



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล

Mechanical and Thermal Properties of Recycled High Density
Polyethylene

รัตติญา มะกะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประจำปี 2566

หัวข้อโครงการวิจัย	สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล
ชื่อ-นามสกุล	นางรัตติญา มະกะ
สังกัด	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีงบประมาณ	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) รีไซเคิล ซึ่งโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของ HDPE รีไซเคิล 2) นำผลการทดสอบมาใช้จัดทำข้อมูลเพื่อเป็นกรณีศึกษาให้นักศึกษาภาคปฏิบัติ ในรายวิชาการทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล รหัสวิชา 04-720-309 ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ 3) นำผลการทดสอบมาใช้เป็นข้อมูลในการให้บริการงานบริการทดสอบสมบัติวัสดุในงานบริการทางวิชาการของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

โดยศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของ HDPE ซึ่งเป็นพลาสติกหลักสำหรับการฝึกภาคปฏิบัติในเรื่องงานฉีดของนักศึกษาวิชารีไซเคิลหลาย ๆ ครั้ง ด้วยเครื่องมือและวิธีการทดสอบตามมาตรฐานสากล โดยมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สมบัติ ความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D792 สมบัติการหดตัว การทดสอบการเปลี่ยนสีในระบบ CIE และทดสอบสมบัติทางกล สมบัติความทนแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 สมบัติความทนแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D256 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง ตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ทดสอบสมบัติอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D648 และทดสอบค่าดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238

ผลจากการทดสอบค่าความทนแรงกระแทกพบว่าค่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อจำนวนครั้งของการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น (R1-R7) ผลจากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงพบว่าค่า ความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังมีค่าไม่ต่างจากเดิมมากนักเมื่อจำนวนครั้งของการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น แต่จะพบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลง และจากการศึกษาค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิล ซึ่งไม่มีค่าแตกต่างกันนัก และผลจากการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัวจากการให้ความร้อนในครั้งที่ 1 มีพีคที่พบเพียงพีคเดียวแสดงว่า HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลเป็นพลาสติกที่สามารถเกิดผลึกได้ดี และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 7 แสดงแนวโน้มของการเกิดผลึกเร็วขึ้น และอุณหภูมิการหลอมตัว T_m ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 จะพบว่า HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลตั้งแต่ครั้งที่ 1-7 มีความแตกต่างของอุณหภูมิหลอมผลึก

ไม่มากนัก และปริมาณการเกิดผลึกของ HDPE เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลมีปริมาณการเกิดผลึกลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE และการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนพบว่า การนำกลับมารีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึง ครั้งที่ 4 (R1-R4) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ HDPE และผลทดสอบดัชนีการไหลพบว่า เมื่อจำนวนครั้งของการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นค่าดัชนีการไหลมีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การนำ HDPE มาผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง พลาสติกยังคงมีสมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งไม่แตกต่างจาก HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิลมากนัก แต่พบว่าค่าความทนแรงกระแทกลดลง จึงไม่เหมาะกับการนำไปรีไซเคิลเพื่อใช้งานในด้านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรับแรงในรูปแบบการทนต่อแรงกระแทก และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าการรีไซเคิลพลาสติกจำนวนครั้งยิ่งมากขึ้น ความเป็นผลึกที่ส่งผลกับสมบัติความแข็งแรงจะลดลงตามไปด้วย

ผลการศึกษานี้สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ในการให้ความรู้กับนักศึกษาภาคปฏิบัติในรายวิชาการทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล รหัสวิชา 04-720-309 และเป็นการลดการนำเม็ดพลาสติก HDPE ใหม่ มาใช้ในการเรียนในภาคปฏิบัติในรายวิชา 04-720-309 การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล เพื่อให้นักศึกษานำชิ้นทดสอบที่ฝึกปฏิบัติแล้วกลับมาใช้ฝึกปฏิบัติใหม่นอกเวลาเรียนปกติ และยังสามารถนำผลทดลองไปใช้เป็นแนวทางในการสร้างความเข้าใจถึงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนไปของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลให้กับหน่วยงานภายนอกที่มาใช้บริการทดสอบสมบัติวัสดุในงานบริการทางวิชาการ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเม็ดพลาสติกใหม่สำหรับนักศึกษาในการเรียนการสอนในรายวิชา 04-720-309 การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล และยังเป็นการช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

คำสำคัญ : สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง รีไซเคิล

Title	Mechanical and Thermal Properties of Recycled High Density Polyethylene
Affiliation	Faculty of Engineering
Name –Surname	Missis Rattiya Maka
Year	2023

Abstract

This research aims to 1) compare the mechanical and thermal properties of recycled high-density polyethylene (HDPE), 2) provide experimental data as a case study for practical students in the course "Materials Testing and Analysis" (Course Code: 04-720-309) in the Department of Materials and Metallurgical Engineering, and 3) supply information for material testing services in academic service activities of the department.

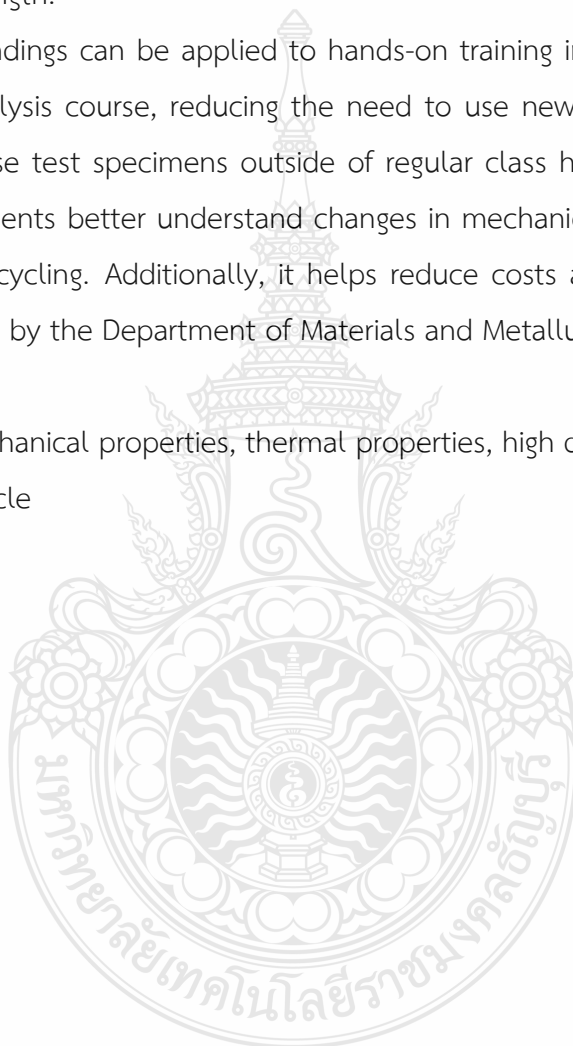
The study focused on the mechanical and thermal properties of HDPE, which is a primary plastic used for injection molding practice by students, subjected to multiple recycling cycles. Standardized equipment and testing methods were employed to evaluate physical properties, including density (ASTM D792), shrinkage, color change (CIE system), and mechanical properties, such as tensile strength (ASTM D638), impact strength (ASTM D256), and flexural strength (ASTM D790). Thermal properties were examined using differential scanning calorimetry (DSC), heat distortion temperature (ASTM D648), and melt flow index (ASTM D1238).

The impact test results showed that impact strength decreased with an increasing number of recycling cycles. Tensile tests indicated that tensile strength and Young's modulus did not significantly change across recycling cycles (R1–R7), but the elongation at break decreased. Flexural strength showed a slight decrease compared to virgin HDPE, though not statistically significant. DSC (Differential Scanning Calorimetry) analysis revealed that the crystallization temperature (T_c) during the first cooling phase showed a single peak, indicating that both virgin and recycled HDPE maintain good crystallization ability. Recycled HDPE (R1–R7) showed a tendency to crystallize more quickly. The melting temperature (T_m) obtained during the second heating phase showed no significant differences between virgin and recycled HDPE. However, the degree of crystallinity decreased with increased recycling. Heat deflection temperature

testing showed that samples recycled from R1 to R4 maintained values close to virgin HDPE. The melt flow index increased with each recycling cycle. The results show that HDPE can be recycled up to seven times while retaining relatively stable tensile and flexural properties, though impact strength declines. Therefore, recycled HDPE is not suitable for applications requiring high impact resistance. The thermal testing results further indicated that increased recycling reduces crystallinity, which negatively affects mechanical strength.

These findings can be applied to hands-on training in the 04-720-309 Materials Testing and Analysis course, reducing the need to use new HDPE pellets by allowing students to reuse test specimens outside of regular class hours. The results can also help external clients better understand changes in mechanical and thermal properties due to HDPE recycling. Additionally, it helps reduce costs and the amount of plastic waste generated by the Department of Materials and Metallurgical Engineering.

Keywords : mechanical properties, thermal properties, high density polyethylene, recycle



กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ทางผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ดร.อำนาจ ลาภเกษมสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งต้องขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านของเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย และอำนวยความสะดวกในด้านอื่น ๆ ตลอดจนผู้มีส่วนร่วมทุกท่านที่มีส่วนร่วมช่วยให้งานวิจัยเล่มนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ได้ด้วยดี

รัตติญา มะกะ
ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑๑
สารบัญ	๑๒
สารบัญตาราง	๑๓
สารบัญรูป	๑๔
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ	4
2 ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 พลาสติกรีไซเคิล (Plastic Recycle)	7
2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)	10
2.3 การเตรียมพลาสติกเพื่อนำเข้ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์	12
2.4 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการฉีด	14
2.5 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation)	24
2.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : SD)	34
2.7 บริบทของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ	40
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	45
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	38

สารบัญ (ต่อ)

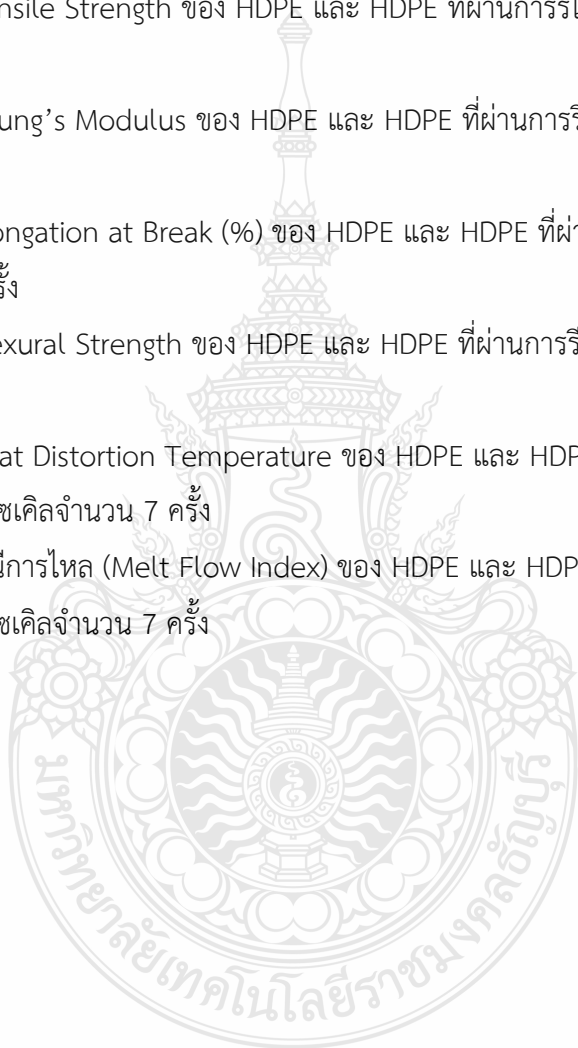
	หน้า
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	48
4 ผลการดำเนินการวิจัย	59
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	59
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	61
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	66
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน	71
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	77
5.1 ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพ	77
5.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	77
5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน	77
5.4 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนางาน	78
5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป	79
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก	83
ก. ตารางข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพ	83
ข. ตารางข้อมูลการทดลองสมบัติเชิงกล	90
ค. เทอร์โมแกรม และตารางข้อมูลการทดลองสมบัติทางความร้อน	65
ง. ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือ	102
ประวัติผู้วิจัย	124

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติเฉพาะของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)	11
2.2 ลักษณะของปฏิกิริยาที่พบในขั้นเริ่มการเชื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยความร้อน	26
2.3 ตัวอย่างเอนไซม์ที่สามารถย่อยพอลิเมอร์จากธรรมชาติได้	33
3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) เกรดฉีด ชื่อทางการค้า InnoPlus HD1600J	41
3.2 แสดงสภาวะในการฉีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	48
4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	61
4.2 แสดงขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	62
4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงสีของขึ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	64
4.4 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	66
4.5 แสดงทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	67
4.6 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	70
4.7 แสดงพารามิเตอร์การเกิดผลึกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	71
4.8 แสดงอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	74
4.9 แสดงดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	74
ก.1 แสดงค่าความหนาแน่น (Density) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	84
ก.2 แสดงค่าขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	85
ก.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีของขึ้นทดสอบ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ข.1 แสดงค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	91
ข.2 แสดงค่า Tensile Strength ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	92
ข.3 แสดงค่า Young's Modulus ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	92
ข.4 แสดงค่า Elongation at Break (%) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	93
ข.5 แสดงค่า Flexural Strength ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	94
ค.1 แสดงค่า Heat Distortion Temperature ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	100
ค.2 แสดงค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	101



สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ขยะจากพลาสติก	6
2.2 เครื่องย่อยพลาสติกแบบต่าง ๆ	13
2.3 โม่ตัด	14
2.4 ลักษณะของเครื่องฉีดพลาสติก	15
2.5 ลักษณะของเครื่องฉีดพลาสติกที่สามารถปรับยกชุดฉีดหรือชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ได้	17
2.6 โครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก	18
2.7 ชุดฉีด	19
2.8 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์	19
2.9 ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบแมคคานิค	20
2.10 ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก	21
2.11 แสดงสมการปฏิกิริยาการเสื่อมสลายด้วยความร้อนแบบต่าง ๆ	25
2.12 กลไกการเสื่อมสลายพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยความร้อน	26
2.13 (ก) ESR ของพอลิพรพิลีนที่เสื่อมสภาพด้วยการบดด้วยบอลมิลล์ (b) แบบจำลองของ ESR ที่ได้จากการผสมกันระหว่าง R1 และ R2 ในอัตราส่วน 1:1 และ (c) สายโซ่ที่เป็น R1 และ R2	29
2.14 การเกิดขึ้นของฟองอากาศและการแตกตัวของฟองอากาศ ส่งผลให้เกิดจุดร้อนเมื่อผ่านคลื่นอัลตราโซนิกส์เข้าไปในของเหลว	30
2.15 การตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์สืบเนื่องจากการแตกตัวของฟองอากาศทำให้เกิดช่องว่าง ซึ่งช่องว่างนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือน และแรงเฉือนทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์	31
2.16 แสดงการหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่สนใจด้วยฟังก์ชัน AVERAGE	35
2.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบอากาศปกติ และ แปรปรวน	36
2.18 แสดงตัวอย่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	37
2.19 แสดงรายงานไขที่เก็บได้ใน 1 เดือน จำนวน 30 วัน	38
2.20 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนไขที่เก็บได้ในแต่ละวันของโรง 1 และ 4	39
2.21 แสดงตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดสอบของเด็กทั้ง 10 คน	39
3.1 แผนภูมิแสดงวิธีการเตรียม HDPE รีไซเคิล	45
3.2 การทดสอบความหนาแน่น	49
3.3 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ X-rite รุ่น Ci6	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.4 รูปแบบการวางขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Izod	52
3.5 การทดสอบความทนแรงกระแทก	52
3.6 ตัวอย่างขึ้นทดสอบทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก	53
3.7 ตัวอย่างขึ้นทดสอบ HDPE รูปดัมเบลล์สำหรับทดสอบสมบัติความทนแรงดึง	54
3.8 ตัวอย่างการทดสอบความทนแรงดึง	54
3.9 การทดสอบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ (Flexural Testing)	55
3.10 ตัวอย่างขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง	55
3.11 ตัวอย่างการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน	57
3.12 เครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT)	57
3.13 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI)	58
4.1 เม็ดพลาสติก HDPE (Virgin) และ เม็ดพลาสติก HDPE ที่ผ่านการบด รีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง (R1-R7) ตามลำดับ	59
4.2 ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ HDPE (Virgin) และขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง (R1-R7) ตามลำดับ	60
4.3 แสดงค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบของ HDPE (Virgin) และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	61
4.4 แสดงความกว้างของขึ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	62
4.5 แสดงความยาวของขึ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	63
4.6 แสดงความหนาของขึ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	63
4.7 แสดงความต่างของเฉดสี (ΔE) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	64
4.8 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	66
4.9 แสดงค่าความทนแรงดึงของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.10 แสดงค่ามอดูลัสของยังของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	68
4.11 แสดงค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	69
4.12 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	70
4.13 DSC เทอร์โมแกรมของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้งที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัว	73
4.14 DSC เทอร์โมแกรมของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้งที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2	73
4.15 แสดงอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	74
4.16 แสดงดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง	75
5.1 แผนภาพข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนางาน	78
ค.1 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE	96
ค.2 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 (R1)	96
ค.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 2 (R2)	97
ค.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 3 (R3)	97
ค.5 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 4 (R4)	98
ค.6 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 5 (R5)	98
ค.7 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 6 (R6)	99
ค.8 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 7 (R7)	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัญหาขยะพลาสติกโลกเป็นประเด็นสำคัญที่ทั่วโลกต่างให้ความสนใจ เพราะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศเป็นวงกว้าง ทั้งจากพลาสติกที่ตกค้างในทะเลซึ่งทำลายสัตว์น้ำและปะการัง พลาสติกที่ตกค้างในดินซึ่งมีผลให้ดินเสื่อมคุณภาพ อีกทั้งการเผาทำลายพลาสติกยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และยังซ้ำเติมภาวะโลกร้อนให้รุนแรงขึ้น [1] ในช่วง 2 - 3 ปีที่ผ่านมา เราได้เห็นหลายแบรนด์ยักษ์ใหญ่ระดับโลกออกมาประกาศนโยบายสิ่งแวดล้อมเป็นเป้าหมายสำคัญของธุรกิจ นั่นก็เพราะผู้บริโภคทั่วโลกต่างก็ตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม ทั้งเรื่องปัญหาการจัดการขยะบนบกและในทะเล ปัญหาขาดแคลนทรัพยากร ปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งไม่เพียงแต่องค์กรเอกชนเท่านั้น ภาครัฐในหลายประเทศก็ยังประกาศเรื่องนี้เป็นวาระเร่งด่วนด้วยการประกาศข้อกำหนดหรือกฎหมายเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ตามเป้าหมาย หนึ่งในตัวอย่างของการลงมือปฏิบัติอย่างเข้มงวดและเห็นภาพชัดเจน คือการที่สหราชอาณาจักรประกาศภาษีบรรจุภัณฑ์พลาสติก โดยบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่จะนำเข้า หรือผลิตใช้งานใน สหราชอาณาจักร จะต้องประกอบด้วยวัสดุพลาสติกรีไซเคิลในปริมาณไม่น้อยกว่า 30% หากฝ่าฝืนจะต้องเสียภาษีค่าปรับจำนวน 200 ปอนด์ต่อตัน ทางด้านสหภาพยุโรปก็มีการดำเนินการเพื่อสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียนแบบครบวงจรภายในภูมิภาค เริ่มจากการสร้างกลไกการจัดการขยะพลาสติกขึ้นเพื่อพาประชาคมไปสู่เป้าหมายที่วางไว้ โดยเริ่มต้นจากการแบนพลาสติกที่ใช้งานครั้งเดียวทิ้งหรือ Single-Use Plastics เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันที่ไม่จำเป็น ซึ่งได้แก่ ซ้อนส้อม มีด จาน หลอด ก้านคนกาแฟ ก้านสำลี ก้านลูกโป่ง เป็นต้น [2]

ประเทศไทยมีนโยบายของรัฐบาลไทยที่สนับสนุนให้เกิดการพัฒนาเศรษฐกิจรูปแบบใหม่คือ บีซีจี โมเดล (BCG Model) คือการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวม ที่จะพัฒนาเศรษฐกิจ 3 มิติไปพร้อมกันได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) ระบบเศรษฐกิจชีวภาพที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรชีวภาพเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มเชื่อมโยงกับเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) คือคำนึงถึงการนำวัสดุต่าง ๆ กลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด และทั้ง 2 เศรษฐกิจนี้รวมอยู่ภายใต้เศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) ดังนั้นในอุตสาหกรรมพลาสติกจึงต้องมีการปรับตัว เปลี่ยนแปลง เพื่อให้สอดคล้องกับโมเดลนี้ และยังเป็นการแก้ปัญหาโลกร้อน และทำให้ธุรกิจสามารถดำเนินการต่อไปได้ [3] การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะพลาสติกฐานปิโตรเลียมที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพจึงเป็นแนวทางการแก้ปัญหาของอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียนและเป็นส่วนหนึ่งของการลดต้นทุนทางอุตสาหกรรม โดยพลาสติกที่จะนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่แบ่งได้ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ พลาสติก ที่เหลือทิ้งหรือสูญเสียระหว่างกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม (Post-

Industrial Recycled : PIR) และ พลาสติกที่ผ่านการใช้งานโดยผู้บริโภคมาแล้ว (Post-Consumer Recycled : PCR) [4] การรีไซเคิลพลาสติกทั้ง 2 กลุ่มนี้จึงเป็นการนำพลาสติกมาแปรรูปใช้ใหม่ เป็นการช่วยลดปริมาณวัตถุดิบหลักในการผลิต ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหลักฐานเศรษฐกิจหมุนเวียน อย่างไรก็ตามการแปรรูปพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จะทำให้สมบัติการใช้งานของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกต้องผ่านกระบวนการได้รับความร้อนและแรงกลในกระบวนการผลิตซ้ำหลายครั้ง สมบัติเชิงการ และสมบัติทางความร้อนตลอดจนความหนืดของพลาสติกขณะหลอมจึงลดลง ซึ่งส่งผลต่อสมบัติ การนำไปใช้งานและการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีได้มีการจัดการเกี่ยวกับขยะมากมาย โดยการจัดทำโครงการเกี่ยวกับการจัดการขยะในรูปแบบการวิจัย เช่น โครงการนักวิจัยด้านการจัดการขยะ และของเหลือทิ้ง ภายใต้โครงการทำทนายไทย ปี 2 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จำนวน 5 เรื่อง (5 นวัตกรรมเพื่อจัดการขยะ ของ มทร.ธัญบุรี) [5] งานวิจัยเกี่ยวกับการจัดการขยะ ภายใน มทร.ธัญบุรี [6] และมีโครงการจัดการขยะของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการหลายโครงการ เช่น โครงการแปรรูปถุงหิ้ว เปลี่ยน “ขยะ” ให้เป็น “เงิน” [7] และโครงการจากขยะพลาสติกสู่ผลิตภัณฑ์ [8] ในส่วนของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นภาควิชาหลักที่เปิดการเรียนการสอนในหลักสูตรวิศวกรรมพอลิเมอร์ และวิศวกรรมอุตสาหกรรมพลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือผลิตบัณฑิตให้เป็นวิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญด้านทฤษฎีและปฏิบัติเฉพาะสาขางานสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติก จึงมีการจัดการเรียนสอนเกี่ยวกับการแปรรูปและทดสอบพลาสติกในหลายวิชา เช่น กระบวนการขึ้นรูปทางพอลิเมอร์ (Polymer Processing) รหัสวิชา 04-720-211 กระบวนการผลิตเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastics Processing) รหัสวิชา 04-720-212 และ การแก้ปัญหากระบวนการผลิตพอลิเมอร์ (Polymer Processing Troubleshooting) รหัสวิชา 04-722-309 และรวมถึงรายวิชาการทดสอบและวิเคราะห์พลาสติก (Materials Testing and Analysis) รหัสวิชา 04-720-309 ที่เป็นรายวิชาที่ผู้วิจัยปฏิบัติหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในภาคปฏิบัติด้วย โดยมีนักศึกษาลงทะเบียนในรายวิชาที่ต้องใช้เม็ดพลาสติกชนิดนี้ประมาณรายวิชาละ 35 - 40 คน ใน 1 ภาคการศึกษา ซึ่งทุกวิชานักศึกษาต้องแปรรูปพลาสติกเป็นชิ้นทดสอบทั้งสิ้น อีกทั้งในการฝึกภาคปฏิบัตินอกจากนักศึกษาต้องเข้าเรียนในชั่วโมงปฏิบัติตามปกติแล้ว นักศึกษายังสามารถฝึกปฏิบัตินอกเวลาเรียนเพิ่มเติมได้ในกรณีที่เครื่องจักรที่ใช้แปรรูปว่างจากการเรียนการสอนปกติ โดยที่ผ่านมามีเม็ดพลาสติกที่ให้นักศึกษาใช้เป็นเม็ดพลาสติกใหม่ทั้งหมด ส่งผลให้เมื่อหมดภาคการศึกษามีชิ้นทดสอบพลาสติกที่เหลือจากการฝึกภาคปฏิบัติจำนวนมาก ซึ่งโดยปกติแล้วทางภาควิชาจะต้องจัดซื้อเม็ดพลาสติกชนิดนี้ในราคาประมาณกิโลกรัมละ 25 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม และพลาสติกที่ถูกใช้แล้วที่ไม่ได้นำกลับมารีไซเคิลทางภาควิชาจะดำเนินการขายเป็นขยะพลาสติกให้กับทางผู้รับซื้อในราคาเพียงกิโลกรัมละ 5 บาทเท่านั้น ประกอบกับอีกหนึ่งภาระกิจของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คือการให้บริการทดสอบชิ้นทดสอบอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นงานบริการทางวิชาการที่ผู้วิจัยเป็นผู้รับหน้าที่ในการทดสอบสมบัติวัสดุให้กับหน่วยงานนอกที่มาขอเข้ารับ

การบริการ ซึ่งในหลาย ๆ กรณีพบว่าผู้ประกอบการส่งชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกรีไซเคิล ซึ่งอาจผสมเม็ดใหม่ หรือไม่มีการผสมเม็ดใหม่ มาให้ทดสอบสมบัติเชิงกลอย่างต่อเนื่อง และมักมีคำถามเกี่ยวกับสมบัติที่ลดลงเสมอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวความคิดจะทำเป็นโครงการนำร่องที่จะนำพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งเป็นพลาสติกหลักสำหรับการฝึกภาคปฏิบัติในเรื่องงานฉีดของนักศึกษา มารีไซเคิล เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดยการนำมารีไซเคิลซ้ำหลาย ๆ ครั้งและทดสอบสมบัติด้วยเครื่องมือ และวิธีการทดสอบตามมาตรฐานสากล (ASTM) เมื่อทราบผลลัพธ์จากการทดสอบสมบัติ ก็สามารถระบุการเสื่อมสภาพ จนนำไปถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติได้ โดยคาดว่าผลจากงานวิจัยจะสามารถบอกได้ว่า พลาสติก HDPE จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้กี่ครั้งโดยไม่ต้องปรับปรุงสมบัติ เช่น การผสมเม็ดใหม่ หรือการใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพพลาสติก ทั้งนี้ เพื่อให้นักศึกษานำชิ้นทดสอบที่ฝึกปฏิบัติแล้วกลับมาใช้ฝึกปฏิบัติใหม่นอกเวลาเรียนปกติ ซึ่งหากทำได้แล้วจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการจัดซื้อวัสดุฝึกเม็ดพลาสติกลงได้ นอกจากนี้แล้วโครงการนี้ยังสามารถขยายผลในชั่วโมงเรียนภาคปฏิบัติ ซึ่งสามารถนำมาเป็นกรณีศึกษา หรือกรณีตัวอย่างให้นักศึกษาได้เรียนรู้เกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของพลาสติกการนำพลาสติกรีไซเคิล มาใช้งาน และยังเป็นการปลูกฝังให้นักศึกษาเกิดจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด การลดต้นทุนวัตถุดิบ เข้าใจเกี่ยวกับหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมพลาสติกและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานในอนาคต ตลอดจนการรักษาสิ่งแวดล้อมและลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอน และยังสามารถนำมาเป็นกรณีศึกษาเพื่ออธิบายให้ผู้มาขอรับบริการทดสอบได้เข้าใจเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของพลาสติกรีไซเคิลได้ชัดเจนขึ้น

ผู้วิจัยซึ่งมีภาระงานในการสนับสนุนการเรียนการสอนในภาคปฏิบัติในรายวิชา 04-720-309 การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล และรับบริการทดสอบสมบัติวัสดุให้กับหน่วยงานภายนอก จึงต้องการศึกษาการรีไซเคิลพลาสติกชนิด HDPE ที่มีปริมาณการใช้งานค่อนข้างมากในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนเพื่อเป็นประโยชน์ในรายวิชา 04-720-309 การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล และเป็นแนวทางในการสอนในรายวิชาปฏิบัติการให้กับนักศึกษาและผู้ที่มาขอใช้บริการงานทดสอบของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ และสำหรับผู้มีความสนใจทั่วไปเพื่อให้เลือกวิธีการเตรียมชิ้นทดสอบได้อย่างเหมาะสมต่อไป ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการลดขยะ และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเม็ดพลาสติกใหม่ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของ HDPE รีไซเคิล

1.2.2 เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้จัดทำข้อมูลเพื่อเป็นกรณีศึกษาให้นักศึกษาภาคปฏิบัติ ในรายวิชาการทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล รหัสวิชา 04-720-309 ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และโลหการ

1.2.3 เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้เป็นข้อมูลในการให้บริการงานบริการทดสอบสมบัติวัสดุ ในงานบริการทางวิชาการของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เตรียมชิ้นทดสอบจาก HDPE ด้วยกระบวนการฉีด (Injection Molding Process)

1.3.2 บดชิ้นทดสอบที่ได้จากการฝึกปฏิบัติของนักศึกษาสาขาวิศวกรรมพลาสติกในทุกวิชา

1.3.3 เตรียม HDPE รีไซเคิลด้วยการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก โดยทำซ้ำจากข้อที่ 1.3.2 และ 1.3.3 จำนวน 7 ครั้ง

1.3.4 ศึกษาลักษณะทางกายภาพ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน ของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 7

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

1.4.2 ลดปริมาณในการจัดซื้อเม็ดพลาสติกของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

1.4.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการวิจัยไปใช้ถ่ายทอดความรู้ให้กับนักศึกษาถึงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนไปของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลในการสอนภาคปฏิบัติในรายวิชาการทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล รหัสวิชา 04-720-309

1.4.4 นำผลการทดลองไปใช้เป็นแนวทางในการสร้างความเข้าใจถึงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนไปของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลให้กับหน่วยงานภายนอกที่มาใช้บริการทดสอบ ในงานบริการทางวิชาการ

1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ

การจัดทำรายงานวิจัยเรื่อง “สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (HDPE) รีไซเคิล” มีนิยามคำศัพท์เฉพาะ ดังนี้

สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) หมายถึง ความสามารถในการตอบสนองเมื่อได้รับ แรงภายนอกที่มากระทำ เช่น แรงดัน แรงกด หรือแรงกระแทก เมื่อได้รับแรงที่มากระทำในการทดสอบ สมบัติพอลิเมอร์ในรายวิชา การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล (Materials Testing and Analysis)

รหัสวิชา 04-720-309 และการให้บริการทดสอบสมบัติพอลิเมอร์ในงานบริการทางวิชาการของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) สมบัติทางความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อน ด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาดพลังงานจะถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยวัสดุอาจเกิดการหลอมเหลวในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ความจุความร้อน การขยายตัวจากความร้อนและการนำความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุของแข็งในการนำไปใช้งานในรายวิชา 04-720-309 การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล (Materials Testing and Analysis) และงานบริการทดสอบสมบัติพอลิเมอร์ในงานบริการทางวิชาการของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) หมายถึงพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นระหว่าง $0.94-0.96 \text{ g/cm}^3$ มีจำนวนกิ่งน้อยที่สุดในตระกูลพอลิเอทิลีนทำให้เรียงตัวกันได้ จึงมีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมเหลวสูงและแข็งแรง พอลิเมอร์ชนิดนี้ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นการผลิตขวด โดยขึ้นรูปแบบเป่า หรือนำไปผลิตท่อด้วยวิธีอัดรีด ซึ่งพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นพลาสติกที่ใช้ในการเรียนการสอนของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

รีไซเคิล (Recycled) หมายถึง การนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อให้พลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ



บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ HDPE รีไซเคิล ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้า แนวคิด ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการศึกษาในงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 2.1 พลาสติกรีไซเคิล (Plastic Recycle)
- 2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)
- 2.3 การเตรียมพลาสติกเพื่อนำเข้ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์
- 2.4 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการฉีด
- 2.5 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation)
- 2.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : SD)
- 2.7 บริบทของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ
- 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลาสติกที่ใช้แล้วมักถูกทิ้งเป็นขยะพลาสติกซึ่งส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้อีกในลักษณะต่าง ๆ กัน และอีกส่วนหนึ่งถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบเป็นวิธีที่สะดวก แต่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากโดยธรรมชาติพลาสติกถูกย่อยสลายได้ยากจึงทับถมอยู่ในดิน นับวันยังมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณการใช้พลาสติก จึงก่อให้เกิดมลภาวะและเป็นอันตรายอย่างมาก วิธีแก้ปัญหaxyขยะพลาสติกที่ได้ผลดีที่สุดคือ การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ [9]



รูปที่ 2.1 ขยะจากพลาสติก [10]

การรีไซเคิลพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้น ถือเป็นการลดขยะอีกทางหนึ่งแทนที่เราจะทิ้งไปเลย เราก็นำมาใช้ใหม่ด้วยการรีไซเคิลและเป็นการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วยเช่นกัน การรีไซเคิลพลาสติกสามารถลดมลพิษขยะลงได้อย่างมาก อนุรักษ์ทรัพยากร และปกป้องสิ่งแวดล้อมจากมลภาวะพลาสติกและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการนำพลาสติกที่ไม่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยการผลิตขึ้นมาอีกครั้ง [11]

2.1 พลาสติกรีไซเคิล (Plastic Recycle)

พลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเพราะใช้ทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ไม้และเหล็กได้เป็นอย่างดี และมีราคาถูก น้ำหนักเบาสามารถผลิตให้มีสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้จากการเลือกชนิดของวัตถุดิบ ปฏิกริยาเคมี กระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังสามารถปรุงแต่งสมบัติได้ง่ายโดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารเสริม (Filler) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น [12]

ด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายด้านทำให้พลาสติกได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็วและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการ รีไซเคิลจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย [12] โดยหลักการคัดแยกพลาสติกว่าจะนำกลับไปรีไซเคิลใหม่ หรือนำไปกำจัดอย่างถูกต้อง สามารถสังเกตได้จากประเภท ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ดังนี้ [13]

2.1.1 เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) [13]

เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) หรือพลาสติกที่คงรูปถาวร เป็นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยความร้อน เมื่อโหลที่แข็งตัวแล้วจะไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก จึงทำให้นำกลับมารีไซเคิลใหม่ไม่ได้ เช่น เมลามีน (Melamine) อีพ็อกซี (Epoxy) และยูรีเทน (Urethane) เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังใช้เวลาในการย่อยสลายนานนับร้อยปี อีกทั้งยังกำจัดยาก ต้องใช้เตาเผาพิเศษที่มีอุณหภูมิสูง 1,300 องศาเซลเซียสเท่านั้น จึงทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมากขึ้นตามไปด้วย

2.1.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) [13]

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยความร้อน จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น จึงทำให้เป็นพลาสติกที่ไม่คงรูปถาวรและสามารถนำกลับมารีไซเคิลใหม่ได้ มีทั้งหมด 7 ชนิด คือ

1. PETE หรือ PET (Polyethylene Terephthalate)
2. HDPE (High Density Polyethylene)
3. PVC (Polyvinyl Chloride)

4. LDPE (Low Density Polyethylene)

5. PP (Polypropylene)

6. PS (Polystyrene)

7. Other (พลาสติกอื่น ๆ)

การพัฒนาทางเทคโนโลยีในช่วงหลายปีที่ผ่านมาทำให้การรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary Recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary Recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary Recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary Recycling) [12]

2.1.3 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ [12]

เป็นการนำขวดหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2.1.4 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ [12]

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค คือ

1) การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical Recycling)

เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสี จากนั้นล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ ก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและปริมาณการผสมที่ต้องการ ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกคือหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลงปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุลของ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และมีราคาถูกลงเรื่อย ๆ จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน สาเหตุที่สำคัญเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก อนุภาคเล็ก ๆ หรือ เศษกาวทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้นหรือ มีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้นในพลาสติก และความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติก ทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเหลือง และมีสมบัติเชิงกลลดลงด้วย

2) การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical Modification)

เนื่องจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้น การปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม

ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี แต่ถ้าเป็นพลาสติกผสม มักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า Compatibilizer

3) การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Coextrusion and Coinjection Moulding)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบตติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสน่าใช้ ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกรีไซเคิล

2.1.5 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ [12]

การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

1) การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical Recycling)

เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerisation) ได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพหุได้ใหม่

2) การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis)

โครงสร้างของพหุสามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน เรียกว่า Thermolysis แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และ การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

Pyrolysis เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็นของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic Crude Oil) สามารถนำกลับไปใช้ในโรงกลั่นและส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการ

Gasification เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของพหุเกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า Pyrolysis ผลลัพธ์ที่ได้คือ Syngas ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง แต่ถ้าทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2 – 3 เท่า

Hydrogenation เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของพหุจะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินพอที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และเกิดการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล

กระบวนการรีไซเคิลทางความร้อนถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์ และคุ้มค่ากว่าการรีไซเคิลทางเคมีเพราะสามารถจัดการขยะที่เป็นพลาสติกผสมที่มีสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่พลาสติกได้ ในขณะที่การรีไซเคิลทางเคมีต้องใช้พลาสติกที่มีความสะอาดค่อนข้างสูงและมีการผสมหรือปนเปื้อนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูง อย่างไรก็ตามพลาสติกเพทที่จะนำมารีไซเคิลทางความร้อนก็ควรมีการคัดขนาดหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกบ้าง

2.1.6 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ [12]

พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

แม้ว่าทุกวันนี้การรีไซเคิลพลาสติกยังไม่ได้ได้รับความนิยมมากนัก แต่ก็กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่เรให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมารีไซเคิลใช้ซ้ำจึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะช่วยให้เรารักษาความสวยงามและความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรธรรมชาติไว้ได้ ซึ่งอีกไม่นานเราก็จะก้าวข้ามเข้าสู่ศตวรรษใหม่ที่วิทยาการและเทคโนโลยีต่าง ๆ จะได้รับการพัฒนาให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น คนแห่งศตวรรษใหม่อาจต้องเปลี่ยนวิสัยทัศน์เกี่ยวกับพลาสติก เมื่อพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในศตวรรษหน้าไม่ได้กลายเป็นขยะอีกต่อไป แต่กลับกลายเป็นทรัพยากรสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) [14]

พอลิเอทิลีนที่ผลิตจากแก๊สเอทิลีน ซึ่งผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่าง ๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขข้น) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้)

2.2.1 สมบัติของ HDPE

HDPE มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง จึงมีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้ผิวแตกรานได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี

โดยสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 80 - 100 °C แต่ HDPE นั้นไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ เทาพลาสติกชนิด PP และ HDPE ยังทนต่อสารเคมีมากกว่า LDPE ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้

ตารางที่ 2.1 สมบัติเฉพาะของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) [14]

ชื่อ	High-Density Polyethylene
ตัวย่อ	HDPE
ความหนาแน่น	0.95
อัตราการดูดซับน้ำ (%)	0.01 %
การยึดตัว (%)	100 %
การทนแรงดึง	4550 psi
การทนแรงอัด	2900 psi
การทนแรงกด	5800 psi
ความทรงรูปในแนวแรงกด	120000 psi
อุณหภูมิที่เสียรูป (deg. F)	@ 66 psi: 176 @ 264 psi: 131
อุณหภูมิการใช้งาน (deg. F)	min: -180 max: 248
จุดหลอมเหลว (deg. F)	266
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	0.00007

ซึ่ง HDPE มีลักษณะภายนอก คือ มีสีที่ขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ สามารถผสมให้มีสีต่าง ๆ ได้

2.2.2 การนำ HDPE ไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากสมบัติที่มีความทนทานทั้งต่อแรงกระแทก ความร้อน และสารเคมี รวมถึงยังยืดหยุ่น สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้มีการนำ HDPE ไปใช้เป็นวัสดุในการผลิตภาชนะบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดนม ถังพลาสติก ถังน้ำ บรรจุภัณฑ์สำหรับทำความสะอาด แกลลอน ขวดแชมพู ขวดน้ำมันเบรก ขวดน้ำ

โดยพลาสติก HDPE ที่ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และผ่านการใช้งานแล้ว สามารถนำไปรีไซเคิลทำให้ได้เม็ดพลาสติก HDPE เพื่อเป็นวัตถุดิบในการนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุต่าง ๆ อีกครั้ง เช่น นำไปรีไซเคิลเป็นขวดน้ำมันเครื่อง ขวดใส่น้ำยาซักผ้า ท่อ ลังพลาสติก ไม้เทียมที่ใช้ทำม้านั่งในสวน เป็นต้น

2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของ HDPE

1) ข้อดีของ HDPE

1.1) HDPE มีความต้านทานที่ยอดเยียมต่อสิ่งมีชีวิตและอุตสาหกรรมเคมี สามารถต้านทานการกัดกร่อน และการสลายตัวของสารอนุมูลอิสระที่แข็งแกร่ง เกลือ เบส กรด และตัวทำละลายอินทรีย์

1.2) HDPE ไม่ดูดความชื้น และมีคุณสมบัติไอน้ำที่กันน้ำได้ดีซึ่งสามารถใช้สำหรับป้องกันความชื้น และป้องกันการซึมของบรรจุภัณฑ์

1.3) HDPE มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเป็นฉนวน ความเป็นฉนวนสูงทำให้เหมาะสำหรับลวดและสายเคเบิล เกรดน้ำหนักโมเลกุลระดับกลางถึงสูง มีความต้านทานแรงกระแทกที่ดีเยี่ยมที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ -40°F

1.4) HDPE มีการแปรรูปที่ดี และการปิดผนึกความร้อน

1.5) HDPE มีคุณสมบัติเหมือนกระดาษสีเหลืองจัดรัสและเปิดกว้างและมีความแข็งแรงมากกว่าฟิล์ม LDPE 4 - 5 เท่า ความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรง และความแข็งแรงเชิงกลอื่น ๆ ใกล้เคียงกับ PP กว่าความเหนียว PP

1.6) HDPE ไม่มีพิษและไม่มีกลิ่น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในวัสดุบรรจุภัณฑ์ เช่น อาหาร เสื้อผ้า และเสื้อผ้า

2) ข้อเสียของ HDPE

2.1) คุณสมบัติการต้านทานความแก่ชราและความเครียดจากการแตกของสภาพแวดล้อมไม่ดีเท่า LDPE โดยเฉพาะประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันจาก ความร้อน ดังนั้นโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงจึงถูกเติมด้วยสารต้านอนุมูลอิสระและตัวดูดซับรังสียูวีเพื่อปรับปรุงการขาดของมันเป็นแผ่นพลาสติก

2.2) ความโปร่งใสต่ำของ HDPE, สิ่งกีดขวางต่อออกซิเจนและก๊าซอื่น ๆ

2.3) พิมพ์ได้ยาก ในระหว่างการพิมพ์ควรทำการระบายพื้นผิว

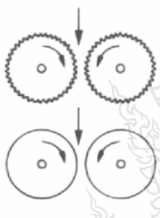
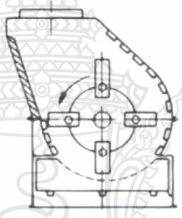
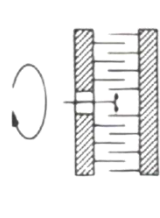
2.3 การเตรียมพลาสติกเพื่อนำเข้ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ [15]

คำว่า “เตรียม” ในเทคนิคการทำงานพลาสติก หมายถึง ขั้นตอนที่สำคัญในการเตรียมพลาสติกซึ่งอยู่ในลักษณะวัตถุดิบให้พร้อมที่จะนำมาผลิตเป็นชิ้นได้ ซึ่งประกอบด้วยการทำเป็นเม็ดผสม (Compound) ซึ่งจะทำในขณะที่เป็นของแข็ง หรือผสมขณะที่เป็นของเหลว

2.2.1 การย่อ

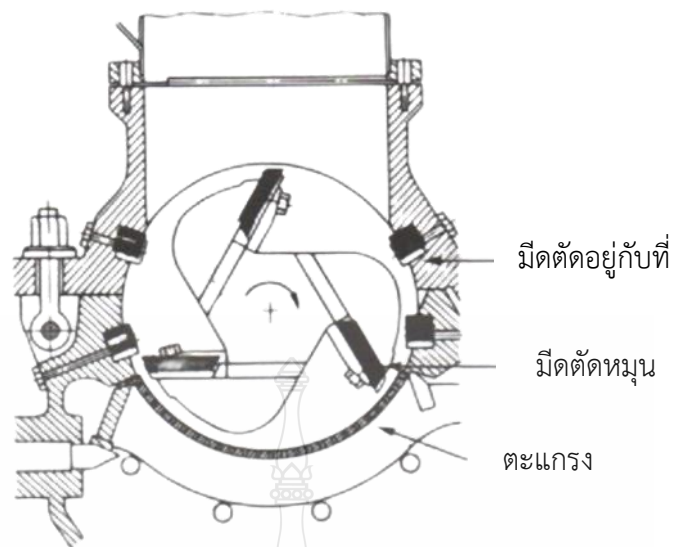
การย่อ หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีกล ในการย่อจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็ก แตกต่างกันตามต้องการ ถ้าจะต้องมีการแยกพลาสติกเม็ด เช่น ทำให้งานขั้นตอนต่อไปสะดวกยิ่งขึ้นจึงต้องมีการกรองประกอบเข้าไปด้วย

เหตุผลที่จำเป็นต้องย่อพลาสติก เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายได้เร็ว เป็นต้น เครื่องย่อพลาสติกมีหลายชนิด ซึ่งสร้างไว้เหมาะกับชนิดของพลาสติก ตัวอย่างเครื่องย่อที่ควรรู้จัก คือ เครื่องรีย่อย โมตี โมกวน โมตัด โมแท่งตี และโมรีด เครื่องรีย่อยจะใช้สำหรับการย่อพลาสติกแข็งเปราะได้เท่านั้น สำหรับการย่อจะต้องใช้โม่บดในการที่จะเลือกใช้โม่ชนิดใดขึ้นอยู่กับว่าต้องการความละเอียดหรือความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติกขนาดไหน ดังรูปที่ 2.2 เครื่องย่อพลาสติกแบบต่าง ๆ

เครื่อง	เครื่องรีย่อย	โมตี	โมตัด	โมแท่งตี
สภาพของพลาสติก				
เปราะ				
เหนียว				
Elastic				
เหมาะสำหรับ	PS, PF	PS, PF, PMMA	PVC, PE, PP, PA	PVC, PE, PF

รูปที่ 2.2 เครื่องย่อพลาสติกแบบต่าง ๆ [15]

ลักษณะการทำงานของเครื่องย่อต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.2 แตกต่างกัน ดังเช่นเครื่องย่อใช้แรงอัด โมตัดใช้การตัดเฉือน และเครื่องโมแท่งตีใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี เนื่องจากโมตัดมีใช้มากในการย่อพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้ในการย่อพลาสติก หรือขึ้นทดสอบที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.3 โม่ตัด [15]

รูปที่ 2.3 เป็นโม่ตัดซึ่งประกอบด้วยเรือนเหล็กหล่อที่มั่นคง มีคมตัดติดอยู่กับเรือน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่ วัสดุที่จะตัดส่งเข้าทางปล่องข้างบนตรงกลางจะเป็นเพลาสซึ่งมีมีดตัดอยู่ 3 เล่ม เศษพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมีดหมุนจับ และนำไปตัดกับมีดซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่อง โดยเครื่องจะทำงานซ้ำ ๆ ไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงได้ ความเร็วตัดอยู่ระหว่าง 12 - 14 m/s ระยะห่างระหว่างมีดหมุนและมีดอยู่กับที่ประมาณ 0.25 - 0.5 mm โม่ตัดมีขนาดทำงานได้ตั้งแต่ 10 kg/h จนถึง 2,500 kg/h

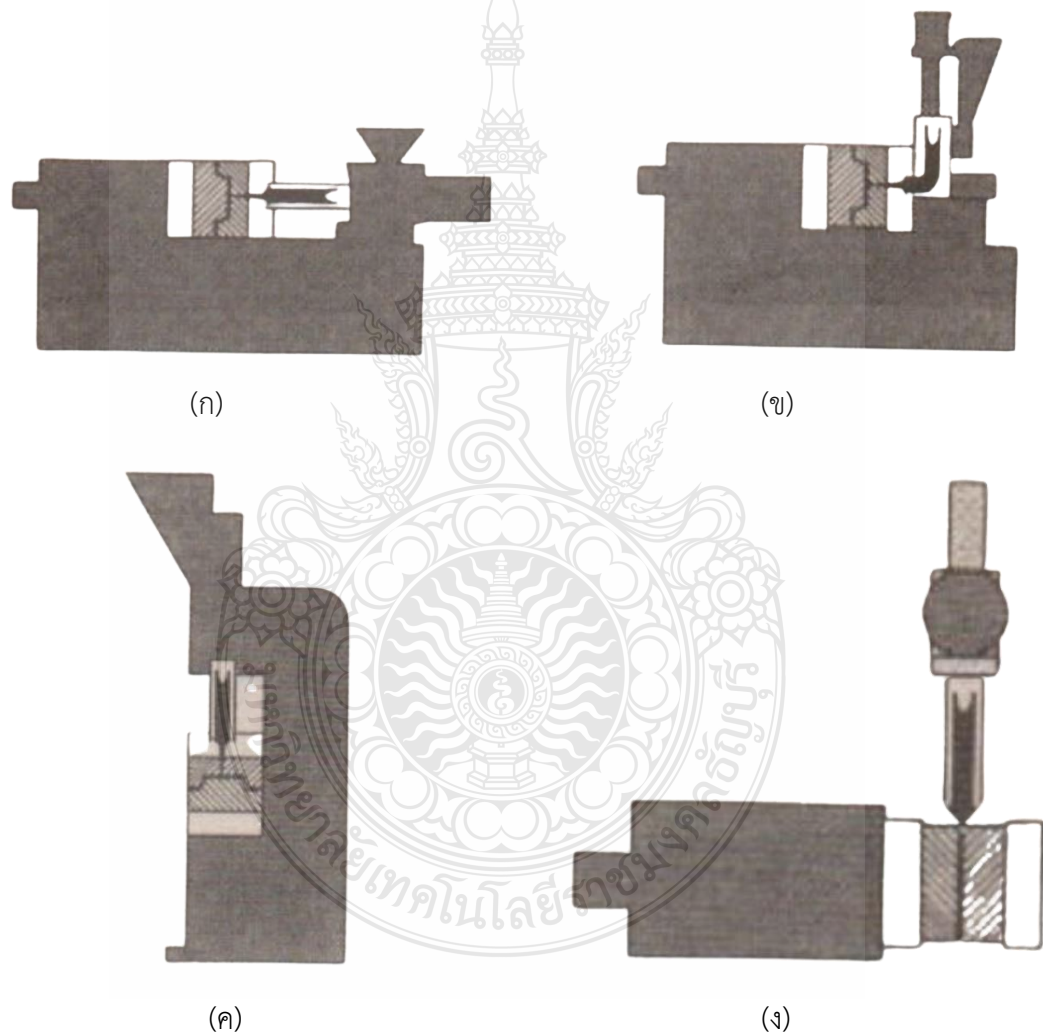
2.4 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการฉีด [16]

กรรมวิธีในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้น โดยทั่วไปแล้วทางโรงงานพลาสติก สามารถกระทำได้หลายกรรมวิธี ด้วยกัน เช่น การอัดรีด (Extrusion) เพื่อผลิตชิ้นงานต่างๆ ทั้งกลวงและตัน เช่น ท่อ สายยาง กรอบประตู หน้าต่าง และชิ้นงานพลาสติกอื่นๆ กรรมวิธีการเป่าถุงและฟิล์ม (Blown Film) กรรมวิธีเป่าภาชนะกลวง (Blow Moulding) กรรมวิธีการขึ้นรูปจากแผ่นฟิล์มพลาสติก (Thermoforming) กรรมวิธีการรีด (Calendering) การที่จะเลือกใช้กรรมวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะของชิ้นงานพลาสติก ชนิดของพลาสติก และความสะดวกรวดเร็วในการผลิต แต่กรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นิยมใช้มากในปัจจุบันก็คือ การฉีดพลาสติก (Injection Molding) เพราะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีและได้หลายลักษณะงาน เช่น ตะกร้าหูเหล็ก ถาดเพาะกล้า ลังพลาสติก กรรมวิธีการทำงานก็ไม่ค่อยยุ่งยากมากนัก และใช้พื้นที่โรงงานพลาสติกไม่มากเหมือนกรรมวิธีการผลิตแบบอื่นนอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้กับพลาสติกที่มีลักษณะทั้งเม็ดและผงและเกร็ด และกับพลาสติกทุกประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เทอร์โมเซต (Thermosets) และ

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) และมีอีกกรรมวิธีหนึ่งที่ปัจจุบันกำลังเริ่มคือ ปริ้นเตอร์สามมิติ (Printer 3d) แต่ในปัจจุบันยังไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนักเพราะตัวเครื่องแพงและขั้นตอนในการผลิตเข้า
 เหมาะกับผลิตชิ้นงานพลาสติกจำนวนไม่เยอะเหมาะกับการใช้ตามบ้านไม่เหมาะกับการผลิตจำนวนมาก ๆ
 อย่างโรงงานพลาสติก แต่มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องมีแม่พิมพ์ (Mold)

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก [16]

เครื่องฉีดพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสมกับ
 การทำงานและลักษณะชิ้นทดสอบที่ต้องการฉีด โดยสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของทิศทางการฉีด
 พลาสติกเข้าแม่พิมพ์ได้เป็น 4 แบบตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเครื่องฉีดพลาสติก [16]

จากรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายได้ดังนี้

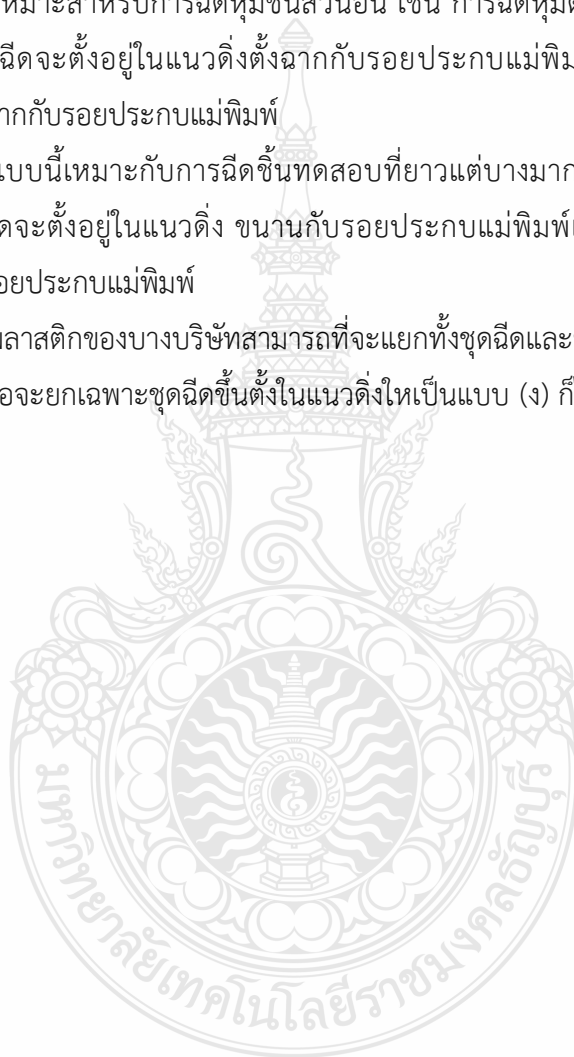
แบบ (ก) เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยชุดฉีดจะวางอยู่ตามแนวนอน ตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์ และพลาสติกเหลวจะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ตามรอยตั้งฉากประกบกับแม่พิมพ์

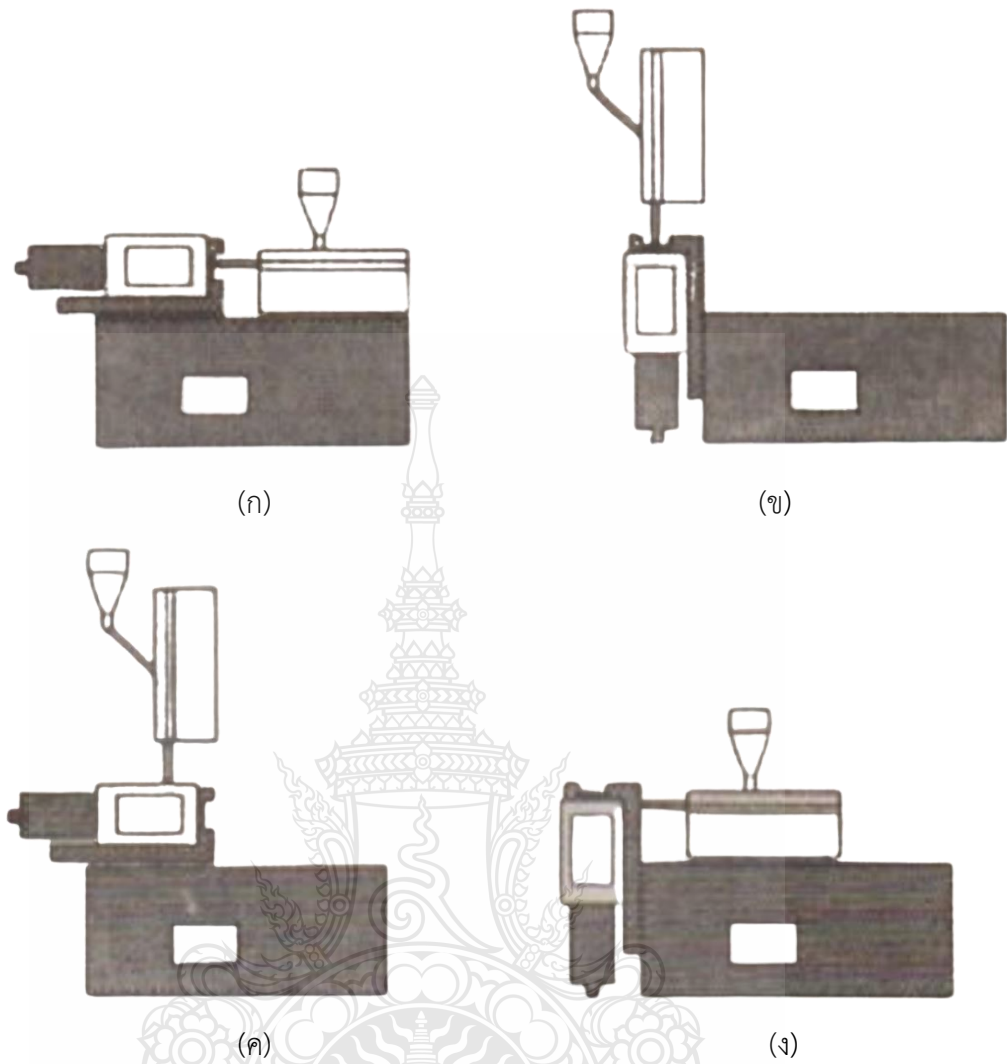
แบบ (ข) ถูกออกแบบมาเพื่อให้่ายต่อการทำงาน โดยชุดฉีดจะถูกยกขึ้นให้อยู่ในแนวตั้ง และพลาสติกเหลวจะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ตามแนวตั้งฉากกับรอยแม่พิมพ์

แบบ (ค) เหมาะสำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนอื่น เช่น การฉีดหัวดำมไขควง ดำมมีด ดำมประแจ หกเหลี่ยม โดยชุดฉีดจะตั้งอยู่ในแนวตั้งตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์ พลาสติกเหลวจะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ในแนวตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์

แบบ (ง) แบบนี้เหมาะกับการฉีดขึ้นรูปทดสอบที่ยาวแต่บางมาก ๆ ซึ่งพลาสติกจะไหลได้ดีกว่าแบบ (ก) โดยชุดฉีดจะตั้งอยู่ในแนวตั้ง ขนานกับรอยประกบแม่พิมพ์และพลาสติกเหลวจะถูกฉีดลงในแนวตั้งเข้าตามรอยประกบแม่พิมพ์

เครื่องฉีดพลาสติกของบางบริษัทสามารถที่จะแยกทั้งชุดฉีดและชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์จากแบบ (ก) ให้เป็นแบบ (ค) หรือจะยกเฉพาะชุดฉีดขึ้นตั้งในแนวตั้งให้เป็นแบบ (ง) ก็ได้ ดังรูปที่ 2.5

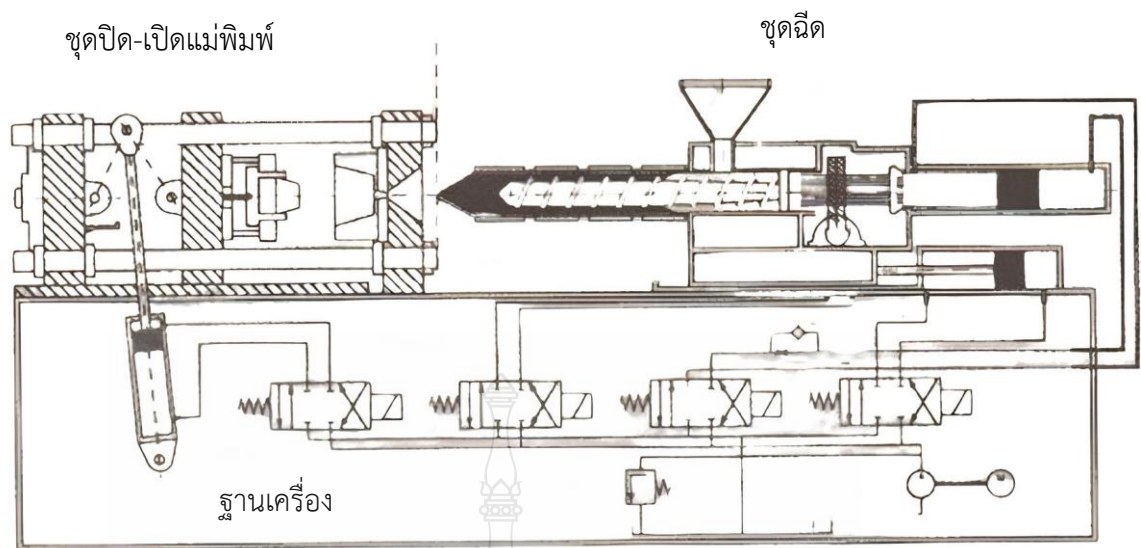




รูปที่ 2.5 ลักษณะของเครื่องฉีดพลาสติกที่สามารถปรับยกชุดฉีดหรือชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ได้ [16]

2.4.2 โครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก

เครื่องฉีดพลาสติกโดยทั่ว ๆ ไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ ๆ 3 ส่วนคือ 1. ชุดฉีด (Injection Unit) 2. ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) และ 3. ฐานเครื่อง (Base)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก [16]

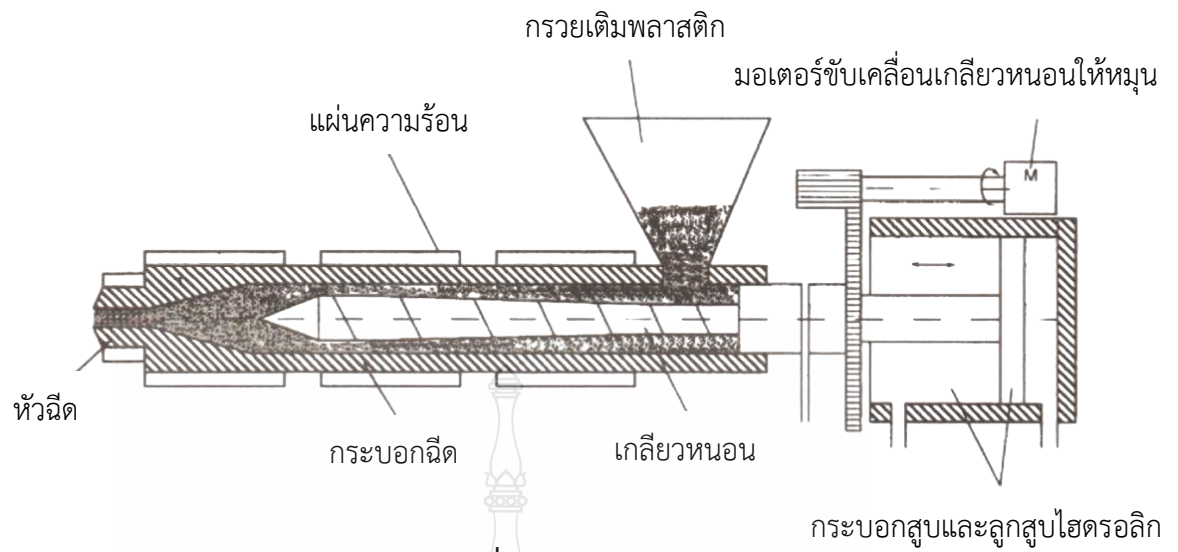
1) ชุดฉีด (Injection Unit)

ชุดฉีดจะทำหน้าที่หลายอย่างดังนี้คือ

1.1) การดึงพลาสติกเข้ากระบอกลัด วัสดุพลาสติกสภาพเย็นในลักษณะผงหรือเม็ด ซึ่งบรรจุอยู่ในกรวยเติม จะถูกดึงเข้าสู่กระบอกลัดด้วยการหมุนรอบตัวเองของเกลียวหนอน

1.2) การหลอมเหลวและหมุนส่งพลาสติก พลาสติกที่ถูกดึงเข้ามาในกระบอกลัดแล้วจะถูกลำเลียงต่อไปเรื่อย ๆ ยังหน้าปลายเกลียวหนอนพร้อมกับการหลอมเหลวของพลาสติก เมื่อได้ปริมาณของพลาสติกเหลวตามที่ต้องการแล้ว เกลียวหนอนก็จะหยุดหมุน

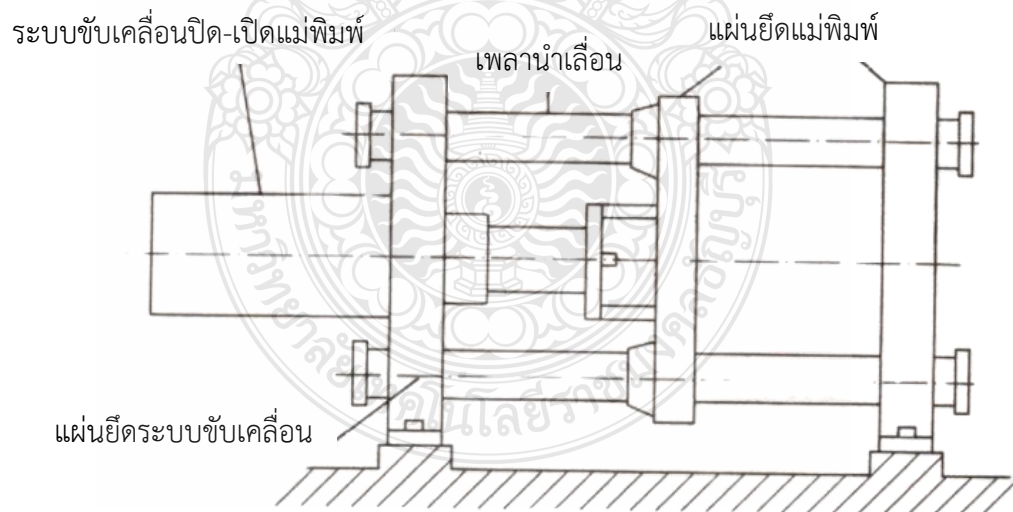
1.3) การฉีดอัดรักษาความดัน เกลียวหนอนจะเคลื่อนที่ตามแนวแกนด้วยความเร็วสูงเพื่ออัดพลาสติกที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน พลาสติกเหลวก็จะวิ่งเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์จนกระทั่งเต็มในแม่พิมพ์ และเกลียวหนอนก็ยังคงค้างอยู่ด้วยความดันที่พอเหมาะเพื่ออัดพลาสติกในแม่พิมพ์ให้แน่น



รูปที่ 2.7 ชุดฉีด [16]

2) ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)

ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ ประกอบไปด้วย 1. แผ่นยึดแม่พิมพ์ (ด้านเคลื่อนที่และอยู่กับที่) 2. เพลาหน้าเลื่อน 3. ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ และ 4. แผ่นยึดระบบขับเคลื่อน



รูปที่ 2.8 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ [16]

หน้าที่ของชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์

1.1) แผ่นยึดแม่พิมพ์

ตามปกติแผ่นยึดแม่พิมพ์ทั้งสองข้างจะมีรูเกลียวอยู่เป็นจำนวนมาก ขนาดและระยะห่างระหว่างรูเกลียวก็ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องฉีด และบริษัทผู้ผลิต แผ่นยึดแม่พิมพ์ยังจำเป็นต้องมีรูคว้านซึ่งมีศูนย์รวมกันกับหัวฉีดและแผ่นหน้าแปลนประกอบศูนย์ของแม่พิมพ์ แผ่นยึดแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่จะถูกยึดติดตายอยู่ทางด้านชุดฉีด ส่วนแผ่นยึดแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่จะเป็นตัวเลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์เอง

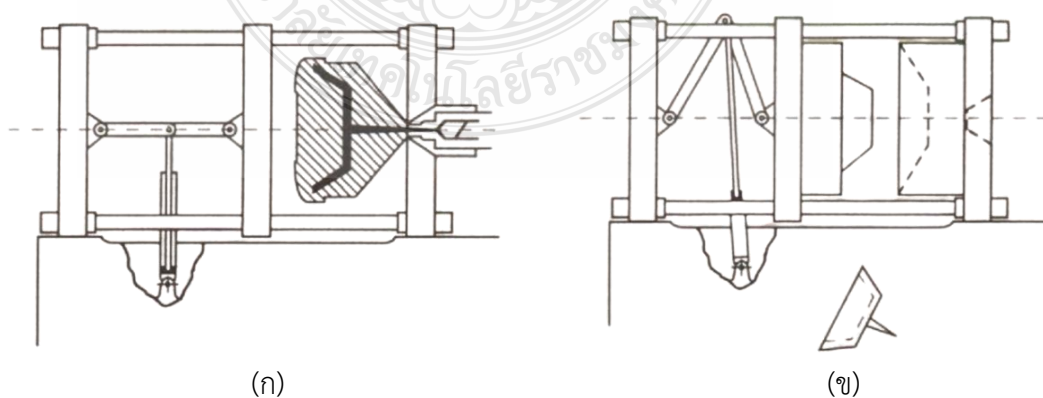
1.2) เพลานำเลื่อน

เพลานำเลื่อนนี้จะทำหน้าที่ประกอบแผ่นยึดแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่ ให้สามารถเลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ได้อย่างสะดวกและเที่ยงตรง ตลอดจนรับน้ำหนักของแผ่นยึดแม่พิมพ์ และตัวแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังช่วยรับแรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์ด้วย เพลานำเลื่อนจะมีอยู่ 2 หรือ 4 เพลาก็ได้ ขนาดและระยะห่างของเพลาก็แตกต่างกันออกไปตามขนาดของเครื่อง และบริษัทผู้ผลิต

1.3) ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์

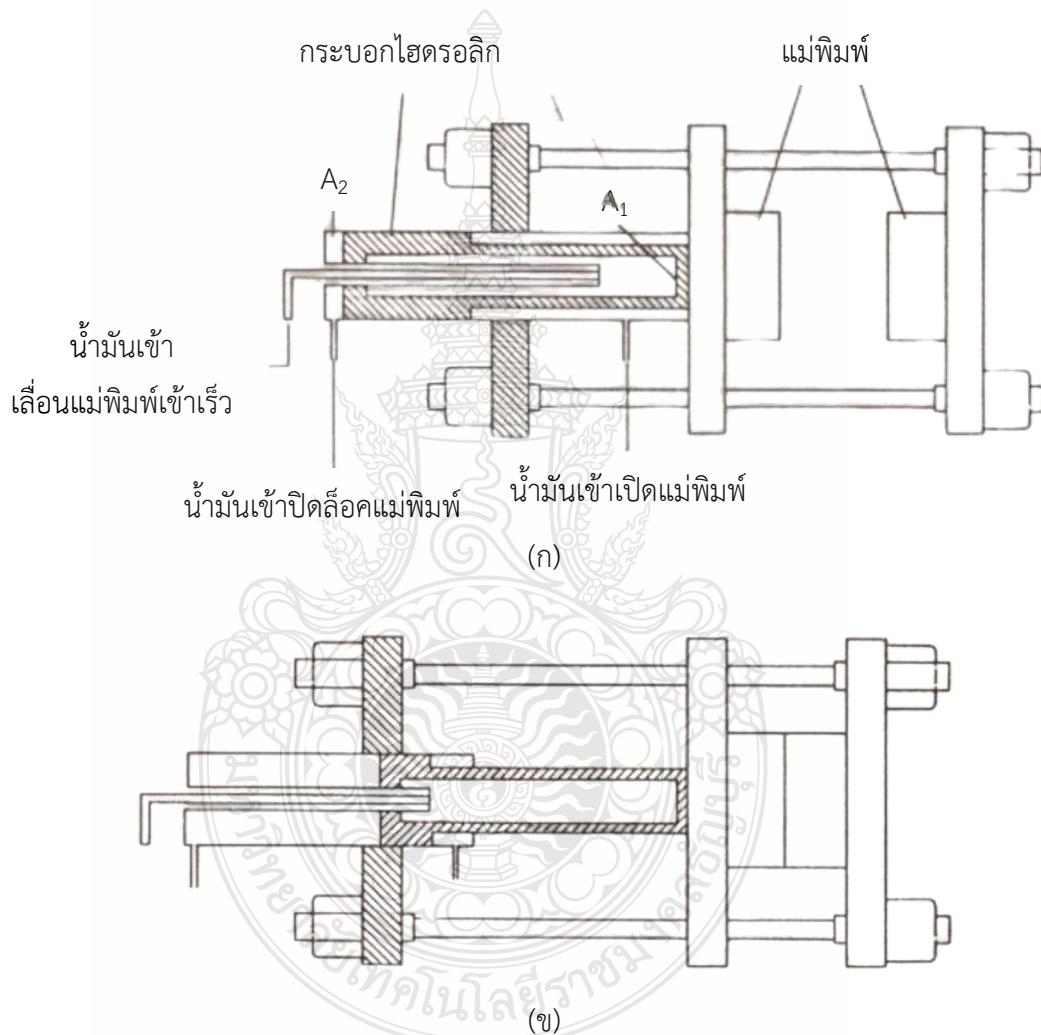
ระบบขับเคลื่อนเพื่อปิด-เปิดแม่พิมพ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1.3.1) แบบแมคคานิค (Mechanic) โดยจะมีข้อพับเป็นตัวปิด-เปิดแม่พิมพ์ซึ่งได้กำลังขับเคลื่อนมาจากกระบอกสูบไฮดรอลิก ด้วยเหตุนี้แรงที่เกิดขึ้นในการปิดล็อกแม่พิมพ์เพื่อป้องกันแม่พิมพ์ฝอยนั้นตัวข้อพับจะรับไปทั้งหมดเมื่ออยู่ในตำแหน่งเหยียดตรง ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบนี้จะทำงานได้ค่อนข้างช้า การปรับแรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์สามารถกระทำได้โดยการเลื่อนข้อพับให้อยู่ตำแหน่งที่แตกต่างกัน กล่าวคือข้อพับเหยียดออกตรงจะให้แรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์มากที่สุด และแรงจะลดลงเมื่อข้อพับหุบเข้ามาหรืออยู่ในตำแหน่งอื่น ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบแมคคานิค [16]

1.3.2) แบบไฮดรอลิก (Full Hydraulic) ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์นี้ จะใช้กำลังในการขับเคลื่อนและปิดล็อกแม่พิมพ์ด้วยกระบอกสูบไฮดรอลิกโดยตรง ด้วยเหตุนี้แรงที่ใช้ ในการปิดล็อกแม่พิมพ์เพื่อป้องกันแม่พิมพ์เด้งนั้นสามารถปรับได้ตามต้องการ แม้กระทั่งความเร็ว ในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ก็สามารถปรับได้หลายชั้นความเร็วแต่ส่วนใหญ่จะมี 3 ชั้น ความเร็ว ในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ด้วยระบบไฮดรอลิกแบบนี้จะช่วยให้การทำงานเร็วขึ้น และยืดอายุการใช้งาน ของเครื่องฉีดพลาสติกระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิกแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก [16]

1.3.3) แผ่นยึดระบบขับเคลื่อน

แผ่นยึดนี้จะอยู่ทางด้านท้ายสุดของเครื่องฉีด โดยจะทำหน้าที่ยึดยึดข้อพับหรือกระบอกสูบไฮดรอลิกก็ได้ และยังทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงปิดล็อกแม่พิมพ์โดยตรง โดยมีเพลานำเลื่อนช่วยอยู่ด้วย ในระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบแมคคานิค แผ่นยึดนี้จะไม่ยึดแน่นตายตัว

ติดกับฐานเครื่อง เพราะจะต้องยอมให้เคลื่อนที่ได้ ในกรณีที่ต้องการปรับระยะปิดแม่พิมพ์ (เมื่อความสูงของแม่พิมพ์เปลี่ยนไป) แต่ในระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิกแผ่นยึดนี้จะถูกยึดแน่นตายตัวติดอยู่กับฐานเครื่อง เพราะว่าการปรับระยะปิดแม่พิมพ์สามารถปรับได้โดยตรงที่แกนไฮดรอลิกด้วยเหตุนี้ แผ่นยึดนี้จึงมีโอกาสน้อยหลังกลับได้ ในระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบแมคานิก ทำให้แม่พิมพ์มีโอกาสเผยออกและเกิดครีบขึ้นได้ที่ขึ้นทดสอบ

3) ฐานเครื่อง (Base)

ฐานเครื่องส่วนใหญ่จะเป็นโครงเหล็กเหนียวที่ได้รับการเชื่อมประกบ โดยทำหน้าที่คอยรับน้ำหนักของชุดฉีด และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ และยึดติดอุปกรณ์ไฮดรอลิกทั้งหมด ตลอดจนทำหน้าที่เป็นถังบรรจุน้ำมันไฮดรอลิกด้วย

2.4.3 ขั้นตอนพื้นฐานในการฉีดพลาสติก [17]

การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกจะมีการทำงานอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ แบบไม่เป็นอัตโนมัติ (Manual) ซึ่งจะสั่งให้เครื่องทำงานในขั้นตอนใดก่อนหลังก็ได้ตามที่ต้องการ แบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic) ซึ่งการทำงานจะเป็นไปตามขั้นตอนของเครื่องฉีดเพียงรอบการทำงานเดียวเท่านั้นแล้วหยุด และแบบอัตโนมัติทั้งหมด (Fully – Automatic) จะมีการทำงานเป็นไปตามขั้นตอนของเครื่องฉีด โดยเมื่อครบรอบการทำงานของเครื่องฉีดแล้ว ก็เริ่มวงจรรอบการทำงานใหม่ทันที และทำต่อไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติและแบบอัตโนมัติทั้งหมดจะมีขั้นตอนพื้นฐานในการฉีดพลาสติกประกอบไปด้วย 9 ขั้นตอน คือ

1) ขั้นตอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิด โดยจะมีพารามิเตอร์คือ ความดัน (แรง) ความเร็ว และระยะทางในการเคลื่อนที่ปิดเข้าหากันของแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนมากจะแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่แม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่ เคลื่อนที่เข้าไปหาแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่ โดยใช้ความเร็วที่ช้าเป็นระยะสั้น ๆ ช่วงที่สองเป็นช่วงแม่พิมพ์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นเป็นระยะทางยาว ๆ ช่วงที่สามเป็นช่วงที่แม่พิมพ์กำลังลดความเร็วลงในระยะที่เหลือไม่มากนัก ช่วงที่สี่เป็นช่วงป้องกันแม่พิมพ์เกิดความเสียหายก่อนที่แม่พิมพ์จะปิดสนิท และช่วงที่ห้าเป็นช่วงที่แม่พิมพ์ปิดสนิทหรือเรียกว่า ช่วงปิดล็อกแม่พิมพ์ ด้วยความดันหรือแรงที่สูงมาก

2) ขั้นตอนชุดฉีดหรือหัวฉีดเคลื่อนที่เข้าชนและแนบกับแม่พิมพ์ โดยจะมีพารามิเตอร์คือ ความดัน (แรง) และความเร็ว

3) ขั้นตอนสกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนโดยไม่มีการหมุน เพื่อขับเคลื่อนพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกฉีดให้ไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปให้เต็มแม่พิมพ์ซึ่งเรียกว่า จังหวะฉีด (Injection Phase) โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลัก ๆ คือ ความเร็วฉีด ความดันฉีด ระยะทางการฉีด เวลาในการฉีด และผู้ผลิตเครื่องฉีดพลาสติกบางบริษัทได้ออกแบบให้สกรูสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกนพร้อมกับหมุนไปด้วย เพื่อป้องกันพลาสติกไปพร้อมกับการฉีด ทำให้สามารถฉีดขึ้นทดสอบที่มีปริมาตรและน้ำหนักมากกว่าปกติได้

4) ขั้นตอนสกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนโดยไม่มีการหมุน เพื่อขับเคลื่อนพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์เพิ่มเติมหลังจากที่พลาสติกเหลวเติมในแม่พิมพ์แล้ว ทั้งนี้ เพื่อรักษาความดันให้พลาสติกในแม่พิมพ์มีความหนาแน่นตามที่ต้องการที่เรียกว่า ช่วงการย่ำ (Holding Phase) ขึ้นทดสอบจะได้มีขนาดที่เที่ยงตรง และมีความแข็งแรง โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลัก ๆ คือ ความดัน เวลา และความเร็ว (สำหรับเครื่องฉีดพลาสติกบางรุ่นหรือบางยี่ห้อ)

5) ขั้นตอนที่สกรูเริ่มหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกในกรวยเติมเม็ดพลาสติก พร้อมทั้งป้อนไปข้างหน้าของสกรูเพื่อทำการหลอมผสมและป้อนพลาสติกเหลวไปอยู่หน้าปลายสกรูฉีด ซึ่งเรียกว่า จังหวะ Plasticizing โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน (แรง) ความเร็ว ระยะทาง โดยจังหวะการทำงานนี้จะเป็นตัวกำหนดปริมาณเนื้อพลาสติกเหลวหรือระยะถอยสกรู (ระยะตั้งเนื้อพลาสติก) ตามที่ต้องการ เนื่องจากเวลาที่สั่งให้สกรูหมุนนั้น พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายสกรูจะเกิดแรงดันจนทำให้สกรูถอยหลังกลับไปยังทิศทางของกรวยเติมเม็ดพลาสติกได้ และในหน้าปลายสกรูฉีดให้มีค่าคงที่ที่เรียกว่า Back Pressure ตลอดจึงมีการกระตุ้นสกรูให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนเท่านั้น ในช่วงก่อนเริ่มต้น สกรูหมุนและ/หรือเมื่อสกรูหยุดหมุนแล้วที่เรียกว่า Suck Back หรือ Pull Back หรือ Decompression

6) ขั้นตอนการหล่อเย็นพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์ให้เปลี่ยนจากพลาสติกเหลวเป็นของแข็ง โดยจะทำงานพร้อมกับการเริ่มหมุนสกรูเพื่อหลอมและป้อนพลาสติกเหลวไปหน้าปลายสกรูฉีดขั้นตอนที่ 5 โดยขั้นตอนที่ 5 และ 6 นี้ จะเริ่มทำงานพร้อมกันเมื่อสิ้นสุดเวลาในการย่ำรักษาความดันแล้ว

7) ขั้นตอนชุดฉีดหรือหัวฉีดเคลื่อนที่ถอยออกจากแม่พิมพ์ จะทำงานเมื่อสกรูหยุดเคลื่อนที่แล้ว กล่าวคือหยุดหมุนและหยุดถอยแล้ว โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน (แรง) และความเร็ว

8) ขั้นตอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่เปิด เวลาในการหล่อเย็นจากขั้นตอนที่ 6 นั้นหมดลงแล้ว โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน (แรง) ความเร็ว และระยะทาง ความเร็วและระยะทางในการเปิดแม่พิมพ์ส่วนมากจะมีอยู่ 3 ความเร็วและ 3 ระยะทางด้วยกัน โดยความเร็วแรกเป็นช่วงที่แม่พิมพ์เริ่มเคลื่อนที่แยกออกจากกัน ควรใช้ความเร็วที่ช้า ๆ และเป็นระยะสั้น ๆ ให้ขั้นตอนฉีดสามารถขยับตัวเคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่และติดออกมากับแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นจึงใช้ความเร็วจังหวะที่สองให้เร็วขึ้นและเป็นระยะทางที่ยาวขึ้นด้วย ความเร็วในช่วงที่สามซึ่งเป็นความเร็วสุดท้ายก่อนจะถึงตำแหน่งที่แม่พิมพ์เปิดมากที่สุด ควรใช้ความเร็วที่ช้าลงและระยะทางสั้น ๆ เพื่อให้แม่พิมพ์สามารถหยุดได้ตรงตามตำแหน่งโดยไม่เกิดการสั่นสะเทือน ส่วนระยะในการเปิดแม่พิมพ์ก็ไม่ควรตั้งกว้างมากเกินไป แคพอให้ขั้นตอนฉีดไม่ติดค้างอยู่ที่หน้าแม่พิมพ์หลังจากทำการกระทุ้งแล้ว หรือสามารถใช้มือหรือแขนกลจับออกมาได้ก็เพียงพอแล้ว

9) ขั้นตอนการกระทุ้งขั้นตอนฉีดให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ โดยจะมีพารามิเตอร์ของความเร็ว ความดัน ระยะทาง และจำนวนครั้งในการกระทุ้ง

หมายเหตุ : ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 7 ซึ่งเป็นขั้นตอนในการเคลื่อนที่ของชุดฉีดเข้าหาและเคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์นั้น อาจจะไม่ต้องใช้ในการทำงานจริง เพื่อเป็นการลดเวลาและขั้นตอนในการผลิต แต่จะมีข้อดีและข้อเสียอยู่บ้าง

2.5 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation) [18]

ในการนำพอลิเมอร์มาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ นั้นนอกจากจะคำนึงถึงความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การนำไปผลิตเป็นภาชนะ การนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนในยานยนต์ การผลิตเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ฯลฯ ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยปัจจัยต่าง ๆ เป็นสิ่งที่ต้องนำมาประกอบการพิจารณาด้วยเสมอ ซึ่งสำหรับความเสื่อมสภาพหรือการแตกสลายของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation) จะหมายถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ซึ่งมีสาเหตุสำคัญจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือแรงทางกายภาพที่มากระทำให้เกิดการขาดจากกันของพันธะเคมีที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างมอนอเมอร์ที่ประกอบกันขึ้นเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ สำหรับปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ซึ่งจะกล่าวถึง ได้แก่ การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากความร้อน (Thermal Degradation) การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากแรงเชิงกล (Mechanical Degradation) หรือการแตกสลายเชิงกล และการเสื่อมสภาพพอลิเมอร์จากชีวภาพ (Biodegradation)

2.5.1 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากความร้อน (Thermal Degradation)

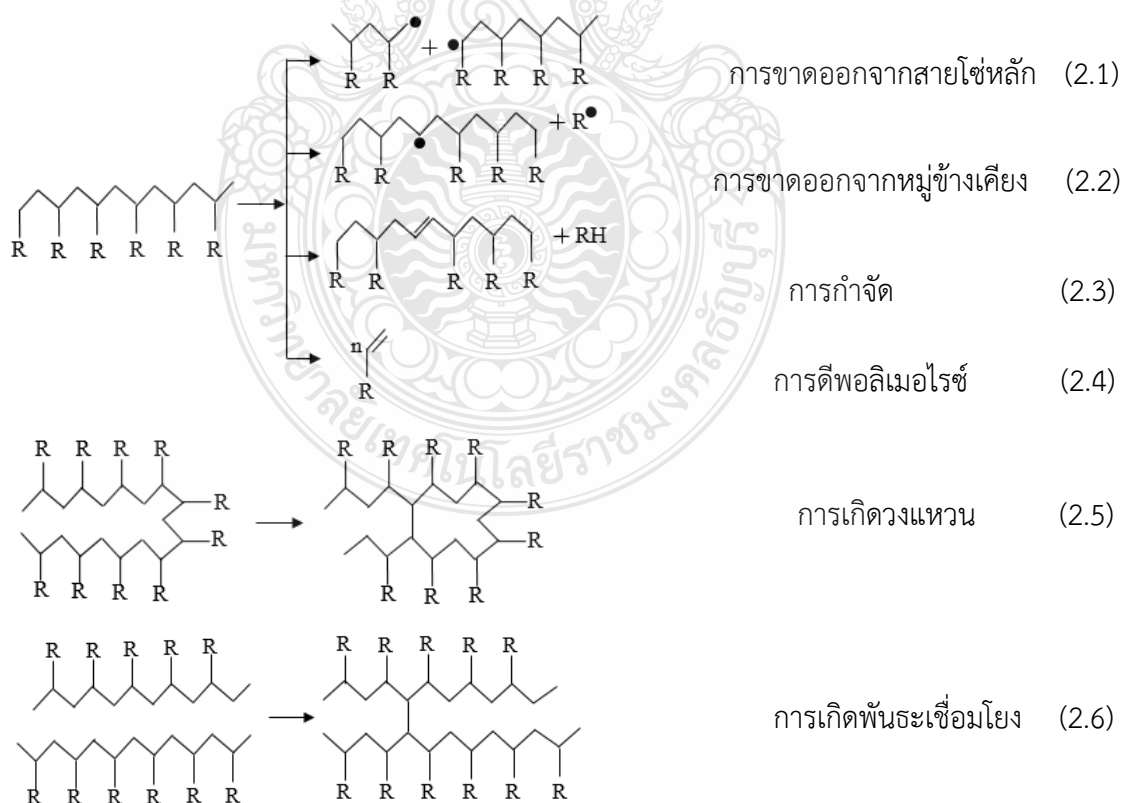
การเสื่อมสภาพจากความร้อน (Thermal Degradation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์สูงขึ้นโดยไม่มีสารเคมีตัวใดตัวหนึ่งมาทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะแยกระหว่างการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนจากการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Thermochemical Degradation) ทั้งนี้เนื่องจากว่าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันปัจจุบัน มีการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้พอลิเมอร์มีสมบัติตามความต้องการเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิเพียงพอ จะทำให้สารเคมีที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยปกติแล้วพอลิเมอร์จะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอมด้วยพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้นถ้าความร้อนที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานสลายพันธะที่ยึดเหนี่ยวอะตอมแต่ละอะตอมไว้ด้วยกัน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 150-400 kJ/mol อุณหภูมิ 25 °C จะส่งผลให้อะตอมหลุดออกจากกันได้ ส่งผลให้มีการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์

สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์มีการเสื่อมสภาพจะอยู่ระหว่าง 400 - 600 °C อย่างไรก็ตามที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150-300°C สารเคมีที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาโดยปฏิกิริยาที่มักพบคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยการเกิดปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องนี้

มีชื่อว่า การเสื่อมสภาพด้วยความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Thermo-Oxidative Degradation)

1) กลไกการเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากความร้อน

สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างที่พอลิเมอร์มีการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนนั้นปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นก็คือ การที่พันธะเคมีที่เชื่อมต่อกันระหว่างคาร์บอนอะตอมในสายโซ่หลัก และสายโซ่ที่เป็นกิ่งมีการขาดหรือหลุดออกจากกัน ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง นอกจากนั้นแล้วจะได้แก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ สำหรับปฏิกิริยาที่พบในสายโซ่หลักที่พบได้แก่ ปฏิกิริยาการกำจัด (Elimination) และปฏิกิริยาการเกิดวง (Cyclization) ในบางกรณีที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง จะพบว่ามีการเกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นภายในสายโซ่หลักโดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของมวลโมเลกุล แต่ในพอลิโอฟิเลฟินที่มีโครงสร้างสายโซ่เป็นเส้นตรงจะพบว่าการแตกตัวหรือตัดขาดออกของพันธะในสายโซ่หลักทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมอนอเมอร์จำนวนมาก ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะพบในกรณีอุณหภูมิที่ให้กับสายโซ่พอลิเมอร์มีค่าสูงมาก โดยปรากฏการณ์นี้มีชื่อเรียกว่า ดีพอลิเมอไรเซชัน (Depolymerization) สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยานี้จะเรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่อนุมูลอิสระ เพื่อทำให้ง่ายต่อการเข้าใจในกลไกการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยความร้อนนี้จะเป็นการเสื่อมสภาพโดยไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยจะเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ R เป็นหมู่แทนที่



รูปที่ 2.11 แสดงสมการปฏิกิริยาการเสื่อมสลายด้วยความร้อนแบบต่าง ๆ [18]

การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ที่พบอีกแบบก็คือ การเสื่อมสภาพด้วยความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจน (Thermal Oxidation) สามารถเขียนแสดงเป็นปฏิกิริยาได้ดังนี้

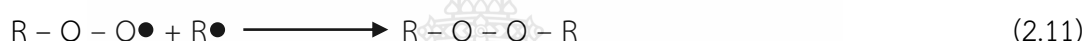
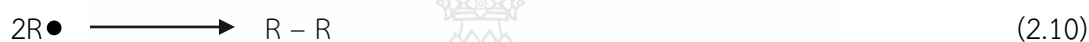
ขั้นริเริ่ม



ขั้นแผ่ขยาย



ขั้นสิ้นสุด



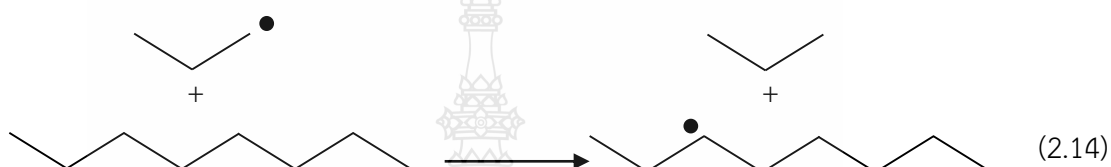
2.5.2 การเสื่อมสภาพพอลิเมอร์จากแรงเชิงกล

การเสื่อมสภาพพอลิเมอร์จากแรงเชิงกลเป็นการเสื่อมสภาพที่ถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งลักษณะที่สังเกตได้คือ การแตกหัก การฉีกขาด ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างพอลิเมอร์นอกจากนี้แล้วยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีการลดลงไปจากเดิม ลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นนี้เกิดเนื่องจากพอลิเมอร์ได้รับความเค้นเชิงกล (Mechanical Stress) ซึ่งได้แก่ การบิด การตัด การเจาะ การหัก การดึง การสับ ฯลฯ นอกจากนี้แล้วการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากแรงเชิงกล หรือแรงเฉือนจะทำให้เกิดการขาดกันหรือการหลุดออกของพันธะในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ยังจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระตามตัวการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในกรณีที่มีแก๊สออกซิเจน โดยการเสื่อมสภาพลักษณะนี้จะเรียกว่าการเสื่อมสภาพเคมีเชิงกล (Mechanochemical Degradation) จากการศึกษาพบว่าเสื่อมสภาพแบบนี้จะทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมสาเหตุของการเสื่อมสลายเคมีเชิงกลนั้นมาจากการที่พอลิเมอร์ได้รับความเค้นเชิงกลหรือคลื่นอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics Radiation) อย่างไรก็ตามการเกิดขึ้นของอนุมูลอิสระจากแรงเชิงกลจะพบเฉพาะในสารจำพวกพอลิเมอร์ไม่พบใน สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ

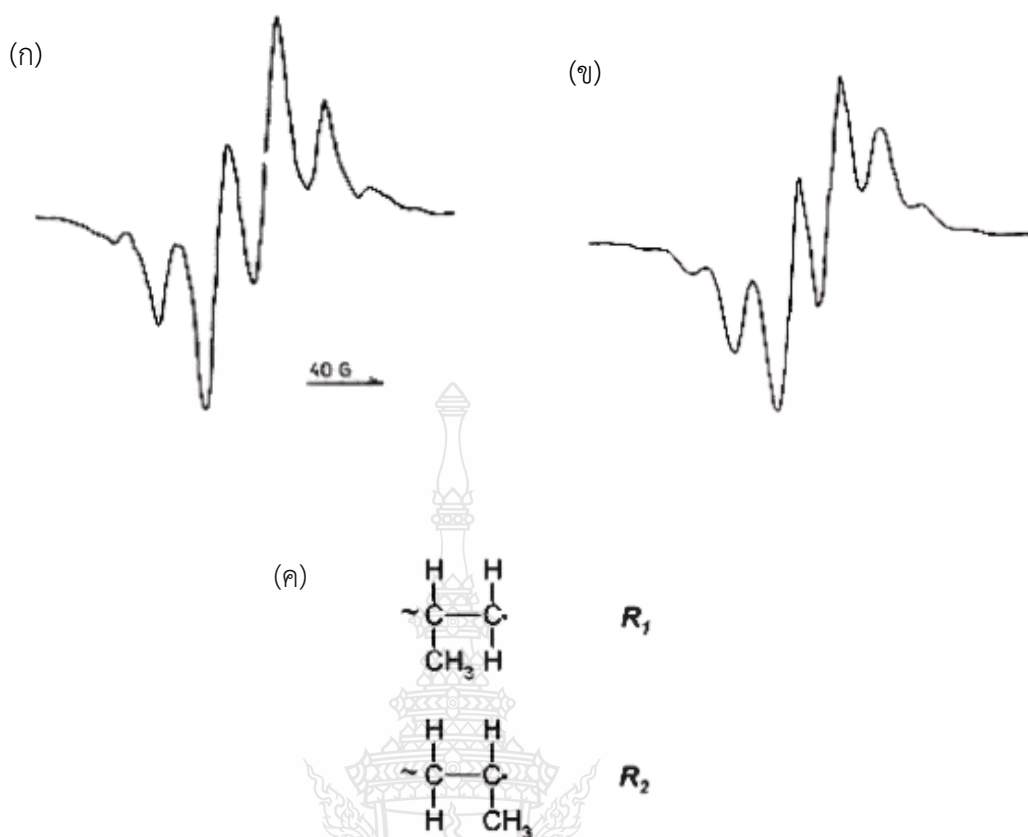
1) กลไกการเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากแรงเชิงกล

การเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยแรงเชิงกลจะสามารถแยกออกได้เป็น 3 แบบตามสถานะของพอลิเมอร์หรือลักษณะของพอลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ พอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง (Solid State) พอลิเมอร์สถานะคล้ายยาง (Rubber State) และสถานะหลอมเหลว (Melt State) ในสถานะของแข็งการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากรอยฉีกขาดหรือรอยหัก ซึ่งเกิดจากการขาดออก

ของพันธะเคมีของพอลิเมอร์ ในกรณีที่พอลิเมอร์อยู่ในสถานะคล้ายยาง หลอมเหลวหรือสารละลาย การเสื่อมสภาพเชิงกลจะเป็นผลให้ แรงภายในสายโซ่ แรงระหว่างสายโซ่ และสายโซ่ที่เกี่ยวข้องกัน มีการเคลื่อนที่ห่างออกจากกันเป็นผลทำให้พันธะเคมีที่ยึดระหว่างอะตอมหลุดออกจากกัน สำหรับกลไก การเกิดการเสื่อมสภาพจากแรงเชิงกลโดยทั่วไปนั้น จะเกิดเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ได้รับแรงเค้นส่งผลให้เกิด การขาดออกของพันธะเคมีที่เชื่อมต่อระหว่างอะตอมส่งผลให้ได้ สายโซ่สั้นลงโดยที่แต่ละปลายสายโซ่ จะมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้นแสดงดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



จะเห็นว่าในสมการ 2.13 - 2.15 เป็นการเสื่อมสภาพโดยไม่มีออกซิเจน เข้ามาเกี่ยวข้องถ้าในกรณีที่มียกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นเช่นเดียวกับสมการ 2.8 และ 2.9 สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในการศึกษาการหลุดหรือการขาดออกของพันธะเคมีที่อยู่ในสายโซ่ของ พอลิเมอร์มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีด้วยกัน คือ (1) การวัดการขาดออกพันธะเคมีโดยตรงจะใช้วิธีการวัด ด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance, ESR) ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถ หาปริมาณของอนุมูลอิสระที่เกิดการขาดของพันธะเคมีเนื่องจากแรงเชิงกลของสายโซ่พอลิเมอร์หรือ หมู่ข้างเคียง (2) การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยที่น้ำหนักโมเลกุลจะลดลงจากเดิมเป็นหลักฐานยืนยันการขาดของพันธะเคมี ซึ่งวิธีวิเคราะห์ หากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลนี้จะใช้วิธีโครมาโทกราฟี แบบซึมผ่านเจล และ (3) เป็นวิธีทางอ้อม โดยการศึกษาสารมัธ-ยันต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสื่อมสภาพเชิงกลของพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยาเคมี สำหรับตัวรูปแสดงสเปกตรัม ESR ของพอลิโพรพิลีนที่ถูกบดด้วยบอลมิลล์ (Ball Mill) ที่อุณหภูมิ 77 K ในสถานะไม่มีออกซิเจน แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 (ก) ESR ของพอลิโพรพิลีนที่เชื่อมสภาพด้วยการบดด้วยบอลมิลล์ (ข) แบบจำลองของ ESR ที่ได้จากการผสมกันระหว่าง R_1 และ R_2 ในอัตราส่วน 1:1 และ (ค) สายโซ่ที่เป็น R_1 และ R_2 [18]

2) กลไกการเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากคลื่นอัลตราโซนิกส์

คลื่นเหนือเสียง (Ultrasound) จะประกอบไปด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งคลื่นเสียงออกเป็น 2 ลักษณะคือ คลื่นเสียงที่เป็นแบบทำลาย (Destructive) จะมีความถี่สูงคือ 20 - 2 MHz และ คลื่นเสียงแบบไม่ทำลาย จะมีความถี่ต่ำ คือ 5-10 MHz โดยคลื่นเสียงที่มีพลังงานต่ำจะใช้ในทางการแพทย์ ส่วนคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงจะใช้ในกระบวนการชักนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีโดยใช้เสียง (Sonochemical) สมการที่แสดงแรงดันที่เกิดจากคลื่นเหนือเสียง คือ

$$P_A = P_{A,max} \times \sin(2\pi \times f \times t) \quad (2.16)$$

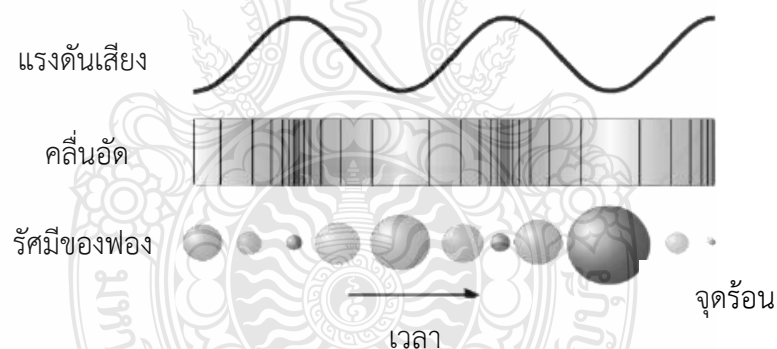
เมื่อกำหนดให้ P_A คือ แรงดันอะคูสติก (Acoustic Pressure)

P_{Amax} คือ อะคูสติกแอมพลิจูด (Acoustic Amplitude)

F คือ ความถี่

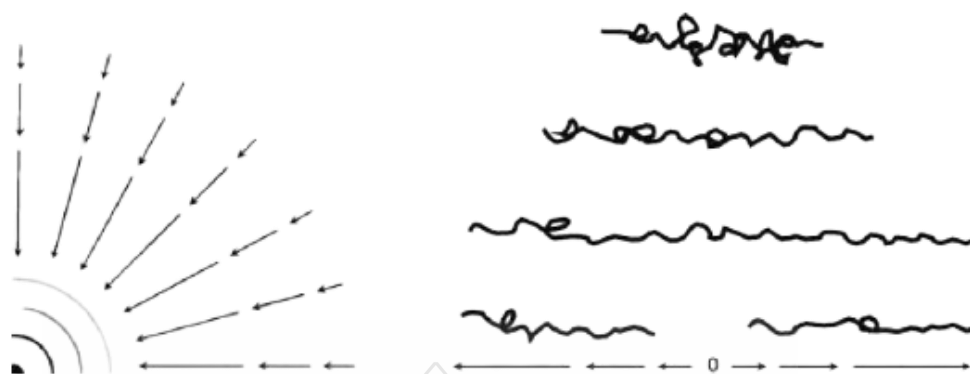
T คือ เวลา

เมื่อของเหลวได้รับคลื่นเหนือเสียงจะส่งผลให้เกิดกระบวนการคาวิเทชัน (Cavitation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของฟองอากาศ และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำโดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของของเหลวมีการสั่นรอบ ๆ แกนกลางของโมเลกุลระหว่างที่มีความดันแบบบวก (Positive) ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลจะลดลง และเมื่อช่วงที่มีความดันแบบลบ (Negative) ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของเหลวจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดฟองอากาศเกิดขึ้น โดยฟองอากาศนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ทุกครั้งที่มีการอัดและการขยาย เมื่อขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่มากพอ ฟองอากาศจะเกิดการแตกตัว ในระหว่างที่ฟองอากาศเกิดการแตกตัวส่งผลให้ของเหลวที่อยู่ใกล้เคียงจะถูกเร่งด้วยแรงกระแทกทำให้โมเลกุลของเหลวเกิดการชนกัน การชนกันระหว่างโมเลกุลของเหลวส่งผลให้เกิดจุด ที่เรียกว่า จุดร้อน (Hot Spot) ซึ่งจุดนี้จะมีอุณหภูมิและแรงดันสูงมาก การเกิดฟองของของเหลวเมื่อผ่านคลื่นเสียงแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิดขึ้นของฟองอากาศและการแตกตัวของฟองอากาศ ส่งผลให้เกิดจุดร้อนเมื่อผ่านคลื่นอัลตราโซนิกส์เข้าไปในของเหลว [18]

ผลของคลื่นเหนือเสียงจะสามารถแบ่ง ออกเป็น 2 กรณี คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและทำให้เกิดแรงเชิงกล ตัวอย่างการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น การเกิดอนุมูลอิสระและโซโนลูมิเนสเซนส์ (Sonoluminescence) ส่วนแรงเชิงกลจะเกิดขึ้นจากแรงกระแทกทำให้เกิดแรงเฉือน ส่งผลให้เกิดการทำ ให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดขาดออกจากกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากการยืดออกของสายโซ่พอลิเมอร์จากการแตกตัวของฟองอากาศ ซึ่งปรากฏการณ์นี้แสดงได้ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์สืบเนื่องจากการแตกตัวของฟองอากาศทำให้เกิดช่องว่าง ซึ่งช่องว่างนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือน และแรงเฉือนทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์

[18]

2.5.3 การเสื่อมสภาพพอลิเมอร์จากแสงหรือโฟตอน

การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากแสงหรือโฟตอนเกิดขึ้นได้ก็เนื่องจากว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันล้วนแล้วแต่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งในสารอินทรีย์ก็จะมีหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric Groups) ซึ่งมีสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ดังนั้นเมื่อนำพอลิเมอร์ไปวางกลางแจ้งหรือภายใต้รังสี UV เป็นเวลานาน จะสังเกตเห็นว่าพอลิเมอร์จะมีสีจางลงและเปราะแตกหักง่าย สำหรับตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างพอลิเมอร์ที่สามารถดูดกลืนแสงและเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical Reaction) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการที่สารทำอันตรกิริยากับแสงส่งผลทำให้โมเลกุลเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานทำให้เกิดอนุมูลอิสระและไอออนขึ้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ สารอินทรีย์อิ่มตัว (Saturated Compounds) ซึ่งมีพันธะ C-C C-H C-Cl เป็นต้น โดยจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 200 nm นอกจากนี้แล้วสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิลและสารประกอบที่มีพันธะ C=C จะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-300 nm อย่างไรก็ตามพบว่าในทางปฏิบัติพบว่าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มักจะมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ (Impurities) ซึ่งจะสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมีได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์เนื่องจากแสงจะมีกระบวนการเกิดร่วมกันในกรณีที่ไม่มีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณของแก๊สออกซิเจน และสารตัวเติมต่าง ๆ ที่เติมลงไป สำหรับในหัวข้อนี้จะแบ่งการเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยแสง เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีออกซิเจน และมีออกซิเจน

1) กลไกการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยแสง

กรณีที่ไม่มีออกซิเจน ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมีในพอลิเมอร์ที่มีหมู่คีโตนในโครงสร้างหรือเป็นสารเจือปนในพอลิเมอร์ ซึ่งการดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอนิลจะเหนี่ยวนำให้เกิดการตัดขาดของพันธะโดยกลไกปฏิกิริยาแบบนอร์ริช ชนิดที่ 1 (Norrish I) หรือนอร์ริช



ซึ่งในสมการที่ 2.23 นี้ถือได้ว่าการเริ่มต้นของปฏิกิริยาโฟโตเคมี

2.5.4 การเสื่อมสภาพทางชีวภาพของพอลิเมอร์

โดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ทางชีวภาพเกิดจากการที่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กซึ่งมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ที่มีความจำเพาะกับพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว ดังนั้นการเสื่อมสภาพทางชีวภาพจึงเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีความจำเพาะสูงแต่อย่างไรก็ตาม คำว่า ชีวภาพ อาจมีความหมายรวมถึง สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น สัตว์ฟันแทะ และแมลงชนิดต่าง ๆ ดังนั้นการเสื่อมสภาพทางชีวภาพอาจรวมถึงความเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยาเคมีและแรงเชิงกล ดังนั้นการเสื่อมสภาพทางชีวภาพของพอลิเมอร์จึงสามารถจึงแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือ การเสื่อมสภาพจากเอนไซม์ และการเสื่อมสภาพจากแรงเชิงกล ซึ่งตัวอย่างของการเกิดการเสื่อมสภาพจะสามารถอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

1) การเสื่อมสภาพด้วยเอนไซม์

เนื่องจากการเสื่อมสภาพด้วยเอนไซม์มีความจำเพาะเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นจะถูกผลิตขึ้นมาจากสิ่งมีชีวิต เอนไซม์บางชนิดจะทำหน้าที่ได้ดีก็ต่อเมื่อมีโคเอนไซม์มาร่วมด้วย สำหรับชื่อของเอนไซม์นั้นจะเรียกตามการทำหน้าที่ในการย่อยสลาย ตัวอย่างเช่น เอนไซม์ที่มีชื่อว่า ไฮโดรเลส (Hydrolases) เป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาสลายพันธะเคมีด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารที่มีหมู่เอสเทอร์ อีเทอร์ หรือเอไมด์ เป็นต้น ดังนั้นเอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีนจะมีชื่อเรียกว่าโปรตีเอส (Proteases) และเอนไซม์ที่ย่อยสลายพอลิแซ็กคาไรด์จะมีชื่อว่า คาร์โบไฮเดรส (Carbohydrase) เป็นต้น สำหรับตัวอย่างเอนไซม์ที่ย่อยสลายพอลิเมอร์และแหล่งที่มาแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างเอนไซม์ที่สามารถย่อยพอลิเมอร์จากธรรมชาติได้ [18]

กลุ่มของเอนไซม์	ชื่อเอนไซม์	พอลิเมอร์	แหล่งที่พบ
Carbohydrases	Amylase	Amylose	แบคทีเรีย มอลต์ ดักอ้อน
	Phosphorylase	Amylose	แบคทีเรีย ยีสต์
		Amylopectin	สัตว์ พืช
	Cellulase	Cellulose	แบคทีเรีย ฟังไจ
	Lysozyme	Polysaccharides	น้ำย่อย ไข่ขาว

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างเอนไซม์ที่สามารถย่อยพอลิเมอร์จากธรรมชาติได้ (ต่อ) [18]

กลุ่มของเอนไซม์	ชื่อเอนไซม์	พอลิเมอร์	แหล่งที่พบ
Proteases	Pepsin	Proteins	น้ำย่อยจากตับอ่อน
	Trypsin	Proteins	และแบคทีเรีย
	Carboxypeptidase	Proteins	
Esterase	Ribonucleases	Ribonucleic acid (RNA)	แบคทีเรีย พืช น้ำดี น้ำย่อยจากม้าม
	Deoxyribonucleases	Deoxyribonucleic Acid (DNA)	แบคทีเรีย น้ำดี
	Phosphodiesterases	Nucleic acids (DNA RNA)	น้ำย่อยจากลำไส้เล็ก น้ำดี น้ำย่อย จากม้าม

2) การเสื่อมสภาพจากแรงเชิงกลจากสิ่งมีชีวิต

การเสื่อมสภาพนี้เกิดจากสัตว์ฟันแทะต่าง ๆ เช่น กระต่าย หนู สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ปลวก หรือแมลงบางชนิด ซึ่งปกติแล้วจะพบการทำลายพอลิเมอร์โดยการกัดหรือแทะ ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจากสัตว์ เช่น สายไฟฟ้าที่มักขาดเนื่องจากการกัดของหนู เป็นต้น

2.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : SD) [19]

2.6.1 ค่าเฉลี่ย (Average)

การคำนวณสถิติที่น่าจะคุ้นเคยกันดี คือ "ค่าเฉลี่ย" คือการคำนวณโดยเอาตัวเลขของข้อมูลมาบวกกันทุกตัวแล้วหารด้วยจำนวนข้อมูล โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.24)$$

ตัวอย่าง: อุณหภูมิวันจันทร์ - ศุกร์ คือ 30.0 31.5 30.5 29.0 29.5 30.0 และ 30.5 ตามลำดับ ถ้านำมาคิดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของสัปดาห์นี้ = $(30.0+31.5+30.5+29.0+29.5+30.0+30.5) / 7 = 30.14$ รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่สนใจด้วยฟังก์ชัน AVERAGE

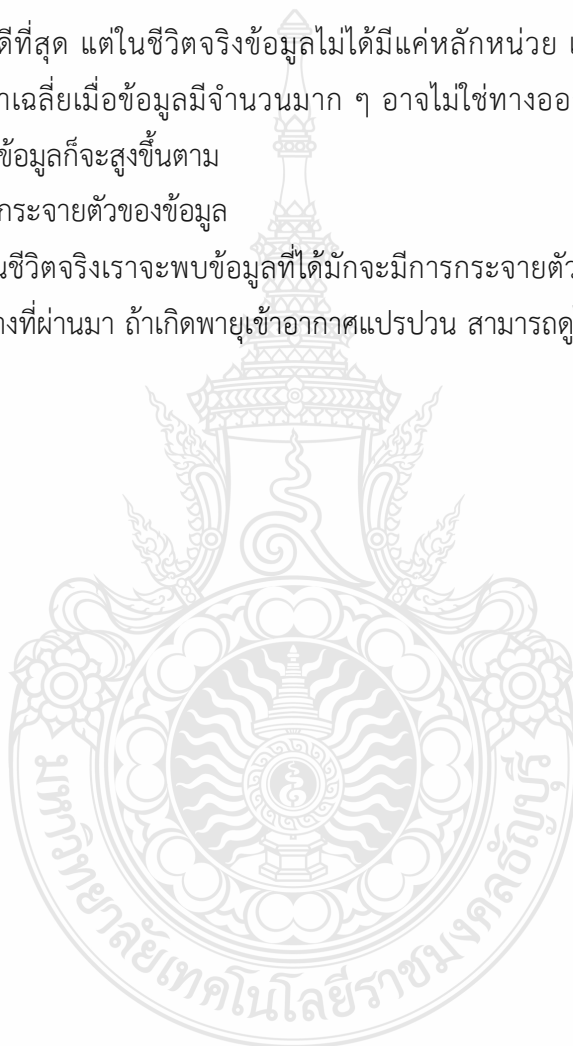
I2		=AVERAGE(B2:H2)							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์	ค่าเฉลี่ย
2	อุณหภูมิต่ำ	30	31.5	30.5	29	29.5	30	30.5	30.14

รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่สนใจด้วยฟังก์ชัน AVERAGE [19]

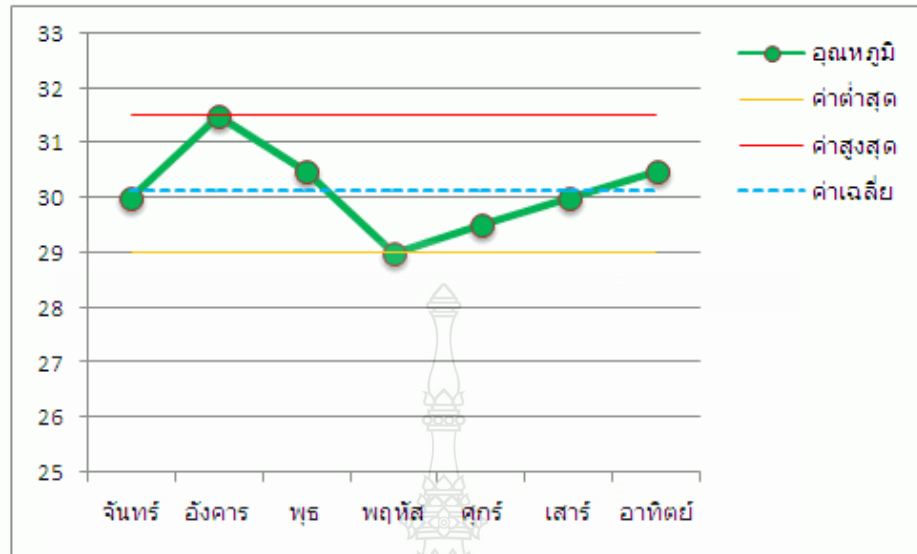
ค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ จะเป็นค่ากลางหรือค่าที่เรานำมาใช้แทนกลุ่มข้อมูล เป็นตัวแทนของข้อมูลที่น่าจะดีที่สุด แต่ในชีวิตจริงข้อมูลไม่ได้มีแค่หลักหน่วย แต่อาจมีเป็นร้อยจนหลักแสนหลักล้าน การใช้ค่าเฉลี่ยเมื่อข้อมูลมีจำนวนมาก ๆ อาจไม่ใช่ทางออกที่ดีที่สุด เพราะข้อมูลยิ่งมาก การกระจายตัวของข้อมูลก็จะสูงขึ้นตาม

2.6.2 การกระจายตัวของข้อมูล

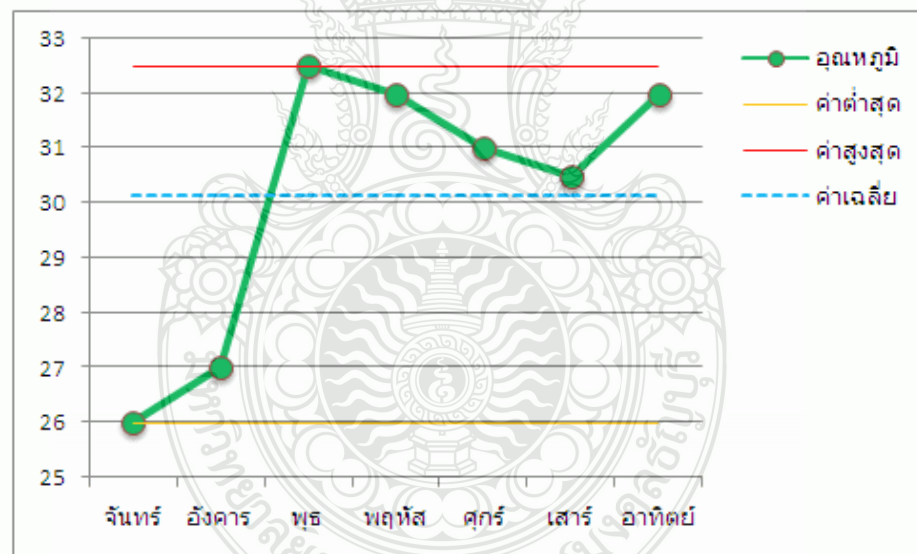
ในชีวิตจริงเราจะพบข้อมูลที่ได้มักจะมีการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันหรือไม่ใกล้เคียงกันเสมอไป จากตัวอย่างที่ผ่านมา ถ้าเกิดพายุเข้าอากาศแปรปรวน สามารถดูได้จากกราฟตัวอย่าง



	จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิ	30	31.5	30.5	29	29.5	30	30.5	30.14



	จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิ	26	27	32.5	32	31	30.5	32	30.14



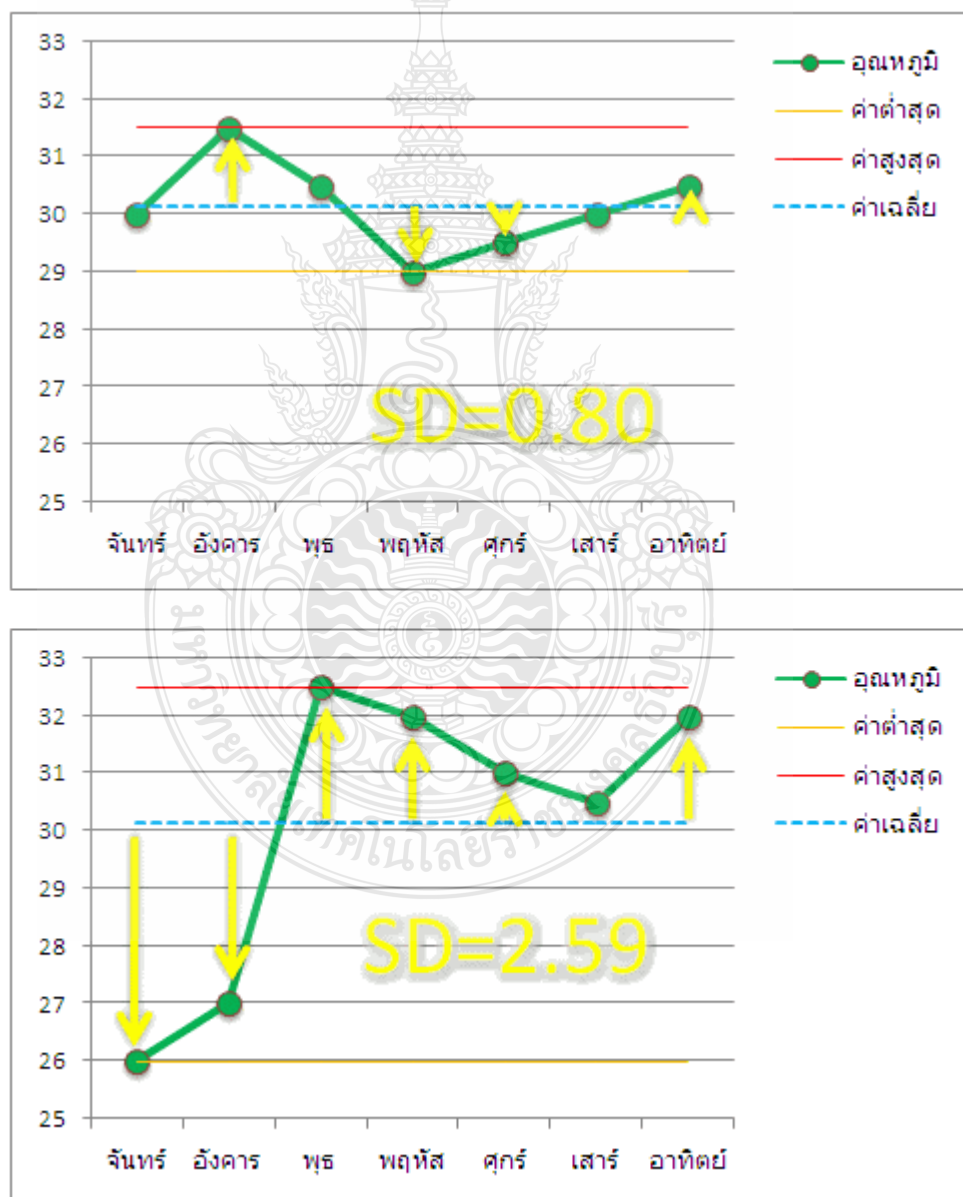
รูปที่ 2.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบอากาศปกติ และ แปรปรวน [19]

จากข้อมูลจะเห็นว่าแม้ข้อมูลได้ค่าเฉลี่ยเท่ากัน แต่แค่มองด้วยตาเปล่าก็จะเห็นว่าข้อมูลด้านล่างมีความแปรปรวนมาก และค่าเฉลี่ยที่ได้มาไม่น่าจะนำมาแทนชุดข้อมูลดังกล่าวได้ ปัญหาก็คือถ้าข้อมูลมีจำนวนมาก ๆ การดูด้วยสายตาคงไม่เพียงพอจะตัดสินได้ว่าข้อมูลเป็นปกติหรือไม่ปกติ

2.6.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation หรือ SD)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือ SD คิดค้นโดย ฟรานซิส กาลตัน (Francis Galton) ในช่วงปลายคริสต์ทศวรรษ 1860 จุดประสงค์ของการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็คือ หาค่าการกระจายตัวของข้อมูลที่ออกมาจากค่าเฉลี่ยกลางของข้อมูล ค่ายิ่งมากแสดงว่า มีการแปรปรวน หรือการกระจายของข้อมูลสูง โดยคำนวณค่า SD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25 และตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของข้อมูลดูได้จากรูปที่ 2.18

$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [19]

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือการเอาระยะเส้นสีเหลืองมารวมกันหาค่าเฉลี่ยจากภาพกราฟจะเห็นว่ายิ่งผลรวมความยาวของเส้นสีเหลืองยิ่งมาก ค่า SD ก็ยิ่งสูงขึ้น ในทางสถิติหากมีการเก็บข้อมูลมาแล้วค่า SD เกินค่าที่รับได้จะถือว่าข้อมูลกระจายตัวเกินไป (แล้วแต่งงานและเจื่อนไข) ซึ่งก็ต้องหาเหตุผลต่อว่าทำไมถึงเป็นอย่างนั้น จากกราฟตัวอย่างเกิดจากอากาศแปรปรวนเลยทำให้ค่า SD มีค่าสูง

1) ตัวอย่างการวิเคราะห์แม่ไก่ออกไข่

ในฟาร์มไก่ไข่ มีไก่อยู่ 1,000 ตัว โดยแบ่งอยู่ในโรงเลี้ยงจำนวน 4 โรง โดยค่าเฉลี่ยที่ควรจะเป็นไก่จะออกไข่ประมาณ 80% (มีพัก 20%) ฟาร์มไก่มีแรงงานคนจำกัดไม่สามารถนับไข่ที่ออกจากแม่ไก่แบบตัวต่อตัวได้

เมื่อเลี้ยงไก่เพื่อขายไข่ หากไก่กินอาหารแต่ออกไข่น้อยกว่าที่ควรจะเป็นก็จะขาดทุน ดังนั้นเราต้องหาให้ได้ว่ามีไก่ตัวไหนกินแล้วไม่ไข่บ้างหรือเปล่า

AH2		fx =STDEV(B2:AE2)													
	A	B	C	D	E	F	G	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
1	วันที่	1	2	3	4	5	6	26	27	28	29	30	เฉลี่ย	ค่า80%	SD
2	โรง 1	188	199	206	208	202	189	210	199	184	188	189	195	200	9.59
3	โรง 2	199	219	155	167	204	158	216	159	159	204	204	185	200	23.40
4	โรง 3	209	223	224	186	190	195	191	200	213	180	227	202	200	14.01
5	โรง 4	210	186	222	197	194	169	220	179	208	162	227	196	200	22.80

รูปที่ 2.19 แสดงรายงานไข่ที่เก็บได้ใน 1 เดือน จำนวน 30 วัน [19]

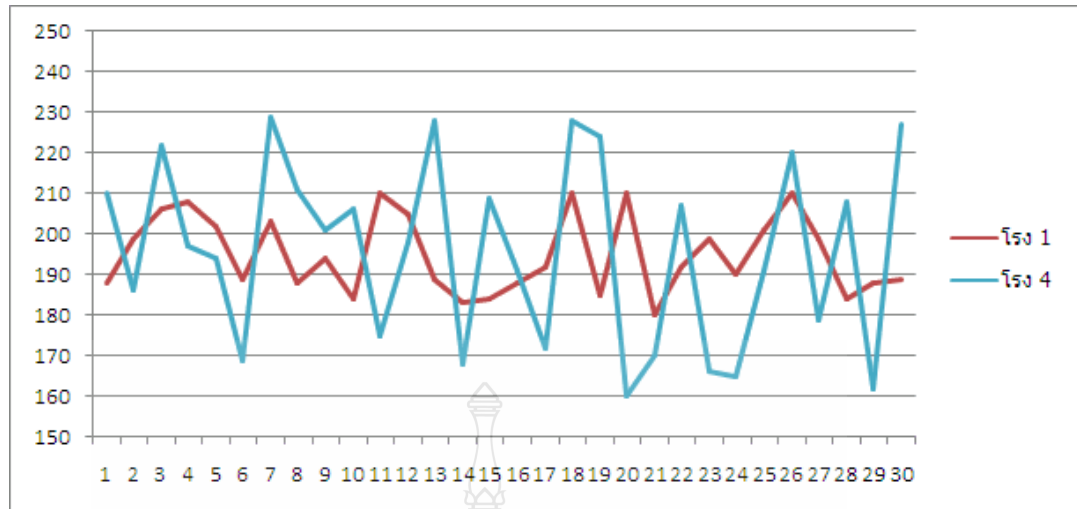
จากตารางนี้สามารถบอกอะไรได้บ้าง

1. ค่าเฉลี่ย (AVERAGE) โรงที่ 1 2 และ 4 ออกไข่เฉลี่ยต่ำกว่า 80%
2. โรง 2 มีปัญหาเยอะสุด ค่าเฉลี่ยต่ำ แถมมีไก่ไม่ออกไข่มากที่สุด
3. ค่าเฉลี่ยโรง 1 และ 4 แม้จะมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ค่า SD

ต่างกันมาก

4. แสดงว่าในโรง 1 ไก่ออกไข่สม่ำเสมอว่าโรง 4 (โรง 4 น่าจะมีไก่ไม่ออกไข่มากกว่า)

เพื่อแสดงให้เห็นภาพมากขึ้นจึงนำมาจัดทำเป็นกราฟของโรง 1 และ 4 เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนมากขึ้น

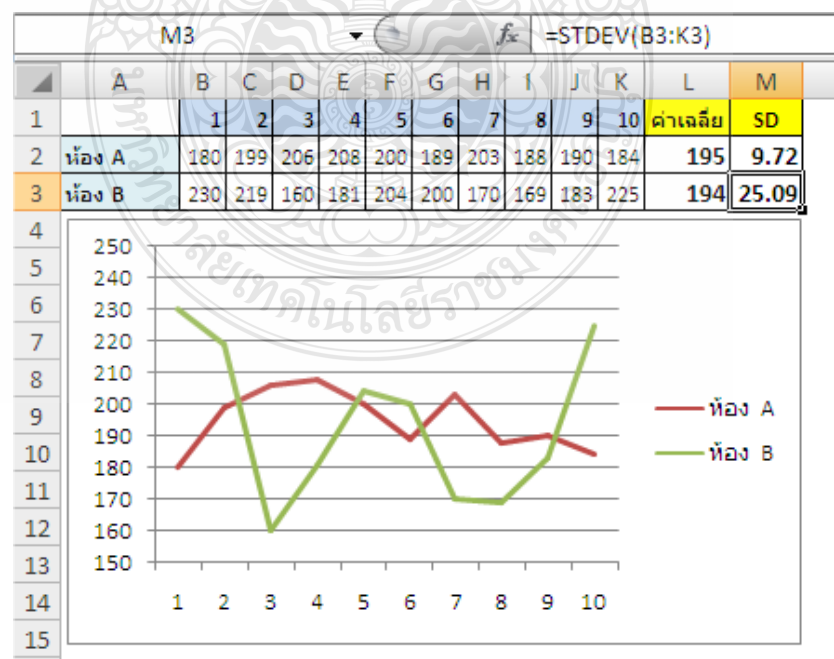


รูปที่ 2.20 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนไขที่เก็บได้ในแต่ละวันของโรง 1 และ 4 [19]

การแก้ไขปัญหของโรง 4 คือ ต้องแยกไก่ที่ออกไข่กับไก่ที่ไม่ออกไข่ออกจากกัน ซึ่งวิธีการอาจต้องให้คนงานเก็บข้อมูลไข่แยกเป็นโซน แล้วนำแต่ละโซนมาหาดูว่าโซนไหนตกค่าเฉลี่ยหรือค่า SD เยอะ จึงค่อยดูเป็นรายตัวในโซนนั้น ๆ

2) ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทำข้อสอบ

อาจารย์วิชาภาษาอังกฤษได้ทดสอบเด็ก 2 ห้อง เพื่อวัดผลผลปรากฏว่าค่าเฉลี่ยที่ได้ 2 ห้องใกล้เคียงกัน แต่ค่า SD ต่างกัน



รูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดสอบของเด็กทั้ง 10 คน [19]

จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าแม้คะแนนเฉลี่ยจะใกล้เคียงกัน แต่ค่า SD ต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าห้อง B มีเด็กเก่งและไม่เก่ง ส่วนห้อง A จะเก่งใกล้เคียงกันมากกว่า เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้ จะทำให้เห็นว่าถ้าจะสอนห้อง B จะใช้วิธีสอนเหมือนห้อง A ไม่ได้ ต้องแบ่งกลุ่มเด็กอ่อนในห้อง B ออกมาสอนเพิ่มเติมเป็นต้น

2.7 บริบทของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จัดตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2518 ใช้ชื่อว่า “คณะวิศวกรรมเทคโนโลยี” วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา ต่อมาปี พ.ศ. 2532 มีพระราชบัญญัติเปลี่ยนชื่อวิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาเป็นสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล โดยยกเลิกคณะวิศวกรรมเทคโนโลยี และประกาศใน พระราชกิจจานุเบกษา ใช้ชื่อใหม่ว่า “คณะวิศวกรรมศาสตร์” โดยมีผลตั้งแต่วันที่ 13 ตุลาคม 2537 ซึ่งได้ย้ายมาทำการเรียนการสอน ณ ถนนรังสิต-นครนายก กม.13 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

ในปัจจุบันมีพระราชบัญญัติจัดตั้งเป็นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อวันที่ 18 มกราคม 2548 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงอยู่ในการแบ่งส่วนราชการใหม่ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-ราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา [20]

พันธกิจ (Mission) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์

1. จัดการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมศาสตร์ให้ตอบสนองความต้องการของผู้ประกอบการ อุตสาหกรรมและชุมชน
2. สร้างงานวิจัย สิ่งประดิษฐ์ และนวัตกรรม เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนผู้ประกอบการ อุตสาหกรรมและชุมชน
3. ให้บริการทางวิชาการ ฝึกอบรม และทดสอบทางวิศวกรรมให้กับผู้ประกอบการ อุตสาหกรรมและชุมชน
4. บ่มเพาะสนับสนุนบุคลากรให้มีความก้าวหน้าในอาชีพการทำงาน ด้วยหลักธรรมาภิบาล [21]

คณะวิศวกรรมศาสตร์ประกอบด้วยภาควิชาทั้งหมด 10 ภาควิชา ได้แก่

1. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา (Department of Civil Engineering)
2. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล (Department of Mechanical Engineering)
3. ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (Department of Computer Engineering)
4. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Department of Industrial Engineering)
5. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (Department of Electrical Engineering)
6. ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม (Department of Electronics and Telecommunication Engineering)

7. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ (Department of Textile Engineering)

8. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ (Department of Materials and Metallurgical Engineering)

9. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร (Department of Agricultural Engineering)

10. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี (Department of Chemical Engineering) [22]

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการเป็นภาควิชาที่อยู่ในสังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มีการเรียนการสอนในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ (Bachelor of Engineering (Materials Engineering)) โดยแบ่งเป็น 2 แขนงวิชาคือ 1. แขนงวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมพลาสติก (Plastics Engineering) 2. แขนงวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ (Polymers Engineering) ทั้งแขนงวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมพลาสติก และแขนงวิชาพอลิเมอร์มีวิชาเรียนชื่อรายวิชาการทดสอบวัสดุ และการวิเคราะห์ผล (Materials Testing and Analysis) รหัสวิชา 04720309 บรรจุอยู่ในหลักสูตรการเรียนการสอนนี้ด้วย [23]

โดยมีรายละเอียดของรายวิชาดังนี้

1. จุดมุ่งหมายของรายวิชา

- 1.1 รู้และเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุ ที่มีผลต่อการนำไปใช้งาน
- 1.2 รู้และเข้าใจวิธีการทดสอบวัสดุ และผลิตภัณฑ์ ตามมาตรฐานที่ผ่านการยอมรับ
- 1.3 ปฏิบัติการทดสอบได้ถูกต้องตามมาตรฐานการทดสอบสากลและมาตรฐานภายในประเทศที่ผ่านยอมรับ เช่น มาตรฐาน ASTM, ISO และ TIS เป็นต้น
- 1.4 สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบ และสามารถประยุกต์ใช้ผลการทดสอบกับทางอุตสาหกรรมได้

2. วัตถุประสงค์ในการพัฒนา/ปรับปรุงรายวิชา

เพิ่มความชำนาญในการใช้เครื่องมือ

3. คำอธิบายรายวิชา

มาตรฐานและข้อกำหนดการทดสอบ ความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติพอลิเมอร์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติและพฤติกรรมเชิงกลด้านความแข็งแรง ความเหนียว ความแข็ง สมบัติเชิงความร้อนและการเสียรูป สมบัติเชิงเคมีและสิ่งแวดล้อม สมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า วิธีการทดสอบตามมาตรฐานสากล การวิเคราะห์ผลการทดสอบ นำเสนอผลการทดสอบ และสรุปผลการทดสอบ การประยุกต์ใช้ผลการทดสอบทางอุตสาหกรรม [24]

ผู้วิจัยในฐานะเป็นบุคลากรของคณะที่ได้รับมอบหมายให้รับผิดชอบในการเป็นผู้ช่วยสอน ในรายวิชาการทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผล (Materials Testing and Analysis) รหัสวิชา 04-720-309 ในภาคปฏิบัติ และจากพันธกิจของคณะวิศวกรรมศาสตร์ข้อที่ 2 คือการสร้างงานวิจัย เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนผู้ประกอบการ และงานบริการทดสอบสมบัติวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ ซึ่งเป็นงานบริการทางวิชาการตามพันธกิจของคณะวิศวกรรมศาสตร์ในพันธกิจข้อที่ 3 คือการให้บริการ

ทางวิชาการให้กับผู้ประกอบการ จากพันธกิจของคณะวิศวกรรมศาสตร์กับสิ่งที่นำมาวิจัยคือส่วนหนึ่ง ในภาระงานหลักของผู้วิจัยซึ่งสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้อย่างสูงสุด และเป็นการพัฒนา ทักษะ ประสบการณ์ในการทำงานของผู้วิจัยให้มีความเชี่ยวชาญมากขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shiying Zhang [25] ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนไปของ HDPE และ LDPE รีไซเคิล จากการศึกษาพบว่าค่าทางความร้อนของ HDPE และ LDPE รีไซเคิลเปรียบเทียบกับ HDPE และ LDPE ที่บริสุทธิ์แล้วมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยวัสดุรีไซเคิล HDPE และ LDPE เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิในการผลิตเมื่อเทียบกับพลาสติกบริสุทธิ์ และจากทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดสอบแรงดึงพบว่า HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล 2 ครั้ง มีค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ลดลงเล็กน้อยในครั้งที่ 3 และค่ามอดูลัสของยังของ HDPE ก็มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน ส่วน LDPE มีค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นในครั้งแรกของการรีไซเคิล แต่ลดลงอย่างต่อเนื่องในการรีไซเคิลครั้งที่สองและสาม แต่จะพบว่าค่ามอดูลัสของยังของ LDPE กลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในด้านสมบัติการไหลของ HDPE ที่รีไซเคิลครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองยังคงมีค่าคล้ายกับวัสดุใหม่ มีการลดลงเพียงเล็กน้อยในครั้งที่สาม ซึ่งบ่งชี้ว่า HDPE ที่รีไซเคิลแล้วมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นและมีความหนืดมากกว่าวัสดุใหม่ และพบว่า LDPE มีอัตราการไหลลดลงในการรีไซเคิลครั้งแรก และกลับเพิ่มขึ้นในครั้งที่สองและสามเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุใหม่ ซึ่งแสดงว่า LDPE ที่รีไซเคิลครั้งแรก มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าวัสดุใหม่ แต่เมื่อผ่านการรีไซเคิลหลายครั้ง วัสดุเริ่มสูญเสียคุณสมบัติความหนืดลง

Rohmat และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาสมบัติของ HDPE รีไซเคิลที่ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์ โดยเตรียม HDPE รีไซเคิลร้อยละ 70 ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์ร้อยละ 30 โดยทำเปรียบเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ ที่ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์อัตราส่วนผสมเดียวกัน และทำการศึกษาสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต โดยจากการศึกษาพบว่าค่าความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังของ HDPE รีไซเคิลที่ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์ ให้ค่าความทนแรงดึงที่ 8.76 MPa และค่ามอดูลัสของยังที่ 52.01 MPa ในขณะที่ HDPE บริสุทธิ์ ที่ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์ให้ค่าความทนแรงดึง 9.33 MPa และค่ามอดูลัสของยังที่ 94.84 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่า HDPE บริสุทธิ์ที่ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์ให้ค่าความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังที่ดีกว่า HDPE รีไซเคิลที่ผสมกับเส้นใยไฟเบอร์

Antyas Imad Rezakalla และ Savostina Tatiana Petrovna [27] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE และ LDPE รีไซเคิล ที่มีปริมาณร้อยละ 48% ของขยะพลาสติกในยุโรป งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของ HDPE และ LDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล โดยเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึง และสมบัติความทนแรงกระแทกจาก HDPE และ LDPE โดยเตรียมในอัตราส่วนตั้งแต่พลาสติกที่บริสุทธิ์ 100% จนถึงพลาสติกรีไซเคิล 100% โดยแต่ละอัตราส่วนจะมีปริมาณ

ต่างกัน 10% ของพลาสติกรีไซเคิล เพื่อศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึง และสมบัติความทนต่อแรงกระแทก โดยจากงานวิจัยพบว่าความทนแรงดึงของ HDPE เพิ่มขึ้นในส่วนผสมที่ผสม HDPE รีไซเคิล 10% และความทนแรงดึงลดลงตามลำดับเมื่อมีปริมาณร้อยละของ HDPE จนเมื่อถึงส่วนผสมที่มีปริมาณ HDPE รีไซเคิล 60% ขึ้นไปสมบัติความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ LDPE ที่ค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อปริมาณ LDPE รีไซเคิลเพิ่มขึ้น และความทนแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ LDPE รีไซเคิลที่เป็นส่วนผสมมีปริมาณตั้งแต่ 50% ขึ้นไป และพบว่าค่าการยืดตัวมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของพลาสติก รีไซเคิลที่เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น และพบว่าค่าความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของพลาสติกรีไซเคิลที่เป็นส่วนผสมทั้ง HDPE และ LDPE มีปริมาณเพิ่มขึ้น

Solomon Tesfaw และคณะ [28] ได้ทำการศึกษา HDPE บริสุทธิ์และ HDPE รีไซเคิลที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของท่อ โดยทำการผสมของส่วนผสมระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE รีไซเคิล ในอัตราส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการขึ้นรูปท่อด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก และทำการทดสอบสมบัติการไหลเพื่อศึกษาสมบัติการไหลของพลาสติก จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงพบว่าสามารถใช้ HDPE รีไซเคิลเป็นส่วนผสมได้ถึงร้อยละ 30 โดยผ่านค่ามาตรฐานของท่อที่ต้องการ และเมื่อปริมาณของ HDPE รีไซเคิลที่เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของพลาสติกก่อนจะเสียรูปความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การคืนตัวของ HDPE มีค่าลดลง ในขณะที่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

Javed Ahmed Khan Tipu และคณะ [29] ได้ศึกษาการรีไซเคิลโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยการนำขวดพลาสติก HDPE มารีไซเคิลโดยการล้างทำความสะอาด แล้วนำมาบดเพื่อให้ได้ HDPE รีไซเคิลที่เป็นลักษณะผง จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการอัดรีดให้ได้เป็นเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.75 mm เพื่อนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องปรีนท์แบบ 3 มิติเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบสมบัติแรงดึง และสมบัติแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 และ ASTM D6110 ตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลนั้นมีแนวโน้มที่ดีขึ้นหลังจากการรีไซเคิลหลายครั้ง ทำให้การรีไซเคิล HDPE เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน และจะพบว่า การรีไซเคิลในครั้งที่สองถึงครั้งที่ห้าส่งผลให้มีพฤติกรรมทางกลโดยรวมที่ดีที่สุด

Nectarios Vidakis และคณะ [30] ศึกษาความสามารถในการรีไซเคิลโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุที่ถูกรีไซเคิลมากที่สุดในโลก เพื่อนำมาใช้ในการกระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (AM) โดยได้ทำการศึกษาการนำ HDPE กลับมารีไซเคิลและศึกษาผลของสมบัติเชิงกลทางโครงสร้าง และสมบัติทางความร้อนของ HDPE โดยการหลอมเส้นใย (FFF) จากวัสดุใหม่และวัสดุรีไซเคิล และทดสอบสมบัติความทนแรงดึง สมบัติแรงดัดโค้ง สมบัติความทนแรงกระแทก และสมบัติความแข็งแรง รวมถึงการวิเคราะห์ทางความร้อนและเชิงสัญญาณวิทยาอย่างละเอียด ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็น

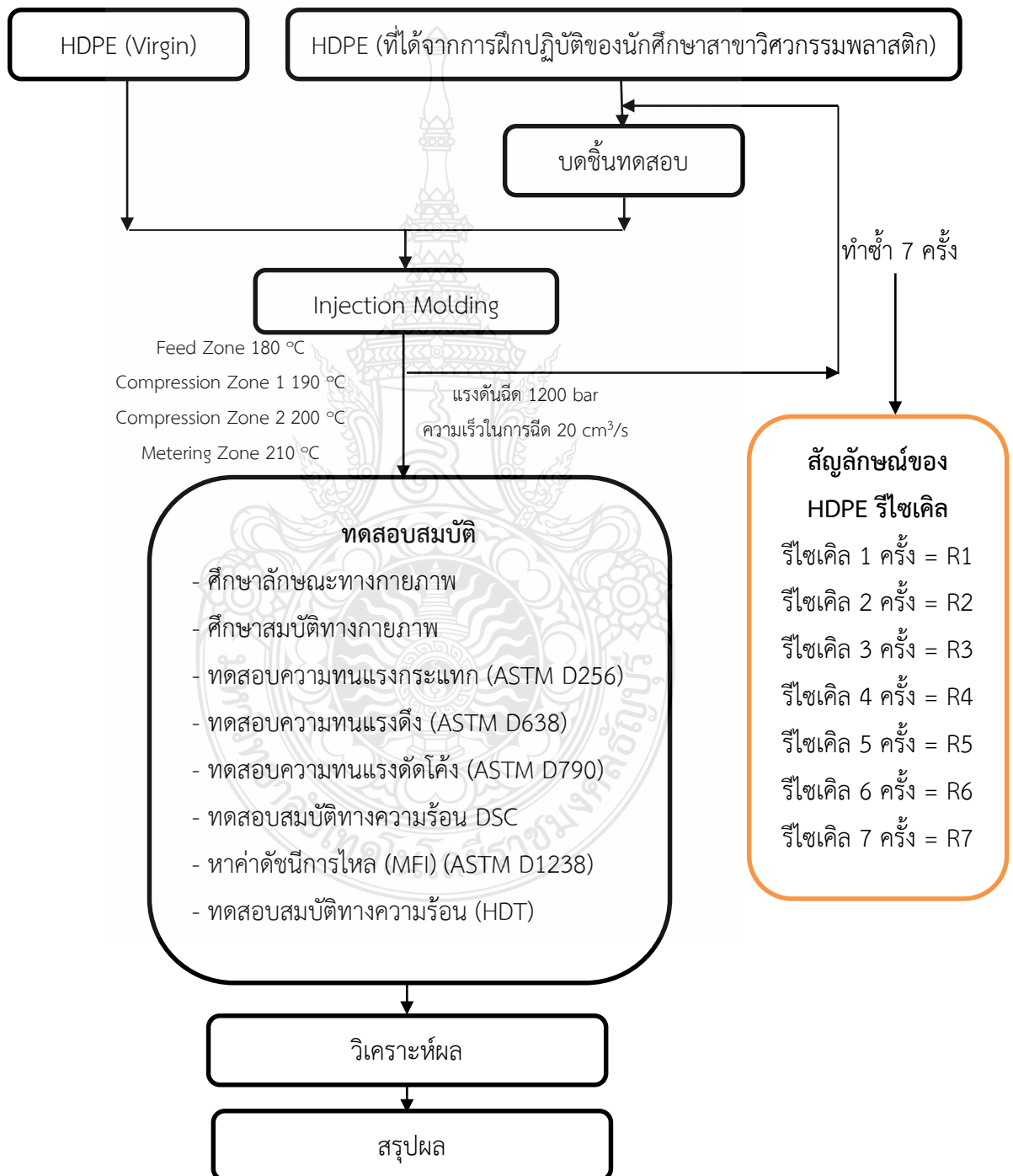
เห็นว่า คุณสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลนั้น โดยทั่วไปมีการปรับปรุงดีขึ้น ในครั้งการรีไซเคิลจำนวนหนึ่ง ทำให้การรีไซเคิล HDPE เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับระบบเศรษฐกิจ หมุนเวียน โดยครั้งที่สองถึงครั้งที่ห้ามีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่เหมาะสมที่สุด



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของ HDPE รีไซเคิล โดยมีวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ และวิธีการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงวิธีการเตรียม HDPE รีไซเคิล

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

วัตถุดิบหลักของโครงการวิจัยนี้คือเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) เกรดฉีด ชื่อทางการค้า InnoPlus HD1600J โดยมีสมบัติตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) เกรดฉีด ชื่อทางการค้า InnoPlus HD1600J

สมบัติ	ค่าทั่วไป	หน่วย	มาตรฐานการทดสอบ
สมบัติทางฟิสิกส์			
Melt Flow Rate (190 °C, 2.16 kg)	12	g/10 min	ASTM D1238
Density	0.958	g/cm ³	ASTM D1505
Vicat Softening Point @ 10 N, 50 °C/hr	118	°C	ASTM D1525
Melting Point	129	°C	ASTM D2117
Mechanical Properties			
Tensile Strength @ Yield	280	kg/cm ²	ASTM D638
Tensile Strength @ Break	200	kg/cm ²	ASTM D638
Elongation @ Break	210	%	ASTM D638
Stiffness	9000	kg/cm ²	ASTM D747
Flexural Modulus	13500	kg/cm ²	ASTM D790
Notched Izod Impact Strength	3 (C)*	kg.cm/cm	ASTM D256
Durometer Hardness	64	Shore D	ASTM D2240
ESCR (condition B, 25 % Igepal)	5	hrs, F50	ASTM D1693

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบทดสอบ

ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมชิ้นทดสอบ HDPE โดยใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

- เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) รุ่น Allrounder 470 C ยี่ห้อ Arburg มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และโลหการ

- เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) รุ่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-
ราชมนคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องบดพลาสติก (Plastic Granulator) ชื่อรุ่นทางการค้า Bosco บริษัท
BOSCO ENGINEER ประเทศไทย ขนาดตะแกรงรูดเปิด 8 mm มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้มีเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชั้นทดสอบ HDPE และ HDPE รีไซเคิล
โดยมีเครื่องมือที่ใช้ดังต่อไปนี้

- เครื่องชั่งเพื่อวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะ (Density Electronic
Balance) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AB204-S มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องวัดสียี่ห้อ X-rite รุ่น Ci60 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

- เครื่องทำรอยบาก (Notching Machine) ยี่ห้อ CEAST รุ่น 6525
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก (Pendulum Impact
Tester Resil) ยี่ห้อ CEAST รุ่น 6545 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ
HOUNSFIELD รุ่น H50KS มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา
วิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้ง (universal Testing Machine)
ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H50KS มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง
แคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ยี่ห้อ Mettler Toledo มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Distortion
Temperature; HDT) ยี่ห้อ CEAST รุ่น HDT Vicat 6911 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

- เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester) ชื่อรุ่นทางการค้า CEST MF20, Intron มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ HDPE ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป

เตรียมชิ้นทดสอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป และใช้สภาวะในการฉีดขึ้นรูปดังตารางที่ 3.2 เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบดัมเบลล์ Type I ตามมาตรฐาน ASTM D638 และชิ้นทดสอบขนาดความหนา 3 mm ความยาว 127 mm ความกว้าง 12.7 mm และชิ้นทดสอบขนาดความหนา 3 mm ความยาว 127 และความกว้าง 12.7 โดยวางชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ 24 hr เพื่อคลายความเครียดในชิ้นทดสอบ ก่อนนำชิ้นทดสอบงานที่ได้แต่ละครั้งไปทดสอบและวิเคราะห์ผลต่อไป

ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะในการฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

โซนป้อน (Feed Zone, (°C))	180
โซนอัด 1 (Compression Zone, (°C))	190
โซนอัด 2 (Compression Zone, (°C))	200
โซนหลอม (Metering Zone, (°C))	210
แรงดันฉีด (Bar)	1200
ความเร็วในการฉีด (Injection Speed, (cm ³ /s))	20

3.3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ HDPE ที่ได้จากการฝึกปฏิบัติของนักศึกษาสาขาวิศวกรรมพลาสติก

เตรียมชิ้นทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบ HDPE ที่ได้จากการฝึกปฏิบัติของนักศึกษาสาขาวิศวกรรมพลาสติกในทุกวิชา มาดัดเป็นชิ้นขนาดเล็กนำไปฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบใหม่เป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ Type I ตามมาตรฐาน ASTM D638 และชิ้นทดสอบขนาดความหนา 3 mm ความยาว 127 mm ความกว้าง 12.7 mm และชิ้นทดสอบขนาดความหนา 3 mm ความยาว 127 mm และความกว้าง 12.7 mm ด้วยกระบวนการฉีดในแบบ (Injection Molding Process) โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป และใช้สภาวะในการฉีดขึ้นรูปดังตารางที่ 3.2 เป็นครั้งที่ 2 และนำชิ้นทดสอบที่ฉีดจากครั้งที่ 2 มาดัดและทำการฉีดใหม่เป็นครั้งที่ 3 ทำแบบนี้จนกระทั่งฉีดครบ 7 ครั้ง โดยวางชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ 24 hr เพื่อคลายความเครียดในชิ้นทดสอบ ก่อนนำชิ้นทดสอบงานที่ได้แต่ละครั้งไปทดสอบและวิเคราะห์ผลต่อไป

3.3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

ศึกษาลักษณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยตาเปล่าหลังจากนำพลาสติกรีไซเคิลมาบดเป็นเม็ด และสังเกตสีของชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นรูปดัมเบลล์ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

1) ทดสอบสมบัติความหนาแน่น

การทดสอบทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792 นำ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง ไปชั่งในอากาศ แล้วบันทึกค่าความหนาแน่น จากนั้นนำเม็ดพลาสติกซึ่งในสารละลาย Isopropyl Alcohol แล้วบันทึกค่า ที่อุณหภูมิการทดสอบ $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ โดยทำกับชิ้นทดสอบทั้งหมด 10 ชิ้น แล้วคำนวณผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นตามสมการที่ 3.1

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = (a/(a - b))/c \quad (3.1)$$

- a = น้ำหนักชั่งอากาศ (g)
- b = น้ำหนักชั่งในสารละลาย (g)
- c = ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm³)



รูปที่ 3.2 ทดสอบความหนาแน่น [31]

2) การหัตถ์ของขึ้นทดสอบ

การหาความกว้าง ความยาว ความหนา ของขึ้นทดสอบในเวลา 24 hr และ 48 hr ใช้ขึ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแต่ละครั้งมาวัดความหนาของขึ้นทดสอบด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ จากนั้นนำมาเฉลี่ยหาความหนา ความกว้าง และความยาวของขึ้นทดสอบในแต่ละครั้ง โดยวัดจากจำนวนขึ้นทดสอบทั้งหมด 10 ชิ้น ในแต่ละครั้งของการรีไซเคิลเพื่อศึกษาการหัตถ์ของขึ้นทดสอบ

การหาความกว้างของขึ้นทดสอบเฉลี่ย

$$\frac{\text{ความกว้างรวมของขึ้นทดสอบ}}{\text{จำนวนขึ้นทดสอบ}} \quad (3.2)$$

การหาความยาวของขึ้นทดสอบเฉลี่ย

$$\frac{\text{ความยาวรวมของขึ้นทดสอบ}}{\text{จำนวนขึ้นทดสอบ}} \quad (3.3)$$

การหาความหนาของขึ้นทดสอบเฉลี่ย

$$\frac{\text{ความหนารวมของขึ้นทดสอบ}}{\text{จำนวนขึ้นทดสอบ}} \quad (3.4)$$

จากนั้นจึงนำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดไปเปรียบเทียบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การหัตถ์ในแต่ละครั้ง

3) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสีขึ้นทดสอบ

นำเม็ดพลาสติกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้ HDPE เป็นมาตรฐานในการเทียบกับ HDPE รีไซเคิลด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ X-rite รุ่น Ci60 เครื่องวัดสีจะทำการวัดค่าความแตกต่างของสีมาตรฐาน เพื่อทำการเปรียบเทียบหน่วยสี (Color Space) ใช้อธิบายและสื่อสารสีของวัตถุโดยใช้ตัวเลข ซึ่งมี Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ได้รับระดับสากล ได้กำหนดขอบเขตสี รวมถึงหน่วยสีในระบบต่าง ๆ เช่น CIE XYZ, CIE L*a*b* และ CIE L*C *h สำหรับสื่อสารและแสดงสีของวัตถุ ระบบเหล่านี้ช่วยให้ผู้ใช้ในการประเมินคุณลักษณะสี คัดแยกหรือระบุส่วนที่ไม่สอดคล้องกันและถูกต้องแม่นยำ สูตรการคำนวณค่าความต่างของเฉดสี ดังสมการที่ 3.5

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2} \quad (3.5)$$

โดย ΔE = ค่าความต่างของเฉดสี

L^* = ความแตกต่างของความสว่างและความมืด (+ หมายถึง สว่างกว่า (Lighter), - หมายถึง มืดกว่า (Darker))

a^* = แขนสี จากสีเขียว ($-a^*$) จนถึง สีแดง ($+a^*$) (Duller)

b^* = แขนสี จากสีน้ำเงิน ($-b^*$) จนถึงสีเหลือง ($+b^*$)

โดยค่า L^*_1 , a^*_1 , b^*_1 หมายถึงค่าของ HDPE และ L^*_2 , a^*_2 , b^*_2 เป็นค่าของ RHDPE

ในการตัดสินความถูกต้องของสีมักใช้ ΔE ค่า ΔE $0.0 < 1.00$ หมายถึงไม่มีความแตกต่างในการรับรู้ของผู้เชี่ยวชาญในการเปรียบเทียบสองสีควบคู่กันไป ΔE $0.0 < 3.00$ หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญสำหรับคนทั่วไป



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ X-rite รุ่น Ci6 [32]

3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

1) การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (Impact Testing)

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์มีรูปแบบ 2 ลักษณะ คือ แบบ Pendulum Test และ Falling Weight Test

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงลักษณะการทดสอบแบบ Pendulum Test แบบ Izod Test (วางแนวตั้ง) ขึ้นทดสอบทดสอบจะต้องมีการทำรอยบากเพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (Stress Concentration Point) ดังรูปที่ 3.4 โดยจะใช้ค้อนเหวี่ยงลงมากระแทกขึ้นทดสอบ พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการทำให้ชิ้นทดสอบแตกหัก ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัด (หน่วยเป็น J) ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งในกรณีที่ทดสอบแล้วชิ้นทดสอบไม่หักแสดงว่าพลังงานไม่พอ ซึ่งจะต้องเพิ่มน้ำหนักขึ้นไปอีก (หรือใช้เครื่องที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือ Specification ตรงกว่า)



รูปที่ 3.4 รูปแบบการวางชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Izod [31]



รูปที่ 3.5 การทดสอบความทนแรงกระแทก [31]

โดยจากพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็น Impact Strength ได้จากสูตร

$$\text{Impact Strength} = \text{Energy (J)} / \text{Thickness (m)} \quad (3.6)$$

หรือบางกรณี จะใช้สมการ

$$\text{Impact Strength} = \text{Energy (J)} / \text{Area (Notch) (m}^2\text{)} \quad (3.7)$$

การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุในงานวิจัยนี้ มีวิธีการทดลองดังนี้

นำชิ้นทดสอบที่ได้ทำการฉีดยึดขึ้นรูปไว้มาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 12.7 mm ยาว 63.5 mm โดยมีขนาดความหนา 3 mm ขัดบริเวณขอบด้วยกระดาษทรายละเอียดเพื่อให้ขอบมีความเรียบ ทำรอยบากเป็นรูปตัววี (V-Notch) ทำมุม 45° ขนาดความลึก 2.54 mm ด้วยเครื่องทำรอยบาก ตามมาตรฐาน ASTM D256 สำหรับการทดสอบแบบ Izod จะได้ชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.6 โดยทำการทดสอบกับชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น เริ่มจากการทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่อง Impact Tester โดยใช้ช้อนในการทดสอบขนาด 2 J โดยยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับหัวจับในแนวดิ่ง หันด้านรอยบากให้เข้าหาด้านหัวค้อน ยกค้อนขึ้นให้สูงตามตำแหน่งที่ล็อกค่าไว้ ปล่อยค้อนลงกระแทกชิ้นทดสอบให้หัก นำค่าพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกหักที่อ่านได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าความทนแรงกระแทกตามสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นทดสอบทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

2) การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Tensile Testing)

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุ มีวิธีการทดลองดังนี้

นำชิ้นทดสอบที่ได้จากการฉีดยึดขึ้นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type 1 ดังรูปที่ 3.7 มีระยะทดสอบ (Gauge Length) 50 mm โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างจำนวน 5 ชิ้น โดยเริ่มจากการวัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ทำเครื่องหมายตำแหน่งระยะระหว่างตัวยึด (Grip) ที่บริเวณปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทดสอบหาค่าความทนแรงดึง (Tensile Strength) และค่ามอดูลัสของยัง

(Young's Modulus) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชิ้นทดสอบ HDPE รูปดัมเบลล์สำหรับทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ในขณะทดสอบจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine โดยจะทำการจับชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะ 115 mm ตามมาตรฐานกำหนด ดังรูปที่ 3.5 แล้วทำการดึงยึดชิ้นทดสอบด้วยอัตราการดึง 50 (mm/min) และทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นทดสอบบริเวณตรงกลาง



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการทดสอบความทนแรงดึง [31]

ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง

3) การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Testing)

ความทนแรงดัดโค้ง คือ สมบัติวัสดุที่จะสามารถทนต่อแรงที่ทำให้ตัวอย่างดัดโค้ง โดยไม่เกิดการแตกหรือเสียรูปของตัวอย่างเมื่อหยุดให้แรง เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับพอลิเมอร์ที่ถูกนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ยางล้อรถ ล้อเฟือง โครงสร้างของยานยนต์ เรือ และเครื่องบิน

เป็นต้น วิธีการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9 ผลการทดสอบสามารถหาค่าความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) และ ค่ามอดุลัสดัดโค้ง (Flexural Modulus) ได้



รูปที่ 3.9 การทดสอบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ (Flexural Testing) [31]

การทดสอบความทนต่อความทนแรงดัดโค้งของวัสดุ มีวิธีการทดลองดังนี้
นำชิ้นทดสอบที่ได้ทำการฉีดยึดขึ้นรูปที่มีขนาดความหนา 3 mm ความยาว 127 mm และความกว้าง 12.7 mm ขัดบริเวณขอบด้วยกระดาษทรายละเอียดเพื่อให้ขอบมีความเรียบตามมาตรฐาน ASTM D790 จะได้ชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.10 นำชิ้นทดสอบไปทดสอบความทนแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Universal Testing Machine การทดสอบใช้ความเร็วในการกด 1.38 mm/min และใช้ระยะฐานรองชิ้นทดสอบ (Support Span) 50 mm โดยทำการทดสอบกับชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้น



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

3.3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

1) ทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) หรือที่เรียกว่าเครื่อง DSC เป็นแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal Transition) ของสารตัวอย่าง ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม เพื่อหาค่า อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และระดับการเกิดผลึก (X_c) ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{f100} \times W_p} \times 100 \quad (3.8)$$

โดย ΔH_m = เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึกของ HDPE

ΔH_{f100} = เอนทัลปีของ HDPE ที่เกิดผลึก 100% (มีค่า 240 J/g)

W_p = สัดส่วนของพอลิเมอร์

การทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง-แคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) มีวิธีการทดลองโดยการเตรียมตัวอย่างทดสอบจากเม็ดพลาสติกโดยใช้น้ำหนักประมาณ 4 - 4.99 มิลลิกรัม นำใส่ภาชนะทดสอบอลูมิเนียมและปิดฝาภาชนะทดสอบ โดยใช้สภาวะในการทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 °C และอุณหภูมิสูงสุด 250 °C โดยให้อัตราความร้อน 20 °C /min เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมตัว (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ (T_c) ของ HDPE

2) การศึกษาอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT)

แผ่นวัสดุตัวอย่างที่ได้ทำการขึ้นรูปมาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 12.7 mm ความยาว 127 mm ความหนา 3 mm ขัดบริเวณขอบด้วยกระดาษทรายละเอียดเพื่อให้ขอบมีความเรียบ ตามมาตรฐาน ASTM D648 นำขึ้นทดสอบไปทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน โดยทำการทดสอบกับขึ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น วางขึ้นทดสอบในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.11 และใช้สภาวะการทดสอบ Surface Stress 1.82 MPa อัตราการให้อุณหภูมิ (Ramp) 120 °C/hr และใช้ระยะทดสอบ 0.25 mm เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ขึ้นทดสอบโก่งตัวจากความร้อน



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน [31]

ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับอุณหภูมิ และผลจากการทดสอบสามารถหาอุณหภูมิที่ขึ้นทดสอบอ่อนตัวถึงระยะทดสอบที่กำหนดได้



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT [31])

3.3.6 การทดสอบสมบัติการไหล

1) การทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index, MFI)

ดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) หรือ อัตราการไหล (Melt Flow Rate, MFR) เป็นการบอกความสามารถในการไหลของพลาสติกหลอมเหลวแบบง่าย ๆ มีหน่วยเป็น กรัมต่อ 10 นาที (g/10 min) ซึ่งใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) [31]

การทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุ มีวิธีการทดลองดังนี้

ซึ่งเม็ดพลาสติก หรือพลาสติกที่ได้จากการบดด้วยเครื่องบดปริมาณ 8 กรัม นำไปบรรจุลงและลือคโคได้ ปรับตั้งอุณหภูมิสำหรับให้ความร้อนกับเม็ดพลาสติกที่อุณหภูมิ 190 °C โดยจะใช้น้ำหนักกด 2.16 kg ตามมาตรฐาน ASTM D1238 และนำแท่ง Piston บรรจุลงในส่วนของลำกล้องเครื่องมือและรอจนอุณหภูมิของเครื่องทดสอบได้ตามที่ตั้งไว้ จากนั้นนำ Piston ออกและบรรจุเม็ดพลาสติกลงในส่วนลำกล้องของเครื่องมือ รอให้เม็ดพลาสติกหลอมละลายประมาณ 8 min ตามมาตรฐานทดสอบ เมื่อครบกำหนดแล้วให้วางแท่ง piston ลงบนพลาสติกหลอมที่อยู่ในส่วนลำกล้องเครื่องมือ และนำน้ำหนักกดลงบนแท่ง piston รอจนพลาสติกไหลลงผ่านหน้าไดจนถึงขีดกำหนดของ piston ตามมาตรฐาน และทำการเก็บตัวอย่าง โดยใช้รอบในการตัด 10 s ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมด 10 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้จากการเก็บตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีการไหล โดยสมการในการคำนวณค่าดัชนีการไหลแสดงในสมการที่ 3.9 ดังนี้

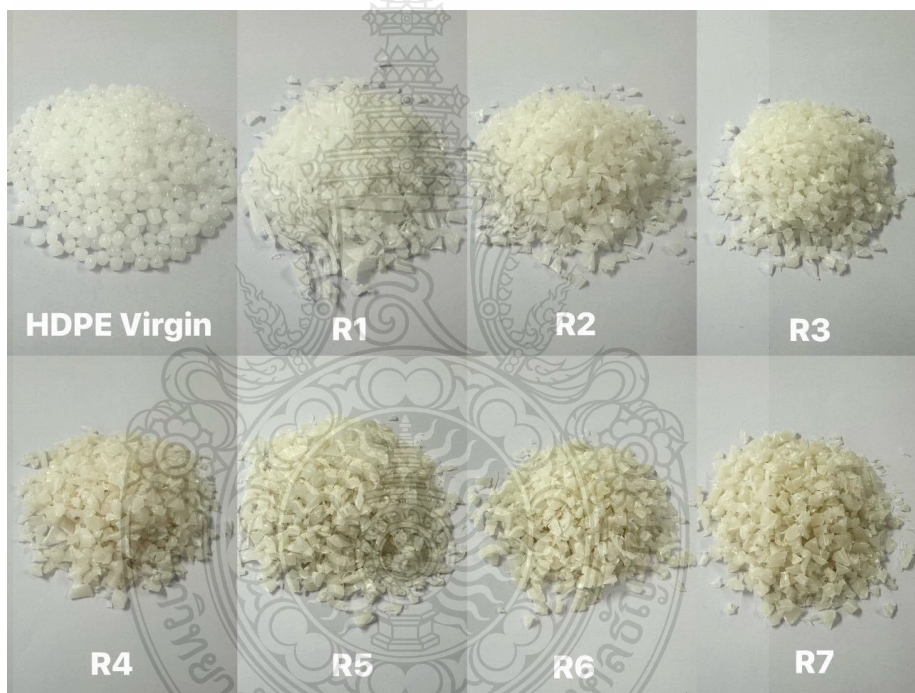
$$\text{MFI(g/10 min)} = 600 \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)} \times \text{เวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง (s)} \quad (3.9)$$

บทที่ 4

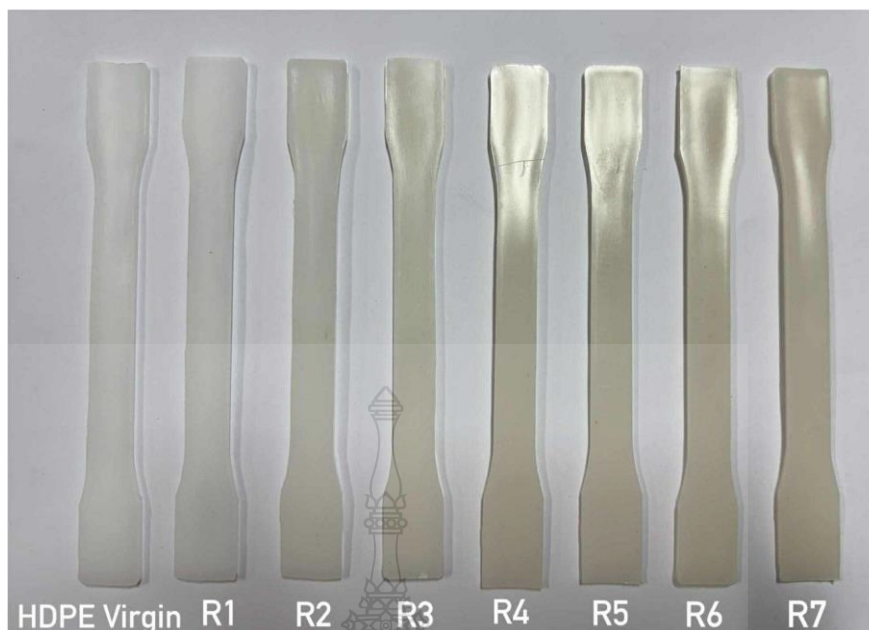
ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปหลาย ๆ ครั้ง เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพลาสติกในการนำกลับไปใช้งานซ้ำ

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง



รูปที่ 4.1 เม็ดพลาสติก HDPE และ เม็ดพลาสติก HDPE ที่ผ่านการบดรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ HDPE และชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล
จำนวน 7 ครั้ง

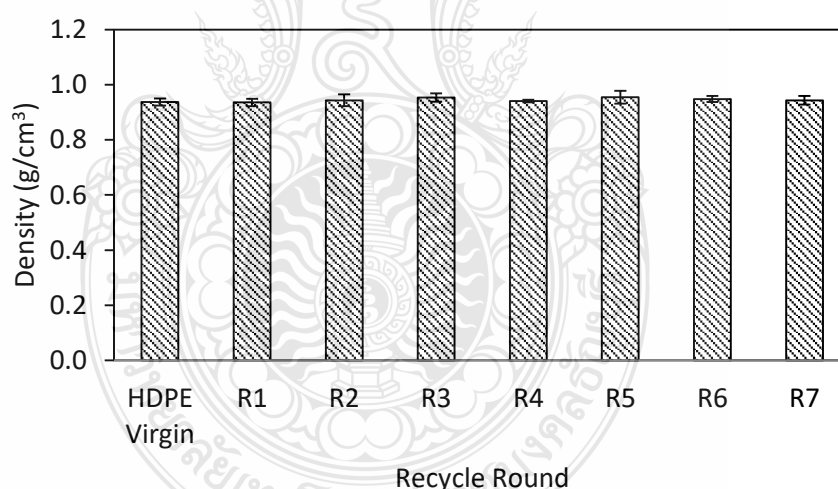
จากศึกษาลักษณะทางกายภาพ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการบดรีไซเคิลซ้ำ ดังรูปที่ 4.1 พบว่า HDPE ที่ยังไม่ผ่านการรีไซเคิลมีสีขาวขุ่นค่อนข้างทึบแสง มีความมันเงา และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล (R1 - R7) มีสีเหลืองนวล และมีสีเหลืองนวลเข้มขึ้นเมื่อจำนวนการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ยังคงมีความมันเงา เช่นเดียวกับชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ที่ผ่านการรีไซเคิล รูปที่ 4.2

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

4.2.1 ความหนาแน่นของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	Density (g/cm ³)
HDPE Virgin	0.9371 ± 0.012
R1	0.9358 ± 0.013
R2	0.9437 ± 0.021
R3	0.9535 ± 0.015
R4	0.9408 ± 0.004
R5	0.9548 ± 0.023
R6	0.9481 ± 0.011
R7	0.9436 ± 0.015



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

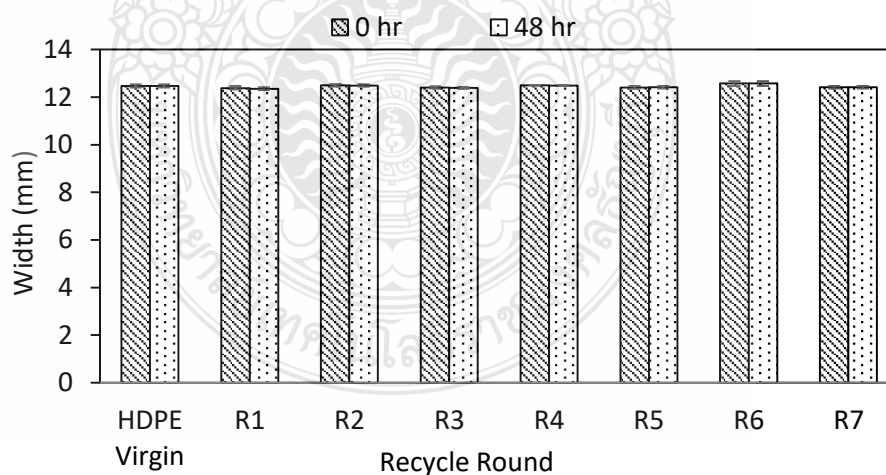
จากการศึกษาสมบัติความหนาแน่นโดยการแทนที่ใน Isopropyl Alcohol ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 พบว่า HDPE มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.9371 g/cm³ และเมื่อนำมารีไซเคิลครั้งแรกพบว่ามีค่าความหนาแน่นไม่ต่างกับ HDPE บริสุทธิ์มากนัก คือมีค่าเท่ากับ 0.9358 g/cm³ และการนำกลับมารีไซเคิลในครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 7 พบว่า HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลแสดงแนวโน้มของค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.9408-0.9548 g/cm³ ทั้งนี้เป็นผลมาจากอาจมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของสายโซ่โมเลกุลของคาร์บอน อย่างไรก็ตาม HDPE

และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงสามารถเกิดผลึกได้ง่าย ดังนั้นการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้งจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงอย่างไม่น่าเด่นชัดมากนัก

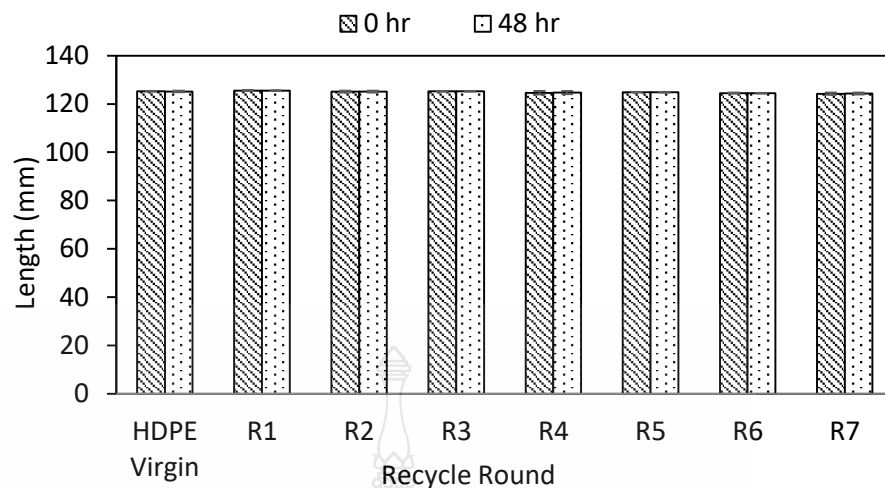
4.2.2 การหดตัวของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

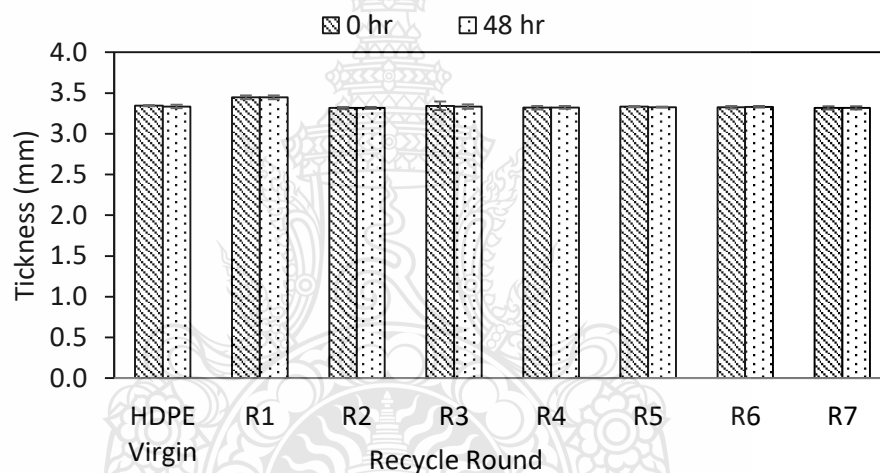
Dimension Sample	Width (mm)		Length (mm)		Thickness (mm)	
	0 hr	48 hr	0 hr	48 hr	0 hr	48 hr
HDPE Virgin	12.48±0.06	12.47 ± 0.07	125.24±0.10	125.13±0.33	3.35±0.01	3.34±0.02
R1	12.38±0.09	12.36±0.06	125.53±0.06	125.51±0.04	3.45±0.02	3.45±0.02
R2	12.50±0.05	12.49±0.05	125.06±0.40	125.06±0.40	3.32±0.01	3.32±0.01
R3	12.41±0.05	12.39±0.04	125.23±0.14	125.22±0.12	3.34±0.05	3.33±0.03
R4	12.50±0.01	12.49±0.02	124.63±0.69	124.71±0.60	3.32±0.02	3.32±0.02
R5	12.41±0.06	12.42±0.05	124.89±0.11	124.89±0.11	3.33±0.01	3.33±0.00
R6	12.58±0.10	12.58±0.10	124.51±0.18	124.47±0.16	3.33±0.01	3.33±0.01
R7	12.42±0.05	12.42±0.05	124.24± 0.45	124.32±0.45	3.32±0.02	3.32±0.02



รูปที่ 4.4 แสดงความกว้างของชิ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง



รูปที่ 4.5 แสดงความยาวของชิ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง



รูปที่ 4.6 แสดงความหนาของชิ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 แสดงค่าน้ำหนักและการหดตัวโดยวัดด้านความยาว ความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบที่ได้จากการฉีดแบบ กำหนดเวลาหล่อเย็นชิ้นทดสอบ ในแม่แบบเท่ากับ 50 s และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 25 °C โดยสุ่มวัดจากตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง จากนั้นวัดขนาดของชิ้นทดสอบหลังจากปลดชิ้นทดสอบออกจากแม่แบบและวัดอีกครั้ง เมื่อเวลาผ่านไป 48 hr พบว่าความยาวของชิ้นทดสอบเมื่อออกจากแบบ มีค่าอยู่ระหว่าง 124 - 125 mm และหลังจากทิ้งไว้ 48 hr มีค่าความยาวอยู่ระหว่าง 124 - 125 mm เช่นเดียวกัน ขณะที่ค่าความกว้าง และความหนามีค่าอยู่ระหว่าง 12.38 - 12.58 และ 3.32 - 3.35 mm ตามลำดับ และชิ้นทดสอบ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลทุกสูตรพบว่าค่าความยาว ความกว้าง และความหนาที่วัดได้ หลังจากออกจากแบบมีค่าเท่ากับค่าที่วัดได้หลังทิ้งไว้ 48 hr จึงกล่าวได้ว่าชิ้นทดสอบทั้ง HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลทุกสูตรไม่พบการหดตัว ทั้งนี้อาจเกิดจากการปรับตั้งแสดงถึงสภาวะการฉีด

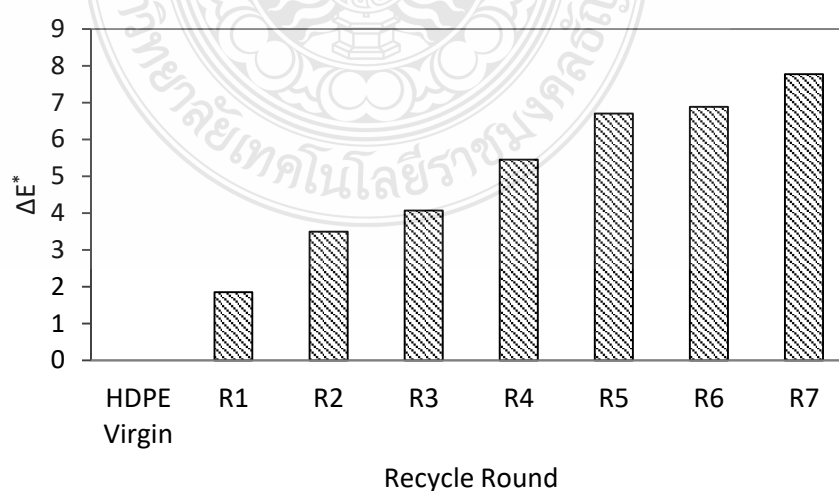
อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างคงที่ และให้เวลาในการปิดแม่พิมพ์นาน อุณหภูมิหล่อเย็นเหมาะสม พลาสติกจึงสามารถเกิดผลึกได้อย่างสมบูรณ์ในแม่แบบ

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 แสดงค่าความต่างของเฉดสี (ΔE) ตามระบบการวัดสี CIE $L^*a^*b^*$ (Commission International de l'Eclairage) ของชิ้นทดสอบ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง โดยการใช้ HDPE เป็นตัวมาตรฐานการเปรียบเทียบเพื่อดูผลความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนไปหลังจาก HDPE ผ่านการรีไซเคิล ครั้งที่ 1 - ครั้งที่ 7

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นทดสอบของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
HDPE Virgin	-	-	-	0.00
R1	-0.94	-0.08	1.59	1.85
R2	-1.06	-0.04	3.33	3.49
R3	-2.12	0.00	3.48	4.07
R4	-2.67	-0.09	4.75	5.45
R5	-3.17	-0.03	5.90	6.70
R6	-3.66	-0.04	5.82	6.88
R7	-4.82	-0.95	6.02	7.77



รูปที่ 4.7 แสดงความต่างของเฉดสี (ΔE) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า ΔL^* ซึ่งเป็นค่าแสดงความแตกต่างของความสว่างเมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE พบว่า HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง มีค่าความสว่างน้อยกว่า HDPE (มีค่าติดลบ) และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 มีค่า ΔL^* ต่ำกว่า HDPE โดยมีค่าค่าสว่างคือ -0.94 และเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการรีไซเคิลจากครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 7 พบว่า ค่า ΔL^* มีค่าติดลบเพิ่มขึ้น คือ -1.06, -2.12, -2.67, -3.17, -3.66 และ -4.82 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายิ่งจำนวนครั้งของการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น ชั้นทดสอบมีค่า ΔL^* ติดลบเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า Δa^* ซึ่งเป็นค่าแสดงแกนแนวโน้มของสีไปทางแกนสีเขียว พบว่า มีค่าติดลบ คือมีค่าอยู่ระหว่าง -0.04 ถึง -0.09 แสดงให้เห็นว่าชั้นทดสอบที่ผ่านการรีไซเคิลมีความคล้ำมากขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE ยกเว้นชั้นทดสอบที่ได้จากการรีไซเคิลครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.00

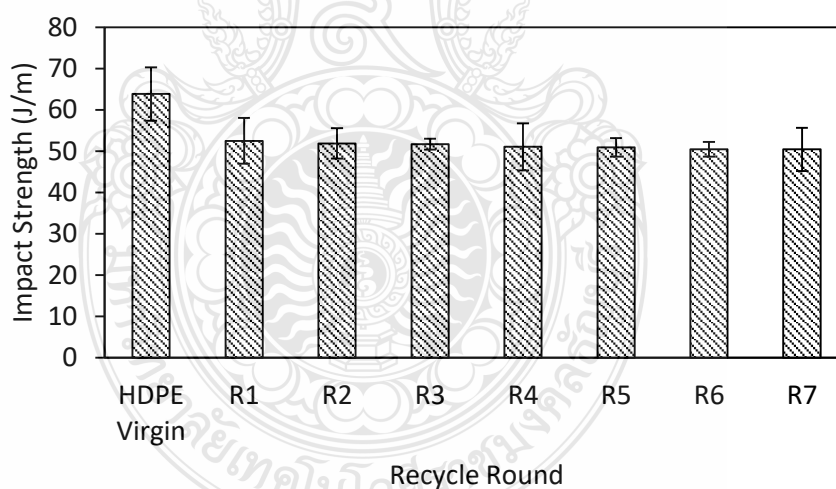
ในส่วน of ค่า Δb^* ซึ่งเป็นแกนสีจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง พบว่า HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 7 มีค่าเป็นบวกทุกค่า โดย HDPE รีไซเคิลครั้งที่ 1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.59 และมีค่าสูงขึ้นตามจำนวนครั้งของการรีไซเคิล โดยการรีไซเคิลครั้งที่ 7 มีค่าสูงสุดที่ 6.02 ซึ่งแสดงเฉดสีเป็นสีเหลือง เช่นเดียวกับค่า ΔE^* ซึ่งคือค่าความต่างของเฉดสี พบว่า HDPE ที่มีการรีไซเคิลจำนวนครั้งมากขึ้น ค่าความต่างของเฉดสี เมื่อเทียบกับ HDPE มีความแตกต่างกันมากขึ้น (ระหว่าง 1.85 - 7.77) ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการรีไซเคิล HDPE ได้รับความร้อนและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเพื่อทำให้เกิดการหลอมและไหลจากชุดฉีดไปยังแม่พิมพ์ จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของ HDPE ถูกตัดขาดหรือ สั่นลง ดังนั้นเมื่อ HDPE ผ่านกระบวนการรีไซเคิลหลาย ๆ ครั้ง โดยที่สภาวะการแปรรูป (ความร้อน และ แรงกระทำต่อ HDPE ในระหว่างการแปรรูป) มีค่าเท่าเดิม จึงทำให้โมเลกุลของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลซึ่งมี สายโซ่โมเลกุลสั้นกว่า HDPE มีโอกาสเสื่อมสภาพได้ง่ายขึ้น สีของชั้นทดสอบจึงเปลี่ยนไปจาก HDPE

4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	Impact Strength (J/m)
HDPE Virgin	63.82 ± 6.49
R1	52.48 ± 5.54
R2	51.88 ± 3.65
R3	51.67 ± 1.33
R4	51.03 ± 5.66
R5	50.91 ± 2.22
R6	50.45 ± 1.81
R7	50.42 ± 5.21



รูปที่ 4.8 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 พบว่า HDPE มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 63.82 J/m ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด เนื่องจาก HDPE มีสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมการเกิดผลึก และเมื่อนำ HDPE มาผ่านกระบวนการรีไซเคิลครั้งที่ 1 พบว่าค่าความทนแรงกระแทกลดลงเท่ากับ 52.48 J/m ซึ่งลดลงประมาณ 17.77 % และเมื่อนำ HDPE มารีไซเคิลครั้งที่ 3 จนถึงครั้งที่ 7 พบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกอยู่ระหว่าง 51.87, 51.03, 50.90, 50.45, และ 50.42 J/m ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแสดงแนวโน้มที่ลดลงตามจำนวนครั้งที่รีไซเคิล

จากตารางที่ 4.4 การรีไซเคิลครั้งแรกพบการลดลงของค่าความทนแรงกระแทกมากที่สุด และเมื่อรีไซเคิลครั้งที่ 2 จนถึงครั้งที่ 7 ค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการรีไซเคิลครั้งแรกสายโซ่โมเลกุลของ HDPE ที่ยังมีความยาวมีการขาดและสั้นลงเนื่องจากความร้อนและแรงกระทำในระบบการฉีดมากที่สุดจึงทำให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การรีไซเคิลครั้งที่ 2 จนถึงครั้งที่ 7 สายโซ่โมเลกุลได้สั้นลงเมื่อเทียบกับ HDPE ทำให้ค่าความเหนียวลดลง ดังนั้นผลกระทบที่มาจากแรงเฉือนจึงลดลงตามสายโซ่โมเลกุลที่สั้นลง ดังนั้นจึงได้รับอิทธิพลจากแรงกระทำน้อยลง แต่จะได้รับอิทธิพลจากความร้อนมากขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ให้ในระบบยังคงมีค่าเท่าเดิม

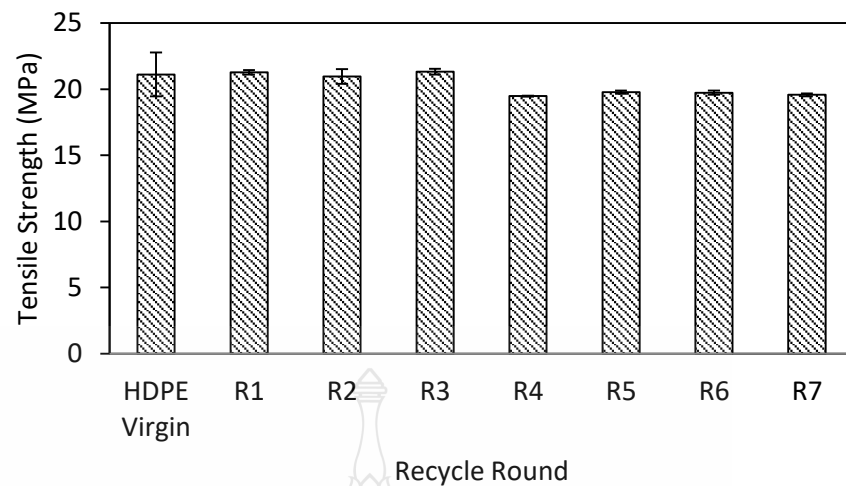
4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 - 4.11 แสดงสมบัติความทนแรงดึง (Tensile Strength) มอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ%การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

1) ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

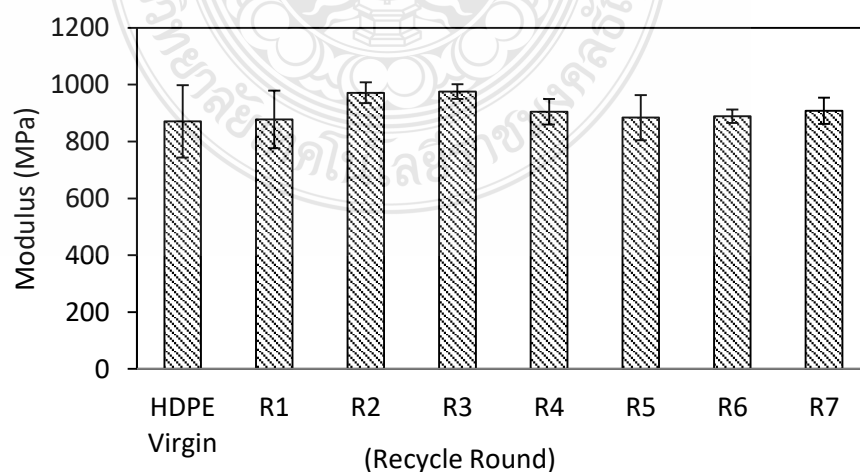
Sample	Tensile Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Elongation at Break (%)
HDPE Virgin	21.12 ± 1.66	871.00 ± 127.77	333.40 ± 90.06
R1	21.28 ± 0.16	877.20 ± 101.32	350.40 ± 93.75
R2	20.96 ± 0.56	971.40 ± 36.45	177.40 ± 53.37
R3	21.32 ± 0.22	975.60 ± 25.89	157.80 ± 44.89
R4	19.48 ± 0.04	905.00 ± 44.82	172.60 ± 54.96
R5	19.78 ± 0.13	884.00 ± 78.92	231.98 ± 130.77
R6	19.74 ± 0.15	889.00 ± 23.24	210.60 ± 91.88
R7	19.58 ± 0.11	908.20 ± 46.21	219.80 ± 62.97



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความทนแรงดึงของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 แสดงค่าความทนแรงดึงของ HDPE และ HDPE ที่จำนวนครั้งการรีไซเคิล ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 7 พบว่า HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิลมีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 21.12 MPa และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 3 มีค่าความทนแรงดึงอยู่ระหว่าง 20.96 - 21.28 MPa และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบแล้ว พบว่าการรีไซเคิลครั้งที่ 1 - 3 ส่งผลกระทบบต่อค่าความทนแรงดึงน้อยมาก เช่นเดียวกับการรีไซเคิลในครั้งที่ 4 จนถึงครั้งที่ 7 พบว่ามีค่าความทนแรงดึงประมาณ 19 MPa ดังนั้น จากการทดสอบแรงดึงจึงพบว่า เมื่อรีไซเคิลพลาสติก HDPE จำนวน 1-7 ครั้งส่งผลต่อค่าความทนแรงดึงน้อยมาก อย่างไรก็ตาม HDPE แสดงแนวโน้มการลดลงของค่าความทนแรงดึง หากมีการรีไซเคิลในจำนวนครั้งที่มากกว่านี้

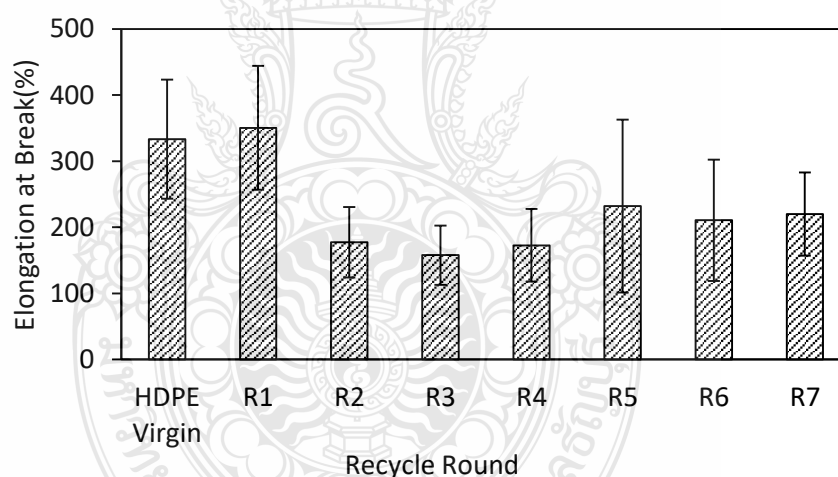
2) มอดูลัสของยัง (Young's Modulus)



รูปที่ 4.10 แสดงค่ามอดูลัสของยังของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 HDPE มีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 871 MPa และเมื่อนำมารีไซเคิลในครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 3 พบว่าค่ามอดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.71 - 12.00 % เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิล ทั้งนี้อาจเนื่องจากผลึกของ HDPE รีไซเคิลในการรีไซเคิลแต่ละครั้งมีทั้งผลึกเล็กและผลึกขนาดใหญ่ผสมกันอยู่ ดังนั้นผลึกขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะหลอมตัวช้ากว่าและไปขัดขวางโมเลกุลหรือทำให้เกิดการพันกันของสายโซ่ (Chain Entanglement) ส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวยากขึ้น จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของยังของการรีไซเคิลในครั้งที่ 4, 5 และ 6 พบว่ามีค่าเท่ากับ 905.00, 884.00, 889.00 และ 908.20 MPa ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงที่แสดงถึงค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการ รีไซเคิลในครั้งที่ 3 (975.60 MPa) คาดว่าในช่วงนี้ผลึกของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลอาจมีการเติบโตใกล้เคียงกันจึงส่งผลต่อการเคลื่อนไหวยของโมเลกุลน้อยลง การเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสของยังของพลาสติกที่เสื่อมสภาพอาจเป็นผลมาจากการเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างที่เป็นแบบร่างแหก็ได้ [10]

3) % การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break)



รูปที่ 4.11 แสดงค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

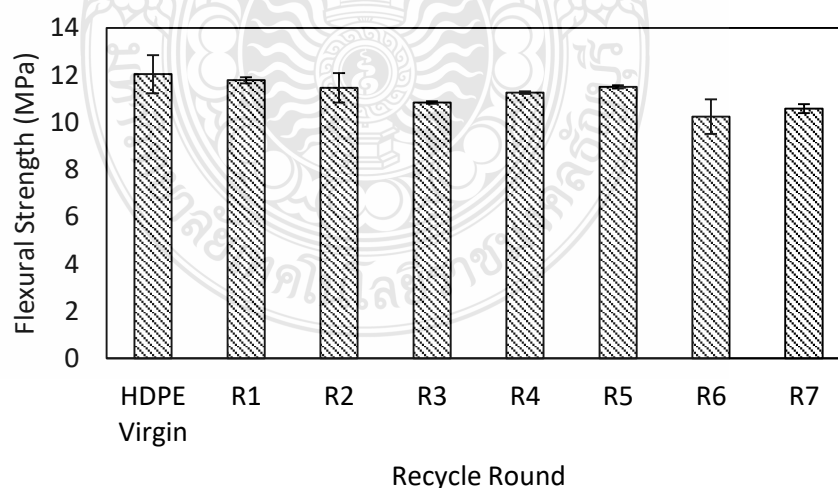
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 พบว่าค่า % การยืดตัว ณ จุดขาดของ HDPE มีค่าเท่ากับ 333.40 % และเมื่อผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 ค่าร้อยละการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น 5.1 % และเมื่อรีไซเคิลครั้งที่ 2 จนถึงการรีไซเคิลครั้งที่ 4 พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอยู่ระหว่าง 46.79 - 52.67 % เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิล และเมื่อรีไซเคิลครั้งที่ 5 และ 7 พบว่ามีค่า % การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอยู่ระหว่าง 30.41 - 36.83 % เห็นได้ว่าผลของการรีไซเคิลที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลงนั้น ทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก HDPE เป็นพลาสติกที่มีสายโซ่ตรงโครงสร้างเป็นแบบอะลิฟาติกที่มีความแข็งตึง (Stiffness) ต่ำ และสามารถเกิดผลึกได้เอง ผลึกที่

เกิดขึ้น จะเป็นผลึกขนาดใหญ่ซึ่งโมเลกุลสามารถเคลื่อนตัวออกจากโครงผลึกและเกิดการเคลื่อนที่เมื่อได้รับแรงดึง ดังนั้นจึงแสดงพฤติกรรมการยืดตัวได้สูง แต่เมื่อผ่านการรีไซเคิลซ้ำกันหลาย ๆ ครั้งโมเลกุลขนาดสั้นลง แต่ยังสามารถเกิดผลึกได้ แต่ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงมีเฟสระหว่างผลึกจำนวนมาก ดังนั้นจึงส่งผลให้การรับแรงและการยืดตัวลดลง

4.3.3 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.6 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	Flexural Strength (MPa)
HDPE Virgin	12.04 ± 0.80
R1	11.78 ± 0.13
R2	11.46 ± 0.62
R3	10.84 ± 0.05
R4	11.26 ± 0.05
R5	11.50 ± 0.07
R6	10.24 ± 0.73
R7	10.58 ± 0.19



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.12 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล ครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 7 พบว่า HDPE มีค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ

12.04 MPa และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 7 มีค่าความทนแรงดัดโค้งอยู่ระหว่าง 10.24 - 11.78 MPa มีค่าต่ำกว่า HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิลเล็กน้อย ซึ่งไม่มีค่าแตกต่างกันมาก เมื่อเทียบกับ HDPE แสดงว่าการรีไซเคิลเพียง 7 ครั้ง (R1- R7) ส่งผลกระทบน้อยมาก นั่นคือขั้นตอนการโม่เมื่อได้รับแรงกดใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์

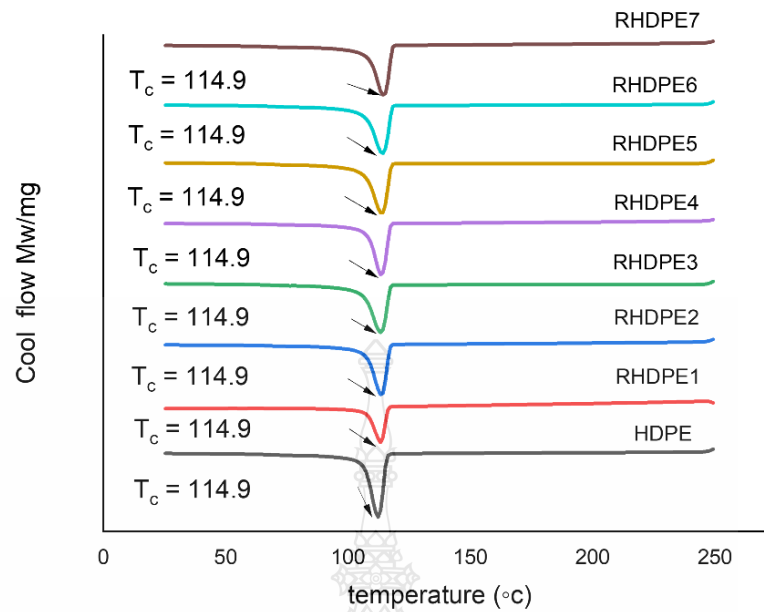
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

4.4.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมการเกิดผลึกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

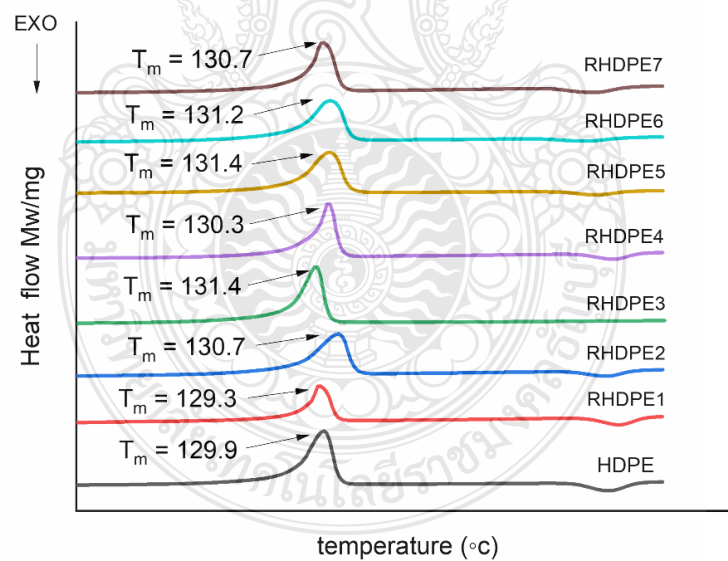
ตารางที่ 4.7 แสดงพารามิเตอร์การเกิดผลึกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	x_c (%)
HDPE (Virgin)	112.4	129.9	207.0	86.25
R1	113.4	129.3	108.1	80.41
R2	113.7	130.7	182.4	76.00
R3	113.4	131.4	192.8	80.33
R4	113.6	130.3	186.7	77.79
R5	113.9	131.4	202.0	84.16
R6	114.3	131.2	201.0	83.75
R7	114.9	130.7	177.0	73.75

ตารางที่ 4.7 แสดงพฤติกรรมการเกิดผลึกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 7 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หาได้จาก DSC เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลในขั้นตอนการเย็นตัว (Cooling Scan) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second Heating Scan) ส่วนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First Heating Scan) เป็นขั้นตอนที่ใช้ลบประวัติทางความร้อน (Thermal History) ของขั้นตอนทดสอบ ผลลัพธ์ของการทดสอบเป็นการแสดงอุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) ที่บันทึกจากขั้นตอนการเย็นตัว อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m), เอนทัลปีของการหลอมเหลว (Enthalpy Of Melting, ΔH_m), และระดับของการเกิดผลึก (Degree Of Crystallinity, x_c) ของ HDPE และ HDPE ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4



รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้งที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัว



รูปที่ 4.14 DSC เทอร์โมแกรมของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้งที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรม ในขั้นตอนการเย็นตัวของชิ้นทดสอบภายหลังถูกอบประวัติทางความร้อนในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 พบว่า T_c ของ HDPE มีค่าเท่ากับ $112.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งพบเพียงพิกเดียวแสดงว่า HDPE และ HDPE

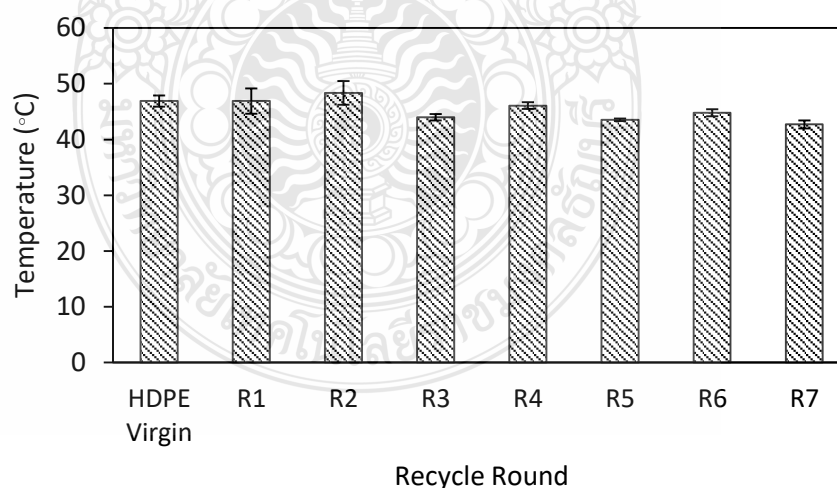
ที่ผ่านการรีไซเคิลเป็นพลาสติกที่สามารถเกิดผลึกได้ดี เนื่องจากไม่พบพีคขนาดเล็กที่เกิดจากการเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏขึ้น และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 7 มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่อยู่ระหว่าง $113.4 - 114.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้พลาสติกสามารถเกิดผลึกเปลี่ยนสถานะจากพลาสติกหลอมเหลวในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัว $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ พบว่า HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล ครั้งที่ 1 จนถึง ครั้งที่ 7 แสดงแนวโน้มของการเกิดผลึกเร็วขึ้นประมาณ $1 - 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้เนื่องจากการรีไซเคิลทำให้สายโซ่โมเลกุลของ HDPE มีขนาดสั้นลงตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลจึงสามารถเคลื่อนตัวมาจัดเรียงตัวใหม่ได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณา DSC เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิหลอมตัว (T_m) ที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ดังรูปที่ 4.14 พบว่า T_m ของ HDPE มีค่าเท่ากับ $129.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ HDPE ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลทั้งหมด (R1 – R7) มีค่าอยู่ระหว่าง $129.3 - 131.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิประมาณ $0.6 - 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเทียบกับ HDPE ดังนั้นการรีไซเคิล HDPE ทั้ง 7 ครั้งจึงส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมผลึกไม่มากนัก นอกจากนี้ ปริมาณการเกิดผลึกของ HDPE มีค่าเท่ากับ 86.25% และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 มีปริมาณการเกิดผลึกเท่ากับ 80.41% อาจเกิดจากการที่ HDPE ผ่านความร้อนและแรงกระทำของกระบวนการผลิตเพียงครั้งเดียว ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลบางส่วนจึงเกิดการเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อย ทำให้ภายในโครงสร้างอาจมีทั้งสายโซ่โมเลกุลที่ยาวและสั้นอยู่รวมกันความสามารถในการจัดเรียงผลึกจึงลดลง แต่เมื่อนำมารีไซเคิลซ้ำอีกครั้ง (R2) กลับพบว่าปริมาณการเกิดผลึกลดลงเป็น 76% และในการรีไซเคิลซ้ำครั้งที่ 3 และ 4 พบว่าปริมาณการเกิดผลึกใหม่อยู่ในช่วง 80.33 และ 77.79% ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับปริมาณการเกิดของ HDPE อยู่ระหว่าง $10.25-5.92\%$ และเมื่อนำกลับมารีไซเคิลซ้ำอีกเป็นครั้งที่ 5 จนถึงครั้งที่ 7 (R5 – R7) พบว่ามีปริมาณการเกิดผลึก $84.16\ 83.75$ และ 73.75% ตามลำดับ ซึ่งอาจแสดงถึงแนวโน้มการเกิดผลึกใหม่ลดลง

4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนเนื่องจากความร้อน (Heat Deflection Temperature, HDT) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลทั้งหมด 7 ครั้ง (R1 – R7)

ตารางที่ 4.8 แสดงอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	Heat Deflection Temperature (°C)
HDPE Virgin	46.90 ± 1.01
R1	46.90 ± 2.27
R2	48.37 ± 2.12
R3	44.00 ± 0.56
R4	46.07 ± 0.61
R5	43.53 ± 0.21
R6	44.80 ± 0.62
R7	42.70 ± 0.72



รูปที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

จากตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.15 HDPE มีอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนเนื่องจากความร้อนเท่ากับ 46.9 °C และมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 0 - 2.9 °C แสดงว่าผลของการรีไซเคิล

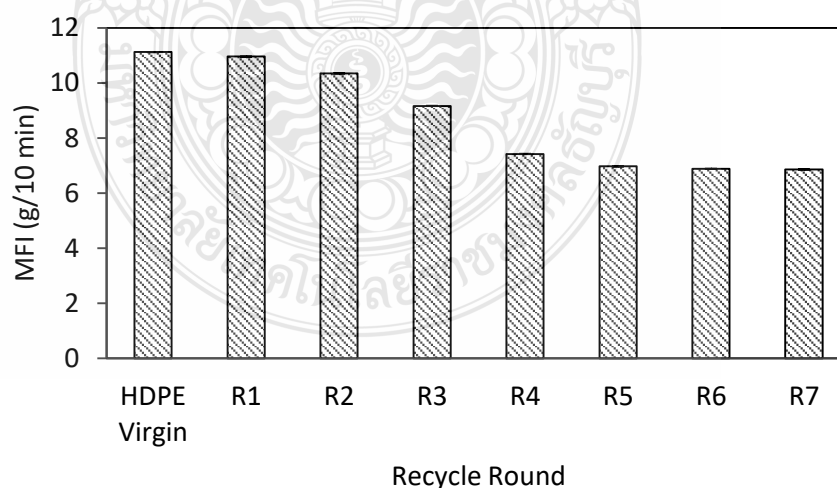
จำนวนน้อยครั้งส่งผลต่ออุณหภูมิอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนไม่มากนัก เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกยังมีไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการรีไซเคิล HDPE มีการแสดงแนวโน้มของอุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนเนื่องจากความร้อนลดลง (42.7°C) ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกที่มากขึ้น

4.4.3 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 แสดงดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.9 แสดงดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	MFI (g/10 min)
HDPE Virgin	11.12 ± 0.0027
R1	10.96 ± 0.0065
R2	10.35 ± 0.0016
R3	9.16 ± 0.0032
R4	7.42 ± 0.0097
R5	6.97 ± 0.0040
R6	6.88 ± 0.0008
R7	6.86 ± 6.86



รูปที่ 4.16 แสดงดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 แสดงค่าดัชนีการไหลของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง พบว่า HDPE มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 11.12 g/10 min และ เมื่อนำกลับมารีไซเคิล

ครั้งที่ 1 (R1) ค่าดัชนีการไหลลดลงเท่ากับ 10.96 g/10 min และการรีไซเคิลซ้ำครั้งที่ 2 จนถึงครั้งที่ 7 (R2 - R7) ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนครั้งของการรีไซเคิลซ้ำที่เพิ่มขึ้น (10.35 - 6.86 g/10 min ตามลำดับ) แสดงว่า HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลของ HDPE เกิดการสลายตัว จากปัจจัยด้านความร้อน แรงเฉือน และการมีอยู่ของออกซิเจน ส่งผลให้มีโอกาสเกิดการตัดขาดของสายโซ่หรือเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ในกรณีนี้ การรีไซเคิลจำนวนครั้งที่มากขึ้น HDPE มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่และปฏิกิริยาเชื่อมขวางขึ้นได้ระหว่างการรีไซเคิล ซึ่งส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีค่าดัชนีการไหลลดลง ซึ่งสามารถอธิบายการทดลองได้เช่นเดียวกับทฤษฎีในหนังสือวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงภู อุตรา ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 ของงานวิจัยเล่มนี้ในหัวข้อที่ 2.5 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation) หัวข้อย่อยที่ 2.5.1 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากความร้อน (Thermal Degradation) [19]



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพพบว่า เมื่อจำนวนครั้งการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น (R1-R7) สีของ HDPE มีสีเหลืองนวลเข้มขึ้น และความหนาแน่นมีค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เด่นชัดมากนัก เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิล และจากการทดสอบการหดตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการรีไซเคิลตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 7 พบว่ามีขนาดความหนา ความกว้าง และความยาวของชิ้นทดสอบเมื่อวัดหลังจากออกจากแม่แบบ และวัดที่เวลาผ่านไป 48 hr มีค่าไม่ต่างจากเดิม และผลจากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นทดสอบ พบว่าค่าความต่างของเอนดี (ΔE^*) ของ HDPE เมื่อมีการรีไซเคิลจำนวนครั้งมากขึ้น ค่าความต่างของเอนดี เมื่อเทียบกับ HDPE มีความแตกต่างกันมากขึ้น สีของชิ้นทดสอบจึงเปลี่ยนไปจาก HDPE

5.2 ผลการศึกษสมบัติเชิงกล

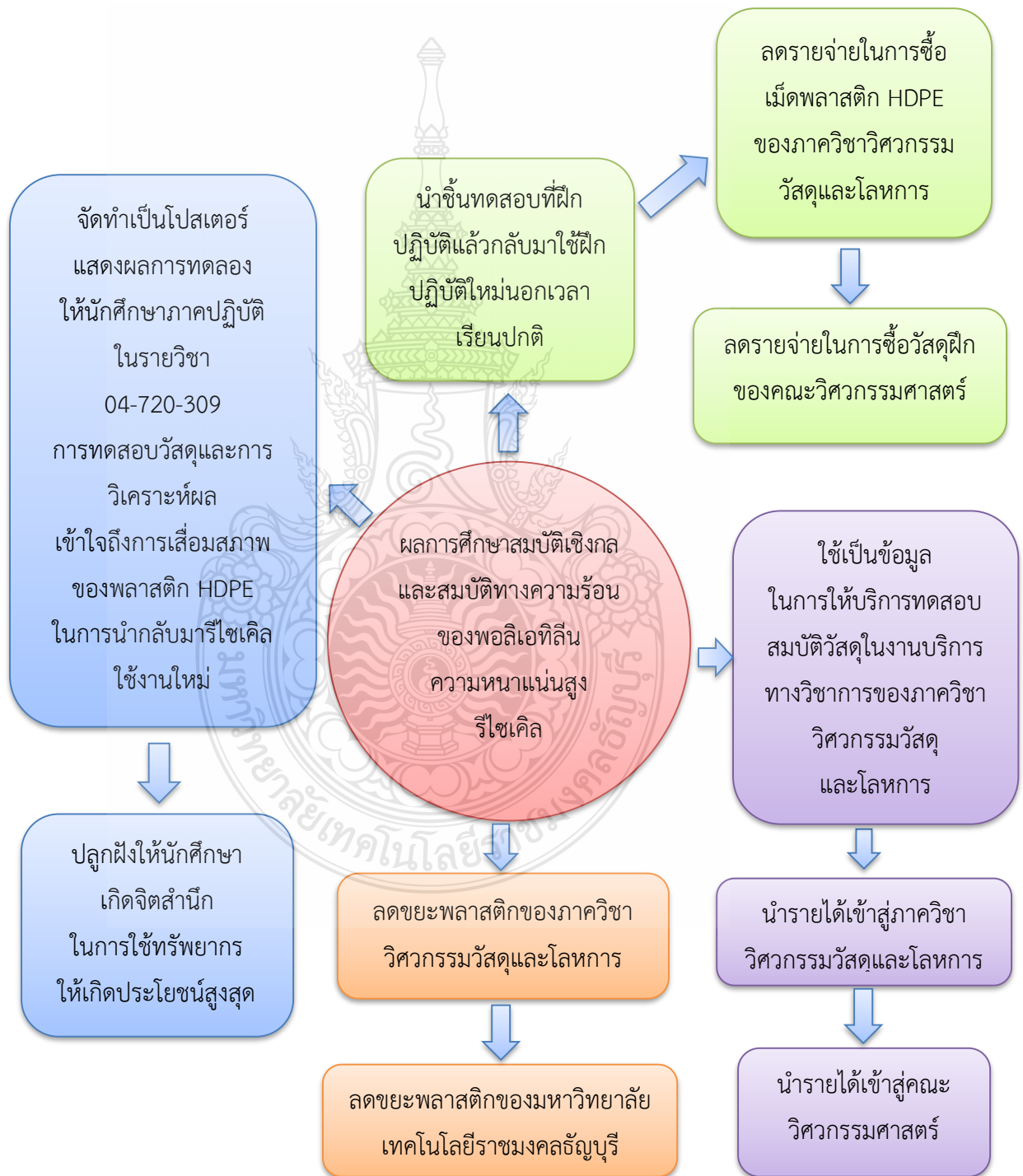
จากการศึกษาสมบัติความทนแรงกระแทกพบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการรีไซเคิลแปรผกผันกับค่าความทนแรงกระแทก กล่าวคือเมื่อจำนวนครั้งการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นชิ้นทดสอบจะมีค่าความทนแรงกระแทกลดลง ผลการทดสอบความทนแรงดึงพบว่าค่าความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังมีค่าไม่ต่างจากเดิมมากนักเมื่อ HDPE ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 7 แต่จะพบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อนำ HDPE กลับมารีไซเคิลเมื่อเทียบกับ HDPE ไม่ได้ผ่านการรีไซเคิล และจากการศึกษาค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ผ่านการรีไซเคิล ซึ่งไม่มีความแตกต่างมากนัก แสดงว่าการรีไซเคิลเพียง 7 ครั้ง (R1 - R7) ส่งผลกระทบน้อยมาก นั่นคือชิ้นทดสอบมีการโค้งงอเมื่อได้รับแรงกดใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์

5.3 ผลการศึกษสมบัติทางความร้อน

ผลจากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัวจากการให้ความร้อนในครั้งที่ 1 แสดงให้เห็นว่า HDPE มีพีคที่พบมีเพียงพีคเดียว แสดงว่า HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลเป็นพลาสติกที่สามารถเกิดผลึกได้ดี เนื่องจากไม่พบพีคขนาดเล็กที่เกิดจากการเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏขึ้น และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 7 แสดงแนวโน้มของการเกิดผลึกเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการรีไซเคิลทำให้สายโซ่โมเลกุลของ HDPE มีขนาดสั้นลง ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลจึงสามารถเคลื่อนตัวมาจัดเรียงตัวใหม่ได้ง่ายขึ้น และอุณหภูมิการหลอมตัว T_m ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 จะพบว่า HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลตั้งแต่ครั้งที่ 1 – ครั้งที่ 7 มีความแตกต่างของอุณหภูมิหลอมผลึกไม่มากนัก และพบว่า

ปริมาณการเกิดผลึกของ HDPE เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลมีปริมาณการเกิดผลึกลดลง เมื่อเทียบกับ HDPE และการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนพบว่า การนำกลับมารีไซเคิลครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 4 (R1 - R4) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ HDPE และผลทดสอบดัชนีการไหลพบว่า เมื่อจำนวนครั้งการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นค่าดัชนีการไหลมีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับ

5.4 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนางาน



รูปที่ 5.1 แผนภาพข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนางาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของ HDPE รีไซเคิล ซึ่งเป็นพลาสติกหลักสำหรับการฝึกภาคปฏิบัติในเรื่องงานฉีดของนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ โดยการนำมารีไซเคิลซ้ำหลาย ๆ ครั้ง และทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่องมือและวิธีการทดสอบตามมาตรฐานสากล ผลจากการศึกษานี้ผู้วิจัยสามารถนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนางานได้ดังนี้

5.4.1 นักศึกษาของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการสามารถนำชิ้นทดสอบที่ฝึกปฏิบัติแล้วกลับมาใช้ฝึกปฏิบัติใหม่นอกเวลาเรียนปกติได้ เป็นการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของงบประมาณการจัดซื้อเม็ดพลาสติก HDPE ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ลงได้

5.4.2 จัดทำเป็นโปสเตอร์เพื่อเป็นกรณีศึกษาหรือกรณีตัวอย่างให้นักศึกษาภาคปฏิบัติในรายวิชา 04-720-309 การทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ผลได้เรียนรู้เกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของพลาสติก HDPE และนำพลาสติก HDPE กลับมารีไซเคิลใช้งานใหม่ และยังเป็นการปลูกฝังให้นักศึกษาเกิดจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5.4.3 ลดปริมาณขยะพลาสติกของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

5.4.4 ใช้เป็นข้อมูลในงานบริการทดสอบสมบัติวัสดุในงานบริการทางวิชาการของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ โดยการจัดทำเป็นโปสเตอร์แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของพลาสติก HDPE และการนำ HDPE รีไซเคิลมาเป็นส่วนผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่ได้ชัดเจนขึ้น และยังเป็น การนำรายได้จากงานบริการทางวิชาการเข้าสู่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ และคณะวิศวกรรมศาสตร์

5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป

5.5.1 อาจมีการใช้สารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และทางความร้อน ที่เสื่อมสภาพจากการรีไซเคิล เช่น การใช้สารเสริมเสถียรภาพหรือสารเพิ่มความทนทาน เพื่อให้ HDPE รีไซเคิลมีความเสถียรมากขึ้นในการใช้งานที่หลากหลาย

5.5.2 อาจเพิ่มการทดสอบสมบัติการใช้งานในสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง เช่น การทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นหรือสารเคมี เพื่อให้สามารถนำผลไปใช้พิจารณาในการใช้งานในอุตสาหกรรมจริงได้มากขึ้น

5.5.3 อาจจะเพิ่มการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระดับเชิงลึกมากขึ้น เพื่อจะช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ เมื่อ HDPE ผ่านการรีไซเคิลหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้เข้าใจและหาแนวทางในการปรับปรุงการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

5.5.4 ศึกษาสมบัติของพลาสติกชนิดอื่น ๆ ที่ผ่านการรีไซเคิล

บรรณานุกรม

- [1] RYT9. **ส่องเทรนด์โลก: พลิกโฉมบรรจุภัณฑ์หลังหลายประเทศเดินหน้าลด-เลิกพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้ง** [ออนไลน์] 2566 [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://www.ryt9.com/s/exim/3387958>
- [2] ALL AROUND PLASTICS. **เทรนด์ของวงการพลาสติกเพื่อการขับเคลื่อนโลกอย่างยั่งยืน** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://surl.li/lrqkbb>
- [3] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.). **แผนปฏิบัติการด้านการขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศไทยด้วยโมเดลเศรษฐกิจ BCG พ.ศ. 2564-2570** [ออนไลน์] 2565 [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://www.bcg.in.th/bcg-action-plan/>
- [4] EXPRESSPLASPACK. **ทำความเข้าใจ ประเภทพลาสติกที่ถูกนำมารีไซเคิล** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://surl.li/zrgewi>
- [5] งานวิจัยและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาพื้นที่ บพท. **5 นวัตกรรมเพื่อจัดการขยะ ของ มทร.ธัญบุรี** [ออนไลน์] 2562 [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://url.in.th/YVTes>
- [6] ฐานข้อมูลและงานวิจัย มทร.ธัญบุรี. **ต้นแบบการบริหารจัดการขยะภายใน มทร.ธัญบุรี** [ออนไลน์] 2563 [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://url.in.th/vbLFF>
- [7] RMUTT. **คอลัมน์ วิจัยได้ทิ้ง: แปรรูปถุงพลาสติกหิ้ว เปลี่ยน ‘ขยะ’ ให้เป็น ‘เงิน’** [ออนไลน์] 2563 [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://url.in.th/ralwW>
- [8] RMUTT. **คอลัมน์ ด้วยสมองและสองมือ: จากขยะพลาสติกสู่ผลิตภัณฑ์นักวิจัย ‘มทร.ธัญบุรี’ คว่ำรางวัล ‘นวัตกรรมจัดการขยะชุมชน** [ออนไลน์] 2563 [อ้างเมื่อ 1 เมษายน 2566]. จาก <https://url.in.th/yJsPP>
- [9] GUANG LEE PLASTIC CO.,LTD. **ขยะพลาสติก** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 19 เมษายน 2566]. จาก <http://www.guangleeplastic.com/Article/Detail/63727>
- [10] มูลนิธิแม่ฟ้าหลวง ในพระบรมราชูปถัมภ์. **รู้จักพลาสติก 7 ชนิดที่ไทยกำลังจะแบน** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อวันที่ 19 เมษายน 2566]. จาก <https://shorturl.asia/ifJMT>
- [11] บริษัท ซี.ซี.ที กรุ๊ป (1997) จำกัด. **การรีไซเคิลพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยเครื่องบดพลาสติก** [ออนไลน์] 2564 [อ้างเมื่อวันที่ 28 เมษายน 2566]. จาก <https://www.cctgroup.co.th/recycling-plastic-by-milling-machine/>
- [12] Bio Plastic. **พลาสติกรีไซเคิล** [ออนไลน์] [อ้างเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2566]. จาก <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/what-is-plastic/recycle-plastic.html>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] เทศบาลนครแม่สอด. 9 ไอเดียรีไซเคิลขวดพลาสติก เป็นของใช้รักษ์โลก [ออนไลน์] 2565 [อ้างเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม 2566]. จาก <https://surl.li/lftahe>
- [14] SGE CHEM. พลาสติก HDPE [ออนไลน์] 2564 [อ้างเมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม 2566]. จาก <https://shorturl.asia/XIPxM>
- [15] บริษัท ยูเนี่ยนทอย (ไทยแลนด์) จำกัด. กระบวนการผลิตวัสดุพลาสติก [ออนไลน์] 2563 [อ้างเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2566]. จาก <https://surl.li/jbzokf>
- [16] L.A PLASTIC. ลักษณะเครื่องฉีดพลาสติกและโครงสร้างเครื่องฉีดพลาสติก ตอน1 [ออนไลน์] [อ้างเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2566]. จาก <https://shorturl.asia/slUvW>
- [17] ANAN INDUSTRY อนันต์อินดัสทรี. พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก [ออนไลน์] [อ้างเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2566]. จาก <https://shorturl.asia/Jmvh8>
- [18] ทรงภู อุตรา. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ กรุงเทพฯ: โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าส์; 2560.
- [19] Excel VBA Notes. เราได้อะไรจาก "ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน" (standard deviation) [ออนไลน์] [อ้างเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2566]. จาก <https://shorturl.asia/4hsIK>
- [20] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ข้อมูลคณะวิศวกรรมศาสตร์ [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 23 มีนาคม 2566]. จาก <https://shorturl.asia/FLnCV>
- [21] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. แผนปฏิบัติการประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 23 มีนาคม 2566]. จาก <https://shorturl.asia/8olX3>
- [22] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ภาควิชา [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 23 มีนาคม 2566]. จาก <https://engineer.rmutt.ac.th/all-departments/>
- [23] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. หลักสูตรที่เปิดสอน [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 23 มีนาคม 2566]. จาก <https://engineer.rmutt.ac.th/materials-th-course/>
- [24] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 23 มีนาคม 2566]. จาก https://oreg.rmutt.ac.th/?page_id=14908
- [25] Shiyong Z. Analysis the property changes of the thermal recycled HDPE and LDPE [Degree Thesis Material Processing and Design]. Arcada University of Applied Sciences; 2020.
- [26] Rohmat R, Indah W, Danar SW. Characteristics of recycled HDPE/bamboo fibre composite. **Journal of Physics: Conference Series**. AEVEC 2020; 18-19 September 2020; City, Indonesia. Indonesia: IOP Publishing; 2021.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [27] Antypas IR, Savostina TP. 2021, Study of Mechanical Properties of Recycled Polyethylene of High and Low Density. **Materiale Plactice** 2022 January 4; 58(4): 210-215.
- [28] Solomon T, Olawale SF, Teshome M, Ester TA. Investigation of Compositional Effects of Virgin and Recycled HDPE on Mechanical Properties of Pipe. **ICMED 2021.3rd** International Conference on Design and Manufacturing Aspects for Sustainable Energy (ICMED-ICMPC 2021); 2021 September 24-26; Hyderabad, India. E3S Web of Conferences: EDP Sciences; 2021.
- [29] Javed A, Adnan N, Arifa M, Muhammad N, Haris K, Muhammad Suhaiba, Aamer Sharifb. Mechanical properties evaluation of recycled high density polyethylene via additive manufacturing. **Journal of Materials and Manufacturing** 2023 December 18; 2: 1-9.
- [30] Nectarios V, Markos P. Athena M. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of High-Density Polyethylene over Multiple Recycling Processes. **Recycling** 2021 January 4; 6(1).
- [31] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ (2566). **ที่มาได้ภาพ**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [32] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2566). **ที่มาได้ภาพ**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก ก.

ตารางข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพ



ค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่น = ((น้ำหนักชั่งในอากาศ - น้ำหนักชั่งในสารละลาย Isopropyl Alcohol)/น้ำหนักชั่งใน-
อากาศ) $\times$ 0.786

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาความหนาแน่นของสูตร HDPE Virgin ครั้งที่ 1

ความหนาแน่น HDPE Virgin ครั้งที่ 1 = $((0.0224 - 0.0034)/0.0224) \times 0.786$
= 0.9267 g/cm³

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความหนาแน่น (Density) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7
ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Density (g/cm ³)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	0.9267	0.9292	0.9622	0.9541	0.9391	0.9723	0.9619	0.9366
2	0.9689	0.9423	0.9507	0.9648	0.9482	0.9858	0.9528	0.9502
3	0.9411	0.9359	0.9535	0.9338	0.9365	0.9492	0.9342	0.9408
4	0.9332	0.9404	0.9603	0.9529	0.9427	0.9462	0.9392	0.9494
5	0.9365	0.9364	0.9678	0.9313	0.9376	0.9237	0.9496	0.9377
6	0.9282	0.9386	0.9640	0.9502	0.9368	0.9402	0.9546	0.9423
7	0.9441	0.9348	0.9207	0.9390	0.9341	0.9521	0.9547	0.9489
8	0.9299	0.9544	0.9257	0.9653	0.9456	0.9321	0.9490	0.9484
9	0.9357	0.9432	0.9193	0.9676	0.9420	0.9490	0.9576	0.9095
10	0.9271	0.9032	0.9133	0.9762	0.9452	0.9971	0.9275	0.9727
ค่าเฉลี่ย	0.9371	0.9358	0.9437	0.9535	0.9408	0.9548	0.9481	0.9436
SD	0.0126	0.0132	0.0214	0.0152	0.0047	0.0233	0.0110	0.0157

การหดตัว

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่าน
การรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	No.	0 hr			48 hr		
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)
HDPE	1	12.59	125.30	3.35	12.59	125.30	3.35
	2	12.38	125.32	3.33	12.38	125.32	3.33
	3	12.48	125.32	3.34	12.48	125.32	3.34
	4	12.42	125.18	3.34	12.42	125.18	3.34
	5	12.50	125.26	3.34	12.50	124.26	3.34
	6	12.43	125.31	3.35	12.43	125.31	3.30
	7	12.47	125.22	3.36	12.47	125.22	3.36
	8	12.44	124.99	3.35	12.40	124.90	3.30
	9	12.51	125.24	3.34	12.51	125.24	3.34
	10	12.55	125.25	3.35	12.55	125.25	3.35
R1	1	12.47	125.41	3.42	12.47	125.45	3.42
	2	12.45	125.59	3.50	12.45	125.50	3.50
	3	12.34	125.58	3.43	12.30	125.55	3.43
	4	12.58	125.58	3.46	12.40	125.55	3.46
	5	12.36	125.59	3.46	12.36	125.58	3.46
	6	12.33	125.51	3.44	12.30	125.50	3.44
	7	12.33	125.51	3.44	12.33	125.50	3.44
	8	12.30	125.50	3.42	12.30	125.50	3.42
	9	12.33	125.50	3.45	12.33	125.50	3.45
	10	12.35	125.48	3.46	12.33	125.48	3.46

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่าน
การรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง (ต่อ)

Sample	No.	ออกจากแบบ			48 hr		
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)
R2	1	12.41	125.50	3.33	12.41	125.50	3.33
	2	12.40	124.85	3.31	12.40	124.85	3.31
	3	12.50	125.13	3.32	12.50	125.13	3.32
	4	12.55	125.50	3.33	12.50	125.50	3.33
	5	12.53	125.43	3.33	12.53	125.43	3.33
	6	12.51	125.16	3.33	12.50	125.16	3.33
	7	12.55	124.89	3.32	12.55	124.89	3.32
	8	12.50	124.19	3.30	12.50	124.19	3.30
	9	12.52	125.11	3.30	12.52	125.11	3.30
	10	12.51	124.80	3.31	12.51	124.80	3.31
R3	1	12.37	125.29	3.48	12.37	125.29	3.38
	2	12.37	125.46	3.34	12.37	125.26	3.34
	3	12.47	125.33	3.38	12.47	125.33	3.38
	4	12.36	125.32	3.31	12.36	125.32	3.31
	5	12.33	125.32	3.31	12.33	125.32	3.31
	6	12.38	125.22	3.31	12.38	125.22	3.31
	7	12.42	125.13	3.33	12.42	125.23	3.33
	8	12.47	125.10	3.33	12.40	125.10	3.33
	9	12.45	125.11	3.32	12.40	125.10	3.32
	10	12.44	124.99	3.32	12.40	124.99	3.32

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่าน
การรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง (ต่อ)

Sample	No.	ออกจากแบบ			48 hr		
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)
R4	1	12.50	123.82	3.32	12.50	123.82	3.32
	2	12.51	123.60	3.31	12.51	123.90	3.31
	3	12.50	124.00	3.34	12.50	124.50	3.34
	4	12.49	125.11	3.30	12.49	125.11	3.31
	5	12.50	124.49	3.30	12.50	124.50	3.31
	6	12.51	125.52	3.35	12.51	125.52	3.35
	7	12.49	125.41	3.36	12.49	125.41	3.35
	8	12.48	124.51	3.32	12.48	124.51	3.32
	9	12.50	125.31	3.31	12.45	125.31	3.31
	10	12.50	124.53	3.30	12.48	124.50	3.31
R5	1	12.40	124.95	3.33	12.40	124.95	3.33
	2	12.41	124.89	3.33	12.41	124.80	3.33
	3	12.42	124.88	3.34	12.40	124.88	3.33
	4	12.34	124.65	3.32	12.34	124.65	3.32
	5	12.40	125.00	3.33	12.40	125.00	3.33
	6	12.55	125.00	3.34	12.50	125.00	3.33
	7	12.34	124.76	3.32	12.44	124.80	3.33
	8	12.46	124.92	3.34	12.46	124.92	3.32
	9	12.37	124.90	3.34	12.47	124.95	3.32
	10	12.36	124.98	3.33	12.36	124.95	3.33

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ HDPE และ HDPE ที่ผ่าน
การรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง (ต่อ)

Sample	No.	ออกจากแบบ			48 hr		
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)
R6	1	12.51	124.56	3.30	12.51	124.45	3.33
	2	12.81	124.89	3.33	12.81	124.80	3.33
	3	12.52	124.46	3.32	12.52	124.46	3.32
	4	12.56	124.26	3.32	12.56	124.26	3.33
	5	12.51	124.59	3.33	12.51	124.50	3.33
	6	12.71	124.63	3.33	12.71	124.64	3.33
	7	12.53	124.39	3.31	12.53	124.39	3.32
	8	12.56	124.38	3.32	12.56	124.35	3.32
	9	12.53	124.49	3.34	12.53	124.45	3.34
	10	12.54	124.44	3.35	12.54	124.40	3.35
R7	1	12.50	124.70	3.33	12.50	124.75	3.33
	2	12.42	124.46	3.32	12.42	124.48	3.32
	3	12.47	124.46	3.33	12.47	124.46	3.33
	4	12.41	124.52	3.32	12.41	124.56	3.32
	5	12.49	124.45	3.32	12.49	124.45	3.32
	6	12.41	124.55	3.33	12.41	124.90	3.33
	7	12.44	124.50	3.32	12.44	124.50	3.32
	8	12.35	123.64	3.33	12.35	123.64	3.33
	9	12.34	123.51	3.31	12.34	123.90	3.31

การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นทดสอบ

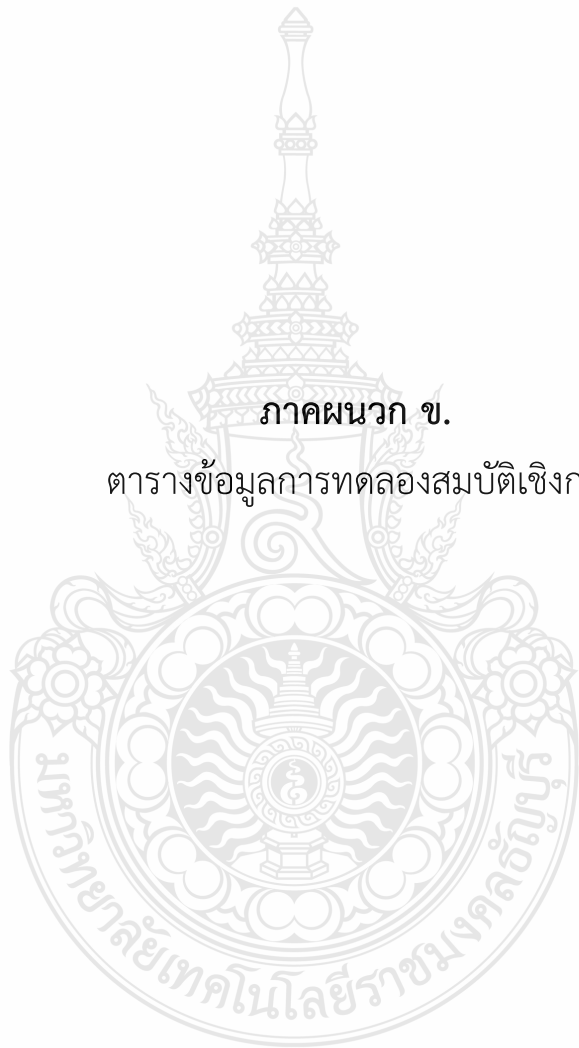
ตารางที่ ก.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นทดสอบ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

Sample	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
HDPE (Virgin)	-	-	-	0.00
R1	-0.94	-0.08	1.59	1.85
R2	-1.06	-0.04	3.33	3.49
R3	-2.12	0.00	3.48	4.07
R4	-2.67	-0.09	4.75	5.45
R5	-3.17	-0.03	5.90	6.70
R6	-3.66	-0.04	5.82	6.88
R7	-4.82	-0.95	6.02	7.77



ภาคผนวก ข.

ตารางข้อมูลการทดลองสมบัติเชิงกล



ค่าความทนแรงกระแทก

ค่าความทนแรงกระแทก

Energy (J)

Thickness (mm) $\times 10^{-3}$

ตัวอย่างวิธีการหาค่าความทนแรงกระแทกของ HDPE Virgin ครั้งที่ 1

$$\frac{0.1857 \text{ (J)}}{3.33 \text{ (mm)} \times 10^{-3}} = 58.18 \text{ (J/m)}$$

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Impact Strength (J/m)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	58.18	53.33	53.33	52.73	58.18	52.12	47.88	50.91
2	60.61	53.33	55.76	53.33	41.21	50.91	50.00	50.91
3	58.18	50.91	48.48	50.61	55.76	49.39	52.12	46.06
4	72.73	58.18	58.18	51.52	46.06	51.52	51.21	50.91
5	58.18	46.06	50.91	50.91	50.91	50.91	50.91	53.33
6	70.30	55.76	53.33	52.12	53.33	51.21	50.00	53.33
7	65.45	55.76	46.06	49.09	50.91	46.06	50.91	46.06
8	72.73	41.21	48.48	53.33	43.64	53.94	50.91	41.21
9	55.76	50.91	53.33	52.12	55.45	53.33	47.27	50.91
10	66.06	59.39	50.91	50.91	54.85	49.70	53.33	60.61
ค่าเฉลี่ย	63.82	52.48	51.88	51.67	51.03	50.91	50.45	50.42
SD	6.49	5.54	3.65	1.33	5.66	2.22	1.81	5.21

ค่าความทนแรงดึง

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า Tensile Strength ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Tensile Strength (MPa)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	21.0	21.5	20.7	21.5	19.5	19.6	19.7	19.6
2	21.5	21.2	21.4	21.4	19.5	19.9	19.8	19.7
3	21.9	21.1	20.9	21.2	19.5	19.9	19.9	19.6
4	22.8	21.2	20.2	21.5	19.4	19.8	19.5	19.6
5	18.4	21.4	21.6	21.0	19.5	19.7	19.8	19.4
ค่าเฉลี่ย	21.12	21.28	20.96	21.32	19.48	19.78	19.74	19.58
SD	1.66	0.16	0.56	0.22	0.04	0.13	0.15	0.11

ตารางที่ ข.3 แสดงค่า Young's Modulus ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Young's Modulus (MPa)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	936	741	955	1010	829	941	867	867
2	902	902	1020	958	946	903	871	919
3	935	884	1000	983	906	928	913	954
4	938	1020	938	943	922	746	879	948
5	644	839	944	984	922	902	915	853
ค่าเฉลี่ย	871.00	877.20	971.40	975.60	905.00	884.00	889.00	908.20
SD	127.77	101.32	36.45	25.89	44.82	78.92	23.24	46.21

ตารางที่ ข.4 แสดงค่า Elongation at Break(%) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Elongation at Break(%)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	254	488	224	174	144	217	306	286
2	431	310	141	167	221	184	312	273
3	281	336	155	220	240	230	122	134
4	269	235	244	116	146	443	175	222
5	432	383	123	112	112	85.9	138	184
ค่าเฉลี่ย	333.40	350.40	177.40	157.80	172.60	231.98	210.60	219.80
SD	90.06	93.75	53.37	44.89	54.96	130.77	91.88	62.97



ค่าความทนแรงดัดโค้ง

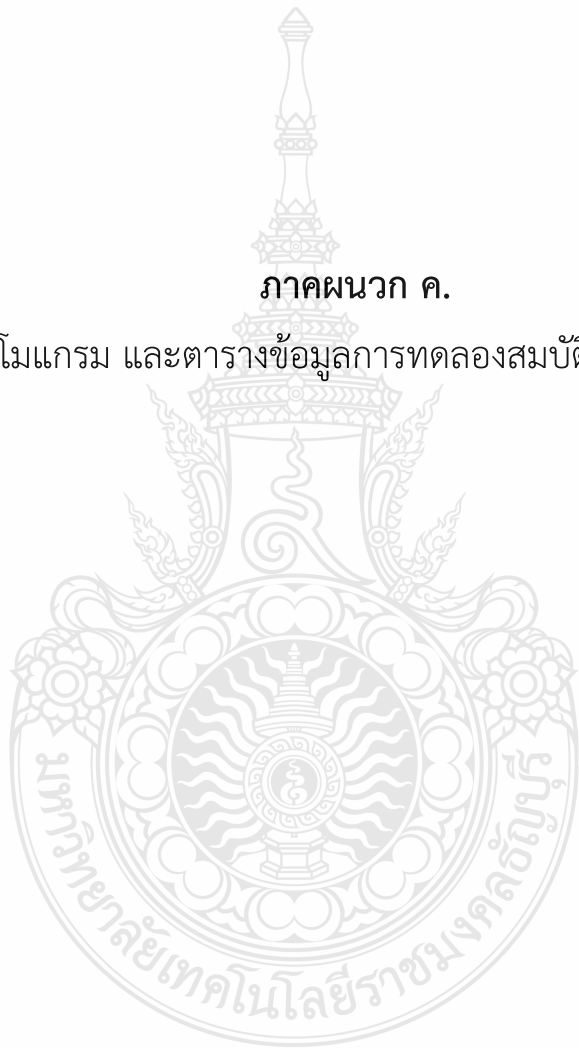
ตารางที่ ข.5 แสดงค่า Flexural Strength ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลจำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Flexural Strength (MPa)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	11.2	11.6	11.4	10.8	11.2	11.6	10.9	10.3
2	11.2	11.8	11.9	10.9	11.2	11.5	9.48	10.6
3	13.0	11.9	11.8	10.8	11.3	11.5	11.0	10.7
4	12.4	11.7	10.4	10.8	11.3	11.5	9.52	10.8
5	12.4	11.9	11.8	10.9	11.3	11.4	10.3	10.5
ค่าเฉลี่ย	12.04	11.78	11.46	10.84	11.26	11.50	10.24	10.58
SD	0.80	0.13	0.62	0.05	0.05	0.07	0.73	0.19

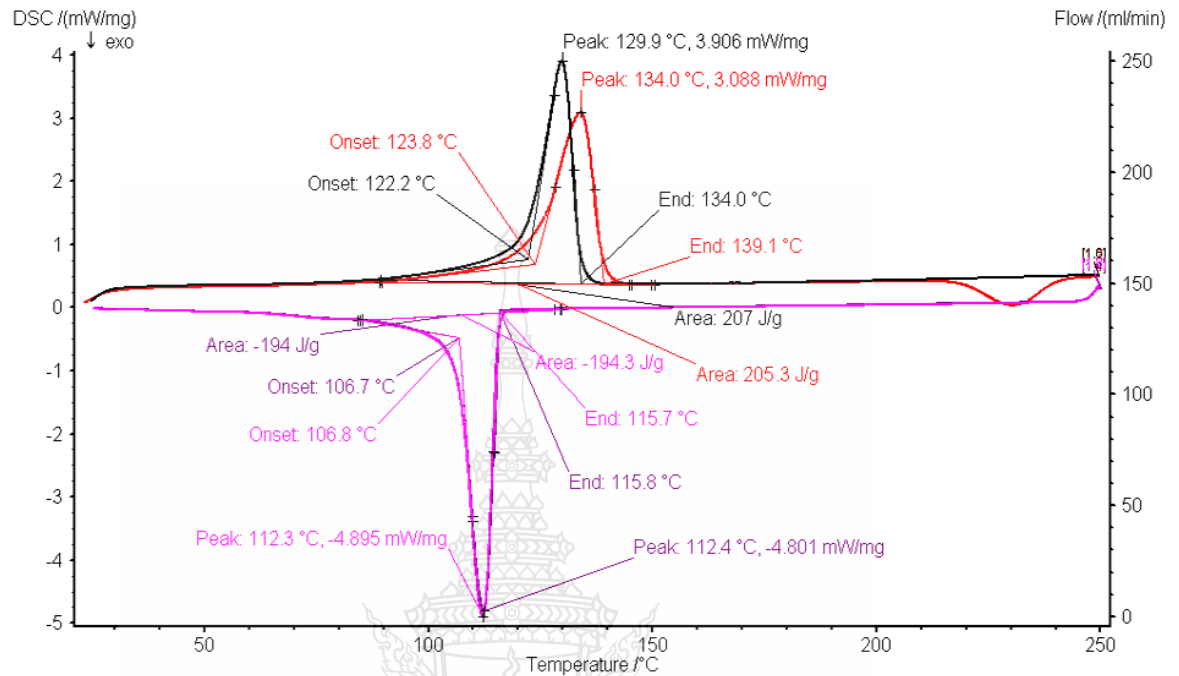


ภาคผนวก ค.

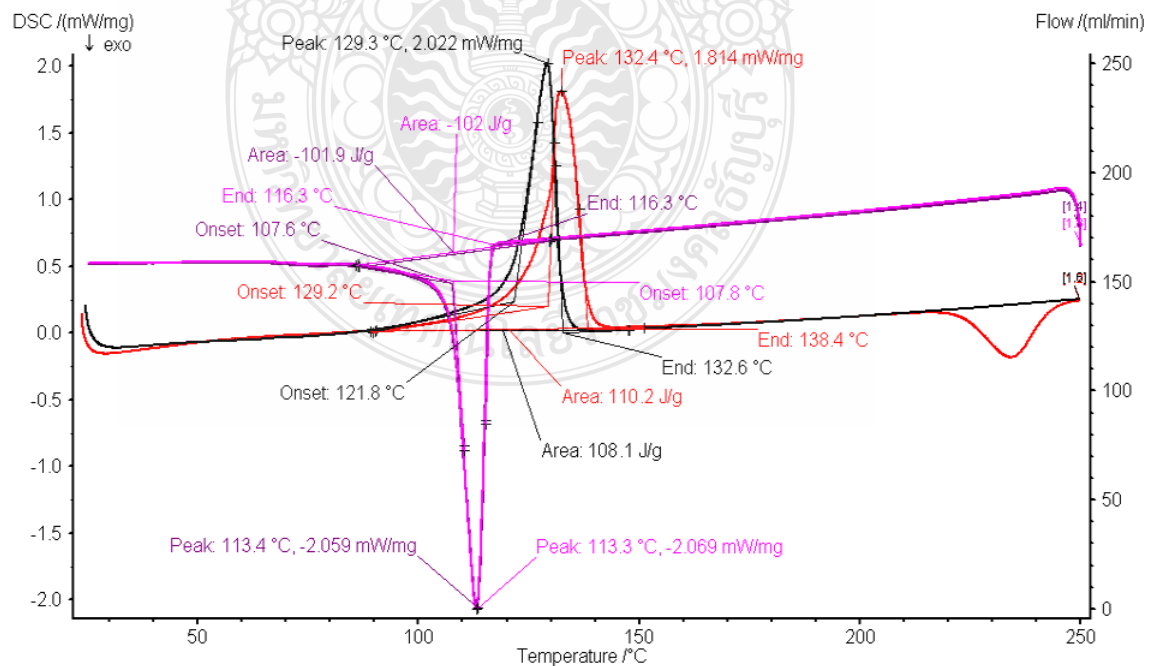
เทอร์โมแกรม และตารางข้อมูลการทดลองสมบัติทางความร้อน



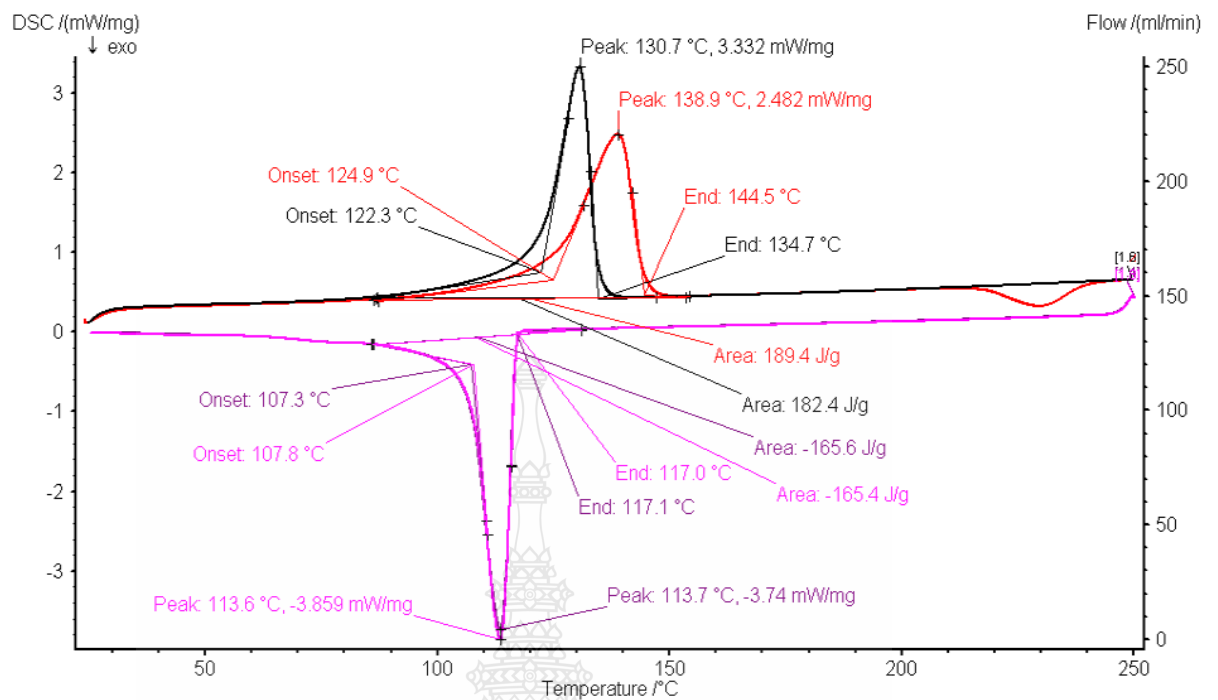
เทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่อง DSC



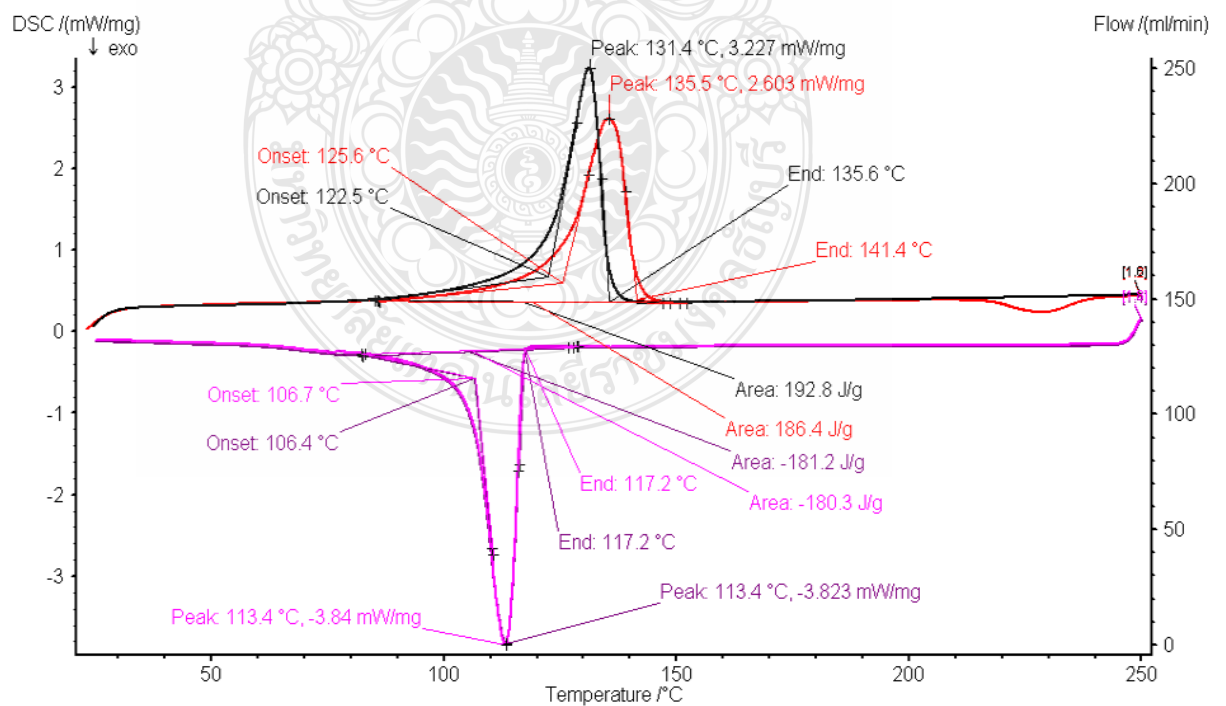
รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE



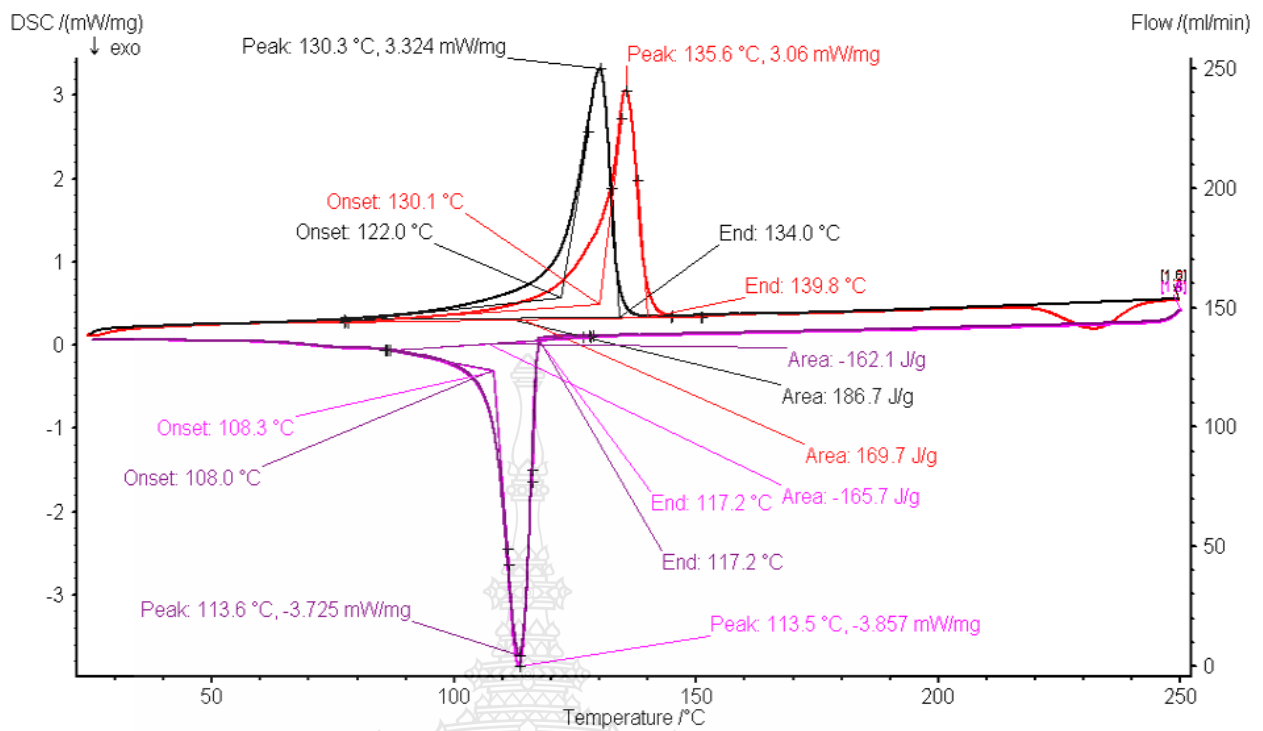
รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 (R1)



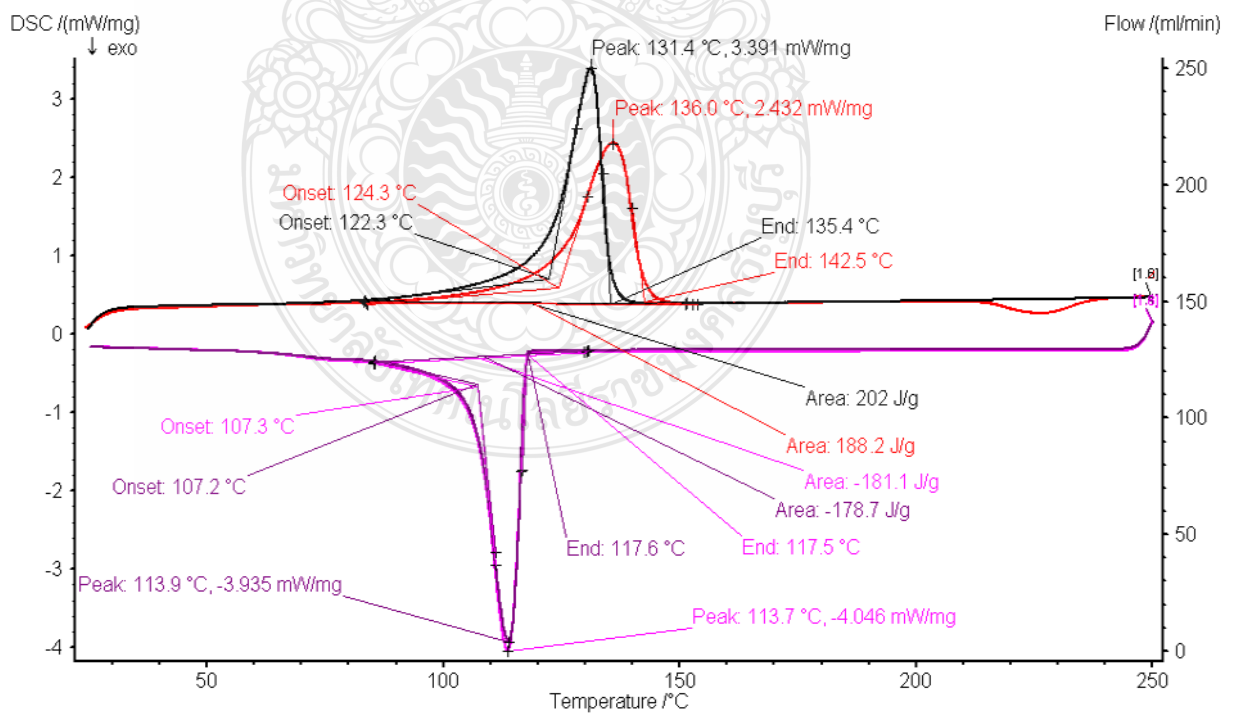
รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 2 (R2)



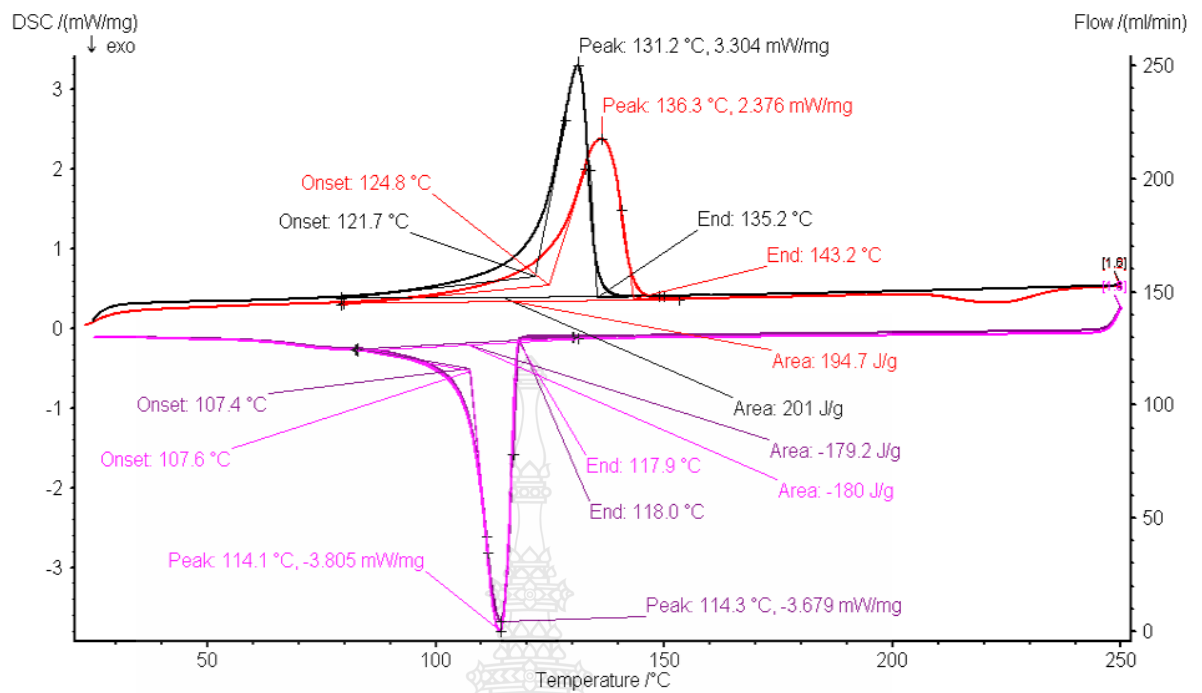
รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 3 (R3)



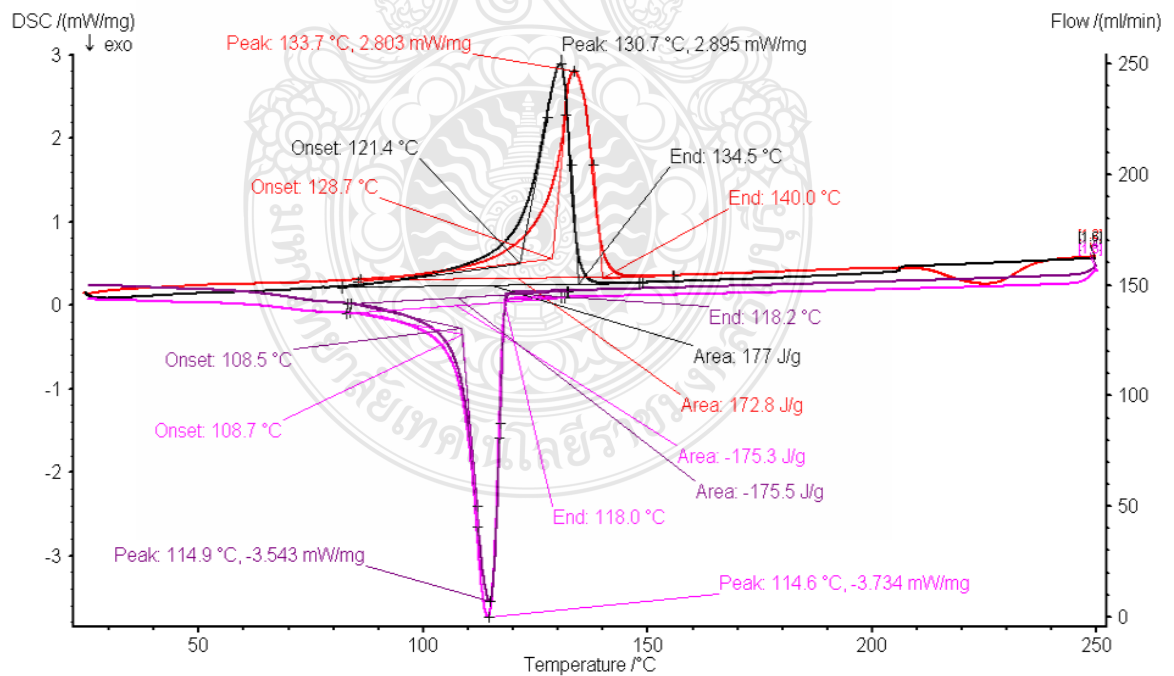
รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 4 (R4)



รูปที่ ค.6 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 5 (R5)



รูปที่ ค.7 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 6 (R6)



รูปที่ ค.8 เทอร์โมแกรม DSC ของ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 7 (R7)

ค่าอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน

ตารางที่ ค.1 แสดงค่า Heat distortion temperature ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล
จำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	Heat distortion temperature (°C)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	46.7	49.5	48.7	44.1	46.6	43.6	44.6	42.5
2	48	45.9	46.1	43.4	45.4	43.3	45.5	42.1
3	46	45.3	50.3	44.5	46.2	43.7	44.3	43.5
ค่าเฉลี่ย	46.9	46.9	48.4	44.0	46.1	43.5	44.8	42.7
SD	1.0	2.3	2.1	0.6	0.6	0.2	0.6	0.7



ค่าดัชนีการไหล

ดัชนีการไหล (MFI) = (น้ำหนักเฉลี่ยของตัวอย่าง 10 ชิ้น ของ 1 สูตร(กรัม) × 600) / เวลาที่ใช้ตัด
ตัวอย่างในแต่ละครั้ง(วินาที)

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าดัชนีการไหลของสูตร HDPE Virgin

ดัชนีการไหลของ HDPE Virgin =

$$((0.185+0.189+0.186+0.186+0.189+0.186+0.180+0.183+0.186+0.183)/10) \times 600 / 10$$

$$= 11.12 \text{ g/10 min}$$

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของ HDPE และ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล
จำนวน 7 ครั้ง

ตัวอย่าง ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (g)							
	HDPE Virgin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
1	0.1853	0.1877	0.1724	0.1542	0.1247	0.1161	0.1133	0.1150
2	0.1892	0.1871	0.1719	0.1520	0.1255	0.1125	0.1160	0.1160
3	0.1865	0.1872	0.1745	0.1606	0.1230	0.1138	0.1159	0.1115
4	0.1864	0.1842	0.1740	0.1571	0.1240	0.1229	0.1142	0.1147
5	0.1890	0.1867	0.1717	0.1519	0.1223	0.1127	0.1140	0.1160
6	0.1869	0.1783	0.1753	0.1502	0.1232	0.1223	0.1150	0.1141
7	0.1802	0.1716	0.1718	0.1503	0.1231	0.1176	0.1150	0.1158
8	0.1831	0.1710	0.1742	0.1522	0.1231	0.1129	0.1151	0.1136
9	0.1864	0.1862	0.1710	0.1503	0.1258	0.1127	0.1143	0.1129
10	0.1835	0.1863	0.1726	0.1516	0.1265	0.1188	0.1144	0.1137
ค่าเฉลี่ย	0.1854	0.1826	0.1724	0.1527	0.1237	0.1162	0.1147	0.1143
SD	0.0027	0.0065	0.0016	0.0032	0.0097	0.0040	0.0008	0.0015
MFI(g/10min)	11.12	10.96	10.35	9.16	7.42	6.97	6.88	6.86

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือ



ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Universal Testing Machine



CALSERVE (THAILAND) CO., LTD.

219/41 Moo 6 Tambol Bangken, Amphur Muang Nonthaburi
Nonthaburi 11000 Thailand center@calservethailand.com
Tel: +6629652090 to 2 Fax: +6629652093

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Page 1 of 4

Calibrate Testing Machine in Accordance with ASTM E4-13
Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

Certificate NO. C190056
Date of Calibration 29 Mar 19

Testing Machine		Transducer	
Manufacturer:	Hounsfield	Manufacturer:	Hounsfield
Machine Model:	H50KS	Model:	THE 2500N
Serial Number:	0121	Serial Number:	805037
Indicator:	Digital-Readout	Capacity: (N)	25000

This is to certify that the above testing machine have been verified by Calserve (Thailand) Co., Ltd. The listed data is in accordance with the practices of ASTM E4-13. The expanded uncertainties reported are estimates of the measurement uncertainty in the errors determined during the verification. They are expressed as percentages of their respective verification readings. The expanded uncertainties reported are based on combined standard uncertainties, multiplied by a coverage factor of 2, which provide a confidence interval of approximately 95%.

The forces verified with the testing machine that passed are within $\pm 1\%$ accuracy, 1% repeatability, and zero return tolerance. Verification range and calibration report are enclosures.

We recommend to re-calibrate above testing machine before 28 Mar 20

Above testing machine was verified on-site at customer location:-

Company/User Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Address 39 Village No. 1 Rangsit-Nakornnayok Road, Klong 6, Thanyaburi,
Pathumthani, 12110 Thailand.
Contact Number 0-2549-3000
Department -
Location -
Operator -

Approved by :

02/04/2019

Service Manager :

02/04/2019

X

X

Signed by:

Signed by:

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Universal Testing Machine(ต่อ)



CALSERVE (THAILAND) CO., LTD.

219/41 Moo 6 Tambol Bangken, Amphur Muang Nonthaburi

Nonthaburi 11000 Thailand

Tel: +6629652090 to 2

center@calservethailand.com

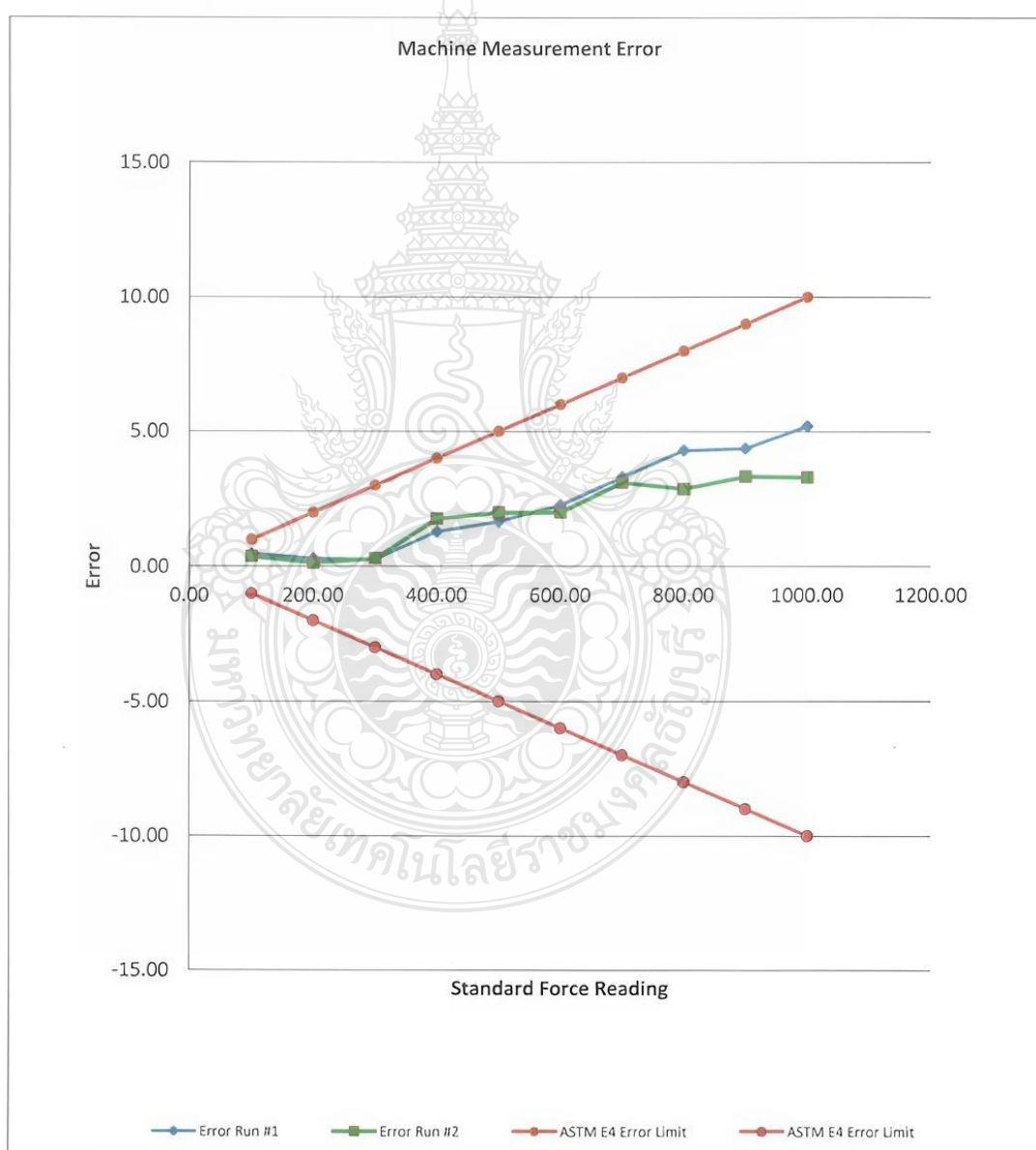
Fax: +6629652093

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Page 3 of 4

Calibrate Testing Machine in Accordance with ASTM E4-13
Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

Certificate NO. C190056
Date of Calibration 29 Mar 19



Unit in N

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Universal Testing Machine(ต่อ)



CALSERVE (THAILAND) CO., LTD.

219/41 Moo 6 Tambol Bangken, Amphur Muang Nonthaburi
Nonthaburi 11000 Thailand center@calservethailand.com
Tel: +6629652090 to 2 Fax: +6629652093

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Page 4 of 4

Calibrate Testing Machine in Accordance with ASTM E4-13
Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

Certificate NO. C190056
Date of Calibration 29 Mar 19

Standard Verification Devices

*	Cal Due	Description	Reference	Cal By	Load Range
Set G	07/04/19	Load Indicator model 9150 (S/N 28811) Load Cell SWP10M-1.5KN-B000 (S/N 113874A)	MF-0078-17	NIMT	300.000 to 1200.00 N
Set H	07/04/19	Load Indicator model 9150 (S/N 28811) Load Cell SWP10M-5KN-B000 (S/N 113081A)	MF-0079-17	NIMT	1000.00 to 4000.00 N
Set I	03/04/19	Load Indicator model 9150 (S/N 28811) Load Cell SWP10M-25KN-B000 (S/N 116190A)	MF-0080-17	NIMT	5000.00 to 20000.0 N
Set J	03/04/19	Load Indicator model 9150 (S/N 28811) Load Cell SWP20M-100KN-B000 (S/N 112863A)	MF-0081-17	NIMT	20000.0 to 80000.0 N
Set C	04/01/20	Standard Weights Set 500g, 1kg, 2kg, 2kg, 5kg, 5kg, 5kg, 5kg	61-210594-1	Calibratech	500g to 25kg
Set D	04/01/20	Standard Weights Set 100g, 200g, 200g, 500g	61-210594-2	Calibratech	100g to 1kg
Set E	04/01/20	Standard Weights Set 20g, 50g	61-210594-3 61-210594-4	Calibratech	20g to 50g

Note1: Temperature during verification was measured by Hygrometer Testo 608-H1 S/N 34891497

Note2: The standard Class A lower limit is used for systems with accuracy of $\pm 1.0\%$

Note3: The standard Class A1 lower limit is used for systems with accuracy of $\pm 0.5\%$

Note4: Standard forces have been temperature compensated as necessary

Note5: Weights have been corrected to local gravity according to ASTM E74-01, $(13.7500^\circ \text{ N, height 10 m}) = 9.78321 \text{ g ms}^{-2}$

Comments

The testing machine was verified in the 'as found' condition with no adjustments carried out.

Verified by :

02/04/2019

X

Service Engineer

Signed by:

Calserve Load Calibration 2019/1311A

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Pendulum Impact Tester Resil



**Siam
Intercorp
(Thailand) Co., Ltd.**

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 IMT

Date of issue : 16 April 2019

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Location : Lab / Technology Thanyaburi

Address : 39 Moo1 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

Equipment : Pendulum Impact Tester Resil

Manufacturer : CEAST

Model : 6545.000

Serial Number : 9709

Date of Calibration : 9 April 2019

Date of Received : 9 April 2019

Ambient Temperature Minimu 26.3 °C Maximum 27.6 °C

Relative Humidity : Minimu 45.7 %RH Maximum 58.9 %RH

Procedure used :-

Calibration were conducted using procedure according to standard ASTM D 256, ASTM D 6110, ISO 179, ISO 180 and ISO 13802

Condition of this results of calibration

1. Reference standard instruments and test instruments :-

Instruments	Model	Serial No.	Test Report No.	Due date
1) Quartz Stop Watch	809Q02R	09E1288E	18E1473	25 Aug 19
2) Digital Thermo - Hygrometer	608-H1	34852914	19H115	8 Jan 20
3) Precision Balance	XP8002S	B007009853	18B292	29 Apr 19
4) Weights Set 1 mg - 5 kg	F1	11119515	18M1242	13 May 19

2. This certificate was verified only for the measuring instrument we calibrated.

3. This result of calibration was found accurate as shown on date and place of calibration only.

4. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the head of Calibration Laboratory of Siam Intercorp (Thailand) Co., Ltd.

5. This certificate is traceable to SI unit maintain at NIMT via Accredited Calibration Laboratory

The reported uncertainty was based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2.00$, providing a level of confidence of approximately 95%

Calibrated by :

Approved by :

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Pendulum Impact Tester Resil(ต่อ)



**Siam
Intercorp
(Thailand) Co.,Ltd.**

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 IMT

Date of issue : 16 April 2019

Result of calibration

Izod Hammer : 2 J

Code : 6545.002 S/N : 267

Nominal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.02	0.008	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.144	0.0071
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	324.5	0.63
Hammer mass at 90° (g)	-	333.47-336.82	334.46	0.041

Release Angle: 150°

Izod Hammer : 4 J

Code : 6545.003 S/N : 265

Nominal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.02	0.016	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.147	0.0072
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	326.1	0.62
Hammer mass at 90° (g)	-	666.93-673.63	670.11	0.051

Release Angle: 150°

Izod Hammer : 7.5 J

Code : 6545.004 S/N : 273

Nominal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.0375	0.000	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.145	0.0072
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	324.7	0.61
Hammer mass at 90° (g)	-	1250.50-1263.06	1261.87	0.032

Release Angle: 150°

UUC* = Unit Under Calibration

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Pendulum Impact Tester Resil(ต่อ)



**Siam
Intercorp
(Thailand) Co., Ltd.**

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 IMT

Date of issue : 16 April 2019

Result of calibration

Charpy Hammer : 1 J

Code : 6545.918 S/N : 114

Normal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.025	0.000	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.147	0.0046
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	325.7	0.65
Hammer mass at 90° (g)	-	166.73-168.41	167.96	0.031

Release Angle: 150°

Charpy Hammer : 2.75 J

Code : 6545.935 S/N : 178

Normal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.025	0.000	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.149	0.0061
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	327.3	0.61
Hammer mass at 90° (g)	-	458.25-463.12	461.65	0.037

Release Angle: 150°

Charpy Hammer : 5.5 J

Code : 6545.936 S/N : 185

Normal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.075	0.000	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.149	0.0061
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	327.4	0.61
Hammer mass at 90° (g)	-	917.03-926.25	922.35	0.036

Release Angle: 150°

UUC* = Unit Under Calibration

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่อง Pendulum Impact Tester Resil(ต่อ)



**Siam
Intercorp
(Thailand) Co.,Ltd.**

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,

Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 IMT

Date of issue : 16 April 2019

Result of calibration

Charpy Hammer : 11 J

Code : 6545.937 S/N : 177

Norminal Value			*STD	Uncertainty
Energy Loss (J)	-	0-0.055	0.000	0.00059
Period of Swing (sec)	TP	1.141-1.153	1.149	0.0047
Pendulum Length (mm)	Lp	323.6-330.1	327.2	0.61
Hammer mass at 90° (g)	-	1834.06-1852.49	1849.55	0.054

Release Angle: 150°

UUC* = Unit Under Calibration

End of Certificate



ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co., Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 /1 MFT

Date of issue : 19 April 2019

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi Location : Lab / Technology Thanyaburi

Address : 39 Moo1 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

Equipment : Melt Flow Tester

Manufacturer : CEAST

Model : 6542.000

Serial Number : 8531

Date of Calibration : 9 April 2019

Date of Received : 9 April 2019

Ambient Temperature : Minimum 26.3 °C Maximum 27.6 °C

Relative Humidity : Minimum 45.7 %RH Maximum 58.9 %RH

Procedure used :-

Calibration were conducted using CP-MFT-01 calibration procedure base on standard ASTM D 1238-10, ISO 1133-1-2011, ISO 1133-2-2011

Condition of this results of calibration

1. Reference standard instruments and test instruments :-

Instruments	Model	Serial No.	Test Report No.	Due Date
1) External Digital Micrometer	293-240-30	86115415	19L231	16 Jan 20
2) Digital Holtest	HTD-10R	416320	CC561-09-0013	29 Aug 19
3) Steel Ring Gauge (8.002 mm)	177-125	081529	CC561-09-0014	29 Aug 19
4) Holtest	N/A	086420	CC561-09-0010	29 Aug 19
5) Steel Ring Gauge (2.000 mm)	177-239	080254	CC561-09-0011	29 Aug 19
6) Precision Balance	XP8002S	B007009853	18B292	29 Apr 20
7) Weights set 1 mg - 5kg	F1	11119515	18M1242	13 May 20
8) Digital Thermo - Hygrometer	608-H1	45118923	19H813	22 Mar 20
9) Digimatic Head	164-161	800781	18L3357	21 Jun 19
10) Frequency Counter	PEM3000	453372	ME18-1845	31 Jul 19

2. This certificate was verified only for the measuring instrument as state above.

3. This result of calibration was shown on date and place of calibration.

4. This certificate may not be valid in full, except with the prior approval of the head of Calibration Laboratory of Siam Intercorp (Thailand) Co., Ltd.

5. This certificate is traceable to SI unit maintain via Accredited Calibration Laboratory.

The reported uncertainty was based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2.00$, providing a level of confidence of approximately 95%

Calibrated by :

Approved by :

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester) (ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,

Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th



CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 MFT

Date of issue : 19 April 2019

Result of Calibration

Barrel Temperature : 190 °C

Level in the Barrel (mm)	UUC* Reading Temp. (°C)	STD Reading Temp. (°C)	Correction (°C)	Uncertainty (±°C)
10	190.0	190.063	0.063	0.075
30	190.0	189.909	-0.091	0.076
50	190.0	189.334	-0.666	0.077
70	190.0	188.481	-1.519	0.076
75	190.0	188.119	-1.881	0.076

UUC* = Unit Under Calibration

End of Certificate

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester) (ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co., Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th



CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 MFT

Date of issue : 19 April 2019

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi Location : Lab / Technology Thanyaburi

Address : 39 Moo1 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

Equipment : Melt Flow Tester

Manufacturer : CEAST

Model : 6542.000

Serial Number : 8531

Date of Calibration : 9 April 2019

Date of Received : 9 April 2019

Ambient Temperature : Minimum 26.3 °C Maximum 27.6 °C

Relative Humidity : Minimum 45.7 %RH Maximum 58.9 %RH

Procedure used :-

Calibration were conducted using CP-MFT-01 calibration procedure base on standard ASTM D 1238-10, ISO 1133-1-2011, ISO 1133-2-2011

Condition of this results of calibration

1. Reference standard instruments and test instruments :-

Instruments	Model	Serial No.	Test Report No.	Due Date
1) Digital Thermometer with	1524	2335018	PSL-T 039/62	6 Nov 19
RTD Probe PT100		T1-01	PSL-T 039/62	6 Nov 19
2) Digital Thermo - Hygrometer	608-H1	45118923	19H813	22 Mar 20

2. This certificate was verified only for the measuring instrument as state above.

3. This result of calibration was found accurate as shown on date and place of calibration only.

4. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the head of Calibration Laboratory of Siam Intercorp (Thailand) Co., Ltd.

5. This certificate is traceable to SI unit maintain via Accredited Calibration Laboratory.

The reported uncertainty was based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2.00$, providing a level of confidence of approximately 95%

Calibrated by :

Approved by :

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester)
(ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

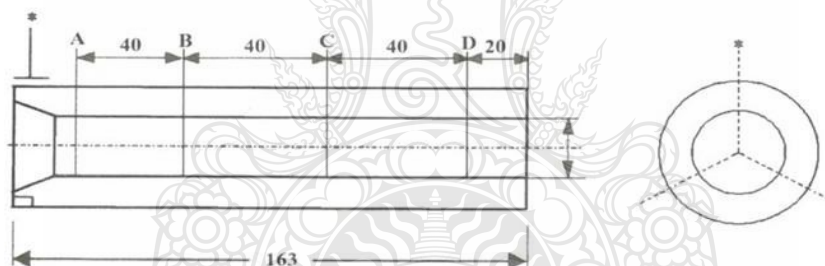
Certificate Number : ST 1904001 /1 MFT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

Cylinder (Barrel) Diameter

Inside Dia. (mm)	A	B	C	D
Standard Reading (mm)	9.956	9.955	9.954	9.953
Uncertainty (±mm)	0.0034	0.0034	0.0034	0.0034



UUC* = Unit Under Calibration

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester) (ต่อ)



**Siam
InterCorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

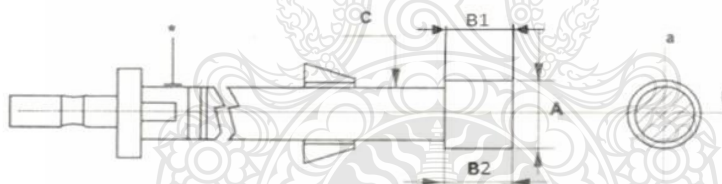
Certificate Number : ST 1904001 /1 MFT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

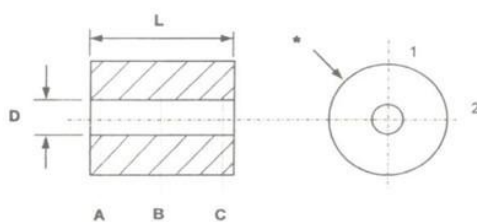
Piston Dimension : N/A

Dimension	Standard Reading (mm)		Uncertainty (±mm)
A	a	9.460	0.0021
	b	9.459	
B	1	6.437	0.0023
	2	6.438	
C	a	8.879	0.0021
	b	8.880	



Nozzle (Die) Dimension : 320.822

Dimension		Standard Reading (mm)	Uncertainty (±mm)
A	1 mm (from the top of nozzle)	1 2.095	0.0030
		2 2.095	0.0030
B	4 mm (from the top of nozzle)	1 2.095	0.0030
		2 2.095	0.0030
C	7 mm (from the top of nozzle)	1 2.095	0.0030
		2 2.095	0.0030
L	(Length)	8.004	0.0029



ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Tester) (ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 /1 MFT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

Piston and Mass Weight 2,160 g

UUC* ID	Standard Reading (g)	Uncertainty (±g)
Piston	322.0	0.17
Mass 1,835 g S/N : 21.18N	1,836.7	0.17
Summation	2,158.7	0.17

Piston and Mass Weight 3,800 g

UUC* ID	Standard Reading (g)	Uncertainty (±g)
Piston and Mass	322.0	0.17
Mass 3,475 g S/N : 37.27N	3,474.4	0.17
Summation	3,796.4	0.17

Piston and Mass Weight 5,000 g

UUC* ID	Standard Reading (g)	Uncertainty (±g)
Piston and Mass	322.0	0.17
Mass 4,675 g S/N : 49.05N	4,673.7	0.17
Summation	4,995.7	0.17

UUC* = Unit Under Calibration

End of Certificate



ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Distortion Temperature; HDT)



**Siam
Intercorp
(Thailand) Co., Ltd.**

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 HDT

Date of issue : 19 April 2019

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Location : Lab / Technology Thanyaburi

Address : 39 Moo1 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

Equipment : HDT 3 Vicat

Manufacturer : CEAST

Model : 6911.000

Serial Number : 20227

Date of Calibration : 9 April 2019

Date of Received : 9 April 2019

Ambient Temperature Minimu 26.3 °C Maximum 27.6 °C

Relative Humidity : Minimu 45.7 %RH Maximum 58.9 %RH

Procedure used :-

Calibration were conducted using procedure according to standard ASTM D 648, ASTM D 1525, ISO 75 and ISO 306

Condition of this results of calibration

1. Reference standard instruments and test instruments :-

Instruments	Model	Serial No.	Test Report No.	Due date
1) Digital Thermometer with	1524	2335018	PSL-T 039/62	6 Nov 19
RTD Probe PT100	N/A	T1-01	PSL-T 039/62	6 Nov 19
RTD Probe PT100	N/A	T2-02	PSL-T 039/62	6 Nov 19
2) Gauge Block Set	516-111-10	900302	18G739	18 Sep 19
3) External Digital Micrometer	293-240-30	86115415	19L231	16 Jan 20
4) Precision Balance	XP8002S	B007009853	18B292	29 Apr 19
5) Weights set 1 mg - 5 kg	F1	11119515	18M1242	13 May 19
6) Digital Thermo - Hygrometer	608-H1	34852914	19H115	8 Jan 20
7) Quartz Stop Watch	809Q02R	09E1288E	18E1473	25 Aug 19
8) Radidius Gauge	N/A	1104001	L54/03762.1	9 Dec 19

2. This certificate was verified only for the measuring instrument we calibrated.

3. This result of calibration was found accurate as shown on date and place of calibration only.

4. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the head of Calibration Laboratory of Siam Intercorp (Thailand) Co., Ltd.

5. This certificate is traceable to SI unit maintant at NIMT via Accredited Calibration Laboratory

The reported uncertainty was based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2.00$, providing a level of confidence of approximately 95%

Calibrated by :

Approved by

Siam Intercorp (Thailand) Co., Ltd.

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน
(Heat Distortion Temperature; HDT)(ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 HDT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

Vicat Head Dimension (Station 1) S/N: 1

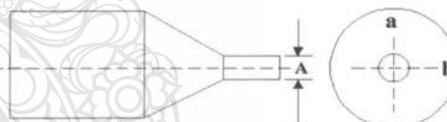
Dimension	UUC* (mm)		Uncertainty (mm)
A 1.120 - 1.137	a	1.129	0.002
	b	1.129	

Vicat Head Dimension (Station 2) S/N: 2

Dimension	UUC* (mm)		Uncertainty (mm)
A 1.120 - 1.137	a	1.127	0.002
	b	1.128	

Vicat Head Dimension (Station 3) S/N: 3

Dimension	UUC* (mm)		Uncertainty (mm)
A 1.120 - 1.137	a	1.127	0.002
	b	1.127	



UUC* = Unit Under Calibration

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน
(Heat Distortion Temperature; HDT)(ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 HDT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

HDT Head Dimension (Station 1) S/N: 1

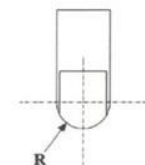
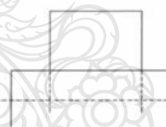
Dimension	UUC* (mm)	Uncertainty (mm)
R 3±0.2mm.	3.0	0.017

HDT Head Dimension (Station 2) S/N: 2

Dimension	UUC* (mm)	Uncertainty (mm)
R 3±0.2mm.	3.0	0.017

HDT Head Dimension (Station 3) S/N: 3

Dimension	UUC* (mm)	Uncertainty (mm)
R 3±0.2mm.	3.0	0.017



UUC* = Unit Under Calibration

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน
(Heat Distortion Temperature; HDT)(ต่อ)



**Siam
Intercorp
(Thailand) Co., Ltd.**

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 HDT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

LVDT Displacement

LVDT Displacement	Normal Value	UUC*Reading (mm)	STD* (mm)	Correction (mm)	Uncertainty (mm)
Station 1	1.000 mm	1.000	1.000	0.000	0.00060
Station 2	1.000 mm	1.000	1.000	0.000	0.00060
Station 3	1.000 mm	1.000	1.000	0.000	0.00060

Heating Rate

Heating Rate [°C/Hr]	STD*Reading [°C/Hr]	Correction [°C/Hr]	Uncertainty [°C/Hr]
50 ±5°C/Hr (Vicat)	49.964	-0.036	0.006
120 ±10°C/Hr (HDT/Vicat)	119.960	-0.041	0.014

UUC* = Unit Under Calibration

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน
(Heat Distortion Temperature; HDT)(ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co., Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 HDT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

Temperature (Station 1)

Calibration Point (°C)	Average of STD. Reading (°C)	UUC* Main Reading (°C)	UUC* Station 1 Reading (°C)	Correction Value (°C)	Uncertainty (±°C)
30	30.013	30.0	30.0	0.013	0.081
80	80.130	80.0	79.9	0.230	0.083
150	150.048	150.0	150.0	0.048	0.079

Temperature (Station 2)

Calibration Point (°C)	Average of STD. Reading (°C)	UUC* Main Reading (°C)	UUC* Station 2 Reading (°C)	Correction Value (°C)	Uncertainty (±°C)
30	30.013	30.0	30.0	0.013	0.081
80	80.130	80.0	79.7	0.430	0.083
150	150.048	150.0	150.0	0.048	0.079

Temperature (Station 3)

Calibration Point (°C)	Average of STD. Reading (°C)	UUC* Main Reading (°C)	UUC* Station 3 Reading (°C)	Correction Value (°C)	Uncertainty (±°C)
30	30.031	30.0	30.0	0.031	0.080
80	80.161	80.0	79.8	0.361	0.084
150	150.147	150.0	150.0	0.147	0.083

UUC* = Unit Under Calibration

Bath Temperature Uniformity

Station	Average of STD. Reading (°C)			Bath Temperature Uniformity (± 0.5 °C)		
	30	80	150	30	80	150
1	30.013	80.130	150.048	0.018	0.031	0.099
2	30.013	80.130	150.048			
3	30.031	80.161	150.147			

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน
(Heat Distortion Temperature; HDT)(ต่อ)



**Siam
Intercorp**
(Thailand) Co.,Ltd.

212/10 Moo 1, Nonthree Place, Nakorn In - Rama V, Bangphai,
Muangnonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand

Tel : 0 2886 7834 - 5

Fax : 0 2886 7836

Website: www.siamintercorp.co.th

Email: info@siamintercorp.co.th

CALIBRATION CERTIFICATE

Certificate Number : ST 1904001 HDT

Date of issue : 19 April 2019

Result of calibration

List of Binary Weights Set

	Weight Set at Station 1			Weight Set at Station 2			Weight Set at Station 3		
[g]	[S/N]	*STD	Uncertainty	[S/N]	*STD	Uncertainty	[S/N]	*STD	Uncertainty
Rod HDT	1	101.95	0.022	2	101.88	0.022	3	102.36	0.022
Rod Vicat	1	101.84	0.022	2	101.75	0.022	3	102.63	0.022
1	1	0.96	0.022	2	0.94	0.022	3	0.96	0.022
2	1	1.95	0.022	2	1.94	0.022	3	1.96	0.022
4	1	3.91	0.022	2	3.92	0.022	3	3.96	0.022
8	1	7.97	0.022	2	7.93	0.022	3	8.06	0.022
16	1	16.04	0.022	2	16.16	0.022	3	15.98	0.022
32	1	32.27	0.022	2	32.14	0.022	3	32.18	0.022
64	1	63.62	0.022	2	64.03	0.022	3	63.81	0.022
128	1	127.59	0.022	2	127.59	0.022	3	128.38	0.022
256	1	256.40	0.022	2	255.98	0.022	3	256.54	0.022
512	1	513.47	0.022	2	513.22	0.022	3	512.78	0.022
1024	1	1036.62	0.023	2	1035.43	0.023	3	1033.85	0.023
2048	1	2071.35	0.023	2	2052.87	0.023	3	2070.19	0.023
4096	1	4125.68	0.024	2	4065.55	0.024	3	4126.34	0.024

UUC* = Unit Under Calibration

End of Certificate



ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องชั่งเพื่อวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะ (Density Electronic Balance)



INTRO TSC Company Limited
Calibration Center Measuring and Testing Instrument
 46/155 Nualchan Rd., Nualchan, Bungkum, Bangkok 10230, Thailand
 Tel : +66-2363-4417-21 Fax : +66-2363-4427 E-mail : info@intro.co.th



Certificate of Calibration

Certificate Number : MB1-2317-2023

Page 1 of 2 Pages

Equipment : Density Electronic Balance

Manufacturer : Mettler toledo

Model : AB204-S

Serial Number : 1120501467

ID Number : N/A

Max Capacity : 220 (g)

Resolution : 0.0001 (g)

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k , providing a level of confidence of approximately 95 %. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS M3003 requirements. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). This Certificate may not be reproduced other than in full except with the prior written approval of Calibration Center, Intro TSC Co.,Ltd.

Customer Reference : H203

Customer : Department of Materials And Metallurgical Engineering

CSRS No.: 23171123

Rajamangala University Of Technology Thanyaburi 39 Moo 1

Date of Receipt : 27-Nov-23

Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong 6, Thanyaburi Pathumtani 12110

Date of Calibration : 30-Nov-23

Location : Polymer Testing Room

Condition of this result of calibration

1. Reference Standard instruments :

Instruments	Model	Serial No.	Certificate No.	Due Date
Weight set (1 mg to 200 g)	Class E2	K-1871/20	MM-0195-22	28-Nov-24

2. This Certification is traceable to the International System of Unit maintained at :-

- National Institute of Metrology (Thailand)

3. This result of calibration was found accurate as shown on date and place of calibration only.

Method : Measurement In-house Method Calibration Procedure No. CP-CL-43 base on UKAS Publication Ref : Lab 14 : 2019

Environmental Conditions :

Temperature : (30 ± 10) °C

Humidity : (50 ± 20) %

Air Pressure : (1010 ± 10) mbar

Calibrated By :

Approved Signatory :

Date of Issued : 1-Dec-23

FM-CL-11-06

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องชั่งเพื่อวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะ
(Density Electronic Balance)(ต่อ)



INTRO TSC Company Limited
Calibration Center Measuring and Testing Instrument
46/155 Nualchan Rd., Nualchan, Bungkum, Bangkok 10230, Thailand
Tel : +66-2363-4417-21 Fax : +66-2363-4427 E-mail : info@intro.co.th



Certificate Number : MB1-2317-2023

Page 2 of 2 Pages

Calibration Result (Weight) : Without Adjustment

1. Repeatability of Reading

Nominal Value (g)	Standard Deviation (g)	Maximum diff. Between successive (g)
200	0.00000	0.0000

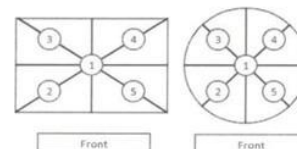
2. Error of indication from nominal value

Nominal Value (g)	Balance Reading (g)	Correction Value (g)	Uncertainty (±) (g)	factor <i>k</i>	Balance Reading Before Adjust (g)
Unload	0.0000	0.0000	0.000084	2.00	-
40	40.0000	0.0000	0.00013	2.00	-
80	80.0000	0.0000	0.00021	2.00	-
120	120.0000	0.0000	0.00040	2.00	-
160	160.0000	0.0000	0.00040	2.00	-
200	200.0000	0.0000	0.00040	2.00	-

3. Eccentric or off-center loading

Nominal Value (g)	Reference Position				
	Position 1 (g)	Position 2 (g)	Position 3 (g)	Position 4 (g)	Position 5 (g)
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000

Eccentric Error = 0.0000 (g)



End of report

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล

นางรัตติยา มะกะ

วัน เดือน ปีเกิด

19 สิงหาคม 2528

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลาสติก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2551

ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2558

ทุนวิจัย

ทุนส่งเสริมงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประจำปี 2566

ประวัติการทำงาน

ออกแบบแม่พิมพ์
บริษัท เรดิคอน จำกัด
พ.ศ. 2551 – 2554

นักวิชาการศึกษา ปฏิบัติการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โทร 02-5493487
e-mail : rattiya_m@rmutt.ac.th
พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Phakdee R, Boochathum P. Properties of Thermoplastic Elastomer Composites Prepared from Para Rubber Wood Sawdust Filled-Polypropylene/ Natural Rubber Blends. **Key Engineering Materials** 2015 August; 659: 490-494.