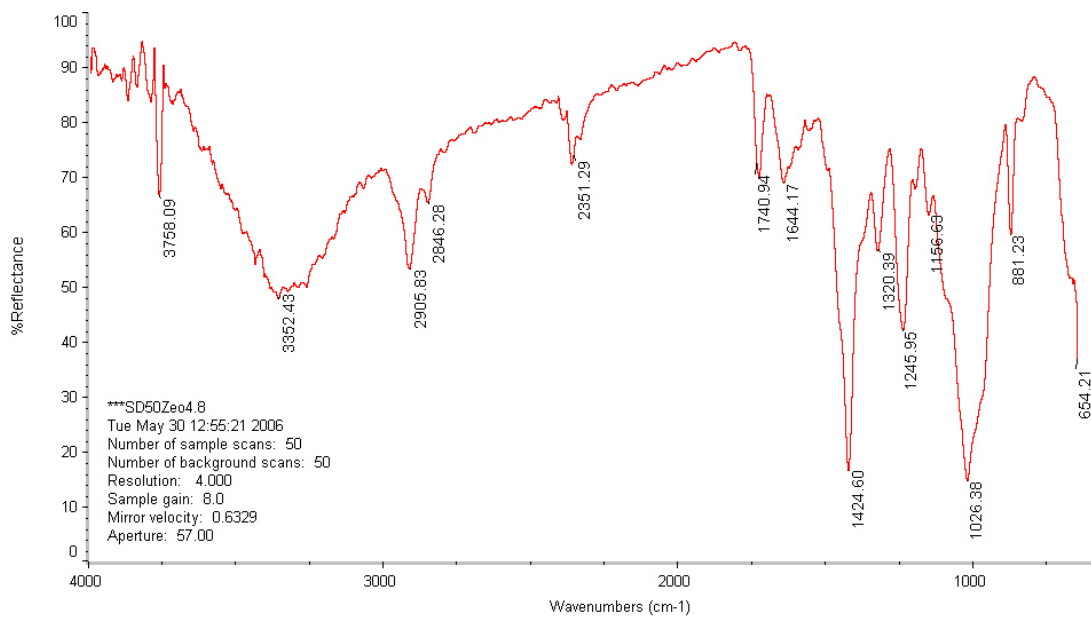
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เดิม
สเต็มเรทของตะกั่ว 4.8 phr



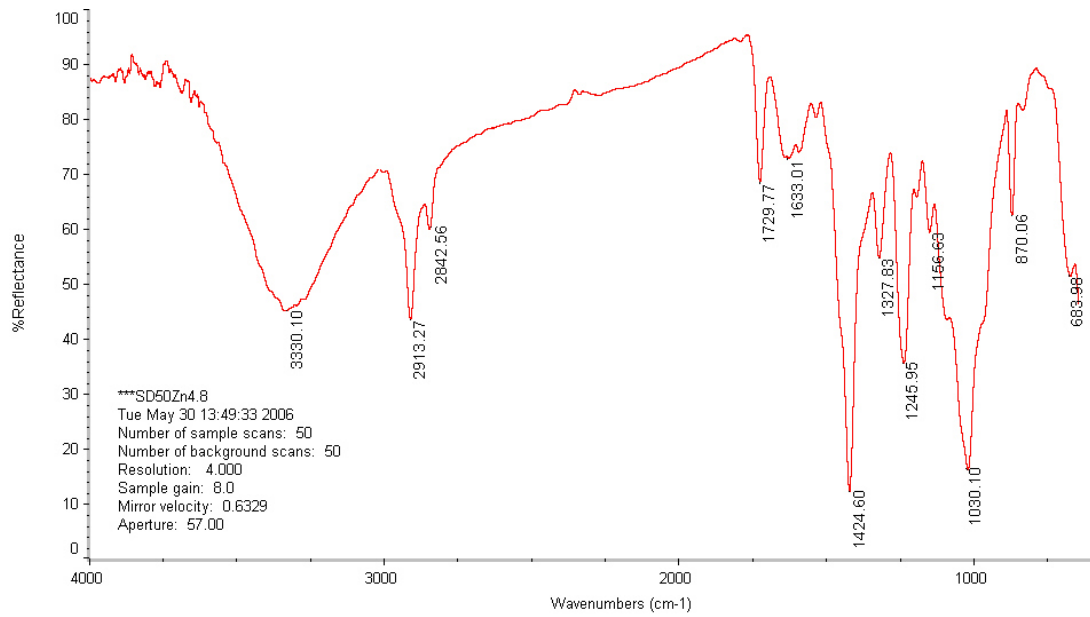
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เถ้า
ไม้ ที่ไม่เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน



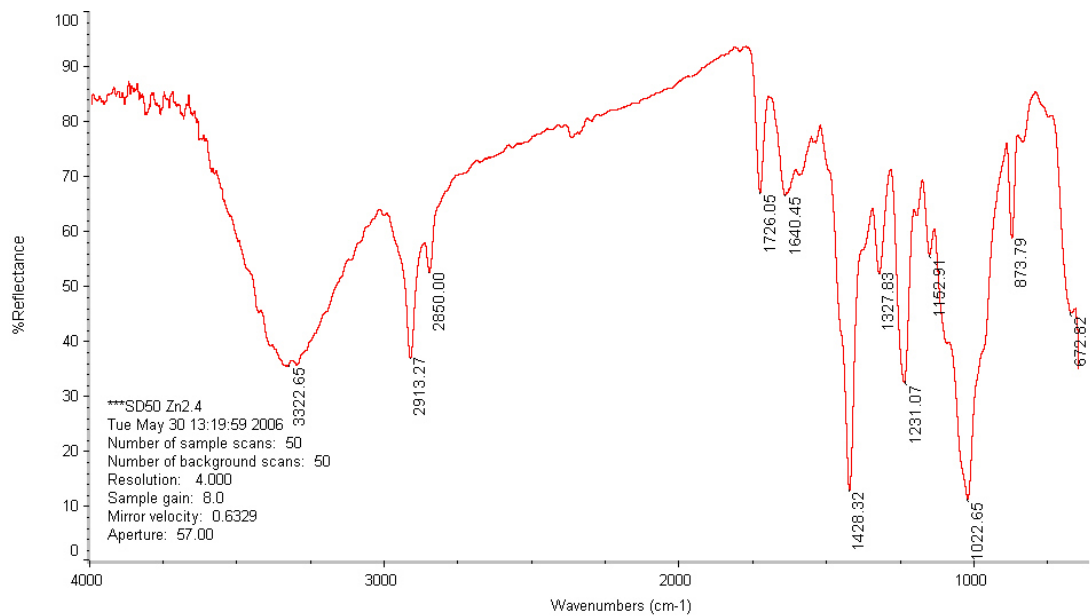
รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมซีโอโลท 2.4 phr



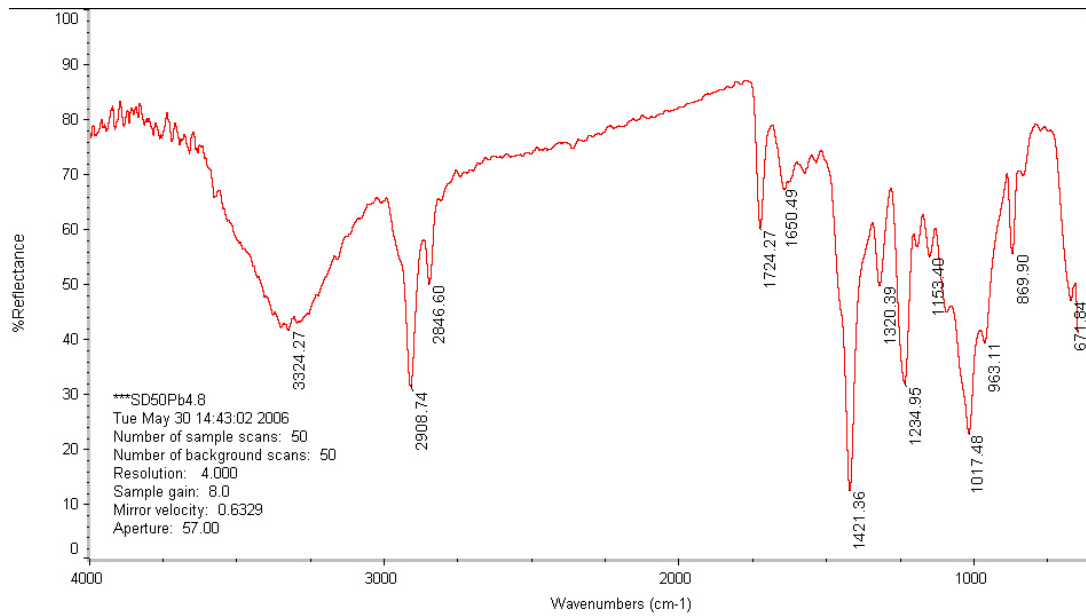
รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมซีโอโลท 4.8 phr



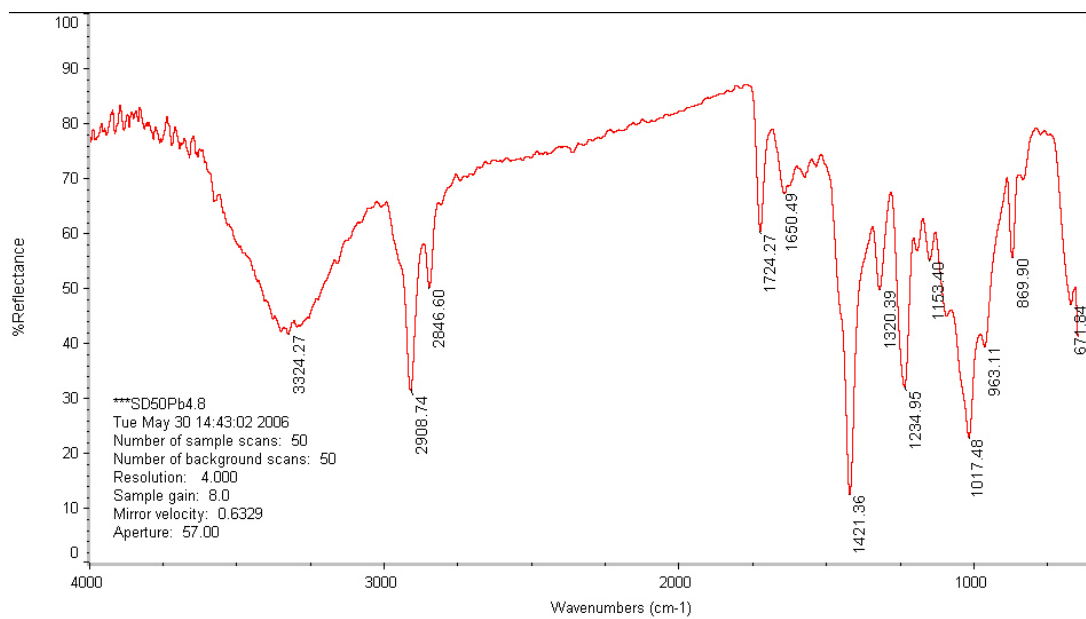
รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานฟิวซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมสเต็มเรทของสังกะสี 2.4 phr



รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานฟิวซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมสเต็มเรทของสังกะสี 4.8 phr



รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมสเต็มเรทของตะกั่ว 2.4 phr

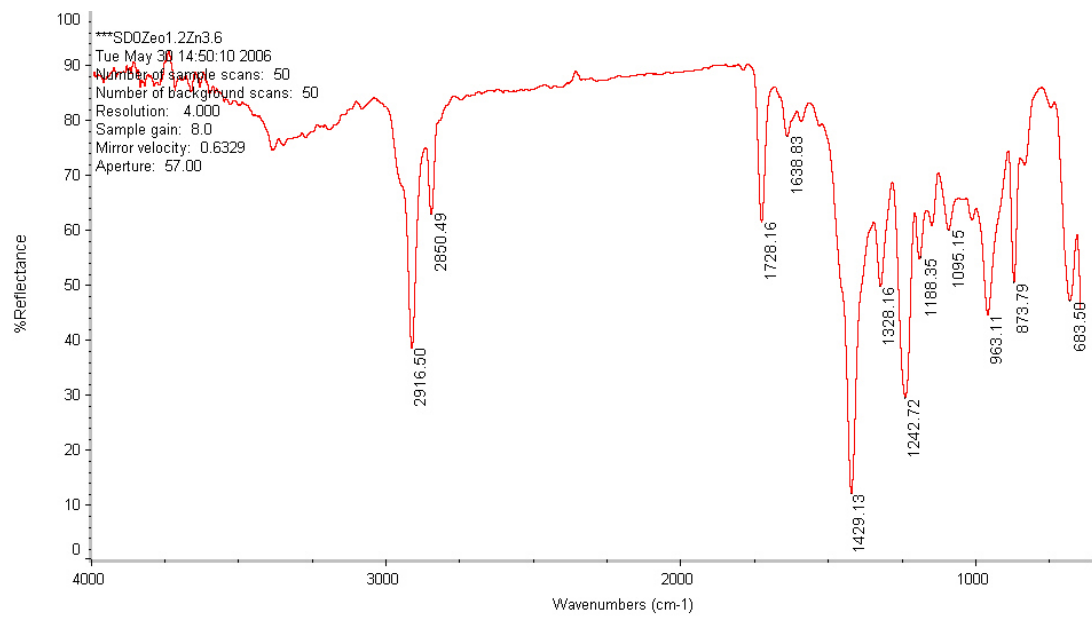


รูปที่ ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมสเต็มเรทของตะกั่ว 4.8 phr

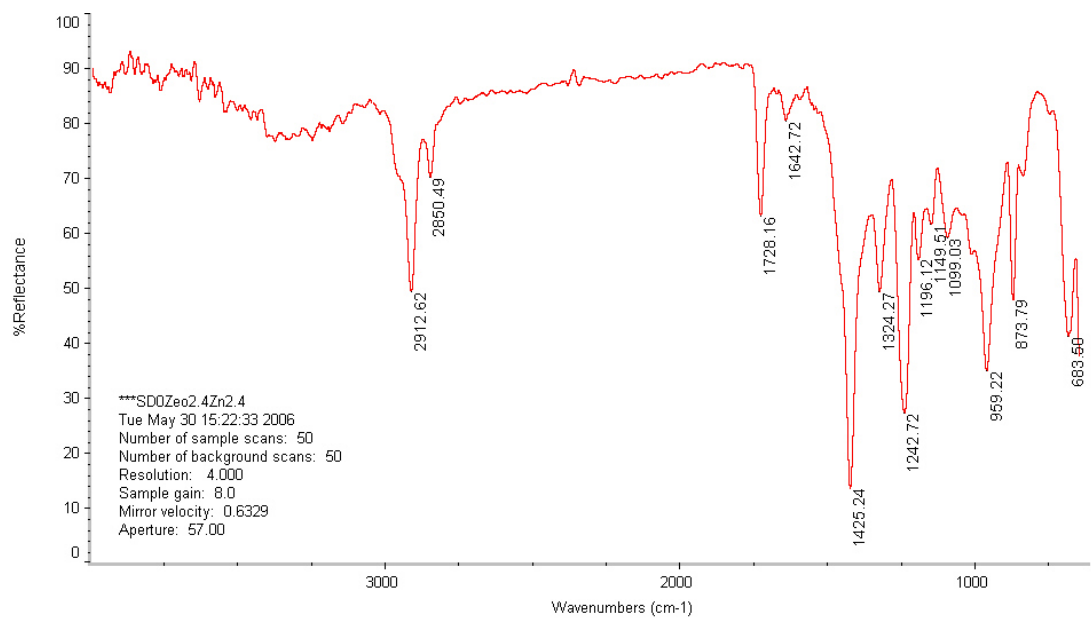
ภาคผนวก ข

การศึกษาอิทธิพลของสารผสมซีโอไลต์ และ สเตียเรทของสังกะสีที่เป็นสารป้องกันการ
เสื่อมสภาพ ทางความร้อน ต่อสมบัติทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี

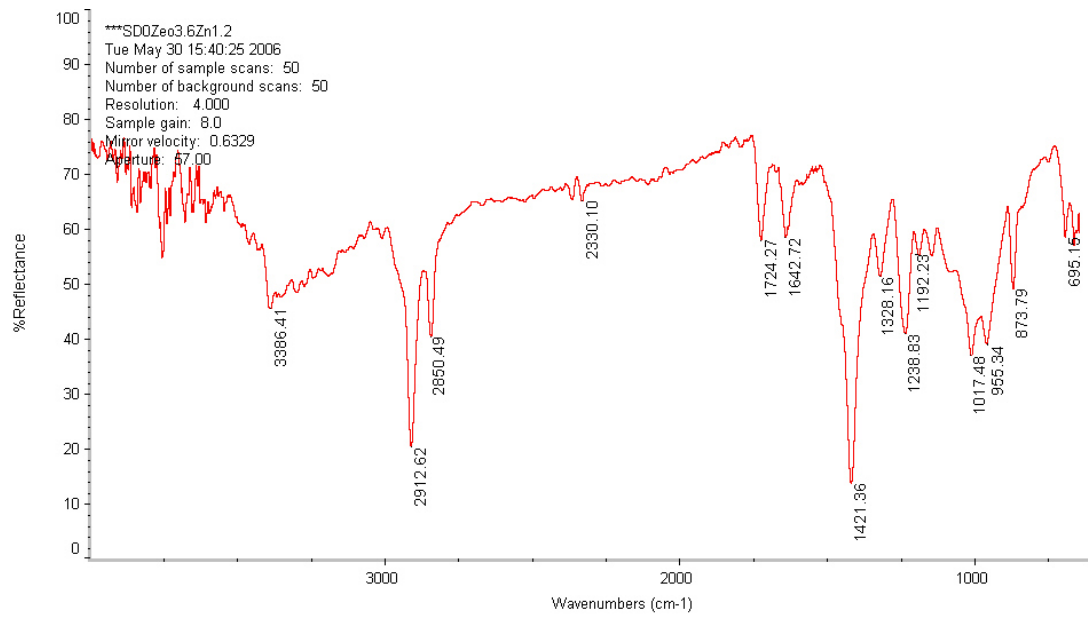
- ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณหมู่พอลิอื่นจากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR



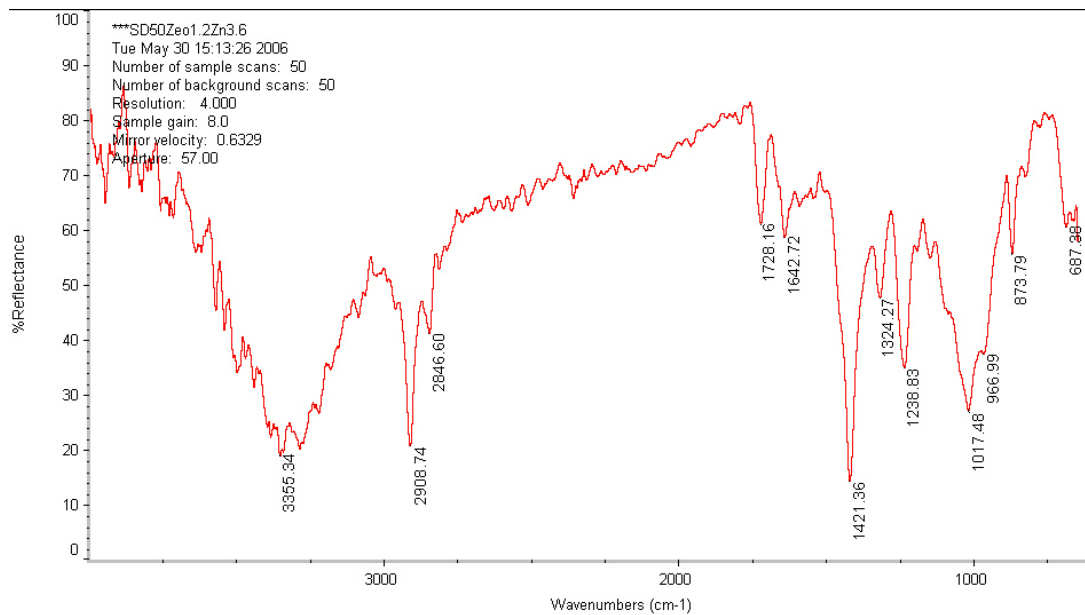
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพิวซีซีที่เติม
ซีโอไลต์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 1.2 : 3.6 phr



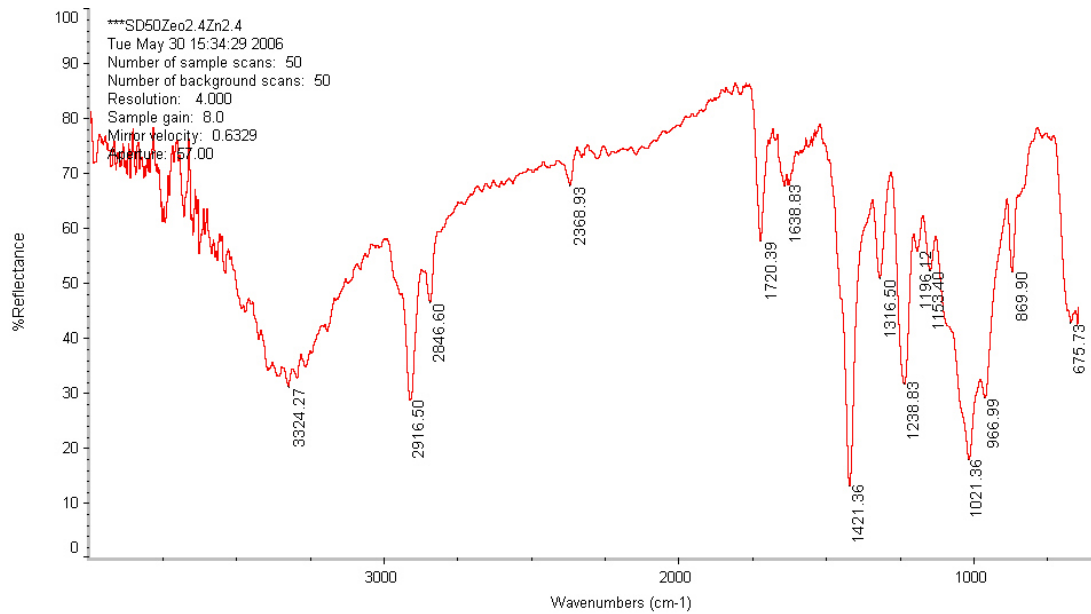
รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพิวซีซีที่เติม
ซีโอไลต์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 2.4 : 2.4 phr



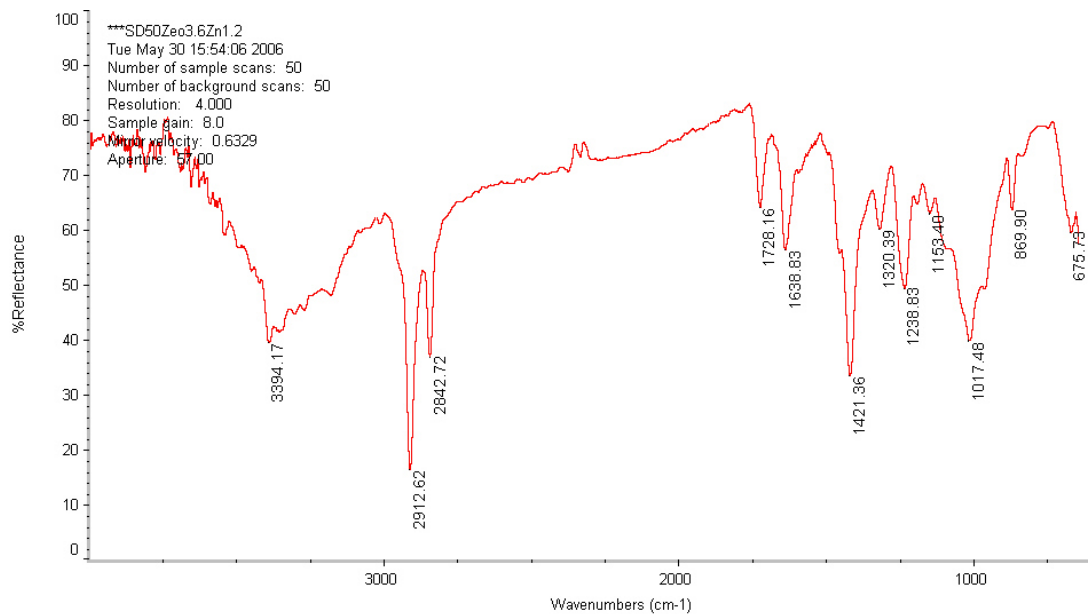
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีที่เติม
ซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 3.6 : 1.2 phr



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เถ้า
ไม้ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเดียรทของสังกะสี 1.2 : 3.6 phr



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เลื่อย
ไม้ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเต็มเรทของสังกะสี 2.4 : 2.4 phr



รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการสะท้อนและเลขคลื่นของชิ้นงานพีวีซีและผงขี้เลื่อย
ไม้ที่เติมซีโอไลท์ร่วมกับสเต็มเรทของสังกะสี 3.6 : 1.2 phr

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ - สกุล	นางสาวกุลนิตา เทพทิม
วัน เดือน ปีเกิด	16 มีนาคม 2524
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนราชินี พ.ศ. 2538 ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ พ.ศ. 2541
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2546
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ทุนการศึกษา	ทุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ปีงบประมาณ 2548
ประวัติการทำงาน	-
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2550

ข้าพเจ้า นางสาวกุลนิตา เทพทิม รหัสประจำตัว 47401002

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก ☐ ปร.ด

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

อยู่บ้านเลขที่ 74 / 440 ตรอก/ซอย ถนน อำเภอ/เขต ถนน แขวง

ตำบล/แขวง อำเภอ/เขต จังหวัด

รหัสไปรษณีย์ 11000

ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี ดร.พัฒนะ รักความสุข ตำแหน่ง คณบดีคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลง ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การใช้ซีโอไลท์ (Zeolites) เป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน ในวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับผงขี้เลื่อยไม้”

ซึ่งอยู่ในความควบคุม ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

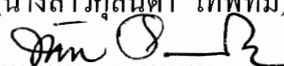
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

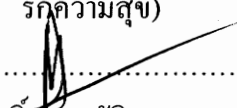
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ.....กุลนิตา.....เทพทิม.....ผู้โอนลิขสิทธิ์

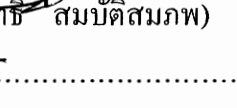
(นางสาวกุลนิตา เทพทิม)

ลงชื่อ..........ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(ดร.พัฒนะ รักความสุข)

ลงชื่อ..........พยาน

(ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

ลงชื่อ..........พยาน

(.....)