

ผลการเติมแกรไฟต์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุอัลตราไฮโมเลกุลาร์เวตโพลี
เอทิลีนสำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม



นางสาวอรุณมณีย์ เพล

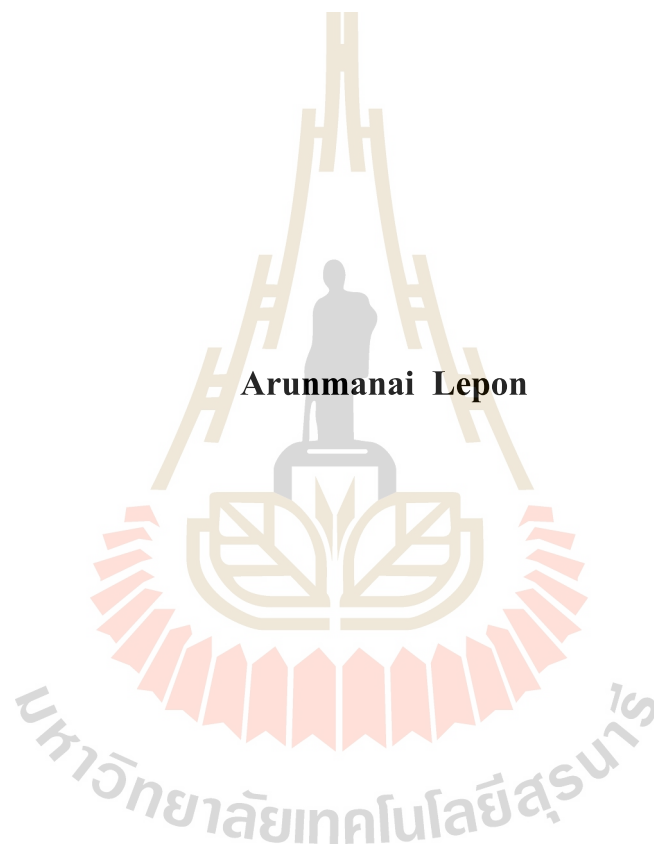
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**EFFECT OF GRAPHITE ADDITION ON MECHANICAL
PROPERTIES OF UHMWPE FOR USE AS TIBIA INSERT
BIOCOMPOSITE MATERIALS**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Ceramic Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

ผลการเติมแกรไฟต์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุอัลตราไฮโมเลกุลาร์เวทโพลีเอทิลีน
สำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.อนูรัตน์ กุวานคำ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สุขเกษม วัชรชัยกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

จิรัชญา อายะวรรณา

(อ. ดร.จิรัชญา อายะวรรณา)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



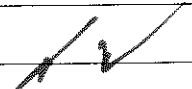
(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรุณมณี เพลล : ผลการเติมแกรไฟต์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุอัลตราไฮโมเลกุลาร์เวต โพลีเอทิลีนสำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม (EFFECT OF GRAPHITE ADDITION ON MECHANICAL PROPERTIES OF UHMWPE FOR USE AS TIBIA INSERT BIOCOMPOSITE MATERIALS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม วัชรมัยสกุล, 105 หน้า.

จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาผลของการเติมแกรไฟต์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุอัลตราไฮโมเลกุลาร์เวต โพลีเอทิลีน (UHMWPE) สำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม ซึ่งในงานสัณยกรรมกระดูก UHMWPE เป็นวัสดุที่ถูกเลือกนำมาทำเป็นหมอนรองข้อเข่าเทียม เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงและความเหนียว อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งาน เพราะ UHMWPE มีความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำ เนื่องจากการเสียดสีระหว่างวัสดุหมอนรองกับฝาครอบกระดูกต้นขาและเป็นกระดูกหน้าแข้ง ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE สำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม โดยการเติมแกรไฟต์ซึ่งมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นชนิดของแข็งที่ดีเยี่ยม และมีความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ ได้นำอนุภาคแกรไฟต์ในปริมาณร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ผสมเข้ากับผง UHMWPE โดยวิธีการผสมแบบแห้ง และขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีการใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบไปตรวจสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงกด และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เป็นต้น ผลการทดลองพบว่า วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ มีสมบัติในการลดแรงเสียดทานได้ อันเป็นสมบัติสำคัญในงานที่ต้องรับการเสียดสีตลอดเวลาดังเช่นข้อเข่าเทียมได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาณแกรไฟต์เพิ่มมากขึ้น สมบัติเชิงกล นั่นคือ ความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานต่อแรงอัด มีแนวโน้มลดต่ำลง โดยวัสดุเชิงประกอบที่เติมแกรไฟต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีความเปราะสูงมาก ดังนั้นการผสม UHMWPE กับแกรไฟต์ที่ปริมาณมากกว่าร้อยละ 30 เป็นไปได้ยากในการทดสอบ

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา อรุณมณี เพลล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ARUNMANAI LEPON : EFFECT OF GRAPHITE ADDITION ON
MECHANICAL PROPERTIES OF UHMWPE FOR USE AS TIBIA INSERT
BIOCOMPOSITE MATERIALS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
SUKASEM WATCHARAMAISAKUL, Ph.D., 105 PP.

BIOCOMPATIBILITY / FRICTION COEFFICIENT / GRAPHITE / ULTRA HIGH
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE) / WEAR RESISTANT

This thesis is aimed to study the effect of graphite addition on mechanical properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) for use as Tibia insert biocomposite materials. UHMWPE is saluted to be an orthopedic replacement material for use as a knee spacer due to its excellent strength and toughness. Nevertheless, the drawback of UHMWPE in long-term performance is low wear resistant because of the friction between the tibia insert and femoral component with the tibia component.

Therefore, the improvement of wear properties by addition of graphite has been carried out on the UHMWPE. Graphite is an excellent solid lubricant and also exhibits good biocompatibility with human body. The preparation of UHMWPE/Graphite composites is performed by mixing graphite particles in the ratios of 5, 10, 20, 30 and 40 wt% into UHMWPE using dry-mixing method. The mixtures are compressed in a mold under a pressure of 10 MPa, at 250 °C for 30 minutes. Hardness, wear resistant, impact strength, compressive strength and coefficient of friction of the UHMWPE/Graphite composites are examined. The results reveal that the UHMWPE/Graphite biocomposites exhibit a remarkable

reducing in coefficient of friction, which is useful for using as a lubricant in knee replacement material. However, an increase in the graphite ratios reduces the mechanical properties; hardness, impact strength, wear resistant and compressive strength. The composite sample with 40 wt% graphite is very fragile and therefore the composite UHMWPE with the graphite higher than 30 wt% is hard to be formed.



School of Ceramic Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature อรรถพงษ์ วัฒน

Advisor's Signature ✓

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขเกษม วัชรมัยสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรัตน์ ภูวานคำ และ อาจารย์ ดร. จิรัชญา อายะวรรณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพนักงานประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

อรุณมณีย์ เลพล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้อเข้าเทียม (Tibia insert).....	4
2.1.1 วิวัฒนาการของข้อเข้าเทียม.....	4
2.1.2 ส่วนประกอบของข้อเข้าเทียม.....	5
2.2 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material).....	9
2.2.1 ความหมายของวัสดุเชิงประกอบ.....	9
2.2.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ.....	9
2.3 แกรไฟต์ (Graphite).....	12
2.4 UHMWPE.....	14
2.5 แรงเสียดทานของพอลิเมอร์.....	16
2.6 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1	การตรวจสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอ.....	19
2.7	ไทรโบโลยี (Tribology).....	20
2.6.1	สารหล่อลื่น (Lubricant).....	20
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	29
3.2	วัสดุและสารเคมี.....	30
3.2.1	ผง UHMWPE	30
3.2.2	ผงแกรไฟต์ (Graphite).....	30
3.3	วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	30
3.3.2	แผนผังขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	32
3.3.3	ตรวจสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength).....	34
3.3.4	ตรวจสอบสมบัติความแข็งที่บริเวณผิวของวัสดุ (Hardness).....	36
3.3.5	ตรวจสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistant).....	37
3.3.6	ตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction).....	39
3.3.7	ตรวจสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive strength).....	40
3.4	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	41
4	ผลการทดลอง และอภิปรายผล.....	43
4.1	ลักษณะทางกายภาพของสารตั้งต้น และ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ..	43
4.1.1	ผง UHMWPE.....	43
4.1.2	ผงแกรไฟต์.....	44
4.1.3	วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	44
4.2	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	48
4.2.1	อิทธิพลของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อความต้านทาน ต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2	อิทธิพลของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	49
4.2.3	อิทธิพลของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	50
4.2.4	อิทธิพลของอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	51
4.2.5	อิทธิพลของอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	53
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	55
5.1.1	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	55
5.1.2	ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	56
5.1.3	ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	56
5.1.4	ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	56
5.1.5	ความต้านทานต่อแรงกดอัดของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	56
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	56
	รายการอ้างอิง.....	57
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ลักษณะทางกายภาพของสารเคมี.....	61
	ภาคผนวก ข. 1. ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์	
	2. ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์	
	3. กฎของการผสม (Rule of Mixtures) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. มาตรฐานการทดสอบ ASTM.....	71
ภาคผนวก ง. ผลงานด้านวิชาการระหว่างการศึกษา	
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเอกสารยื่นคำขอจดอนุสิทธิบัตร.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	105



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุแกรไฟต์.....	13
2.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ UHMWPE.....	15
2.3 ความแตกต่างของสารหล่อลื่นของแข็ง และของเหลว.....	22
2.4 ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง.....	23
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 แสดงปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบ โดยวิธีการผสมแบบแห้ง.....	31

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของข้อเข้าเทียม.....	5
2.2 ฝาครอบกระดูกต้นขา.....	6
2.3 แป้นกระดูกหน้าแข้ง.....	6
2.4 หมอนรองข้อเทียมชนิดไม่มีเดือยและมีเดือย.....	7
2.5 การสึกหรอของหมอนรองกระดูกข้อเข้าเทียมที่ทำจากสารโพลีเมอร์ประเภท UHMWPE เมื่อมีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปีผลึก.....	8
2.6 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุหลัก และลักษณะของสารตัวเติม.....	10
2.7 โครงสร้างของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้น a) แกรไฟต์ b) เฮกซะโกนอลโบรอน ไนไตรด์ b) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ d) บอริกแอซิด.....	13
2.8 กลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบาง.....	14
2.9 โครงสร้างทางเคมีของเอทีลินและพอลิเอทีลิน.....	14
2.10 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	16
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยสังเขป.....	32
3.2 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ.....	33
3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการบากร่อง.....	34
3.4 เครื่องบากร่อง.....	35
3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact testing).....	35
3.6 แสดงการเรียงลำดับในการจัดด้วยกระดาษทราย จากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 เครื่อง Shore D Hardness Tester Durometer Bareiss Oberdisingen DE-89610.....	37
3.8 วิธีการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-disc)	37
3.9 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-disc)	38
3.10 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction tester).....	40
3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงอัด (Compression tester).....	41
3.12 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	42
4.1 ลักษณะของผง UHMWPE ตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	43
4.2 ลักษณะของผงแกรไฟต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	44
4.3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ กำลังขยาย 500 เท่า.....	46
4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	47
4.5 ผลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงกระทำของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	49
4.6 ผลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	50
4.7 ผลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ โดยวัดความลึกลับสูญเสียบนพื้นที่และทดสอบที่ระยะเวลา ในการทดลองที่ต่างกัน.....	51
4.8 ผลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	53
4.9 ผลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน มนุษย์ได้พยายามค้นหาวิธีการที่จะทำให้มีชีวิตที่ยืนยาว และปราศจากความเจ็บป่วย พัฒนาการทางเทคโนโลยีการรักษาที่ก้าวหน้ามากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มนุษย์มีชีวิตที่ยืนยาวมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เรายังคงต้องประสบกับความเจ็บป่วย และการเสื่อมถอยของสภาพร่างกายไปตามอายุขัย เมื่อเราเจ็บป่วย อวัยวะในร่างกายไม่สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ หรืออาจบกพร่องในการทำหน้าที่ เราต้องการการบำบัด หรือรักษา เพื่อที่จะได้กลับมาใช้ชีวิตที่ดีเหมือนนอกจากการรักษาโรคแล้ว บางครั้งจะต้องมีการใช้วัสดุ หรืออุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุสังเคราะห์ หรือกึ่งสังเคราะห์ ใส่เข้าไปใช้งานภายในร่างกาย เพื่อช่วยในการรักษา เสริมสร้าง หรือทดแทนเนื้อเยื่อ อวัยวะต่างๆ ของร่างกายที่เสียหาย ซึ่งเราเรียกรวมวัสดุที่ใช้ทางด้านนี้ว่า วัสดุการแพทย์ (Pritchett, 2006) หรือวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ได้แก่ ข้อเข่าเทียม ข้อต่อเทียมต่างๆ ลูกศรเทียม กระดูกเทียม หัว และเบ้ากระดูกของ ข้อสะโพกเทียม หมอนรองข้อเข่าเทียม ครอบฟัน ฟันปลอม รากฟันเทียม เป็นต้น

สำหรับเทคโนโลยีทางด้านวัสดุการแพทย์ได้มีการนำวัสดุประเภทต่างๆ มาใช้งาน ได้แก่ วัสดุประเภทโลหะ พอลิเมอร์ เซรามิก และวัสดุเชิงประกอบ (วัสดุผสม) ซึ่งวัสดุทางการแพทย์กลุ่มโลหะจะมีสมบัติแข็งแรง มีความเหนียว ผิวมันวาว แต่อาจเกิดการกัดกร่อนได้ มีน้ำหนักสูง ใช้ทำข้อเทียม แผ่น และกระดูก กระดูก รากฟันเทียม ในส่วนของวัสดุพอลิเมอร์มีความเหนียวสูง ขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีความแข็งแรงต่ำ และสมบัติอาจเสื่อมถอยตามระยะเวลา ได้แก่ ไหมเย็บแผล หลอดเลือดเทียม ดั้งจมูกเทียม เต้านมเทียม ข้อเทียม เป็นต้น ส่วนประกอบของข้อเข่าเทียม โดยวัสดุที่ใช้ทำหมอนรองข้อเข่าเทียม (Tibia insert) ทำมาจากพลาสติก ซึ่งเรียกว่าพลาสติกสเปซเซอร์ (Plastic spacer) โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารพอลิเมอร์ประเภท UHMWPE ที่มีเนื้อแข็งมาก ทำหน้าที่ทั้งเป็นผิวข้อ และหมอนรองข้อเข่าเทียม เนื่องจากชิ้นส่วนที่ทำจากพลาสติก ขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีจุดด้อยคือความแข็งแรงต่ำ มีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งาน เนื่องจากการเสียดสีระหว่างวัสดุหมอนรอง (Tibia insert) กับฝาครอบกระดูกต้นขา (Femoral component) และแป้นกระดูกหน้าแข้ง (Tibia component)

ดังนั้น การปรับปรุงพัฒนาสมบัติของวัสดุ UHMWPE ที่ใช้ทำหมอนรองข้อเข่าเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสี โดยการเติมแกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งมีสมบัติมีความเข้ากันได้ดีกับร่างกาย (Biocompatibility) และมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid lubricant) เนื่องจากโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์มีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) ยึดเกาะระหว่างชั้น ซึ่งเป็นการยึดเกาะอย่างอ่อนทำให้ระหว่างชั้นสามารถเลื่อน (Slip) ผ่านกันได้ง่าย เป็นผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งจะช่วยให้อัตราการสึกหรอของวัสดุคู่สัมผัสมีค่าลดลง ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณของแกรไฟต์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ UHMWPE สำหรับการทำเป็นวัสดุหมอนรองข้อเข่าเทียม

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็ง (Shore D hardness) ความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistant) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) และความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียมได้

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

วัสดุ UHMWPE ถูกใช้เป็นชิ้นส่วนหมอนรองข้อเข่าเทียม เนื่องจากความทนทานต่อการสึกหรอ อย่างไรก็ตามเมื่อถูกใช้งานเป็นเวลานานต่อเนื่อง ยังคงส่งผลต่อการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE และอาจจะนำไปสู่การผิดรูปผิดตำแหน่งของข้อเข่าเทียมได้ การเติมแกรไฟต์ลงไปจะช่วยลดแรงเสียดทานของชิ้นส่วนหมอนรองข้อเข่าเทียม เนื่องจากแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid lubricant) อันเนื่องมาจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der waals) ที่ยึดเกาะระหว่างชั้นในโครงสร้างของแกรไฟต์ซึ่งเป็นแรงยึดเกาะอย่างอ่อนจึงทำให้ระหว่างชั้นสามารถเลื่อน (Slip) ผ่านกันได้ง่าย ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งจะช่วยให้อัตราการสึกหรอของวัสดุคู่สัมผัสมีค่าลดลง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็ง (Shore D hardness) ความต้านทานการสึก

หรือ (Wear resistant) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) และความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive strength)

1.4.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

1.4.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแกรไฟต์ที่เติมลงใน UHMWPE ในปริมาณร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบแนวทางในการพัฒนา และการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ สำหรับประยุกต์ใช้เป็นชิ้นส่วนหมอนรองข้อเข่าเทียม

1.5.2 ทราบผลของปริมาณของแกรไฟต์ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

1.5.3 ช่วยยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนหมอนรองข้อเข่าเทียม ช่วยลดราคาค่าใช้จ่ายในการรักษา เพิ่ม โอกาสให้แก่ผู้ป่วยด้านกระดูกมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อเข้าเทียม (Tibia insert)

ข้อเข้าเป็นข้อที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในร่างกาย การที่เข้ามีสุขภาพดีจะส่งผลให้ชีวิตประจำวันของคนเราสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี โดยข้อเข้าประกอบไปด้วยกระดูกเชิงสามส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนปลายของกระดูกต้นขา (Femur) ส่วนบนของกระดูกหน้าแข้ง (Tibia) และกระดูกลูกสะบ้า (Patellar) ส่วนปลายของกระดูกทั้งสามจะสัมผัสกับกระดูกอ่อน (Articular cartilage) โดยมีส่วนประกอบหลักส่วนใหญ่คือ น้ำ ซึ่งถูกดูดซับอยู่ในโครงสร้างที่คล้ายกับฟองน้ำ กระดูกอ่อนที่สมบูรณ์ดีจะมีสีขาว ลักษณะเรียบเป็นมัน แต่เมื่อข้อเข้ามีปัญหาเนื่องจากโรคภัยต่างๆ เช่น โรคข้อกระดูกอักเสบ รูมาตอยด์ และโรคข้อกระดูกอักเสบจากอุบัติเหตุ ในระดับที่การรับยาและกายภาพบำบัดไม่สามารถช่วยบรรเทาอาการได้ สามารถรักษาได้โดยการปลูกถ่ายข้อเข้าเทียมแทนข้อเข้าเดิม เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถกลับมาเคลื่อนไหวได้อย่างปกติ

2.1.1 วิวัฒนาการของข้อเข้าเทียม

วัสดุที่ใช้สำหรับทำข้อเข้าเทียมในปัจจุบันนั้น ได้มีการปรับใช้มาจากข้อสะโพกเทียม (Knight, et al., 2011) โดยมีรายงานว่าข้อสะโพกเทียมมีการใช้ครั้งแรกในเยอรมัน เมื่อปี 1891 โดยใช้ขี้ผึ้งมาทำเป็นหัวกระดูกต้นขา (Femoral head) นอกจากนั้นในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 และต้นศตวรรษที่ 20 เหล่าศัลยแพทย์ยังได้มีการทดลองนำวัสดุหลายอย่าง เช่น เนื้อเยื่อหุ้มกล้ามเนื้อ (Fascia lata) ผิวหนัง (Skin) ชิ้นใต้เยื่อเมือกของกระเพาะปัสสาวะของหมู (Pig bladders submucosa) เป็นต้น มาแทนเป็นหมอนรองกระดูก เพื่อกันการเชื่อมกันของกระดูกบริเวณข้อพับ

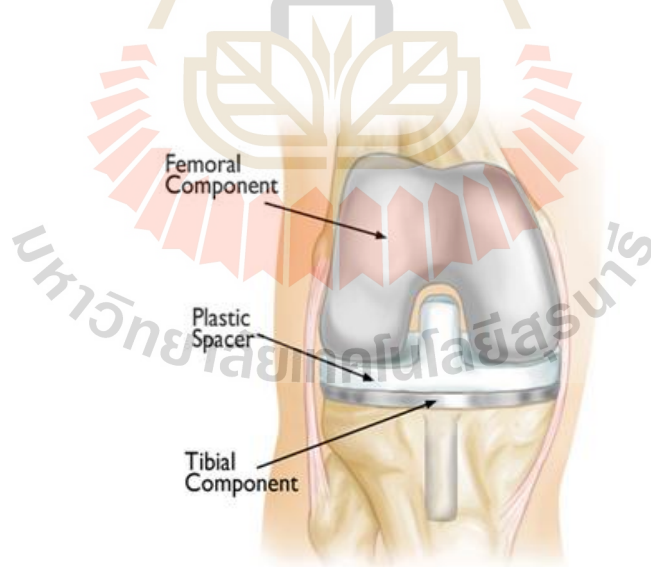
ในปี 1925 ศัลยแพทย์ชาวอเมริกันชื่อว่า Marius Smith-Petersen ได้ทำส่วนโค้งของหัวกระดูกต้นขาด้วยแก้วที่มีผิวสัมผัสเรียบเพื่อให้ผู้ป่วยสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างคล่องตัวขึ้นมาเป็นครั้งแรก ซึ่งถึงแม้ว่าแก้วจะมีสมบัติความเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับเนื้อเยื่อภายในร่างกายแต่ไม่สามารถทนรับแรงกดที่ข้อสะโพกต้องรับได้ ต่อมา Marius Smith-Petersen จึงได้ร่วมกับ Philip

Wiles ทำการทดลองทำข้อสะโพกเทียมโดยใช้โลหะสแตนเลสที่สามารถยึดติดกับกระดูกจริงได้ โดยใช้สลักและสกรู

ต่อมาจึงมีการพัฒนาทำข้อเทียมแบบโลหะบนโลหะ (Metal-on-metal) ทั้งหมดเป็นครั้งแรกโดยศัลยแพทย์ชาวอังกฤษ ชื่อว่า George McKee โดยใช้โลหะกลุ่มโคโรเมียม (Cobalt-chrome) เป็นเป้ากระดูกต้นขา (Acetabulum) ซึ่งมีรายงานถึงผลจากการใช้งานจริง ผู้ใช้งานมีอัตราการรอดชีวิตในช่วง 28 ปี ถึง 74% อย่างไรก็ตาม ในช่วงปี 1970 มีการใช้งานลดลง เนื่องจากมีการหลุดร่อนของอนุภาคโลหะบริเวณที่ปลูกถ่ายซึ่งส่งผลเสียต่อการใช้งาน

ต้นแบบข้อเทียมที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำในปัจจุบันมีการริเริ่มโดย Sir John Charnley และวิศวกรผู้ช่วยชื่อ Harry Craven ตั้งแต่ปี 1962 (Kurtz, 2011) โดยข้อเทียมทั้งหมดประกอบด้วยสามส่วนด้วยกัน คือ ก้านสะโพกที่ทำจากโลหะ (Metal femoral stem) เป้าข้อสะโพกที่ทำด้วยโพลีเอททิลีน (Polyethylene acetabular) และซีเมนต์สำหรับยึดติดกับกระดูกจากโพลีอะคริลิก (Acrylic bone cement) โดยต่อมาจึงได้มีการนำต้นแบบของของข้อเทียมนี้มาปรับใช้กับบริเวณข้ออื่นๆ เช่น ข้อเข่า เป็นต้น

2.1.2 ส่วนประกอบของข้อเข่าเทียม



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของข้อเข่าเทียม

(<http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00221>)



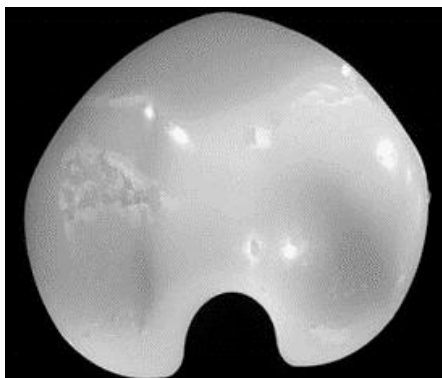
3) หมอนรองข้อเทียม (Tibial insert)

บริเวณหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม ทำมาจากพลาสติก เป็นบริเวณที่ได้รับการเสียดสีจากการเคลื่อนไหวของร่างกายแทบจะตลอดเวลา ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้เป็นหมอนรองข้อเข่าเทียมจึงต้องมีความแข็ง (Hardness) การต้านทานการสึกหรอที่สูง และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ โดยในปัจจุบันนิยมใช้เป็นสารโพลีเมอร์ชื่อว่า UHMWPE โดยวัสดุที่สามารถนำมาใช้ได้นั้นต้องเป็นระดับที่ใช้ในการแพทย์เท่านั้น คือมีความบริสุทธิ์ของสารโพลีเมอร์สูงสุด ใช้เป็นผิวสัมผัสของข้อ ทำหน้าที่ทั้งเป็นผิวข้อ และหมอนรองข้อ



รูปที่ 2.4 หมอนรองข้อเทียมชนิดไม่มีเดือยและมีเดือย

จากรูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของข้อเข่าเทียม จะเห็นว่าวัสดุที่ใช้ทำหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม (Tibial insert) ทำมาจากพลาสติก ซึ่งจากรูปเรียกว่าพลาสติกสเปซเซอร์ (Plastic spacer) โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารโพลีเมอร์ประเภท UHMWPE ที่มีเนื้อแข็งมาก ทำหน้าที่ทั้งเป็นผิวข้อ และหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียมเนื่องจากชิ้นส่วนที่ทำจากพลาสติก และจากรูปที่ 2.5 แสดงถึงหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียมที่ทำจากสารโพลีเมอร์ประเภท UHMWPE ซึ่งเกิดการสึกหรอเมื่อมีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปี



รูปที่ 2.5 การสึกหรอของหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียมที่ทำจากสาร โพลีเมอร์ประเภท UHMWPE เมื่อมีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปี (Blunn et.al., 2002)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาสมบัติของวัสดุ UHMWPE ที่ใช้ทำหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม โดยการเติมแกรไฟต์ซึ่งมีสมบัติที่ลื่น (Solid lubricant) ลดแรงเสียดทาน (Friction) เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

2.2 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)

2.2.1 ความหมายของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือ ระบบของวัสดุที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน หรือมากกว่า มีองค์ประกอบหลักได้แก่ วัสดุหลัก และสารเสริมแรง (Brydson, 2000) สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกัน ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การทำนาย หรือคาดคะเนสมบัติของ วัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว (Bryan, 1999)

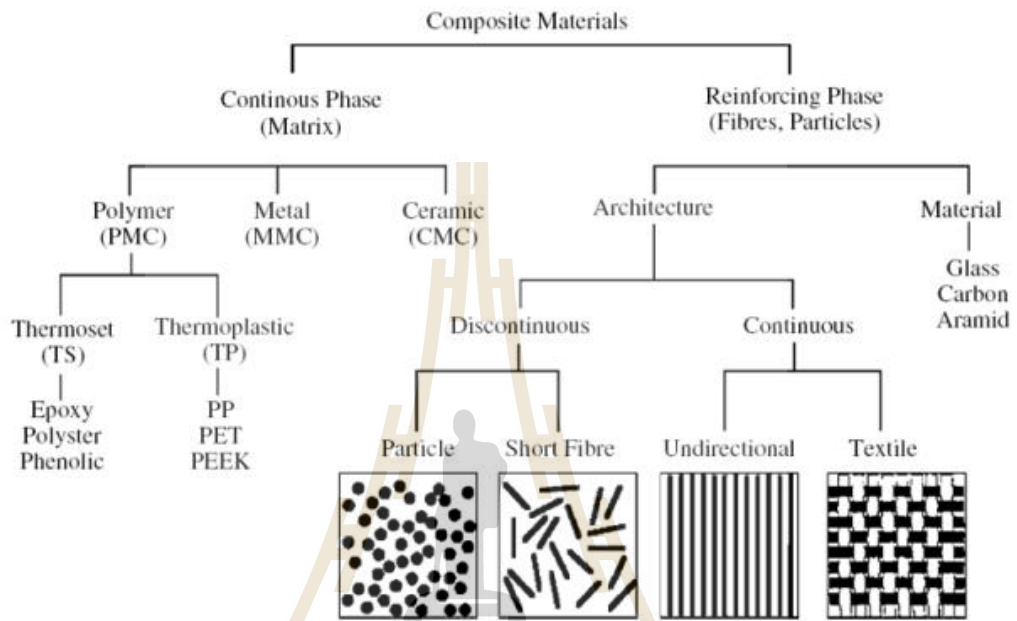
วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยสองส่วนประกอบหลักได้แก่ วัสดุหลักหรือเนื้อพื้น (Matrix) และสารตัวเติม (Filler) โดยวัสดุหลักหรือเนื้อพื้น เป็นส่วนที่เป็นเฟสหลัก ที่ห่อหุ้ม และยึดส่วนที่เป็นสารตัวเติมเข้าด้วยกัน รวมทั้งป้องกันไม่ให้สารตัวเติมเสียดสภาพอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม วัสดุหลักเป็นเฟสต่อเนื่อง ทำหน้าที่ถ่ายเทแรงที่ได้รับไปยังส่วนเสริมแรง วัสดุหลักมักจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าสารเสริมแรง (Brydson, 2000) ในส่วนของสารตัวเติม เป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงกับวัสดุเชิงประกอบ หรือปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆตามสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นสารตัว

เติม สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับสมบัติ, ปริมาณ และลักษณะทางกายภาพของสารตัวเติม ซึ่งสามารถมีได้หลายลักษณะ อาทิเช่น เส้นใยแบบสั้น เส้นใยแบบยาว แบบอนุภาค แบบแผ่น หรืออาจจะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยสารตัวเติมเหล่านี้จะมีโครงสร้าง และการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงแตกต่างกันไป (Brydson, 2000) ในส่วนของสารตัวเติม สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้ (อรอุษา สรวารี, 2546)

- จำแนกตามรูปทรงสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา ทัลคัม สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใยเช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น
- จำแนกตามประเภทของสารเคมี เช่น สารตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ สารตัวเติมประเภท สารอนินทรีย์ เป็นต้น
- จำแนกตามความสามารถในการช่วยปรับปรุงสมบัติ เช่น สารตัวเติมประเภทที่ช่วยเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) หรือช่วยเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน เช่น ซิลิกา อะลูมินา เป็นต้น

2.2.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกตามชนิดของวัสดุหลักออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ สารเสริมแรงที่เป็นอนุภาค (Particle) โดยอนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด หรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ และสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใย (Fiber) เป็นต้น (Callister, 2007) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยใช้การพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) โดยต้องมีอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไป (Chawla, 2001) สารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องด้วยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 (Bader, 2000) เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์ และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ (เส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น) ส่วนวิสเกอร์ (Whisker) เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมครอน และมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated single crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากดิสโลเคชัน (Dislocation) ทำให้



ในส่วนของการเติมสารตัวเติมชนิดอนุภาคที่เข้าไปในพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มสมบัติทางไตรโบโลยี และมีผลในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมสารตัวเติมประเภทนี้ มักจะนิยมนำมาขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป มีการศึกษาสมบัติทางไตรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมสารตัวเติมแบบอนุภาคอย่างกว้างขวาง โดยได้แบ่งตามลักษณะของสารตัวเติมได้ 2 ประเภท (Wang, 1997) ได้แก่ การเติมสารตัวเติมวัสดุที่แข็งลงในวัสดุหลักที่มีความอ่อนนุ่ม (Hard and strong phases in a soft matrix) และการเติมสารตัวเติมเป็นวัสดุที่อ่อนนุ่มหรือมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นในวัสดุหลักที่มีความแข็ง (Soft and lubricating phases in a harder matrix) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเติมวัสดุที่แข็งลงในวัสดุหลักที่มีความอ่อนนุ่ม ยกตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (เส้นใยแก้ว (Glass fiber; GF) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber; CF) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber; AF)) หรือวัสดุประเภทเซรามิกที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (อะลูมิเนียมออกไซด์, ซิลิกอนไดออกไซด์, ซิลิกอนคาร์ไบด์ และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น) ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งลงไปไนโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) โพลีเอไมด์ (Polyamides; Nylon) และโพลีเอเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone; PEEK) เป็นต้น การเติมวัสดุในลักษณะนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ให้กับวัสดุเชิงประกอบ ส่วนสมบัติทางไตรโบโลยีนั้นพบว่า อัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงเนื่องจากวัสดุที่แข็งเมื่อกระจายตัวในเนื้อวัสดุหลักจะช่วยรับแรงกระทำแทนวัสดุหลักขณะได้รับแรงกด ซึ่งสารตัวเติมดังกล่าวจะมีความแข็งและค่ามอดุลัสที่มากกว่าวัสดุหลัก สารตัวเติมเหล่านี้จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของวัสดุหลักที่อยู่ใกล้อนุภาค และวัสดุหลักจะส่งผ่านแรง หรือความเค้นเข้าสู่อนุภาคสารตัวเติม ส่วนความเสียดทานจะถูกควบคุมด้วยค่าความเสียดทานของวัสดุหลัก

การเติมวัสดุที่อ่อนนุ่มหรือมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นในวัสดุหลักที่มีความแข็งเป็นการเติมเพื่อไปลดแรงเสียดทานจากวัสดุคู่สัมผัส หรือช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับวัสดุหลัก ซึ่งอาจจะไม่ได้เป็นการช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้วัสดุหลัก เช่น การเติมโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีนและแกรไฟต์ ลงในโพลีเอเทอร์คีโตนและโพลีเอไมด์ เป็นต้น ซึ่งข้อดีของการเติมวัสดุที่อ่อนนุ่ม หรือมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่น คือการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ส่วนอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนที่เติมลงไปวัสดุหลักอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตามระดับความสามารถในการเสริมแรงหรือปรับปรุงสมบัติทางกลจะขึ้นอยู่กับ การยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างรอยต่อของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุหลัก และยังขึ้นอยู่กับขนาด และปริมาณของสารตัวเติมอนุภาค ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค นั่นคือ อนุภาคแกรไฟต์ ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ในหัวข้อ 2.3

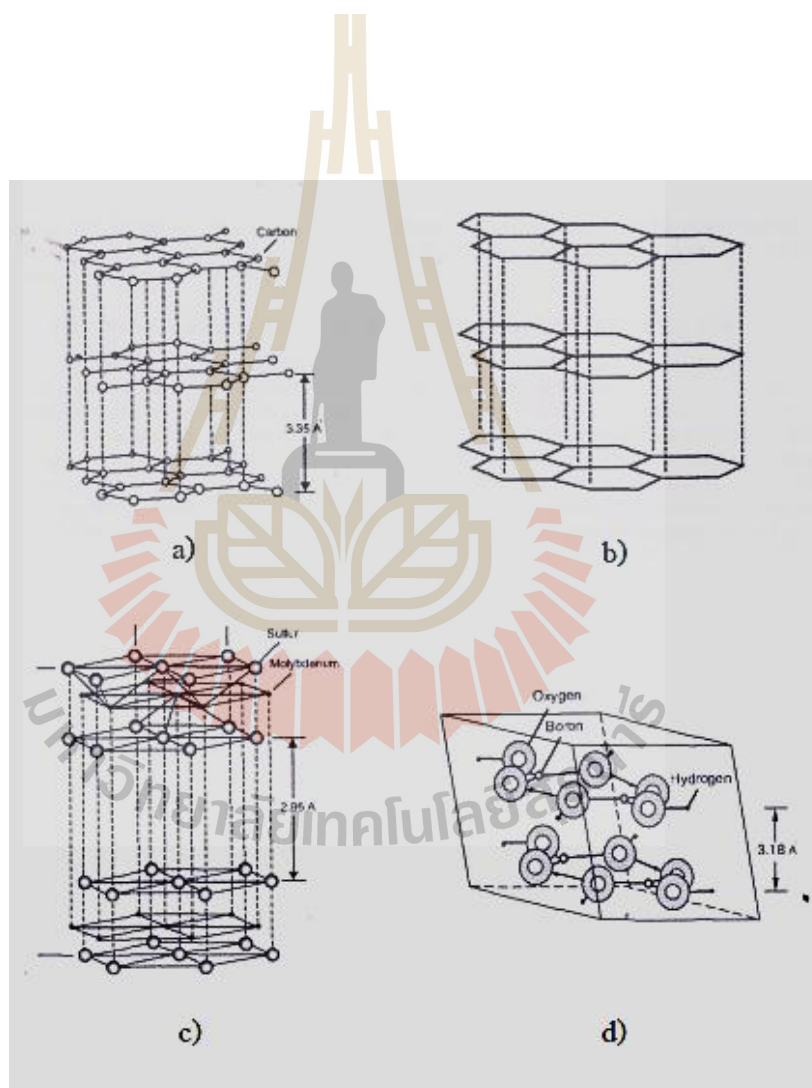
2.3 แกรไฟต์ (Graphite)

แกรไฟต์เกิดจากอะตอมของคาร์บอนจับกันเป็นโครงข่าย 2 มิติ รูปร่างหกเหลี่ยมเรียงซ้ำกัน ไปเป็นชั้น ดังรูปที่ 2.7a โดยที่คาร์บอนแต่ละอะตอมยังเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนในชั้น p-orbital ที่ไม่มีส่วนร่วมในการเกิดพันธะอีกหนึ่งอะตอมเป็นหมอกอิเล็กตรอนที่ไม่ประจำที่อยู่ระหว่างระนาบ และในแนวตั้งฉากกับระนาบอะตอมคาร์บอน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างระนาบน้อยกว่าแรงดึงดูดภายในระนาบอย่างมาก หรือคาร์บอนอะตอมระหว่างชั้นไม่ได้สร้างพันธะโควาเลนต์กัน แต่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่ไม่แข็งแรงเท่ากับพันธะโควาเลนต์ในชั้นเดียวกัน แกรไฟต์จึงเลื่อนไถลไปตามชั้นได้ง่ายกว่าการเลื่อนไหลในแนวตั้งฉาก จึงใช้แกรไฟต์เป็นตัวหล่อลื่น เนื่องจากหมอกอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในแนวกับระนาบอะตอมคาร์บอน แกรไฟต์จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าโดยทิศทางกรไหลของกระแสไฟฟ้าจะขนานกับระนาบอะตอมของคาร์บอน สมบัติเฉพาะของแกรไฟต์อีกอย่างหนึ่งคือ มีจุดหลอมเหลว 3,700 องศาเซลเซียส มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส และเนื่องจากแกรไฟต์มีอัตราการขยายตัวต่ำจึงทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันได้ (Wood, 1991)

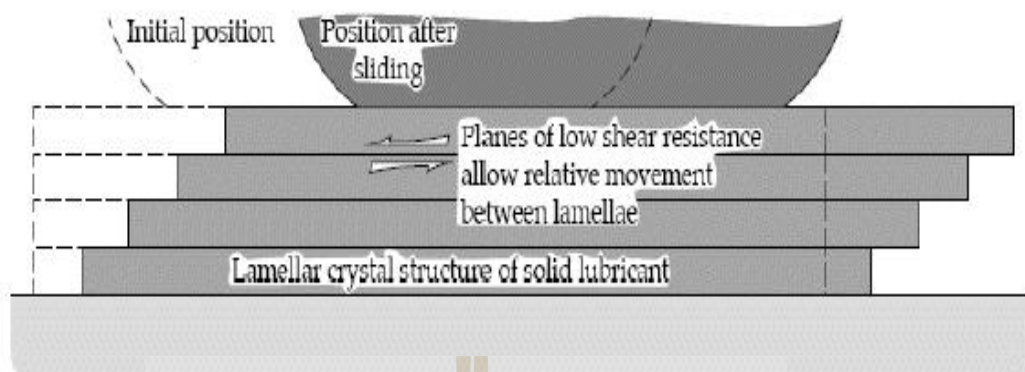
สำหรับแกรไฟต์ ซึ่งเป็นผลึกโควาเลนต์ และเป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอน มีความเข้ากันได้กับร่างกาย (Biocompatibility) ไม่ละลาย หรือทำปฏิกิริยากับกรด และน้ำ เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid lubricant) และตัวอย่างการใช้งานของแกรไฟต์ในทางวัสดุชีวภาพ เช่น เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไพโรคาร์บอน สำหรับใช้ทำวาล์วเปิด-ปิดลิ้นหัวใจเทียมแทนพลาสติก และโลหะที่เคยใช้ เนื่องจากมีสมบัติเข้ากันได้ดีกับเลือด ไม่ทำให้เลือดจับตัวเป็นลิ่ม ซึ่งต่างจากวาล์วลิ้นหัวใจที่ทำจากพลาสติก และโลหะที่ทำให้เลือดจับตัวเป็นลิ่ม และยังมีอายุการใช้งานที่สั้นอีกด้วย นอกจากนี้ Arabi et.al. (2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของแกรไฟต์ที่เคลือบลงบนหลอดเลือดเทียมพอลิเอสเตอร์ ซึ่งได้ทำการทดลองในสิ่งมีชีวิต และโดยวิธีการเลี้ยงเนื้อเยื่อ จากการทดลองพบว่าหลอดเลือดเทียมพอลิเอสเตอร์ ที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ (Graphite on polyester vascular grafts) จะช่วยลดการยึดเกาะของเกล็ดเลือดเพราะอนุภาคของแกรไฟต์ป้องกันโมเลกุลโปรตีนเซลล์เกล็ดเลือดจากผิวของหลอดเลือดที่มีประจุลบ และป้องกันการทำปฏิกิริยาของเกล็ดเลือดกับผิวของหลอดเลือดเทียมได้ดีมากกว่าหลอดเลือดเทียมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ (non-coated PVG)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุแกรไฟต์

สมบัติ	ปริมาณ	หน่วย	อ้างอิง
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.07-0.5	-	Richarson, T., 1987
ความแข็ง	0.5-1	Moh's scale	Erdemir (2001)
ความต้านทานต่อแรงกระแทก	58.8	กิโลจูลต่อตารางเมตร	Lubin (1982)
ความต้านทานต่อแรงกดอัด	97	เมกะปาสกาล	Poco graphite, INC



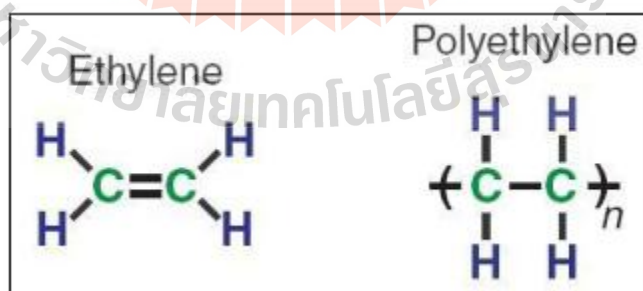
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้น a) แกรไฟต์
 b) เฮกซะโบรอนไนไตรด์ b) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ d) บอริกแอซิด
 (Erdemir, 2001)



รูปที่ 2.8 กลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบาง
(Gwidon and Andrew, 2001)

2.4 UHMWPE

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์ หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่ม โพลีเอทิลีน (Polyethylene) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) โพลีเอทิลีนคือพอลิเมอร์ที่ก่อตัว หรือสังเคราะห์จาก เอทิลีนแก๊ส (C_2H_4) ที่มีมวล โมเลกุลเท่ากับ 28 กรัมต่อโมล ซึ่งรูปแบบโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไป ของโพลีเอทิลีน คือ $-(C_2H_4)_n-$ โดยที่ n คือ ปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ซึ่งแผนภาพแสดง โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและ โพลีเอทิลีนมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและ โพลีเอทิลีน (Kurtz, 2009)

สายโซ่โมเลกุลของโพลีเอทิลีนประกอบด้วยเอทิลีน โมโนเมอร์ประมาณ 200,000 หน่วย เรียงต่อกันซ้ำๆ หรือในอีกหนึ่งความหมาย สายโซ่โมเลกุลของโพลีเอทิลีนจะประกอบด้วยอะตอม

ของคาร์บอนมากถึง 400,000 อะตอม และนอกจากนี้ โพลีเอทีลีนยังสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดตามขบวนการสังเคราะห์ ซึ่ง โพลีเอทีลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาด้วยขนาดของมวลโมเลกุล และรูปแบบการจัดเรียงตัวของเอทีลีนโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน สำหรับในส่วนของ UHMWPE เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทีลีนชนิดอื่นๆ พบว่า UHMWPE มีมวลโมเลกุลสูงประมาณ 6×10^6 กรัมต่อโมล แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆ เช่นนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาต่างๆ แต่จะทำการวัดเปรียบเทียบกับอนุมานแทนด้วยค่าความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity; IV)

UHMWPE มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ มีความลื่นตัวสูง มีความคงทนต่อแรงกระแทก และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และสารเคมีต่างๆ โดยสมบัติเชิงกลของ UHMWPE ได้แสดงในตารางที่ 2.2 การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ UHMWPE ในช่วงที่ผ่านมาเน้นไปที่การศึกษา เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล และความต้านทานการสึกหรอเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจาก UHMWPE ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดทานรองรับการเสียดสีสำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล และทางด้าน การแพทย์

การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟืองเกียร์แบร์ริง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร ใช้เป็นวัสดุปูพื้น หรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหิน หรือพื้นกระบะรถบรรทุก เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ สำหรับงานศัลยกรรมกระดูก และกล้ามเนื้อ (Kurtz, 2009)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

สมบัติเชิงกล	ปริมาณ	หน่วย	อ้างอิง
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.12	-	TIVAR®1000
ความแข็ง	68	Shore D	TIVAR®1000
ความต้านทานต่อแรงกระแทก	34	ฟุต-ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	TIVAR®1000
ความต้านทานต่อแรงกดอัด	536.07	กิโลจูลต่อตารางเมตร	Lubin (1982)



$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน } (\mu) = \frac{\text{แรงที่ดึงให้วัตถุเคลื่อนที่}}{\text{แรงที่กดทับบนผิวสัมผัส}} = \frac{f}{N} \quad (2.1)$$

$$f = \mu N \quad (2.2)$$

โดย μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
 f = แรงที่ดึงให้วัตถุเคลื่อนที่ (นิวตัน)
 N = แรงที่กดทับบนผิวสัมผัส (นิวตัน)

กลไกการเกิดแรงเสียดทานของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลไก นั่นคือ แรงเสียดทานที่บริเวณผิวสัมผัส (Interfacial) และแรงเสียดทานจากการยึดติด (Cohesive) ซึ่งมีสมมติฐานว่าวัสดุที่สัมผัสกับผิวพอลิเมอร์จะต้องมีความแข็งแรง ทนต่อแรง และไม่เกิดการเสียดรูปแม้โดนแรงกระทำเพียงเล็กน้อย แรงเสียดทานทั้งหมดเกิดจากการรวมกันของพลังงานที่สูญเสียจากบริเวณผิวสัมผัสและการยึดติดโดยความแตกต่างของกลไกทั้งสองประเภทนั้นจะต่างกันที่การสูญเสียพลังงานจากการเสียดรูปที่ต่างกัน โดยกลไกแบบผิวสัมผัส (Interfacial) พลังงานที่สูญเสียส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่สูญเสียจากการเสียดรูปที่เกิดจากการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ปริมาณของความเสียดทานนั้นมักจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยร่วมด้วย เช่น ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ โครงสร้างโมเลกุล อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นหรืออุณหภูมิการเกิดผลึก ความหยาบผิว ปฏิกริยาเคมี และไฟฟ้าระหว่างวัสดุสัมผัส และพอลิเมอร์ ตัวอย่างของการเกิดแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัส เช่น วัสดุพอลิเมอร์ ประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กึ่งผลึก (Semi crystalline) และชนิดอสัณฐาน (Amorphous) ชนิดที่เป็นกึ่งผลึกจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีความสามารถในการยึดตัวได้ง่ายในทิศทาง การเคลื่อนที่ตามแรงเฉือน เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึกมีค่าต่ำ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน วัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง วัสดุจึงมีความอ่อนนุ่มมากเมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุอื่น จะเกิดการยึดติดที่สูงมาก ส่งผลทำให้มีความเสียดทานที่สูง โดยอีลาสโตเมอร์จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงที่สุด (Friedrich and Hager, 1995) ส่วนกลไกปรองเสียดทานแบบการยึดติด (Cohesive) ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นพลังงานที่สูญเสียจากการเสียดรูปจากการยึดติด และการขูดขีดของผิวสัมผัสร่วมกัน โดยเฉพาะการขูดขีดแบบไถ (Plowing) นอกจากนั้นการสูญเสียพลังงานจะขึ้นอยู่กับความต้านทาน

แรงดึง (Tensile strength), การยืดตัวก่อนแตกหัก (Elongation before fracture) หรือค่าความเหนียว (Toughness) ของพอลิเมอร์ และความสูงมุมตัด (Cutting angle) ของยอดแหลม (Asperities) ของผิวสัมผัสวัสดุ (Brian and Sujeet, 2001)

2.6 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์

พื้นผิวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ เมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองเลื่อน (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสี จะเกิดการสึกหรอจากการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสที่มีค่าความแข็งสูงกว่า ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคู่สัมผัสโลหะแข็งขัดถูเสียดสีกับพื้นผิวพอลิเมอร์นั้น ถูกกำหนดจากตามความต้องการของการออกแบบทางกล และรวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่าพอลิเมอร์สามารถต้านทานการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะได้ดีกว่าการเลื่อนไถลเสียดสีตัวมันเอง โดยรูปแบบพื้นฐานการสึกหรอของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เริ่มต้นจากก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่ถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะที่มีค่าความแข็งสูงกว่า ซึ่งการก่อตัวของชั้นฟิล์มนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางด้าน ไตรโบโลยีของพอลิเมอร์

ลักษณะรูปแบบของการสึกหรอ โดยทั่วไปแล้วสามารถจัดกลุ่มรูปแบบการสึกหรอได้ 4 ประเภท ซึ่งประกอบด้วย การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear), การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear), การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบ ไตรโบเคมีคอล (Tribochemical wear) (Takadoun, 2008)

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอแบบยึดติดอีก ได้แก่ แรงดึงคู่ระหว่างอะตอมตรงรอยต่อจุดสัมผัสที่ผิวของวัสดุที่เสียดสีขณะที่ทำการทดสอบ การแตกหักของรอยต่อเมื่อเกิดแรงเฉือน สมบัติทางด้านการเปียก (Wetting) พื้นระเคมีบริเวณรอยสัมผัสของวัสดุคู่สัมผัส และการยึดเกาะกันภายในวัสดุ เป็นต้น

การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุแข็งถูกวางสัมผัสกับวัสดุอ่อน การสึกหรอลักษณะนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการ ครูดหรือขูดออกของเนื้อวัสดุ ทำให้เกิดเป็นร่องของการสึกหรอ และนำไปสู่การสูญเสียเนื้อวัสดุ กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบขัดถูนี้มีสาเหตุมาจากจุดปลายความหยาบพื้นผิวที่แข็ง (Hard asperities) บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและ หรืออนุภาคแข็งที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งการสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อความขรุขระเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดในแรงเสียดทาน โดยผลของการขัดถูจะแสดงออกมาในรูปของรอยขีดข่วน รอยแฉะ และร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ เศษซากของการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเศษที่ถูกตัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ คล้ายๆ กับเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดในงานตัดเฉือนด้วยเครื่องมือกล แต่จะมีขนาดที่เล็กกว่า การสึกหรอแบบขัดถูนี้ส่วนใหญ่มี

ความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของจุดปลายความหยาบพื้นผิว (Asperity) ที่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยอัตราการสึกหรอขึ้นอยู่กับรูปร่าง และมุมปลายของจุดหรือบริเวณที่เกิดการขัดถูบนพื้นผิวของกลุ่มสัมผัส (Myshkin and Kovalev, 2009) ในขณะที่เกิดการขัดถู เมื่ออนุภาคขัดถูกระทำกับวัสดุพอลิเมอร์จะมีรูปแบบการเสียดรูปของวัสดุสองรูปแบบที่สำคัญ คือ รูปแบบที่หนึ่งเกิดการเซาะเป็นร่องบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่บ่อยครั้งมักจะมีกรวดอ้างถึงการไหลครูดที่เกิดจากการผลัด หรือคั่นอนุภาค และวัสดุไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องเป็นรอยไถครูดทางยาว และคั่นเนื้อวัสดุออกด้านข้าง ที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นสันใกล้เคียงๆ กับรอยไถครูดที่ต่อมามีการพัฒนาเกิดเป็นร่องโดยไม่มีเนื้อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิว รูปแบบที่สองถูกเรียกว่าเกิดการตัดเฉือนเนื่องจากมีลักษณะคล้ายๆ กับการตัดเฉือนในระดับไมโครเมตร ซึ่งเนื้อวัสดุถูกแทนที่ด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่ถูกขจัดออกมาเป็นเศษเล็กๆ (Chip)

นอกจากนี้การสึกหรอแบบขัดถูเกิดจากการสัมผัสของวัสดุที่มียอดแหลมมาสัมผัสกันหรือมีชิ้นส่วนของแข็งขนาดเล็กหลุดเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัส และครูดไถไปบนผิวหน้าที่อาจจะอ่อนกว่า ชิ้นส่วนของแข็งนี้อาจจะเป็นสิ่งแปลกปลอมจากภายนอก หรือเศษที่แตกหักมาจากการสึกหรอนั่นเอง ในกรณีที่วัสดุมีความเหนียว (Ductile material) อนุภาคที่มีความแข็งเหล่านี้จะเป็นผลให้เกิดการไหล และเสียดรูปถาวร (Plastic flow) ในวัสดุที่มีความอ่อนนุ่มกว่า ส่วนวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle material) การสึกหรอจะเกิดจากการแตกหักบนผิวสึกหรอ (Worn surface) จะมีรอยแตกอยู่บนผิว โดยทั่วไปแล้วลักษณะการสึกหรอแบบขัดถูจะเกิดได้ 2 ลักษณะ นั่นคือ การสึกหรอแบบสองมิติ (Two-body) และสามมิติ (Three-body) (Stachowiak and Batchelor, 2001)

2.6.1 การตรวจสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอ

สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้

- 1) วัดการเปลี่ยนแปลงมวล ซึ่งสะดวกแต่มีข้อเสียดังนี้
 - ไม่สามารถใช้เปรียบเทียบการสึกหรอของวัสดุต่างชนิดภายใต้สภาพเดียวกันได้ เช่น วัสดุเบาซึ่งมีการสึกหรอมาก แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงมวลน้อย
 - วัสดุบางประเภทไม่สามารถใช้ความหนาแน่นเปลี่ยนมวลเป็นปริมาตรได้ เช่น ชิ้นผิวเคลือบ
 - ไม่สามารถวัดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้
- 2) วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งแสดงพื้นฐานของการสึกหรอ แต่มีข้อเสียคือ ไม่สะดวกและงานทางด้านวิศวกรรมมักสนใจการสึกหรอในแง่อื่นๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นผิวและการเพิ่มขึ้นของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วน (Clearance) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนจาก

ปริมาตรการสึกหรอ (Wear volume) เป็นรูปร่างการสึกหรอ (Wear dimension) ซึ่งต้องใช้หลักเรขาคณิต และความสัมพันธ์ที่ได้ อาจไม่เป็นเชิงเส้น

3) วัดการเปลี่ยนแปลงทางอ้อม อาจใช้ในกรณีที่การวัดการเปลี่ยนแปลงมวล และปริมาตรทำได้ยาก หรือการเปลี่ยนแปลงน้อยจนตรวจวัดไม่ได้ จึงจำเป็นต้องใช้การวัดการสึกหรอแบบทางอ้อมแทน เช่น การเปลี่ยนแปลงของการสั่นสะเทือน ความหยาบของผิว และความร้อน

2.7 ไตรโบโลยี (Tribology)

ไตรโบโลยี (Tribology) เกิดจากคำสองคำ คือคำว่า “ไตรบอส (Tribos)” ซึ่งเป็นรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง การขัดสี หรือขัดถู และมารวมกับคำว่า “โลยี (Logy)” ซึ่งหมายถึง วิชา ดังนั้นคำว่า ไตรโบโลยี จึงหมายถึง วิชาที่เกี่ยวกับการศึกษาถึงการขัดสี ขัดถู ของวัสดุใดๆ โดยปกติแล้วผิวของวัสดุที่มากกว่า 2 ชนิดมีการเคลื่อนที่สัมผัสกันจะเกิดการเสียดทานระหว่างผิว ทำให้เกิดการสึกหรอ เพื่อเป็นการลดการเสียดทาน และการสึกหรอที่เกิดขึ้น จึงเป็นที่มาของการหล่อลื่น และสารหล่อลื่น ดังนั้นการศึกษาวิชาไตรโบโลยีจึงเป็นการศึกษาองค์ประกอบใหญ่ๆ 3 เรื่อง ได้แก่ สารหล่อลื่น (Lubricant) แรงเสียดทาน (Friction) และการสึกหรอ (Wear) (Donnet, Mogne and Martin, 1993) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 สารหล่อลื่น (Lubricant)

สารหล่อลื่น คือ สารที่นำมาใช้ทำหน้าที่หลักคือ การหล่อลื่น ลดแรงเสียดทาน สารหล่อลื่นเมื่อแบ่งตามสถานะจะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท นั่นคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แต่การใช้งานสารหล่อลื่นทางด้านไตรโบโลยีส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้สารหล่อลื่นของเหลว หรือจาระบี เพื่อลดการสึกหรอ และความเสียดทาน อย่างไรก็ตาม เมื่อนำสารหล่อลื่นของเหลวเหล่านั้นใช้งานในสภาวะที่รุนแรง เช่น ที่อุณหภูมิสูง สภาวะสุญญากาศ และสภาวะที่มีความเข้มข้นของรังสี หรือการมีแรงดันสูง เป็นต้น สารหล่อลื่นของเหลวจะไม่สามารถคงสภาพความหล่อลื่นได้ ดังนั้นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid lubricant) จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานเพื่อลดการสึกหรอ และความเสียดทาน ซึ่งข้อดีของมันเป็นคือสามารถคงสภาพได้ดีกว่าในสภาวะรุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของเหลว ดังแสดงความแตกต่างของสารหล่อลื่นของแข็ง และของเหลวในตารางที่ 2.3 ดังนั้นสารหล่อลื่นของแข็งจึงเป็นวัสดุที่ถูกสนใจมาก นอกจากนั้นข้อดีอีกประการของสารหล่อลื่นของแข็งก็คือ มีความสะอาดมากกว่าสารหล่อลื่นชนิดของเหลว (Erdemir, 2001; Gwidon and Andrew, 2001)

ในที่นี้จะขออธิบายลักษณะและกลไกของสารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้นคือ สารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น

สารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้น (Lamellar solids) เช่น แกรไฟต์ เฮกซะโกนอล โบรอนไนไตรด์ และบอริกแอซิด เป็นต้น โครงสร้างของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นจะแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.7 วัสดุเหล่านี้มีค่าความเสียดทานที่ต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตามสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นยังมีจุดอ่อน กล่าวคือ สารหล่อลื่นประเภทนี้จะมีการนำความร้อนไม่ดี ยกเว้นโลหะอ่อนนุ่ม (Soft metals) ดังนั้นมันจึงไม่สามารถนำความร้อนออกจากผิวสัมผัสได้มาก และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอาจจะมีความสูง และเกิดการผ่นผวนซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดลอม และสภาวะขณะทำการทดสอบ (Erdemir, 2001)

กลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็ง โครงสร้างแบบชั้น การหล่อลื่น (Lubrication) จะเกี่ยวข้องกับการยึดติด (Adhesion) ของผิววัสดุคู่สัมผัส เมื่อผิวสัมผัสเกิดการยึดติดจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคู่สัมผัสนั้นมีค่าสูง เพราะวัสดุจะเกิดการต้านแรงเฉือนที่มากกับผิวสัมผัส แต่สารหล่อลื่นของแข็ง โครงสร้างแบบชั้น จะเป็นวัสดุที่มีสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropy) เมื่อเกิดการสัมผัสกับผิววัสดุที่มีโครงสร้างแบบชั้นบางในทิศทางขนานกับชั้นบางในแต่ละแผ่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคู่สัมผัสจะมีค่าต่ำ เนื่องจากทิศทางดังกล่าวเป็นทิศทางที่เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย ณ แรงเค้นเฉือนต่ำ และเกิดแรงต้านเฉือนที่น้อยกับผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นกลไกการเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบางซึ่งได้ถูกอธิบายโดยแบรกก์ (Bragg) ได้ทำการยกตัวอย่างการเคลื่อนที่ของแกรไฟต์ ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง โครงสร้างแบบชั้นบางที่นิยมนำมาใช้งาน (Gwidon and Andrew, 2001) การเคลื่อนที่ของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นบาง (Lamellar) มีการเรียงตัวของแผ่นชั้นบางที่ยึดติดกันด้วยพันธะอย่างอ่อน และโครงสร้างแบบชั้นบางในแต่ละแผ่นจะสามารถเลื่อนผ่านกันได้ง่าย ถึงแม้จะถูกแรงเค้นเฉือนต่ำ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบนผิวหน้าวัสดุต่ำ ด้วยสารหล่อลื่นของแข็งที่มีโครงสร้างแบบชั้นที่มีสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นจึงถูกเรียกว่า สารหล่อลื่นของแข็งที่เป็นวัสดุหล่อลื่นในตัว (Self-lubricating)

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของสารหล่อลื่นของแข็ง และของเหลว (Erdemir, 2001; Gwidon and Andrew, 2001; Erdemi, 1995; Martin et al., 1994; Donnet, Mogne and Martin, 1993)

การใช้งาน/ สภาวะแวดล้อม	สารหล่อลื่นของแข็ง	สารหล่อลื่นของเหลว
ระบบสุญญากาศ	สามารถคงสภาพการเป็นสารหล่อลื่นได้ดีในสภาวะสุญญากาศ หรือมีอากาศเพียงเล็กน้อย	สารหล่อลื่นของเหลวจะเกิดการระเหย (Evaporate) ยกเว้น PFPE และ PAO
ความดัน	คงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นที่ความดันสูง	ไม่สามารถคงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นได้ที่ความดันสูง หากไม่มีสารแต่งเติม (Additive) ชนิดอื่นร่วม
อุณหภูมิ	คงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง และต่ำมาก และแม้กระทั่งความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน	ไม่สามารถคงสภาพความเป็นสารหล่อลื่นเนื่องจากเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำมาก และเกิดการเสียดทาน หรือเกิดการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงมาก
แรงเสียดทาน	มีความเป็นไปได้มากกว่าว่าจะมีความเสียดทานที่ต่ำในทุกสภาวะ	ความเสียดทานมักจะขึ้นกับความหนืด และอุณหภูมิที่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย
การนำความร้อน	จะนำความร้อนได้ดีเมื่อเป็นสารหล่อลื่นของแข็งประเภทโลหะ แต่จะนำความร้อนได้ไม่ดีนักเมื่อเป็นสารหล่อลื่นของแข็งประเภทอโลหะ หรือสารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้างแบบชั้น	นำความร้อนได้ดีกว่า

ตารางที่ 2.4 ประเภทของสารหล่อลื่นของแข็ง (Erdemir, 2001)

ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง	ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (โดยประมาณ)
โลหะอ่อนนึ่ม (Soft metals)	Ag	0.2-0.35
	Pb	0.15-0.2
	Au	0.2-0.3
	In	0.15-0.25
	Sn	0.2
สารประกอบออกไซด์ร่วม (Mixed oxides)	CuO-Re ₂ O ₇	0.3-0.1
	CuO-MoO ₃	0.35-0.2
	PbO-B ₂ O ₃	0.2-0.1
	CoO-MoO ₃	0.047-0.2
สารประกอบออกไซด์ (Single oxides)	B ₂ O ₃	0.1
	Re ₂ O ₇	0.1-0.6
	MoO ₃	0.2
วัสดุอินทรีย์/พอลิเมอร์ (Organic materials/polymers)	Zinc Stearite	0.1-0.2
	Waxes	0.2-0.4
	Soaps	0.15-0.25
	PTFE	0.04-0.15
ฮาไลด์และซัลเฟตของโลหะหมู่ 2 ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Halides and sulfates of alkaline earth metals carbon-based solids)	CaF ₂ , BaF ₂ , SrF ₂	0.2-0.4
	CaSO ₄ , BaSO ₄ , SrSO ₄	0.15-0.2
	Diamond	0.02-1
	Diamond-like Carbon	0.03-0.5
	Hollow Carbon Nanotube	-
	Carbon-carbon and Carbon-graphite-based Composites	0.05-0.3

ตารางที่ 2.4 ประเภทของสารหล่อลื่นของแข็ง (ต่อ) (Erdemir, 2001)

ประเภทสารหล่อลื่นของแข็ง	ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (โดยประมาณ)
สารหล่อลื่นของแข็งโครงสร้าง แบบชั้น (Lamellar solids)	MoS ₂	0.002-0.25
	WS ₂	0.01-0.2
	h-BN	0.150-0.2
	Graphite	0.07-0.5
	Graphite-Fluoride	0.05-0.15
	H ₃ BO ₃	0.02-0.2

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Howling et al. (2001) ได้ทำการแยกวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการปลูกถ่ายแล้วจากบริเวณข้อเข่าที่มีอายุการใช้งานต่ำกว่า 10 ปี และบริเวณข้อสะโพกที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปีและน้อยกว่า 10 ปี พบว่า มีเศษของอนุภาค UHMWPE ขนาดประมาณ 0.1-0.5 ไมครอน เกิดขึ้นโดยมีปริมาณต่างกันไปตามลักษณะการใช้งานและระยะเวลาการใช้งาน โดยที่ระยะเวลาการใช้งานมากกว่า 10 ปี มีปริมาณของเศษอนุภาคเหล่านี้สูงขึ้น ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้อัตราการสึกหรอของวัสดุสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้งานในระยะยาว

Fouad et.al. (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนแกรไฟต์ (Graphite nano particles) ที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) สำหรับข้อสะโพกเทียม โดยนำอนุภาคนาโนแกรไฟต์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.5 ผสมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในปริมาณ ร้อยละ 2 4 และ 8 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีอัดขึ้นรูปด้วยแกนอัดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากการทดลอง พบว่าเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนแกรไฟต์ (Graphite nano particles) ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด อีกทั้งยังทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ที่เพิ่มขึ้น

Panin et.al. (2010) ได้ทำการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบวิเคราะห์อิทธิพลของอนุภาคนาโนออกไซด์ของออกไซด์ของอนุภาคนาโนเมตรและไมโครเมตรที่มีผลต่อสมบัติทางไตรโบโลยีและสมบัติทางกลของ UHMWPE โดยการผสมอนุภาคนาโนออกไซด์นาโนไฟเบอร์ ในปริมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนัก อนุภาคนาโนออกไซด์ขนาดอนุภาค 200-500 นาโนเมตร ปริมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนัก และอัตราการผสมอนุภาคนาโนออกไซด์ขนาดอนุภาค 3-50 ไมครอน ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขึ้น

รูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน โดยใช้แรงกดอัดในการขึ้นรูป 10 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากนั้น ทำการทดสอบสมบัติการสึกหรอ ด้วยวิธีทดสอบในรูปของก้อนสี่เหลี่ยมที่อยู่กับที่จะถูกกดเข้ากับแหวนทดสอบที่หมุนอยู่ที่ความเร็วซึ่งกำหนดได้ (Block on ring) ตามมาตรฐาน ASTM G77 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานตามมาตรฐาน ASTM G99 และ DIN 50324 ทดสอบสมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึงและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางเคมีโดยตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) ผลการศึกษาวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.13-0.14 ในตัวอย่างที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์นาโนไฟเบอร์ ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีค่าความหยาบผิวต่ำสุด และมีความต้านทานการสึกหรอสูงสุด เมื่อวิเคราะห์ตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดพบว่า เกิดตาข่ายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ และเมื่อวิเคราะห์ตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดอนุภาค 3-50 ไมครอน ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า มีค่าความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น

ปีติพงษ์ และคณะ (2012) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่มีผลต่อไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ โดยนำเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ในเอทานอลและนำไปผสมในเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปรีออนที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที อัดด้วยแรงดัน 10 เมกะปาสกาล แล้วตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ จากการทดลองพบว่า การเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์พบว่าทำให้ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาถึงปริมาณอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนที่ปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากความแข็งที่เพิ่มขึ้นและอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง นอกจากนี้เมื่อนำหนักทดสอบการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้การเติมอนุภาคเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ยังส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเติมเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

Zoo et.al. (2003) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) ที่มีผลต่อสมบัติทางไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE โดยนำเอา คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มี

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-50 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 3-5 นาโนเมตร ในปริมาณร้อยละ 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ผสมกับ UHMWPE ในโทลูอีน (Toluene) ซึ่งหลังจากผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปใส่ตู้ดูดไอสารเคมี (Hood) เป็นระยะเวลา 2 วัน เพื่อลดปริมาณสารโทลูอีน (Toluene) จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูปร้อน ที่ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 25 เมกะปาสกาล ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ขนาดชิ้นงาน 50 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร x 2 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานที่จะทดสอบความต้านทานการสึกหรอ จะตัดชิ้นงานให้มีขนาด 15 มิลลิเมตร x 15 มิลลิเมตร และล้างชิ้นงานด้วยเอทานอล จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณอนุภาคของ คาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้น พบว่า ทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และมีปริมาณน้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) ที่ลดลง แต่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เล็กน้อย ซึ่งการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) จะช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติความแข็งแรงกดและแรงเฉือน ที่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือน และความหยาบของพื้นผิวที่เกิดจากการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ และการศึกษาของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึง การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งช่วยปรับปรุงวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistant) ได้เป็นอย่างดี

Boon et.al. (2015) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณทัลคัม (Talc) ที่มีผลต่อสมบัติการสึกหรอแบบสภาวะไร้สารหล่อลื่นของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE โดยนำทัลคัมที่มีขนาดของอนุภาคน้อยกว่า 45 ไมครอน ในปริมาณร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผสมกับ UHMWPE โดยทำการผสมแบบแห้งในหม้อบด (Ball mill) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นการหมุนของหม้อบด 2 ชั่วโมง ตามเข็มนาฬิกา และอีก 2 ชั่วโมงทวนเข็มนาฬิกา โดยใช้ความเร็วที่ 30 เฮิร์ตซ์ หลังจากผสมแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธี อัดขึ้นรูปร้อน โดยให้ความร้อนก่อนอัดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และกดอัดขึ้นรูปเป็นเวลา 7 นาที จากการทดลองพบว่า อนุภาคของทัลคัมที่เติมลงใน UHMWPE นั้น ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการสึกหรอ ซึ่งเมื่อเติมอนุภาคของทัลคัมเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าการสึกหรอต่อวัสดุเชิงประกอบ (ดังรูปที่ 18) โดยพบว่าที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก UHMWPE/ทัลคัม มีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ UHMWPE/ทัลคัม ที่สัดส่วนอื่นๆ

Ben et.al. (2012) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีผลต่อไทโรโบโลยีและสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrenepolymer)/แกรไฟต์ โดยมีการผสมแกรไฟต์ร้อยละ 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนัก ผสมลงใน ABS polymer โดยในขั้นตอนแรกทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดผ่านคาย (Extruder) ก่อน จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปร้อน โดยให้ความร้อนก่อนอัดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 6 เมกะ

ปาสกาล เป็นเวลา 12 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อใช้แรงกดในการทดสอบคงที่เท่ากับ 17.16 นิวตัน การเพิ่มปริมาณแกรไฟต์ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไป (Weight loss) ลดลง และมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานลดลงด้วย จึงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบในการเลื่อนไถล (Slide cycle) ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติการเป็นสารหล่อลื่นแข็งของแกรไฟต์

Baradeswaran (2014) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีผลต่อคุณสมบัติไตรโบโลยี และสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA705/แกรไฟต์ โดยมีการผสมแกรไฟต์ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบการต้านทานการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ พบว่าเมื่อปริมาณแกรไฟต์ในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้น อัตราการสึกหรอจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ปริมาณแกรไฟต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงแปรผันกับปริมาณแกรไฟต์ เนื่องจากการสร้างชั้นฟิล์มของแกรไฟต์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็งบริเวณผิวสัมผัสที่เกิดการขัดถู นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพบว่า มีค่าลดลงเมื่อวัสดุมีปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น

Liu et al. (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของแกรไฟต์ที่เติมลงในวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) สำหรับเป็นวัสดุทำกระดูกเทียม โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเติมแกรไฟต์ลงใน PVA เป็นปริมาณตั้งแต่ ร้อยละ 0 - 40 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของแกรไฟต์มากขึ้น ค่าความแข็งแรง และปริมาณน้ำในวัสดุลดน้อยลง โดยเฉพาะเมื่อเติมแกรไฟต์ปริมาณมากกว่า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีการหลุดร่วงของอนุภาคแกรไฟต์และปริมาณน้ำในวัสดุไม่เหมาะสมต่อการทำกระดูกเทียม ในงานวิจัยนี้จึงทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับสัตว์ทดลองโดยใช้วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณแกรไฟต์ที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งหลังจากนำวัสดุเชิงประกอบไปทดลองใช้ในหนูทดลอง ที่ 1 สัปดาห์และ 12 สัปดาห์ พบว่าเนื้อเยื่อบริเวณที่มีการปลูกถ่ายของวัสดุเชิงประกอบมีการอักเสบน้อยกว่าวัสดุ PVA บริสุทธิ์ ทั้งยังมีการยึดเกาะของเซลล์ และมีการสร้างเนื้อเยื่อขึ้นมาใหม่ได้มากกว่าอีกด้วย

Arabi et.al. (2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของแกรไฟต์ที่เคลือบลงบนหลอดเลือดเทียมพอลิเอสเตอร์ ซึ่งได้ทำการทดลองในสิ่งมีชีวิต และโดยวิธีการเลี้ยงเนื้อเยื่อ จากการทดลองพบว่าหลอดเลือดเทียมพอลิเอสเตอร์ ที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ (Graphite on polyester vascular grafts) จะช่วยลดการยึดเกาะของเกล็ดเลือดเพราะอนุภาคของแกรไฟต์ป้องกันโมเลกุลโปรตีนเซลล์เกล็ดเลือดจากผิวของหลอดเลือดที่มีประจุลบและป้องกันการทำปฏิกิริยาของเกล็ดเลือดกับผิวของหลอดเลือดเทียมได้ดีมากกว่าหลอดเลือดเทียมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ (Non-coated PVG)

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาสมบัติของวัสดุ UHMWPE สำหรับทำหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม โดยการเติมแกรไฟต์ซึ่งมีสมบัติที่ลื่น (Solid lubricant) เพื่อลดแรงเสียดทาน (Friction) ในปริมาณร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์ และทดสอบสมบัติทั้งหมด แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Dry Powder Mixer	OTTO	CP-390
Oven	Despatch LAC	34G6
Hot Compression Machine	Lab Tech	LP20-B
Vernier	Mitutoyo	530-118
V-notch Tester	ONION TSL	RR1400/015
Microhardness Tester	Bareiss	BS61 II
Grinder&Polisher Machine	CERADEL	6362
Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL	6010LV
Impact Tester Machine	Instron	CEAST 9050
Wear Tester Machine		-
Coefficient of Friction Tester Machine	Param	MXD-02
Ultrasonic Cleaner	Scientific Promotion	950D
Compression Tester	Instron Calibration	5582

3.2 วัสดุ และสารเคมี

วัสดุ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสาร	ขนาด	ผู้ผลิต
อัลตราไฮโมเลกุลาร์เวตโพลีเอทิลีน (Ultra High Molecular Weight Polyethylene ,UHMWPE)	170 ไมครอน	IRPC Public Company Limited of Thailand
แกรไฟต์ (Graphite)	80 ไมครอน	VWR International UTD

3.2.1 ผง UHMWPE

ผง UHMWPE มีมวลโมเลกุล 3.2×10^6 กรัมต่อโมล (ISO 1628-3), ความหนาแน่น 0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 170 ไมครอน

3.2.2 ผงแกรไฟต์ (Graphite)

ผงแกรไฟต์ มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 80 ไมครอน

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอน และวิธีการทดลอง

3.3.1.1 เตรียมผง UHMWPE ที่ได้จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) และผงแกรไฟต์ที่ได้จากบริษัท วิดีบิลยูอาร์ อินเตอร์เนชั่นแนล แอลแอลซี จำกัด ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

3.3.1.2 ผสมผงวัตถุดิบที่ได้จากข้อที่ 3.3.1.1 ด้วยวิธีการผสมผงแบบแห้ง (Dry powder mixing) โดยใช้เครื่องปั่นผสม เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งมีอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.3

3.3.1.3 นำส่วนผสมที่ได้จากข้อที่ 3.3.1.2 ไปขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) โดยอุ่นส่วนผสมในแม่พิมพ์ก่อนอัดขึ้นรูปเป็นเวลา 150 นาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จากนั้นอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที

3.3.1.4 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบหมอนรองข้อเข่าเทียม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

3.3.1.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุ

3.3.1.5.1 ตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (INSTRON รุ่น CEAST 9050)

3.3.1.5.2 ตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness; Shore D) โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบดัดิจิตอล (Bareiss รุ่น BS61 II)

3.3.1.5.3 ตรวจสอบค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistant) โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงาน (CERADEL SOCOR รุ่น P6123)

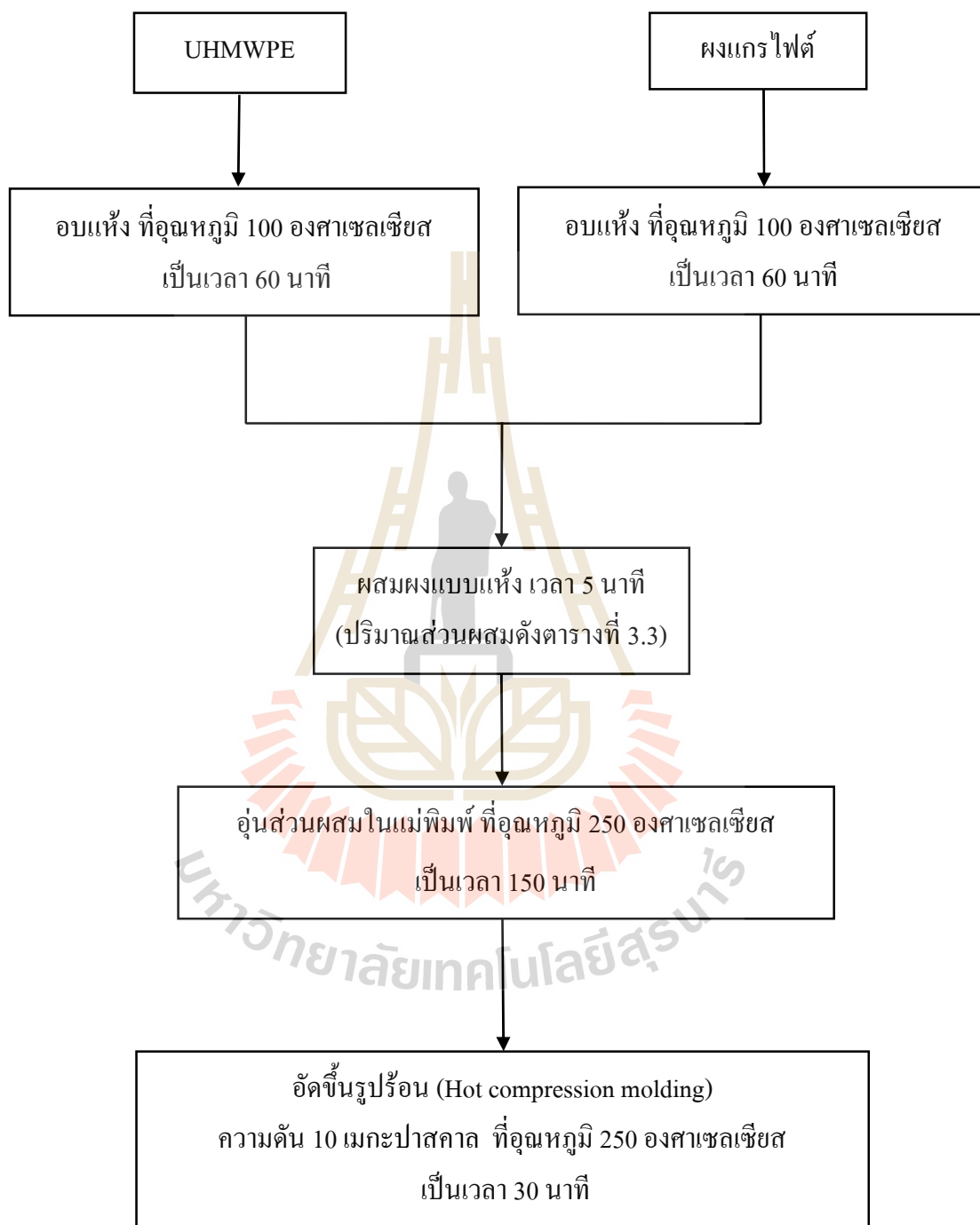
3.3.1.5.4 ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) โดยใช้เครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานพื้นผิวแบบคงที่ (PARAM รุ่น MXD-02)

3.3.1.5.5 ตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive strength) โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลแบบอเนกประสงค์ (INSTRON CALIBRATION รุ่น 5582)

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง โดยวิธีการผสมผงแบบแห้ง

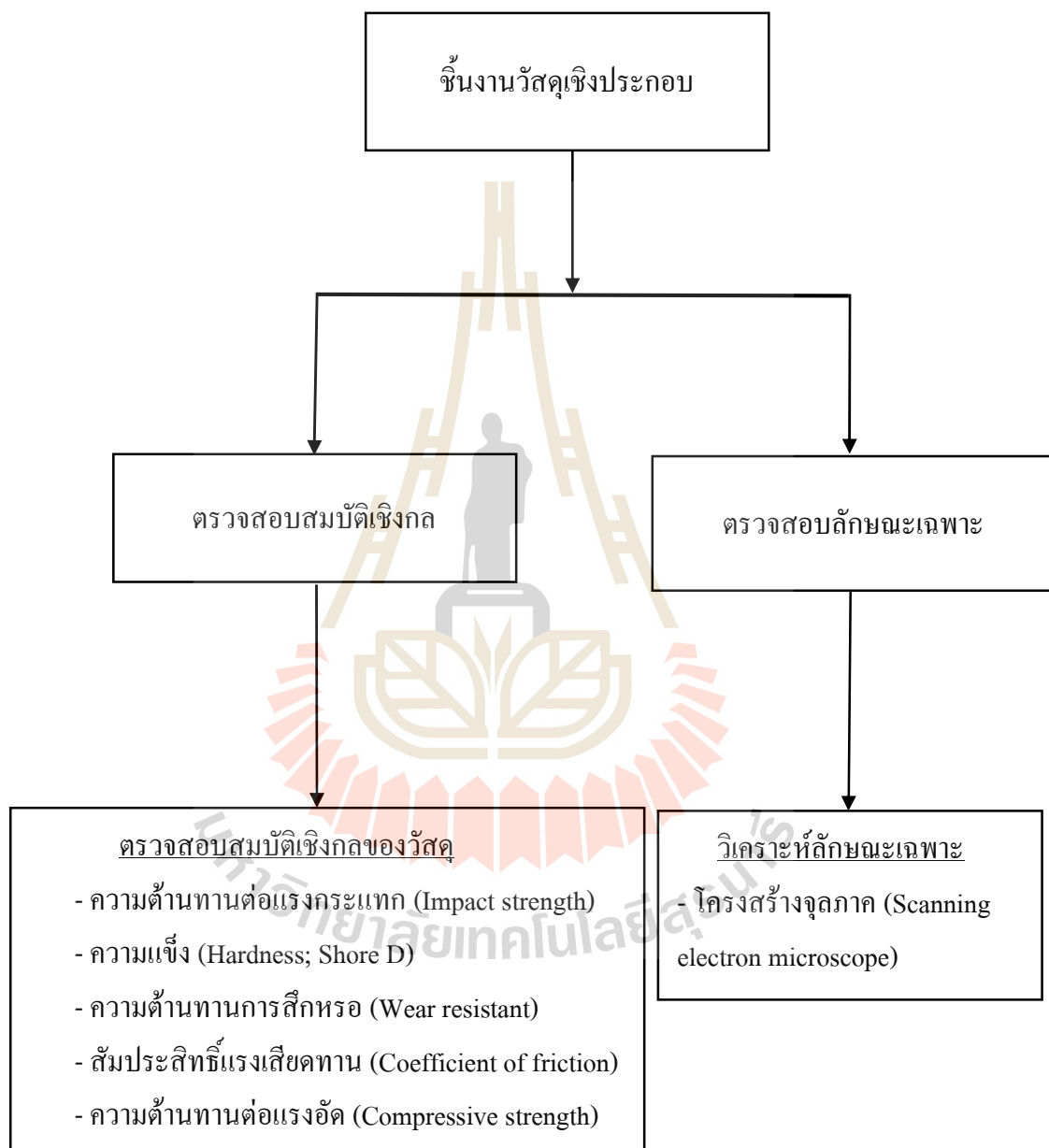
ส่วนผสมที่	UHMWPE (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	แกรไฟต์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	80	20
5	70	30
6	60	40

3.3.2 แผนผังขั้นตอนและวิธีการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



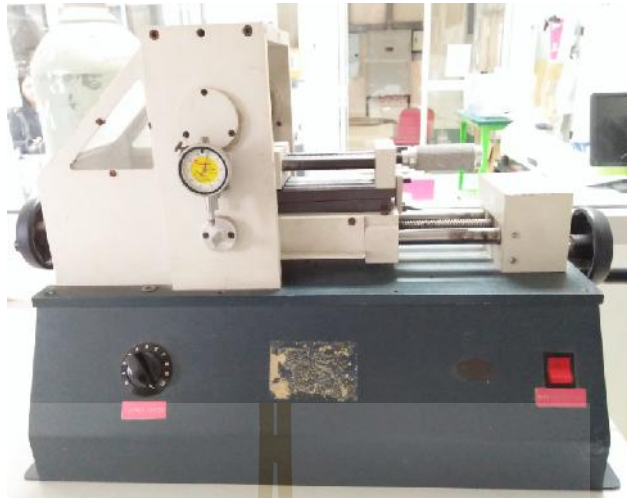
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยสังเขป

หลังจากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากกระบวนการเตรียมในรูปที่ 3.1 นำมาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.4 ตรวจสอบสมบัติความแข็งที่บริเวณผิวของวัสดุ (Hardness)

3.3.4.1 เตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) หลังจากนั้น เลื่อยตัดให้มีชิ้นงานขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และมีความหนา 18 มิลลิเมตร (ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) และขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (เมื่อมีการเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิมทุกครั้ง)

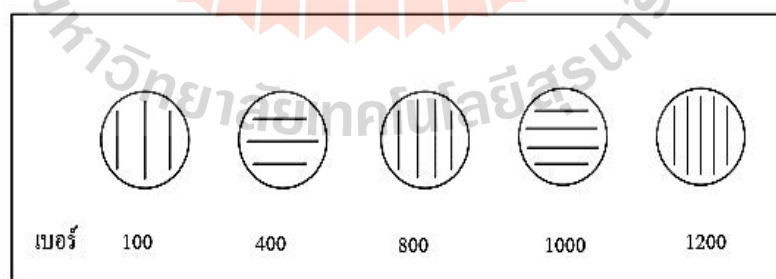
3.3.4.2 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.4.1 มาขัดผิวให้ละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 0.05 ไมครอน บนจานขัดแบบผ้า

3.3.4.3 ทำความสะอาดด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เพื่อขจัดคราบไขมัน

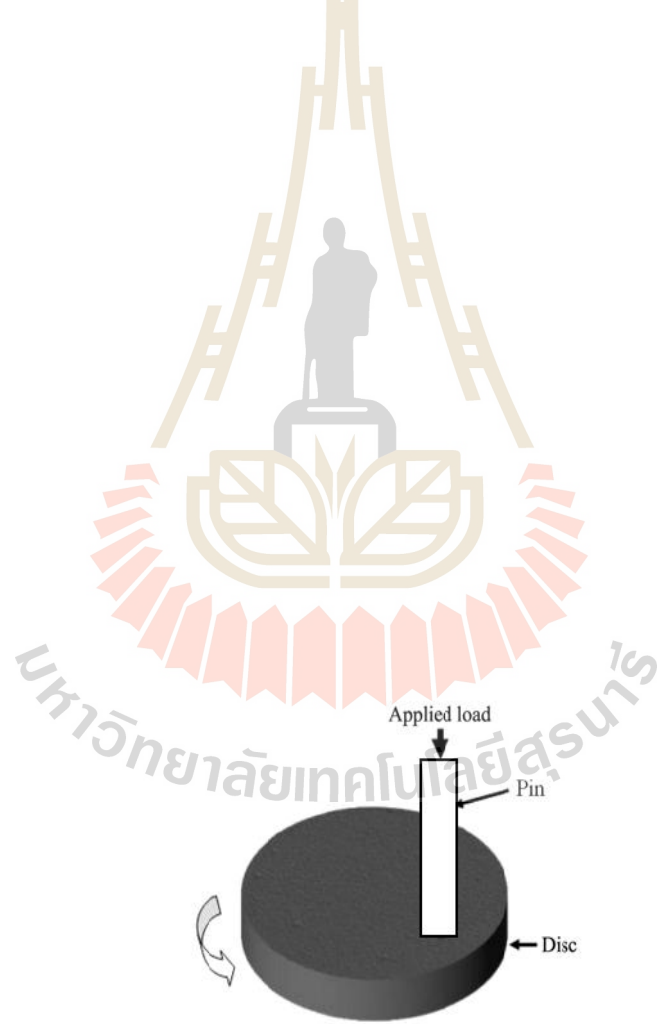
3.3.4.4 ล้างอนุภาคที่จับเกาะผิวหน้าตัวอย่างออก ด้วยเครื่องสั่นสะเทือนความถี่สูง แล้วนำไปทดสอบ

3.3.4.5 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

นำชิ้นงานที่มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และมีความหนา 18 มิลลิเมตร (ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) ทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกด ชนิด ชอร์ ดี (Shore D) (เป็นหัวกดแหลม ใช้น้ำหนักกด 37.16 นิวตัน) โดยนำชิ้นงานทดสอบวางลงบนแท่นทดสอบได้เครื่องมือวัดที่มีตุ้มน้ำหนักวางอยู่ด้านบน แล้วดันหัวตุ้มน้ำหนักกดลงมาติดกับชิ้นงานที่วางอยู่บนแท่นวางชิ้นงาน จากนั้นอ่านค่าที่ได้จากสเกล แล้วบันทึกค่าและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล โดยทำการทดสอบน้ำหนักกดจำนวน 5 ครั้งต่อชิ้นงาน (D 2240)



รูปที่ 3.6 แสดงการเรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด





กระดาษทราย = P800

ทดสอบในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (Dry sliding)

6. นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก (เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง) เพื่อวัดค่าการสูญเสียของมวล หลังการทดสอบ

7. การคำนวณหาการสึกหรอ ตามสมการที่ 3.1 (นริศราและคณะ, 2015)

การสึกหรอหาได้จาก

มวลที่สูญเสียไป = มวลก่อนการทดสอบ – มวลหลังการทดสอบ

$$\text{มวลที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ (กรัมต่อตารางเมตร)} = \frac{\text{มวลที่สูญเสียไป}}{\text{พื้นที่ใช้งานจริง (กว้าง x ยาว)}} \quad (3.1)$$

3.3.6 ตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction)

3.3.6.1 เตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ ขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 39 มิลลิเมตร x 64 มิลลิเมตร x 4 มิลลิเมตร โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) และขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (เมื่อมีการเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิมทุกครั้ง) (ASTM D 1894-01)

3.3.6.2 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.6.1 มาขัดผิวให้ละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 0.05 ไมครอน บนจานขัดแบบผ้า

3.3.6.3 ทำความสะอาดด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เพื่อขจัดคราบไขมัน

3.3.6.4 ล้างอนุภาคที่จับเกาะผิวหน้าตัวอย่างออก ด้วยเครื่องต้นสะเทือนความถี่สูง แล้วนำไปทดสอบ

3.3.6.5 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ชิ้นงานขัดผิวหน้าให้เรียบมีขนาด = 39 มิลลิเมตร x 64 มิลลิเมตร x 4 มิลลิเมตร

น้ำหนักกดทดสอบ = 1.96 นิวตัน

ความเร็วในการทดสอบ = 150 มิลลิเมตร/นาที



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





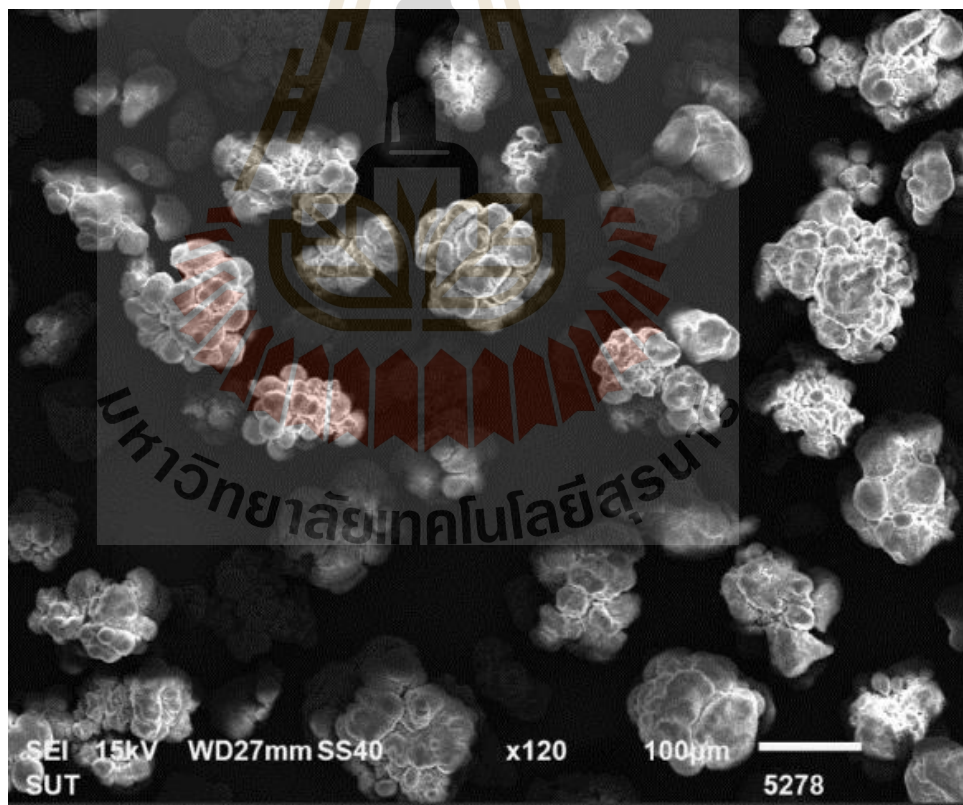
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของสารตั้งต้น และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ

4.1.1 ผง UHMWPE

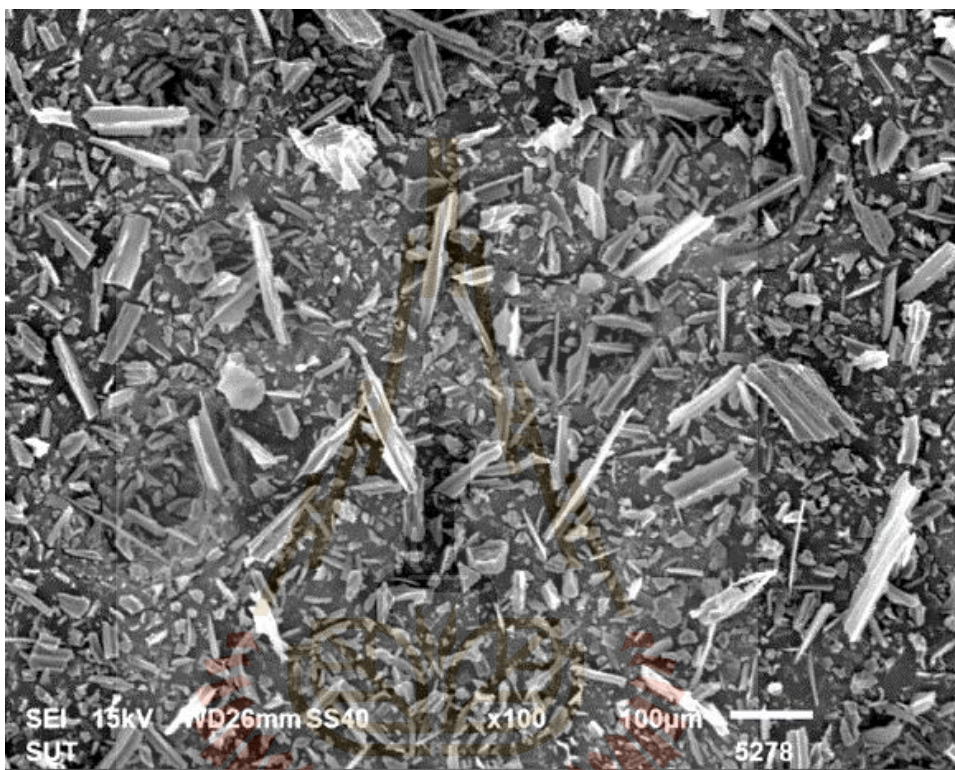
เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผง UHMWPE ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า รูปร่างอนุภาค UHMWPE จะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนและไม่สมมาตรมีรูพรุน และมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค มีขนาดอนุภาค โดยเฉลี่ยเท่ากับ 170 ไมครอน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของผง UHMWPE ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1.2 ผงแกรไฟต์

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผงแกรไฟต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ารูปร่างของอนุภาคแกรไฟต์ลักษณะเป็นแผ่นบาง รูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 80 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะของผงแกรไฟต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

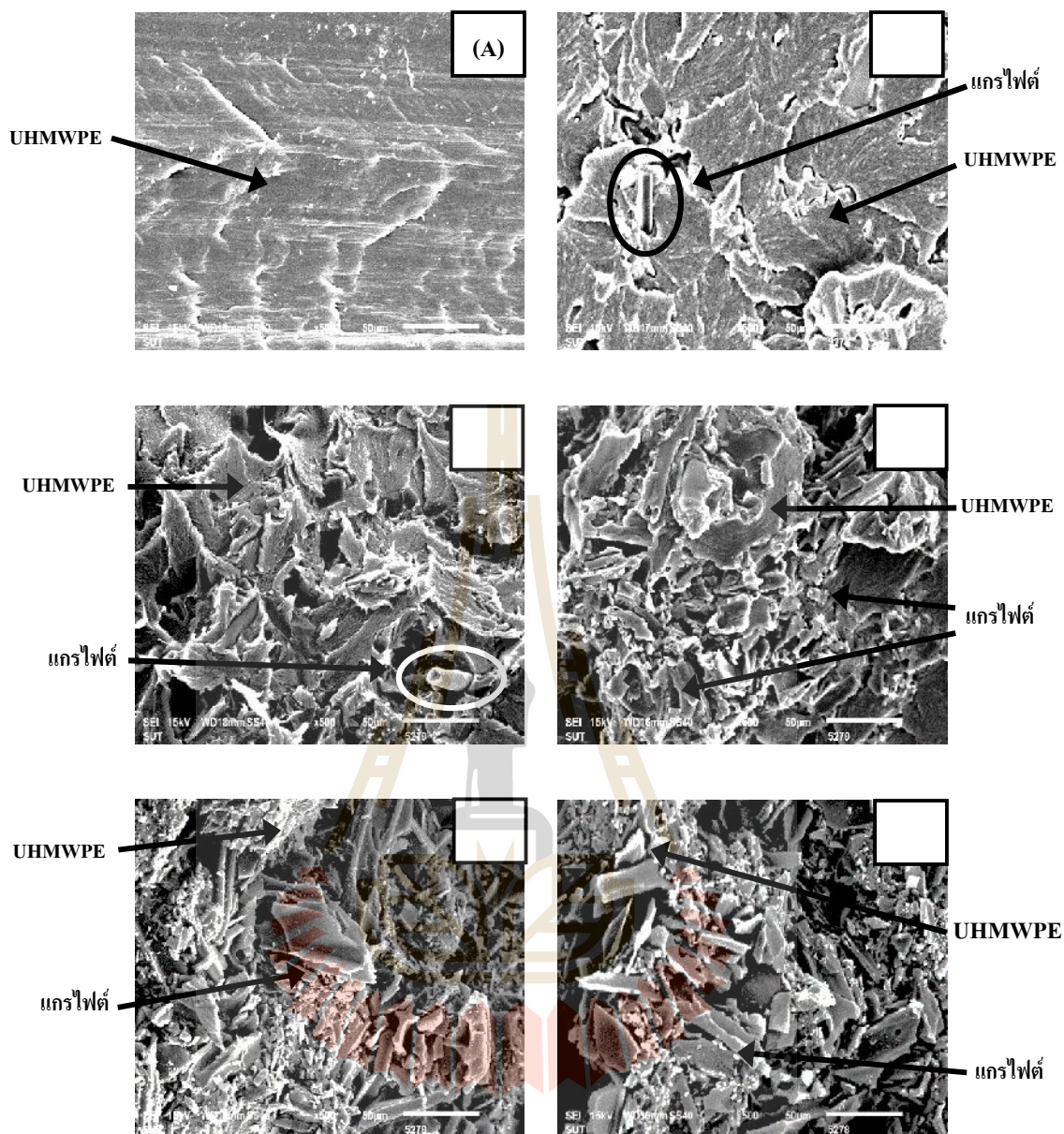
4.1.3 วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เมื่อปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ ในวัสดุ UHMWPE (ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4) เพิ่มขึ้นจะมีการเกาะกลุ่มกัน (Agglomerate) มากกว่าเดิมและมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในวัสดุหลัก ซึ่งปริมาณแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานลดลง ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเชิงประกอบลดลง โดยสังเกตได้จากความต่อเนื่องของบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสม ซึ่งถ้าพอลิเมอร์และ

สารตัวเติมมีแรงยึดเหนี่ยวกันอย่างดี บริเวณรอยต่อหรือผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม จะมีความต่อเนื่องกัน

นอกจากนี้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวหน้าของรอยแตกหัก (Fracture Surface) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ พบว่ารอยแตกหักของพื้นผิวชิ้นงานที่ไม่เติมแกรไฟต์หรือเติมแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยมีลักษณะพื้นผิวเป็นเส้นคลื่นไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าวัสดุมีการแตกหักแบบวัสดุเหนียว ในขณะที่เดียวกัน วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณแกรไฟต์มากกว่า บริเวณรอยแตกหักจะมีความคมมากขึ้นนั่นคือวัสดุมีความเปราะมากขึ้น





รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ กำลังขยาย 500 เท่า

(A) UHMWPE (ไม่เติมอนุภาคแกรไฟต์)

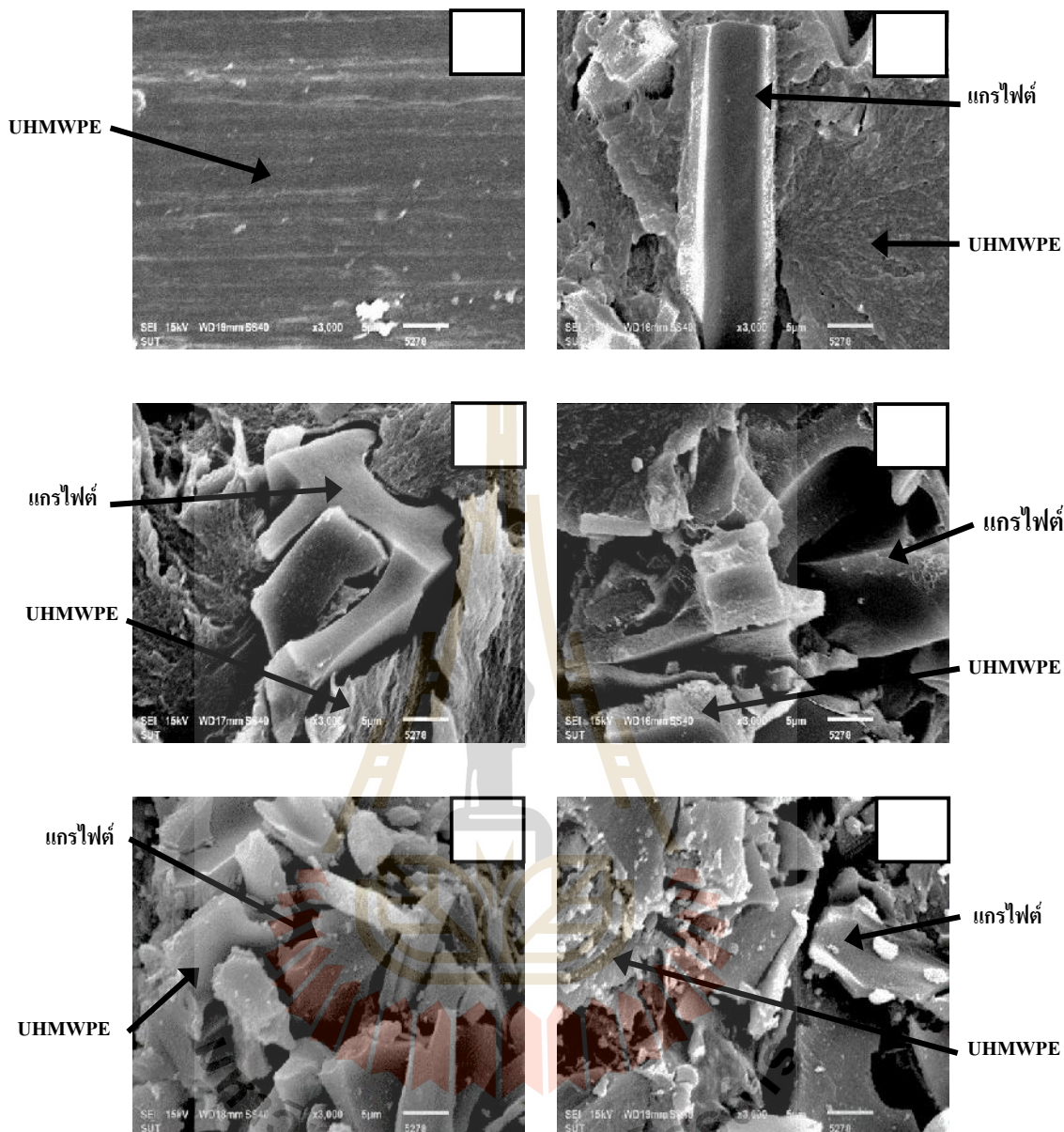
(B) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

(C) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

(D) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

(E) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

(F) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ กำลังขยาย 3,000 เท่า

- (A) UHMWPE (ไม่เติมอนุภาคแกรไฟต์)
- (B) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
- (C) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- (D) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
- (E) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
- (F) UHMWPE/แกรไฟต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

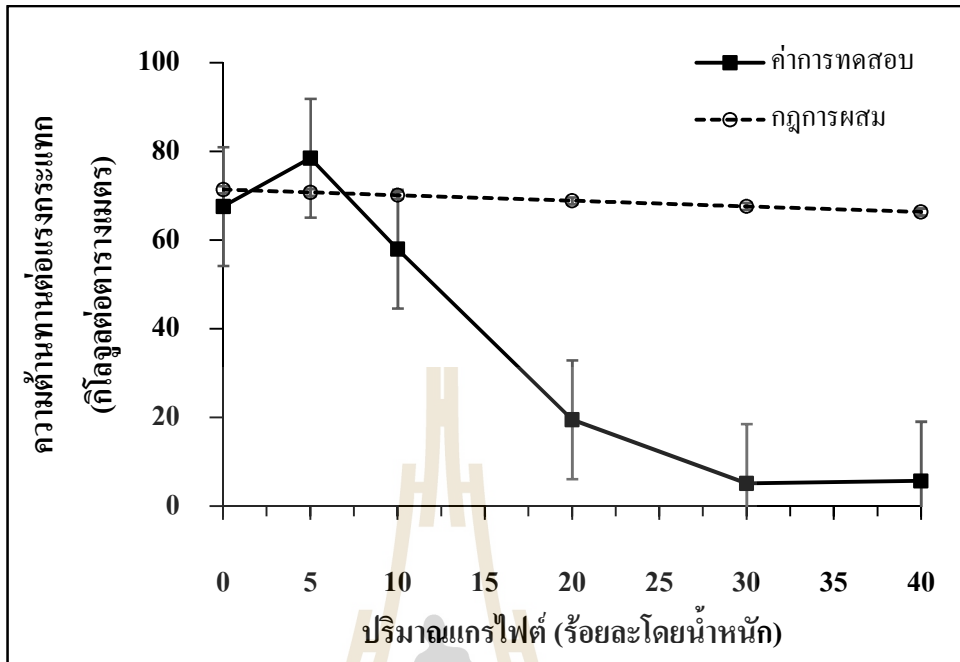
4.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

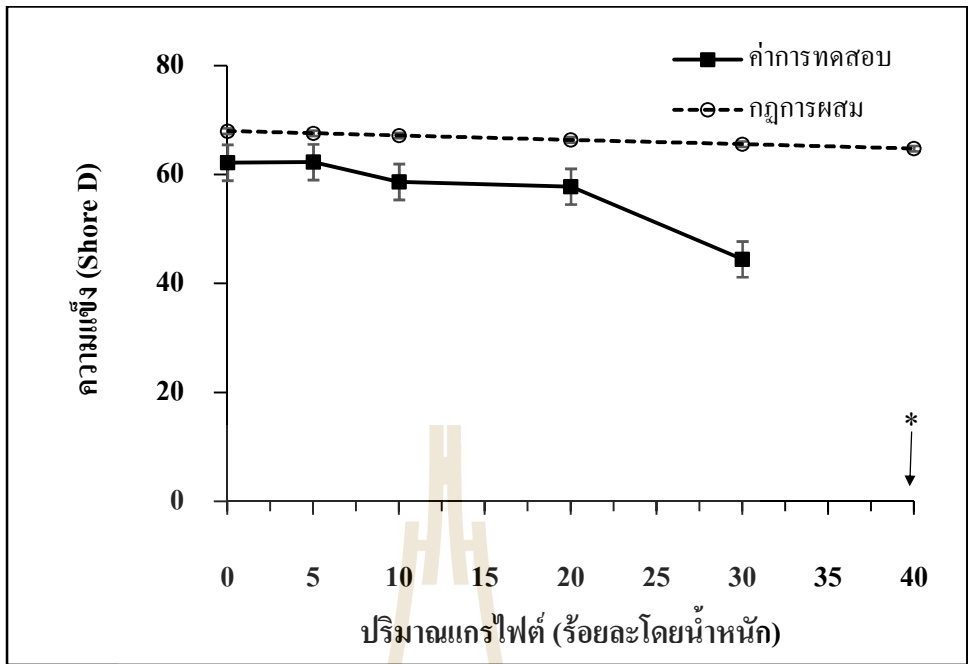
ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล 5 ประเภท ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็ง (Hardness; Shore D) ความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistant) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) และความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่ไม่เติม และเติมแกรไฟต์ในปริมาณร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

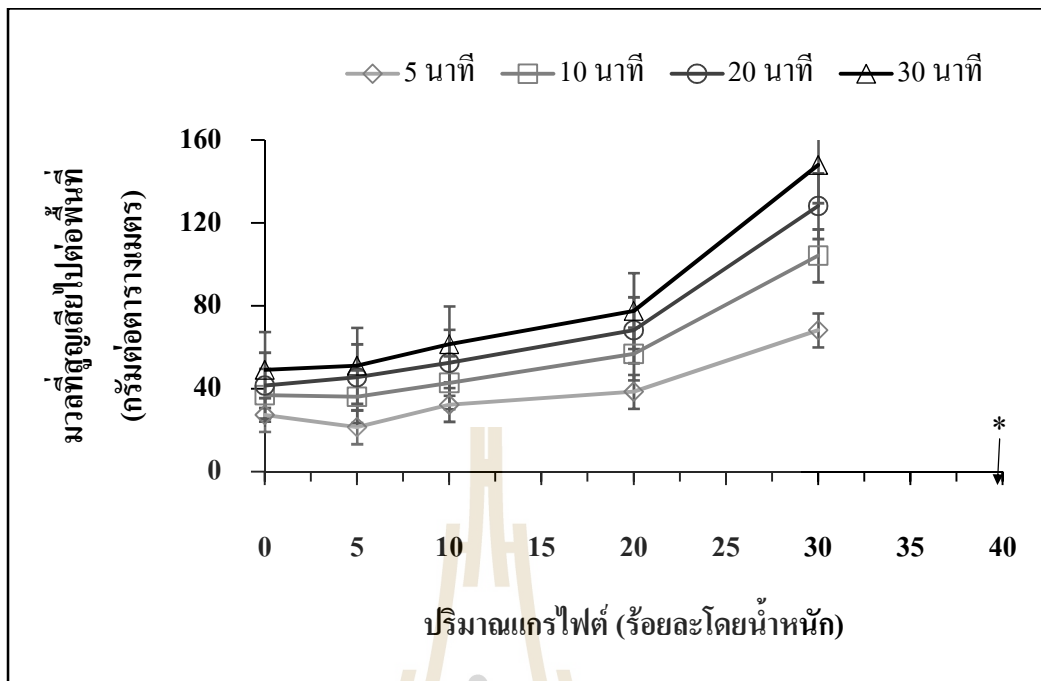
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณแกรไฟต์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังรูปที่ 4.5 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณแกรไฟต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเท่ากับ 78.51 กิโลจูลต่อตารางเมตร ซึ่งมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้เติมแกรไฟต์ ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเท่ากับ 67.59 กิโลจูลต่อตารางเมตร เพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากการกระจายตัวและการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์และแกรไฟต์ที่ดี อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่าความผิดพลาดแล้วพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของทั้งสองมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่เดียวกันจะมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณแกรไฟต์ ร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเท่ากับ 57.98 กิโลจูลต่อตารางเมตร 19.53 กิโลจูลต่อตารางเมตร 5.13 กิโลจูลต่อตารางเมตร และ 4.96 กิโลจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบเมื่อมีการเติมแกรไฟต์มากขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง นั่นคือความเหนียวของชิ้นทดสอบลดลง เนื่องมาจากเกิดการเกาะตัวกัน (Agglomerate) ของอนุภาคแกรไฟต์และปริมาณวัสดุหลักที่เป็นพอลิเมอร์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ทำให้วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ มีความเปราะมากขึ้น ซึ่งเมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับความเค้นจากแรงกระแทก ความเค้นนั้นจะมีการเคลื่อนที่และกระจายในเนื้อวัสดุ แกรไฟต์ซึ่งเป็นสารตัวเติมจะทำให้การเคลื่อนที่ของความเค้นนั้นหยุดลง และเกิดการสะสมของความเค้น (Stress concentration) บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุหลักกับสารตัวเติมมากขึ้น เหนียวนำไปเกิดการแตกขาดเป็นผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงลดลง (นิลกุล, 2550)

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจากการทดสอบมีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้จากกฎการผสมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแกรไฟต์ในวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้ UHMWPE ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานมีปริมาณลดลงดังจะเห็นได้จาก รูปที่ 4.3 และ 4.4

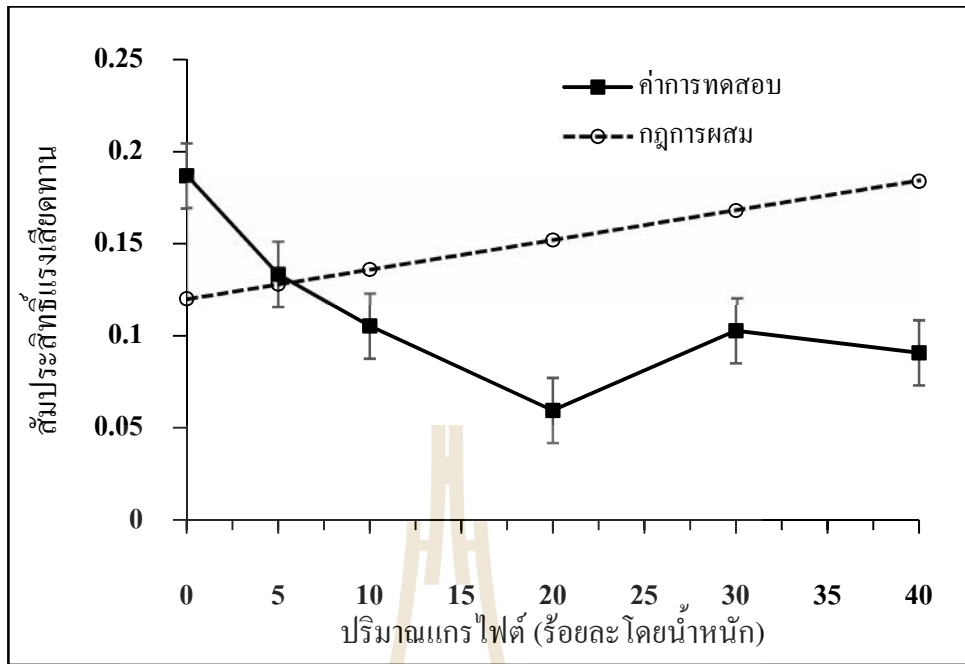


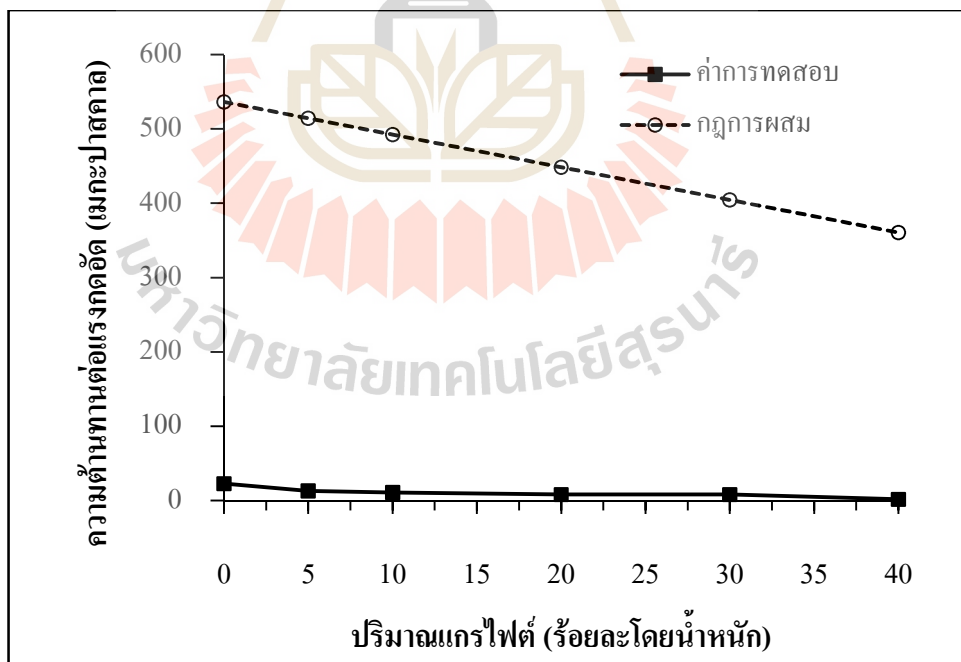




จากงานวิจัยของ Baradeswaran (2014) ที่ศึกษาสมบัติทางไดรโมโลยีของวัสดุเชิงประกอบ โพลีเอ AA7075 โดยการเติมอนุภาคแกรไฟต์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีแกรไฟต์ปริมาณ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุด เนื่องจากการเกิดชั้นฟิล์มของแกรไฟต์บริเวณ คู่สัมผัสสัมผัส อย่างที่ทราบว่าแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกและมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่น ของแข็ง จึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดต่ำลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณแกรไฟต์ ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ มากขึ้น การยึดเกาะระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งและเนื้อ พื้นจะลดต่ำลง สังเกตได้จากอัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น อนุภาคเหล่านั้นจึงมีโอกาสหลุดออกมาอยู่ บริเวณวัสดุคู่สัมผัสได้มาก ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่คำนวณได้จากกฎการผสมพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ เชิงประกอบจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณแกรไฟต์ที่สูงขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตาม ทฤษฎีของแกรไฟต์มีค่าสูงกว่า UHMWPE อย่างไรก็ตามกฎการผสมเป็นเพียงการทำนายสมบัติของ วัสดุ ซึ่งในการคำนวณไม่ได้รวมถึงการเกิดชั้นฟิล์มของแกรไฟต์ หรือการหลุดร่อนของอนุภาคใน ระหว่างการทดสอบ

การที่วัสดุเชิงประกอบมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำส่งผลให้การใช้งานข้อเข้าเทียมได้ดี ยิ่งขึ้นเนื่องจากไปลดการสูญเสียของเนื้อวัสดุหมอนรองข้อเข้าเทียมจากการเสียดสีระหว่างการใช้ งาน (Chang, 2015) โดยจากผลการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วยแกรไฟต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าลดลงจากวัสดุ UHMWPE ที่ไม่เติมแกรไฟต์ถึงร้อยละ 68





บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการศึกษา อิทธิพลของปริมาณแกรไฟต์ที่ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุหมอนรองข้อเข่าเทียม โดยทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) และทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมแกรไฟต์ลงในวัสดุ UHMWPE นั้นสามารถช่วยลดแรงเสียดทานได้ อันเป็นสมบัติสำคัญในงานที่ต้องรับการเสียดสีตลอดเวลาเช่นวัสดุหมอนรองข้อเข่าเทียม การเติมแกรไฟต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบลดลงโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลอย่างอื่นมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณแกรไฟต์เพิ่มมากขึ้น สมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานต่อแรงอัด มีแนวโน้มลดต่ำลงและเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานจะมีความเปราะสูงมากจนไม่สามารถทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ผลสรุปการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งรายละเอียดได้ดังนี้

5.1.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

พบว่า มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่ไม่เติมอนุภาคแกรไฟต์ แม้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแกรไฟต์มีค่ามากกว่า UHMWPE แต่ในความเป็นจริงแล้วในขณะที่ใช้แกรไฟต์ซึ่งมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง จะสร้างชั้นฟิล์มบริเวณผิวคู่สัมผัส จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวระหว่างวัสดุคู่สัมผัสมีค่าลดลง โดยมีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.059 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าวัสดุ UHMWPE ที่ไม่เติมแกรไฟต์ถึงร้อยละ 68

5.1.2 ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

พบว่า การเติมอนุภาคแกรไฟต์จะทำให้สมบัติด้านความแข็งของวัสดุเชิงประกอบลดลง เนื่องจากแกรไฟต์มีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง มีความเปราะและอ่อนนุ่ม

5.1.3 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

พบว่า ที่ปริมาณแกรไฟต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่ไม่เติมแกรไฟต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE สอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากกฎการผสม

5.1.4 ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

จากการทดสอบค่าความต้านทานการสึกหรอ พบว่าเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบจะมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของ UHMWPE ที่ยึดเหนี่ยวแกรไฟต์ไว้ลดลง ทำให้อนุภาคแกรไฟต์หลุดร่อนได้ง่าย

5.1.5 ความต้านทานต่อแรงกดอัดของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแกรไฟต์ ปริมาณร้อยละ 5 ถึง 40 โดยน้ำหนัก แนวโน้มของความต้านทานต่อแรงกดอัดของวัสดุเชิงประกอบจะมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่ไม่เติมอนุภาคแกรไฟต์ เนื่องจากแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำจึงไม่สามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่มีการเติมแกรไฟต์ต่ำกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

5.2.2 ในการเติมแกรไฟต์เพียงอย่างเดียวสามารถปรับปรุงได้เพียงการลดแรงเสียดทาน ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นจึงควรเติมสารเสริมแรงชนิดอื่นร่วมด้วย หรือเติมสารชนิดอื่นที่มีสมบัติครบ เช่น เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ อะลูมินา (Al_2O_3) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ไททานียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- นิติกร นรภัยพิพากษา (2554). ผลกระทบของอุณหภูมิผิวสัมผัสที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของ อีพอกซีเรซินเติมซิลิกาบด. **โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.**: 19-30.
- นริศรา มหาชนินวงศ์. กาออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีสำหรับใช้ร่วมกับ เครื่องขัดชิ้นงาน. **โครงการวิจัยทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.**: 32-34.
- นิลุบล เพื่อกบัวขาว. สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่าน กระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง. **โครงการปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.**: 54-60.
- ปิติพงษ์ พรหมรักษ์, ทิพวรรณ ปะละไทย และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ (2012). อิทธิพลของเสก ะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่มีผลต่อสมบัติทางไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิ อีเทอร์อีโตน. **วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.**: 1-113.
- วิลเลียม เอฟ สมิท (2547). **วัสดุวิศวกรรม**, สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ. หน้า 273.
- อรอุษา สรวารี (2546). **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. หน้า 8.**
- Arabi, H., Mirzadeh, H., Ahmadi, S.H., Amanpour, S., Rabbani, S., and Abdi, A. (2004). In vitro and in vivo hemocompatibility evaluation of graphite coated polyester vascular grafts. **Springer, Berlin**, p. 691-8.
- Bader, M. G (2000). **The Composites Market in Comprehensive Composite Materials**, Amsterdam: Elsevier, p. 1-13.
- Bahadur, S. (2000). **The development of transfer layers and their role in polymer tribology**, *Wear*, 245:92.

- Baradeswaran, A. (2014). Effect of graphite on tribological and mechanical properties of AA7075 composites, **Tribology Transaction**, 58(1): 1-6.
- Ben, D.B., Kharrat, M., Dammak, M., and Monteil, G. (2012). **Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder**. *Materials and design*, 34:782-787.
- Bharat, B. (1999). **Principles and applications of tribology**, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., New York, p. 577–578.
- Blunn, G. (2002). Ultra high molecular-weight polyethylene (UHMWPE) in total knee replacement: fabrication, sterilization and wear, **The journal of bone & joint surgery**. 84:946-9.
- Boon, P.C. (2015) Hazizan Md A. & Ramdziah bt md N. **Dry Sliding Wear Behaviour of Talc-Reinforced UHMWPE Composite for Implant Application**: *Sains Malaysiana* 44: 819–825.
- Brian, J., and Sujeet, K. (2001). Tribological applications of polymers and their composites : past, present and future Prospects ; 2nd ed., **Tribology of Polymeric Nanocomposites**, p. 1–14.
- Bricoe, B.J. (1993). The Tribology of composites materials : **A Preface, Advance in Composites Tribology** (ed. K. Friedrich), Elsevier, Amsterdam, p. 3-15.
- Bryan, H. (1999). **Engineering Composite Materials**. The Institute of Material, London, p. 5-31.
- Brydson, J.A. (2000). *Plastics Materials*, 7th ed. **Butter Heinemann, Oxford**, p. 247 - 509.
- Callister, D. (2007). **Material Science and Engineering : An introduction**, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, p. 577–578.
- Chawla, K. K (2001). **Fibrous reinforcements for composites: overview” in encyclopedia of materials : science and technology**, Amterdum : Elsevier, p. 3160-3167.
- Debrupa, L., Francois, H., Mikael, T. Andriy, D., Cheng, Z., and Arvind A. (2014). **Nanotribological behavior of grapheme nanoplatelet reinforced Ultra high molecular weight polyethylene composites**: p.165-169.
- Donnet, C., Le Mogne, Th., and Martin, J.M. (1993). Superflow friction of oxygen-free MoS₂ coatings in ultrahigh vacuum, **Surface Coating Technology**, 62:406-411.

- Erdemir, A. (2001). **Modern Tribology Handbook**, CRC Press, Oxford, p 2.
- Farrar, D.F., and Brain, A.A. (1997). **The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements**. *Biomaterials*, 18:1677–85.
- Fouad et.al. (2011). High density polyethylene/graphite nano-composites for total hip joint replacements: Processing and in vitro characterization. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, 4:1376-1383.
- Friedrich, K., Lu, Z. and Hager, A. M. (1995).Recent advances in polymer composites, **Wear**, 190(2):139–144.
- George, L., (1982). **Handbook of composite**, Springer, Boston, MA.
- Gwidon, S., and Andrew, B. (2001). **Solid lubrication and surface treatments ; Engineering tribology**, 2nd ed., Butterworth Heinemann, Oxford, p. 411–420.
- Gwidon, W.H (2006). **Wear – materials, Mechanism and Practice**, 1st ed., John Wiley & Sons Ltd, p. 270-290.
- Harsha, A.P., and Tewari, U.S. (2002). Triboperformance of polyetheretherketone composites, **Polymer Testing**, 21:679-709.
- Howling, I.G., Barnett, I.P., Tipper, L.J., Stone, H.M., Fisher, J., Ingham, E. (2001). **Quantitative Characterization of Polyethylene Debris Isolated from Periprosthetic Tissue in Early Failure Knee Implants and Early and Late Failure Charnley Hip Implants**. John Wiley & Sons, Inc. *J Biomed Mater Res (Appl Biomater)*, 58:415–420
- Kroto, H.W. (1992), Introduction. **Carbon**, 30(8):1139-1141.
- Kurtz, S.M., Muratoglu, O.K., Evans, M., and Edidin, A.A. (1999). Advances in the processing, **sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty**. *Biomaterials*, 20:1659–88.
- Liu, K., Li, Y., Xu, F., Zuo, Y., Zhang, L., Wang, H., Liao, J. (2009). Graphite/poly (vinyl alcohol) hydrogel composite as porous ringy skirt for artificial cornea, **Materials Science and Engineering C**, 29:261-266
- Myshkin, N.K., and Kovalev, A.V. (2009). **Adhesion and Friction of Polymers, in Polymer Tribology**, editors: **Sujeet K Sinha and Brian J Briscoe**, Imperial College Press, p. 3–32.

- Panin, S.V., Kornienko, L.A., Vannasri, S., Ivanova, L.R., and Shil'ko, S.V. (2010). **Comparative Analysis of the Influence of Nano and Microfillers of Oxidized Al on the Frictional–Mechanical Characteristics of UHMWPE.** *Journal of Friction and Wear*, 31:492-499.
- Pritchett, J.W. (2006). Heat generated by knee prostheses. *Clin Orthop Relat Res*, 442:195-198.
- Stachowiak, G.W., and Batchelor, A.W. (2001). **Engineering Tribology**, 2nd ed., Butterworth Heinemann, U.S.A., p. 483-484, 537-538, 542-544, 553-554.
- Steven, M. K. (2009). **UHMWPE Biomaterials Handbook.** China: Elsevier Inc, p. 1-3.
- Takadoun, J. (2008). **Materials and Surface Engineering in Tribology**, CPI Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, Great Britain, p. 82-84.
- Tanaka, K., and Miyat, T. (1977). **Studies on the Friction and Transfer of Semi–Crystalline Polymers**, *Wear*, 41:383–398.
- Tanaka, K., Uchiyama, Y., and Toyooka, S. (1973). **Wear**, 23:153.
- Wang, Q., Xue, Q., Shen, W. (1997). The friction and wear properties of nanometre SiO₂ filled polyetheretherketone, **Tribology International**, 30:1997.
- Wood, A.A.R. (1991). Carbon and Graphite. **In: Concise encyclopedia of advanced ceramic materials.** Ed RJ Brook. Oxford. Pergamon, p. 57-62.
- Yu, L., and Bahadur, S. (1998). *Wear*, 214:245.
- Zoo, Y.S., An, J.W., Lim, D.P., and Lim, D.S. (2003). **Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE.** *Tribology Letters*, 16:305-309.



ภาคผนวก ก

ลักษณะทางกายภาพของสารเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ข

1. ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์
2. ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์
3. กฎของการผสม (Rule of Mixtures) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

การคำนวณหาการสึกหรอหาได้จาก

$$\begin{aligned}\text{มวลที่สูญเสียไปต่อพื้นที่(กรัมต่อตารางเมตร)} &= \frac{\text{มวลก่อนการทดสอบ} - \text{มวลหลังการทดสอบ}}{\text{พื้นที่ใช้งานจริง (กว้าง x ยาว)}} \\ &= \frac{13.1724 - 13.1480}{0.03 \times 0.03} \\ &= 27.11 \text{ กรัมต่อตารางเมตร}\end{aligned}$$



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบแสดงสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ
UHMWPE/แกรไฟต์ โดยวัดมวลที่สูญเสียไปต่อพื้นที่

%แกรไฟต์	มวลที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ (กรัมต่อตารางเมตร)				
	5 นาที				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
0	27.11	25.89	28.89	27.30	1.51
5	21.00	20.89	22.22	21.37	0.74
10	29.67	31.33	35.56	32.19	3.04
20	37.56	40.33	37.56	38.48	1.60
30	85.67	68.89	50.00	68.19	17.84
	10 นาที				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
	0	39.67	32.22	38.78	36.89
5	34.78	33.00	40.67	36.15	4.01
10	37.33	46.67	44.56	42.85	4.89
20	47.33	64.11	59.00	56.81	8.60
30	138.78	105.44	68.33	104.19	35.24

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบแสดงสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ
UHMWPE/แกรไฟต์ โดยวัดมวลที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ (ต่อ)

%แกรไฟต์	มวลที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ (กรัมต่อตารางเมตร)				
	15 นาที				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
0	46.56	36.22	41.78	41.52	5.17
5	43.56	38.78	54.22	45.52	7.91
10	46.44	57.67	53.56	52.56	5.68
20	60.56	74.33	69.89	68.26	7.03
30	170.44	130.33	83.78	128.19	43.37
	20 นาที				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
	0	53.00	44.33	49.78	49.04
5	48.11	42.22	62.78	51.04	10.59
10	56.00	65.11	63.22	61.44	4.81
20	73.56	79.67	79.33	77.52	3.44
30	193.56	150.56	99.78	147.96	46.94

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบแสดงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ
UHMWPE/แกรไฟต์

%แกรไฟต์	ลำดับ	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พลังงานการกระแทก (กิโลจูลต่อตารางเมตร)
0	1	10.84	3.54	44.97*
	2	11.36	3.54	72.00
	3	11.30	3.53	71.98
	4	11.34	3.95	63.55
	5	11.00	4.03	62.84
	ค่าเฉลี่ย			67.59
5	1	10.94	4.01	90.50
	2	11.14	3.89	86.23
	3	10.82	3.95	79.29
	4	10.56	4.32	68.10
	5	11.24	4.44	68.41
	ค่าเฉลี่ย			78.51
10	1	10.98	3.69	19.69*
	2	10.64	3.87	58.99
	3	10.92	3.82	59.41
	4	10.36	4.02	54.65
	5	10.38	4.09	58.87
	ค่าเฉลี่ย			57.98

หมายเหตุ * หมายถึง ข้อมูลที่ไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบแสดงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์ (ต่อ)

%แกรไฟต์	ลำดับ	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พลังงานการกระแทก (กิโลจูลต่อตารางเมตร)
20	1	11.06	4.24	21.03
	2	10.8	3.83	17.53
	3	10.98	3.84	17.90
	4	11.10	4.22	21.60
	5	9.90	3.95	13.49*
	ค่าเฉลี่ย			19.52
30	1	10.98	4.44	3.34
	2	10.80	4.17	5.29
	3	11.14	4.40	6.91
	4	10.68	4.02	5.94
	5	10.88	4.05	4.18
	ค่าเฉลี่ย			5.13
40	1	10.64	4.17	4.03
	2	10.74	4.37	5.66
	3	10.62	4.23	4.72
	4	10.78	4.50	5.38
	5	10.74	4.50	8.64*
	ค่าเฉลี่ย			4.95

หมายเหตุ * หมายถึง ข้อมูลที่ไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล

การคำนวณหากฎของการผสม (Rule of Mixtures)

ได้จากสมการ

$$X_c = X_f V_f + X_m (1 - V_f) \quad ; X_c \text{ คือ คุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ}$$

X_f คือ คุณสมบัติของสารตัวเติม

X_m คือ คุณสมบัติของเนื้อพื้น

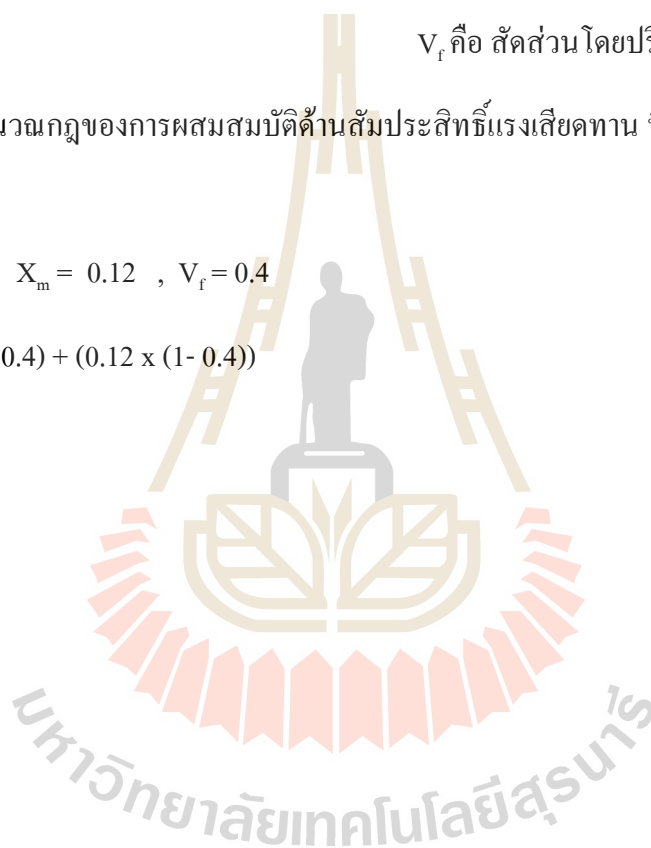
V_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติม

ตัวอย่างการคำนวณกฎของการผสมสมบัติด้านสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่แกรไฟต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

$$X_f = 0.285 \quad , \quad X_m = 0.12 \quad , \quad V_f = 0.4$$

$$X_c = (0.285 \times 0.4) + (0.12 \times (1 - 0.4))$$

$$= 0.19$$



ตารางที่ ข.3 กฎของการผสม (Rule of Mixtures) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/แกรไฟต์

สมบัติ	UHMWPE	แกรไฟต์	กฎของการผสม (Rule of Mixtures)				
			%แกรไฟต์				
			5	10	20	30	40
ความแข็ง (Shore D)	68.00	1.15	64.66	61.32	54.63	47.95	41.26
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.12	0.28	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19
ความต้านทานต่อแรงอัด (เมกะปาสคาล)	536.07	97.00	514.12	492.16	448.26	404.35	360.44
ความต้านทานต่อแรงกระแทก (กิโลจูลต่อตารางเมตร)	71.40	58.80	70.77	70.14	68.88	67.62	66.36





ภาคผนวก ค

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1894-01

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D256

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Designation: D 1894 – 01

Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting¹

This standard is issued under the fixed designation D 1894; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 This test method covers determination of the coefficients of starting and sliding friction of plastic film and sheeting when sliding over itself or other substances at specified test conditions. The procedure permits the use of a stationary sled with a moving plane, or a moving sled with a stationary plane. Both procedures yield the same coefficients of friction values for a given sample.

NOTE 1—For the frictional characteristics of plastic films partially wrapped around a cylinder, or capstan, see Test Method G 143 under the jurisdiction of ASTM Subcommittee G02.50.

1.2 Test data obtained by this test method is relevant and appropriate for use in engineering design.

1.2.1 As an option to this test, coefficient of friction may be run at temperatures other than 23°C by heating only the plane while the sled is at ambient temperature.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For a specific precautionary statement, see Note 7.*

NOTE 2—This test method and ISO/DIS 8295–1994 are not technically equivalent.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing²

D 883 Terminology Relating to Plastics²

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved March 10, 2001. Published June 2001. Originally published as D 1894 – 61 T. Last previous edition D 1894 – 00.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

D 3574 Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams³

D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials³

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁴

G 143 Test Method for Measurement of Web/Roller Friction Characteristics⁵

2.2 ISO/DIS Standard:

ISO/DIS 8295–1994⁶

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *friction, n*—resistance to relative motion between two bodies in contact.

3.1.1.1 *coefficient of friction*—the ratio of the force required to move one surface over another to the total force applied normal to those surfaces.

3.1.1.2 *kinetic coefficient of friction*—the ratio of the force required to move one surface over another to the total force applied normal to those surfaces, once that motion is in progress.

3.1.1.3 *static coefficient of friction*—the ratio of the force required to move one surface over another to the total force applied normal to those surfaces, at the instant motion starts.

D 996, D10

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *slip—in plastic films*, lubricity of two surfaces sliding in contact with each other.

4. Significance and Use

4.1 Measurements of frictional properties may be made on a film or sheeting specimen when sliding over itself or over another substance. The coefficients of friction are related to the

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

⁶ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

slip properties of plastic films that are of wide interest in packaging applications. These methods yield empirical data for control purposes in film production. Correlation of test results with actual performance can usually be established.

4.1.1 This test method includes testing at temperatures other than 23°C by heating only the plane while the sled is at ambient temperature.

4.2 Slip properties are generated by additives in some plastic films, for example, polyethylene. These additives have varying degrees of compatibility with the film matrix. Some of them bloom, or exude to the surface, lubricating it and making it more slippery. Because this blooming action may not always be uniform on all areas of the film surface, values from these tests may be limited in reproducibility.

4.3 The frictional properties of plastic film and sheeting may be dependent on the uniformity of the rate of motion between the two surfaces. Care should be exercised to ensure that the rate of motion of the equipment is as carefully controlled as possible.

4.4 Data obtained by these procedures may be extremely sensitive to the age of the film or sheet and the condition of the surfaces. The blooming action of many slip additives is time-dependent. For this reason, it is sometimes meaningless to compare slip and friction properties of films or sheets produced at different times, unless it is desired to study this effect.

4.5 Frictional and slip properties of plastic film and sheeting are based on measurements of surface phenomena. Where products have been made by different processes, or even on different machines by the same process, their surfaces may be dependent on the equipment or its running conditions. Such factors must be weighed in evaluating data from these methods.

4.6 The measurement of the static coefficient of friction is highly dependent on the rate of loading and on the amount of blocking occurring between the loaded sled and the platform due to variation in time before motion is initiated.

4.7 Care should be exercised to make certain that the speed of response of the recorder, either electronic or mechanical, is not exceeded.

4.8 For many materials, there may be a specification that requires the use of this test method, but with some procedural modifications that take precedence when adhering to the specification. Therefore, it is advisable to refer to that material specification before using this test method. Table 1 of Classification System D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

5. Apparatus

5.1 *Sled*—A metal block 63.5 mm (2½ in.) square by approximately 6 mm (0.25 in.) thick with a suitable eye screw fastened in one end. When a flexible film (see 6.2) is to be attached, the block shall be wrapped with a sponge rubber 63.5 mm (2½ in.) in width and 3.2 mm (¼ in.) in thickness. The foam shall be flexible, smooth-faced, and have a nominal density of 0.25 g/cm³ when measured in accordance with the Density Test of Methods D 3574. The pressure required to compress the foam 25 % shall be 85 ± 15 kPa (12.5 ± 2.5 psi).

The foam shall also have a high hysteresis when deformed.⁷ The rubber shall be wrapped snugly around the sled and held in place against the bottom and top of the sled with double-faced masking tape. When a sheet (see 6.3) is to be attached, double-faced tape shall be used to attach the specimen. The total weight of the (wrapped) sled and specimen shall be 200 ± 5 g.

NOTE 3—Round-robin testing⁸ has shown that the physical properties of the backing can drastically affect both the coefficient of friction and stick-slip behavior of the film.

5.2 *Plane*—A polished plastic, wood, or metal sheet,⁹ approximately 150 by 300 by 1 mm (6 by 12 by 0.040 in.). A smooth, flat piece of glass may cover the upper surface of the plane. This provides a smooth support for the specimen.

5.2.1 When it is desirable to run tests at temperatures above 23°C, a heating unit shall be provided that is capable of maintaining the temperature of the plane within ±2°C of the desired temperature. The temperature should be maintained within ±2°C of the desired temperature over the entire traverse of the sled (that is, over the full surface of the plane).

NOTE 4—If the equipment has a plane with a heater, a cover may be used to help maintain the temperature of the plane within ±2°C of the desired temperature.

5.3 *Scissors or Cutter*, suitable for cutting specimens to the desired dimensions.

5.4 *Adhesive Tape*, cellophane or pressure-sensitive.

5.5 *Adhesive Tape*, double-faced.

5.6 *Nylon Monofilament*, having a 0.33 ± 0.05-mm (0.013 ± 0.002-in.) diameter and capable of supporting a 3.6-kg (8-lb) load.

5.7 *Beaded Chain*, flexible metal cable, or equivalent, having a spring rate no less than 600 lbs per inch of stretch per inch of length (40 lbs/in. (7000 N/m) for a 15-in. chain) in the range of 50 to 150 g of tension (such as beaded lampswitch pull chain).

5.8 *Low-Friction Pulleys*—A phenolic type pulley mounted in hardened steel cone bearings on a metal fork. A ball-bearing type pulley may also be used.

5.9 *Force-Measuring Device*, capable of measuring the frictional force to ±5 % of its value. A spring gage¹⁰ (Note 3), universal testing machine, or strain gage may be used.

NOTE 5—The capacity of the spring gage (Fig. 1(a and b)) needed will depend upon the range of values to be measured. For most plastic, a 500-g capacity gage with 10-g or smaller subdivisions will be satisfactory. This spring will measure coefficients of friction up to and including 2.5.

5.10 *Supporting Base*—A smooth wood or metal base approximately 200 by 380 mm (8 by 15 in.) is necessary to support the plane. The supporting base may be a simple rectangular box. If a universal testing machine is used to pull

⁷ Sheet stock, available from Greene Rubber Co., 59 Broadway, North Haven, CT 06473, has been found satisfactory.

⁸ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1065.

⁹ Acrylic or rigid poly(vinyl chloride) sheeting has been found satisfactory for this purpose.

¹⁰ Model L-500, available from Hunter Spring Co., Lansdale, PA, has been found satisfactory for this purpose.

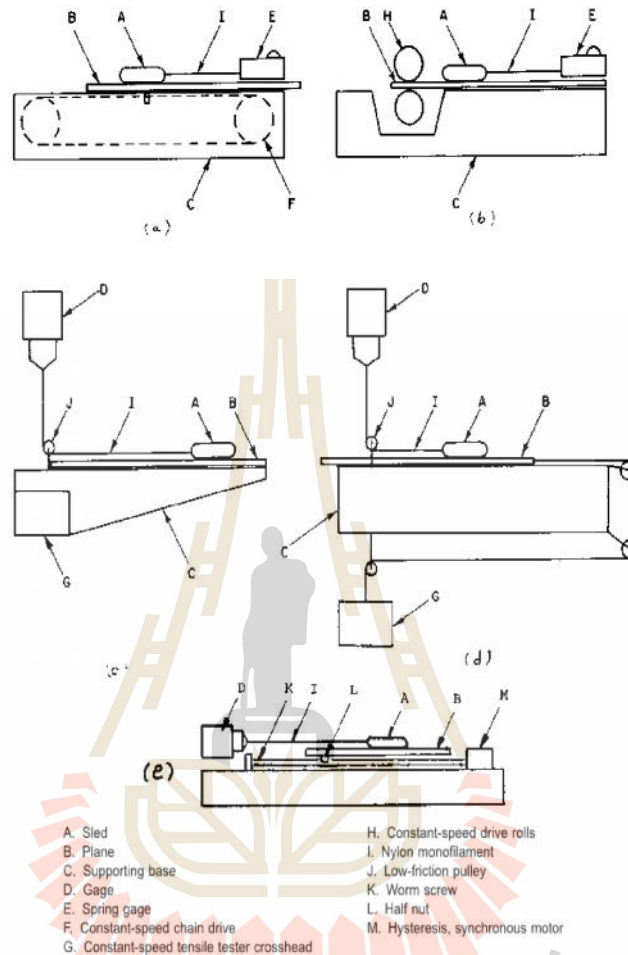


FIG. 1 Five Methods of Assembly of Apparatus for Determination of Coefficients of Friction of Plastic Film

a moving plane, a supporting base of sufficient structural strength and rigidity to maintain a firm position between the moving crosshead and the force-measuring device will be necessary.

5.11 *Driving or Pulling Device for Sled or Plane*—The plane may be pulled by a driven pair of rubber-coated rolls not less than 200 mm (8 in.) long, capable of maintaining a uniform surface speed 150 ± 30 mm/min (0.5 ± 0.1 ft/min) (Fig. 1(b)), by the crosshead of a universal testing machine (Fig. 1(d)) (Note 7), or a worm drive driven with a synchronous motor (Fig. 1(e)). A constant-speed chain drive system has also been found satisfactory (Fig. 1(a)). A power-operated source may be used for pulling the sled over the horizontally-mounted specimen at a uniform speed of 150 ± 30 mm/min (0.5 ± 0.1 ft/min). A universal testing machine equipped with a load cell in its upper crosshead and a constant rate-of-motion lower crosshead has been found satisfactory (see Fig. 1(c)).

NOTE 6—Where the moving crosshead of a universal testing machine is

used to pull the moving plane through a pulley system (Fig. 1(d)), the strain gage load cell, or other load-sensing instrument in the testing machine, acts as the force-measuring device.

6. Test Specimens

6.1 The test specimen that is to be attached to the plane shall be cut approximately 250 mm (10 in.) in the machine direction and 130 mm (5 in.) in the transverse direction when such extrusion directions exist and are identifiable.

6.2 A film specimen that is to be attached to the sled shall be cut approximately 120 mm (4 1/2 in.) square. Film is defined as sheeting having a nominal thickness of not greater than 0.254 mm as indicated in Terminology D 883.

6.3 A sheeting specimen (greater than 0.254 mm nominal thickness) or another substance that is to be attached to the sled shall be cut 63.5 mm (2 1/2 in.) square.

6.4 Sheetting specimens shall be flat and free of warp. Edges of specimens shall be rounded smooth.

6.5 Five specimens shall be tested for each sample unless otherwise specified.

NOTE 7—Plastic films and sheeting may exhibit different frictional properties in their respective principal directions due to anisotropy or extrusion effects. Specimens may be tested with their long dimension in either the machine or transverse direction of the sample, but it is more common practice to test the specimen as described in 6.1 with its long dimension parallel to the machine direction.

NOTE 8—**Caution:** Extreme care must be taken in handling the specimens. The test surface must be kept free of all dust, lint, finger prints, or any foreign matter that might change the surface characteristics of the specimens.

7. Preparation of Apparatus

7.1 Fig. 1 shows five ways in which the apparatus may be assembled. The support bases for all apparatus assemblies shall be level.

7.2 If the apparatus of Fig. 1(a) or (b) is used, calibrate the scale of the spring gage as follows:

7.2.1 Mount the low-friction pulley in front of the spring gage.

7.2.2 Fasten one end of the nylon filament to the spring gage, bring the filament over the pulley, and suspend a known weight on the lower end of the filament to act downward.

NOTE 9—The reading on the scale shall correspond to the known weight within $\pm 5\%$. The weight used for this calibration shall be between 50 and 75 % of the scale range on the gage.

7.3 The drive speed for the apparatus of Fig. 1(a and b) shall be adjusted to 150 ± 30 mm/min (6.0 ± 1.2 in./min). This speed may be checked by marking off a 150-mm (6.0 in.) section beside the plane and determining the time required for the plane to travel 150 mm.

7.4 If the apparatus of Fig. 1(c and d) employing a universal testing machine is used, select the proper speed setting for a crosshead motion of 150 ± 30 mm/min (6.0 ± 1.2 in./min). A similar speed for the load-displacement recorder is desirable. However, the speed of the recorder can be adjusted to give the desired accuracy in reading the pen trace.

7.5 When the apparatus of Fig. 1(c) (moving sled-stationary plane) is used, wipe the support base free of foreign matter and lay down two strips of double-faced adhesive tape along the length of the supporting base so that they are approximately 100 mm (4 in.) between centers.

7.6 Fix the plane in position on the tape strips and firmly press in place.

8. Conditioning

8.1 **Conditioning**—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618, for those tests where conditioning is required. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) and $\pm 2\%$ relative humidity.

8.2 **Test Conditions**—Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified in the test methods or in this test method. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) and $\pm 2\%$ relative humidity. In specific cases, such as control testing, where the

conditioning requirements cannot be met and the data still may be of direct assistance to the operation, other conditioning procedures may be used and recorded in the report. Frictional properties should be measured only after sufficient time has been allowed for the specimens to reach essential equilibrium with the ambient atmosphere.

9. Procedure

9.1 Tape the 250 by 130-mm (10 by 5-in.) film or sheet specimen to the plane with the machine direction of the specimen in the 250-mm direction. Smooth the film specimen to eliminate wrinkles if necessary, taking care not to alter the specimen surface through finger oils, etc.

NOTE 10—For some samples it has been found necessary to tape only the leading edge of the specimen to the plane. In some cases the specimen has been pulled through the nip rolls apparatus of Fig. 1(b) without the plane. However, should any dispute arise, taping of all four edges will be the referee method.

NOTE 11—For the sake of uniformity and later comparison when testing a specimen sliding over itself, the specimens shall be mounted so that the same side of the specimen shall be used as the contact surface for both the moving and stationary specimens.

NOTE 12—Coefficient of friction measurements may be made on a film or sheeting specimen when sliding over itself or over other substance surfaces wherein the movement is made in the transverse direction of the specimen. However, the methods described here will be confined to movements in the machine direction of the specimens.

9.2 For film specimens, tape the edges of the 120-mm ($4\frac{1}{2}$ -in.) square film specimen to the back of the sled, using adhesive tape and pulling the specimen tight to eliminate wrinkles without stretching it. For sheet specimens, tape the 63.5-mm ($2\frac{1}{2}$ -in.) square sheet specimen or second substrate to the sled face with double faced tape. Keep the machine direction of the specimen parallel to the length of the sled (where such a direction exists and is identifiable).

9.3 Attach the specimen-covered sled through its eye screw to the nylon filament. If a universal testing machine is used (Fig. 1(c and d)), pass the filament through pulley(s) and upward to the bottom of the load-sensing device and attach securely. If a spring gage is used (Fig. 1(a and b)), securely attach the filament to it. The nylon filament shall be of sufficient length to allow maximum sled or plane travel. With some slack in the nylon filament, lightly place the sled in position on the horizontal plane (Note 12). The positioning of the sled shall be such that the length of the sled, the adjacent length of nylon filament, and the long dimension (machine direction) of the plane-mounted specimen are parallel. For material combinations found to have an excessive stick-slip tendency, wherein the kinetic portion of the test degenerates into a series of static tests interspersed by rapid jumps of the sled, it is advisable but not mandatory to substitute the metal tow line (5.7) for the nylon tow line to make kinetic measurements. This will necessitate making separate measurements for static and kinetic friction coefficients. Each laboratory will determine what level of stick-slip is considered excessive for its materials. In case of disagreement between testing laboratories, the nylon tow line remains the referee procedure.

NOTE 13—The purpose of using a nylon filament for the static friction and sometimes a metallic tow line for kinetic friction is to avoid a faster

force buildup in the static measurement than the recorder can respond to, and to allow time for the recorder to separate the buildup of static friction force in the nylon filament from the mass acceleration force as the sled breaks loose. The opposite effect is needed from the metallic tow line during kinetic friction measurement to prevent the occurrence of repeated stick-slips instead of steady motion.

NOTE 14—The sled must be placed very lightly and gently on the plane to prevent any unnatural bond from developing. A high starting coefficient of friction may be caused by undue pressure on the sled when mounting it onto the plane.

9.4 Start the driving mechanism (which has been adjusted previously to provide a speed of 150 ± 30 mm/min (6.0 ± 1.2 in./min)). As a result of the frictional force between the contacting surfaces, no immediate relative motion may take place between the sled and the moving plane until the pull on the sled is equal to, or exceeds, the static frictional force acting at the contact surfaces. Record this initial, maximum reading as the force component of the static coefficient of friction.

9.4.1 If conducting the test at temperatures above 23°C (the temperature of the plane), ensure that sufficient time for the interface to reach the temperature of the plane has elapsed before starting the driving mechanism.

9.5 Record the visual average reading during a run of approximately 130 mm (5 in.) while the surfaces are sliding uniformly over one another. This is equivalent to the kinetic force required to sustain motion between the surfaces and normally is lower than the static force required to initiate motion. After the sled has traveled over 130 mm (5 in.) stop the apparatus and return to the starting position.

9.6 If a strain gage and load-displacement recorder are used, either draw the best straight line midway between the maximum points and minimum points shown on the chart while the sled is in motion, or obtain the average load by integration of the recorder trace. The mean load is the kinetic friction force required to sustain motion on the sled.

9.7 Remove the film or sheeting specimen from the sled and the horizontal plane. The apparatus is now ready for the next set of specimens. A new set of specimens shall be used for each run. No specimen surface(s) shall be tested more than once unless such tests constitute one of the variables to be studied.

NOTE 15—The maximum point at which initial motion takes place between the sled and the horizontal plane should be carefully examined with reference to the rate of loading and the speed of response of the sensing device. Failure to consider this factor can lead to meaningless results for the value of the static coefficient of friction.

10. Calculation

10.1 Calculate the static coefficient of friction μ_s , as follows:

$$\mu_s = A_s/B \tag{1}$$

where:

A_s = initial motion scale reading, g, and
 B = sled weight, g.

10.2 Calculate the kinetic coefficient of friction, μ_k , as follows:

$$\mu_k = A_k/B \tag{2}$$

where:

A_k = average scale reading obtained during uniform sliding of the film surfaces, g, and
 B = sled weight, g.

10.3 Calculate the arithmetic mean of each set of observations and report these values to three significant figures.

10.4 Calculate the standard deviation (estimated to be $\pm 15\%$ of the value of the coefficient of friction) as follows, and report it to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n - 1)} \tag{3}$$

where:

s = sample standard deviation,
 X = value of a single observation,
 n = number of observations, and
 \bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

11. Report

11.1 Report the following information:

11.1.1 Complete description of the plastic sample, including manufacturer's code designation, thickness, method of production, surfaces tested, principal directions tested, and approximate age of sample after manufacture,

11.1.2 Description of second substance if used,

11.1.3 Apparatus used,

11.1.4 Average static and kinetic coefficients of friction, together with the standard deviation,

11.1.5 Number of specimens tested for each coefficient of friction, and

11.1.6 The temperature of the plane at which the test was conducted.

12. Precision and Bias ¹¹

12.1 Precision—Table 1 is based on a round robin con-

¹¹ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1131.

TABLE 1 Precision Data at 23°C

Material	Static Coefficient of Friction at 23°C				
	Avg	S_s^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D
Polyethylene, (M3)	0.18	0.018	0.066	0.050	0.186
Polyethylene, (M4)	0.19	0.027	0.135	0.077	0.383
Polyester, (M1)	0.20	0.009	0.037	0.025	0.104
Polyester, (M2)	0.70	0.066	0.094	0.186	0.265
Material	Kinetic Coefficient of Friction at 23°C				
	Avg	S_s^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D
Polyethylene, (M3)	0.19	0.007	0.046	0.019	0.131
Polyethylene, (M4)	0.12	0.007	0.025	0.021	0.071
Polyester, (M1)	0.17	0.005	0.021	0.015	0.059
Polyester, (M2)	0.66	0.054	0.123	0.154	0.349

^A S_s = within-laboratory standard deviation of the average,
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average,
^C $I_r = 2.83 S_s$, and
^D $I_R = 2.83 S_R$.

ducted in 1986 in accordance with Practice E 691, involving four materials tested by seven laboratories. For each material, all of the samples were prepared at one source. Each laboratory obtained seven test results for each material. Each test result was one determination per each material. S_p and S_R are based on five determinations for five materials in accordance with the test method. The temperature of the plane was 23°C for all of the tests.

NOTE 16—Caution: The following explanations of I_r and I_R (12.3-12.3.3) are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Table 1 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 12.3-12.3.3 would then be valid for such data.

12.2 Table 2 presents repeatability data at 38°C for one

TABLE 2 Repeatability Data at 38°C

Static Coefficient of Friction at 38°C			
Material	Average	S_p^A	I_r^B
Polyethylene	0.330	0.023	0.064
Kinetic Coefficient of Friction at 38°C			
Material	Average	S_p^A	I_r^B
Polyethylene	0.246	0.014	0.041

^A S_p = within-laboratory standard deviation of the average.

^B I_r = 2.83 S_p .

material tested by one laboratory. The average is based upon 18 specimens tested by one operator using one instrument in accordance with this test method.

12.3 *Concept of I_r and I_R* —If S_p and S_R were calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from the number of determinations stated in 12.1.

12.3.1 *Repeatability, I_r* (Comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day)—The samples represented by the two results should be regarded as not having equivalent friction if they differ by more than the I_r value for that material and condition.

12.3.2 *Reproducibility, I_R* (Comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days)—The samples represented by the two test results should be regarded as not having equivalent friction if they differ by more than the I_R value for that material and condition.

12.3.3 Any judgment in accordance with 12.3.1 and 12.3.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

12.4 *Bias*—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

13. Keywords

13.1 friction; kinetic coefficient of friction; plastic film; plastic sheeting; slip; static coefficient of friction

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to this test method. For the convenience of the user, Committee D20 has highlighted those changes that may impact the use of this test method. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

D 1894-99:

(1) Added Note 2.

D 1894-00:

(1) Revised Section 3, Terminology.

D 1894-01:

(1) Revised 1.2, 4.1, 5.2, and 9.4 to include testing at temperatures above 23°C.

(2) Added Table 2.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 256; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of the resistance of plastics to “standardized” (see Note 1) pendulum-type hammers, mounted in “standardized” machines, in breaking standard specimens with one pendulum swing. The standard tests for these test methods require specimens made with a milled notch (see Note 2). In Test Methods A, C, and D, the notch produces a stress concentration that increases the probability of a brittle, rather than a ductile, fracture. In Test Method E, the impact resistance is obtained breakage by flexural shock as indicated by the energy extracted from by reversing the notched specimen 180° in the clamping vise. The results of all test methods are reported in terms of energy absorbed per unit of specimen width or per unit of cross-sectional area under the notch. (See Note 3.)

NOTE 1—The machines with their pendulum-type hammers have been “standardized” in that they must comply with certain requirements, including a fixed height of hammer fall that results in a substantially fixed velocity of the hammer at the moment of impact. However, hammers of different initial energies (produced by varying their effective weights) are recommended for use with specimens of different impact resistance. Moreover, manufacturers of the equipment are permitted to use different lengths and constructions of pendulums with possible differences in pendulum rigidities resulting. (See Section 5.) Be aware that other differences in machine design may exist. The specimens are “standardized” in that they are required to have one fixed length, one fixed depth, and one particular design of milled notch. The width of the specimens is permitted to vary between limits.

NOTE 2—The notch in the Izod specimen serves to concentrate the stress, minimize plastic deformation, and direct the fracture to the part of the specimen behind the notch. Scatter in energy-to-break is thus reduced. However, because of differences in the elastic and viscoelastic properties of plastics, response to a given notch varies among materials. A measure of a plastic’s “notch sensitivity” may be obtained with Test Method D by comparing the energies to break specimens having different radii at the base of the notch.

NOTE 3—Caution must be exercised in interpreting the results of these standard test methods. The following testing parameters may affect test results significantly:

Method of fabrication, including but not limited to processing technology, molding conditions, mold design, and thermal treatments;

Method of notching;
Speed of notching tool;
Design of notching apparatus;
Quality of the notch;
Time between notching and test;
Test specimen thickness,
Test specimen width under notch, and
Environmental conditioning.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 4—These test methods resemble ISO 180:1993 in regard to title only. The contents are significantly different.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing²
- D 883 Terminology Relating to Plastics²
- D 3641 Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastics Molding Extrusion Materials³
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials³
- D 4066 Specification for Nylon Injection and Extrusion Materials³
- D 4812 Test Methods for Unnotched Cantilever Beam Impact Strength of Plastics⁴
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods⁵

2.2 ISO Standard:

- ISO 180:1993 Plastics—Determination of Izod Impact

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved April 10, 1997. Published May 1998. Originally published as D 256 – 26T. Last previous edition D 256 – 93a.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

Strength of Rigid Materials⁶

3. Terminology

3.1 *Definitions*— For definitions related to plastics see Terminology D 883.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *cantilever*—a projecting beam clamped at only one end.

3.2.2 *notch sensitivity*—a measure of the variation of impact energy as a function of notch radius.

4. Types of Tests

4.1 Four similar methods are presented in these test methods. (See Note 5.) All test methods use the same testing machine and specimen dimensions. There is no known means for correlating the results from the different test methods.

NOTE 5—Test Method B for Charpy has been removed and is being revised under a new standard.

4.1.1 In Test Method A, the specimen is held as a vertical cantilever beam and is broken by a single swing of the pendulum. The line of initial contact is at a fixed distance from the specimen clamp and from the centerline of the notch and on the same face as the notch.

4.1.2 Test Method C is similar to Test Method A, except for the addition of a procedure for determining the energy expended in tossing a portion of the specimen. The value reported is called the “estimated net Izod impact resistance.” Test Method C is preferred over Test Method A for materials that have an Izod impact resistance of less than 27 J/m (0.5 ft-lbf/in.) under notch. (See Appendix X5 for optional units.) The differences between Test Methods A and C become unimportant for materials that have an Izod impact resistance higher than this value.

4.1.3 Test Method D provides a measure of the notch sensitivity of a material. The stress-concentration at the notch increases with decreasing notch radius.

4.1.3.1 For a given system, greater stress concentration results in higher localized rates-of-strain. Since the effect of strain-rate on energy-to-break varies among materials, a measure of this effect may be obtained by testing specimens with different notch radii. In the Izod-type test it has been demonstrated that the function, energy-to-break versus notch radius, is reasonably linear from a radius of 0.03 to 2.5 mm (0.001 to 0.100 in.), provided that all specimens have the same type of break. (See 5.8 and 22.1.)

4.1.3.2 For the purpose of this test, the slope, *b* (see 22.1), of the line between radii of 0.25 and 1.0 mm (0.010 and 0.040 in.) is used, unless tests with the 1.0-mm radius give “non-break” results. In that case, 0.25 and 0.50-mm (0.010 and 0.020-in.) radii may be used. The effect of notch radius on the impact energy to break a specimen under the conditions of this test is measured by the value *b*. Materials with low values of *b*, whether high or low energy-to-break with the standard notch, are relatively insensitive to differences in notch radius; while

the energy-to-break materials with high values of *b* is highly dependent on notch radius. The parameter *b* cannot be used in design calculations but may serve as a guide to the designer and in selection of materials.

4.2 Test Method E is similar to Test Method A, except that the specimen is reversed in the vise of the machine 180° to the usual striking position, such that the striker of the apparatus impacts the specimen on the face opposite the notch. (See Fig. 1, Fig. 2.) Test Method E is used to give an indication of the

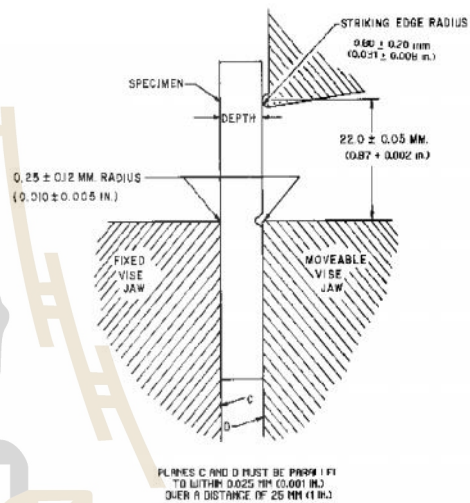


FIG. 1 Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Izod Test Methods A and C

unnotched impact resistance of plastics; however, results obtained by the reversed notch method may not always agree with

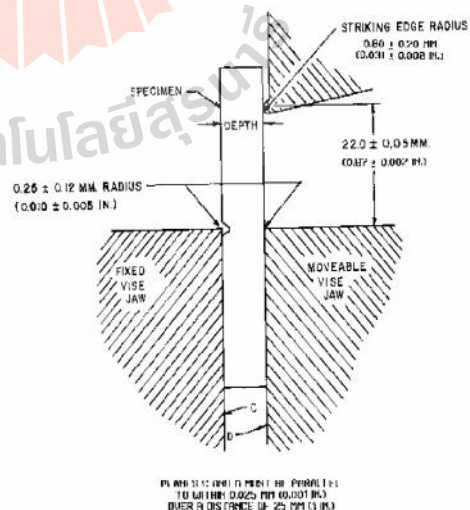


FIG. 2 Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Test Method E

⁶ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

those obtained on a completely unnotched specimen. (See 28.1.)^{7,8}

5. Significance and Use

5.1 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, and testing parameters covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. If there is no material specification, then the default conditions apply.

5.2 The excess energy pendulum impact test indicates the energy to break standard test specimens of specified size under stipulated parameters of specimen mounting, notching, and pendulum velocity-at-impact.

5.3 The energy lost by the pendulum during the breakage of the specimen is the sum of the following:

- 5.3.1 Energy to initiate fracture of the specimen;
- 5.3.2 Energy to propagate the fracture across the specimen;
- 5.3.3 Energy to throw the free end (or ends) of the broken specimen ("toss correction");
- 5.3.4 Energy to bend the specimen;
- 5.3.5 Energy to produce vibration in the pendulum arm;
- 5.3.6 Energy to produce vibration or horizontal movement of the machine frame or base;
- 5.3.7 Energy to overcome friction in the pendulum bearing and in the excess energy indicating mechanism, and to overcome windage (pendulum air drag);
- 5.3.8 Energy to indent or deform plastically the specimen at the line of impact; and
- 5.3.9 Energy to overcome the friction caused by the rubbing of the striker (or other part of the pendulum) over the face of the bent specimen.

5.4 For relatively brittle materials, for which fracture propagation energy is small in comparison with the fracture initiation energy, the indicated impact energy absorbed is, for all practical purposes, the sum of factors 5.3.1 and 5.3.3. The toss correction (see 5.3.3) may represent a very large fraction of the total energy absorbed when testing relatively dense and brittle materials. Test Method C shall be used for materials that have an Izod impact resistance of less than 27 J/m (0.5 ft-lbf/in.). (See Appendix X5 for optional units.) The toss correction obtained in Test Method C is only an approximation of the toss error, since the rotational and rectilinear velocities may not be the same during the re-toss of the specimen as for the original toss, and because stored stresses in the specimen may have been released as kinetic energy during the specimen fracture.

5.5 For tough, ductile, fiber filled, or cloth-laminated materials, the fracture propagation energy (see 5.3.2) may be large compared to the fracture initiation energy (see 5.3.1). When testing these materials, factors (see 5.3.2, 5.3.5, and 5.3.9) can become quite significant, even when the specimen is accurately machined and positioned and the machine is in good condition with adequate capacity. (See Note 6.) Bending (see 5.3.4) and

indentation losses (see 5.3.8) may be appreciable when testing soft materials.

NOTE 6—Although the frame and base of the machine should be sufficiently rigid and massive to handle the energies of tough specimens without motion or excessive vibration, the design must ensure that the center of percussion be at the center of strike. Locating the striker precisely at the center of percussion reduces vibration of the pendulum arm when used with brittle specimens. However, some losses due to pendulum arm vibration, the amount varying with the design of the pendulum, will occur with tough specimens, even when the striker is properly positioned.

5.6 In a well-designed machine of sufficient rigidity and mass, the losses due to factors 5.3.6 and 5.3.7 should be very small. Vibrational losses (see 5.3.6) can be quite large when wide specimens of tough materials are tested in machines of insufficient mass, not securely fastened to a heavy base.

5.7 With some materials, a critical width of specimen may be found below which specimens will appear ductile, as evidenced by considerable drawing or necking down in the region behind the notch and by a relatively high-energy absorption, and above which they will appear brittle as evidenced by little or no drawing down or necking and by a relatively low-energy absorption. Since these methods permit a variation in the width of the specimens, and since the width dictates, for many materials, whether a brittle, low-energy break or a ductile, high energy break will occur, it is necessary that the width be stated in the specification covering that material and that the width be reported along with the impact resistance. In view of the preceding, one should not make comparisons between data from specimens having widths that differ by more than a few mils.

5.8 The type of failure for each specimen shall be recorded as one of the four categories listed as follows:

- C Complete Break—A break where the specimen separates into two or more pieces.
- H Hinge Break—An incomplete break, such that one part of the specimen cannot support itself above the horizontal when the other part is held vertically (less than 90° included angle).
- P Partial Break—An incomplete break that does not meet the definition for a hinge break but has fractured at least 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.
- NB Non-Break—An incomplete break where the fracture extends less than 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.

For tough materials, the pendulum may not have the energy necessary to complete the breaking of the extreme fibers and toss the broken piece or pieces. Results obtained from "non-break" specimens shall be considered a departure from standard and shall not be reported as a standard result. Impact resistance cannot be directly compared for any two materials that experience different types of failure as defined in the test method by this code. Averages reported must likewise be derived from specimens contained within a single failure category. This letter code shall suffix the reported impact identifying the types of failure associated with the reported value. If more than one type of failure is observed for a sample material, then the report will indicate the average impact resistance for each type of failure, followed by the percent of

⁷ Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1021.

⁸ Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1026.

the specimens failing in that manner and suffixed by the letter code.

5.9 The value of the impact methods lies mainly in the areas of quality control and materials specification. If two groups of specimens of supposedly the same material show significantly different energy absorptions, types of breaks, critical widths, or critical temperatures, it may be assumed that they were made of different materials or were exposed to different processing or conditioning environments. The fact that a material shows twice the energy absorption of another under these conditions of test does not indicate that this same relationship will exist under another set of test conditions. The order of toughness may even be reversed under different testing conditions.

TEST METHOD A—CANTILEVER BEAM TEST

6. Apparatus

6.1 The machine shall consist of a massive base on which is mounted a vise for holding the specimen and to which is connected, through a rigid frame and bearings, a pendulum-type hammer. (See 6.2.) The machine must also have a pendulum holding and releasing mechanism and a pointer and dial mechanism for indicating the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. Optionally, an electronic digital display or computer can be used in place of the dial and pointer to measure the energy loss and indicate the breaking energy of the specimen.

6.2 A jig for positioning the specimen in the vise and graphs or tables to aid in the calculation of the correction for friction and windage also should be included. One type of machine is shown in Fig. 3. One design of specimen-positioning jig is illustrated in Fig. 4. Detailed requirements are given in subsequent paragraphs. General test methods for checking and calibrating the machine are given in Appendix X1. Additional

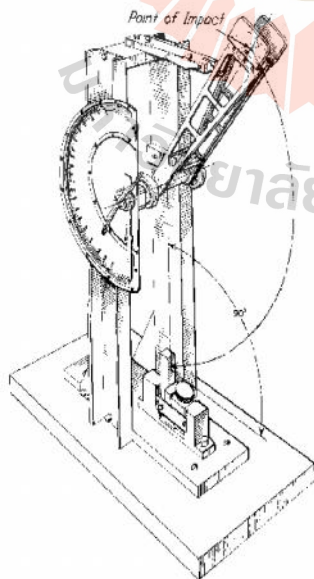


FIG. 3 Cantilever Beam (Izod-Type) Impact Machine



FIG. 4 Jig for Positioning Specimen for Clamping

instructions for adjusting a particular machine should be supplied by the manufacturer.

6.3 The pendulum shall consist of a single or multi-membered arm with a bearing on one end and a head, containing the striker, on the other. The arm must be sufficiently rigid to maintain the proper clearances and geometric relationships between the machine parts and the specimen and to minimize vibrational energy losses that are always included in the measured impact resistance. Both simple and compound pendulum designs may comply with this test method.

6.4 The striker of the pendulum shall be hardened steel and shall be a cylindrical surface having a radius of curvature of 0.80 ± 0.20 mm (0.031 ± 0.008 in.) with its axis horizontal and perpendicular to the plane of swing of the pendulum. The line of contact of the striker shall be located at the center of percussion of the pendulum within ± 2.54 mm (± 0.100 in.) (See Note 7.) Those portions of the pendulum adjacent to the cylindrical striking edge shall be recessed or inclined at a suitable angle so that there will be no chance for other than this cylindrical surface coming in contact with the specimen during the break.

NOTE 7—The distance from the axis of support to the center of percussion may be determined experimentally from the period of small amplitude oscillations of the pendulum by means of the following equation:

$$L = (g/4\pi^2)p^2$$

where:

- L = distance from the axis of support to the center of percussion, m (or ft),
- g = local gravitational acceleration (known to an accuracy of one part in one thousand), m/s^2 (or ft/s^2),
- π = 3.1416 ($4\pi^2 = 39.48$), and
- p = period, s, of a single complete swing (to and fro) determined by averaging at least 20 consecutive and uninterrupted swings. The angle of swing shall be less than 5° each side of center.

6.5 The position of the pendulum holding and releasing mechanism shall be such that the vertical height of fall of the striker shall be 610 ± 2 mm (24.0 ± 0.1 in.). This will produce a velocity of the striker at the moment of impact of approximately 3.5 m (11.4 ft/s). (See Note 8.) The mechanism shall be so constructed and operated that it will release the pendulum without imparting acceleration or vibration to it.

NOTE 8—

$$V = (2gh)^{0.5}$$

where:

V = velocity of the striker at the moment of impact (m/s),

g = local gravitational acceleration (m/s^2), and

h = vertical height of fall of the striker (m).

This assumes no windage or friction.

6.6 The effective length of the pendulum shall be between 0.33 and 0.40 m (12.8 and 16.0 in.) so that the required elevation of the striker may be obtained by raising the pendulum to an angle between 60 and 30° above the horizontal.

6.7 The machine shall be provided with a basic pendulum capable of delivering an energy of 2.7 ± 0.14 J (2.00 ± 0.10 ft-lbf). This pendulum shall be used with all specimens that extract less than 85 % of this energy. Heavier pendulums shall be provided for specimens that require more energy to break. These may be separate interchangeable pendulums or one basic pendulum to which extra pairs of equal calibrated weights may be rigidly attached to opposite sides of the pendulum. It is imperative that the extra weights shall not significantly change the position of the center of percussion or the free-hanging rest point of the pendulum (that would consequently take the machine outside of the allowable calibration tolerances). A range of pendulums having energies from 2.7 to 21.7 J (2 to 16 ft-lbf) has been found to be sufficient for use with most plastic specimens and may be used with most machines. A series of pendulums such that each has twice the energy of the next will be found convenient. Each pendulum shall have an energy within ± 0.5 % of its nominal capacity.

6.8 A vise shall be provided for clamping the specimen rigidly in position so that the long axis of the specimen is vertical and at right angles to the top plane of the vise. (See Fig. 1.) This top plane shall bisect the angle of the notch with a tolerance of 0.12 mm (0.005 in.). Correct positioning of the specimen is generally done with a jig furnished with the machine. The top edges of the fixed and moveable jaws shall have a radius of 0.25 ± 0.12 mm (0.010 ± 0.005 in.). For specimens whose thickness approaches the lower limiting value of 3.00 mm (0.118 in.), means shall be provided to prevent the lower half of the specimen from moving during the clamping or testing operations (see Fig. 4 and Note 9.)

NOTE 9—Some plastics are sensitive to clamping pressure; therefore, cooperating laboratories should agree upon some means of standardizing the clamping force. One method is using a torque wrench on the screw of the specimen vise. If the faces of the vise or specimen are not flat and parallel, a greater sensitivity to clamping pressure may be evident. See the calibration procedure in Appendix X2 for adjustment and correction instructions for faulty instruments.

6.9 When the pendulum is free hanging, the striking surface shall come within 0.2 % of scale of touching the front face of a standard specimen. During an actual swing this element shall

make initial contact with the specimen on a line 22.00 ± 0.05 mm (0.87 ± 0.002 in.) above the top surface of the vise.

6.10 Means shall be provided for determining energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. This may consist of a pointer and dial mechanism which indicate the height of rise of the pendulum beyond the point of impact in terms of energy removed from that specific pendulum. Since the indicated remaining energy must be corrected for pendulum-bearing friction, pointer friction, pointer inertia, and pendulum windage, instructions for making these corrections are included in 10.3 and Annex A1 and Annex A2. Optionally, an electronic digital display or computer can be used in place of the dial and pointer to measure the energy loss and indicate the breaking energy of the specimen. If the electronic display does not automatically correct for windage and friction, it shall be incumbent for the operator to determine the energy loss manually. (See Note 10.)

NOTE 10—Many digital indicating systems automatically correct for windage and friction. The equipment manufacturer may be consulted for details concerning how this is performed, or if it is necessary to determine the means for manually calculating the energy loss due to windage and friction.

6.11 The vise, pendulum, and frame shall be sufficiently rigid to maintain correct alignment of the hammer and specimen, both at the moment of impact and during the propagation of the fracture, and to minimize energy losses due to vibration. The base shall be sufficiently massive that the impact will not cause it to move. The machine shall be so designed, constructed, and maintained that energy losses due to pendulum air drag (windage), friction in the pendulum bearings, and friction and inertia in the excess energy-indicating mechanism are held to a minimum.

6.12 A check of the calibration of an impact machine is difficult to make under dynamic conditions. The basic parameters are normally checked under static conditions; if the machine passes the static tests, then it is assumed to be accurate. The calibration procedure in Appendix X2 should be used to establish the accuracy of the equipment. However, for some machine designs it might be necessary to change the recommended method of obtaining the required calibration measurements. Other methods of performing the required checks may be substituted, provided that they can be shown to result in an equivalent accuracy. Appendix X1 also describes a dynamic test for checking certain features of the machine and specimen.

7. Test Specimens

7.1 The test specimens shall conform to the dimensions and geometry of Fig. 5, except as modified in accordance with 7.2, 7.3, 7.4, and 7.5. To ensure the correct contour and conditions of the specified notch, all specimens shall be notched as directed in Section 8.

7.2 Molded specimens shall have a width between 3.0 and 12.7 mm (0.118 and 0.500 in.). Use the specimen width as specified in the material specification or as agreed upon between the supplier and the customer. All specimens having one dimension less than 12.7 mm (0.500 in.) shall have the notch cut on the shorter side. Otherwise, all compression-molded specimens shall be notched on the side parallel to the

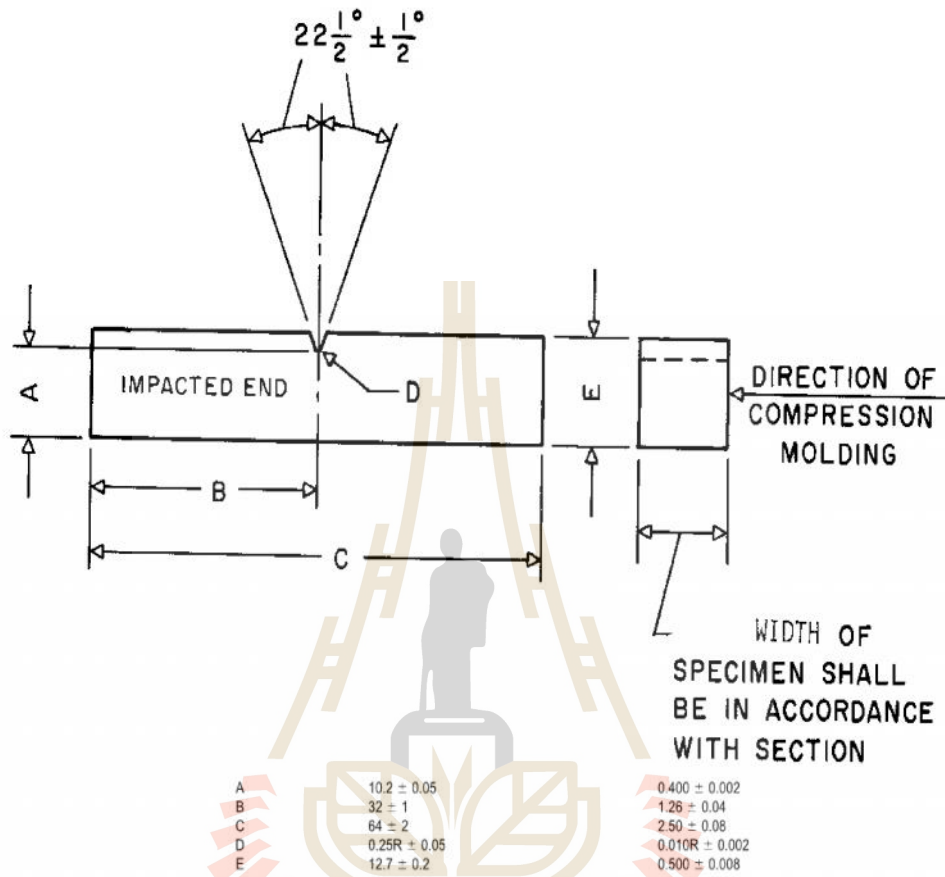


FIG. 5 Dimensions of Izod-Type Test Specimen

direction of application of molding pressure. (Due to the draft of the mold, the notched surface and the opposite surface may not be parallel in molded specimens. Therefore, it is essential that the notched surface be machined parallel to its opposite surface within 0.025 mm (0.001 in.), removing a minimum of material in the process, so as to remain within the allowable tolerance for the specimen depth.) (See Fig. 5.)

7.2.1 Extreme care must be used in handling specimens less than 6.4 mm (0.250 in.) wide. Such specimens must be accurately positioned and supported to prevent twist or lateral buckling during the test. Some materials, furthermore, are very sensitive to clamping pressure (see Note 9).

7.2.2 A critical investigation of the mechanics of impact testing has shown that tests made upon specimens under 6.4 mm (0.250 in.) wide absorb more energy due to crushing, bending, and twisting than do wider specimens. Therefore, specimens 6.4 mm (0.250 in.) or over in width are recommended. The responsibility for determining the minimum specimen width shall be the investigator's, with due reference to the specification for that material.

7.2.3 Material specification should be consulted for preferred molding conditions. The type of mold and molding

machine used and the flow behavior in the mold cavity will influence the impact resistance obtained. A specimen taken from one end of a molded plaque may give different results than a specimen taken from the other end. Cooperating laboratories should therefore agree on standard molds conforming to the material specification. Practice D 3641 can be used as a guide for general molding tolerances, but refer to the material specification for specific molding conditions.

7.2.4 The impact resistance of a plastic material may be different if the notch is perpendicular to, rather than parallel to, the direction of molding. The same is true for specimens cut with or across the grain of an anisotropic sheet or plate.

7.3 For sheet materials, the specimens shall be cut from the sheet in both the lengthwise and crosswise directions unless otherwise specified. The width of the specimen shall be the thickness of the sheet if the sheet thickness is between 3.0 and 12.7 mm (0.118 and 0.500 in.). Sheet material thicker than 12.7 mm shall be machined down to 12.7 mm. Specimens with a 12.7-mm square cross section may be tested either edgewise or flatwise as cut from the sheet. When specimens are tested flatwise, the notch shall be made on the machined surface if the specimen is machined on one face only. When the specimen is

cut from a thick sheet, notation shall be made of the portion of the thickness of the sheet from which the specimen was cut, for example, center, top, or bottom surface.

7.4 The practice of cementing, bolting, clamping, or otherwise combining specimens of substandard width to form a composite test specimen is not recommended and should be avoided since test results may be seriously affected by interface effects or effects of solvents and cements on energy absorption of composite test specimens, or both. However, if Izod test data on such thin materials are required when no other means of preparing specimens are available, and if possible sources of error are recognized and acceptable, the following technique of preparing composites may be utilized.

7.4.1 The test specimen shall be a composite of individual thin specimens totaling 6.4 to 12.7 mm (0.250 to 0.500 in.) in width. Individual members of the composite shall be accurately aligned with each other and clamped, bolted, or cemented together. The composite shall be machined to proper dimensions and then notched. In all such cases the use of composite specimens shall be noted in the report of test results.

7.4.2 Care must be taken to select a solvent or adhesive that will not affect the impact resistance of the material under test. If solvents or solvent-containing adhesives are employed, a conditioning procedure shall be established to ensure complete removal of the solvent prior to test.

7.5 Each specimen shall be free of twist (see Note 11) and shall have mutually perpendicular pairs of plane parallel surfaces and free from scratches, pits, and sink marks. The specimens shall be checked for compliance with these requirements by visual observation against straightedges, squares, and flat plates, and by measuring with micrometer calipers. Any specimen showing observable or measurable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the proper size and shape before testing.

NOTE 11—A specimen that has a slight twist to its notched face of 0.05 mm (0.002 in.) at the point of contact with the pendulum striking edge will be likely to have a characteristic fracture surface with considerable greater fracture area than for a normal break. In this case the energy to break and loss of the broken section may be considerably larger (20 to 30%) than for a normal break. A tapered specimen may require more energy to bend it in the vise before fracture.

8. Notching Test Specimens

8.1 Notching shall be done on a milling machine, engine lathe, or other suitable machine tool. Both the feed speed and the cutter speed shall be constant throughout the notching operation (see Note 12). Provision for cooling the specimen with either a liquid or gas coolant is recommended. A single-tooth cutter shall be used for notching the specimen, unless notches of an equivalent quality can be produced with a multi-tooth cutter. Single-tooth cutters are preferred because of the ease of grinding the cutter to the specimen contour and because of the smoother cut on the specimen. The cutting edge shall be carefully ground and honed to ensure sharpness and freedom from nicks and burrs. Tools with no rake and a work relief angle of 15 to 20° have been found satisfactory.

NOTE 12—For some thermoplastics, cutter speeds from 53 to 150 m/min (175 to 490 ft/min) at a feed speed of 89 to 160 mm/min (3.5 to 6.3 in./min) without a water coolant or the same cutter speeds at a feed speed

of from 36 to 160 mm/min (1.4 to 6.3 in./min) with water coolant produced suitable notches.

8.2 Specimens may be notched separately or in a group. However, in either case an unnotched backup or “dummy bar” shall be placed behind the last specimen in the sample holder to prevent distortion and chipping by the cutter as it exits from the last test specimen.

8.3 The profile of the cutting tooth or teeth shall be such as to produce a notch of the contour and depth in the test specimen as specified in Fig. 5 (see Note 13). The included angle of the notch shall be $45 \pm 1^\circ$ with a radius of curvature at the apex of 0.25 ± 0.05 mm (0.010 ± 0.002 in.). The plane bisecting the notch angle shall be perpendicular to the face of the test specimen within 2° .

NOTE 13—There is evidence that notches in materials of widely varying physical dimensions may differ in contour even when using the same cutter. If the notch in the specimen should take the contour of the cutter, then the contour of the tip of the cutter may be checked instead of the notch in the specimen for single-tooth cutters. Under the same condition, multi-tooth cutters may be checked by measuring the contour of a strip of soft metal shim inserted between two specimens for notching.

8.4 The depth of the plastic material remaining in the specimen under the notch shall be 10.20 ± 0.05 mm (0.400 ± 0.002 in.). This dimension shall be measured, with a micrometer or other suitable measuring device. (See Fig. 6.)

8.5 Cutter speed and feed speed should be chosen appropriate for the material being tested since the quality of the notch may be adversely affected by thermal deformations and stresses induced during the cutting operation if proper conditions are not selected.⁹ The notching parameters used shall not alter the physical state of the material such as by raising the temperature of a thermoplastic above its glass transition temperature. In general, high cutter speeds, slow feed rates, and lack of coolant induce more thermal damage than a slow cutter speed, fast feed speed, and the use of a coolant. Too high a feed speed/cutter speed ratio, however, may cause impacting and cracking of the specimen. The range of cutter speed/feed ratios possible to produce acceptable notches can be extended by the use of a suitable coolant. (See Note 14.) In the case of new types of plastics, it is necessary to study the effect of variations in the notching conditions. (See Note 15.)

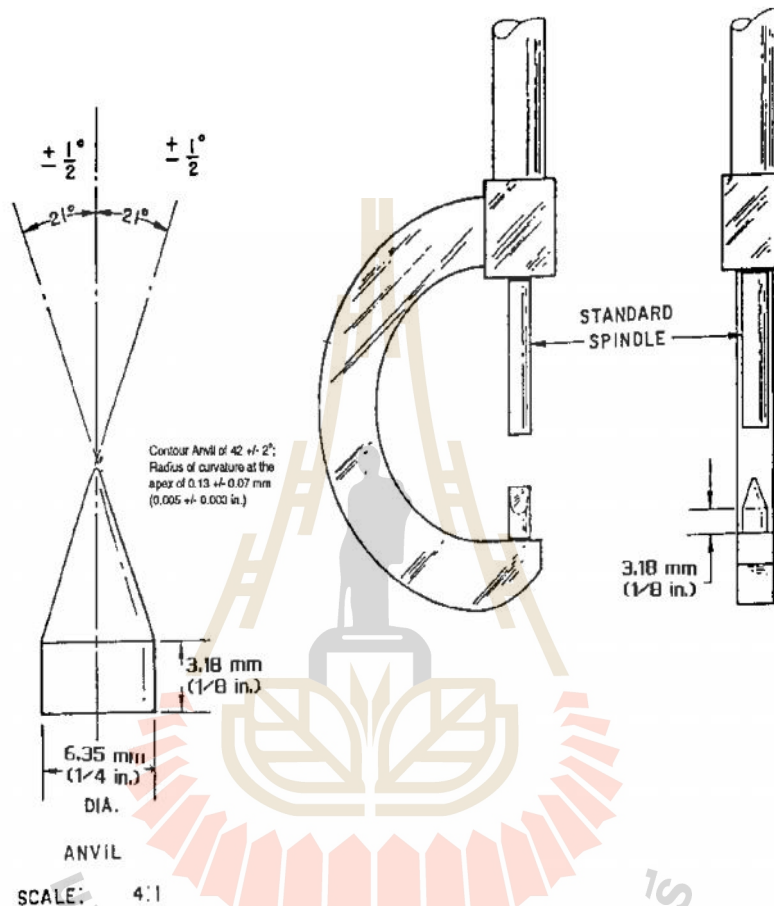
NOTE 14—Water or compressed gas is a suitable coolant for many plastics.

NOTE 15—Embedded thermocouples, or another temperature measuring device, can be used to determine the temperature rise in the material near the apex of the notch during machining. Thermal stresses induced during the notching operation can be observed in transparent materials by viewing the specimen at low magnification between crossed polars in monochromatic light.

8.6 The specimen notch produced by each cutter will be examined, at a minimum, after every 500 notches. The notch in the specimen, made of the material to be tested, shall be inspected and verified. One procedure for the inspection and verification of the notch is presented in Appendix XI. Each type of material being notched must be inspected and verified

⁹ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1066.

IZOD



NOTE 1—These views not to scale.

NOTE 2—Micrometer to be satin-chrome finished with friction thimble.

NOTE 3—Special anvil for micrometer caliper 0 to 25.4-mm range (50.8 mm frame) (0 to 1-in. range (2-in. frame)).

NOTE 4—Anvil to be oriented with respect to frame as shown.

NOTE 5—Anvil and spindle to have hardened surfaces.

NOTE 6—Range: 0 to 25.4 mm (0 to 1 in. in thousandths of an inch).

NOTE 7—Adjustment must be at zero when spindle and anvil are in contact.

FIG. 6 Early (ca. 1970) Version of a Notch-Depth Micrometer

at that time. If the angle or radius does not fall within the specified limits for materials of satisfactory machining characteristics, then the cutter shall be replaced with a newly sharpened and honed one. (See Note 16.)

NOTE 16—A carbide-tipped or industrial diamond-tipped notching cutter is recommended for longer service life.

9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h after notching and prior to testing in accordance with

Procedure A of Practice D 618, unless it can be documented (between supplier and customer) that a shorter conditioning time is sufficient for a given material to reach equilibrium of impact resistance.

9.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Specification D 4066) call for testing “dry as-molded specimens.” Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50% relative humidity and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

9.2 *Test Conditions*—Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified in the material specification or by customer requirements. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) and $\pm 2\%$ relative humidity.

10. Procedure

10.1 At least five and preferably ten or more individual determinations of impact resistance must be made on each sample to be tested under the conditions prescribed in Section 9. Each group shall consist of specimens with the same nominal width ($\pm 0.13\text{ mm}$ ($\pm 0.005\text{ in.}$)). In the case of specimens cut from sheets that are suspected of being anisotropic, prepare and test specimens from each principal direction (lengthwise and crosswise to the direction of anisotropy).

10.2 Estimate the breaking energy for the specimen and select a pendulum of suitable energy. Use the lightest standard pendulum that is expected to break each specimen in the group with a loss of not more than 85% of its energy (see Note 17). Check the machine with the proper pendulum in place for conformity with the requirements of Section 6 before starting the tests. (See Appendix X1.)

NOTE 17—Ideally an impact test would be conducted at a constant test velocity. In a pendulum-type test, the velocity decreases as the fracture progresses. For specimens that have an impact energy approaching the capacity of the pendulum there is insufficient energy to complete the break and toss. By avoiding the higher 15% scale energy readings, the velocity of the pendulum will not be reduced below 1.3 m/s (4.4 ft/s). On the other hand, the use of too heavy a pendulum would reduce the sensitivity of the reading.

10.3 If the machine is equipped with a mechanical pointer and dial, perform the following operations before testing the specimens:

10.3.1 With the excess energy indicating pointer in its normal starting position but without a specimen in the vise, release the pendulum from its normal starting position and note the position the pointer attains after the swing as one reading of Factor *A*.

10.3.2 Without resetting the pointer, raise the pendulum and release again. The pointer should move up the scale an additional amount. Repeat (10.3.2) until a swing causes no additional movement of the pointer and note the final reading as one reading of Factor *B* (see Note 18).

10.3.3 Repeat the preceding two operations several times and calculate and record the average *A* and *B* readings.

NOTE 18—Factor *B* is an indication of the energy lost by the pendulum to friction in the pendulum bearings and to windage. The difference *A* – *B* is an indication of the energy lost to friction and inertia in the excess energy indicating mechanism. However, the actual corrections will be smaller than these factors, since in an actual test the energy absorbed by the specimen prevents the pendulum from making a full swing. Therefore, the indicated breaking energy of the specimen must be included in the calculation of the machine correction before determining the breaking energy of the specimen (see 10.7). The *A* and *B* values also provide an indication of the condition of the machine.

10.3.4 If excessive friction is indicated, the machine shall be adjusted before starting a test. If the machine is equipped with a digital energy indicating system, follow the manufacturer's instructions to correct for windage and friction. If excessive

friction is indicated, the machine shall be adjusted before starting a test.

10.4 Check the specimens for conformity with the requirements of Sections 7, 8, and 10.1.

10.5 Measure the width and depth to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) after notching of each specimen. Measure the width in the region of the notch. A micrometer or other measuring device is necessary for measuring the depth. (See Fig. 6.)

10.6 Position the specimen precisely (see 6.7) so that it is rigidly, but not too tightly (see Note 9), clamped in the vise. Pay special attention to ensure that the "impacted end" of the specimen as shown and dimensioned in Fig. 5 is the end projecting above the vise. Release the pendulum and record the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen, together with a description of the appearance of the broken specimen (see failure categories in 5.8).

10.7 Subtract the windage and friction correction from the indicated breaking energy of the specimen, unless determined automatically by the indicating system (that is, digital display or computer). If a mechanical dial and pointer is employed, use the *A* and *B* factors and the appropriate tables or the graph described in Annex A1 and Annex A2 to determine the correction. For those digital systems that do not automatically compensate for windage and friction, follow the manufacturer's procedure for performing this correction.

10.7.1 In other words, either manually or automatically, the windage and friction correction value is subtracted from the uncorrected, indicated breaking energy to obtain the new breaking energy. Compare the net value so found with the energy requirement of the hammer specified in 10.2. If a hammer of improper energy was used, discard the result and make additional tests on new specimens with the proper hammer. (See Annex A1 and Annex A2.)

10.8 Divide the net value found in 10.7 by the measured width of the particular specimen to obtain the impact resistance under the notch in J/m (ft·lbf/in.). If the optional units of kJ/m^2 (ft·lbf/in.²) are used, divide the net value found in 10.7 by the measured width and depth under the notch of the particular specimen to obtain the impact strength. The term, "depth under the notch," is graphically represented by Dimension A in Fig. 5. Consequently, the cross-sectional area (width times depth under the notch) will need to be reported. (See Appendix X5.)

10.9 Calculate the average Izod impact resistance of the group of specimens. However, only values of specimens having the same nominal width and type of break may be averaged. Values obtained from specimens that did not break in the manner specified in 5.8 shall not be included in the average. Also calculate the standard deviation of the group of values.

11. Report

11.1 Report the following information:

11.1.1 The test method used (Test Method A, C, D, or E).

11.1.2 Complete identification of the material tested, including type source, manufacturer's code number, and previous history.

11.1.3 A statement of how the specimens were prepared, the testing conditions used, the number of hours the specimens were conditioned after notching, and, for sheet materials, the direction of testing with respect to anisotropy, if any.

D 256

11.1.4 The capacity of the pendulum in joules, or foot pound-force, or inch pound-force,

11.1.5 The width and depth under the notch of each specimen tested (see 5.6),

11.1.6 The total number of specimens tested per sample of material,

11.1.7 The type of failure (see 5.8),

11.1.8 The impact resistance must be reported in J/m (ft·lbf/in.); the optional units of kJ/m² (ft·lbf/in.²) may also be required (see 10.8),

11.1.9 The number of those specimens that resulted in failures which conforms to each of the requirement categories in 5.8,

11.1.10 The average impact resistance and standard deviation (in J/m (ft·lbf/in.)) for those specimens in each failure category, except non-break as presented in 5.8. Optional units (kJ/m² (ft·lbf/in.²)) may also need to be reported (see Appendix X5), and

11.1.11 The percent of specimens failing in each category suffixed by the corresponding letter code from 5.8.

TEST METHOD C—CANTILEVER BEAM TEST FOR MATERIALS OF LESS THAN 27 J/m (0.5 ft·lbf/in.)

12. Apparatus

12.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

13. Test Specimens

13.1 The test specimens shall be the same as specified in Section 7.

14. Notching Test Specimens

14.1 Notching test specimens shall be the same as specified in Section 8.

15. Conditioning

15.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

16. Procedure

16.1 The procedure shall be the same as in Section 10 with the addition of a procedure for estimating the energy to toss the broken specimen part.

16.1.1 Make an estimate of the magnitude of the energy to toss each different type of material and each different specimen size (width). This is done by repositioning the free end of the broken specimen on the clamped portion and striking it a second time with the pendulum released in such a way as to impart to the specimen approximately the same velocity it had attained during the test. This is done by releasing the pendulum from a height corresponding to that to which it rose following the breakage of the test specimen. The energy to toss is then considered to be the difference between the reading previously described and the free swing reading obtained from this height. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

17. Report

17.1 Report the following information:

17.1.1 Same as 11.1.1,

17.1.2 Same as 11.1.2,

17.1.3 Same as 11.1.3,

17.1.4 Same as 11.1.4,

17.1.5 Same as 11.1.5,

17.1.6 Same as 11.1.6,

17.1.7 The average reversed notch impact resistance, J/m (ft·lbf/in.) (see 5.8 for failure categories),

17.1.8 Same as 11.1.8,

17.1.9 Same as 11.1.9,

17.1.10 Same as 11.1.10, and

17.1.11 Same as 11.1.11.

17.1.12 The estimated toss correction, expressed in terms of joule (J) or foot pound-force (ft·lbf).

17.1.13 The difference between the Izod impact energy and the toss correction energy is the net Izod energy. This value is divided by the specimen width (at the base of notch) to obtain the net Izod impact resistance for the report.

TEST METHOD D—NOTCH RADIUS SENSITIVITY TEST

18. Apparatus

18.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

19. Test Specimens

19.1 The test specimens shall be the same as specified in Section 7. All specimens must be of the same nominal width, preferably 6.4-mm (0.25-in.).

20. Notching Test Specimens

20.1 Notching shall be done as specified in Section 8 and Fig. 5, except those ten specimens shall be notched with a radius of 0.25 mm (0.010 in.) and ten specimens with a radius of 1.0 mm (0.040 in.).

21. Conditioning

21.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

22. Procedure

22.1 Proceed in accordance with Section 10, testing ten specimens of each notch radius.

22.2 The average impact resistance of each group shall be calculated, except that within each group the type of break must be homogeneously C, H, C and H, or P.

22.3 If the specimens with the 0.25-mm (0.010-in.) radius notch do not break, the test is not applicable.

22.4 If any of ten specimens tested with the 1.0-mm (0.040-in.) radius notch fail as in category NB, non-break, the notch sensitivity procedure cannot be used without obtaining additional data. A new set of specimens should be prepared from the same sample, using a 0.50-mm (0.020-in.) notch radius and the procedure of 22.1 and 22.2 repeated.

23. Calculation

23.1 Calculate the slope of the line connecting the values for impact resistance for 0.25 and 1.0-mm notch radii (or 0.010

and 0.040-in. notch radii) by the equation presented as follows. (If a 0.500-mm (0.020-in.) notch radius is substituted, adjust the calculation accordingly.)

$$b = (E_2 - E_1)/(R_2 - R_1)$$

where:

E_2 = average impact resistance for the larger notch, J/m of notch,

E_1 = average impact resistance for the smaller notch, J/m of notch,

R_2 = radius of the larger notch, mm, and

R_1 = radius of the smaller notch, mm.

Example:

$$E_{1.0} = 330.95 \text{ J/m}; E_{0.25} = 138.78 \text{ J/m}$$

$$b = (330.95 - 138.78 \text{ J/m}) / (1.00 - 0.25 \text{ mm})$$

$$b = 192.17 \text{ J/m } 0.75 \text{ mm} \\ = 256.23 \text{ J/m} \\ \text{of notch per mm of radius}$$

24. Report

24.1 Report the following information:

24.1.1 Same as 11.1.1,

24.1.2 Same as 11.1.2,

24.1.3 Same as 11.1.3,

24.1.4 Same as 11.1.4,

24.1.5 Same as 11.1.5,

24.1.6 Same as 11.1.6,

24.1.7 The average reversed notch impact resistance, in J/m (ft-lbf/in.) (see 5.8 for failure categories),

24.1.8 Same as 11.1.8,

24.1.9 Same as 11.1.9,

24.1.10 Same as 11.1.10, and

24.1.11 Same as 11.1.11.

24.1.12 Report the average value of b with its units, and the average Izod impact resistance for a 0.25-mm (0.010-in.) notch.

TEST METHOD E—CANTILEVER BEAM REVERSED NOTCH TEST

25. Apparatus

25.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

26. Test Specimens

26.1 The test specimen shall be the same as specified in Section 7.

27. Notching Test Specimens

27.1 Notch the test specimens in accordance with Section 8.

28. Conditioning

28.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

29. Procedure

29.1 Proceed in accordance with Section 10, except clamp the specimen so that the striker impacts it on the face opposite the notch, hence subjecting the notch to compressive rather

than tensile stresses during impact (see Fig. 2 and Note 19, Note 20, and Note 21).

NOTE 19—The reversed notch test employs a standard 0.25-mm (0.010-in.) notch specimen to provide an indication of unnotched impact resistance. Use of the reversed notch test obviates the need for machining unnotched specimens to the required 10.2 ± 0.05 -mm (0.400 ± 0.002 -in.) depth before testing and provides the same convenience of specimen mounting as the standard notch tests (Test Methods A and C).

NOTE 20—Results obtained by the reversed notch test may not always agree with those obtained on unnotched bars that have been machined to the 10.2-mm (0.400-in.) depth requirement. For some materials, the effects arising from the difference in the clamped masses of the two specimen types during test, and those attributable to a possible difference in toss energies ascribed to the broken ends of the respective specimens, may contribute significantly to a disparity in test results.

NOTE 21—Where materials are suspected of anisotropy, due to molding or other fabricating influences, notch reversed notch specimens on the face opposite to that used for the standard Izod test; that is, present the same face to the impact blow.

30. Report

30.1 Report the following information:

30.1.1 Same as 11.1.1,

30.1.2 Same as 11.1.2,

30.1.3 Same as 11.1.3,

30.1.4 Same as 11.1.4,

30.1.5 Same as 11.1.5,

30.1.6 Same as 11.1.6,

30.1.7 The average reversed notch impact resistance, J/m (ft-lbf/in.) (see 5.8 for failure categories),

30.1.8 Same as 11.1.8,

30.1.9 Same as 11.1.9,

30.1.10 Same as 11.1.10, and

30.1.11 Same as 11.1.11.

31. Precision and Bias

31.1 Table 1 and Table 2 are based on a round robin¹⁰ in accordance with Practice E 691. For each material, all the test bars were prepared at one source, except for notching. Each participating laboratory notched the bars that they tested. Table 1 and Table 2 are presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin each laboratory tested, on average, nine specimens of each material.

31.2 Table 3 is based on a round robin⁸ involving five materials tested by seven laboratories. For each material, all the samples were prepared at one source, and the individual specimens were all notched at the same laboratory. Table 3 is presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin, each laboratory tested ten specimens of each material. (See Note 22.)

NOTE 22—**Caution:** The following explanations of I_d and I_R (see 31.3-31.3.3) are only intended to present a meaningful way of considering the precision of this test method. The data in Tables 1-3 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to

¹⁰ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1034.

D 256

TABLE 1 Precision Data, Test Method E—Reversed Notch Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width (J/m of width).
NOTE 2—See Footnote 10.

Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D	Number of Laboratories
Phenolic	0.57 (30.4)	0.024 (1.3)	0.076 (4.1)	0.06 (3.2)	0.21 (11.2)	19
Acetal	1.45 (77.4)	0.075 (4.0)	0.604 (32.3)	0.21 (11.2)	1.70 (90.8)	9
Reinforced nylon	1.98 (105.7)	0.083 (4.4)	0.245 (13.1)	0.23 (12.3)	0.69 (36.8)	15
Polypropylene	2.66 (142.0)	0.154 (8.2)	0.573 (30.6)	0.43 (23.0)	1.62 (86.5)	24
ABS	10.80 (576.7)	0.136 (7.3)	0.585 (31.2)	0.38 (20.3)	1.65 (88.1)	25
Polycarbonate	16.40 (875.8)	0.295 (15.8)	1.056 (56.4)	0.83 (44.3)	2.98 (159.1)	25

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C $I_r = 2.83 S_r$.
^D $I_R = 2.83 S_R$.

TABLE 2 Precision Data, Test Method C—Reversed Notch Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width (J/m of width).
NOTE 2—See Footnote 10.

Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D	Number of Laboratories
Phenolic	0.45 (24.0)	0.038 (2.0)	0.129 (6.9)	0.10 (5.3)	0.36 (19.2)	15

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C $I_r = 2.83 S_r$.
^D $I_R = 2.83 S_R$.

TABLE 3 Precision Data, Test Method E—Reversed Notch Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width (J/m of width).
NOTE 2—See Footnote 8.

Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D
Acrylic sheet, unmodified	3.02 (161.3)	0.243 (13.0)	0.525 (28.0)	0.68 (36.3)	0.71 (37.9)
Premix molding compounds laminate acrylic, injection molded	6.11 (326.3)	0.767 (41.0)	0.786 (42.0)	2.17 (115.9)	2.22 (118.5)
compound (SMC) laminate	10.33 (551.6)	0.878 (46.9)	1.276 (68.1)	2.49 (133.0)	3.61 (192.8)
Preformed mat laminate	11.00 (587.4)	0.719 (38.4)	0.785 (41.9)	2.03 (108.4)	2.22 (118.5)
	19.43 (1037.6)	0.960 (51.3)	1.618 (86.4)	2.72 (145.2)	4.58 (244.6)

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C $I_r = 2.83 S_r$.
^D $I_R = 2.83 S_R$.

their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 31.3-31.3.3 would then be valid for such data.

31.3 *Concept of I_r and I_R* —If S_r and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens.

31.3.1 *Repeatability, I_r (Comparing Two Test Results for the Same Material, Obtained by the Same Operator Using the Same Equipment on the Same Day)*—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material.

31.3.2 *Reproducibility, I_R (Comparing Two Test Results for the Same Material, Obtained by Different Operators Using Different Equipment on Different Days)*—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material.

31.3.3 Any judgment in accordance with 31.3.1 and 31.3.2 would have an approximate 95% (0.95) probability of being correct.

31.4 *Bias*—There is no recognized standards by which to estimate bias of these test methods.

NOTE 23—Numerous changes have occurred since the collection of the original round-robin data in 1973.¹⁰ Consequently, a new task group has been formed to evaluate a precision and bias statement for the latest revision of these test methods.

32. Keywords

32.1 impact resistance; Izod impact; notch sensitivity; notched specimen; reverse notch impact



ภาคผนวก ง

ผลงานด้านวิชาการระหว่างการศึกษา

1. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์
2. เอกสารยื่นคำขอจดอนุสิทธิบัตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Author's Accepted Manuscript

EFFECT OF GRAPHITE ADDITION ON MECHANICAL PROPERTIES OF UHMWPE FOR USE AS TIBIA INSERT BIOCOMPOSITE MATERIALS

Sukasem Watcharamaisakul and Arunmanai Lepon

Reference: ENG170101012
www: <http://ird.sut.ac.th/e-journal/Journal/pdf/170101012.pdf>
To appear in: Suranaree Journal of Science and Technology
ISSN: 0858-849X
Received date: January 05, 2017
Revised date: February 22, 2017
Accepted date: April 01, 2017

Cite this article as:
Watcharamaisakul, S. and Lepon, A. (2017). Effect of graphite addition on mechanical properties of UHMWPE for use as tibia insert biocomposite materials. Suranaree J. Sci. Technol. Available from <http://ird.sut.ac.th/ejournal/Journal/pdf/1501863.pdf>

This is an early version of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting and review of the resulting galley proof before it is published in its final form.

It should be noted that, during the production process, errors may be found which may affect the content. All disclaimers relating to the opinions and statements contained in the journal remain in force.

EFFECT OF GRAPHITE ADDITION ON MECHANICAL PROPERTIES OF UHMWPE FOR USE AS TIBIA INSERT BIOCOMPOSITE MATERIALS

Sukasem Watcharamaisakul* and Arunmanai Lepon

School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. 30000. Tel: 0-4422-4471; Fax: 0-4422-4477;

Email: sukasem@sut.ac.th

** Corresponding author*

Abstract

In this work, graphite was used as a filler material for ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) to prepare graphite/UHMWPE composites for a potential alternative tibia insert for total knee replacement, because graphite has been shown to have excellent solid lubrication and biocompatibility. Graphite powder was blended with 5, 10, 20, 30, and 40 wt% into the UHMWPE matrix. Then, it was compression molded at 250°C for 30 minutes under a pressure of 10 MPa. The mechanical and tribological properties, and the coefficient of the friction of the composite samples were investigated. As the results show, the highest hardness (Shore D) of 62.31, the highest impact strength of 78.51 kJ/m², and the highest coefficient of friction were obtained with 5 wt% graphite, while the lowest coefficient of friction was obtained with 20 wt% graphite. It can be concluded that the graphite/UHMWPE biocomposites displayed a remarkable combination of enhanced mechanical properties such as hardness, wear resistance, impact strength, and coefficient of friction making the composites attractive potential candidates as a tibia insert for artificial joints in the human body.

Keywords: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), graphite, biocomposites, mechanical properties

Introduction

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) is one of the best engineering thermoplastics that possesses high impact strength, low friction coefficient, good biocompatibility, high chemical inertness, and the highest wear resistance as compared with other thermoplastics due to its long chain entanglement (Budinski, 1997). For many years, it has been an established material for application as a component of artificial joint replacement in prosthetic joints that can replace human joints degraded by severe arthritis or injuries. Despite its exceptional properties, wear problems that occur after certain service periods still remain as the main challenge. The production of wear debris will cause adverse effects to the

human body's system which subsequently leads to osteolysis and aseptic loosening of the implant. On this subject matter, it is imperative for research to be carried out in polymer tribology in order to reduce the wear rate of UHMWPE components in artificial joint replacements. There are several methods that have been attempted and studied by researchers in order to improve the tribological properties of UHMWPE. To enhance the performance of UHMWPE in terms of reducing its wear rate and wear particle generation, attempts have been made to improve the lifespan of the component. For example, the Hymaler, a high crystalline UHMWPE (with 73.2% crystallinity) was identified as a potential material for arthroplasty application, since this material presents a high resistance to fatigue and creep propagation. However, it is susceptible to oxidation related degradation, which affects its clinical performance (Baena *et al.*, 2015). This material was replaced by Maraton crosslinked UHMWPE in 1997 (Shi *et al.*, 2004). In regard to a UHMWPE composite, it also has been considered as a potential alternative to improve the wear performance of artificial joints. The UHMWPE reinforced with carbon fibers (CFR-UHMWPE), named Poly II, was used in orthopedic implants in the 1970s. This composite was discontinued due to evidence of reduced crack resistance, rupture of the fibers on the surface, and other issues (Pearle *et al.*, 2005). Lahiri *et al.*, (2014) evaluated the evolution of the wear resistance at the nano-scale by scratching the UHMWPE- GNP composite at different graphene nanoplatelet (GNP) concentrations (0.1, 0.5, and 1.0 wt%) and using 3 different loads (100, 200, and 300 μN) (Lahiri *et al.*, 2014; Baena *et al.*, 2015).

Recently, graphite-filled polymeric materials have been discussed in tribological research in many published articles (Wang *et al.*, 2010; Zouari *et al.*, 2010). The use of graphite as a filler material is known to ameliorate the tribological behavior of polymer matrix composites (Suresha *et al.*, 2007). Difallah *et al.* (2012) evaluated the evolution of the addition of a small amount of graphite which improves the friction behavior and the anti-wear abilities of the acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer. Graphite strengthens the wear resistance of ABS composites and effectively reduces the adhesive and plowing wear and enhances the formation of a third body with better quality on the sliding stripe. A composite filled with 7.5 wt% graphite corresponds to the best friction and wear abilities (Difallah *et al.*, 2012).

The present study focuses on the improvement of the mechanical properties of UHMWPE such as wear resistance, the coefficient of friction, hardness, and impact strength by the addition of graphite as a filler. Graphite has solid lubrication, biocompatibility, high temperature stability, a low coefficient of friction under high loads, excellent thermal shock resistance, and high chemical resistance.

Materials and Methods

Commercially available UHMWPE powder with a mean diameter of 170 μm (IRPC Public Company Limited, Rayong, Thailand) (0.94 g/cm^3 density) was used as the matrix. Graphite powder with a mean diameter of 80 μm was used as the filler. The graphite particles were mixed in the UHMWPE with 5 to 40 wt% with a dry powder mixer. Composites were formed by using a hot compression molding machine with

the pressure at 10 MPa at a temperature of 250°C for 30 minutes. The hardness of the composite samples was measured by means of a hardness tester (Heinrich Bareiss Prüfgeräteebau GmbH, Oberdisingen, Germany) with Shore hardness type-D. The study of the friction behavior was performed using a Param MXD-02 coefficient of friction tester (Labthink Instruments Co., Ltd., Jinan, China). Rectangle-shaped specimens were 64 mm long, 4 mm thick, and 39 mm wide, and the contact area was 39 mm × 64 mm in the abrasion wear test. The specimens were slid onto a SiC paper P800 ($R_a \sim 120$ nm) and the abrasive was of a median diameter of 25.8 microns. The normal load was 14.71 N for 5 minutes/sample. The study of the impact strength was measured using the Izod mode with an Instron CEAST 9050 (Illinois Tool Works Inc., Norwood, MD, USA) at room temperature using the impact pendulum with an impact energy of 22 joules for the notched specimen. The microstructure of the composite samples was observed by means of a JEOL-JSM-6010 LV scanning electron microscope (SEM) (JEOL Ltd., Tokyo, Japan). The section of the samples was cut under liquid nitrogen as a coolant.

Results and Discussion

The work reports the results of systemic studies of the mechanics and characteristics of the coefficient of friction, impact strength, hardness, and wear resistance of the graphite/UHMWPE composites.

Figure 1 shows the hardness of the graphite/UHMWPE composites with different amounts of graphite. The highest hardness was obtained with 5 wt% of graphite filler, an increase of 0.16% in comparison with ordinary UHMWPE. At the higher graphite content (> 5 to 30 wt%), there was a decrease in hardness due to the decreasing of the UHMWPE matrix as the binding phase. Nevertheless, with a large amount of 40 wt%, the graphite content could not be tested due to the brittleness of the sample.

Figure 2 presents the coefficient of friction of the UHMWPE composites with different amounts of graphite. It can be seen that the increased graphite content reduced the friction coefficient. The 20 wt% of graphite showed the lowest friction coefficient due to the self-lubricating ability of the graphite which easily causes interlayer shearing, whereas its high in-plane strength resists its total disintegration and thus keeps the lubrication long-lasting and effective. Corresponding to the work of Difallah *et al.* (2012), the addition of graphite in the ABS matrix exhibits a lower coefficient of friction and the best coefficient of friction was obtained with 7.5 wt% of graphite.

Figure 3 presents the weight loss of the UHMWPE composites with different amounts of graphite. The composite with a 5 wt% of the graphite showed the lowest weight loss because the 5 wt% of graphite addition could reduce the transmission of shear stresses throughout the bulk sample. However, by increasing the graphite content over 5 wt%, the weight loss was increased as compared to pure UHMWPE due to the fact that the crosslinking reduces the distance between the folds caused by decreased polymer chain mobility and, compared with the behavior of UHMWPE reinforced with a graphene nanoplatelet (GNP) content from 0.1 to 1

wt%, it also increases the wear resistance (Lahiri *et.al.*, 2014). Finally, the 40 wt% of the graphite content could not be tested due to the brittleness of the sample.

Figure 4 presents the impact strength of the UHMWPE composites with different amounts of graphite. The highest impact strength, obtained with 5 wt% graphite addition, is 16.4% higher than that of the UHMWPE. However, in increasing the graphite content over 5 wt%, cracks were able to propagate through weak points within the large particle agglomerations, while decreasing the polymer matrix in the composites leads to the brittleness of the sample and also the poor dispersion of particles in the composites; this creates a path of weak regions within the polymer matrix. When the polymer is cyclically loaded, fatigue cracks can quickly propagate around the boundaries of the graphite particles, creating separated regions which can deform more freely and independently of each other (Plumlee, 2008).

Characterization of the SEM

Scanning electron images were compared to reveal the distribution of graphite particles within the matrix, as seen in Figures 5 and 6. The images revealed that the graphite particles accumulated in long veins that ran through the entirety of the samples. This can be explained by the difference in particle size between the graphite and the UHMWPE during the mixing state. This causes the graphite particles of 80 μm to gather in the empty regions between the larger UHMWPE particles of 170 μm while the groupings were caused by the particle geometries; the graphite particles did not appear to naturally agglomerate together even when in close proximity, suggesting that dispersion could be improved by simply altering the initial particle size of the UHMWPE powder, with a diameter ratio of 1:1, resulting in the most uniform distribution (Plumlee, 2008).

The 5 wt% of the graphite/UHMWPE composites, as seen in Figures 5(b) and 6(h), showed that individual graphite particles appear to be fully encompassed by the UHMWPE. It confirmed that the melted UHMWPE was able to flow around the graphite particles during the molding process leading to 0.16% of hardness and 16.14% of impact strength increasing in comparison with the UHMWPE.

At the higher graphite content of over 5 wt%, the results in Figures 5 and 6 showed that, in the regions between the UHMWPE powder particles, many graphite particles accumulated. The extremely small crevices between these closely packed particles, along with the high melt viscosity of the UHMWPE, lead to voids where the melted polymer could not penetrate (Plumlee, 2008).

Conclusions

The addition of graphite could reduce the coefficient of friction of the UHMWPE. The 20 wt% of the graphite exhibited the lowest coefficient of friction as compared to the UHMWPE. A decrease in the coefficient of friction is possibly due to the decrease in shear strength. 5 wt% of the graphite/UHMWPE composites exhibited the lowest %weight loss, creating an increase of 0.16% of hardness and 16.14% of impact strength in comparison with the UHMWPE. For the most uniform dispersion, the UHMWPE particle size should be equal to the graphite particle size,

and the results showed that the addition of graphite could improve the friction behavior and the anti-wear ability of the UHMWPE to yield longer performance of a tibia insert.

Acknowledgments

The authors would like to thank IRPC Public Company Limited for support with the ultra-high molecular weight polyethylene powder. This research work was financially supported by Suranaree University of Technology (SUT).

References

- Baena, J. C., Wu, J., and Peng, Z. (2015). Wear performance of UHMWPE and reinforced composites in arthroplasty applications: a review. *Lubricants*, 3:413-436.
- Budinski, K. G. (1997). Resistance to particle abrasion of selected plastics. *Proceedings of the 11th International Conference on Wear of Materials*; April 20-23, 1997; San Diego, CA, USA, 203-204:302-309.
- Difallah, B.B., Kharrat M., Dammaka M., and Monteil, G. (2012). Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. *Mater. Design.*, 34(6):782-787.
- Lahiri, D., Heo, F., Thiesse, M., Durygin, A., Zhang, C., and Agarwal, A. (2014). Nanotribological behavior of graphene nanoplatelet reinforced ultra high molecular weight polyethylene composites. *Tribol. Int.*, 70:165-169.
- Pearle, A.D., Warren, R.F., and Rodeo, S.A. (2005). Basic science of articular cartilage and osteoarthritis. *Clin. Sport. Med.*, 24:1-12.
- Plumlee, K. (2008). Improved performance of ultra-high molecular weight polyethylene for orthopedic applications. [MSc. thesis]. School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Texas A&M University. College Station, TX, USA, 67p.
- Shi, W., Li, X., and Dong, H. (2004). Preliminary investigation into the load bearing capacity of ion beam surface modified UHMWPE. *J. Mater. Sci.*, 39:3183-3186.
- Suresha, B., Chandramohan G., Renukappa, M.N., and Hatna, S. (2007). Mechanical and tribological properties of glass epoxy composites with and without graphite particulate filler. *J. Appl. Polym. Sci.*, 103:2472-2480
- Wang, Q., Zhang, X., and Pei, X. (2010). Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites. *Mater. Design.*, 31:3761-3768.
- Zouari, M., Kharrat, M., and Dammak, M. (2010). Wear and friction analysis of polyester coatings with solid lubricant. *Surf. Coat. Tech.*, 204:2593-2599.

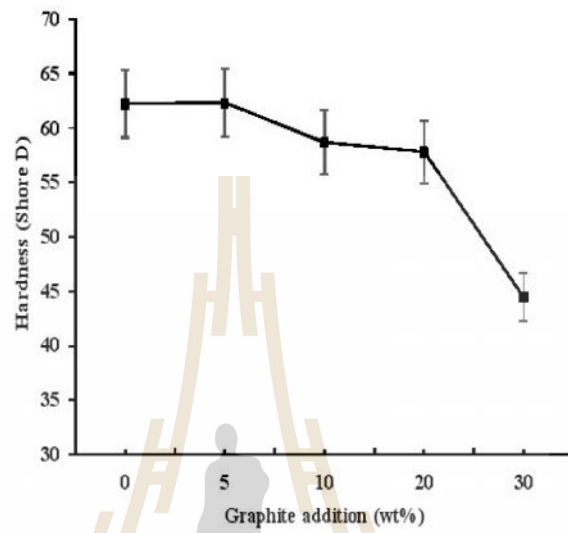


Figure 1. Variations of hardness as a function of graphite addition.

ACCEPTED MANUSCRIPT
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

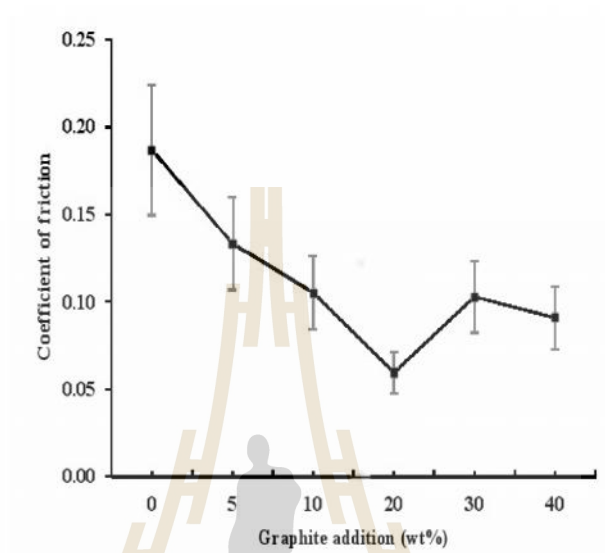


Figure 2. Variations of the coefficient of friction as a function of graphite addition.

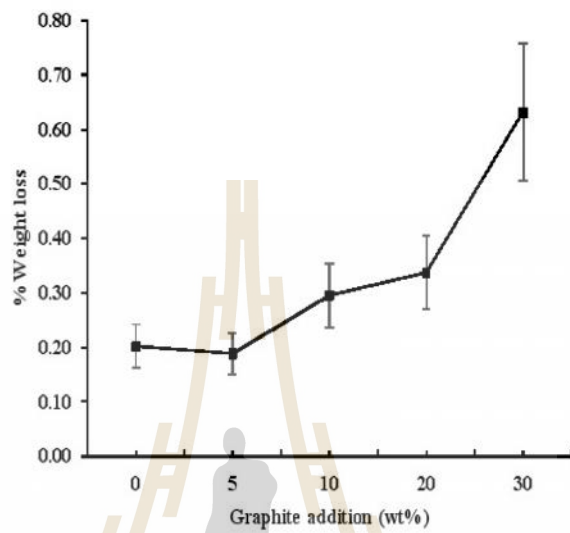


Figure 3. Variations of %weight loss as a function of graphite addition.

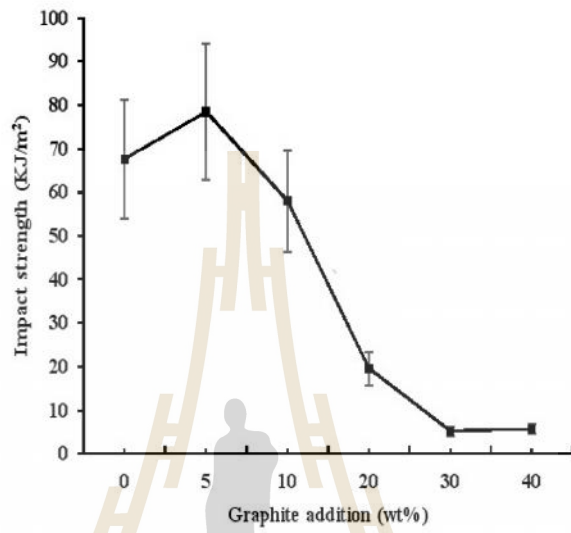


Figure 4. Variations of impact strength as a function of graphite addition.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

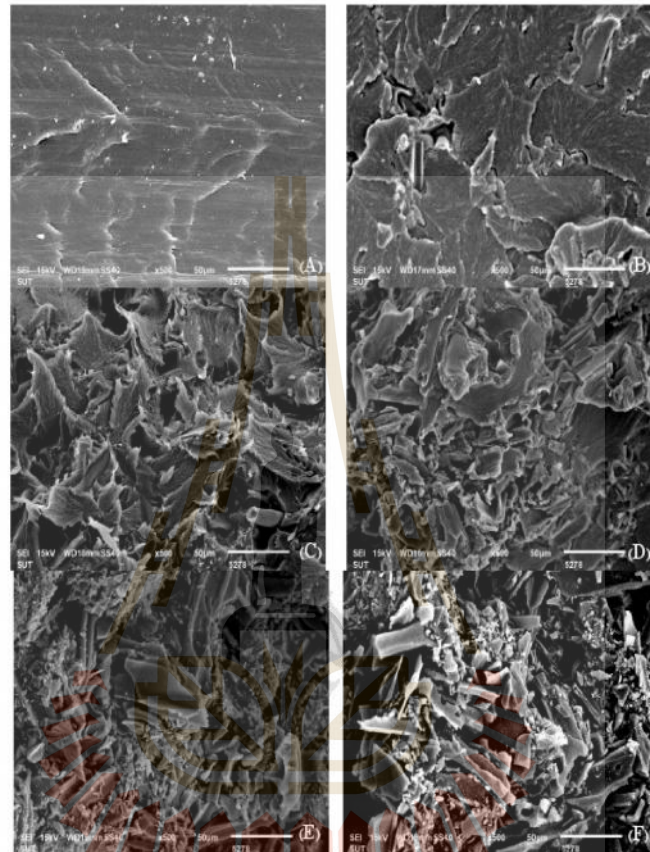


Figure 5. SEM images (magnification = 500x, bar = 50 μm) of the surfaces of unfilled and filled graphite composites:

- (A) UHMWPE
- (B) 5% Graphite
- (C) 10% Graphite
- (D) 20% Graphite
- (E) 30% Graphite
- (F) 40% Graphite

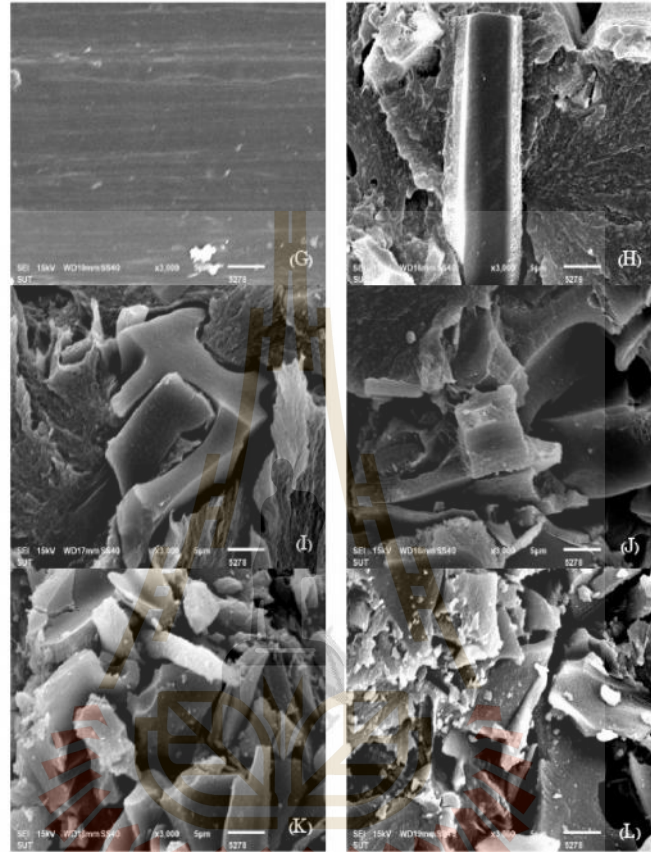


Figure 6. SEM images (magnification = 3000x, bar = 5 μm) of the surfaces of unfilled and filled graphite composites:
 (G) UHMWPE
 (H) 5% Graphite
 (I) 10% Graphite
 (J) 20% Graphite
 (K) 30% Graphite
 (L) 40% Graphite

	สำหรับเจ้าหน้าที่	
	วันรับคำขอ 1 พ.ค. 2560 วันยื่นคำขอ 26 เม.ย. 2560	เลขที่คำขอ 1703000802
คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
<input type="checkbox"/> การประดิษฐ์ <input type="checkbox"/> การออกแบบผลิตภัณฑ์ <input checked="" type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร	ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542	วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
	วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่		
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ อัลตราโวลูเลกุลาร์เวดโพลีเอทิลีนที่มีแกรไฟต์สำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพ		
2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่ ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน		
3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย	3.1 สัญชาติ ไทย 3.2 โทรศัพท์ 4422-4825 3.3 โทรสาร 4422-4814 3.4 อีเมล	
4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้รับโอน <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น		
5. ตัวแทน(ถ้ามี)/ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์)	5.1 ตัวแทนเลขที่ -- 5.2 โทรศัพท์ -- 5.3 โทรสาร -- 5.4 อีเมล	
6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขเกษม วัชรเมย์สกุล อยู่ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 2. นางสาวอรุณมัย เลพล อยู่ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000		
7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร เลขที่ _____ วันยื่น _____ เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ <input type="checkbox"/> คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง <input type="checkbox"/> ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ <input type="checkbox"/> ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ		

หมายเหตุ ในกรณีที่ไมอาจระบุรายละเอียดครบถ้วน ให้จัดทำเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียด
 เพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอรุณมณีย์ เลพล เกิดเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดขอนแก่น เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนแดงราษฎร์สามัคคี จังหวัดขอนแก่น ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนนครขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2558 ระหว่างศึกษาได้มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ง.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี