

บทที่ 5 ผลและอภิปรายผลการดำเนินงาน

ในบทนี้ได้กล่าวถึงในหลายส่วนคือ ผลการทดลองเคลือบเบื้องต้น ซึ่งได้ทำการศึกษาการเตรียมผิวของเซมิคอนดักเตอร์ การเตรียมพอลิเมอร์เคลือบ ผลการยึดเกาะของผิวพอลิเมอร์เคลือบ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของเซมิคอนดักเตอร์เคลือบพอลิเมอร์ และการหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเซมิคอนดักเตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

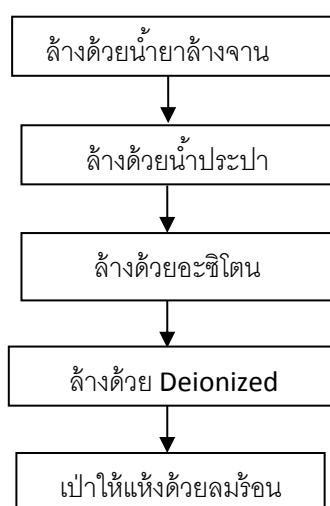
5.1 การทดลองเคลือบเบื้องต้น

การทดลองเคลือบเบื้องต้น แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ การเตรียมผิวโลหะและเซมิคอนดักเตอร์ การเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับเคลือบ การเคลือบพอลิเมอร์ลงบนโลหะ และการอบผิวเคลือบ มีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 การเตรียมผิวโลหะและเซมิคอนดักเตอร์

- การเตรียมผิวโลหะแผ่นสเตนเลสเกรด 316

การเตรียมผิวโลหะแผ่นสำหรับเคลือบพอลิเมอร์ เพื่อนำผิวเคลือบไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เช่น ความเป็นพิษต่อร่างกาย ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทาน การยึดเกาะของผิวเคลือบ เป็นต้น ซึ่งขนาดของโลหะแผ่นตามมาตรฐานของสมบัติที่ต้องการทดสอบ เช่น ขนาดชิ้นงานที่นำไปทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร เป็นต้น และขั้นตอนการทำความสะอาดดังรูปที่ 44



รูปที่ 44 การทำความสะอาดผิวโลหะแผ่น

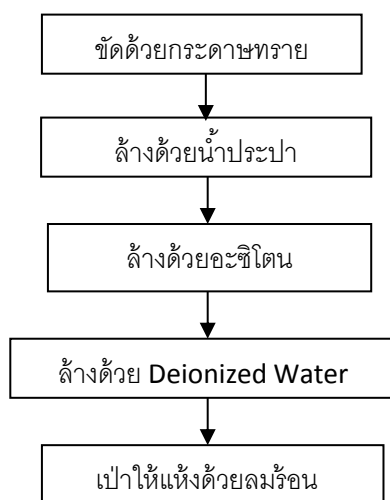
การเตรียมผิวโลหะแผ่นมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อทำความสะอาดคราบน้ำมันที่เกิดขึ้นจากเครื่องตัดและการผลิตโลหะ

2. ล้างด้วยน้ำประปา เพื่อกำจัดน้ำยาล้างจานออก
3. ล้างด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดคราบสารอินทรีย์ที่มีตกค้างบนผิวชิ้นงาน
4. ล้างด้วย Deionized Water เพื่อกำจัดอะซิโตน
5. เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน เพื่อให้ผิวชิ้นงานแห้งก่อนนำไปเคลือบ

- การเตรียมผิวโลหะเซมิคอนดักเตอร์

การเตรียมผิวโลหะเซมิคอนดักเตอร์ด้วยกระดาษทราย และนำไปล้างทำความสะอาด มีขั้นตอนดังรูปที่ 45



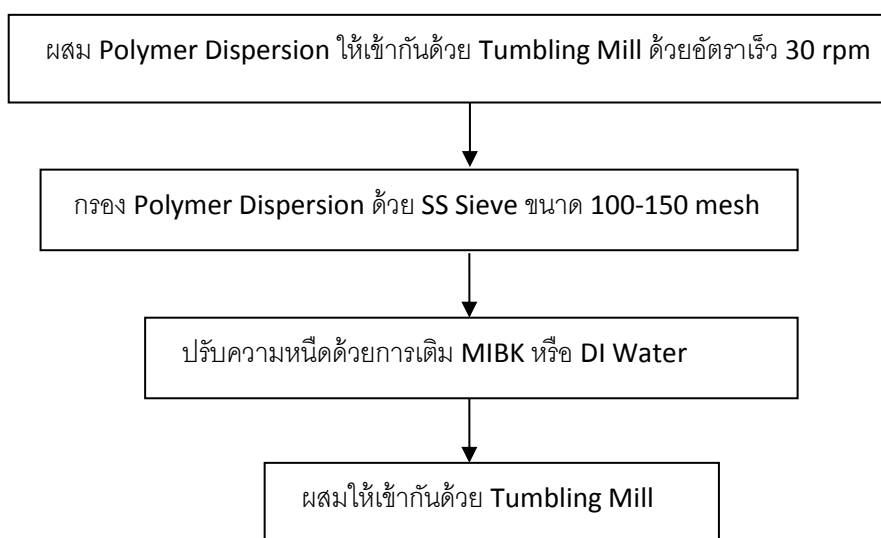
รูปที่ 45 การทำความสะอาดผิวโลหะเซมิคอนดักเตอร์ด้วยกระดาษทราย

5.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับเคลือบ

พอลิเมอร์ที่ใช้ทำการเคลือบมีลักษณะเป็น Aqueous Fluoropolymer Dispersion ซึ่งมีลักษณะตกตะกอน ดังนั้นก่อนนำพอลิเมอร์ไปใช้เคลือบจำเป็นต้องผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง Tumbling Mill ลักษณะเครื่อง Tumbling Mill ดังรูปที่ 46 เมื่อทำการผสมให้เข้ากันแล้วนำพอลิเมอร์ไปกรองด้วย Stainless Steel Sieve ขนาด 100 และ 150 mesh และถ้าต้องการปรับความหนืดของพอลิเมอร์เพื่อให้มีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในขณะเคลือบได้ดี ด้วยการเติม MIBK หรือ Deionized Water ซึ่งขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์และนำไปผสมให้เข้ากันอีกครั้ง สรุปขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับเคลือบดังรูปที่ 47



รูปที่ 46 เครื่อง Tumbling Mill



รูปที่ 47 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับการเคลือบ

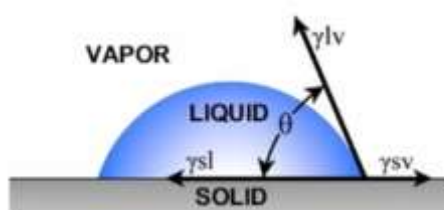
5.1.3 การเคลือบ

ในเบื้องต้นได้ทำการเคลือบด้วยวิธีการ Dip ด้วยมือ เพื่อทดสอบการเตรียมผิวโลหะตัวเซ็่มที่เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเหมาะสมที่นำไปเคลือบพอลิเมอร์หรือไม่ เมื่อทำการเคลือบโดย Dip ด้วยมือ พอลิเมอร์กระจายติดบนผิวของเซ็่มฉัดยา ทั้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงพอลิเมอร์แห้งและสามารถหลุดได้ง่าย เช่นเดียวกับการเคลือบเซ็่มฉัดยาที่ไม่ได้เตรียมผิว ดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 เข็มฉีดยาที่เตรียมผิวด้วยกระดาษทราย

จากการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มฉีดยาพบว่า ในกรณีที่ไม่ได้ทำการกำจัด PDMS ออกจากผิวของตัวเข็มฉีดยาพอลิเมอร์รวมตัวกลายเป็นหยดไม่กระจายตัวบนเข็มฉีดยา เนื่องจาก Surface Tension ของพอลิเมอร์มีมากกว่า Surface Free Energy ของวัสดุรองรับ ตามหลักการ Wetting ดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 Wetting ของพอลิเมอร์เคลือบ

$$\frac{\gamma^{SV} - \gamma^{SL}}{\gamma^{LV}} = \cos\theta \quad [\text{สมการที่ 2}]$$

θ คือ Contact Angle

γ^{SL} คือ The solid/liquid interfacial free energy

γ^{SV} คือ The solid surface free energy

γ^{LV} คือ The liquid surface free energy

พอลิเมอร์ที่สามารถกระจายตัวบนผิววัสดุรองรับได้เมื่อพอลิเมอร์มี Surface Tension ต่ำกว่า Surface Free Energy ของวัสดุรองรับ พอลิเมอร์ที่ได้ออกมาใช้มาเป็นพอลิเมอร์ที่จัดจำหน่ายทั่วไป ซึ่งมีการผสม Surfactant ที่ทำให้ Surface Tension ของพอลิเมอร์ลดลง และเติม Stress Relieve เพื่อลด Internal Stress ของโลหะ

5.1.4 การอบให้ความร้อนของพอลิเมอร์เคลือบ

การอบให้ความร้อนของพอลิเมอร์เคลือบเพื่อให้พอลิเมอร์ที่ผ่านการเคลือบเกิดการ Crosslink และเกิดฟิล์มบนผิวของโลหะ พอลิเมอร์ที่ใช้ทดลองเคลือบคือ One-coat อุณหภูมิในการอบประมาณ 205 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 15 นาที เข็มฉีดยาที่ผ่านการเตรียมผิวมาจุ่มในพอลิ

เมอร์จากนั้นนำไปอบที่ตำแหน่งของเตาอบต่าง ๆ ผลที่ได้ดังรูปที่ 50 จากการสังเกตด้วยตาพบว่า ผิวเรียบติด ทุกบริเวณระดับความสูงและตำแหน่งของการอบในเตา



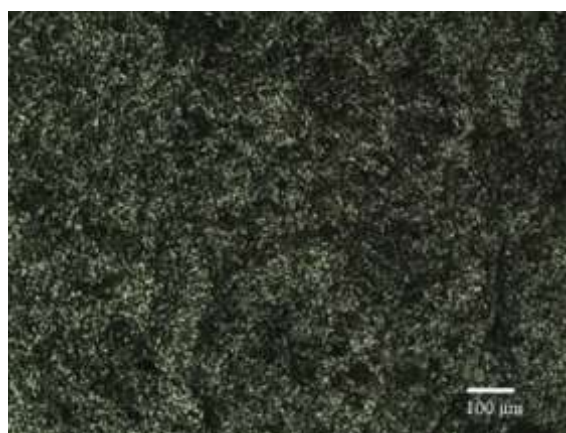
รูปที่ 50 ผิวพอลิเมอร์เคลือบบนตัวเข็มฉีดยาที่ผ่านการอบ

จากนั้นนำเข็มฉีดยาที่เคลือบไปศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วย Optical Microscope กำลังขยาย 20x ได้ผลดังรูปที่ 51



รูปที่ 51 ภาพกำลังขยาย 20x ของผิวเคลือบพอลิเมอร์บนเข็มฉีดยา

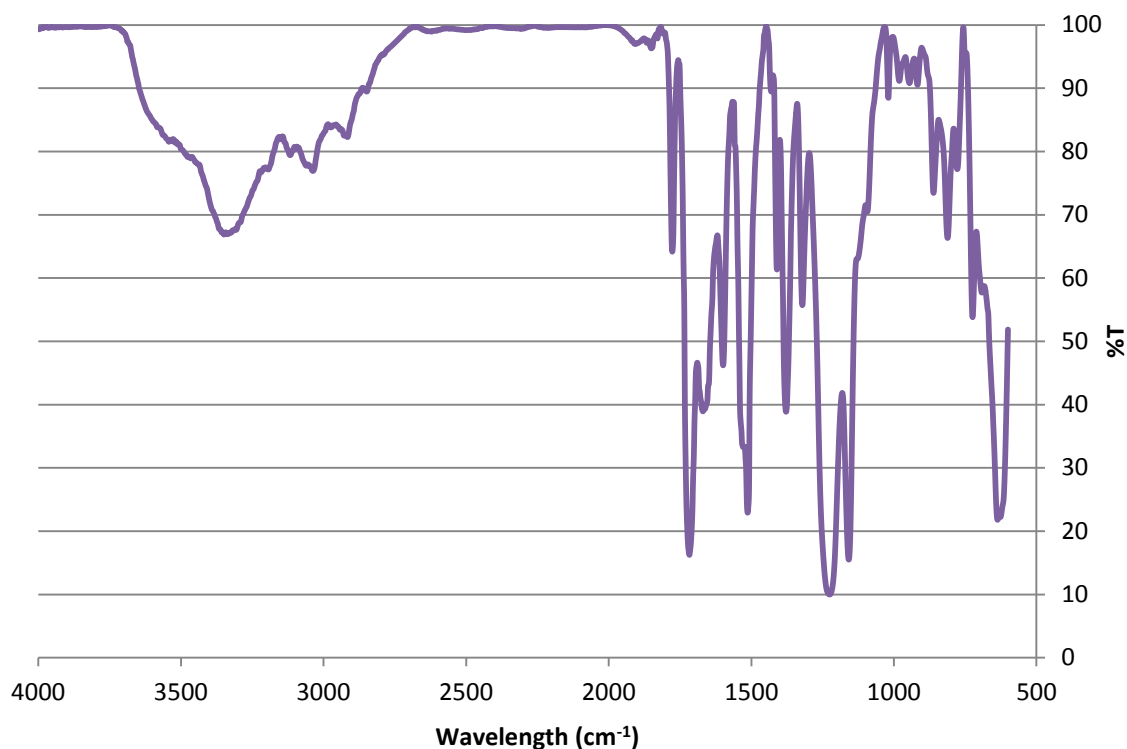
และได้ทำการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนโลหะแผ่นขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร และอบให้ความร้อน และทดสอบลักษณะทางกายภาพด้วย Optical Microscope กำลังขยาย 5x ได้ดังรูปที่ 52 ซึ่งลักษณะของพอลิเมอร์ติดบนโลหะได้ทุกบริเวณ



รูปที่ 52 ภาพกำลังขยาย 5x ของผิวเคลือบพอลิเมอร์บนโลหะแผ่น

5.2 การตรวจสอบชนิดของพอลิเมอร์เคลือบบนโลหะที่ได้ทดลองเคลือบ

การตรวจสอบชนิดของพอลิเมอร์เคลือบบนโลหะที่ได้ทดลองเคลือบ ทำโดยการนำเคมีดยาทดสอบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์และสามารถตรวจสอบชนิดของพอลิเมอร์ได้ ผลการทดสอบดังรูปที่ 53



รูปที่ 53 ตำแหน่ง Wavenumber ต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เคลือบที่ได้ทดลองเคลือบโดยนำไปทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR

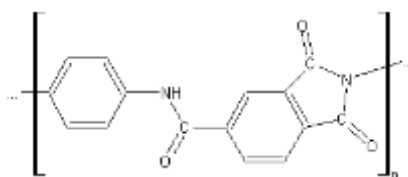
จากรูปที่ 53 พบว่ามีตำแหน่งของ Wavenumber จำนวนมาก และได้นำมาเทียบกับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ตำแหน่งของ Wavenumber และหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่ได้นำมาทดลองเคลือบ

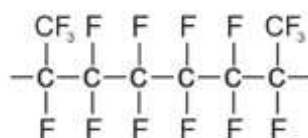
หมู่ฟังก์ชัน	Wavenumber (cm ⁻¹)
C-C	1100-1300
C-H	2850-2970
=C-H	3010-3095
≡C-H	3200-3300
C=C	1610-1680

หมู่ฟังก์ชัน	Wavenumber (cm ⁻¹)
-NH	3300-3500
CF ₂ stretch	1200-1300
CF ₂ deform	610-630
C=O	1690-1760
C-N	1180-1360
C=C (aromatic ring)	1500-1600
Aromatic ring	3010-3100
C-O	1050-1300
-OH	3590-3650

และนำมาเปรียบเทียบกับส่วนผสมของพอลิเมอร์เกรด One-coat มีการผสมของ Fluorinated ethylene propylene resin (FEP) และ Polyamide-imide (PAI) เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 54 และ 55 โดยสูตรโครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่ปรากฏใน Wavenumber จึงสามารถสรุปได้ว่า ผิวนเคลือบมีพอลิเมอร์ 2 ประเภทคือ FEP และ PAI



รูปที่ 54 สูตรโครงสร้างของ Polyamide-imide (PAI)



รูปที่ 55 สูตรโครงสร้างของ Fluorinated ethylene propylene resin (FEP)

5.3 การทดสอบความเหนียวของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เคลือบ

พอลิเมอร์ที่นำมาใช้เคลือบเป็นประเภท FEP เกรด One-coat ซึ่งก่อนทำการเคลือบต้องเตรียมพอลิเมอร์ ลักษณะของพอลิเมอร์เป็นแบบสารแขวนลอย ซึ่งเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอลิเมอร์จะตกตะกอนและมีการแยกชั้นระหว่างพอลิเมอร์และสารละลาย ในระหว่างทำการเคลือบได้ใช้ระยะเวลาประมาณ 20 นาที จึงอาจทำให้พอลิเมอร์มีการตกตะกอนได้ และส่งผลให้ความเหนียวของพอลิเมอร์ลดลง ดังนั้นในแต่ละรอบของการเคลือบต้องทำการผสมให้เข้ากันก่อนทำการเคลือบทุกครั้ง

จากเครื่อง DSCeq ที่ได้พัฒนาขึ้นมีการออกแบบให้มีฐานรองภาชนะบรรจุพอลิเมอร์ ซึ่งมีแท่งแม่เหล็กกวนผสมอยู่ในฐานรองภาชนะ เพื่อใช้สำหรับกวนผสมพอลิเมอร์ให้มีความเข้ากันได้ดี และแท่งแม่เหล็กสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้

ความหนืดของพอลิเมอร์มีผลต่อความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์บนเข็มฉีดยา โดยที่ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติด้านการเป็นฉนวนไฟฟ้าของพอลิเมอร์เคลือบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาความหนืดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เคลือบ การทดสอบความหนืดได้ทำการทดสอบให้สอดคล้องกับการเคลือบจริง

การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์มี 2 วิธีคือ การทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Zahn cup และการทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield RVT viscometer

5.3.1 การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Zahn cup

การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Zahn cup ตามมาตรฐาน ASTM D4212 – 10 Standard Test Method for Viscosity by Dip-Type Viscosity Cups ซึ่งวิธีการทดสอบคือนำ Zahn cup จุ่มลงไปในพอลิเมอร์เหลว และให้พอลิเมอร์เหลวไหลเข้าไปในถ้วยจนเต็ม จากนั้น ยก Zahn cup ขึ้น และเริ่มจับเวลาตั้งแต่พอลิเมอร์เริ่มไหลออกจาก Zahn cup จนถึงพอลิเมอร์ไหลจนหมด Zahn cup (Efflux time) ลักษณะการทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ดังรูปที่ 56 ซึ่งการเลือกใช้เบอร์ของ Zahn cup ต้องคำนึงถึงช่วงความหนืดของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบและ Efflux time ดังตารางที่ 18



รูปที่ 56 การทดสอบความหนืดด้วย Zahn cup

ตารางที่ 18 ช่วงของความหนืดและ Efflux time ของการเลือกไซเบอร์ Zahn cup

Cup number	Viscosity , (cST(mm ² /s))	Efflux time (s)
1	5-60	35-80
2	20-250	20-80
3	100-800	20-80
4	200-1200	20-80
5	400-1800	20-80

และการคำนวณหาค่าความหนืดด้วยการเปลี่ยนค่า Efflux มีดังสมการที่ 3

$$V = K(t - c) \quad [\text{สมการที่ 3}]$$

โดยที่

V = kinematic viscosity, cST (mm²/s)

t = efflux time (s)

K, c = appropriate constants จากตารางที่ 19

ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณหาความหนืดขึ้นอยู่กับเบอร์ของ Zahn cup ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่าคงที่สำหรับการคำนวณความหนืดตามเบอร์ของ Zahn cup

Cup number	K	c
1	1.1	29
2	3.5	14
3	11.7	7.5
4	14.8	5
5	23	0

ผลจากการทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ที่ได้ผ่านการเตรียมพอลิเมอร์ด้วยการผสมด้วยเครื่อง Tumbling mill 30 rpm เป็นเวลา 30 นาที ได้เลือกไซเบอร์ Zahn cup เบอร์ 2 ได้ผลค่า Efflux time 24.8 วินาที และนำมาคำนวณได้ผลความหนืดของพอลิเมอร์ 37.92 centistoke

จากข้อมูล Fact sheet ของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบได้ทำการระบุช่วงของความหนืดคือ 400-1000 Centipoise แต่การทดสอบความหนืดด้วย Zahn cup มีหน่วยเป็น Centistoke จึงทำการเปลี่ยนหน่วยของความหนืดทำได้ด้วยการคูณค่าของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ดังสมการที่ 4

$$\text{Centipoise} = \text{Centistoke} \times \text{Density}$$

[สมการที่ 4]

ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่ทดสอบจาก Fact sheet เท่ากับ 1.04 kg/l ดังนั้นสามารถคำนวณความหนืดของพอลิเมอร์ได้ 39.43 cP ซึ่งไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จาก Fact sheet ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะสมกับการทดสอบหาค่าความหนืดของพอลิเมอร์

5.3.2 การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Brookfield RVT viscometer

การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Brookfield RVT viscometer ASTM ASTM D2196 - 10 Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer โดยลักษณะเครื่อง Brookfield RVT viscometer ดังรูปที่ 57

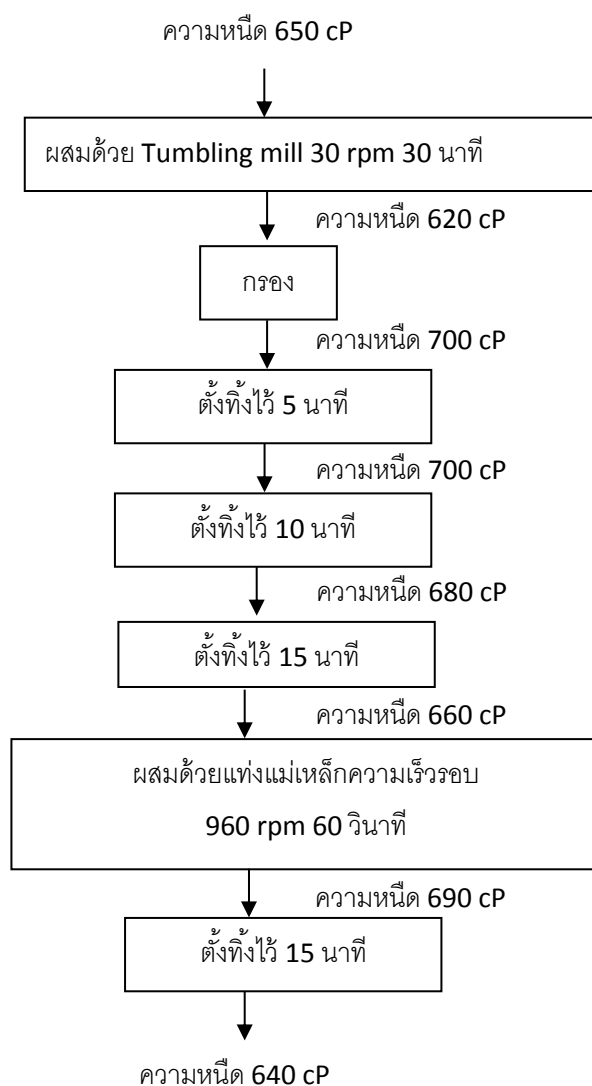


รูปที่ 57 เครื่อง Brookfield RVT viscometer

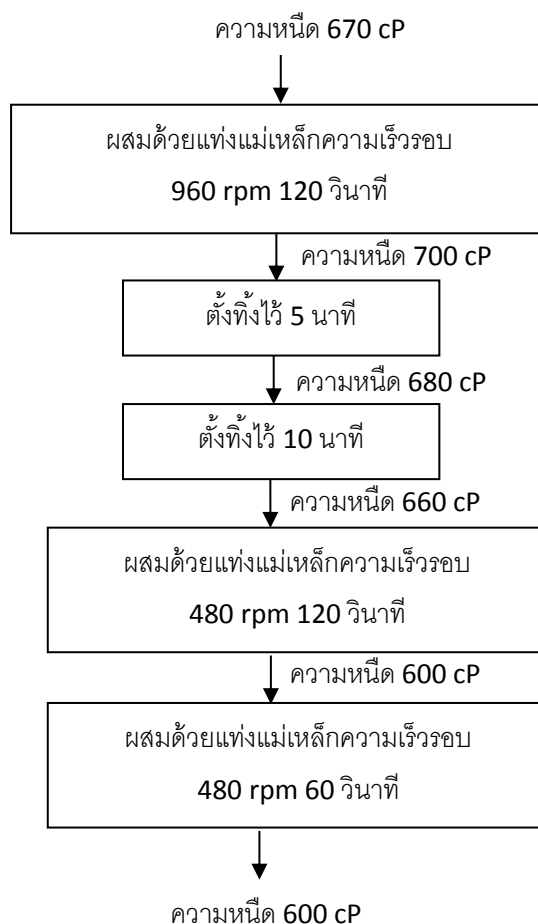
จากข้อมูล Fact sheet ของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบ ได้ระบุใช้ Spindle 2 หมุนด้วยความเร็ว 20 rpm วัดความหนืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้ค่าความหนืดอยู่ในช่วง 400-1000 Centipoise ดังนั้นในการทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ จึงทำการเลือกใช้ Spindle 2 ทดสอบความเร็วรอบ 20 rpm และวัดที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์โดยทำการทดสอบให้ใกล้เคียงกับการเคลือบพอลิเมอร์บนเข็มฉีดยาจริง จากการเตรียมพอลิเมอร์ และทำการเคลือบไปครั้งแรก ได้มีการตั้งพอลิเมอร์ไว้ จากนั้นต้องทำการผสมพอลิเมอร์อีกครั้งด้วยแท่งแม่เหล็กที่ฐานรองที่บรรจุพอลิเมอร์ของเครื่อง

เคลือบเซราม โดยมีการปรับความเร็วรอบและระยะเวลาในการผสม ได้ผลการทดสอบความหนืดในรูปที่ 58 และ 59



รูปที่ 58 ความหนืดของพอลิเมอร์ในระหว่างการเคลือบ



รูปที่ 59 ความหนืดของพอลิเมอร์ที่ผสมด้วยความเร็วรอบและเวลาต่างกัน

จากการทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ พบว่าความหนืดของพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 600-750 cP พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย เมื่อทำการวางพอลิเมอร์ทิ้งไว้โดยไม่มีการผสมส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผสมพอลิเมอร์อีกครั้งด้วยแท่งแม่เหล็กที่ถูกตั้งค่าตั้งค่าความเร็วรอบตามมอเตอร์ของเครื่องเคลือบเข็มทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์สูงขึ้น ซึ่งความเร็วรอบที่มีผลต่อความหนืดของพอลิเมอร์คือ ความเร็วรอบที่มากกว่า 480 rpm และระยะเวลาในการผสมพอลิเมอร์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อความหนืดของพอลิเมอร์คือ ระยะเวลาในการผสมมากกว่า 60 วินาที อีกทั้งพอลิเมอร์ที่ใช้ในระบบมากกว่า 1 ชั่วโมงขึ้นไปส่งผลให้ความหนืดพอลิเมอร์สูงขึ้น

5.4 การศึกษาการทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายของวัสดุ

ได้ทำการศึกษาการทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายของวัสดุ พบว่า มาตรฐานที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ทางการแพทย์มี 2 มาตรฐาน คือ ASTM F748 Standard Practice for Selecting Generic Biological Test Methods for Materials and Devices [6] และ ISO 10993 Biological Evaluation of Medical Devices [5] สำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดข้อบังคับมาตรฐานผลิตภัณฑ์

อุตสาหกรรมสำหรับการประเมินทางชีวภาพของเครื่องมือแพทย์โดยยึดตามมาตรฐาน ISO 10993 เป็นการทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายของเครื่องมือแพทย์ แต่ในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเบื้องต้นของมาตรฐานทั้ง 2 มาตรฐาน มีรายละเอียดดังนี้

มาตรฐาน ASTM F748 Standard Practice for Selecting Generic Biological Test Methods for Materials and Devices จะทำการแบ่งประเภทอุปกรณ์ทางการแพทย์ว่าเป็นประเภทใดและมีจะต้องทำการทดสอบความเป็นพิษด้วยวิธีใดบ้าง จากการศึกษามาตรฐาน ASTM F748 ได้มีการจัดประเภทของเข็มฉีดยาอยู่ในประเภทของอุปกรณ์ที่มีการสัมผัสเนื้อเยื่อร่างกายและเลือด (Devices Communicating with Body Tissues and Fluids) และอยู่ในประเภทย่อย Intraoperative คือจะมีการสัมผัสร่างกายที่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และวิธีในการทดสอบสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์มี 6 ประเภทมีรายละเอียดดังตารางที่ 20 ซึ่งมาตรฐาน ASTM F748 ยังไม่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และเครื่องมือในการทดสอบยังมีไม่ครบถ้วน

ตารางที่ 20 วิธีการทดสอบความเป็นพิษของเข็มฉีดยา [6]

วิธีการทดสอบ	ทดสอบ	มาตรฐาน	สถานที่ทดสอบ
Cell Culture Cytotoxicity	In vitro	ASTM F813 , ASTM F895	MTEC และ มหาวิทยาลัยมหิดล
Sensitization Test	In vivo	ASTM F720	-
Skin Irritation or Intracutaneous	In vivo	ASTM F719	-
Systemic Toxicity , Acute or Subchronic	In vivo	ASTM 750	-
Pyrogen Test	In vivo		-

มาตรฐาน ISO 10993 Biological Evaluation of Medical Devices เป็นมาตรฐานในการใช้ทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายของอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกและสำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับการประเมินทางชีวภาพของเครื่องมือแพทย์ โดยให้มีการใช้มาตรฐาน ISO 10993-5 : Biological Evaluation of medical devices-Part 5: Test for in Vitro Cytotoxicity : เป็นการทดสอบภายนอกในร่างกายเพื่อประเมินความเป็นพิษต่อเซลล์ และจากมาตรฐานดังกล่าวได้ให้มีการแบ่งประเภทของอุปกรณ์ทางการแพทย์ว่าจำเป็นอย่างที่จะต้องทดสอบด้วยวิธีการใดบ้าง ซึ่งมีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน 10993-1 Evaluation and Testing และต้องเตรียมวัสดุทดสอบจากอุปกรณ์ทางการแพทย์ สายพันธุ์และชนิดของเซลล์ที่ใช้ทดสอบ อาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์ การเตรียมเพาะเลี้ยงไว้ มีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน 10993-12 Sample Preparation and Reference Materials

ผลที่ได้จากการศึกษามาตรฐาน 10993-1 ได้จัดประเภทของเซมิคอนดักเตอร์เป็นอุปกรณ์การแพทย์ที่มีการใช้งานแบบ Short Term คือ มีการใช้งานที่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จะต้องทดสอบด้วยวิธี In Vitro Cytotoxicity ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้จะมีการทดสอบอยู่ 2 แบบ คือ การทดสอบแบบสัมผัสโดยตรงกับวัสดุทดสอบ (Direct Contact Tests) และการทดสอบแบบสัมผัสทางอ้อมกับวัสดุทดสอบ (Indirect Contact Tests) โดยผลการทดสอบจะสามารถบอกระดับความเป็นพิษต่อร่างกาย

ผู้วิจัยได้เลือกมาตรฐาน ISO 10993 ในการทำวิจัยในขั้นตอนถัดไป เนื่องจากเป็นไปตามข้อบังคับมาตรฐานสำหรับเครื่องมือแพทย์ และจากการสืบค้นเบื้องต้นพบว่ามีห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายมีอยู่ที่ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งการทดสอบยึดหลักวิธีการ Cell Culture Cytotoxicity โดยแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ Agar Overlay Test , Agar Diffusion Test เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดการทดสอบต่าง ๆ ได้มีการระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 7405 Dentistry-Evaluation of Biocompatibility of Medical Devices Used in Dentistry

ผู้วิจัยได้ทำการติดต่อห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในการศึกษาวิธีการทดสอบความเป็นพิษของวัสดุด้วยวิธี Agar Diffusion Test ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเบื้องต้นว่าวัสดุนั้นสามารถใช้กับทางการแพทย์ได้หรือไม่ สรุปขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. การเตรียมวัสดุโลหะสแตนเลสเคลือบพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

เตรียมแผ่นโลหะวัสดุสแตนเลสเกรด 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เคลือบพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนประเภท One-coat ลงบนแผ่นโลหะสแตนเลส 8 ตัวอย่างด้วยวิธีการจุ่มด้วยมือ และอบให้ความร้อนจนเกิดฟิล์มเคลือบบนแผ่นโลหะสแตนเลส ส่งชิ้นงานตัวอย่างวัสดุโลหะสแตนเลสเคลือบพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนกับทางห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เพื่อทำการทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายของชิ้นงานตัวอย่าง

2. การเตรียมเนื้อเยื่อสำหรับการทดสอบ

นำ Cell line (เซลล์หนู) ออกจากเครื่อง Incubator (เครื่องเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นการจำลองให้เหมือนอยู่ในร่างกาย โดยควบคุมการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) จากนั้นนำมาปรับจำนวน Cell line โดยผสมกับ Cell Medium (อาหารเลี้ยงเซลล์หนู เตรียมจาก 10% MEM ผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต) แบ่งสารละลายมาบางส่วนทำการย้อมสีเซลล์หนูด้วยการเติม Trypan blue ถ้าเซลล์ตายจะติดสีน้ำเงิน จากนั้นนำจำนวนเซลล์โดยใช้ Microscopes และทำการประมาณ เมื่อได้เซลล์หนูที่ต้องการ 2.5×10^5 cells/ml นำสารละลาย Cell line ที่เตรียมได้ แบ่งโดยใช้ Pipette ใส่ใน Petri dish สำหรับใส่สารเซลล์หนูทดสอบประมาณ 10 ml และนำไปเก็บใน Incubator 5%CO₂ อุณหภูมิ 37 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. การเตรียม Agar และทดสอบความเป็นพิษของวัสดุ

นำ Agar แข็งไปอุ่นที่ 100 °C ในอ่างน้ำร้อน จากนั้นนำไปทำให้เย็นลงที่ 48°C และนำไปผสมกับ Cell Medium และไปอุ่นในอ่างน้ำร้อน 48°C 15 นาที จากนั้นนำสารละลายไปเทลงแต่ละ Petri dish บน Cell line ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนแรก ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ทำให้วุ้นแข็งตัวและป้องกันไม่ให้แสงผ่านด้วยฟอยล์ จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานตัวอย่าง แผ่น Negative Control และ Positive Control ซึ่งเป็นแผ่นตัวอย่างพลาสติกที่มีความเป็นพิษมาติดบน Agar และนำไปเก็บใน Incubator 5%CO₂ อุณหภูมิ 37±2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4. การประเมินความเป็นพิษของวัสดุ

ตรวจสอบ Decolorization Zone รอบบริเวณชิ้นงานตัวอย่าง บริเวณ Positive Control และ บริเวณ Negative Control

การประเมินความเป็นพิษของวัสดุจากการอ่าน Decoloration ที่ปรากฏรอบชิ้นงานตัวอย่าง และวัดระยะจากของของชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นมาเทียบระยะ Decoloration ที่แสดงความเป็นพิษของวัสดุ ในตารางที่ 15 และทำการประเมินจากระดับ Lysis Index โดยการสังเกตลักษณะของเซลล์ รอบชิ้นงานตัวอย่างว่ามียังมีความสมบูรณ์และไม่ตายในระดับใด เทียบกับ Lysis Index ในตารางที่ 21 และจากนั้นนำผล Decoloration Index และ Lysis Index มาเทียบประเมินผล Cell Response ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 21 Decoloration Index

Decoloration Index	Description
0	No detectable decolorization zone around or under specimen
1	Decolorization zone limited to area under specimen
2	Decolorization zone extends less than 0.5 cm beyond specimen
3	Decolorization zone extends 0.5 cm to 1.0 cm beyond specimen
4	Decolorization zone extends further than 1.0 cm beyond specimen but does not involve entire dish
5	Decolorization zone involves entire dish

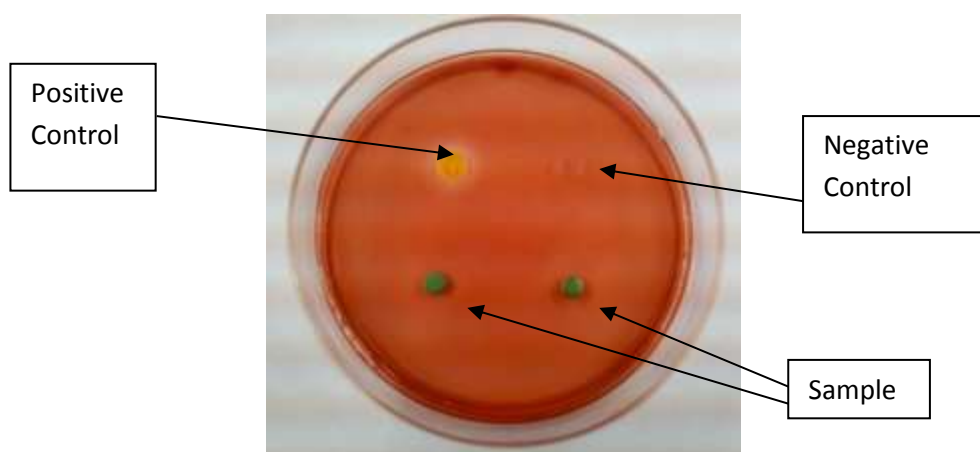
ตารางที่ 22 Lysis Index

Lysis Index	Description
0	No observable cytotoxicity
1	<20% of the decolorized zone affected
2	20% to < 40% of the decolorized zone affected
3	40% to < 60% of the decolorized zone affected
4	60% to < 80% of the decolorized zone affected
5	>80% of the decolorized zone affected

ตารางที่ 23 Cell Response

Scale	Cell response	Interpretation
0	0	Non cytotoxic
1	1	Mildly cytotoxic
2	2 to 3	Moderately cytotoxic
3	4 to 5	Severely cytotoxic

ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อร่างกายของวัสดุโลหะเคลือบตามรูปที่ 60 พบว่าไม่มี Decolorization Zone รอบบริเวณชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 2 ชิ้น และจากผลรายงานการทดสอบตามเอกสารภาคผนวก ง ระบุว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ส่งทดสอบไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย



รูปที่ 60 ผลการทดสอบของชิ้นงานตัวอย่าง Negative Control และ Positive Control

5.5 การศึกษาการทดสอบการยึดเกาะของผิวพอลิเมอร์เคลือบบนโลหะ

การทดสอบการยึดเกาะของผิวพอลิเมอร์เคลือบบนโลหะได้ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3359 Standard test methods for methods for measuring adhesion by tape test โดยใช้ทดสอบการยึดเกาะด้วยเครื่อง Cross-cut Tester ดังรูปที่ 61 มาตัดตามขวางและแนวตั้ง ใช้แปรงปัดเศษพอลิเมอร์ จากนั้นนำเทปกาวมีแรงยึด 40 นิวตันมาติดใช้กันอย่างลบบนเพื่อทำให้ติดแน่น จากนั้นดึงเทปกาวออก แล้วอ่านผลโดยสังเกตด้วยตาผ่านแว่นขยาย อ่านค่าบริเวณที่ผิวพอลิเมอร์หลุดและเทียบผลกับระดับการหลุดของผิวเคลือบตามมาตรฐาน ดังรูปที่ 62

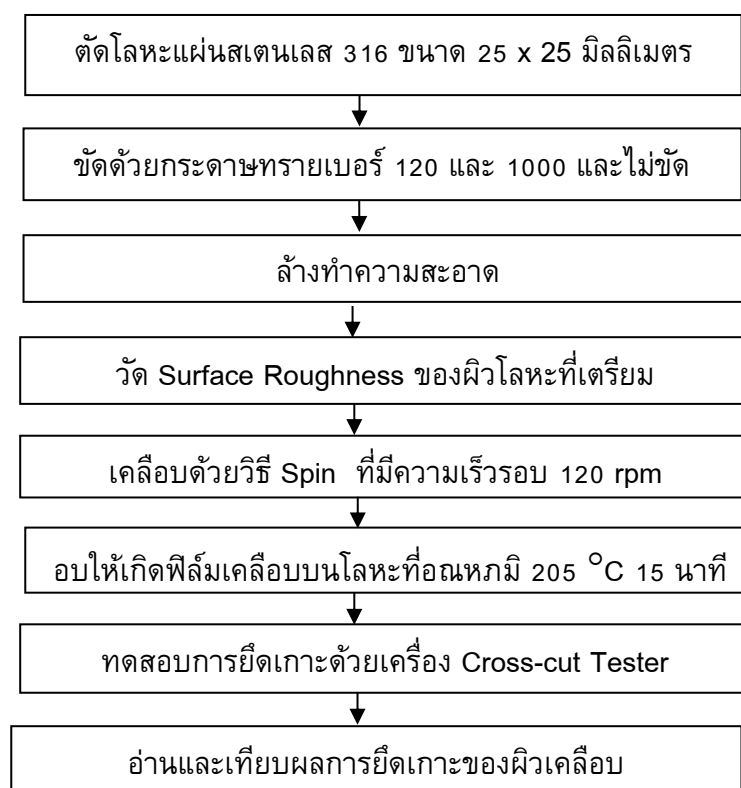


รูปที่ 61 เครื่อง Cross-cut Tester

CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT AREA REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

รูปที่ 62 ระดับการหลุดของผิวเคลือบพอลิเมอร์ [31]

การทดสอบการยึดเกาะของพอลิเมอร์เคลือบบนโลหะที่ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเตรียมผิวโลหะที่มีความหยาบผิวต่างกันจะมีผลต่อการยึดเกาะของพอลิเมอร์เคลือบหรือไม่ ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 63



รูปที่ 63 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและการทดสอบการยึดเกาะของพอลิเมอร์บนโลหะ

ผลการวัดความหยาบผิวโลหะที่มีการเตรียมผิวต่างกันในตารางที่ 24 และผิวพอลิเมอร์เคลือบที่ผ่านทดสอบการยึดเกาะบนโลหะแสดงในรูปที่ 64 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบด้วย Optical Microscopy ด้วยกำลังขยาย 5x ดังรูปที่ 65 และศึกษาลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 66

ตารางที่ 24 ความหยาบผิวโลหะที่มีการเตรียมผิวต่างกัน

การเตรียมผิวโลหะ	ความหยาบผิว (ไมครอน)
ไม่ขัดด้วยกระดาษทราย	0.11-0.38 (ค่าความหยาบผิวไม่สม่ำเสมอ)
ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120	0.35-0.45
ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000	0.10-0.15



การเตรียมผิวไม่ขัดด้วยกระดาษทราย



การเตรียมผิวขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120

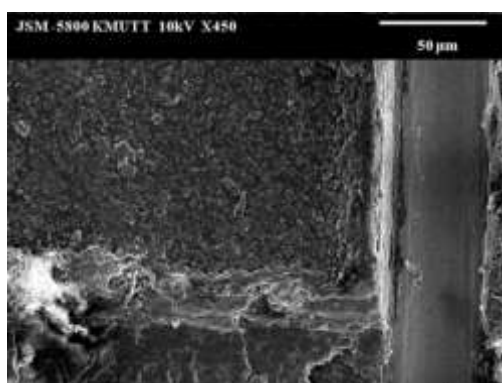


การเตรียมผิวขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000

รูปที่ 64 ผิวพอลิเมอร์เคลือบที่ผ่านการทดสอบการยึดเกาะบนโลหะ



รูปที่ 65 ผิวพอลิเมอร์เคลือบที่ผ่านการทดสอบการยึดเกาะบนโลหะจาก Optical Microscope



รูปที่ 66 ผิวพอลิเมอร์เคลือบที่ผ่านการทดสอบการยึดเกาะบนโลหะจาก SEM

ผลการทดสอบการยึดเกาะของพอลิเมอร์เคลือบที่มีการเตรียมผิวทั้ง 3 วิธี ได้ผลการทดสอบที่เหมือนกันคือ มีระดับการยึดเกาะของผิวเคลือบ 5B หรือ 0% ของพื้นที่ผิวเคลือบที่หลุด และภาพกำลังขยาย 5x ของผิวพอลิเมอร์ที่ถูกตัดด้วย Cross-cut Tester พบว่าผิวพอลิเมอร์เคลือบไม่หลุดลอกมีการยึดเกาะที่สมบูรณ์ จึงสามารถสรุปได้ว่าความหยาบผิวไม่มีผลต่อการยึดเกาะของพอลิเมอร์เคลือบบนโลหะ ซึ่งการเตรียมผิวโลหะของเข็มนัดยาที่จะเคลือบด้วยพอลิเมอร์ อาจไม่จำเป็นที่ต้องเตรียมผิวด้วยการขัดกระดาษทราย โดยที่สอดคล้องกับผลการทดสอบดังกล่าว

5.6 การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มนัดยา

ตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาเป็นตัวแปรจากกระบวนการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มนัดยาด้วยเครื่องเคลือบเข็มนัดยาที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งค่าของตัวแปรที่ได้กำหนดอยู่ในช่วงความเร็วมอเตอร์ของเครื่องเคลือบเข็มนัดยา โดยเลือกค่าสูงสุดและต่ำสุดของความเร็ว และได้กำหนดค่าของตัวแปรดังตารางที่ 25 จากนั้นทำการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มนัดยาตามตัวแปรที่กำหนด และนำไปทดสอบความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบ สมบัติด้านความเป็นฉนวนไฟฟ้าและสมบัติด้านแรงเสียดทานของผิวเคลือบ เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรของกระบวนการเคลือบที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มนัดยา

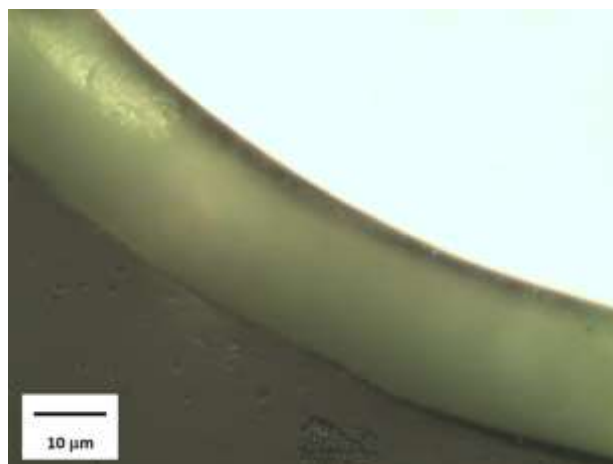
ตารางที่ 25 ค่าของตัวแปรของกระบวนการเคลือบ

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
เบอร์เข็มนัดยา	18G, 24G, 26G
ความเร็วในการดึงชุดจับยึดเข็มนัดยา (mm/s)	5, 25
ความเร็วรอบในการหมุนชุดจับยึดเข็มนัดยา (rpm)	0, 60, 720
ระยะเวลาในการจุ่มเข็มนัดยาในพอลิเมอร์ (s)	10, 60

5.6.1 การทดสอบความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบบนเข็มนัดยา

ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบบนเข็มนัดยาขึ้นอยู่กับขนาดของเข็มนัดยา และตัวแปรที่เกิดจากกระบวนการเคลือบ ดังนั้นจึงทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความหนา โดยได้กำหนดตัวแปรสำหรับการทดลองดังตารางที่ 67

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบหาความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบ ได้ทำการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มนัดยาตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา จากนั้นทำการหล่อเรซิน (Cold-mould resin) ทำการตัดตามขวางของตัวเข็มนัดยา และวัดขนาดของฟิล์มเคลือบพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Optical microscope ตัวอย่างรูปสำหรับวัดขนาดของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบกำลังขยาย 100x ดังรูปที่



รูปที่ 67 ความหนาของฟิล์มเคลือบพอลิเมอร์กำลังขยาย 100X

ผลการทดสอบความหนาฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบที่กระบวนการเคลือบต่างกัน และขนาดของเข็มฉีดยาที่ต่างกันได้ผลดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ความหนาฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบ

เบอร์เข็มฉีดยา	ความเร็วในการดึงชุดจับยึดเข็มฉีดยา (mm/s)	ความเร็วรอบในการหมุนชุดจับยึดเข็มฉีดยา (rpm)	ระยะเวลาในการจุ่มเข็มฉีดยาในพอลิเมอร์ (s)	ความหนาฟิล์ม (micron)
18G	5	0	10	24.8
18G	25	0	10	34.6
18G	25	60	10	31.25
18G	25	720	10	25.6
24G	25	0	10	11.7
24G	25	0	60	17.7
26G	25	0	10	11.3

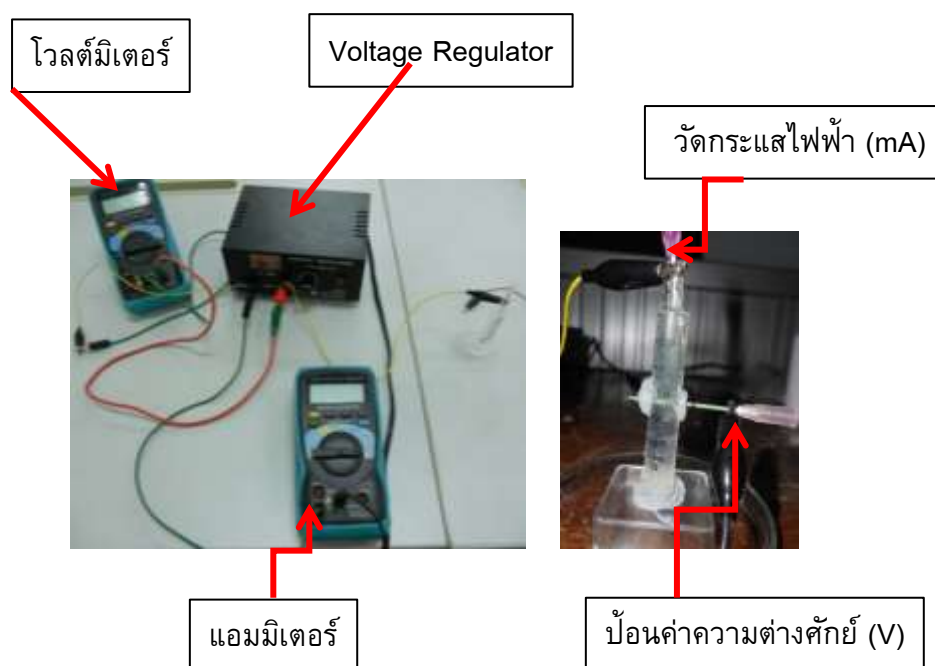
จากตารางที่ 26 การทดสอบความหนาฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่าความหนาฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่

- พื้นที่ของวัสดุรองรับหรือขนาดของเข็มฉีดยา หากพื้นที่ของวัสดุรองรับมีขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ในการเคลือบของพอลิเมอร์มาก ทำให้ความหนาฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบหนา
- ความเร็วในการดึงชุดจับยึดเข็มฉีดยา เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นประเภท Non-newtonian แบบ shear thickening ซึ่งเมื่อได้รับ shear rate สูง ส่งผลให้ความหนาฟิล์มหนาและเมื่อความเร็วในการดึงชุดจับยึดเข็มฉีดยาสูง ทำให้เข็มฉีดยามีระยะเวลาของพอลิเมอร์ที่ถูกแรงดึงดูดของโลกดึงดิ่งลงมีน้อย จึงทำให้ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์สูงอีกด้วย

- ความเร็วรอบในการหมุนชุดจับยึดเข็มฉีดยา เนื่องจากพอลิเมอร์เคลือบที่มีความหนาเกินไปบนวัสดุรองรับจะถูกกำจัดออกด้วยการหมุนแกนชุดจับยึดเข็มฉีดยา ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนชุดจับยึดเข็มฉีดยาสูงจะทำให้ความหนาฟิล์มพอลิเมอร์บาง
- ระยะเวลาในการจุ่มเข็มฉีดยาในพอลิเมอร์ ส่งผลจากได้มีเวลาในการเรียงตัวและยึดเกาะบนผิววัสดุรองรับมีมาก จึงทำให้ความหนาของฟิล์มเคลือบสูง

5.6.2 การทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์

การทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของผิวเคลือบพอลิเมอร์บนเข็มฉีดยา ได้ทำการทดสอบโดยการป้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) จาก Voltage Regulator ไปยังบริเวณโลหะของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ ซึ่งเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ติดตั้งอยู่ภายในสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ และต่อสายไฟไปยังโลหะอีกส่วนที่สัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้า เมื่อมี Voltage Breakdown เกิดขึ้นที่บริเวณผิวเคลือบพอลิเมอร์ของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ โลหะดังกล่าวจะรับค่ากระแสไฟฟ้าและแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าที่แอมมิเตอร์ในหน่วยมิลลิแอมแปร์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไม่ควรเกินในการใช้งานคือ 120 มิลลิแอมแปร์จะทำให้กล้ามเนื้อตายและหัวใจวายได้ทันที ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบฉนวนไฟฟ้างดรูปที่ 68



รูปที่ 68 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์และเข็มฉีดยาทั่วไป

เบอร์ เข็มฉีดยา	ความเร็วในการดึง ชุดจับยึดเข็มฉีดยา (mm/s)	ความเร็วรอบในการ หมุนชุดจับยึดเข็มฉีดยา (rpm)	ระยะเวลาในการจุ่มเข็ม ฉีดยาในพอลิเมอร์ (s)	ความต่าง ศักย์ (V)
18G	5	0	10	5
18G	25	0	10	6
18G	25	60	10	4
18G	25	720	10	4
24G	25	0	10	4
24G	25	0	60	4
26G	25	0	10	3

จากผลการทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ พบว่าเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ที่ได้สามารถใช้งานในช่วงที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 3-6 โวลต์ ซึ่งเครื่อง

Electromyography (EMG) ที่ใช้ในการรักษาภาวะกล้ามเนื้อหดเกร็งได้ใช้ค่าความต่างศักย์ประมาณ 40 mV ความถี่ 1 pps และช่วงระยะเวลาในการรักษา 0.1 ms ซึ่งการนำเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ไปใช้กับเครื่องดังกล่าวจำเป็นต้องสามารถใช้งานได้ในช่วงการใช้งานดังกล่าว จากผลการทดสอบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ดังตารางที่ 27 พบว่าเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์สามารถใช้งานได้ในทุกตัวแปรของกระบวนการเคลือบ

5.6.3 การทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์

การทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Texture analyzer ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดย Texture analyzer ที่ใช้มีขนาด Load cell 50 นิวตัน และได้ทำ Probe เพื่อใช้สวมเข็มฉีดยาในการทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยา ลักษณะของเครื่อง Texture analyzer มีดังรูปที่ 69 โดยเคลื่อนที่เข็มฉีดยาลงไปยัง Rubber stopper ดังรูปที่ 70

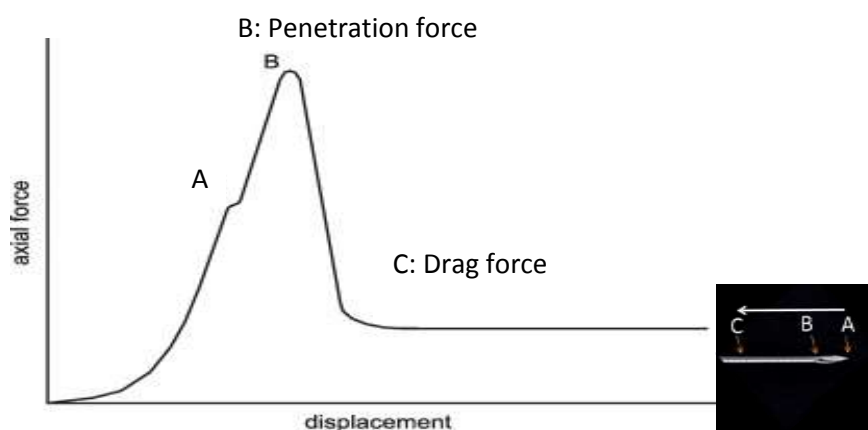


รูปที่ 69 เครื่อง Texture analyzer



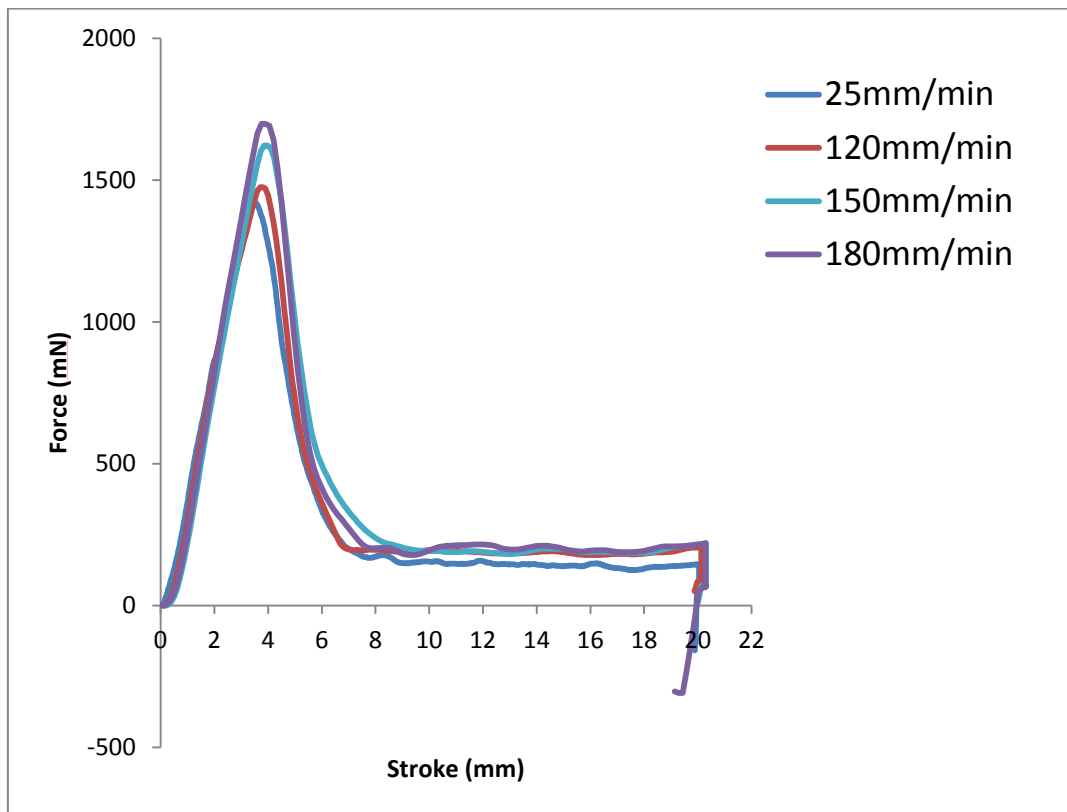
รูปที่ 70 Rubber stopper ที่ใช้วัดแรงเสียดทาน

ลักษณะกราฟที่ทำการทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยา ดังรูปที่ 71 ซึ่งตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งในการเริ่มที่เข็มเข้าไปใน Rubber stopper และเมื่อปลายปากของเข็มฉีดยาที่ตำแหน่ง B และเมื่อเลื่อนไปยังตัวเข็มฉีดยาเป็นการตำแหน่ง C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สามารถบอกเป็นนัยได้ของขนาดของแรงเสียดทานของผิวเคลือบพอลิเมอร์บนเข็มฉีดยา



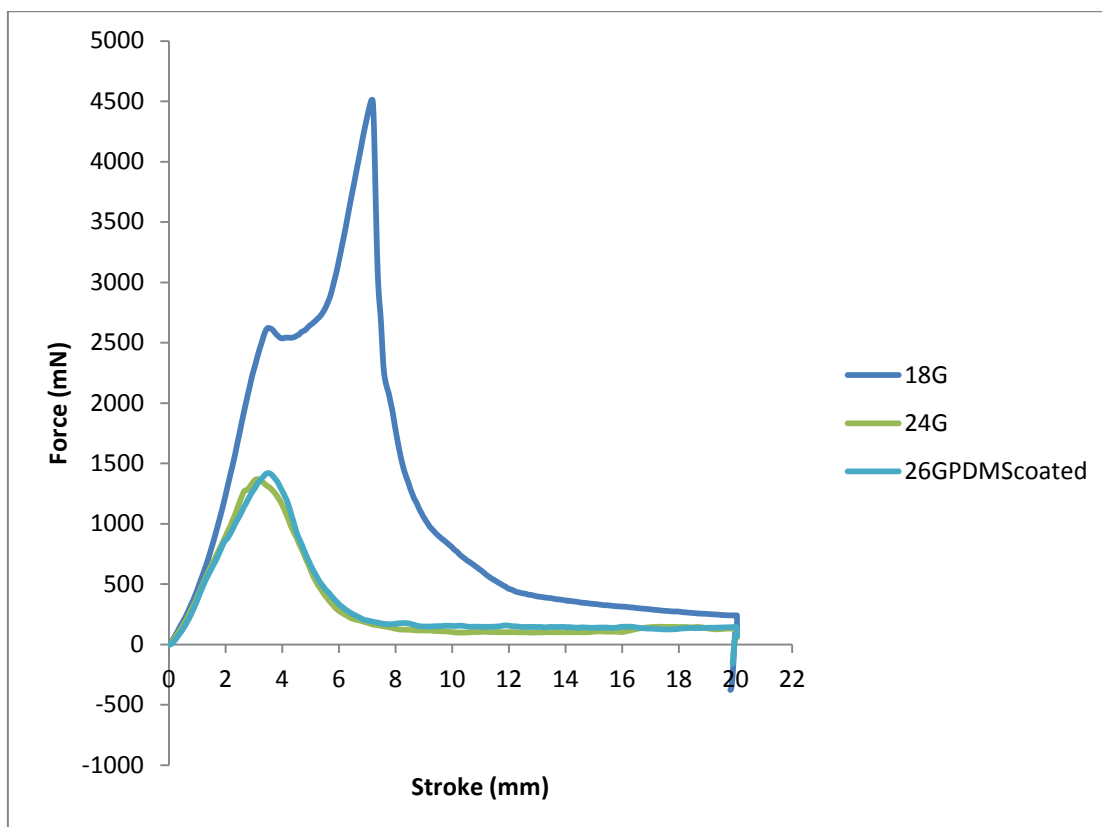
รูปที่ 71 ลักษณะกราฟที่ได้จากการที่เข็มฉีดยาเข้าไปยัง Rubber stopper

การทดสอบแรงเสียดทานด้วยความเร็วในการทิ่มต่างกันของขนาดเข็มฉีดยาเบอร์ 26G ระยะในการทิ่ม 20 มิลลิเมตร ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 72 ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วในการทิ่มสูงจะทำให้ penetration force มีค่ามาก จะส่งผลให้มีผิวหนังบาดเจ็บและอักเสบได้มากกว่า



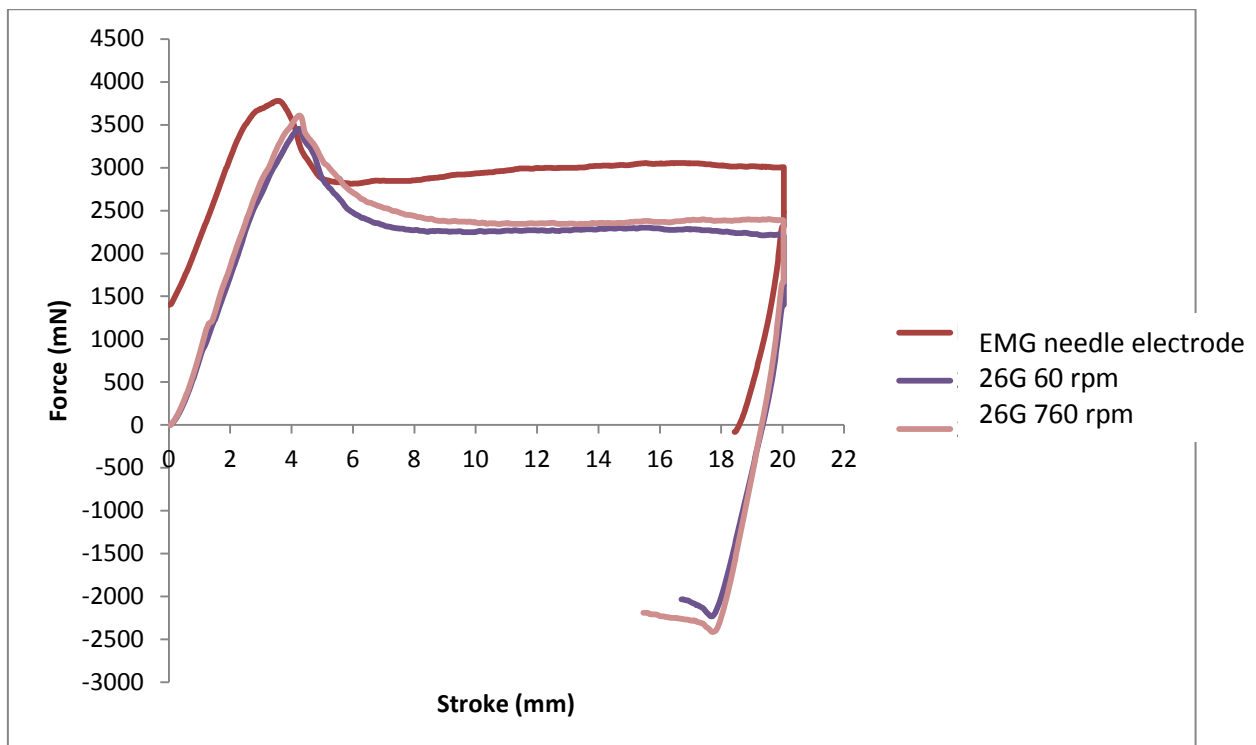
รูปที่ 71 การทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยาขนาด 26G ด้วยความเร็วในการทิ่มต่างกัน

การทดสอบแรงเสียดทานด้วยขนาดเข็มฉีดยาที่ต่างกัน ระยะในการทิ่ม 20 มิลลิเมตร ความเร็วในการทิ่ม 25 mm/s ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 85 ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วในการทิ่มสูงจะทำให้ penetration force และ drag force มีค่ามาก



รูปที่ 72 การทดสอบแรงเสียดทานด้วยขนาดของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ที่ขนาดต่างกันโดยที่เข็มยัง Rubber stopper ด้วยความเร็ว 25 mm/s ระยะทาง 20 มิลลิเมตร และเวลาในการที่เข็มค้างไว้ 10 วินาที

การทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์นำเข้า และเข็มฉีดยาที่ได้เคลือบขนาด 26G ด้วยกระบวนการเคลือบที่ต่างกันความเร็วรอบในการหมุน 60 rpm และ 760 rpm โดยที่เข็มไปยัง rubber stopper ระยะทาง 20 มิลลิเมตร และเวลาในการที่เข็มค้างไว้ 10 วินาที ดังรูปที่ 73



รูปที่ 73 การทดสอบแรงเสียดทานของเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์นำเข้า และเข็มฉีดยาที่ได้เคลือบขนาด 26G ด้วยกระบวนการเคลือบที่ต่างกันความเร็วรอบในการหมุน 60 rpm และ 760 rpm

จากผลการทดสอบพบว่าเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ที่ได้ทำการทดลองเคลือบมี Penetration force และ drag force ที่ต่ำกว่าเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ที่นำเข้า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเข็มฉีดยาที่ได้เตรียมมีแรงเสียดทานที่ต่ำกว่าเข็มฉีดยาเคลือบพอลิเมอร์ที่ขายอยู่ทั่วไป

จากการศึกษาตัวแปรจากกระบวนการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเข็มฉีดยาด้วยเครื่องเคลือบเข็มฉีดยาที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่าความเร็วในการดึงชุดจับยึดเข็มฉีดยา ระยะเวลา และความเร็วในการหมุนของชุดจับยึดเข็มฉีดยาส่งผลต่อความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบ ซึ่งความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบส่งผลต่อสมบัติด้านฉนวนไฟฟ้าด้วย และสมบัติด้านแรงเสียดทานของผิวเคลือบมีผลมาจากขนาดของเข็มฉีดยามากกว่าความหนาของฟิล์มผิวเคลือบ เนื่องจากความหนาของฟิล์มผิวเคลือบมีขนาดไม่มากจึงไม่มีผลต่อแรงเสียดทาน และผลของแรงเสียดทานที่วัดได้ขึ้นอยู่กับประเภทของพอลิเมอร์ที่ได้ทำการเลือก และขึ้นอยู่กับกระบวนการเคลือบที่มีการหมุนของชุดจับยึดเข็มฉีดยาทำให้ผิวของพอลิเมอร์เรียบส่งผลให้แรงเสียดทานลดลงด้วย