MRG4780176 ดร.ทิพบรรณ ปะละไทย

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ "ความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบพอลิเมอร์และผิวชิ้นงาน และการศึกษาความต้านทานต่อการสึกหรอสำหรับผิวเคลือบพอลิเมอร์คอมโพสิต"

โดย ดร.ทิพบรรณ ปะละไทยและคณะ

30 เมษายน 2550

สัญญาเลขที่ MRG4780176

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ "ความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบ พอลิเมอร์และผิวชิ้นงาน และการศึกษาความต้านทานต่อการสึกหรอสำหรับผิวเคลือบพอลิเมอร์คอมโพสิต"

หัวหน้าโครงการ ดร.ทิพบรรณ ปะละไทย

ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยงานสองส่วน คือ **งานในส่วนที่หนึ่ง** ทำการเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนลงบนผิวชิ้นงานโลหะได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด S15C และอลูมิเนียมเกรด 6063 โดยวิธีการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ เพื่อศึกษาผลของการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบคือความหยาบผิว อิทธิพลของการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ และระยะทางในการพ่นเคลือบ ที่มีต่อสมบัติของผิวเคลือบและการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบและชิ้นงานรองรับ การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลใช้กล้องจุลทรรศน์ (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบและผงเคลือบ ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของผงเคลือบด้วยเทคนิค DSC และ TGA วัดการกระจายขนาดของผงเคลือบด้วย MasterSizer วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD วัดความแข็งของผิวเคลือบด้วย Microhardness วัดความหยาบผิวด้วยเครื่อง Roughness tester วัดดัชนีความแข็งแรงของการยึดเกาะด้วยเทคนิค Scratch adhesion test และวัดโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งพบว่าในการเตรียมผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและชิ้นงานอลูมิเนียมให้ได้ความหยาบผิว 4.37 และ 4.72 ไมโครเมตรตามลำดับ การให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่ 200 องศาเซลเซียส และระยะทางการพ่นเคลือบ 100 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ผิวเคลือบที่มีคุณภาพดีกล่าวคือ ผิวเคลือบมีรูพรุนและความหยาบผิวต่ำ มีความแข็ง เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานสูง จากนั้นนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาทำการพ่นเคลือบผิวในสภาวะที่ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอยู่ในสนามแม่เหล็ก เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อค่าการยึดเกาะของผิวเคลือบ ซึ่งพบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เพิ่มสูงขึ้น

งานในส่วนที่สอง ทำการพ่นเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตลงบนชิ้นงานอลูมิเนียม (JIS 6063) โดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ คือ อิทธิพลของอัตราการไหลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ และระยะทางในการพ่นเคลือบ ที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของผิวเคลือบ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดของอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีผลความต้านทานต่อการสึกหรอของผิวเคลือบ จากการวิเคราะห์ผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟกโตมิเตอร์ เครื่องวัดความแข็งในระดับไมโครเมตร และเครื่องวัดความเรียบผิว พบว่า การพ่นเคลือบที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน 750 : 214 ลิตรต่อนาที การให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่ 200 องศาเซลเซียส และระยะทางการพ่นเคลือบ 230 มิลลิเมตร ทำให้ได้ผิว

เคลือบที่มีคุณภาพดีกล่าวคือ ผิวเคลือบไม่มีรูพรุน และผิวเคลือบค่อนข้างเรียบ มีความแข็งสูง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูง จากการทดสอบการสึกหรอแบบลื่นไถลของผิวเคลือบพบว่า การเติมอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดระหว่าง 5-20 ไมโครเมตร ผิวเคลือบที่ได้มีการสึกหรอน้อยกว่าการเติมอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาด 39-53 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์มากขึ้นค่าการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณที่เหมาะสมในการเติมอลูมิเนียมออกไซด์ลงในผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน คือ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าการสึกหรอน้อยที่สุด การศึกษาผลของระยะทางและน้ำหนักในการทดสอบพบว่า เมื่อระยะทางและน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ผิวเคลือบการสึกหรอมากขึ้น

Abstract

This research consisted of two parts. **The first part** was to deposite polyetheretherketone (PEEK) coatings on the metal substrates (low carbon steel; JIS S15C and aluminium; JIS 6063) by low velocity flame spraying. The characteristics of PEEK powder were studied by DSC and TGA, and were examined the powder size by MasterSizerS. The as-sprayed coatings were characterized by OM, SEM, XRD, FTIR and microhardness, surface roughness and scratch adhesion index measurements. In addition, the effect of surface preparation, preheat temperature and spray distance playing an important role on microstructures and mechanical properties, such as hardness and adhesive strength, were studied.

In this study, surface preparation of low carbon steel and aluminium with roughness (Ra) of 4.37 and 4.72 μm, respectively, preheat temperature at 200 °C and spray distance of 100 mm were successfully obtained a dense PEEK coating with an even surface of coating. Moreover, the dense PEEK coating exhibits high hardness value, degree of crystallinity and bond strength compared to spraying with different conditions. In order to improve bond strength, PEEK powder was deposited on low carbon steel substrate under a variety of magnetic flux density, i.e. 7, 14 and 17 mT. It was found that the higher magnetic flux density led to a higher bond strength due to an increase of the degree of crystallinity.

The second part of this research is to deposit PEEK coatings on metal substrate (aluminum; JIS 6063) with the high velocity oxy-fuel (HVOF) spraying and to study the effects of H_2/O_2 gas flow rate ratio, preheat temperature and spray distance on microstructure and properties of coatings. In addition the effects of contents and sizes of Al_2O_3 particles on wear resistance of PEEK/Al_2O_3 composite coatings were investigated. The as-sprayed coatings were characterized by OM, SEM, XRD, microhardness tester and roughness tester. The experimental results showed that the H_2/O_2 gas flow rate ratio of 750:214 SLPM, preheat temperature at 200°C and spray distance of 230 mm were successfully obtained a dense PEEK coating with smooth top-surface. Moreover, the dense PEEK coating exhibited high hardness value and degree of crystallinity compared to PEEK coatings depositing with different conditions. The results of sliding wear test of PEEK composite coatings showed that the coatings filled with 5-20 μm Al_2O_3 exhibited a decreased wear volume loss. The

filled PEEK with 2.5 wt% 5-20 μm Al_2O_3 showed the lowest wear rate. The enhanced wear rate resulted from increases of loads and sliding distances.

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกมีจุดประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบพอลิเมอร์และผิวชิ้นงาน และเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีสมบัติที่ดี จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงกระบวนการพ่นเคลือบ และพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้สมบัติของผิวเคลือบที่ดีตามที่ต้องการ โดยศึกษาอิทธิพลของความหยาบผิว ระยะการพ่น และการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่มีต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะ (bond strength) ระหว่างผิวเคลือบ PEEK และชิ้นงานโลหะ และทำการเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะโดยศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบ PEEK และชิ้นงานโลหะ ผลการวิจัยโดยรวมพบว่า

- การให้ความร้อนกับชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบ ต้องมีอุณหภูมิที่สูงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผงเคลือบกับผิวชิ้นงานมากเกินไป และไม่ทำให้ผงเคลือบที่หลอมเหลวเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะกระทบผิวชิ้นงาน เพื่อให้ผงเคลือบไหลไปบนผิวชิ้นงานรองรับ ทำโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ผิวเคลือบยึดติดกับผิวชิ้นงานรองรับ ความแข็งของผิวเคลือบที่เคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอลูมิเนียมเท่ากับ 24.4 และ 23.3 $Hv_{0.05}$ ตามลำดับ ปริมาณความเป็นผลึกของผิวเคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอลูมิเนียม เท่ากับ 40.5 และ 31.1 % ตามลำดับ

- ระยะทางในการพ่นเคลือบจะต้องไม่ใกล้หรือไกลเกินไปจนทำให้ผงเคลือบไม่หลอมหรือเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะตกกระทบลงบนผิวชิ้นงานรองรับ การพ่นเคลือบผง PEEK ที่ระยะทาง 100 มิลลิเมตร ลงบนชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอลูมิเนียม พบว่าผิวเคลือบมีความหยาบผิวเท่ากับ 8.2 และ 10.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ และส่งผลให้ดัชนีการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานสูงที่สุดมีค่า 15.42 ในชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม และ 13.25 ในชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่ระยะทางไกลหรือใกล้กว่านี้จะส่งผลให้ดัชนีการยึดเกาะลดต่ำลง

- การเตรียมผิวชิ้นงานโดยเพิ่มความหยาบของผิวเคลือบในชิ้นงานรองรับที่เป็นอลูมิเนียม และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทำให้ดัชนีการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นจนถึงความหยาบผิวค่าหนึ่งจะเริ่มคงที่ โดยที่ความหยาบ 4.36 และ 4.76 ดัชนีการยึดเกาะมีค่า

เท่ากับ 15.4 และ 15.8 ตามลำดับ ซึ่งความหยาบผิวส่งผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะมากกว่าชนิดของชิ้นงานรองรับ

- สนามแม่เหล็กส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึก และความแข็งในผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก และยังส่งผลให้ดัชนีการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้น สนามแม่เหล็กจึงเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่เหมาะสมในการเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน

โครงการวิจัยส่วนที่สองมีจุดประสงค์ในการศึกษาการต้านทานต่อการสึกหรอของผิวเคลือบพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยทำการผสมวัสดุเซรามิคที่มีความแข็งสูงลงในพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการต้านทานต่อการสึกหรอ โดยศึกษาหาพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบที่เหมาะสม คืออิทธิพลของอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ และระยะทางในการพ่นเคลือบ และศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดของอลูมิเนียมออกไซด์ และพารามิเตอร์ในการทดสอบคือน้ำหนักและระยะทางในการทดสอบ ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอของผิวเคลือบ โดยพบว่าอัตราส่วนระหว่างการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงและก๊าซออกซิเจนควรมีอัตราส่วนที่พอเหมาะ เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเปลวความร้อนที่สูงพอสำหรับการหลอมเหลวของอนุภาคผงทั่วทั้งอนุภาค ก่อนตกกระทบบนชิ้นงาน โดยให้อัตราการไหลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนมีค่า 750:214 SLPM ส่งผลให้ผิวเคลือบยึดกับชิ้นงานดี มีความหนาแน่นและความแข็งสูง ผลการวิจัยโดยรวมพบว่า

- การให้ความร้อนกับชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบ ควรจะต้องมีอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผงเคลือบกับผิวชิ้นงานมากเกินไป และไม่ทำให้อนุภาคผงที่หลอมเหลวเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะกระทบผิวชิ้นงาน เพื่อให้ผงเคลือบไหลไปบนผิวชิ้นงานรองรับ การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานอลูมิเนียมจะกระทำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผิวเคลือบยึดติดกับผิวชิ้นงานรองรับดี ความแข็งของผิวเคลือบสูง
- ระยะทางในการพ่นเคลือบจะต้องไม่ใกล้หรือไกลเกินไปจนทำให้ผงเคลือบหลอมไม่สมบูรณ์หรือเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะตกกระทบลงบนผิวชิ้นงานรองรับ จากการทดลองทำการพ่นเคลือบที่ระยะทาง 230 มิลลิเมตร จะให้ผิวเคลือบที่มีความหยาบผิวต่ำ และส่งผลให้ความแข็งของผิวเคลือบสูง
- การเติมอลูมิเนียมออกไซด์ลงในผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ควรเติมในปริมาณที่พอเหมาะที่จะช่วยต้านทานต่อการสึกหรอในขณะที่ทดสอบ และไม่เกิดเป็นอนุภาคที่มีความแหลมคม

ออกมาเร่งการสึกหรอให้มากขึ้น โดยเติมอลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณไม่เกิน 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

- ขนาดของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เติมลงในผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ควรมีขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในผิวเคลือบ เพิ่มบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสในระหว่างการทดสอบการสึกหรอ และช่วยต้านทานต่อการสึกหรอในขณะที่ทดสอบ โดยการเติมอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาด 5- 20 ไมโครเมตร
- การใช้งานในการรับภาระ (Load) ควรใช้งานที่น้ำหนักไม่สูงเกินกว่าที่อลูมิเนียมออกไซด์สามารถรับน้ำหนักได้ หากน้ำหนักมากเกินไปจะเกิดการสึกหรออย่างรุนแรง ก ารทดสอบที่น้ำหนัก 1.5 นิวตัน ทำให้อัตราการสึกหรอต่ำที่สุด
- ระยะทางในการเคลื่อนที่ที่ระยะมากขึ้นในกิโลเมตรที่ 3 จะมีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าช่วงแรก เนื่องจากอนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ช่วยต้านทานการสึกหรอ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ปกใน	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
บทสรุปผู้บริหาร	ฉ
สารบัญ	ฌ
รายการรูป	ฎ
รายการตาราง	ต
งานส่วนที่ 1 ความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบพอลิเมอร์และผิวชิ้นงาน	**1**
1. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	1
1.2 ลักษณะของผิวเคลือบ	5
1.3 การเคลือบพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง	6
1.4 การเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง	8
1.5 การยึดเกาะของผิวเคลือบ	9
1.6 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อผิวเคลือบ	13
1.7 อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์	17
1.8 การทดสอบทางกลของการยึดเกาะของผิวเคลือบ	18
2. ขั้นตอนการดำเนินงาน	**26**
2.1 วัสดุผงและชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบ	27
2.2 การเตรียมผิวชิ้นงานรองรับ	28
2.3 กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบเปลวเพลิงความเร็วต่ำ	29
2.4 การวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก	32
2.5 การวัดอุณหภูมิในกระบวนการพ่นเคลือบ	33
2.6 การวัดอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน	33
2.7 ขั้นตอนและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ	34
2.8 การตรวจสอบลักษณะของผง	36
2.9 การตรวจสอบลักษณะของผิวเคลือบ	38
2.10 การตรวจสอบสมบัติทางกล	41

	หน้า
3. ผลการวิจัยที่ได้รับส่วนที่ 1	**44**
3.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับ	44
3.2 ลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	45
3.3 สมบัติทางความร้อนของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	47
3.4 อิทธิพลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ	49
3.5 อิทธิพลของระยะทางการพ่น	55
3.6 อิทธิพลของความหยาบผิวชิ้นงานรองรับ	60
3.7 อิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็ก	62
งานส่วนที่ 2 การต้านทานต่อการสึกหรอของผิวเคลือบพอลิเมอร์คอมโพสิต	**70**
4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**70**
4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต	70
4.2 การสึกหรอ	72
4.3 การสึกหรอของวัสดุประเภทต่างๆ	82
4.4 การทดสอบการสึกหรอ	86
4.5 เศษวัสดุจากการสึกหรอ	95
4.6 การเลือกใช้พอลิเมอร์เพื่อลดการสึกหรอ	97
4.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของพอลิเมอร์คอมโพสิต	98
4.8 หลักการทำงานของการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง	102
4.9 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวเคลือบ	103
4.10 การพ่นเคลือบพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง	107
5. ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 2	**110**
5.1 วัสดุที่เลือกใช้	112
5.2 การเตรียมผิวชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบ	113
5.3 ระบบการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความร้อน	114
5.4 การพ่นเคลือบ	116
5.5 พารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ	117
5.6 การตรวจสอบอนุภาคผง ชิ้นงานรองรับ และผิวเคลือบ	118
5.7 การทดสอบการสึกหรอแบบลื่นไถลด้วย Ball-on-disc	122
6. ผลการวิจัยที่ได้รับส่วนที่ 2	**126**
6.1 ผลการตรวจสอบลักษณะของอนุภาคผง	126

		หน้า
6.2	ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับ	128
6.3	ผลของพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบที่มีผลต่อผิวเคลือบ	129
6.4	การพ่นเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต	141
6.5	ผลการวัดความแข็งของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต	147
6.6	ผลการทดสอบการสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียม-ออกไซด์คอมโพสิต	148
6.7	ผลการตรวจสอบลักษณะผิวที่สึกหรอและเศษวัสดุที่เกิดจากการสึกหรอ	156
6.8	ผลการตรวจสอบการสึกหรอของลูกบอลเหล็กชุบโครเมียม	164
เอกสารอ้างอิง		**168**
Output ที่ได้จากโครงการ		**173**
ภาคผนวก ก.		**174**
ข้อมูลกราฟเอกซ์เรดิฟแฟรกชันเมื่อชิ้นงานรับความร้อนก่อนการพ่นเคลือบแตกต่างกัน		
ภาคผนวก ข.		**177**
เสนอโปสเตอร์ 2 เรื่องในงานสัมมนาเรื่อง เทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน ครั้งที่ 2 ในวันที่ 23 มิถุนายน 2548 ณ อาคารศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จัดโดย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ		

รายการรูป

รูป		หน้า
1	หลักการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	2
2	ขั้นตอนทั่วไปในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	3
3	การแบ่งประเภทของการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	4
4	ลักษณะเฉพาะของผิวเคลือบที่เกิดจากการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	6
5	ลักษณะของกระบวนการพ่นแบบการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ	7
6	โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	8
7	ลักษณะของมุมที่เกิดขึ้นเมื่อมีของเหลวตกกระทบกับผิวของแข็ง	10
8	ลักษณะของการเปียกที่เกิดขึ้นในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน	11
9	ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการไหลของขอบผงที่หลอมเหลวตกลงบนผิวของแข็ง	11
10	ลักษณะของการยึดเกาะของผิวเคลือบด้วยแรงทางไฟฟ้า	12
11	ลักษณะการยึดเกาะของผิวเคลือบโดยการแพร่	13
12	ลักษณะการยึดเกาะของผิวเคลือบในทางกล	14
13	อิทธิพลที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวเคลือบ	14
14	ลักษณะการหลอมของผงที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการยึดเกาะ	16
15	การทดสอบความแข็งแรงของผิวเคลือบในทิศทางแรงดึง	18
16	ของการทดสอบแบบดึงลอก	19
17	รอยที่เกิดขึ้นจากการทดสอบรอยขูดขีด	20
18	แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นจากการทดสอบรอยขีดขูด	22
19	ลักษณะของการเสียรูปเนื่องจากการทดสอบรอยขีดของพอลิเมอร์	25
20	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	26
21	ชิ้นงานที่ใช้ในการพ่นเคลือบ	28
22	เม็ดกริดอลูมินาสีน้ำตาล	28
23	เครื่องยิงกริดที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน	29
24	ส่วนประกอบของเครื่องพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ	30
25	ปืนที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง	30
26	อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ	31
27	เครื่องควบคุมการไหลของผง	31
28	ชุดจับชิ้นงานเพื่อพ่นเคลือบ	32
29	เส้นแรงแม่เหล็กของตัวจับชิ้นงานแบบใส่แม่เหล็ก	32
30	การติดตั้งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคับเปิล	33

รูป	(ต่อ)	หน้า
31	กราฟเอกซ์เรดิฟแฟรกชันที่ใช้ในการหาปริมาณความเป็นผลึก	40
32	อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการตรวจสอบการยึดเกาะด้วยเครื่องทดสอบรอยขีด	42
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของน้ำหนักที่ใช้กับความกว้างของรอยขีด	42
34	ลักษณะของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (เกรด 150 PF) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46
35	การกระจายตัวของอนุภาคผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	46
36	สมบัติทางความร้อนของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	48
37	ผลการทดสอบหาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์	48
38	โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	50
39	ปริมาณร้อยละของความเป็นผลึกของผิวเคลือบที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเทคนิคเอกซ์เรดิฟแฟรกชัน	52
40	อิทธิพลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบกับความแข็งของผิวเคลือบ	52
41	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึกที่ส่งผลต่อความแข็งของผิวเคลือบ	53
42	อิทธิพลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่มีต่อความหยาบผิวของผิวเคลือบ	53
43	โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่ระยะการพ่นต่างกัน	56
44	อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบกับความแข็งของผิวเคลือบ	57
45	ผลของระยะทางการพ่นเคลือบที่มีต่อดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ	59
46	อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบกับความหยาบของผิวเคลือบ	59
47	โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่การเตรียมผิวโดยใช้เม็ดกริตขนาดต่างกัน	61
48	ผลของความหยาบผิวของชิ้นงานที่มีต่อดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ	62
49	โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	63
50	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับปริมาณความเป็นผลึก	64
51	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับความแข็ง	64
52	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ	65
53	รูปลักษณะรอยที่เกิดจากการการทดสอบการยึดเกาะจากรอยขีด	67
54	ผลการทดสอบของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยเทคนิค FTIR	68
55	กลไกการสึกหรอแบบขัดถู	73

รูป	(ต่อ)	หน้า
56	การเกิดการสึกหรอแบบ Two-body abrasive	74
57	การเกิดการสึกหรอแบบ Three-body abrasive	74
58	ลักษณะการสึกหรอแบบ a) Ploughing b) Wedge c) Cutting	75
59	กลไกการเกิดการสึกหรอแบบแตกหัก	76
60	การเกิดการสึกหรอแบบติดกันของวัสดุ	76
61	การเกิดการสึกหรอแบบกัดเซาะโดยอนุภาคของแข็ง	78
62	การเกิดการสึกหรอแบบการกัดกร่อน	79
63	การเกิดการสึกหรอจากความล้า	80
64	การเกิดการสึกหรอแบบการสั่น	81
65	เครื่องมือทดสอบแบบ Pin-on-disc	88
66	เครื่องมือทดสอบแบบ Pin-on-flat	88
67	เครื่องมือทดสอบแบบ Pin-on-cylinder	89
68	เครื่องมือทดสอบแบบ Thrust washer	89
69	เครื่องมือทดสอบแบบ Pin into bushing	90
70	เครื่องมือทดสอบแบบ Rectangular flats on a rotating cylinder	90
71	เครื่องมือทดสอบแบบ Crossed cylinders	91
72	เครื่องมือทดสอบแบบ Four ball	91
73	เครื่องมือทดสอบแบบ Taber abrasive	92
74	เครื่องมือทดสอบแบบ Pin-on-belt	92
75	เครื่องมือทดสอบแบบ Dry-sand abrasive	93
76	เครื่องมือทดสอบแบบ Wet-sand abrasive	93
77	เครื่องมือทดสอบแบบ Disc-on-disc	94
78	เครื่องมือทดสอบแบบ Rolling element on flat	94
79	เครื่องมือทดสอบแบบ Solid-particle erosion	95
80	เศษวัสดุจากการสึกหรอที่มีรูปร่างเป็นแผ่นหรือเกล็ด	95
81	เศษวัสดุแบบ Ribbon-shaped particles	96
82	เศษวัสดุจากการสึกหรอแบบอนุภาคที่มีรูปร่างกลม	96
83	เศษวัสดุจากการสึกหรอแบบอนุภาคที่มีพื้นผิวไม่เรียบ	97
84	การพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง	102
85	ผลของระยะทางที่มีผลต่อความหนาแน่นของผิวเคลือบที่ a_{op} คือระยะที่ให้ความหนาแน่นดีที่สุด	105

รูป	(ต่อ)	หน้า
86	อนุภาคผงพ่นเมื่อตกกระทบบนผิวชิ้นงานที่ อุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสต่างๆ	105
87	การหดตัวของผิวเคลือบเมื่อเย็นตัว	105
88	แผนภาพแสดงการดำเนินการทดลองโดยรวม	110
89	เครื่องบด Ball milling แบบ Planetary mill	113
90	เม็ดกริตอลูมิเนียมออกไซด์ชนิดสีน้ำตาล	113
91	ลักษณะที่จับชิ้นงาน	114
92	ปืนพ่น DJ Diamond jet gun รุ่น 2600 Hybrid	115
93	อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Flow meter) รุ่น DJF	115
94	อุปกรณ์ควบคุมการป้อนผง (Powder feeder) รุ่น DJP	116
95	เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-disc	122
96	การวัดความกว้างรอยสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง	123
97	เครื่องทดสอบความเรียบผิว Profilometer	124
98	ตำแหน่งการวัดรอยจากการสึกหรอ	124
99	พื้นที่หน้าตัดที่การสึกหรอ (Profile)	124
100	การวัดการสึกหรอของลูกบอล	125
101	ลักษณะของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมีมุม	127
102	การกระจายตัวของอนุภาคผงอลูมิเนียมออกไซด์ของ Amperit เกรด 740.2	127
103	ลักษณะของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต	128
104	ผลการพ่นเคลือบที่ปริมาณการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ต่างกัน	130
105	ผลของอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่มีผลต่อความหยาบผิวของผิวเคลือบ	131
106	ความแข็งของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงแตกต่างกัน	132
107	ผลการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบต่างกันที่อัตราการไหลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 750:214 SLPM	133
108	ผลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่มีผลต่อความหยาบผิวของผิวเคลือบ	135
109	ผลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่มีผลต่อค่าความแข็งของผิวเคลือบ	136
110	ความเป็นผลึกของผิวเคลือบที่การไม่ให้ความร้อนและการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเทคนิค XRD	136

รูป	(ต่อ)	หน้า
111	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของผิวเคลือบที่การไม่ให้ความร้อนและการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	137
112	โครงสร้างของผิวเคลือบเมื่อระยะทางระหว่างปืนพ่นและชิ้นงานที่ต่างกัน	139
113	ผลของระยะทางระหว่างปืนพ่นและชิ้นงานที่มีผลต่อความหยาบผิวของผิวเคลือบ	140
114	ผลของระยะทางระหว่างปืนพ่นและชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความแข็งของผิวเคลือบ	141
115	โครงสร้างของผิวเคลือบที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 5-20 ไมโครเมตร	142
116	โครงสร้างของผิวเคลือบที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 25-38 ไมโครเมตร	143
117	โครงสร้างของผิวเคลือบที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 39-53 ไมโครเมตร	144
118	โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	145
119	ความแข็งของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน และผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่ขนาดและปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์ต่างกัน	148
120	การสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่ปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์แตกต่างกัน	151
121	การสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดต่างกัน น้ำหนักในการทดสอบ 1.5 นิวตัน	152
122	การสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ 3 ช่วงขนาด น้ำหนักในการทดสอบต่างกัน	154
123	การสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่ระยะทางการทดสอบแตกต่างกัน น้ำหนักในการทดสอบ 1.5 นิวตัน	155
124	ความลึกและรอยการสึกหรอของผิวเคลือบเมื่อปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ต่างกัน ที่น้ำหนักทดสอบ 1.5 นิวตัน	157
125	รอยการสึกหรอของผิวเคลือบเมื่อปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ต่างกัน ที่น้ำหนักทดสอบ 1.5 นิวตัน	158
126	รอยการสึกหรอของผิวเคลือบเมื่อขนาดอลูมิเนียมออกไซด์ต่างกัน	159
127	รอยการสึกหรอของผิวเคลือบ 2.5% wt Al_2O_3 ขนาด 5-20 ไมโครเมตรเมื่อน้ำหนักในการทดสอบต่างกัน	161
128	ลักษณะของเศษผิวจากการสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนและพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต	162

รูป	(ต่อ)	หน้า
129	ลักษณะของเศษผิวจากการสึกหรอของผิวเคลือบและพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิตที่10%wt Al_2O_3 ขนาด 5-20 ไมโครเมตร น้ำหนักทดสอบ 9.5 นิวตัน	163
130	ค่าการสึกหรอของลูกบอลเหล็กชุบโครเมียมเมื่อทดสอบที่น้ำหนัก 1.5 5.5 และ 9.5 นิวตัน	165
131	ลักษณะของผิวลูกบอลเหล็กชุบโครเมียมจากการทดสอบการสึกหรอของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต	167

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1	สมบัติของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบต่างๆ	5
2	สมบัติของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	8
3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	35
4	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบในสภาวะที่ชิ้นงานอยู่ในสนามแม่เหล็ก	36
5	ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	44
6	ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม	45
7	สมบัติทางความร้อนของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน เกรด 150 PF	48
8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการพ่นเคลือบกับค่าความหยาบของผิวเคลือบ	57
9	ผลของอัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ	68
10	ค่า PV limit ของพอลิเมอร์เมื่อทดสอบแบบลื่นไถลและไม่ใช้สารหล่อลื่น	84
11	พารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน	117
12	พารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต	118
13	ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม	129
14	การเปรียบเทียบปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีอยู่ในผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน/อลูมิเนียมออกไซด์คอมโพสิต กับปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีในผิวเคลือบ	146
15	ส่วนประกอบของเศษผิวจากการสึกหรอบริเวณจุด A ด้วยเทคนิค EDS	163
16	ส่วนประกอบของเศษผิวจากการสึกหรอบริเวณจุด B ด้วยเทคนิค EDS	164

งานส่วนที่ 1 ความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบพอลิเมอร์และผิวชิ้นงาน

1. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนเป็นการสร้างผิวใหม่ให้กับวัสดุหรือชิ้นงาน ซึ่งผิวใหม่ที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกับผิวชิ้นงานเดิมก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน โดยส่วนใหญ่การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน จะใช้วัสดุที่มีสมบัติต่างไปจากสมบัติของชิ้นงานเดิมเพื่อวัตถุประสงค์บางอย่างในการใช้งาน เช่น การเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือเพื่อป้องกันการสึกหรอ [1] และในกรณีที่เป็นการพ่นเคลือบที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกับผิวเดิมก็เพื่อซ่อมแซมส่วนที่เกิดการสึกหรอหรือเสียสภาพไปเนื่องจากการใช้งาน

1.1.1 หลักการของกระบวนการพ่นเคลือบเปลวความร้อน

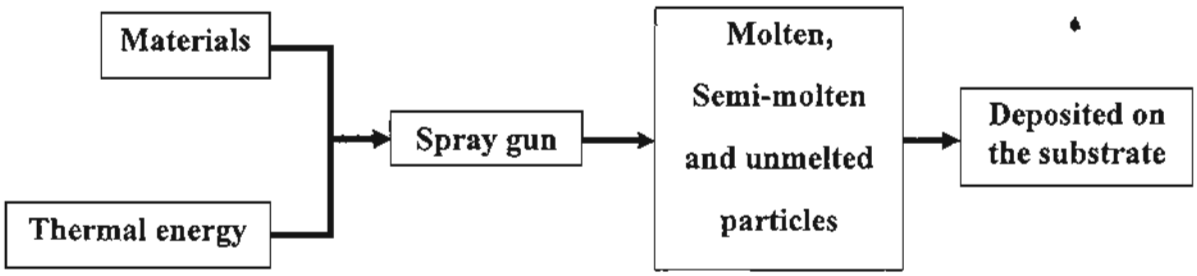
หลักการทั่วไปของวิธีการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแสดงได้ดัง**รูปที่ 1** วัสดุที่ใช้อาจเป็น โลหะ (metal) เซรามิกส์ (ceramic) โลหะผสมเซรามิกส์ (cermet) พอลิเมอร์ (polymer) หรือวัสดุผสม (composites) โดยวัสดุที่ใช้เคลือบจะอยู่ในรูปของ ผง (powder) เส้นลวด (wire) หรือแท่ง (rod) วัสดุเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าไปในเครื่องพ่น (gun) เมื่อวัสดุได้รับความร้อนที่เกิดจากการสันดาป การอาร์คไฟฟ้า หรือเปลวพลาสมา วัสดุจะอยู่ในสถานะหลอมเหลว (molten) กึ่งแข็งกึ่งเหลว (semi-molten) หรือไม่หลอมเหลว (unmelted) หลังจากนั้น วัสดุที่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไปตกลงบนผิวชิ้นงานที่ได้เตรียมไว้ จนเกิดเป็นชั้นผิวเคลือบขึ้น [2]

ขั้นตอนในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยเริ่มต้นจากการขึ้นรูปชิ้นงานรองรับตามแบบการใช้งาน ผงเคลือบอาจจะมีการอบไล่ความชื้นเพื่อให้ผงเคลือบลดการเกาะกลุ่มกันของผงเคลือบ ต่อจากนั้นทำการเตรียมผิวชิ้นงาน (pre-spray treatment) ซึ่งเป็นการเพิ่มความหยาบผิวให้กับชิ้นงาน การทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อขจัดน้ำมันและสิ่งสกปรก หรือการกำหนดตำแหน่งพ่นเคลือบโดยใช้วัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิสูงปิดบังตรงบริเวณที่ไม่ต้องการพ่น แล้วทำการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนตามพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดไว้ ต่อจากนั้นทำการตรวจสอบผิวเคลือบที่ได้ เช่น ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกลของผิวเคลือบ เพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีสมบัติ

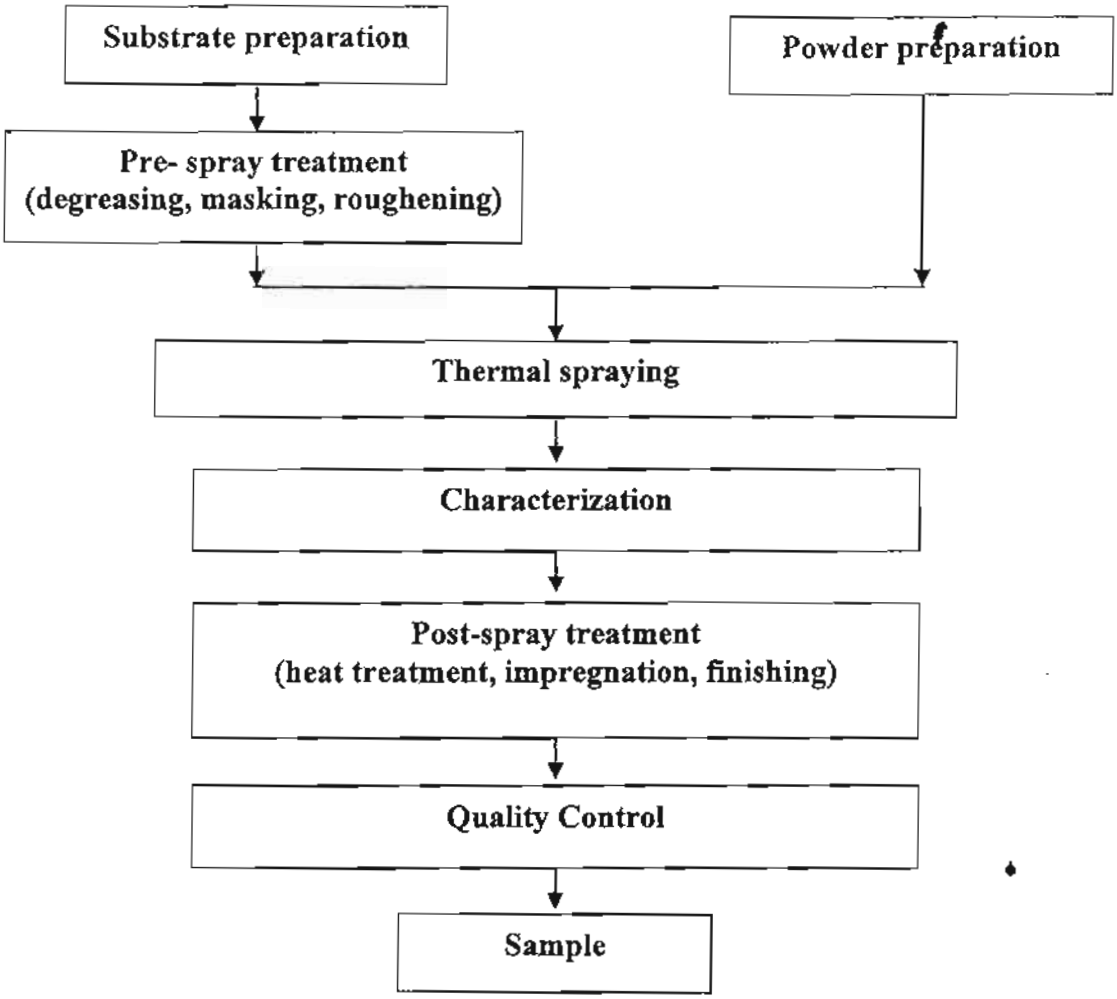
ตามต้องการ หลังจากนั้นทำการปรับปรุงผิวเคลือบ เช่นการขัด การกลึง หรือการทำ Heat treatment เพื่อคลายความเครียดให้กับผิวเคลือบ และเพิ่มการยึดเกาะทั้งภายในผิวเคลือบและระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานรองรับ เช่นการทำ Laser heat treatment ทำการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานที่ได้จากการพ่นเคลือบอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

1.1.2 ประเภทของกระบวนการพ่นเคลือบ

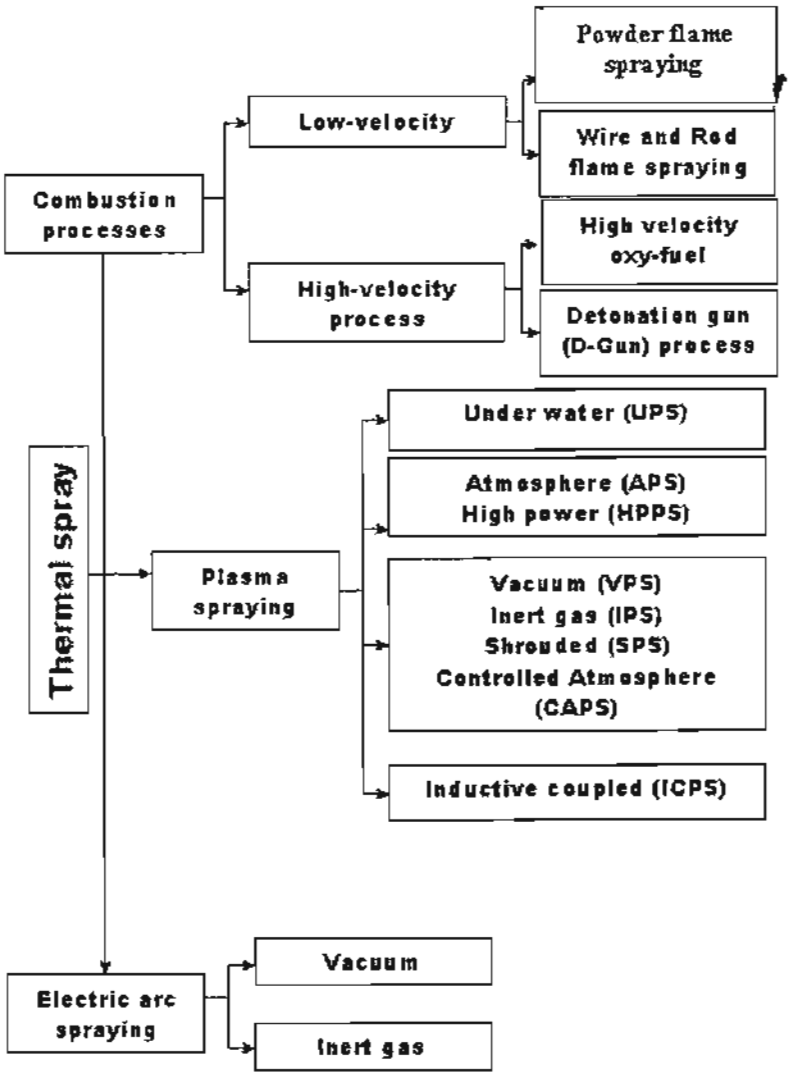
กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดความร้อนได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันดังรูปที่ 3 คือ กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้ (flame spraying หรือ combustion flame spraying) การพ่นเคลือบด้วยการอาร์คไฟฟ้า (electric arc spraying หรือ wire arc) และการพ่นเคลือบด้วยเปลวพลาสมา (plasma spraying) [3] โดยแต่ละกระบวนการจะมีสมบัติที่แตกต่างกันดังตารางที่ 1 นอกจากนี้ในแต่ละแบบยังสามารถจำแนกย่อยออกได้อีกขึ้นอยู่กับลักษณะของการออกแบบรูปทรงภายในของปืนพ่นหรือสภาวะในการพ่น



รูปที่ 1 หลักการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน



รูปที่ 2 ขั้นตอนทั่วไปในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน



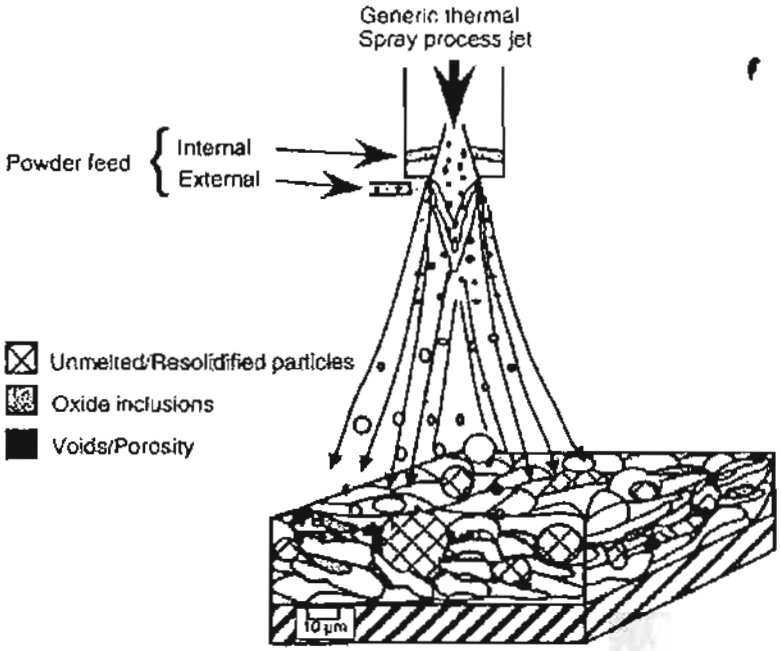
รูปที่ 3 การแบ่งประเภทของการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน โดยแบ่งตามแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้และสภาวะแวดล้อมในขณะพ่น (ดัดแปลงมาจาก [4])

ตารางที่ 1 สมบัติของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบต่างๆ [5]

Attribute	Flame spray	HVOF	Wire arc	Air plasma	Vacuum plasma
Jet					
Temp., K	Up to 3500	>3500	Up to 6300	25000	22000
Velocity, ms^{-1}	50-100	500-1300	50-100	300-2000	200-600
Gas flow rate, m^3s^{-1}	$(0.5\text{-}3.2)\times10^{-3}$	$(6.5\text{-}18)\times10^{-3}$	$(8.3\text{-}50)\times10^{-3}$	$(1.5\text{-}3.2)\times10^{-3}$	$(2.5\text{-}4.2)\times10^{-3}$
Power input, kW	20	150-300	2-5	40-200	40-120
Gas type	O_2, acetylene, C_3H_6, C_3H_8	O_2, H_2, CH_4, C_3H_6, C_3H_8, kerosene, air	Air , Ar, N_2	Ar, N_2, He, H_2	Ar, He, H_2
Sprayed particles					
Max. temp., K	2800	3600	~4000	~4000	~4000
Velocity, ms^{-1}	40-100	200-1000	50-150	80-800	80-350
Feed rate, gs^{-1}	0.5-0.85	Up to 2.5	2.5-34	0.85-2.7	Up to 5.6

1.2 ลักษณะของผิวเคลือบ

เมื่อผงเคลือบอยู่ในสถานะหลอมเหลว (molten) หรือสถานะที่สามารถไหลได้ (viscous state) ตกกระทบลงบนผิวชิ้นงานรองรับ จะเกิดการไหลเคลือบไปบนผิวชิ้นงานในลักษณะที่แผ่ออกคล้ายจานคว่ำ (pancake structure) ซึ่งเรียกว่า Splats เมื่อทำการพ่นเคลือบหลายรอบจนเกิดการทับถมของ Splats ผิวเคลือบที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ (layered หรือ lamellar) ดังรูปที่ 4 เมื่อผงเคลือบที่หลอมเหลวตกกระทบผิวชิ้นงานจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถไหลไปบนผิวชิ้นงานได้ เป็นผลให้ผิวเคลือบมีลักษณะเป็นรูพรุน นอกจากนี้ การเกิดรูพรุนสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ระยะทางในการพ่นเคลือบใกล้ หรือไกลเกินไปจะทำให้ผงเคลือบบางส่วนอยู่ในสถานะไม่หลอม (unmelts) หรือหลอมเหลวมากเกินไป การให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบแก่ชิ้นงาน เพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิของผงเคลือบกับชิ้นงานต่ำหรือสูงเกินไป ทำให้ผงเคลือบที่หลอมเหลวเกิดการเย็นตัว หรือมุมในการพ่นที่ส่งผลต่อการไหลของผงเคลือบ นอกจากนี้ ในผิวเคลือบที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจะมีเศษฝุ่นผงจากบรรยากาศ และออกไซด์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างผงเคลือบกับออกซิเจนในบรรยากาศ



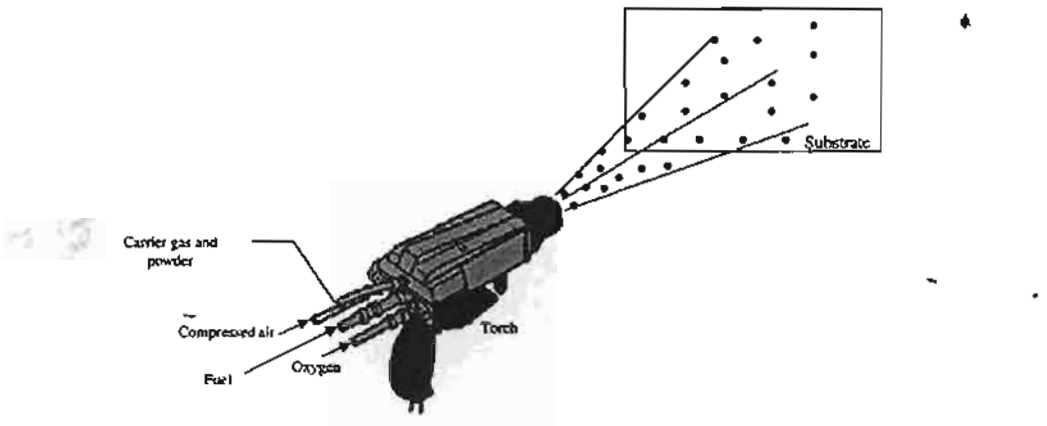
รูปที่ 4 ลักษณะเฉพาะของผิวเคลือบที่เกิดจากการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

1.3 การเคลือบพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง

ปัจจุบันพอลิเมอร์ได้รับความนิยมที่จะนำมาทำการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติด้านการป้องกันการกัดกร่อน (corrosion) การทนต่อสารเคมี (chemical resistance) มีสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานต่ำ การเคลือบผิวโลหะด้วยพอลิเมอร์ทำโดยวิธีการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง การพ่นเคลือบด้วยเปลวพลาสมา หรือ การพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ Lins และคณะ [2] ได้ทำการพ่นเคลือบ Polyethyleneterephthalate (PET) ลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1020 โดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ (LVOF) (ดังรูปที่ 5) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน และการสึกหรอของชิ้นงาน ในการพ่นเคลือบผงที่เป็นพอลิเมอร์จะต้องใช้หัวพ่น (nozzle) ชนิดพิเศษ เพื่อลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์โดยจะมี Cooling gas ring คั่นระหว่างเปลวไฟด้านนอก และตรงกลางที่เป็นช่องปล่อยผง เพื่อป้องกันผงเคลือบสัมผัสกับเปลวไฟที่มีความร้อนสูงมากเกินไป ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปืนพ่นชนิด Diamond Jet ใช้ก๊าซโพรเพนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงและใช้ก๊าซออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน ก๊าซพาผงคือก๊าซไนโตรเจน ระยะทางในการพ่นเคลือบอยู่ระหว่าง 14-32 เซนติเมตร ผลการพ่นเคลือบพบรูพรุนเกิดขึ้นภายในผิวเคลือบเนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ

Vuoristo และคณะ [6] ทำการพ่นเคลือบ Poly(vinylidene fluoride) (PVDF), Ethylene chlorotrifluoroethylene (ECTFE), Perfluoroalkoxy alkane (PFA) และ Fluorinated perfluoroethylenepropylene (FEP) โดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง และเปลวพลาสมา ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบเปลวเพลิง ก๊าซที่ใช้คือ ก๊าซออกซิเจนกับอเซทิลีนในปืนพ่นของ Sulzer Metco A3000S (Metco 6P-II) และใช้ก๊าซโพรเพนกับอากาศ ในระบบการพ่นของ TeroDyn 3500 ส่วนการพ่นแบบเปลวพลาสมา ใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับไฮโดรเจนในระบบ Sulzer Metco A3000S มีก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซพาผง พบว่าผิวเคลือบ PVDF ที่ได้จากการพ่นเคลือบทั้ง 2 กระบวนการไม่พบรูพรุนและสามารถทนต่อสภาวะที่เป็นเบส ส่วนในสารเคมีที่เป็นกรดนั้นผิวเคลือบได้ถูกกัดกร่อนออกไปในปริมาณต่ำ

Gawne และ Bao [7] ได้ทำการพ่นเคลือบ Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), Ethylene acrylic acid (EAA) และวัสดุผสมระหว่าง UHMWPE กับ EAA เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง โดยใช้ก๊าซอเซทิลีนกับออกซิเจน พบว่าผิวเคลือบ UHMWPE มีความเปราะสูง และในการพ่นเคลือบยังปรับปรุงการยึดเกาะของผิวเคลือบ UHMWPE กับชิ้นงานรองรับโดยใช้ EAA เป็น bond layer



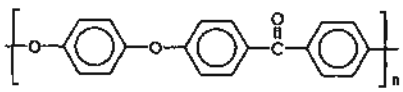
รูปที่ 5 ลักษณะของกระบวนการพ่นแบบการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ (LVOF)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การพ่นเคลือบ PEEK ด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ (LVOF) โดยใช้หัวพ่นเคลือบพิเศษสำหรับงานทางด้านพอลิเมอร์โดยเฉพาะ เนื่องจากเทคนิคการพ่นเคลือบนี้จะมีต้นทุนทางด้านการผลิตต่ำ และง่ายต่อการใช้งาน เมื่อเทียบกับเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเทคนิคอื่นๆ และใช้ก๊าซโพรเพนเป็นก๊าซเชื้อเพลิง เนื่องจากจะใช้อุณหภูมิขณะพ่นเคลือบไม่สูงมาก และเป็นหนึ่งในก๊าซที่ถูกเลือกใช้ในงานการพ่นเคลือบพอลิเมอร์จากงานวิจัยที่ผ่านมา

1.4 การพ่นเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง

1.4.1 พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone; PEEK) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สมบัติโดยทั่วไปแสดงได้ดังตารางที่ 2 นอกจากนี้ PEEK ยังทนต่อสารเคมี มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทางที่ต่ำ จึงสามารถนำไปใช้งานทางด้านการป้องกันการสึกหรอได้ดี [8] โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

ตารางที่ 2 สมบัติของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (ดัดแปลงมาจาก [9])

Properties	**Unit**	**PEEK**
Melting point	°C	334
Glass transition	°C	143
Decomposition point	°C	527
Density	g/cm^3	1.32
Heat conductivity	J/mK	0.25
Melt-Flow-Index		4.49
Linear thermal expansion	$10^{-6}K^{-1}$	4.7 $<T_g$
		10.8 $>T_g$
Crystallinity	%	35

1.4.2 การพ่นเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

การพ่นเคลือบ PEEK สามารถเคลือบด้วยกระบวนการพ่นเคลือบ 3 วิธี ได้แก่ การพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง การพ่นเคลือบด้วยเปลวพลาสมา หรือ การพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง Liao และคณะ [10] ได้ทำการพ่นเคลือบ PEEK ลงบนชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Plasma spraying, HVOF spraying และ Flame spraying พบว่าผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบด้วย Flame spraying ให้ผลดีที่สุด เนื่องจากผิวเคลือบที่พ่นด้วยกระบวนการ Plasma spraying ยังพบรูพรุนที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ เช่นเดียวกับการพ่นเคลือบด้วย HVOF spraying ที่พบรูพรุนอยู่บ้างเล็กน้อย

Lugscheider และคณะ [9] ทำการพ่นเคลือบ PEEK ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง โดยใช้ปืนพ่นของ Metco MP6 ก๊าซที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซอเซทิลีนและก๊าซโพรเพน ทำการศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบเกี่ยวกับการให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ ระยะทางในการพ่นเคลือบที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวเคลือบ พบว่าการให้ความร้อนกับผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่งผลให้การยึดเกาะของผิวเคลือบมีความแข็งแรงสูงกว่าที่ให้ความร้อนกับผิวเคลือบต่ำ เนื่องจากพอลิเมอร์ไหลได้ดีสามารถแทรกตัวไปตามช่องว่างได้ และระยะทางที่ 20 เซนติเมตร เป็นระยะทางที่เหมาะสมทำให้ผงเคลือบมีการหลอมเหลวพอดี ผงเคลือบไม่เย็นตัวเร็วเกินไปหรือหลอมเหลวมากเกินไป

นอกจากนี้ Liao และคณะ [11] ยังได้ปรับปรุงความแข็งแรงของผิวเคลือบ PEEK โดยการผสมสารเสริมแรง SiC เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ทนต่อการสึกหรอ เพื่อนำไปใช้งานในทางการบิน

1.5 การยึดเกาะของผิวเคลือบ (Adhesion bonding)

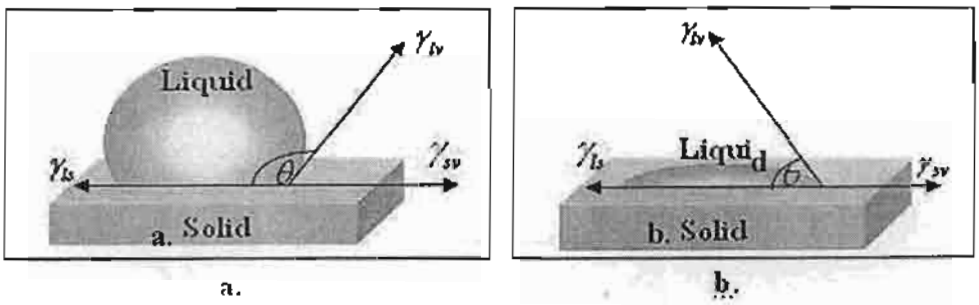
เมื่อผงเคลือบที่หลอมเหลวตกกระทบลงบนผิวชิ้นงาน มุมที่เกิดขึ้นระหว่างผงเคลือบที่หลอมเหลวกับผิวชิ้นงานขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของอนุภาคผง (wettability) [12] ซึ่งสามารถบอกถึงระดับความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผงเคลือบและผิวเคลือบได้ โดยการยึดเกาะของอนุภาคผงที่หลอมเหลว (liquid) กับผิวของของแข็ง (solid) ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิว (surface tension) ของวัสดุเคลือบ การที่แรงตึงผิวมีค่าสูงกว่าแรงตึงผิวของผิวชิ้นงานนั้นส่งผลให้การยึดเกาะไม่ดี เนื่องจากเมื่อแรงตึงผิวสูงทำให้มุมในการสัมผัสของผิวเคลือบสูงขึ้น เกิดเป็นมุมป้าน หรือมุม 180 องศา ดังรูปที่ 7a. จากสมการของ Young's equation แสดงมุมในการสัมผัสของผิวการเปียก (wetting angle) ดังสมการที่ 1

$$\gamma_{lv}\cos\theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \qquad (1)$$

เมื่อ γ_{lv} คือ แรงตึงผิวของของเหลว (Liquid)

γ_{sv} คือ แรงตึงผิวของของแข็ง (Solid)

γ_{sl} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว (Interfacial tension)

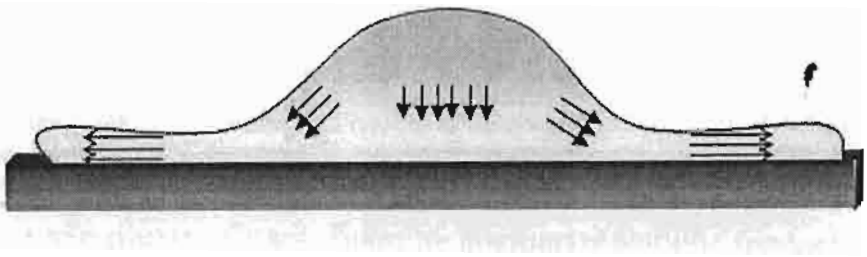


รูปที่ 7 ลักษณะของมุมที่เกิดขึ้น (contact angle) เมื่อมีของเหลวตกกระทบกับผิวของแข็ง

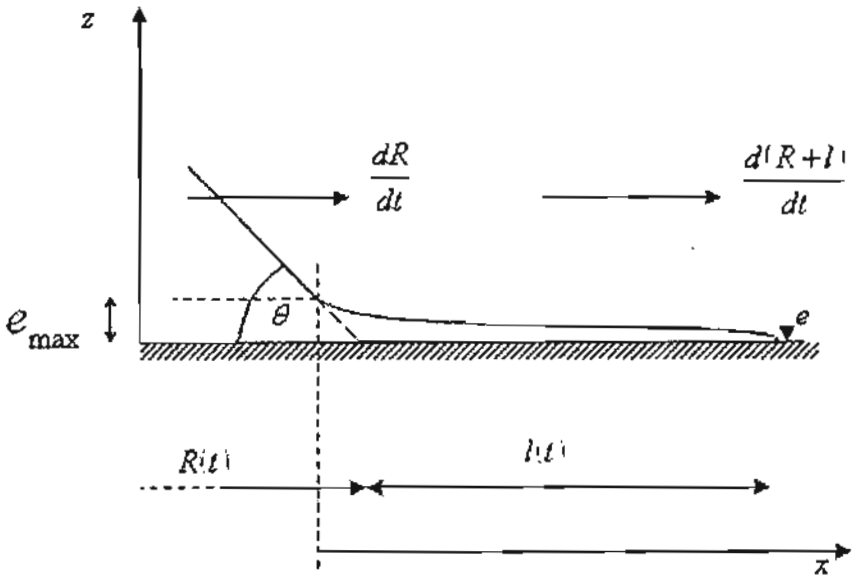
a. มุมที่เกิดขึ้น $\theta > 90^\circ$ ของเหลวจะไม่ยึดเกาะกับผิวของของแข็ง

b. มุมที่เกิดขึ้น $\theta < 90^\circ$ ของเหลวจะยึดเกาะกับผิวของของแข็ง

ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน ลักษณะของการเปียกผิว (Wetting) ที่ดีนั้น อนุภาคผงที่ตกลงบนผิวชิ้นงานควรมีลักษณะแบบ Pancake ตรงบริเวณขอบของของเหลวที่ตกกระทบกับผิวของแข็งจะเกิดการไหลออกไปทางด้านข้าง ดัง**รูปที่ 8** เมื่อพิจารณาการ Wetting ตรงบริเวณขอบของของเหลวที่ตกกระทบบนผิวของแข็งที่ไหลออกไปทางข้าง สามารถที่จะคำนวณหาความเร็วที่เกิดขึ้นในการไหล (U) เมื่อ $U = \frac{dR}{dt}$ เป็นความเร็วในการไหลเริ่มต้นเมื่อตกกระทบผิวเคลือบ และ $U = \frac{d(R+l)}{dt}$) เป็นความเร็วของผงเคลือบที่ไหลไปบนผิวชิ้นงาน เมื่อ R คือรัศมีของผงเคลือบที่ตกกระทบผิวชิ้นงาน l คือ ระยะทางที่ผงเคลือบไหลออกไปจากเดิมเมื่อตกกระทบ t เป็นเวลาที่ใช้ในการไหลของผงเคลือบ แสดงใน**รูปที่ 2.9** ซึ่งจะพิจารณาถึงรัศมีของผงเคลือบที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา ค่า e_{max} ระยะขอบของผงเคลือบหลอมเหลวที่ตกกระทบชิ้นงาน e คือระยะที่ผงเคลือบหลอมเหลวไหลออกไป



รูปที่ 8 ลักษณะของการเปียก (Wetting) ที่เกิดขึ้นในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน



รูปที่ 9 ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการไหลของขอบผงที่หลอมเหลวตกลงบนผิวของแข็ง [12]

การยึดเกาะของผิวเคลือบนั้นสามารถจำแนกออกได้หลายแบบ เช่น การยึดเกาะโดยอาศัย พันธะทางเคมี การยึดเกาะโดยอาศัยแรงทางกล หรือการยึดเกาะโดยอาศัยแรงไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในการพ่นเคลือบจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ว่าผิวเคลือบที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการยึดเกาะกันในลักษณะไหน เพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบและผิวชิ้นงานให้ดีขึ้น

1.5.1 การยึดเกาะของผิวเคลือบด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic theory of adhesion)

จากสมบัติตามตารางธาตุของธาตุแต่ละชนิดจะมีค่า อิเล็กโทรเนกาติวิตี้ (electronegativity) ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีนี้เป็นค่าที่บอกถึงความแรงของการดึงดูดระหว่างอะตอมและอิเล็กตรอน โดยค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีของธาตุที่อยู่ด้านบนของตารางธาตุ จะสูงกว่าธาตุที่อยู่ทางด้านล่างในหมู่

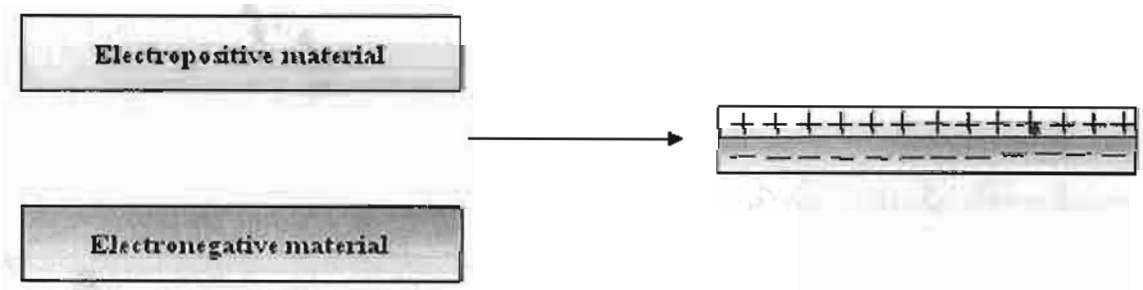
เดียวกัน และธาตุที่อยู่ทางขวาของตารางธาตุนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าธาตุที่อยู่ทางด้านซ้ายของตารางธาตุในคาบเดียวกัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างธาตุลิเทียม (Li) กับธาตุฟลูออไรด์ (F) ธาตุลิเทียมจะมีสมบัติเป็นอิเล็กโทรโพสิทีฟ (electropositive) และ ธาตุฟลูออไรด์จะมีสมบัติเป็นอิเล็กโทรเนกาทีฟ (electronegative) ดังรูปที่ 10 ซึ่งจากทฤษฎีของ Derjaguin [13] กล่าวว่าการยึดเกาะของผิววัสดุนั้นเกิดจากการที่ประจุเคลื่อนที่มาตรงบริเวณผิวสัมผัสมาก เกิดเป็นแรงคูลอมบ์ขึ้น (coulombic forces) ดังสมการที่ 2

$$W_B = 2\pi\sigma_0^2 h_B \qquad (2)$$

เมื่อ W_B คือ งานที่ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างผิวแตกออกจากกัน

σ_0 คือ ความหนาแน่นของประจุที่ผิว

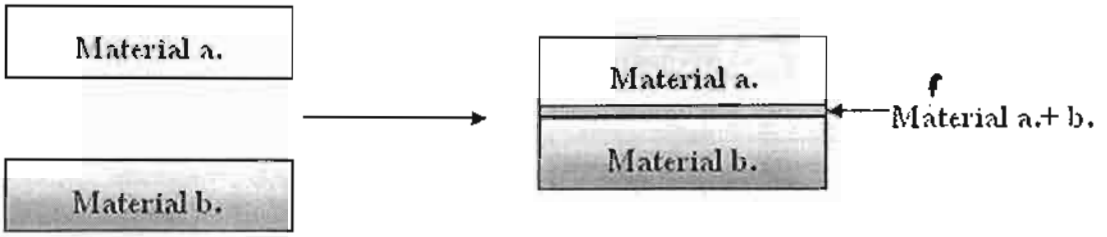
h_B คือ ระยะของการแยกออกของวัสดุ 2 ชนิด



รูปที่ 10 ลักษณะของการยึดเกาะของผิวเคลือบด้วยแรงทางไฟฟ้า [13]

1.5.2 การยึดเกาะของผิวเคลือบโดยการแพร่ (Diffusion theory of adhesion)

เมื่อทำการเคลือบวัสดุชนิด a. ลงบนผิวชิ้นงาน b. ตรงบริเวณผิวรอยต่อของผิวเคลือบจะเกิดการแพร่ของอะตอมของวัสดุ a. ไปยังวัสดุ b. หรือวัสดุ b. แพร่ไปยังวัสดุ a. หรือต่างแพร่เข้าหากัน แต่สุดท้ายตรงบริเวณรอยต่อของผิวเคลือบนั้นเกิดเป็นเฟสของวัสดุ a. และ b. ผสมกันอยู่ ดังรูปที่ 11 ซึ่งจะทำให้การยึดเกาะของผิวเคลือบมีความแข็งแรงสูงขึ้น



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการยึดเกาะของผิวเคลือบโดยการแพร่ [13]

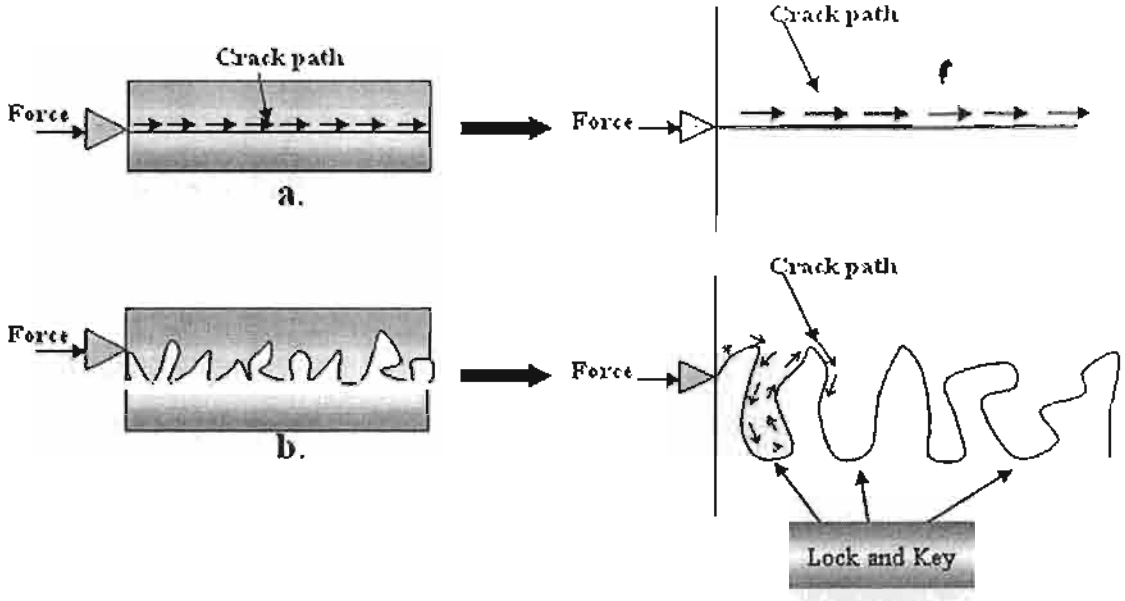
1.5.3 การยึดเกาะของผิวเคลือบด้วยการยึดเกาะทางกล (Mechanical interlocking)

โดยส่วนใหญ่ ผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจะมีการยึดเกาะทางกลกับชิ้นงาน ในการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนชิ้นงานที่เป็นโลหะนั้นจะเป็นการยึดเกาะทางกลอย่างเดียว ถ้าไม่ได้มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเคมีหรือใช้ตัวประสาน (bond coat) ซึ่งจาก**รูปที่ 12** แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวที่ไม่มีการเตรียมผิว คือเป็นผิวเรียบๆ เมื่อได้รับแรงกระทำตรงบริเวณรอยต่อของผิวเคลือบผิวชิ้นงานจะดูดซับแรงเข้ามา ถ้าแรงที่ได้รับมากพอก็จะเกิดรอยแตกขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน ทำให้ผิวเคลือบหลุดลอกออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย แต่เมื่อมีการเตรียมชิ้นงานโดยการนำไปพ่นกริต ทำให้ผิวชิ้นงานนั้นเกิดความขรุขระ เมื่อทำการพ่นเคลือบพอลิเมอร์ลงบนผิวชิ้นงานโลหะ ผิวเคลือบจะแทรกเข้าไปตามบริเวณช่องว่างของผิวชิ้นงานจนเต็ม เกิดการล็อกกันของผิวเคลือบและผิวชิ้นงาน ซึ่งจะเรียกว่า Lock and Key ทำให้ผิวเคลือบมีการยึดเกาะที่แข็งแรง เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกบริเวณรอยต่อของผิวเคลือบ รอยแตกจะวิ่งตามผิวขรุขระของผิวเคลือบซึ่งมีขอบและมุมอยู่ทำให้การแตกของผิวเคลือบเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน การเตรียมผิวชิ้นงานจึงเป็นสิ่งสำคัญ

1.6 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อผิวเคลือบ

อิทธิพลของพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบที่ส่งผลต่อโครงสร้าง และสมบัติของผิวเคลือบนั้นมีอยู่มาก พารามิเตอร์ในการพ่นที่สามารถควบคุมได้ แสดงดัง**รูปที่ 13** เพราะฉะนั้นในการพ่นเคลือบจึงต้องระวังในเรื่องของการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสม

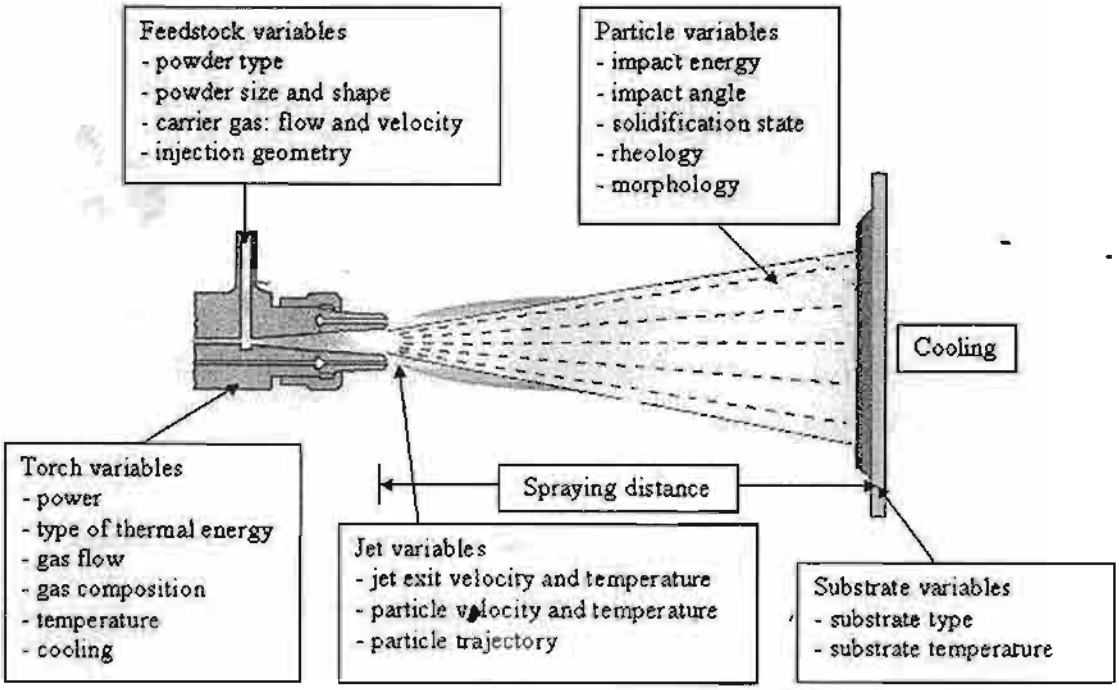
ในที่นี้จะขอกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่การให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ ระยะทางในการพ่นเคลือบ และ ความหยาบผิว



รูปที่ 12 ลักษณะการยึดเกาะของผิวเคลือบในทางกล [13]

a. แสดงการเกิดรอยแตกของผิวเคลือบเมื่อได้กับแรงในชิ้นงานที่มีผิวสัมผัสเรียบ

b. แสดงการเกิดรอยแตกของผิวเคลือบเมื่อได้กับแรงในชิ้นงานที่ผ่านการปรับผิวแล้ว



รูปที่ 13 อิทธิพลที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวเคลือบ (ดัดแปลงจาก [5] และ [14])

1.6.1 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ

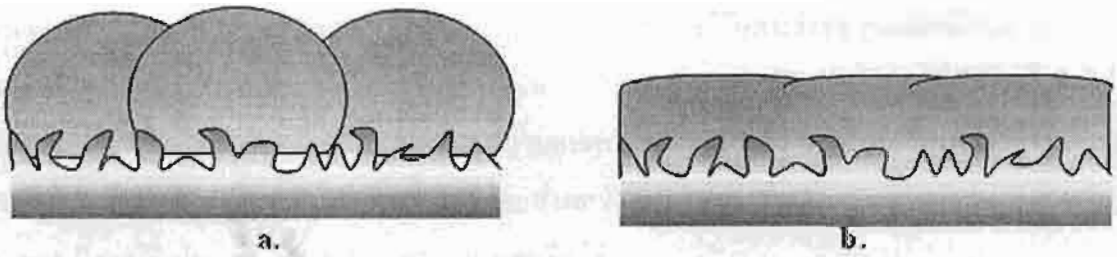
โดยทั่วไป การเคลือบนั้นจะใช้วัสดุเคลือบผิวต่างชนิดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (coefficient of thermal expansion) ที่ต่างกัน [9] เมื่อผิวเคลือบเย็นตัวลง การที่มีความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนที่แตกต่างกันมาก จะส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้าง เนื่องจากผิวเคลือบและผิวชิ้นงานมีการหดตัวไม่เท่ากัน การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจะเป็นการปรับอุณหภูมิของผิวชิ้นงานให้เหมาะสม ช่วยลดความเค้นที่เกิดจากการหดตัวเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ นอกจากนี้การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่เหมาะสมนั้นยังช่วยให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผงเคลือบกับชิ้นงานเป็นไปอย่างเหมาะสม ไม่เย็นตัวเร็วหรือช้าเกินไป เพราะถ้ามีการถ่ายเทความร้อนไว ผงเคลือบจะเกิดการแข็งตัวเร็ว ไม่สามารถเข้าไปแทรก และเติมเต็มให้กับช่องว่างได้ ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น [2,9] ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบต่ำลง เช่นเดียวกับ Zhang และคณะ [1] ได้ทำการพ่นเคลือบ PEEK ลงบนชิ้นงานที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ พบว่าผิวเคลือบที่ได้มีรูพรุนเกิดขึ้นมากภายในผิวเคลือบ และบริเวณด้านบนของผิวเคลือบ เนื่องจากผงเคลือบไม่สามารถไหลเข้าไปเติมเต็มช่องว่าง เนื่องจากเกิดการแข็งตัวก่อน ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานต่ำ จึงต้องทำการปรับปรุงผิวเคลือบโดยการหลอมผิวเคลือบใหม่ โดยใช้เลเซอร์หลอมเหลวให้ผงเคลือบ ทำให้ผงเคลือบไหลแทรกตัวเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างเพื่อลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น แต่เมื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานสูงมากเกินไปก็จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบขึ้นได้

Luciana และคณะ [2] ที่ได้ทำการพ่นเคลือบ PET ลงบนผิวชิ้นงานที่ได้รับความร้อนก่อนการพ่นเคลือบที่สูงมากเกินไป พบว่าผิวเคลือบจะมีรูพรุนเกิดขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ และรูพรุนจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานสูงขึ้นอีก การให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบจึงต้องไม่สูงและต่ำเกินไป โดยทั่วไปในการพ่นเคลือบพอลิเมอร์จะให้ความร้อนกับผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบอยู่ในช่วง 60-250 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานและวัสดุเคลือบผิว

1.6.2 ระยะทางในการพ่นเคลือบ (Spray distance)

ระยะทางในการพ่นเคลือบ คือระยะทางที่ผงเดินทางจากปลายหัว Nozzle ไปถึงผิวชิ้นงาน โดยผงเคลือบที่อยู่ในเปลวไฟจะมีการดูดความร้อนเข้ามาทำให้ผงเคลือบเกิดการหลอมเหลว เมื่อผงได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานก็จะเกิดการเสื่อมสภาพ เมื่อเวลาผ่านไปผงเคลือบจะเคลื่อนที่ออกจากเปลว

ไฟ ผงเคลือบจึงมีการคายความร้อนให้กับสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้ผงเคลือบเกิดการแข็งตัว ดังนั้น ระยะทางในการพ่นเคลือบที่ใกล้เกินไปหรือไกลเกินไปจะส่งผลต่อการหลอมเหลวของผงเคลือบ [9] ที่ระยะทางพ่นเคลือบใกล้ ชิ้นงานก็จะได้รับความร้อนจากเปลวไฟ [15] เมื่อผงเคลือบตกกระทบกับชิ้นงานจะเกิดการกระจายออกส่งผลให้ผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอ เมื่อเกิดการเย็นตัวผิวเคลือบจะมีการหดตัวสูง และในผงเคลือบที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ ผงเคลือบจะไม่สามารถเกิดการหลอมเหลวได้ทัน เนื่องจากมีเวลาในการสัมผัสความร้อนน้อย ผิวเคลือบที่ได้จะมีรูพรุนสูง แต่ถ้าระยะทางในการพ่นเคลือบไกลเกินไป ผงเคลือบจะเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะถึงผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นในผิวเคลือบ เนื่องจากความสามารถในการไหลของผงเคลือบต่ำ ไม่คลอบคลุมทั้งของหมดผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ลักษณะการหลอมของผงที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการยึดเกาะ
a. ผงนั้นมีการเย็นตัวเร็วเกินไป
b. ผงนั้นมีการหลอมที่เหมาะสม

1.6.3 ความหยาบของผิวชิ้นงานรองรับ

Packham [16] ทำการศึกษาพลังงานผิวและลักษณะของผิวชิ้นงานที่ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน พบว่าความหยาบของผิวเคลือบที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การยึดเกาะของผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

ความหยาบของผิวเคลือบจะช่วยเพิ่ม interlock ระหว่างผิว [17] และเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะของผิวเคลือบให้มากขึ้น ทำให้ผงเคลือบมีพื้นที่ในการยึดเกาะมากขึ้นกว่าผิวชิ้นงานที่เรียบ เมื่อผิวเคลือบได้รับแรงกระทำจากภายนอกในทิศทางขนานกับผิวเคลือบ ผิวชิ้นงานที่มีความหยาบผิวมากจึงสามารถรับแรงได้สูงกว่าชิ้นงานที่มีผิวเรียบ นอกจากนี้เมื่อความหยาบผิวสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มพลังงานที่ผิว (surface energy) ส่งผลผิวเคลือบมีการเปียกผิวได้ดีกว่าผิวชิ้นงานรองรับที่เรียบ

1.7 อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์

Kimura [15] ได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อพอลิเมอร์ ซึ่งปกติพอลิเมอร์จะเป็นวัสดุจำพวก Dimagnetic คือเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้ามากระทำ ส่งผงต่ออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเสียสมดุลไปเล็กน้อย เกิดเป็นขั้วแม่เหล็กขึ้นภายในอะตอมในทิศทางที่ขนานและตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ dimagnetic susceptibility (x) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ของแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นต่อหน่วยปริมาตร (Magnitude of the magnetization: M) กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากการนำวัสดุใส่เข้าไปในขดลวดสนามแม่เหล็ก (field strength: H) ดังสมการ $M = xH$ ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นจะได้ค่า x ประมาณ -10^{-6} ถึง -10^{-5} เมื่อเทียบกับวัสดุจำพวก Ferromagnetic จะมีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม จากรายงานการวิจัยพบว่าสนามแม่เหล็กนั้น มีผลต่อการจัดเรียงตัวของผลึกในวัสดุพอลิเมอร์ โดย Kimura ได้ทำการทดสอบหลอมเหลว PET แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวภายใต้สนามแม่เหล็ก พบว่าสนามแม่เหล็กจะส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดมีสมบัติทางด้านความเป็นผลึกที่เพิ่มสูงขึ้น โดยสนามแม่เหล็กจะส่งผลชัดเจนกับพอลิเมอร์ที่มีวงเบนซินอยู่ในสายโซ่โมเลกุล มีสมบัติเป็น anisotropic และสามารถตกผลึกได้

Nakamura และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดูดกลืนรังสี UV ของพอลิเมทิลฟีนิลไซเลน พบว่าค่าการดูดกลืนรังสี UV เพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กจาก 0-12 เทสลา เนื่องจากภายใต้สนามแม่เหล็ก ระนาบของหมู่ฟีนิลจะถูกบังคับให้อยู่ในทิศทางขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลต่อสายโซ่ หลักเกิดการเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

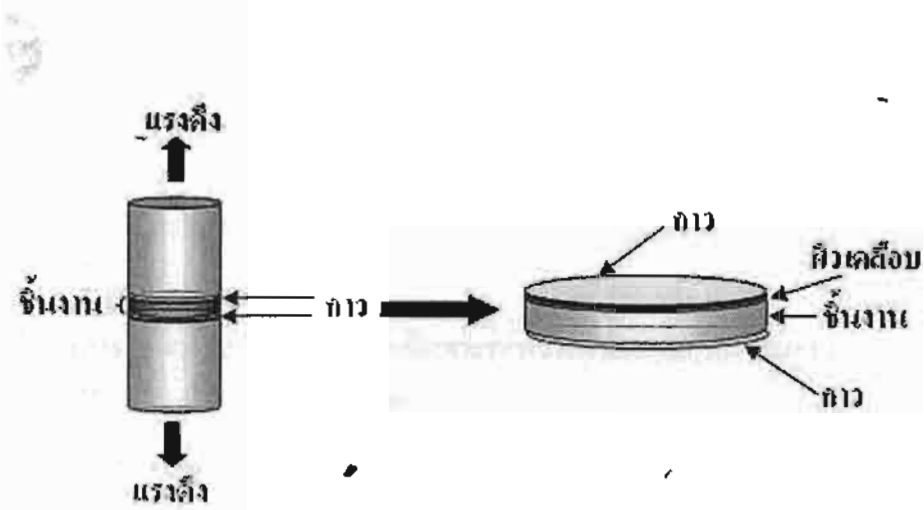
Sombatsompop [19] ได้ศึกษาการบวมตัวของ PS ABS PVC ในระบบหัวอัดรีดมีความเข้มแม่เหล็ก 126 มิลลิเทสลา พบว่า PS และ ABS ที่อัดผ่านหัวรีดที่มีความเป็นแม่เหล็กจะเกิดการบวมตัวมากกว่าในระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก แต่ PVC ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก อิเล็กตรอนในหมู่เบนซินในโครงสร้าง PS และ ABS เกิดการเคลื่อนที่ (delocalization) ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปของกลุ่มอิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และเกิดความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การบวมตัวเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กยังส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อัดรีดออกมาด้วย คือในระบบที่มีสนามแม่เหล็กทำให้ PCV และ ABS ที่อัดรีดออกมามีผิวที่ดีกว่าที่ไม่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความเป็นขั้ว ซึ่งสนามแม่เหล็กทำให้ความเป็นขั้วเพิ่มสูงขึ้น ค่าแรงกระทำระหว่างขั้ว (dipole –dipole interaction) จึงเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt strength) สูงขึ้น

1.8 การทดสอบทางกลของการยึดเกาะของผิวเคลือบ (Mechanical tests of adhesive bond strength)

ในกระบวนการพ่นเคลือบพอลิเมอร์ การยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดอายุการใช้งานของผิวเคลือบ ซึ่งในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนของพอลิเมอร์ลงบนผิวชิ้นงานที่เป็นโลหะปกติการยึดเกาะจะเป็นแบบทางกล ผิวเคลือบที่ได้จะมีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำกว่าการพ่นเคลือบโลหะลงบนโลหะด้วยกันเอง ดังนั้นการพ่นเคลือบจึงต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของผิวเคลือบที่ได้อยู่เสมอเพื่อคุณภาพของชิ้นงานที่ดี ซึ่งกระบวนการทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบมีอยู่หลายวิธี เช่น การทดสอบแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับผิวเคลือบ (tensile test) การทดสอบแรงเฉือน (shear test) การทดสอบแบบดึงลอก (peel test) การทดสอบด้วยเลเซอร์ (laser spallation tests) [20] การทดสอบแบบ Ultracentrifugal test การทดสอบแบบ Hammering test และ Scratch adhesion test

1.8.1 การทดสอบแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับผิวเคลือบ (Tensile test)

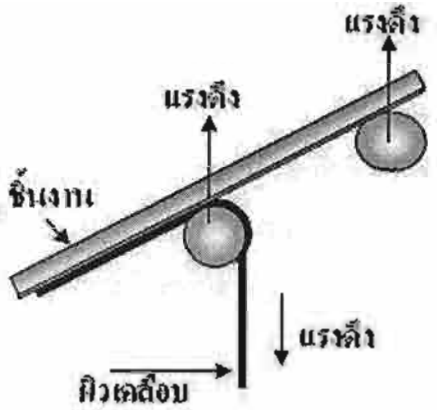
ในการทดลอบนี้ จะนำชิ้นงานมาติดกาวทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นนำไปติดกับแท่งโลหะ รอจนกาวแห้งแล้วนำไปทดสอบแรงดึง โดยให้แรงดึงตั้งฉากกับผิวเคลือบ การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM 633-79 [21] ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 การทดสอบความแข็งแรงของผิวเคลือบในทิศทางแรงดึง

1.8.2 การทดสอบแบบดึงลอก (Peel test)

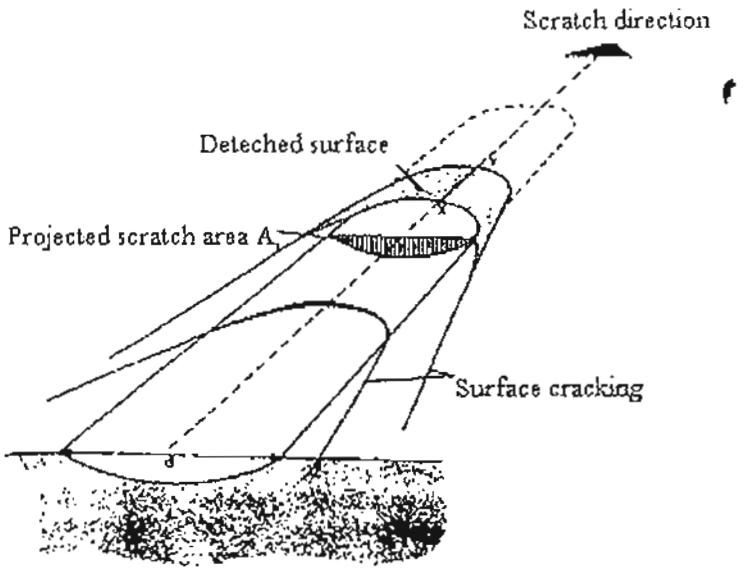
เป็นการทดสอบโดยการลอกผิวจากมุมด้านหนึ่งไปยังปลายของผิวเคลือบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งการทดสอบแบบนี้จำเป็นต้องมีผิวเคลือบที่ไม่แข็งจนเกินไป เพราะจะทำให้ในระหว่างการลอกนั้นผิวเคลือบจะแตกหัก แต่การทดสอบด้วยเทคนิคนี้จะสามารถทราบได้ว่าบริเวณใด มีการยึดเกาะที่ดี บริเวณใดที่มีการยึดเกาะที่ไม่ดี [22] ซึ่งการทดสอบทั่วไปมีลักษณะดังรูปที่ 16 Gross และคณะ [22] ได้ทำการทดสอบการยึดเกาะของ Ethylene methacrylic acid (EMAA) copolymer ที่เคลือบลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ด้วยวิธี Peel test โดยใช้เครื่อง Instron 4505 ในการทดสอบด้วยความเร็วในการดึงลอกผิว 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบ 4 ชิ้นงานต่อที่สภาวะการทดลอง พบว่าเมื่อให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบแก่ชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการลอกออกของผิว (peel strength) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อผิวเคลือบมีความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ peel strength ลดลง



รูปที่ 16 การทดสอบแบบดึงลอก

1.8.3 การทดสอบการยึดเกาะจากรอยขีด (Scratch adhesion test)

การทดสอบนี้เป็นการวัดความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน โดยวิธีนี้จะเหมาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นผิวเคลือบแยกชั้นได้ ชิ้นงานที่มีลักษณะของการกระจายตัวของวัสดุ 2 ชนิดผสมกันจะไม่สามารถวัดได้โดยวิธีนี้ [23] ในการวัดจะใช้กดหัวเพชรกดลงบนผิวเคลือบแล้วให้ชิ้นงานหรือหัวกดเพชรเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นการให้แรงแบบ Normal และ Shear forces กับผิวเคลือบ โดยการเคลื่อนที่ขณะมีแรงกดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวเคลือบดัง รูปที่ 17 การพิจารณาขนาดและรูปร่างของรอยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวที่แรงกดต่างๆ จะสามารถหาการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานได้



รูปที่ 17 รอยที่เกิดขึ้นจากการทดสอบรอยขูดขีด [24]

มีนักวิจัยได้ศึกษา และวิเคราะห์กลไกของ Scratch test เมื่อพิจารณาแรงเฉือน (shearing force) ต่ำสุดที่ทำให้ผิวเคลือบหลุดลอกออก จนเกิดความเสียหายในรูปแบบ Plastic อย่างเดียว โดยจะขึ้นอยู่กับกระบวนการ Scratch test สมบัติของชิ้นงาน และแรงเสียดทานระหว่างหัวกดลากกับผิวเคลือบ ต่อจากนั้นได้มีการพัฒนาศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic – plastic รวมกัน โดยการคำนวณถึงการหลุดลอกของผิวเคลือบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสมบัติของผิวเคลือบเอง [23,24]

Bull และคณะ [7] ได้กล่าวถึง Laugier ที่ได้ทำการศึกษาการยึดเกาะของผิวเคลือบ เมื่อน้ำหนักน้อยสุดที่ทำให้ผิวเคลือบหลุดลอกออกในระหว่างการเคลื่อนที่ของหัวกดลาก จะเกิด Compressive stresses ขึ้นจนเกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบและปลดปล่อยพลังงานออกมา พิจารณาได้จาก Griffith energy balance เมื่อพิจารณาในแนวดึง ค่าพลังงาน Elastic strain energy ต่อหน่วยปริมาตร (U) แสดงได้ดังสมการที่ 3

$$U = \frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E} \qquad (3)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นที่ตำแหน่งใดๆ

E คือ ค่า ยังโมดูลัส

จากรอยขีดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Scratch test พบว่า พื้นที่ที่เกิดการหลุดลอกออกจะมีลักษณะพื้นที่เป็นครึ่งวงกลม เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 3 เมื่อมีปริมาตรเป็นครึ่งวงกลม ค่า Elastic energy (V) จึงหาได้จากสมการที่ 4

$$V = \frac{\pi r^2 t}{2} \frac{\sigma^2}{E} \tag{4}$$

เมื่อ t คือ ความหนาของผิวเคลือบ

โดยพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาคือพลังงานที่ผิว (surface energy) จากการแตกหรือแยกออกของผิวเคลือบ ซึ่งก็คืองานที่ทำให้เกิดแยกออกของผิวเคลือบ (work of adhesion; W)

$$W = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \tag{2.5}$$

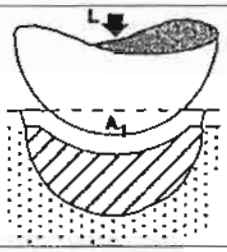
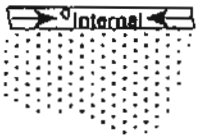
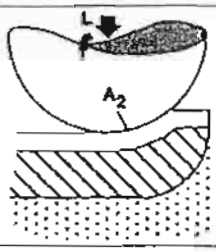
จากสมการที่ 5 γ_1 และ γ_2 เป็นพลังงานที่ผิวของผิวชิ้นงานและผิวเคลือบ γ_{12} เป็นพลังงานระหว่างผิวชิ้นงานและผิวเคลือบ เมื่อพิจารณาถึงพลังงานอีลาสติกและพลังงานผิวเมื่อเกิดการแตกหรือแยกออกของผิวเคลือบหลังจากทำการ scratch จะสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 6

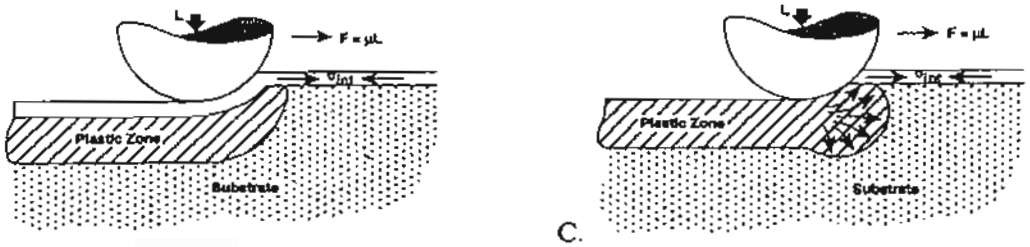
$$\frac{\pi r^2 t}{2} \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} = \frac{\pi r^2 W}{2} \tag{6}$$

จากสมการที่ 6 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$W = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 t}{E} \tag{7}$$

Bull และคณะ [24] กล่าวถึง Burnett และ Rickerby ที่ได้อธิบายถึงความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการทำ scratch test จนทำให้ผิวเคลือบหลุดลอกออก ซึ่งประกอบด้วย 1. Elastic – plastic indentation stress (ploughing) 2. Internal stress และ 3. Tangential frictional stress ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 18

A. a.) Indentation	b.) Internal Stress	c.) Friction (adhesion)
		
Ploughing : $F_p = A_1\sigma_p$	**Internal Stress :** $F_s = f(\sigma_{internal})$	**Adhesion :** $F_a = A_2\tau$
$F = F_p + F_s + F_a$		



รูปที่ 18 แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นจากการทดสอบรอยขีดขูด [24]

ผลรวมของความเค้นที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของแรงเสียดทาน (F) สามารถวัดได้จากการ Scratch test เมื่อพิจารณาผลรวมของแรงเสียดทาน ระหว่าง Ploughing stress (σ_p) และ Shear stress หรือ tangential frictional stress (τ)

$$F = A_1\sigma_p + A_2\tau \tag{8}$$

เมื่อ A_1 และ A_2 เป็นพื้นที่ตัดขวางของรอยขีดและผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับผิวเคลือบ ซึ่ง A_2 จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ A_1 ดังนั้น Ploughing stress จะส่งผลต่อการหลุดลอกของผิวเคลือบมากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 9

$$F = F_p = A_1\sigma_p \tag{9}$$

เมื่อมีการเคลื่อนที่ของหัวกด (stylus) น้ำหนักที่กดลงที่หัวกด จะอยู่ที่ด้านหน้าตรงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับผิวเคลือบแค่ครึ่งเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 18 จากสมการที่ 9 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 10

$$\sigma_p = \frac{2F}{A_1} \tag{10}$$

เมื่อ F มีค่าเท่ากับ น้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผิวเคลือบหลุดลอกออก (L_c) แทนค่าสมการที่ 10 ในสมการที่ 7

$$L_c = \frac{\pi d_c^2}{8}\left[\frac{2EW}{t}\right]^{1/2} \tag{11}$$

เมื่อ d คือ ความกว้างของรอยขูดที่เกิดขึ้น

จาก**รูปที่ 18** เมื่อพิจารณาค่าของความเครียด (strain field) สามารถที่จะหางาน (W) ที่ใช้ในการหลุดลอกของผิวเคลือบที่แสดงถึงความแข็งแรงของการยึดเกาะได้ **[25]** จากสมการของ Elastic deformation energy (U) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ายังโมดูลัสของผิวเคลือบ และความเครียดที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Scratch test ดังสมการที่ 12

$$U = \frac{E_f}{2}\sum \varepsilon^2 = \frac{E_f}{2}\left[\varepsilon_{xx}^{tot^2} + \varepsilon_{yy}^{tot^2}\right] \tag{12}$$

เมื่อ ε_{xx}^{tot} และ ε_{yy}^{tot} เป็นความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวแกน x และ แกน y แสดงได้ดังสมการที่ 13 และ 14

$$\varepsilon_{xx}^{tot} = \frac{1}{E_s}\left[\sigma_{xx} - \nu_s\sigma_{yy}\right] + \frac{\sigma_{res}\left(1-\nu_f\right)}{E_f} \tag{13}$$

$$\varepsilon_{yy}^{tot} = \frac{1}{E_s}\left[\sigma_{yy} - \nu_s\sigma_{xx}\right] + \frac{\sigma_{res}\left(1-\nu_f\right)}{E_f} \tag{14}$$

เมื่อ σ_{xx} และ σ_{yy} เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน x และ แกน y

σ_{res} เป็นความเค้นตกค้างในผิวเคลือบ

ν_s เป็นค่า Poisson's ratio ของชิ้นงานรองรับ

ν_f เป็นค่า Poisson's ratio ของผิวเคลือบ

E_s เป็นค่ายังโมดูลัสของชิ้นงานรองรับ

E_f เป็นค่ายังโมดูลัสของผิวเคลือบ

เมื่อผิวเคลือบเกิดการหลุดลอกออก จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและพื้นที่ส่วนที่หลุดลอกออกจะมีลักษณะรูปร่างเป็นครึ่งวงกลม ดังนั้นพลังงานที่ผิวเคลือบรับได้ก่อนที่เกิดจะหลุดลอกออก หาได้จากสมการที่ 15

$$U = \frac{E_f}{2}\left(\sum \varepsilon^2\right)\frac{\pi c^2 t}{2} - W\frac{\pi c^2}{2} - 2(\pi + 2)c\gamma_f t \qquad (15)$$

เมื่อ c เป็นรัศมีของผิวเคลือบที่เกิดการลอกออก

γ_f เป็นพลังงานผิวของผิวเคลือบ

จากสมการที่ 15 ในเทอมแรกจะเป็นค่าของ Elastic deformation energy ที่กักเก็บไว้ในผิวเคลือบ ในเทอมที่สอง จะเป็นพลังงานผิวและรอยต่อที่เกิดจากการหลุดลอกออก และในเทอมสุดท้ายเป็นพลังงานผิวที่เกิดขึ้นจากการหลุดลอกออกของผิวเคลือบ ถ้าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างการเกิดความเสียหายกับผิวเคลือบทำให้พลังงานที่ผิวและระหว่างผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจนเกิดการแตกหักออกของผิวเคลือบขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 16

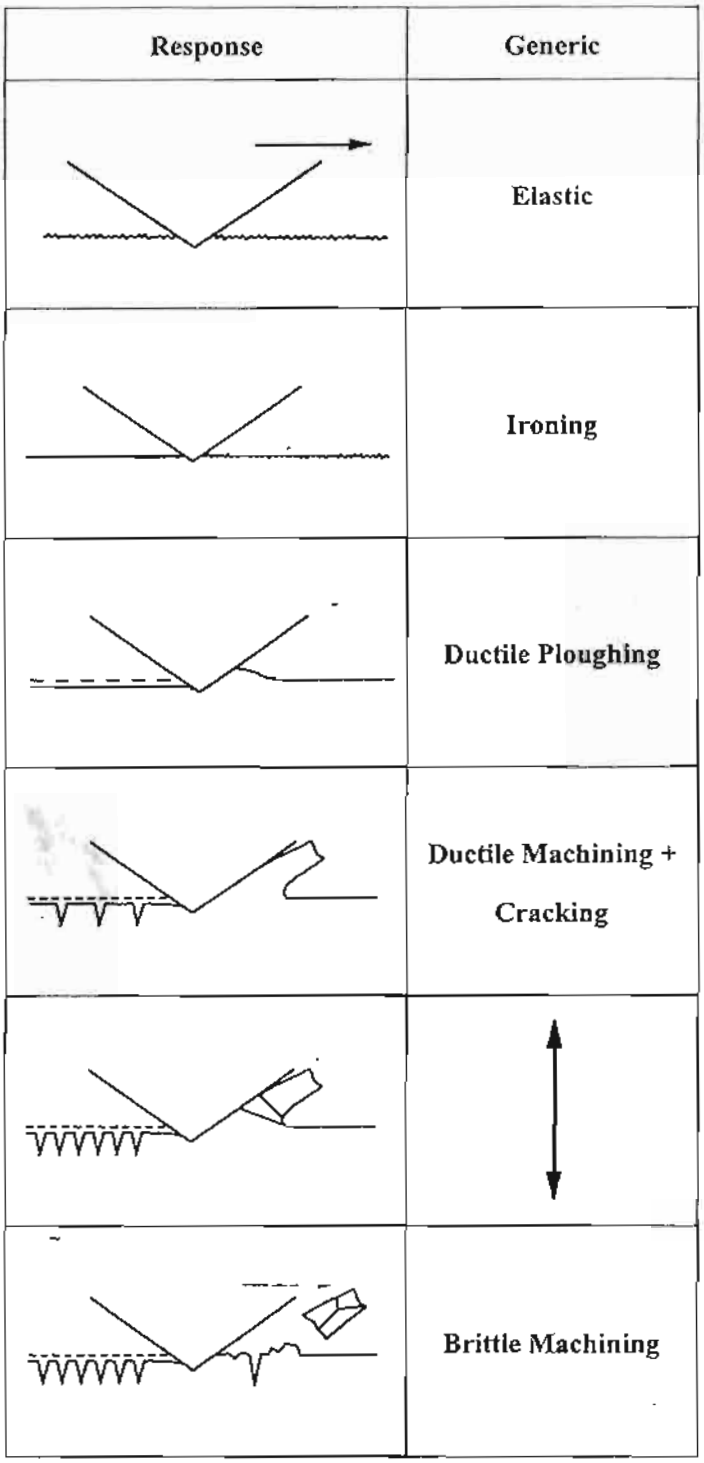
$$\frac{\partial U}{\partial c} = \frac{E_f}{2}\left(\varepsilon^2\right)\pi c t - W\pi c - 2(\pi + 2)\gamma_f t = 0 \qquad (16)$$

จากสมการที่ 16 ค่า Work of adhesion (W) ซึ่งจะบอกถึงความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน สามารถหาได้จากสมการที่ 17

$$W = \frac{E_f}{2}\left(\sum \varepsilon^2\right) - \frac{2(\pi + 2)}{\pi}\frac{\gamma_f}{c}t \qquad (17)$$

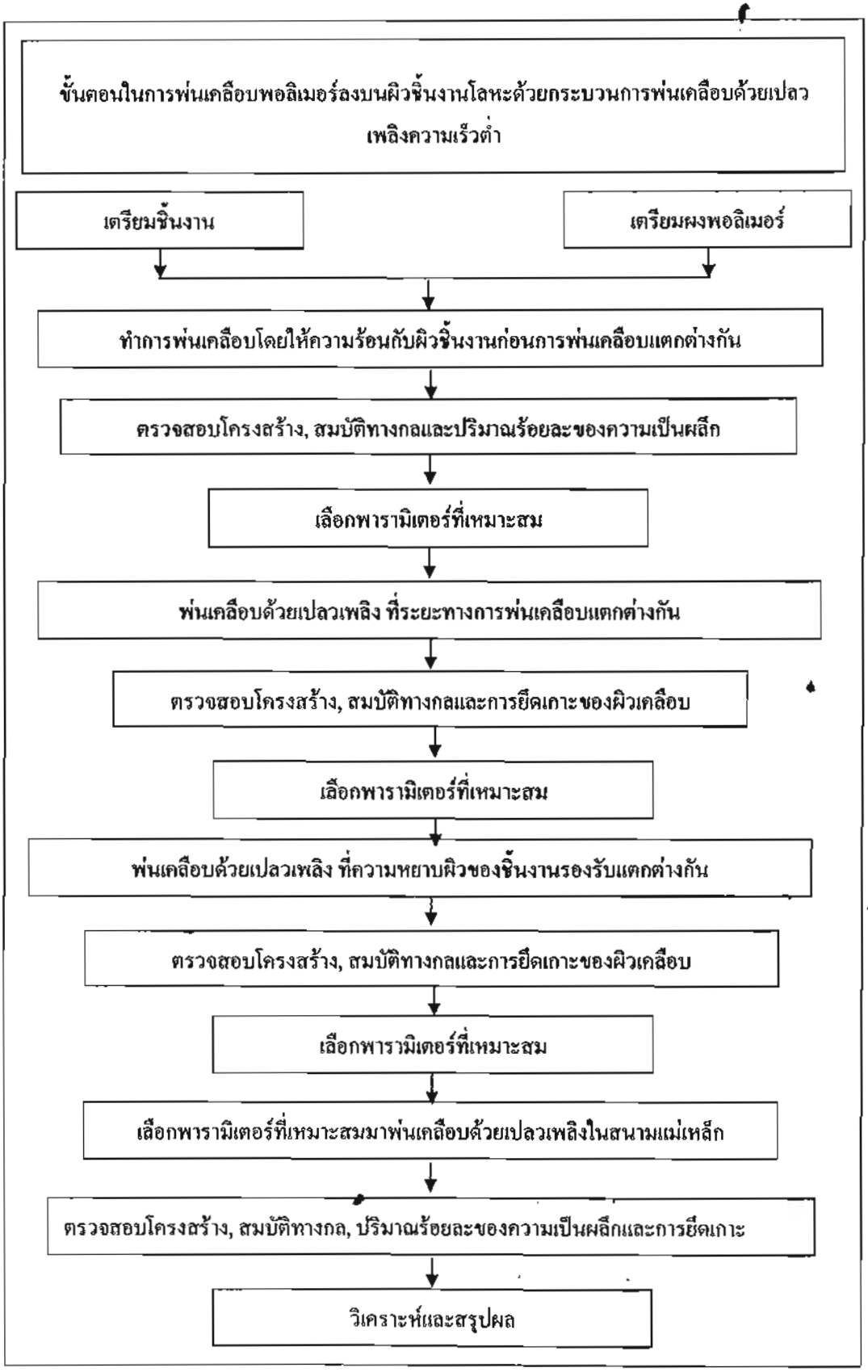
ในสมการที่ 17 พบว่า ความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับสมบัติและลักษณะของผิวเคลือบ (ค่ายังโมดูลัสของผิวเคลือบ พลังงานผิว และค่าความหนา) กับความเครียดและรอยกว้างของผิวเคลือบที่เกิดจากการ Scratch test

จากการทดสอบ Scratch test ในพอลิเมอร์ ลักษณะของรอยขูดขีดที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีสมบัติทางด้านความแข็งต่างกันก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่แตกต่างกันดังรูปที่ 19 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์พิจารณาถึงสมบัติทางด้านความแข็งของผิวเคลือบได้ [26]



รูปที่ 19 ลักษณะของการเสียรูปเนื่องจากการทดสอบรอยขีดของพอลิเมอร์ [26]

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 20 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพ่นเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (polyetheretherketone; PEEK) ลงบนชิ้นงานโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียมและ เหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้เทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ (low velocity oxy-fuel; LVOF) โดยหาค่าความหยาบของผิวชิ้นงานรองรับที่มีผลต่อการยึดติดของผิวเคลือบ และพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ ได้แก่ การให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ และระยะทางในการพ่นเคลือบ การตรวจสอบวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการพ่นเคลือบ ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ความหยาบของผิวเคลือบ ความแข็งของผิวเคลือบ ปริมาณร้อยละของความเป็นผลึก และค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะ (bond strength) ระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน

เมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการพ่นเคลือบแล้ว ทำการปรับปรุงการยึดเกาะของผิวเคลือบโดยทำการพ่นเคลือบชิ้นงานภายใต้สนามแม่เหล็ก ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติของผิวเคลือบและดัชนีการยึดเกาะต่อไป ขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 20

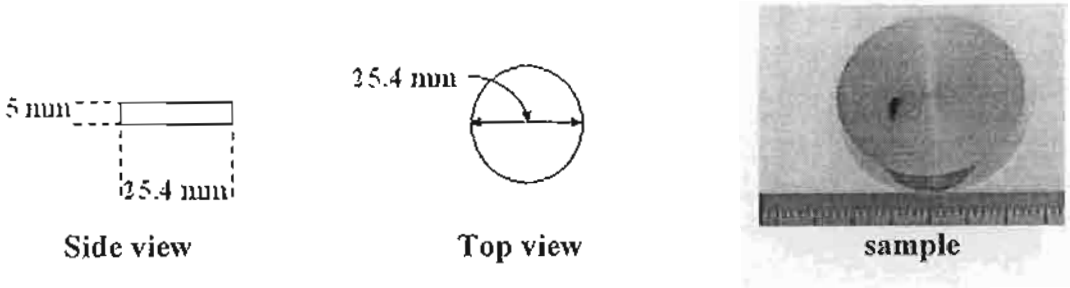
2.1 วัสดุผงและชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบ

2.1.1 วัสดุผงที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

ผงที่นำมาใช้เป็นผงพอลิเมอร์ชนิดพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (polyetheretherketone; PEEK) เกรด 150PF จากบริษัท Victrex ประเทศอังกฤษ มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กสีขาวนวล ความหนืดต่ำใช้ในกระบวนการเคลือบผิวและการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัด (compression moulding) ผง PEEK เป็นเทอร์โมพลาสติก ที่มีวงเบนซินอยู่บนสายโซ่โมเลกุล โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ oxy-1,4-phenyleneoxy-1,4-phenylene-carbonyl-1,4-phenylene ดังแสดงในรูปที่ 6

2.1.2 ชิ้นงานรองรับ (Substrate)

วัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานรองรับ คือ อลูมิเนียม และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีลักษณะเป็นเพลาตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร นำมาตัดเป็นชิ้นงานรองรับหนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 21

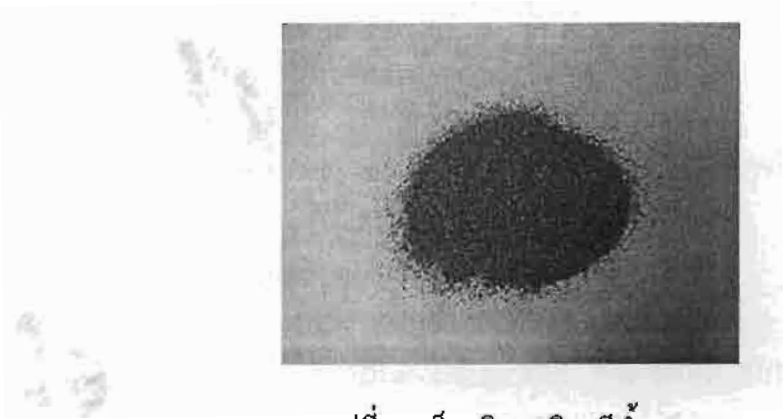


รูปที่ 21 ชิ้นงานที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

2.2 การเตรียมผิวชิ้นงานรองรับ

2.2.1 เม็ดกริต (Grit blast)

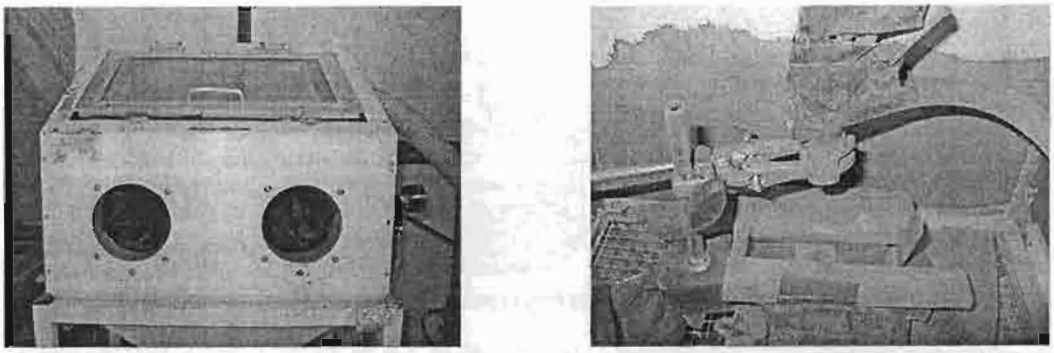
วัสดุที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงานให้มีความหยาบ ได้แก่เม็ดกริตที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์สีน้ำตาล (Al_2O_3 brown) ดังรูปที่ 22 เม็ดกริตที่เลือกใช้มี 3 ขนาด ได้แก่ 100 238 และ 718 ไมโครเมตร



รูปที่ 22 เม็ดกริตอลูมินาสีน้ำตาล

2.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงาน

ก่อนที่จะทำการพ่นเคลือบชิ้นงาน ต้องมีการเตรียมผิวชิ้นงานให้มีความขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวชิ้นงาน เพิ่มการยึดเกาะให้กับผิวเคลือบโดยใช้การยิงกริต เครื่องยิงกริตมีลักษณะเป็นปืนยิงผงที่มีความดันสูง ดังรูปที่ 23 ผงอลูมินาจะพุ่งกระทบกับชิ้นงานโดยใช้ความดันลม 0.86 เมกะปาสคาล หัวพ่นทำมุม 70 องศากับชิ้นงาน [27,28] เป็นเวลา 30 วินาที มีระยะการพ่น 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 23 เครื่องยิงกริตที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

2.2.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานรองรับ

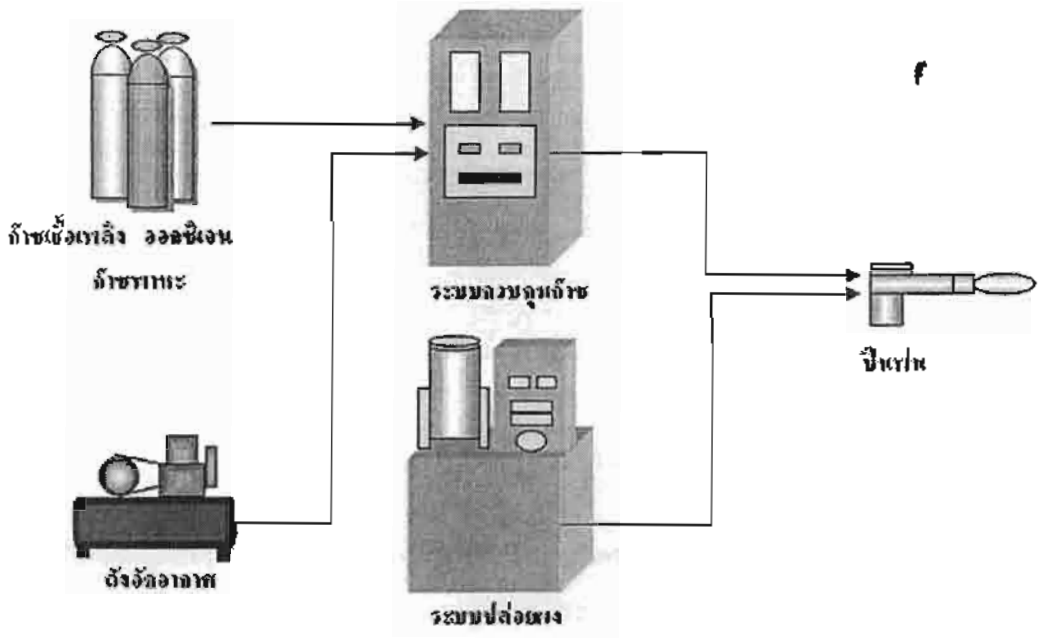
นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานโดยการยิงกริตมาทำความสะอาดโดยการพ่นลม แล้วล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องอัลตร้าโซนิค (ultrasonic) เป็นเวลา 300 วินาที เพื่อกำจัดผง Al_2O_3 ที่ตกค้างออกจากผิวชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปพ่นลมและนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2.3 กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบเปลวเพลิงความเร็วต่ำ

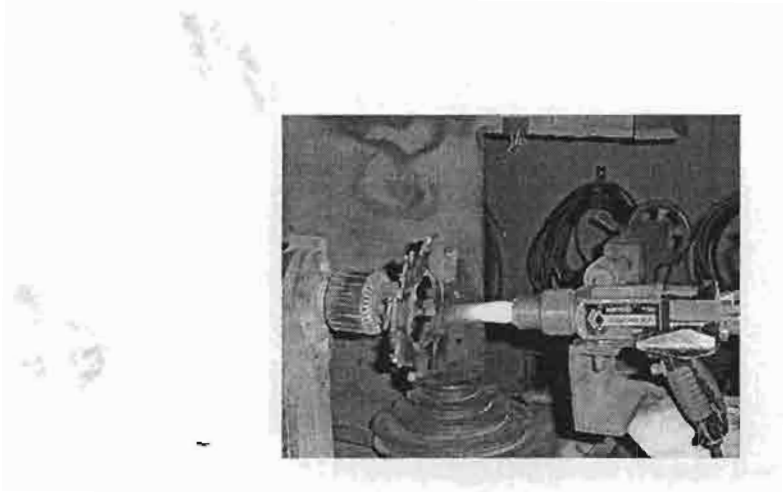
2.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

เครื่องที่ใช้ในการพ่นเคลือบเป็น DJ Diamond Jet Gun ของ บริษัท SULZER METCO ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ โดยปกตินั้นจะใช้ในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง (high velocity oxy-fuel, HVOF) แต่ถูกเปลี่ยนชิ้นส่วนบางชิ้นเพื่อใช้กับการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ (LVOF) ส่วนประกอบหลักของระบบการพ่นเคลือบแบบเปลวเพลิงความเร็วต่ำประกอบด้วย ก๊าซเชื้อเพลิง (fuel gas) ก๊าซพาหะ (carrier gas) ก๊าซออกซิเจน ถังอัดอากาศ ระบบควบคุมก๊าซ ระบบปล่อยผง และปืนพ่น ดังรูปที่ 24

ในงานวิจัยนี้ใช้ปืนพ่นรุ่น DJ1400 (plastic kits) ดังรูปที่ 25 โดยเป็นชุดปืนที่เหมาะสมกับการพ่นเคลือบที่ใช้วัสดุเป็นผงพอลิเมอร์ ส่วนประกอบเฉพาะที่ความแตกต่างจากแบบอื่นๆของปืน คือ ส่วนของ pickup shafts , o-ring package และ ring plier

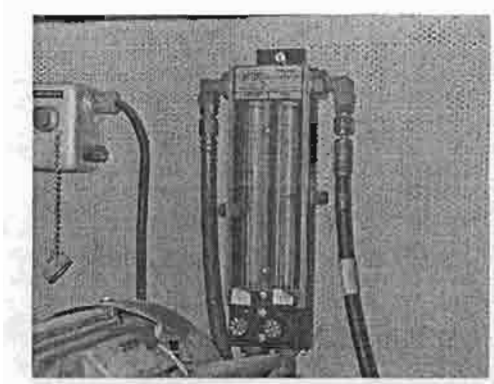


รูปที่ 24 แสดงส่วนประกอบของเครื่องพ่นเคลือบแบบเปลวเพลิงความเร็วต่ำ (Flame spraying)



รูปที่ 25 ปืนที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิง

ในการพ่นเคลือบนั้นใช้ก๊าซโพรเพนเป็นก๊าซเชื้อเพลิง และออกซิเจนเป็นก๊าซในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ก๊าซทั้งสองนั้นผ่านวาล์วควบคุมการไหล (flow meter) รุ่น 2GF ดังรูปที่ 26 ซึ่งเป็นเครื่องมือควบคุมการไหลและอ่านค่าการไหลของก๊าซ



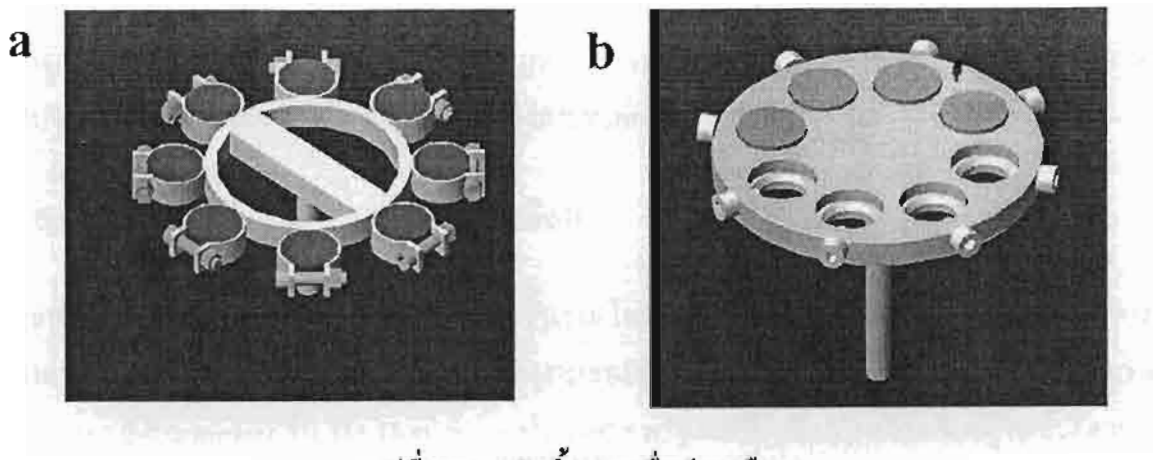
รูปที่ 26 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ

เครื่องควบคุมและปล่อยผง (powder feed control and powder feeder) ของบริษัท PRAXAIR Surface technology ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมการไหลของผง เป็นรุ่น 1284 และส่วนปล่อยผง เป็นรุ่น 1264 ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ปล่อยผงตามอัตราเร็วที่กำหนดโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซช่วยพาผงเคลื่อนที่จากภาชนะบรรจุผงเข้าสู่ปืนผ่านไปยังชิ้นงานแสดงได้ดัง**รูปที่ 28**

รูปที่ 27 เครื่องควบคุมการไหลของผง (Powder feeder)

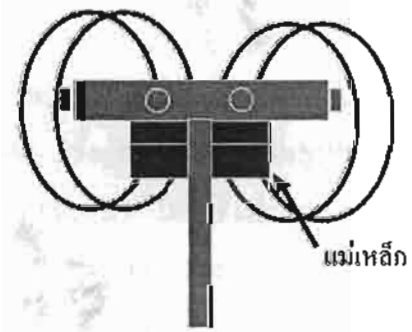
2.3.2 ตัวจับชิ้นงาน (Fixture)

ตัวจับชิ้นงาน มี 2 แบบ ดังรูปที่ 28 โดยในแบบดังรูปที่ 28a ใช้ในการวิจัยเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการพ่นเคลือบ เพื่อเป็นพื้นฐานหรือเป็นกรอบในการตั้งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยต่อไป มีเส้นผ่านศูนย์กลางวัดจากตรงกลางชิ้นงานถึงกลางชิ้นงานอีกด้านหนึ่ง 120 มิลลิเมตร ในส่วนของการพ่นเคลือบในสนามแม่เหล็กซึ่งใช้ตัวจับชิ้นงานดังรูปที่ 28b. มีเส้นผ่านศูนย์กลางวัดจากตรงกลางชิ้นงานถึงกลางชิ้นงานอีกด้านหนึ่ง 90 มิลลิเมตร วัสดุทำด้วยเหล็กกล้าและสามารถติดชิ้นงานในขณะพ่นได้ทั้งหมด 8 ชิ้นทั้งสองแบบ

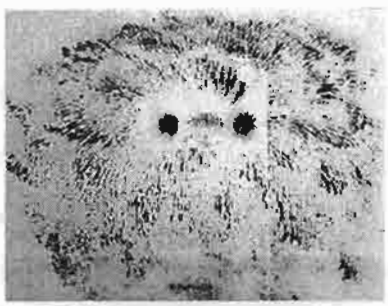


รูปที่ 28 ชุดจับชิ้นงานเพื่อพ่นเคลือบ

การออกแบบการทดลองการพ่นเคลือบในสนามแม่เหล็ก ได้นำก้อนแม่เหล็กมาติดกับที่ยึดจับชิ้นงานทางด้านหลังในรูปที่ 29a. ความเข้มแม่เหล็กเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนก้อนแม่เหล็กเข้าไป ส่วนลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ใช้ผงเหล็กโรยเพื่อดูลักษณะการเรียงตัวเพื่อให้ลักษณะเส้นแรงที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างสมมาตร(รูปที่ 29b.)



a.) แบบจำลองลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็ก



b.) ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กจริง (ภาพด้านบน)

รูปที่ 29 เส้นแรงแม่เหล็กของตัวจับชิ้นงานแบบใส่แม่เหล็ก

2.4 การวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กใช้เครื่อง Teslameter ของบริษัท PHYWE รุ่น 13610.93 ประเทศเยอรมัน โดยแสดงผลแบบดิจิตอลเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยตรงมีทศนิยม 3 ตำแหน่ง สามารถวัดได้อยู่ในช่วง 0.00001 ถึง 2 เทสลา หัววัดเป็นเซมิคอนดัคเตอร์ (semiconductor) แบบแท่ง การวัดได้นำหัววัดเข้าใกล้ผิวชิ้นงานที่ต้องการวัดห่างประมาณ 10 มิลลิเมตร แล้วอ่านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แสดงผลผ่านทางจอแสดงผล ในการติดก้อนแม่เหล็กให้กับตัวจับชิ้นงาน จำเป็นต้อง

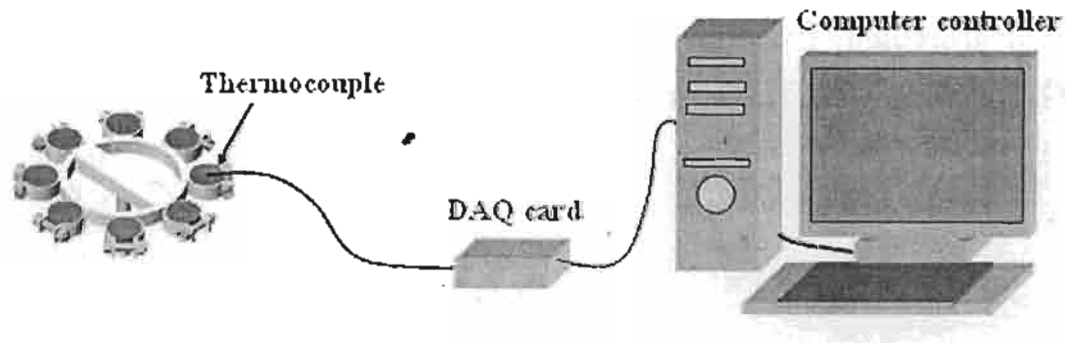
ใช้ Teslameter วัดความเข้มที่ตำแหน่งของการติดชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้ชิ้นงานรองรับได้รับสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มที่เท่ากันในทุกตำแหน่ง ในกระบวนการพ่นเคลือบได้ตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของชิ้นงานโดยวัดก่อนและหลังการพ่นเคลือบ

2.5 การวัดอุณหภูมิในกระบวนการพ่นเคลือบ

ก่อนการพ่นเคลือบต้องทำการวัดอุณหภูมิผิวชิ้นงานในขณะที่กำลังให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ การตรวจสอบอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานรองรับได้ใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (infrared thermometer) รุ่น 3M Heat tracer ประเทศ สหรัฐอเมริกา มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 630 – 670 นาโนเมตร มีช่วงวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง -18 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดในระยะห่างจากตัววัดถึงบริเวณหน้าผิวชิ้นงาน 120 มิลลิเมตร

2.6 การวัดอัตราการเย็นของชิ้นงาน

การวัดอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานได้ใช้เทอร์โมคับเปิลชนิดเค (thermocouple type K) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มิลลิเมตร ติดตั้งดังรูปที่ 30 โดยติดด้านหนึ่งของเทอร์โมคับเปิลไว้บนผิวชิ้นงานรองรับ อีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยผ่าน Basic Multifunction DAQ card รุ่น NI PCI – 6013 ของบริษัท National Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถประมวลผลด้วยความเร็ว 200,000 ครั้งต่อวินาที ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณและแปลงสัญญาณจากอนาลอค (analog) เป็นดิจิตอล (digital) โดยใช้โปรแกรม labview (laboratory vitual instrument engineering workbench) สำหรับประมวลผล และแสดงผลการเก็บค่าอุณหภูมิของชิ้นงานระหว่างการเย็นตัว เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และอลูมิเนียม โดยขั้นตอนในการวัดเริ่มจากการให้ความร้อนกับผิวชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส รอจนอุณหภูมิลดลงถึง 200 องศาเซลเซียส จึงทำการบันทึกผลการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 30 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคับเปิล

2.7 ขั้นตอนและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อผิวเคลือบ ได้แก่ การให้ความร้อนกับผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ (preheat) ระยะทางของปืนถึงผิวชิ้นงาน (spray distance) และการเตรียมผิวชิ้นงาน ได้แก่ ความหยาบผิวของผิวชิ้นงาน (roughness) โดยขั้นตอนการพ่นเคลือบเริ่มจากนำชิ้นงานรองรับที่ผ่านการเตรียมผิวโดยกระบวนการยิงกริต ตามด้วยการทำความสะอาดแล้วยึดติดบนที่จับชิ้นงาน (ในการพ่นเคลือบ 1 ครั้ง สามารถพ่นชิ้นงานได้ 8 ชิ้น) หลังจากนั้นใช้สารสเปรย์ทำความสะอาดผิวชิ้นงานรองรับอีกครั้ง ชิ้นงานรองรับถูกให้ความร้อนก่อนทำการพ่นเคลือบโดยใช้เปลวไฟที่เกิดขึ้นจากปืนพ่นเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นอลูมิเนียมและใช้ที่จับยึดชิ้นงานตาม**รูปที่ 29a** จะต้องใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ได้แก่อุปกรณ์ตัดเหล็ก เพื่อให้ทันต่อการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานรองรับ โดยความร้อนที่ให้เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซอเซทิลีนกับก๊าซออกซิเจน ทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด เมื่อได้อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบตามที่ต้องการแล้ว ทำการหมุนที่จับยึดชิ้นงานด้วยความเร็วรอบ 13.8 รอบต่อนาที ชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านเปลวไฟด้วยความเร็ว 9×10^{-2} เมตรต่อวินาที การพ่นเคลือบใช้ระยะทางในการพ่นเคลือบที่ 100 มิลลิเมตร ปืนพ่นทำมุม 90 องศากับชิ้นงานรองรับ ความหยาบผิวชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม 4.36 ไมโครเมตร และชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 2.86 ไมโครเมตร เมื่อจบสิ้นกระบวนการพ่นเคลือบทำการหยุดหมุนที่จับชิ้นงาน รอจนอุณหภูมิผิวเคลือบลดลงถึงอุณหภูมิห้องถอดชิ้นงานออกจากที่ยึดจับ นำไปศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ความแข็ง ความหยาบผิวเคลือบ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของผิวเคลือบ แล้วเลือกพารามิเตอร์การให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบกับชิ้นงานรองรับที่เหมาะสม โดยพิจารณาสมบัติและลักษณะของผิวเคลือบที่เกิดขึ้น จากนั้นมาทำการหาระยะทางในการพ่นเคลือบ ใช้พารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบอื่นๆ เหมือนเดิม แต่ทำที่ระยะทางในการพ่นที่ 80 100 120 และ 150 มิลลิเมตร แล้วทำการตรวจสอบเช่นเดิม พร้อมทั้งวัดค่าดัชนีการยึดเกาะเพื่อใช้ในการพิจารณาผลที่เกิดขึ้น เพื่อเลือกพารามิเตอร์ระยะทางการพ่นเคลือบต่อไป จากนั้นทำการปรับปรุงการยึดเกาะของผิวเคลือบ โดยเปลี่ยนแปลงความหยาบผิวของชิ้นงานรองรับแล้วตรวจสอบค่าดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ และลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้น โดยความหยาบผิวที่ต่างกันนั้นเกิดจากการใช้เม็ดกริตขนาด 100 238 และ 718 ไมโครเมตร ยิงที่ผิวชิ้นงาน จากนั้นจึงสามารถสรุปถึงพารามิเตอร์ที่ศึกษาที่เหมาะสมกับการพ่นเคลือบ PEEK ได้ ตารางที่ 3 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Parameter	Value
Pressure gas (psi)	
• O_2	60
• C_3H_8	65
• N_2	160
Gas flow rate (l/min)	
• O_2	47.34
• C_3H_8	27.70
Powder feed rate (g/min)	12
Spray duration (s)	40
Preheat temperature (°C)	Non preheat , 100 200 , 300
Spray distance (mm)	80 , 100 , 120 , 150
Surface roughness; Ra (μm)	
• Aluminium substrate	2.22, 4.36, 7.24
• Low carbon steel substrate	1.60, 2.86, 4.72

ต่อจากนั้นทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการยึดเกาะของผิวเคลือบ โดยในการวิจัยได้ทดสอบกับชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพียงอย่างเดียว ใช้แม่เหล็กถาวรติดข้างหลังตัวจับชิ้นงานดังที่กล่าวข้างต้น นำชิ้นงานติดบนตัวจับครั้งละ 4 ชิ้น ในตำแหน่งที่ต้องไม่ตรงกับตำแหน่งที่ติดแม่เหล็ก เนื่องจากทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กไม่เท่ากัน หมุนด้วยความเร็วรอบ 13.8 รอบต่อนาที ตัวยึดจับชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ผ่านเปลวไฟด้วยความเร็ว 7×10^{-2} เมตรต่อวินาที ทำการพ่นเคลือบผง PEEK ลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหยาบผิวต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์ ดังตารางที่ 4 เมื่อได้ผิวเคลือบแล้วจะทำการทดสอบโดยศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ความแข็ง ความหยาบผิวเคลือบ และปริมาณร้อยละของความเป็นผลึกของผิวเคลือบ โครงสร้างทางเคมีด้วย FTIR และค่าดัชนีการยึดเกาะ วิเคราะห์ผลและสรุปผล

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบในสภาวะที่ชิ้นงานอยู่ในสนามแม่เหล็ก

Parameter	Value
Pressure gas (psi)	
• O_2	60
• C_3H_8	65
• N_2	160
Gas flow rate (l/min)	
• O_2	47.34
• C_3H_8	27.70
Powder feed rate (g/min)	12
Spray duration (s)	40
Preheat temperature (°C)	200
Spray distance (mm)	120
Surface roughness; Ra (μm)	2.86 , 4.72
Magnetic intesity (mT)	Non magnetic, 7.40, 13.35, 17.38

2.8 การตรวจสอบลักษณะของผง

2.8.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC นั้น เป็นการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) อุณหภูมิของการหลอมเหลว (melting temperature: T_m) และอุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallization temperature: T_c) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC822^e ประเทศสหรัฐอเมริกา ความแม่นยำ ± 0.2 °C ช่วงอุณหภูมิใช้งาน -65 ถึง 700 °C โดยการทดสอบนำผง PEEK น้ำหนัก 11.09 มิลลิกรัมใส่ลงในแพน (pan) แล้วนำแพนใส่ลงใน chamber ของเครื่อง DSC ให้ความร้อนกับ PEEK ด้วยอัตราเร็ว (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่ 50 – 400 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่เป็นไนโตรเจน โดยใช้อัตราการไหลของไนโตรเจน (N_2 flow) เท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (hold time) เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำให้เย็นตัวลงจาก 400 ถึง 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเย็นตัว (cooling rate) ที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.8.2 การทดสอบหาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^e ประเทศสหรัฐอเมริกา ความแม่นยำ ± 0.25 เปอร์เซ็นต์ ช่วงอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง 25 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส ในการหาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของ PEEK ทำโดยให้ความร้อนกับ PEEK ไปจนถึงอุณหภูมิหนึ่งแล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของ PEEK ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักนี้เองแสดงถึงการเสื่อมสภาพ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ PEEK ไป โดยใช้ผง PEEK น้ำหนัก 4.54 มิลลิกรัม ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25 ถึง 800 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในบรรยากาศที่เป็นไนโตรเจน โดยใช้อัตราการไหลของไนโตรเจน (N_2 flow) เท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

2.8.3 การตรวจสอบการกระจายตัวและขนาดของผงเคลือบ

เครื่อง Mastersizer S รุ่น 2.19 บริษัท Malvern instrument ประเทศอังกฤษ สามารถหาขนาดและการกระจายอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคช่วง 0.05-900 ไมโครเมตร โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน ±5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงขนาดลำแสง 632.8 นาโนเมตร ความยาวของลำแสง 2.4 มิลลิเมตร เมื่อแสงเดินทางผ่านอนุภาคผง PEEK ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางซึ่งได้แก่ เอทานอล (ethanol) ที่เป็นของไหลทำให้เกิดปรากฏการณ์ การกระเจิงของแสง และแสดงผลออกมาเป็นค่าการกระจายขนาดของผงเคลือบได้

2.8.4 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผง

ในการตรวจสอบลักษณะของผงเคลือบจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 5800 scanning microscope ประเทศญี่ปุ่น การเตรียมผงทำโดยนำผง PEEK โรยลงบนกระดาษกาวคาร์บอน พยายามให้กระจายตัวสม่ำเสมอ แล้วทำการเคลือบผงด้วยทองคำเพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยใช้เครื่อง Gold sputter หลังจากนั้นนำเข้าเครื่อง SEM ใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ หัวรับสัญญาณแบบ Secondary electron ภาพที่ได้จะเป็นโครงสร้างแบบ Topography

2.8.5 การตรวจสอบส่วนผสมของชิ้นงานรองรับ

ในการตรวจสอบส่วนผสมของชิ้นงานรองรับจะใช้เครื่อง Emission spectrometer บริษัท Thermo Electron Corporation รุ่น ARL 3460 ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำชิ้นงานรองรับ ขัดให้ได้ระนาบแล้วนำมาตรวจสอบ

2.9 การตรวจสอบลักษณะของผิวเคลือบ

2.9.1 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) โดยเทคนิคทางแสง ชื่อ BHM Metallurgical Microscope จากบริษัท OLYMPUS ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งในการตรวจสอบ ได้นำชิ้นงานที่ได้จากการพ่นเคลือบนั้นมาทำการหล่อเรซินแบบเย็น (cold mounting) เพื่อช่วยให้การขัดชิ้นงานง่ายขึ้น ป้องการการหลุดออกของผิวเคลือบจากการขัดชิ้นงาน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการแข็งตัวของเรซินไม่สูงมาก (ประมาณ 70 องศาเซลเซียส) จนส่งผลต่อสมบัติของผิวเคลือบ โดยเรซินที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานสำหรับผิวเคลือบโดยเฉพาะชื่อทางการค้าคือ EPOXICURE RESIN ของบริษัท BUEHLER ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากมีสมบัติของการหดตัวต่ำเมื่อเรซินแข็งตัวจะไม่เกิดการดึงผิวชิ้นงาน โดยเรซินมีลักษณะเป็นของเหลวใส จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อมาตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานโดยใช้ใบตัดเพชร ซึ่งการตัดทำการตัดขวางชิ้นงานเพื่อต้องการตรวจสอบชิ้นงานตามขวาง

การขัดชิ้นงานเป็นการขัดชิ้นงานแบบเปียก โดยใช้กระดาษทรายเบอร์หยาบก่อน จากเบอร์ 180 240 400 และ 600 ขัดละเอียดเบอร์ 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นนำมาขัดมันด้วยผงเพชรชนิด water-base ขนาด 6 ไมครอน และ 1 ไมครอน ตามลำดับ ในการขัดนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายต้องหมุนชิ้นงานให้รอยขัดตั้งฉากกับรอยขัดเดิม เมื่อกระบวนการขัดเสร็จสิ้นลงนำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค โดยใช้เครื่อง MINI DG-1 Supersonic cleaner ความถี่ 43 กิโลเฮิรตซ์ แล้วนำไปตรวจสอบโดยใช้กลองจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่างๆ เพื่อสังเกตลักษณะของผิวเคลือบและลักษณะการยึดเกาะต่อไป

2.9.2 การตรวจสอบลักษณะของผิวเคลือบที่เกิดการขูดขีด

ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 5800 scanning microscope ประเทศญี่ปุ่น ด้วยสภาวะการตรวจสอบเช่นเดียวกับการตรวจสอบลักษณะของผง PEEK การเตรียมชิ้นงานทำโดยการนำผิวเคลือบที่ต้องการตรวจสอบมาทำการเคลือบทองคำเพื่อช่วยในการนำไฟฟ้า โดยทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบ PEEK และตรวจสอบรอยขูดขีดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Scratch adhesion testing

2.9.3 การวัดความหยาบของผิวเคลือบและผิวชิ้นงานรองรับ

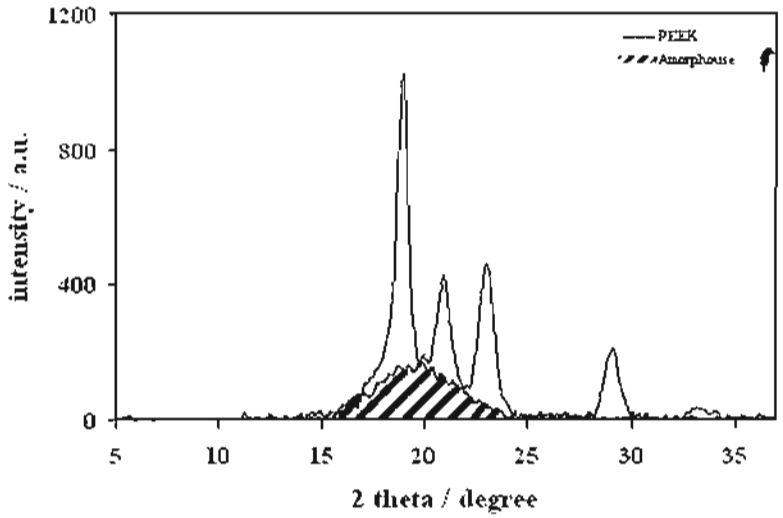
การวัดความหยาบผิวได้ใช้เครื่อง Surface Roughness measuring system unit รุ่น SV 3000 บริษัท Mitutoyo ประเทศญี่ปุ่น เป็นการวัดโดยการลากหัววัด (stylus) แบบกรวย มุม 60 องศา รัศมี 2 ไมโครเมตร บนผิวชิ้นงานด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 1.6 มิลลิเมตร โดยใช้ช่วงคัทออฟ (cut-off) 0.8 มิลลิเมตร ทำการวัดค่า Ra ทั้งหมด 5 ครั้งต่อ 1 ชิ้นงาน แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.9.4 การวัดปริมาณความเป็นผลึก

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค X-ray diffraction (XRD) โดยใช้เครื่อง X ray diffraction รุ่น D8 Discover series 2 บริษัท Bruker Advanced X-ray solutions ประเทศเยอรมนี มีแหล่งกำเนิดรังสีเป็น Cu-K_α ที่ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแส 40 มิลลิแอมป์ ให้รังสี X- ray ความยาวคลื่น 1.54056 อังสตรอม ใช้ช่องขนาดสลิตกว้าง 2 มิลลิเมตรทำการวัดตั้งแต่ ค่ามุม 5 ถึง 60 องศา ด้วยความเร็ว (scan speed) 0.2 วินาทีต่อการเปลี่ยนตำแหน่งองศาในการวัด และการเปลี่ยนแปลงองศาในการวัด 1 ครั้งจะเปลี่ยนไป 0.02 องศา โดยตรวจสอบผิวเคลือบจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณที่สะท้อนออกมาจากชิ้นงานกับค่ามุม 2θ เมื่อคำนวณพื้นที่ใต้กราฟสามารถนำมาหาค่าปริมาณร้อยละของความเป็นผลึกได้

หลักการคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึก

เอกซ์เรดิฟแฟรกชันสเปคตรัมของผิวเคลือบ PEEK ดังรูปที่ 31 สามารถคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกจะหาได้จากสมการที่ 18



รูปที่ 31 กราฟเอกซ์เรดิฟแฟรกชันที่ใช้ในการหาปริมาณความเป็นผลึก

$$Degree\ \ of\ crystalline\ \ = \frac{A_c}{A_c + A_a} \qquad (18)$$

เมื่อ A_c เป็นพื้นที่ใต้กราฟของส่วนที่เป็นผลึก (area of crystalline)

A_a เป็นพื้นที่ใต้กราฟของส่วนที่เป็นอสัญฐาน (area of amorphous)

โดยการหาพื้นที่ให้กราฟส่วนที่เป็นอสัญฐานนั้นหาได้จากการนำผง PEEK ไปทำการหลอมเหลวโดยให้ความร้อนจนถึง 380 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยจุ่มลงในน้ำทันที ผง PEEK มีลักษณะเป็นของแข็งใส เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยเอกซ์เรดิฟแฟรกชันจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นอสัญฐาน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นอสัญฐานได้ต่อไป

2.9.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้ใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Imaging Microscopy (FT-IR imaging microscopy) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum.Spotlight 300 ประเทศเยอรมัน โดยใช้แหล่งกำเนิดเป็นรังสีอินฟราเรด ในช่วงความถี่ 4,000 – 600 เฮิรตซ์ หัวรับสัญญาณเป็นแบบ MCT โดยเทคนิคที่วัดเป็นแบบ Attenuated Total Reflectance (ATR) โดยชิ้นงานที่ใช้นั้นเป็นชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วนำมาทดสอบได้โดยตรง ไม่ต้องมีการเตรียมที่ยุ่งยากมากนัก ผลที่ได้แสดงถึงปริมาณการสะท้อนรังสีในช่วงความถี่ต่างๆ โดยแต่ละหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของ PEEK ซึ่งมี

ความสามารถในการดูดกลืนรังสีในแต่ละความถี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบหาปริมาณและชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมเลกุลเป็นองค์ประกอบทางเคมีของ PEEK ได้ ในการหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นทำได้โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่งเดียวกันเปรียบเทียบกัน โดยในการเปรียบเทียบได้อ้างอิงถึงพีคที่สูงที่สุดในกราฟและมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดมาเป็นอัตราส่วนอ้างอิงในการเปรียบเทียบ

2.10 การตรวจสอบสมบัติทางกล

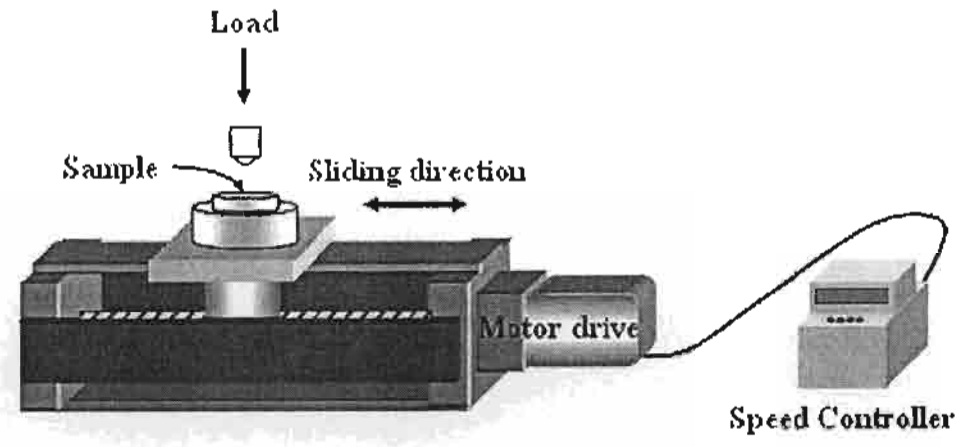
2.10.1 การวัดความแข็งของผิวเคลือบ

การวัดความแข็งของผิวเคลือบ PEEK ใช้วิธีการวัดความแข็งแบบวิคเกอร์ (Vickers) หัวกดเพชรทำมุม 120 องศา ด้วยเครื่องวัดความแข็งในระดับไมโครเมตร (microhardness tester) รุ่น FM-700e ของบริษัท Future tech ประเทศจีน เนื่องจากผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบมีความหนาอยู่ในระดับประมาณ 200 – 500 ไมโครเมตร เตรียมชิ้นงานเช่นเดียวกับการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ใช้น้ำหนักกด 50 กรัม เพราะเป็นน้ำหนักกดที่อยู่ในช่วงที่ให้ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบคงที่แล้ว ทำการทดสอบโดยกดหัวกดเพชรลงบนชิ้นงานตัดขวางบริเวณผิวเคลือบ ใช้เวลาในการกดทดสอบ 10 วินาทีต่อ 1 ครั้งการตรวจสอบได้วัดความแข็งชิ้นงานละ 10 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย

2.10.2 การวัดค่าดัชนีการยึดเกาะ

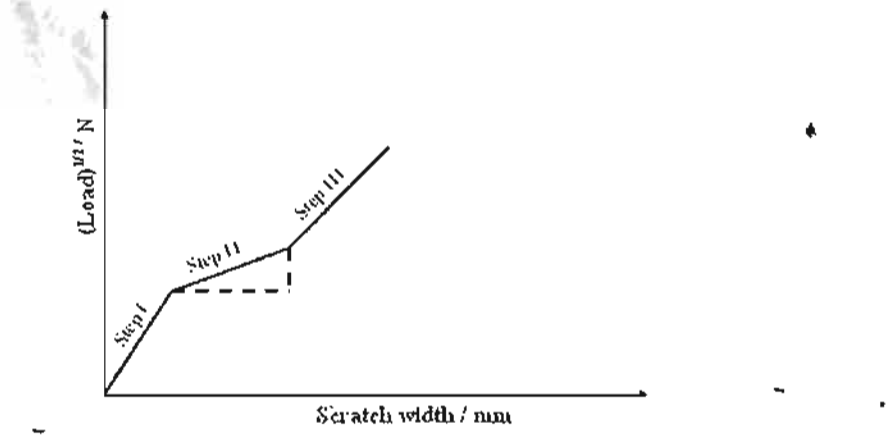
โดยทั่วไปในการวัดความแข็งแรงในการยึดเกาะมีการศึกษาได้หลายวิธี เช่น การทดสอบแบบ Pull of test การทดสอบแบบ Peel test แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถที่จะทดสอบได้เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวต้องใช้กาวติดผิวชิ้นงานแล้วดึงลอก ซึ่งผิวเคลือบ PEEK เป็นพอลิเมอร์ที่มีพลังงานผิวต่ำมาก กาวส่วนใหญ่ที่มีความแข็งแรงในการยึดเกาะผิวเคลือบได้สูง ซึ่งใช้ในการทดสอบส่วนมากจะต้องอบที่อุณหภูมิสูงจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกการทดสอบโดยการวัดค่าดัชนีการยึดเกาะด้วยเทคนิค ของ Scratch adhesion testing (**รูปที่ 32**) เนื่องจากโดยการใช้หัวกดเพชร รูปทรงกรวย ทำมุม 120 องศา กดลงบนผิวเคลือบ ด้วยน้ำหนัก 100 200 300 400 500 600 และ 700 กรัม ตามลำดับ ระหว่างการกดนั้นชิ้นงานมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เกิดรอยขูดขีดขึ้นบนผิวเคลือบยาว 15 มิลลิเมตร ทำการวัดความกว้างของรอยที่เกิดขึ้นโดยใช้การสแกนรูปเป็นภาพแล้วใช้โปรแกรม Photoshop วัดขนาดความกว้างของรอยที่เกิดขึ้น วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยขีดกับรากที่ 2 ของน้ำหนักที่ใช้ หาค่าความชัน ดังรูปที่ 33

ซึ่งกราฟที่เกิดขึ้นมีความชันอยู่ 3 ช่วง ดัชนีการยึดเกาะเป็นค่าของความชันในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นผลของผิวรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับผิวเคลือบ



รูปที่ 32 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการตรวจสอบการยึดเกาะด้วยเครื่องทดสอบรอยขีด

การคำนวณหาค่าดัชนีการยึดเกาะ



รูปที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของน้ำหนักที่ใช้กับความกว้างของรอยขีด

เมื่อทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Scratch adhesion testing นำผลที่ได้มาทำการวาดกราฟ จะได้ผลดัง **รูปที่ 33** จากสมการของ Burnett และ Rickerby [24] ดังสมการที่ 19

$$L_c = \frac{\pi d^2}{8}\sqrt{\frac{2EW}{t}} \qquad (19)$$

เมื่อ L_c คือ แรงที่ผิวเคลือบสามารถรับได้ก่อนเกิดการหลุดลอกออกระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานรองรับ (นิวตัน)

d คือ ความกว้างของรอยจากการทดสอบขีดที่น้ำหนักหนึ่งๆ (มิลลิเมตร)

E คือ ความสามารถในการรับแรงของผิวเคลือบก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (เมกะปาสคาล)

W คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดการแยกออกระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานรองรับ (จูลต่อตารางเมตร)

t คือ ความหนาของผิวเคลือบ (มิลลิเมตร)

สามารถหาค่าดัชนีการยึดเกาะได้จากสมการที่ 19 ดังนี้

$$\frac{L_c}{d^2} = \frac{\pi}{8}\sqrt{\frac{2EW}{t}} \tag{20}$$

จากสมการที่ 20 $\frac{L_c}{d^2}$ คือค่าดัชนีการยึดเกาะซึ่งสามารถหาได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{L_c}$ กับ d ดังสมการที่ 21

$$\frac{L_c}{d^2} = \frac{\sqrt{L_c}}{d} \tag{21}$$

$$adhesion\ \ index = Slop\ \ of\ \ stageII$$

3. ผลการวิจัยที่ได้รับ

ผลการทดลองและอภิปรายผลแยกออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของผง PEEK ที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบ ส่วนที่ 2 เป็นผลของการพ่นเคลือบเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยแสดงความสัมพันธ์ของการให้ความร้อนกับชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบและการยึดติดของผิวเคลือบ และระยะทางในการพ่นเคลือบที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค ปริมาณความเป็นผลึก ความแข็ง ความหยาบผิว และดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ และความหยาบของผิวชิ้นงานรองรับที่ส่งผลต่อดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ ส่วนที่ 3 เป็นผลที่ได้จากการนำช่วงพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาทำการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานรองรับ โดยทำการพ่นเคลือบ PEEK ลงบนผิวชิ้นงานโลหะภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก แล้วพิจารณาถึงผลที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค ปริมาณความเป็นผลึก ความแข็ง และ ดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ

3.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับ

จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และ อลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Emission Spectrometer ดังแสดงใน**ตารางที่ 5** และ **ตารางที่ 6** เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมกับมาตรฐาน JIS แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานรองรับเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด S15C และอลูมิเนียม เกรด 6063

ตารางที่ 5 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low carbon steel substrate)

Chemical composition / %							
Element		C	Si	Mn	P	S	Mo
Substrate (by characterization)		0.153	0.158	0.528	0.010	0.015	0.003
JIS	**S15C**	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.03max	0.035max	0.02max

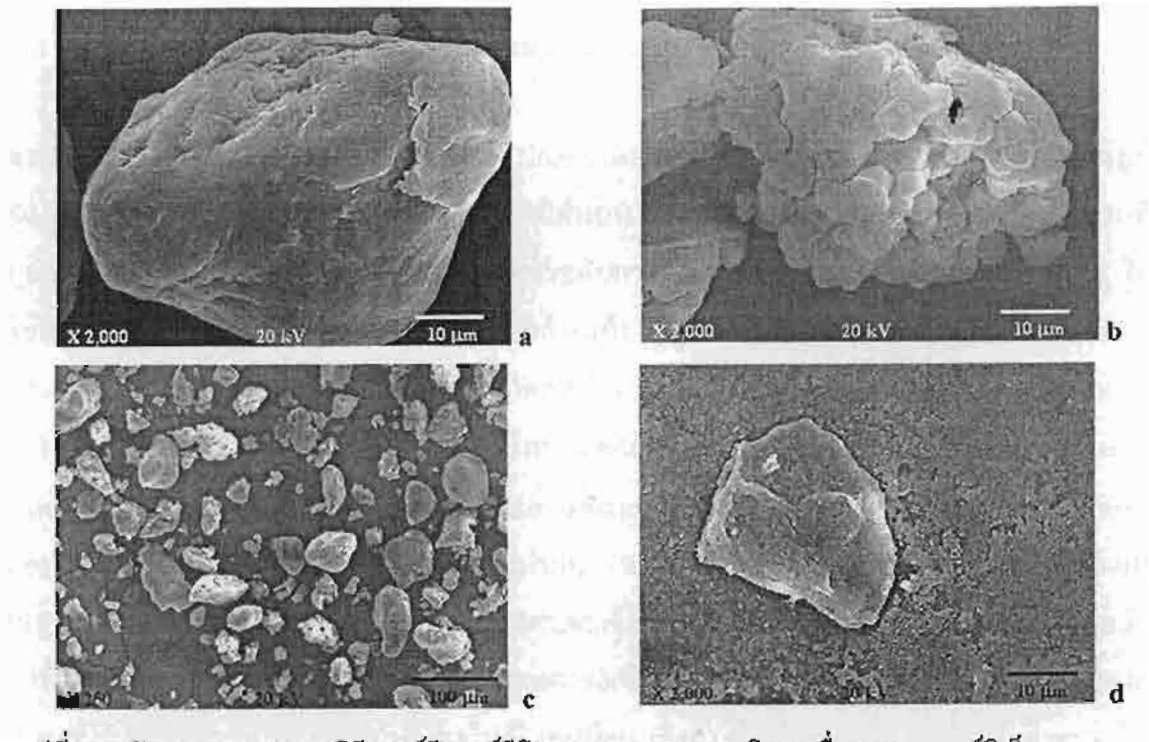
ตารางที่ 6 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม (aluminium substrate)

Chemical composition / %								
Element		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti
Substrate (by characterization)		0.040	0.493	0.572	0.004	0.178	0.070	0.010
JIS	6063	0.10max	0.2-0.6	0.45-0.9	0.10max	0.35max	0.10max	0.10max

3.2 ลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผง PEEK ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดัง**รูปที่ 34** พบว่าผงเคลือบ PEEK ประกอบด้วย 2 ลักษณะด้วยกันคือ ผงที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน **(รูปที่ 34a)** และผงที่เกิดจากการเกาะกลุ่มกันของผงขนาดเล็กๆ จนมีขนาดใหญ่ขึ้น **(รูปที่ 34b)** ในภาพตัดขวางของผง PEEK พบว่าผงมีลักษณะตันไม่มีรูพรุนภายใน **(รูปที่ 34d)** ผงเคลือบส่วนใหญ่จะมีรูปร่างแบบไม่สมมาตรมีขอบค่อนข้างมน **(รูปที่ 34c)** การที่ผง PEEK มีลักษณะค่อนข้างมนนั้น ส่งผลให้การไหลของผง (flowability) ในกระบวนการพ่นเคลือบนั้นดี และเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผงที่มีรูปร่างเหลี่ยมมีขอบและมุม **[2,9,29]**

การวัดการกระจายของขนาดอนุภาค (particle size distribution) พบว่ามีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.6 - 95 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 48.39 ไมโครเมตร **(รูปที่ 35)** แม้ว่าผง PEEK มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นช่วงกว้าง แต่เมื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้น พบว่าผงเคลือบจะมีการกระจายออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ในช่วงประมาณ 10 ไมโครเมตร และ 48 ไมโครเมตร ซึ่งการกระจายในช่วง 10 ไมโครเมตร มีการกระจายอยู่ในปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาด 48 ไมโครเมตร ดังนั้นเมื่อทำการพ่นเคลือบจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเสื่อมสลายไปก่อนของผงเคลือบที่ขนาดเล็ก และผงเคลือบขนาดใหญ่หลอมไม่สมบูรณ์จนเกิดเป็นจุดบกพร่องขึ้นบนผิวเคลือบน้อย Vuoristo และ คณะ **[6]** ที่ได้ทำการเคลือบ PVDF, ECTFE, PFA และ FEP พบว่า ผงเคลือบที่มีรูปร่างลักษณะกลมและมีการกระจายของขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 50-200 ไมโครเมตร จะส่งผลให้การหลอมเหลวของผงเคลือบสม่ำเสมอ มีการเสื่อมสลายต่ำ ทำให้ได้ผิวเคลือบที่มีคุณภาพสูง มีรูพรุนน้อยกว่าผงที่มีรูปร่างเหลี่ยมมีขอบและมุม และมีการกระจายตัวของอนุภาคกว้าง ขนาดไม่สม่ำเสมอ เพราะต้องใช้เวลานานในการหลอมเหลวผงเคลือบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ผงบางส่วนที่มีขนาดเล็กเกิดการเสื่อมสลายไปก่อนเนื่องจากได้รับความร้อนสูง



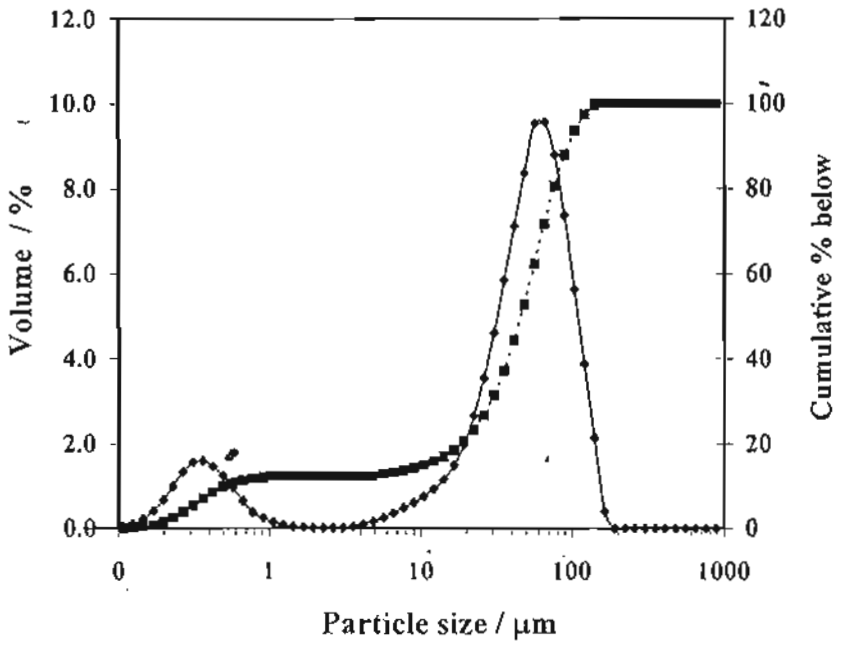
รูปที่ 34 ลักษณะของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (เกรด 150 PF) โดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

a) แสดงลักษณะของผงที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

b) แสดงลักษณะของผงที่เกิดจากการเกาะกลุ่มกันของผงขนาดเล็กๆ จนมีขนาดใหญ่

c) แสดงภาพรวมของผง PEEK ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

d) แสดงภาพตัดขวางของผง PEEK

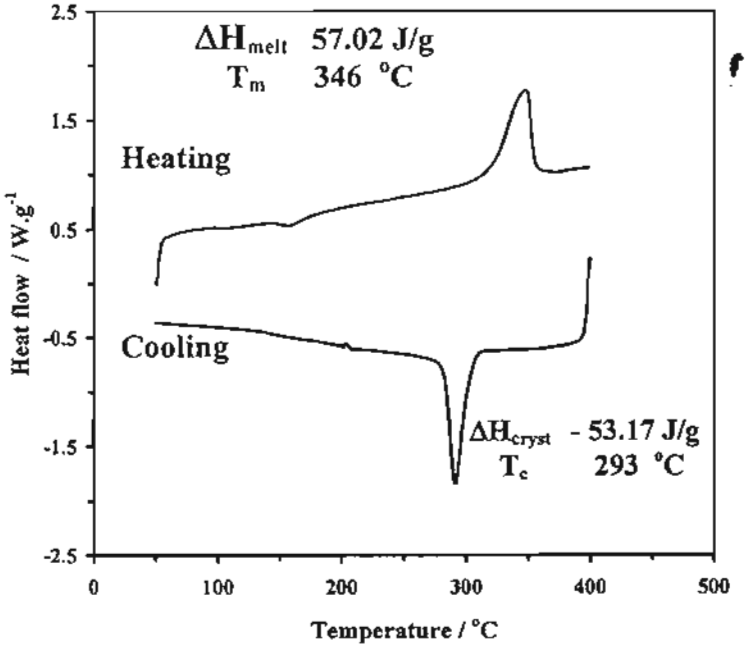


รูปที่ 35 การกระจายตัวของอนุภาคผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

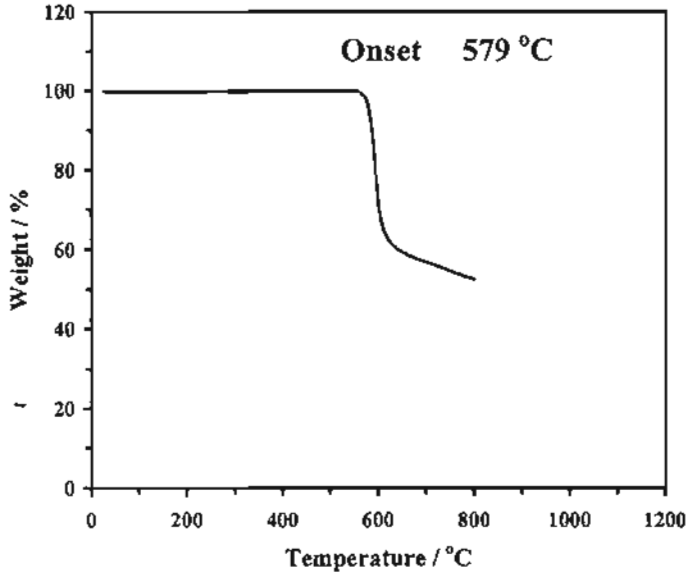
3.3 สมบัติทางความร้อนของผงพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน

จากการศึกษาสมบัติของ PEEK ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC) ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 400 องศาเซลเซียส **(รูปที่ 36)** ในกราฟเส้นบน พบการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ช่วง ในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 153 องศาเซลเซียส ระบบมีการเปลี่ยนระดับการดูดกลืนพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEEK ได้ใช้พลังงานเพื่อการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วไปสู่สถานะที่มีลักษณะคล้ายยาง โดยแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 ที่มีลักษณะเกิดเป็นพีค ที่อุณหภูมิ 346 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) พื้นที่ใต้กราฟแสดงถึงการดูดกลืนพลังงาน หรือเรียกว่า เอนทาลปีของการหลอมเหลว (ΔH_{melt}) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่เรียงชิดติดกันอย่างเป็นระเบียบ หรือส่วนที่เป็นผลึก มีค่าเท่ากับ 57.02 จูลต่อกรัม เมื่อทำการลดอุณหภูมิของผง PEEK (cooling) จากอุณหภูมิ 400 ถึง 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเย็นตัว 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ในกราฟเส้นล่าง พบว่าที่อุณหภูมิ 293 องศาเซลเซียส เกิดการคายพลังงานออกมามาก เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ PEEK ที่อยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ เกิดการจัดเรียงตัว มีการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลและการลดพลังงานจลน์ของโมเลกุล เกิดเป็นผลึกขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จึงมีค่าเท่ากับ 293 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ในการสร้างผลึก หรือเอนทาลปีของการสร้างผลึก (ΔH_{cryst}) คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่ากับ 53.17 จูลต่อกรัม เมื่อ PEEK มีค่าพลังงานการหลอมเหลวผลึกที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (heat of fusion 100% crystalline) เท่ากับ 130 จูลต่อกรัม **[30,31]** ดังนั้นจึงสามารถหาค่าปริมาณร้อยละของความเป็นผลึกของ PEEK ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เกิดเสื่อมสลายของ PEEK (T_d) ได้ใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) จาก**รูปที่ 37** พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับ PEEK สูงขึ้นจาก 25 ถึง 800 องศาเซลเซียส.ในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 579 องศาเซลเซียส PEEK จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ PEEK ลดลง ซึ่งแสดงว่าโมเลกุลของ PEEK เริ่มเกิดการเสื่อมสลาย เนื่องจากความร้อน และการเสื่อมสลายของ PEEK ในบรรยากาศไนโตรเจนจะหลงเหลือเถ้าคาร์บอนอยู่ เนื่องจากบรรยากาศไม่มีก๊าซออกซิเจนที่จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Modderman และคณะ **[32]** ที่ได้ทำการทดสอบ พบว่าถ้า PEEK เกิดการเสื่อมสลายในบรรยากาศทั่วไป จะไม่เหลือเถ้าเหมือนการเสื่อมสลายในบรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 36 สมบัติทางความร้อนของพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน



รูปที่ 37 ผลการทดสอบหาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์

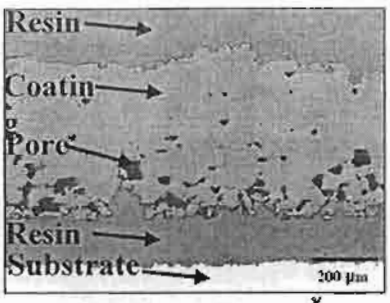
ตารางที่ 7 สมบัติทางความร้อนของ PEEK เกรด 150 PF

Thermal analysis	T_g / °C	T_c / °C	T_m / °C	T_d / °C	% Crystalline
PEEK 150 PF	153	293	346	579	40

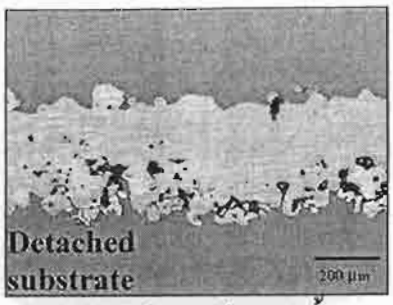
จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PEEK ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่า PEEK สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงได้เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ทั่วๆไป แต่ในขณะทำการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วต่ำ ผงเคลือบ PEEK จะได้รับความร้อนจากเปลวไฟสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ PEEK มาก ประกอบกับอุณหภูมิการเสื่อมสลายของ PEEK ก็ไม่ห่างจากอุณหภูมิการหลอมเหลวมาก ช่วงอุณหภูมิของการพ่นเคลือบจึงแคบ การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

3.4 อิทธิพลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ

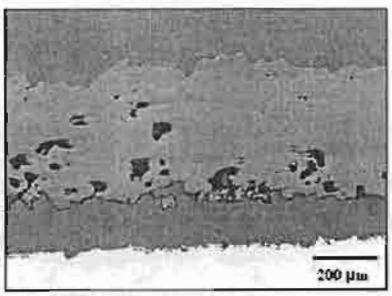
จากรูปที่ **38.1a) – 38.1d)** แสดงผลการเปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ พบว่าการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส ผง PEEK สามารถเคลือบลงบนผิวชิ้นงานอลูมิเนียมได้ดีกว่าที่ไม่ให้ความร้อน และที่ให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน (interface) การที่ผง PEEK ที่ได้รับความร้อนขณะที่อยู่ในเปลวไฟ พุ่งมาปะทะกับผิวชิ้นงานที่มีอุณหภูมิต่ำ ผง PEEK ที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวเกิดการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชิ้นงานจนทำให้ผง PEEK เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (quench) ส่งผลให้ความสามารถในการไหลเคลือบไปบนผิวชิ้นงานรองรับ (wetability) ต่ำ ซึ่งสอดคล้อง Mostaghimi และคณะ [33] ซึ่งพบว่า ผงเคลือบที่ไม่ได้รับความร้อนที่เพียงพอในขณะพ่นเคลือบ เมื่อผงเคลือบตกกระทบลงบนชิ้นงาน ผงเคลือบเกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วไม่สามารถไหลได้ (freeze) ซึ่งส่งผลให้เกิดเป็นรูพรุนบริเวณรอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานและผิวเคลือบ แต่เมื่อผงเคลือบที่หลอมเหลวตกกระทบผิวชิ้นงานอุณหภูมิสูงพอ เกิดการไหลแผ่ไปบนผิวชิ้นงานมีลักษณะวงกลมเรียบทำให้ได้ผิวเคลือบที่ดีมีรูพรุนน้อย เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในรูปที่ **38.2a) – 38.2d)** พบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายในผิวเคลือบพบรูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะกลมขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 80 ไมโครเมตร ซึ่งน่าจะเป็นฟองก๊าซที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนของผิวเคลือบต่ำ แต่ในชิ้นงานรองรับที่เป็นอลูมิเนียมที่สภาวะการพ่นเดียวกัน พบว่าผิวเคลือบมีรูพรุนเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยที่ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน เนื่องจากอลูมิเนียมมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า Luciana และคณะ [2] ได้ทำการพ่นเคลือบ PET ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ และให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบที่ 170 200 และ 215 องศาเซลเซียส พบรูพรุนเกิดขึ้นภายในผิวเคลือบและมีการเกิดเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ และจำนวนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากความร้อนที่ชิ้นงานรองรับถ่ายเทให้กับผิวเคลือบส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายของ PET



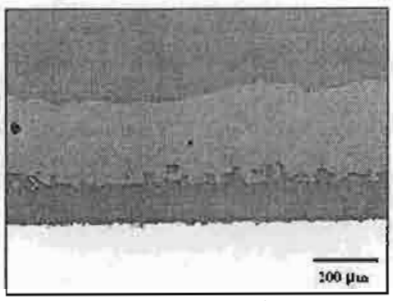
38.1a) ไม่ให้ความร้อนกับชิ้นงาน



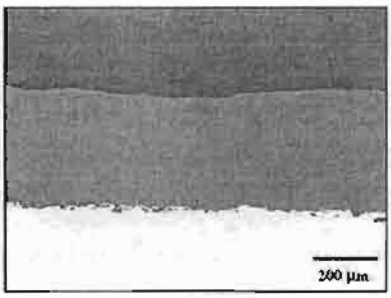
38.2a) ไม่ให้ความร้อนกับชิ้นงาน



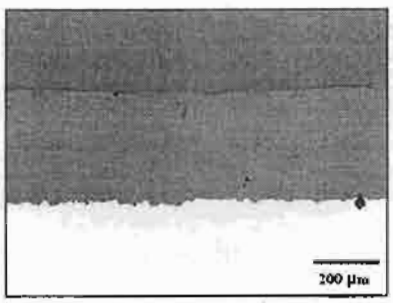
38.1b)ให้ความร้อนกับชิ้นงาน 100 °C



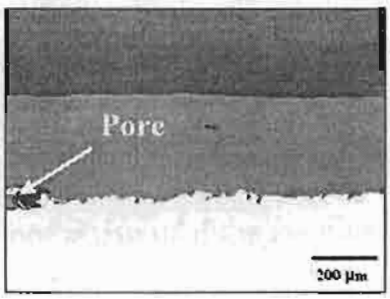
38.2b) ให้ความร้อนกับชิ้นงาน 100 °C



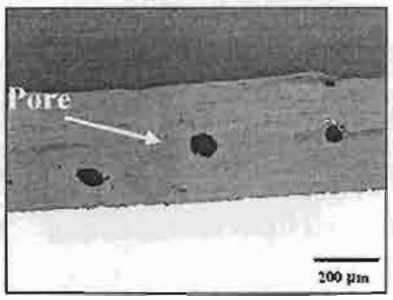
38.1c) ให้ความร้อนกับชิ้นงาน 200 °C



38.2c) ให้ความร้อนกับชิ้นงาน 200 °C



38.1d) ให้ความร้อนกับชิ้นงาน 300 °C



38.2d) ให้ความร้อนกับชิ้นงาน 300 °C

ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานอลูมิเนียม ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

รูปที่ 38 โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน 4.5.1 อลูมิเนียม 4.5.2 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

เมื่อ a) ไม่ให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ

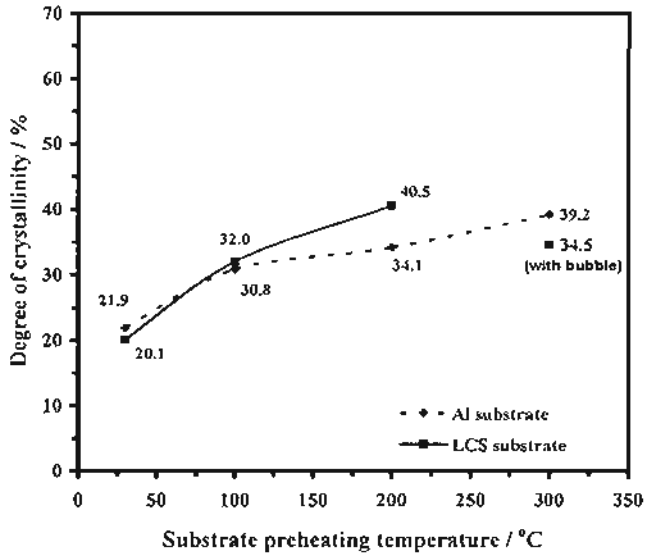
b) ให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ 100 °C

c) 200 °C และ d) 300 °C

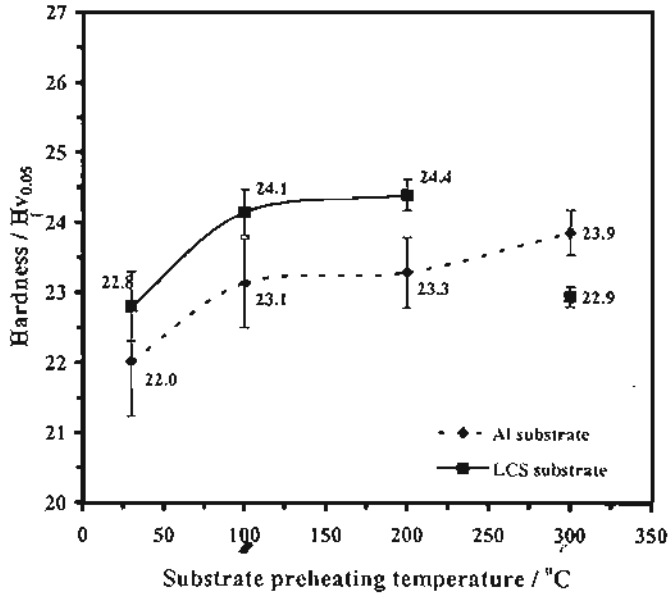
เมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของผิวเคลือบจากผลของ XRD patterns (ในภาคผนวก ก.) นำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 39 พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานอลูมิเนียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานรองรับที่ไม่ให้ความร้อน ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อผงเคลือบอยู่ในสภาวะหลอมเหลวตกกระทบผิวชิ้นงาน เกิดการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานรองรับให้กับผิวเคลือบทำให้ผิวเคลือบใช้เวลานานในการเย็นตัว ส่งผลให้โมเลกุลของ PEEK มีเวลาในการจัดเรียงตัวมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสภาวะที่ชิ้นงานรองรับที่ไม่ให้ความร้อน ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 100 200 องศาเซลเซียส ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่เมื่อให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบกับชิ้นงานรองรับที่ 300 องศาเซลเซียส ผิวเคลือบมีค่าปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าที่ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผิวเคลือบเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากผิวเคลือบมีเวลาอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงนาน ซึ่งสอดคล้องกับ Yan และคณะ [22] ที่ได้ทำการพ่นเคลือบ EMAA บนแผ่นอลูมิเนียมที่เคลือบด้วย PTFE ที่ผิวชิ้นงานรองรับมีอุณหภูมิต่างกัน พบว่า การที่ผิวเคลือบอยู่ในอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้ผิวเคลือบเกิดการเสื่อมสลาย สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาด เกิดเป็นโครงสร้างแบบอสัญฐานมากขึ้นและลดปริมาณผลึกลง

จากการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และอลูมิเนียม (รูปที่ 40) พบว่าการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่ 300 องศาเซลเซียส ความแข็งของผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่าต่ำกว่า ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานอลูมิเนียม เพราะเกิดการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบจากความร้อนสูง [22] เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าอลูมิเนียม ทำให้อนุภาคผง PEEK ได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานาน และเกิดเป็นฟองอากาศขึ้นภายในผิวเคลือบ ส่วนผิวเคลือบที่ได้จากการไม่ให้ความร้อนและให้ความร้อนแก่ชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบที่ 100 และ 200 องศาเซลเซียส พบว่าผิวเคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่าความแข็งสูงกว่าผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีการถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่าอลูมิเนียม ทำให้ PEEK มีเวลาในการจัดเรียงตัวขณะเย็นตัวบนชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนานกว่าบนชิ้นงานรองรับอลูมิเนียม ส่งผลให้ผิวเคลือบมีความเป็นผลึกสูง ดังนั้น ความแข็งของผิวเคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจึงสูงกว่าผิวเคลือบบนชิ้นงานอลูมิเนียม และในการให้อุณหภูมิกับชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ผิวเคลือบมีความแข็งสูงขึ้นทั้งผิวเคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และอลูมิเนียม เนื่องจากผลของปริมาณความเป็นผลึกที่เพิ่มสูงขึ้น โดยรูปที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึกกับความแข็งของผิวเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ Zhang และคณะ [34] ที่ได้

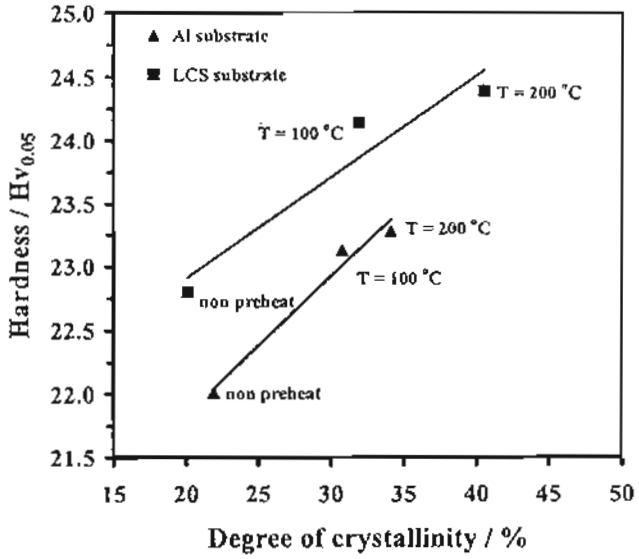
ทำการศึกษาการอบอ่อน PEEK ที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้เวลาและอุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งของผิวเคลือบ PEEK จะสูงขึ้นด้วย อันเป็นผลเนื่องจากความเป็นผลึกที่สูงขึ้น



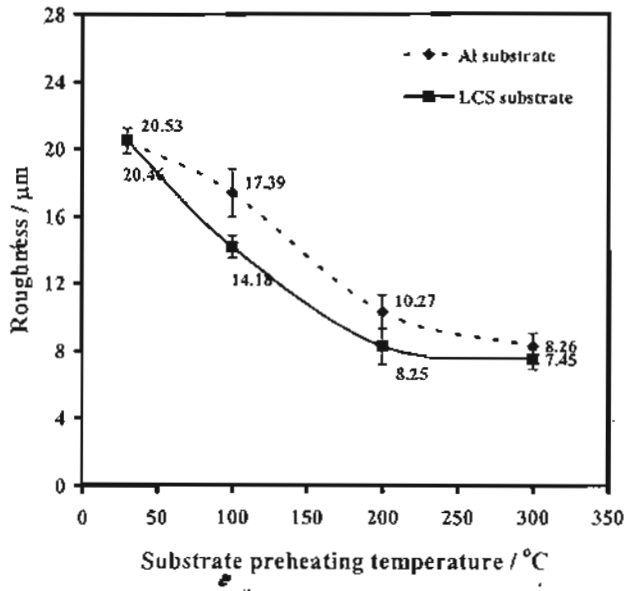
รูปที่ 39 ปริมาณร้อยละของความเป็นผลึกของผิวเคลือบที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเทคนิคเอกซ์เรดิฟเฟรกชัน



รูปที่ 40 อิทธิพลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานรองรับก่อนการพ่นเคลือบกับความแข็งผิวเคลือบ



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึกที่ส่งผลต่อความแข็งของผิวเคลือบ (เนื่องจากที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผิวเคลือบเกิดการเสื่อมสภาพจึงไม่นำมาพิจารณา)



รูปที่ 42 อิทธิพลของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่มีต่อความหยาบของผิวเคลือบ

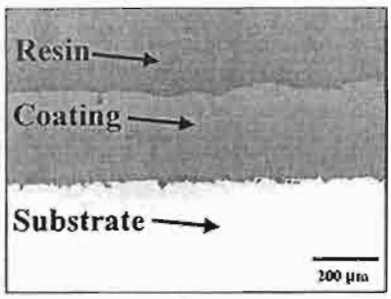
เมื่อพิจารณาถึงความหยาบผิวของผิวเคลือบในสภาวะที่ไม่ให้และให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ (**รูปที่ 42**) พบว่าผิวเคลือบ PEEK ที่ยึดติดบนชิ้นงานรองรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอลูมิเนียม มีค่าความหยาบของผิวเคลือบที่มีแนวโน้มเหมือนกัน กล่าวคือ ถ้าไม่ได้ให้ความร้อนแก่

ผิวชิ้นงานรองรับ ส่งผลให้ความหยาบของผิวเคลือบมีค่าสูงที่สุด (หยาบที่สุด) รองลงมาคือ ชิ้นงานที่ได้รับความร้อนที่ 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส มีค่าความหยาบผิวใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานมีความร้อนเพียงพอในการทำให้อนุภาคผงที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวหรือกึ่งแข็งกึ่งเหลว ไม่เกิดการเย็นตัวเร็วเกินไปเมื่ออนุภาคผงตกกระทบลงบนผิวชิ้นงาน มีลักษณะการไหลได้ง่าย สามารถแผ่ออกไปบนผิวของชิ้นงานก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง แต่ถ้าชิ้นงานไม่ได้รับการให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบ หรือการให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบที่ 100 องศาเซลเซียส เมื่ออนุภาคผงตกกระทบลงบนผิวชิ้นงาน จะเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอนุภาคผงและผิวชิ้นงานสูง ส่งผลให้อนุภาคผงมีการถ่ายเทความร้อนให้กับผิวชิ้นงานสูง อนุภาคผงมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหรือกึ่งหลอมเหลวกลายไปเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว ผิวเคลือบที่เกิดขึ้นจึงมีความขรุขระส่งผลให้มีความหยาบผิวสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Luciana และคณะ [2] ที่พบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนกับผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบสูงขึ้นส่งผลให้ความหยาบผิวลดลง เนื่องจากชิ้นงานรองรับถ่ายเทความร้อนให้กับผิวเคลือบด้านบนที่มีส่วนประกอบของผงเคลือบที่หลอมเหลวไม่สมบูรณ์ ทำให้ผงเคลือบหลอมเหลวได้สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นชิ้นงานรองรับระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับอลูมิเนียม พบว่าความหยาบของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่เป็นอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่สภาวะการพ่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานอลูมิเนียมจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

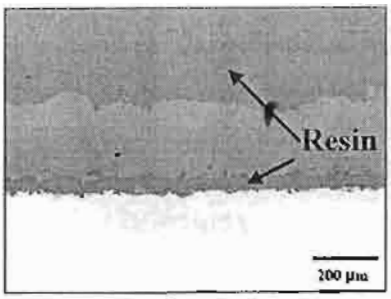
จากผลการทดลองนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลายของผิวเคลือบ การให้ความร้อนแก่ผิวชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบที่ 200 องศาเซลเซียส ได้ถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป (การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ 300 องศาเซลเซียส จะทำให้สิ้นเปลืองก๊าซเนื่องจากใช้เวลานาน) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของ Lugscheider และคณะ [9] ทำการพ่นเคลือบ PEEK ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่าการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีผลทำให้การยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานรองรับดีที่สุดเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนก่อนการพ่นเคลือบในช่วง 240 – 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อวางทิ้งไว้ไม่เกิน 48 ชั่วโมง พบว่าเกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบ และถ้าให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบในช่วง 20 – 240 องศาเซลเซียส ผิวเคลือบเกิดการหลุดลอกในขณะพ่นเคลือบ เนื่องจากมีความแตกต่างของการขยายตัวทางความร้อนสูง และเมื่อมีการพ่นเคลือบซ้ำหลายครั้ง พบว่ามีการบิดเบี้ยว (thermal shrinkage) ของผิวเคลือบ และยังส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นบนผิวเคลือบ เนื่องจากเกิดการเสื่อมสลายของ PEEK การที่ผลการทดลองแตกต่างกันนั้นอาจจะเกิดจากการใช้พารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบที่แตกต่างกัน คือ ระยะทางในการพ่นเคลือบ และก๊าซที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อน

3.5 อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบ

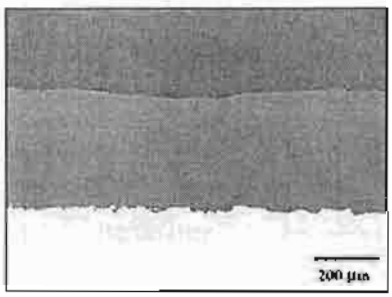
เมื่อพิจารณาผลที่ได้ของชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียมเมื่อทำการพ่นเคลือบที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 80 100 120 และ 150 มิลลิเมตร ดังรูปที่ **43.1a) – 43.1d)** ไม่พบรูพรุนภายในผิวเคลือบ มีการยึดติดระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวเคลือบโดยไม่เห็นรอยแยก แต่เมื่อพิจารณาถึงความหยาบของผิวเคลือบที่เกิดขึ้นที่ระยะทาง 120 และ 150 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 8 ผิวเคลือบที่เกิดขึ้นมีความหยาบผิวสูงกว่าที่ระยะทางที่ 80 และ 100 มิลลิเมตร เนื่องจากระยะทางที่ผงเคลื่อนที่ไปไกลจนทำให้ผงนั้นมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำลง และบางส่วนเกิดการเย็นตัวลง ความสามารถในการไหลไปบนผิวชิ้นงานก็จะต่ำเมื่อตกกระทบลงบนผิวชิ้นงาน ทำให้ผิวเคลือบที่เกิดขึ้นมีความหยาบผิวสูงกว่าเมื่อพ่นในระยะทาง 80 และ 100 มิลลิเมตร Lugscheider และคณะ [9] ได้ทำการพ่นเคลือบ PEEK ที่ระยะทาง 100 200 และ 300 มิลลิเมตร พบว่าที่ระยะทางไกลหรือใกล้เกินไป ส่งผลให้ผงเคลือบนั้นหลอมไม่เต็มที่เมื่อตกกระทบผิวชิ้นงาน เนื่องจากที่ระยะทางใกล้เวลาในการดูดกลืนความร้อนของผงเคลือบจะน้อยทำให้ได้รับความร้อนไม่เพียงพอในการหลอม และถ้าไกลเกินไป ความร้อนที่อยู่ในผงเคลือบจะถูกถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมในขณะเคลื่อนที่ ทำให้ผงเคลือบแข็งตัวก่อน ดังนั้นระยะทางเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก เพราะการเปลี่ยนแปลงระยะทางแค่ 5 มิลลิเมตรก็จะส่งผลต่อระดับต่อการหลอมเหลวของผิวเคลือบ และเมื่อพิจารณาถึงผลการพ่นเคลือบลงบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ดังรูปที่ **43.2a) – 43.2d)** ที่ระยะทางการพ่นเคลือบที่ 80 มิลลิเมตร พบว่าผิวเคลือบแยกออกจากผิวชิ้นงาน เนื่องมาจากชิ้นงานอยู่ใกล้กับเปลวไฟเกินไปทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนสูง มีการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ช้ากว่าระยะทางการพ่นที่ 100 120 และ 150 มิลลิเมตร เป็นผลให้ผิวเคลือบเกิดการหดตัวสูง ผิวเคลือ บจึงหลุดออกจากผิวชิ้นงาน แต่ผลการพ่นเคลือบผิวที่ระยะอื่นๆ พบว่ามีแนวโน้มลักษณะคล้ายกับการพ่นเคลือบลงบนชิ้นงานอลูมิเนียม Blundell และคณะ [35] ได้ทำการวัดปริมาณความเป็นผลึกของ PEEK ที่มีเวลาในการเย็นตัวต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่มีการเย็นตัวช้า เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่มีเวลาในการเย็นตัวเร็ว ซึ่งความเป็นผลึกนี้ส่งผลต่อการหดตัวของ PEEK โดยชิ้นงานที่มีความเป็นผลึกสูง ส่งผลให้การหดตัวสูงด้วย Amada และคณะ [36] พบว่าความเร็วของผงที่หลอมเหลวตกกระทบผิวชิ้นงานรองรับมีผลต่อลักษณะของการไหลและแผ่ออกของผงเคลือบ โดยเมื่อผงเคลือบที่มีความเร็วสูงตกกระทบผิวชิ้นงานรองรับ ทำให้ผงเคลือบที่หลอมเหลวกระจายออกเป็นบริเวณกว้าง บางส่วนเกิดการกระเซ็นออก ซึ่งจะส่งผลต่อการยึดเกาะของผิวเคลือบ



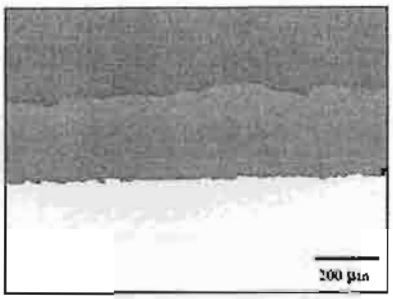
43.1a) ระยะพ่น 80 มิลลิเมตร



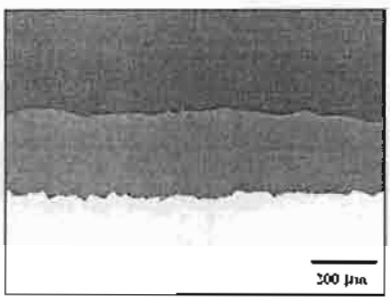
43.2a) ระยะพ่น 80 มิลลิเมตร



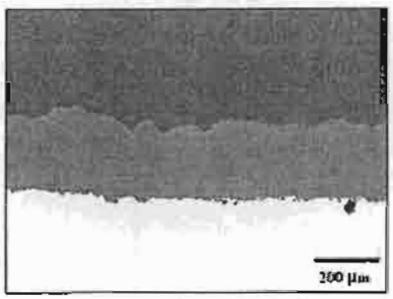
43.1b) ระยะพ่น 100 มิลลิเมตร



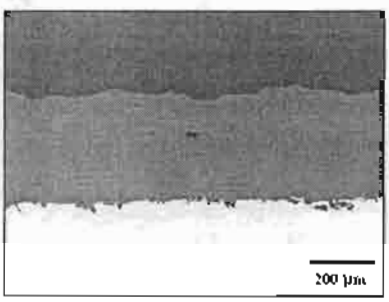
43.2b) ระยะพ่น 100 มิลลิเมตร



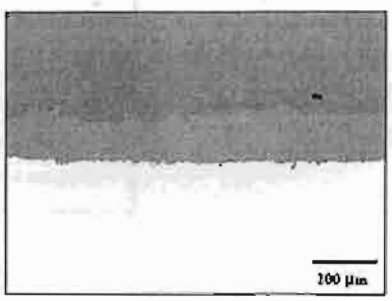
43.1c) ระยะพ่น 120 มิลลิเมตร



43.2c) ระยะพ่น 120 มิลลิเมตร



43.1d) ระยะพ่น 150 มิลลิเมตร



43.2d) ระยะพ่น 150 มิลลิเมตร

ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานอลูมิเนียม

ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

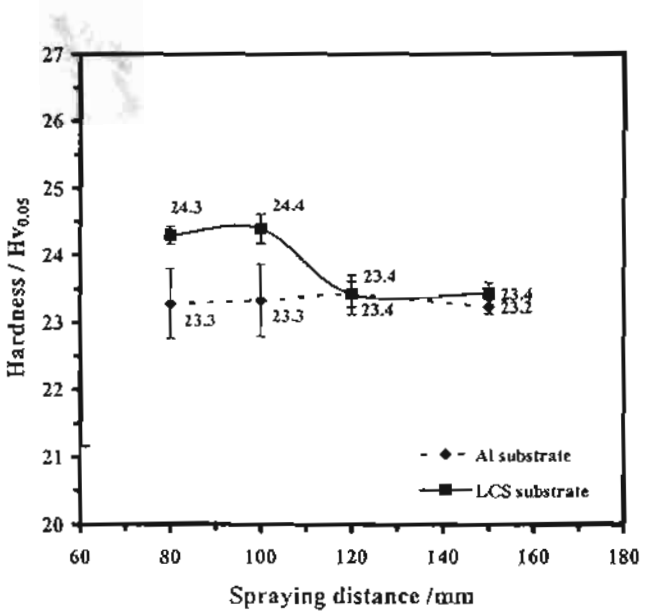
รูปที่ 43 โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่ระยะทางต่างกัน

44.1 อลูมิเนียม 44.2 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

a) 80 มิลลิเมตร b) 100 มิลลิเมตร c) 120 มิลลิเมตร d) 150 มิลลิเมตร

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการพ่นเคลือบกับค่าความหยาบของผิวเคลือบ

ชิ้นงาน	ระยะทางการพ่นเคลือบ / มิลลิเมตร	ค่าความหยาบของผิวเคลือบ (Ra) / ไมโครเมตร
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	80	16.35
	100	8.25
	120	11.16
	150	17.23
อลูมิเนียม	80	12.27
	100	10.27
	120	14.77
	150	16.78



รูปที่ 44 อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบกับความแข็งของผิวเคลือบ

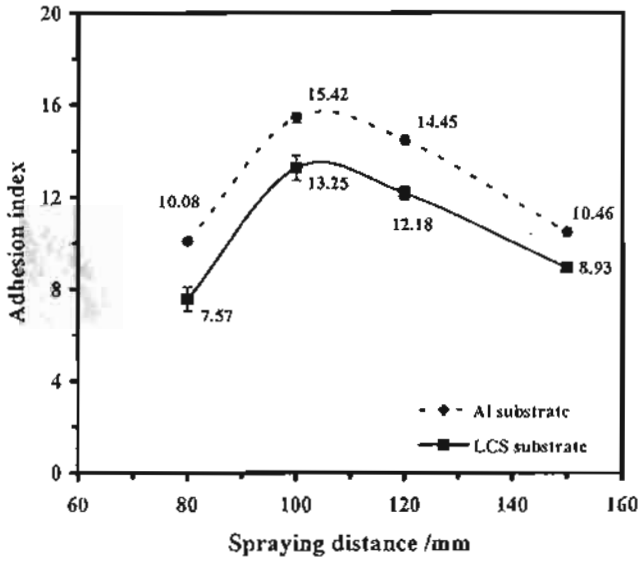
อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบกับความแข็งของผิวเคลือบ จากรูปที่ 44 เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพบว่าที่ระยะทางการพ่น 80 และ 100 มิลลิเมตร ความแข็งของผิวเคลือบมีค่าสูงกว่าผิวเคลือบที่ระยะทางการพ่น 120 และ 150 มิลลิเมตร เนื่องจากที่ระยะทางการพ่นเคลือบที่ 80 และ 100 มิลลิเมตร ผงเคลือบยังมีความร้อนและความเร็วของการเคลื่อนที่ที่สูงกว่าที่ระยะทางการพ่นเคลือบ 120 และ 150 มิลลิเมตร เมื่อผงเคลือบมีความเร็วสูงตกกระทบผิวชิ้นงานส่งผลให้โมเลกุล

ได้รับแรงดันและเกิดการอัดตัวของโมเลกุลสูง ผิวเคลือบมีเวลาอยู่ในความร้อนนานกว่า ทำให้โมเลกุลของผงเคลือบมีเวลาในการจัดเรียงตัวเป็นผลึก ซึ่งความเป็นผลึกนี้ส่งผลโดยตรงกับความแข็ง ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความเป็นผลึก แต่ผลของระยะทางการพ่นเคลือบกับความแข็งของชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความแข็งทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานอลูมิเนียมมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

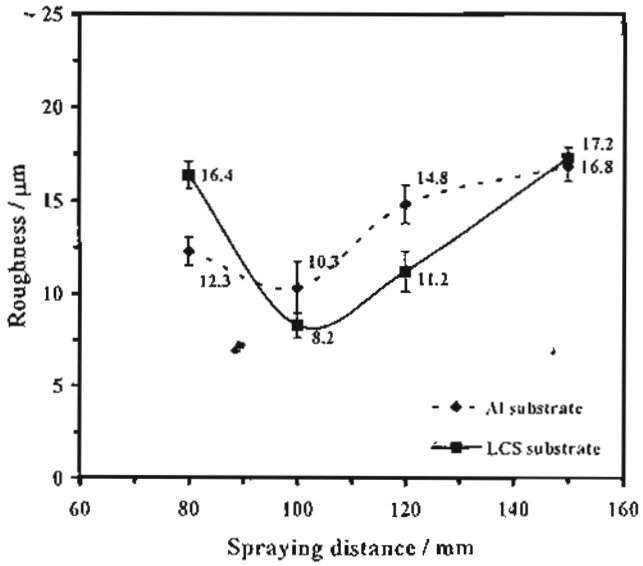
จาก**รูปที่ 45** จะพบว่าระยะทางการพ่นเคลือบมีผลต่อดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ โดยเมื่อระยะทางการพ่นเคลือบไกลออกไปจาก 100 เป็น 120 และ 150 มิลลิเมตร ดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบมีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของผงลดลงส่งผลให้อนุภาคของผงเคลือบมีการไหลออกไปทางด้านข้าง (wetability) ได้ลดลง ผงบางส่วนนั้นมีการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมจึงเกิดการแข็งตัว ส่งผลให้การไหลของผงเคลือบที่หลอมเหลวต่ำ และ การอัดตัวของผิวเคลือบนั้นไม่ดีเท่ากับที่ระยะทาง 100 มิลลิเมตร ในขณะที่ระยะทาง 80 มิลลิเมตร ผงเคลือบมีการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมต่ำ มีความเร็วในการตกกระทบสูง ส่งผลให้ผงเคลือบเมื่อตกกระทบกับผิวชิ้นงานเกิดการกระเซ็นออก การยึดเกาะที่น่าจะสูงกลับต่ำลง ซึ่งทั้งชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอลูมิเนียมมีพฤติกรรมที่คล้ายกัน แต่ผิวชิ้นงานรองรับที่เป็นอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เนื่องจากชิ้นงานรองรับที่เป็นอลูมิเนียมมีความหยาบผิวสูงกว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้ดัชนีการยึดเกาะสูง ซึ่งสอดคล้องกับ Gil และ Staia [37] พบว่า เมื่อระยะทางการพ่นเคลือบห่างออกไป ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานต่ำลง เนื่องจากพลังงานจลน์ของผงเคลือบลดต่ำลงและเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางการพ่นเคลือบไกลออกไป

อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบที่มีต่อความหยาบของผิวเคลือบแสดงได้ ดัง**รูปที่ 46** พบว่า เมื่อระยะทางการพ่นเคลือบที่ไกลออกไปส่งผลให้ความหยาบของผิวเคลือบสูงขึ้น ดังพิจารณาได้จากระยะทางในการพ่นเคลือบที่ 100 120 และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ระยะทางในการพ่นเคลือบที่ 100 มิลลิเมตรค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำสุด เนื่องจากที่ระยะทางที่ 100 มิลลิเมตรนี้อนุภาคผงยังคงอยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวหรือกึ่งหลอมเหลว จึงทำให้อนุภาคผงที่ตกกระทบกับผิวชิ้นงานสามารถไหลแผ่กระจายออกไปตามผิวชิ้นงานรองรับได้ดีไม่เกิดการแข็งตัวเป็นก้อน ส่วนที่ระยะทางในการเคลื่อนที่ของอนุภาคผงที่ 120 และ 150 มิลลิเมตร อนุภาคผงเกิดการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมตลอดระยะทางในการเคลื่อนที่ ส่งผลให้อนุภาคผงบางส่วนเกิดการเย็นตัวกลายเป็นของแข็ง หรือเกือบแข็ง เมื่อตกกระทบลงบนผิวชิ้นงานรองรับ อนุภาคไม่สามารถไหลได้เนื่องจากบางส่วนเกิดการแข็งตัว ส่งผลให้เกิดผิวเคลือบที่มีความหยาบผิวสูง เมื่อพิจารณาที่ระยะทางในการพ่นเคลือบที่ 80 มิลลิเมตร อนุภาคผงเกิดการสูญเสียความร้อนและมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำกว่า 100 120 และ 150 มิลลิเมตร ตามปกติแล้วผิวเคลือบที่ได้น่าจะมีความหยาบผิวต่ำ แต่ในความเป็นจริงผิวเคลือบ

ที่ได้กลับมีความหยาบผิวสูงกว่าที่ระยะการพ่นเคลือบที่ 100 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนสูงเพราะอยู่ใกล้เปลวไฟมาก เมื่ออนุภาคผงที่หลอมเหลวตกกระทบชิ้นงานจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผงเคลือบและผิวชิ้นงานน้อย อนุภาคผงจึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับชิ้นงานรองรับและสิ่งแวดล้อมได้มากเท่ากับที่ระยะการพ่นที่ 100 มิลลิเมตร อนุภาคผงจึงมีลักษณะเป็นของเหลวตกกระทบผิวชิ้นงานรองรับด้วยความเร็วสูง อนุภาคผงเกิดการแตกกระเซ็น และแข็งตัวทำให้ผิวเคลือบมีความหยาบสูง ซึ่งเห็นได้ชัดสำหรับชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหยาบของผิวเคลือบที่ระยะทางในการพ่นเคลือบ 100 120 และ 150 มิลลิเมตร พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกันตามลำดับ แต่ชิ้นงานรองรับที่เป็นอลูมิเนียมมีความหยาบผิวที่สูงกว่าเนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จากผลอิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบที่เกิดขึ้น จึงเลือกระยะทางในการพ่นเคลือบที่ 100 มิลลิเมตรเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบต่อไป



รูปที่ 45 ผลของระยะทางการพ่นเคลือบที่มีต่อดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ



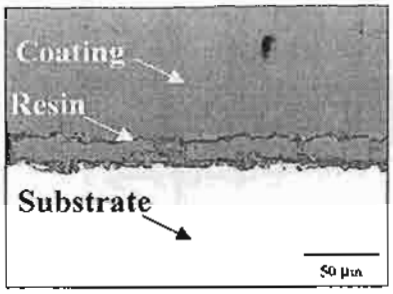
รูปที่ 46 อิทธิพลของระยะทางการพ่นเคลือบกับความหยาบของผิวเคลือบ

3.6 อิทธิพลของความหยาบผิวชิ้นงานรองรับ

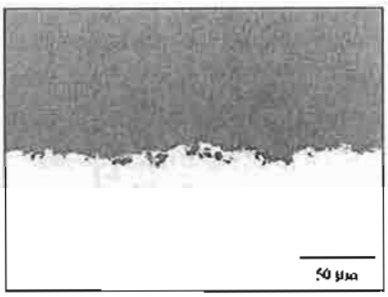
เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบที่เคลือบลงบนชิ้นงานรองรับที่มีความหยาบผิวแตกต่างกัน ดังรูปที่ 47 พบว่าที่ความหยาบของผิวชิ้นงานรองรับสูงจะส่งผลให้มีพื้นที่ในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบสูงด้วย (ดังรูปที่ 47.1c) และที่ความหยาบของผิวชิ้นงานรองรับต่ำ (ดังรูปที่ 47.2a) ผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกิดการแยกออกระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าที่ความหยาบผิวต่ำ ผิวเคลือบมีความสามารถในการยึดเกาะที่ต่ำกว่าผิวเคลือบที่มีความหยาบผิวสูงกว่า

เมื่อพิจารณาความหยาบผิวของชิ้นงานที่ส่งผลต่อดัชนีการยึดเกาะ (ดังรูปที่ 48) ในชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพบว่า เมื่อความหยาบผิวเพิ่มขึ้น แนวโน้มของดัชนีการยึดเกาะได้เพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความหยาบผิวช่วยให้พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับผิวเคลือบเพิ่มสูงขึ้น ทำให้พื้นที่ในการยึดเกาะเพิ่มมากขึ้น [38] และการเพิ่มความหยาบผิวยังช่วยให้การเกิดการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking) ที่ดีขึ้น Harris [39] พบว่าความหยาบผิวของชิ้นงานรองรับช่วยส่งผลให้การยึดเกาะของผิวเคลือบดีขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะและความสามารถในการไหล (wetability) สูงขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียมก็มีแนวโน้มใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่ที่ความหยาบผิวสูงขึ้นค่าดัชนีการยึดเกาะกลับคงที่ เนื่องความหยาบผิวที่สูงขึ้นส่งผลให้ผงเคลือบหลอมเหลวที่ตกกระทบเกิดการกระเซ็นออก โดย Mostaghimi และคณะ [33] พบว่า ผงเคลือบที่หลอมเหลวตกกระทบผิวชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่สูงทำให้เกิดการกระเซ็นออก ไม่มีความต่อเนื่องของการไหลแผ่ออกเป็นแผ่นวงกลม จากสภาวะที่ใช้ในการพ่นเคลือบในงานวิจัยนี้ พบว่า ค่าความหยาบผิวสูงมีอิทธิพลกับผลของดัชนีการยึดเกาะมากกว่าชนิดของวัสดุ

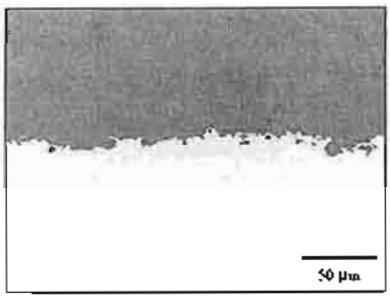
ขนาดเม็ดกริต (ไมโครเมตร)	ความหยาบผิว (ไมโครเมตร)
100	2.22
238	4.36
718	7.25



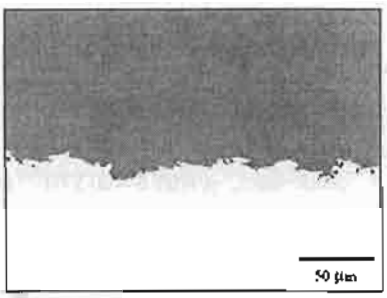
47.2a) 1.61 ไมโครเมตร



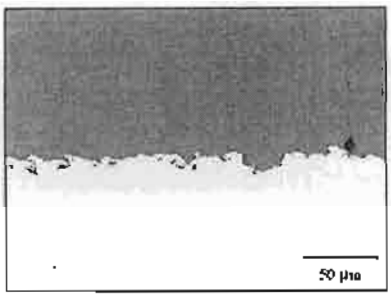
47.1a) 2.22 ไมโครเมตร



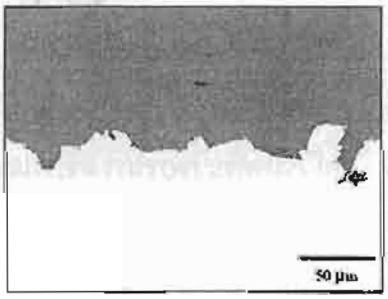
47.2b) 2.86 ไมโครเมตร



47.1b) 4.36 ไมโครเมตร



47.2c) 4.72 ไมโครเมตร



47.1c) 7.25 ไมโครเมตร

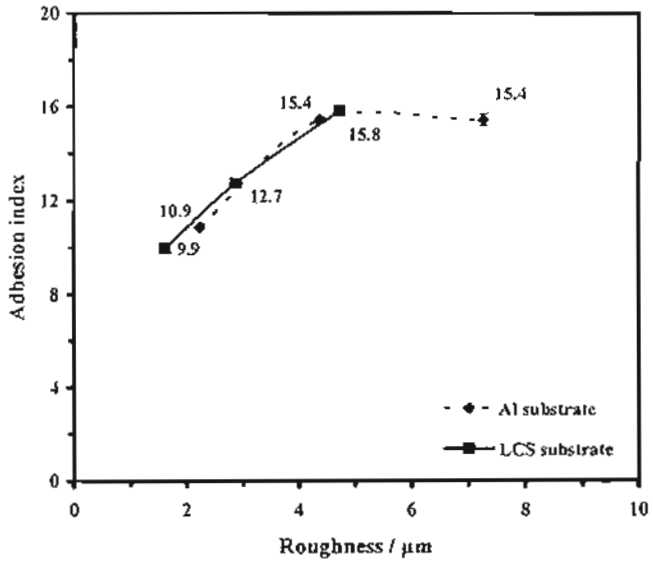
ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานอลูมิเนียม

ขนาดเม็ดกริต (ไมโครเมตร)	ความหยาบผิว (ไมโครเมตร)
100	1.61
238	2.86
718	4.72

ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

รูปที่ 47 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานรองรับที่ได้เตรียมผิวโดยใช้เม็ดกริตขนาดต่างกัน 48.1) อลูมิเนียม 48.2) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

a) เม็ดกริตขนาด 100 µm b) เม็ดกริตขนาด 238 µm c) เม็ดกริตขนาด 718 µm



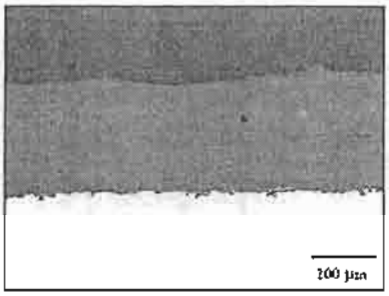
รูปที่ 48 ผลของความหยาบผิวของชิ้นงานที่มีต่อดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ

3.7 อิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็ก

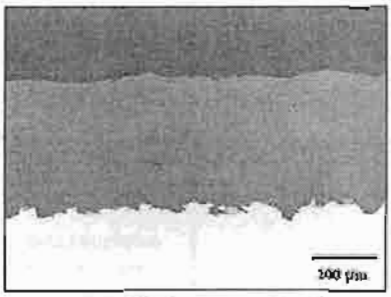
เมื่อทำการพ่นเคลือบ PEEK ลงบนผิวชิ้นงานโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก และชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม 7 13 และ 17 มิลลิเทสลาบนผิวชิ้นงานรองรับที่มีความหยาบผิว 2.86 และ 4.72 ไมโครเมตร พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบมีลักษณะไม่แตกต่างกัน อนุภาคผงมีการหลอมตัวที่ดี มีรูพรุนน้อยมาก ผิวเคลือบไม่แยกออกจากผิวชิ้นงานรองรับ เนื่องจากได้ทำการพ่นเคลือบตามพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากงานวิจัยข้างต้น พิจารณาได้ดัง**รูปที่ 49**

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีต่อปริมาณความเป็นผลึก (ดัง**รูปที่ 50**) พบว่าในช่วงแรกชิ้นงานรองรับที่พ่นเคลือบในสภาวะที่ไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ชิ้นงานรองรับที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กปริมาณ 7 13 มิลลิเทสลา ความเข้มสนามแม่เหล็กไม่มีผลกับปริมาณความเป็นผลึกของผิวเคลือบ PEEK แต่เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก 13 มิลลิเทสลาขึ้นไป ความเข้มสนามแม่เหล็กส่งผลให้ผิวเคลือบ PEEK มีปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ 17 มิลลิเทสลา ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 17 มิลลิเทสลาเป็นปริมาณที่สูงพอที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสายโซ่โมเลกุล (delocalization) ของ PEEK เช่นเดียวกับ Sombatsompop **[19]** ได้ศึกษาการบวมตัวของ PS และ ABS ในระบบหัวอัดรีดมีความเข้มแม่เหล็ก 126 มิลลิเทสลา พบว่า PS และ ABS ที่อัดผ่านหัวรีดที่มีความเป็นแม่เหล็กจะเกิดการบวมตัวมากกว่าในระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เนื่องจากอิเล็กตรอนในหมู่เบนซินในโครงสร้าง PS และ ABS เกิดการเคลื่อนที่ (delocalization) ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปของกลุ่มอิเล็กตรอน เกิดการ

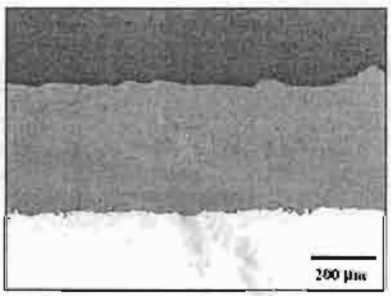
จัดเรียงตัวของโมเลกุล และมีความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การบวมตัวเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการที่สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัว ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเรียงชิดติดกัน โอกาสที่พอลิเมอร์จะเกิดผลึกจึงมีสูงมากขึ้นกว่าปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก



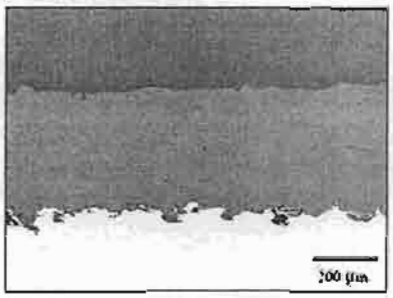
49.1a) ไม่มีสนามแม่เหล็ก



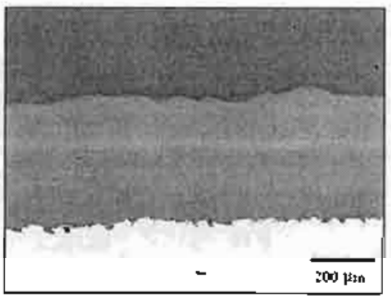
49.2a) ไม่มีสนามแม่เหล็ก



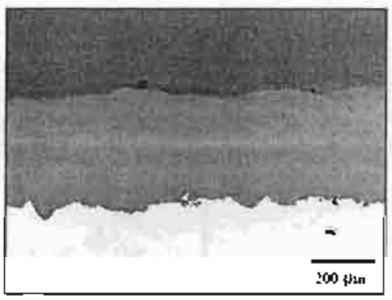
49.1b) 7 มิลลิเทสลา



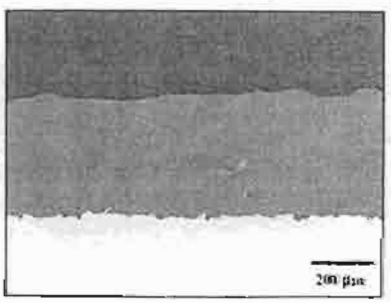
49.2b) 7 มิลลิเทสลา



49.1c) 13 มิลลิเทสลา

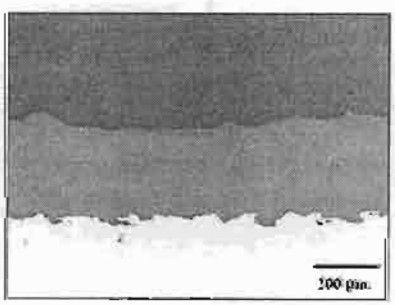


49.2c) 13 มิลลิเทสลา



49.1d) 17 มิลลิเทสลา

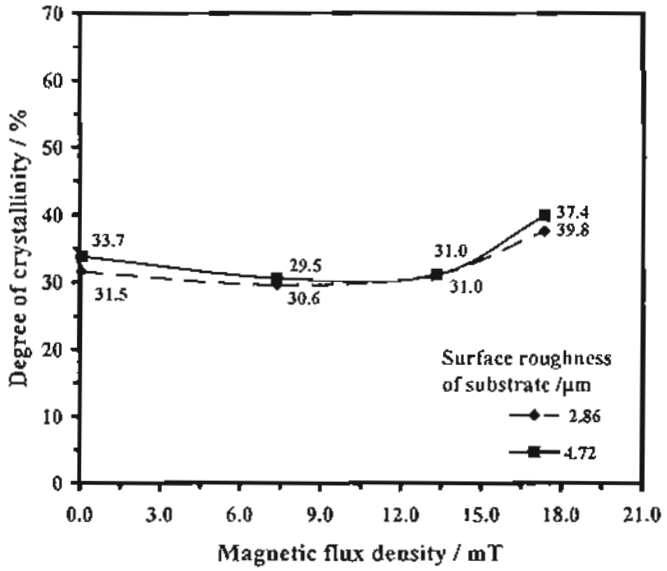
ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความหยาบผิว 2.86 µm



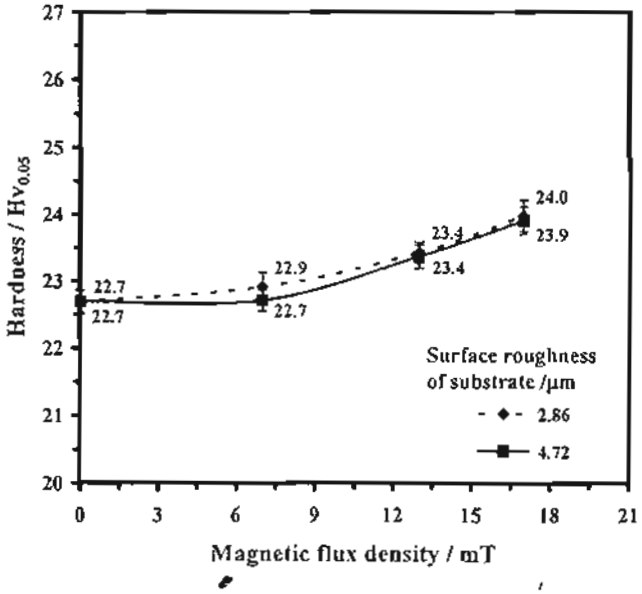
49.2d) 17 มิลลิเทสลา

ผิวเคลือบ PEEK บนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความหยาบผิว 4.72 µm

รูปที่ 49 โครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

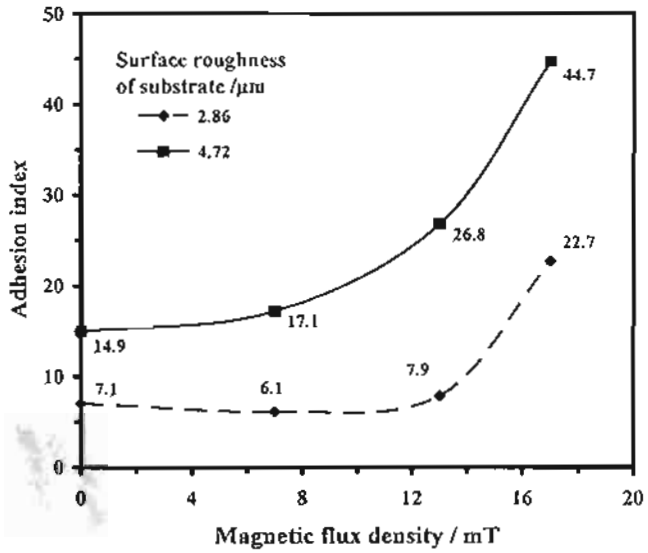


รูปที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็กกับปริมาณความเป็นผลึก



รูปที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็กกับความแข็ง

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับความแข็งของผิวเคลือบที่เกิดขึ้น (**รูปที่ 51**) พบว่าเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความเป็นผลึกของผิวเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ 17 มิลลิเทสลา ส่งผลให้ความแข็งสูงที่สุด ทั้งชิ้นงานรองรับที่มีความหยาบผิว 2.86 และ 4.72 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับ Stuart และ Briscoe [40] ที่พบว่าผิวเคลือบ PEEK ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกทำให้ค่าความแข็งสูงกว่า PEEK ที่มีโครงสร้างอสัญฐาน



รูปที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ

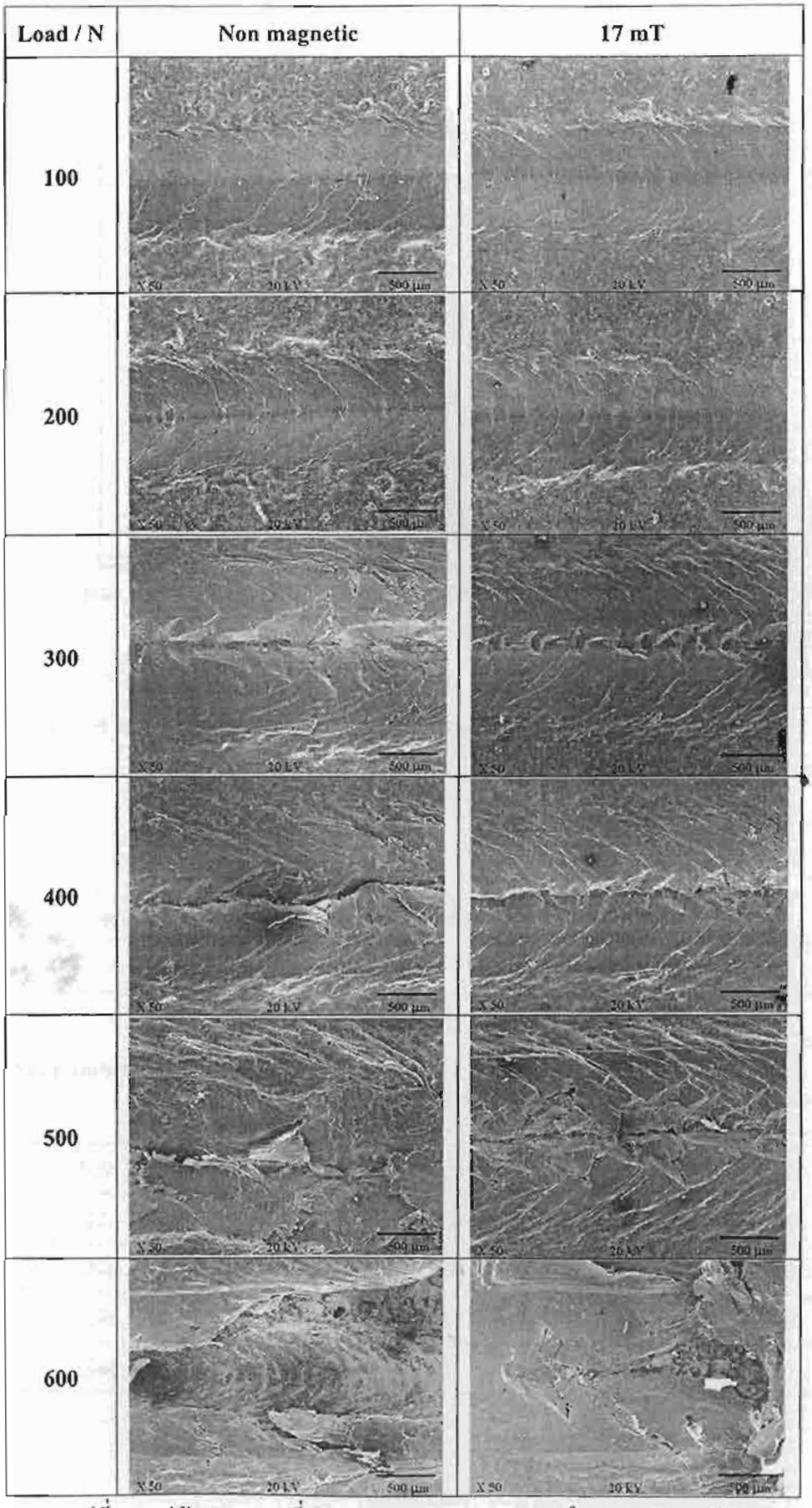
จากความสัมพันธ์ของดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบ และชิ้นงานที่พ่นเคลือบภายใต้สภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก และชิ้นงานที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก 7 13 และ 17 มิลลิเทสลา ซึ่งได้จากการทดสอบ Scratch adhesion test มีความสัมพันธ์ดัง**รูปที่ 52** พบว่าเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มของดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบสูงขึ้นทั้งชิ้นงานที่มีความหยาบผิว 2.86 และ 4.72 ไมโครเมตร โดยเฉพาะที่ 17 มิลลิเทสลา มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยชิ้นงานที่มีความหยาบผิว 2.86 ไมโครเมตรมีค่าดัชนีการยึดเกาะที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่มีความหยาบผิว 4.72 ไมโครเมตร ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ กัน เนื่องจากความหยาบผิวที่ต่ำกว่าส่งผลให้การยึดเกาะมีค่าต่ำกว่าความหยาบผิวสูงซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองในข้างต้น แต่เมื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นของดัชนีการยึดเกาะเมื่อความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยสังเกตได้จากค่าดัชนีการยึดเกาะที่มีค่าแตกต่างกันมากขึ้นระหว่างชิ้นงานที่มีความหยาบผิวสูงและชิ้นงานที่มีความหยาบผิวต่ำ เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็กตรงบริเวณผิวชิ้นงานรองรับที่มีความหยาบผิวสูง และความหยาบผิวต่ำจะมีทิศทางขนานไปกับผิวชิ้นงานรองรับ ดังนั้นเมื่อชิ้นงานรองรับที่ความหยาบผิวสูง ก็จะมีพื้นที่ในการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงกว่าชิ้นงานรองรับที่มีความหยาบผิวต่ำ สนามแม่เหล็กจึงส่งผลกับชิ้นงานที่มีความหยาบผิวสูงได้มากกว่า

จากผลการวัดค่าดัชนีการยึดเกาะจะส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนมากกว่าผลของความแข็ง และปริมาณร้อยละความเป็นผลึก เนื่องจากการวัดค่าดัชนีการยึดเกาะนั้นเป็นการวัดบริเวณรอยต่อของผิวเคลือบซึ่งสนามแม่เหล็กส่งผลได้สูง ส่วนการวัดความแข็งและค่าปริมาณร้อยละความเป็นผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากเป็นการวัดที่อยู่ถัดจากบริเวณรอยต่อของผิวเคลือบออกมามากกว่าการวัดดัชนีการยึดเกาะ อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจึงส่งผลได้น้อยลง Ashrafizadeh [41] ได้ทำการศึกษาการยึดเกาะของผิวเคลือบด้วยการหาค่าดัชนีการยึดเกาะของผิวเคลือบด้วยเทคนิค Scratch adhesion test กล่าวถึงสมการของ Burnett และ Rickerby เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก (L_c) ต่อความกว้างของรอยขีดขูด (d_c) ยกกำลังสอง ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Scratch test ซึ่งก็คือค่าดัชนีการยึดเกาะ ซึ่งแปรผันโดยตรงกับค่า ยังโมดูลัส (E) ดังสมการที่ 22

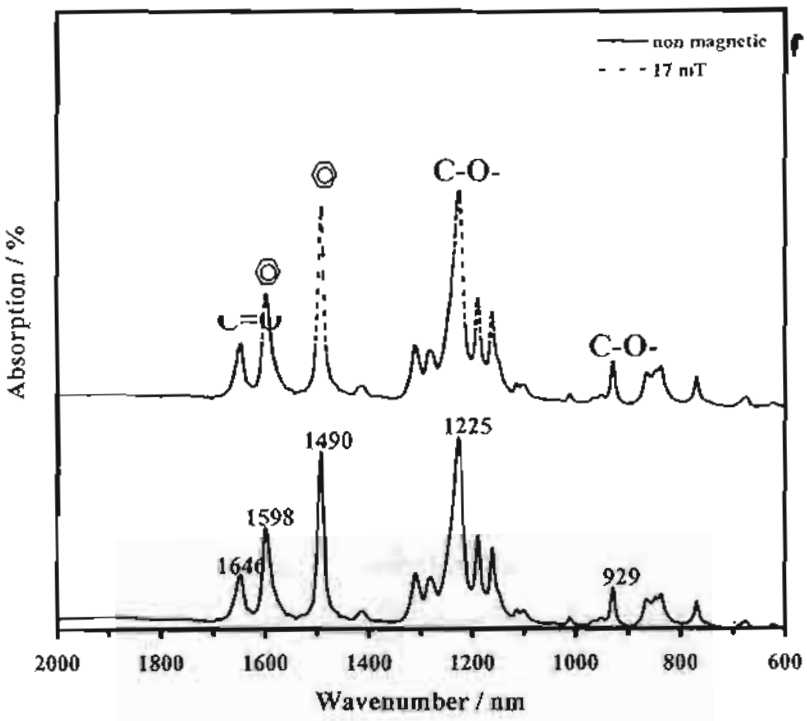
$$\frac{L_c}{d_c^2} \propto E \tag{22}$$

เมื่อความหนาของผิวเคลือบคงที่ ดังนั้นสิ่งที่ส่งผลต่อดัชนีการยึดเกาะคือ ค่ายังโมดูลัสของวัสดุผิวเคลือบ เมื่อความแข็งมีผลโดยตรงกับค่าโมดูลัสยังของวัสดุ เพราะฉะนั้นค่าดัชนีการยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการพ่นเคลือบชิ้นงานภายใต้สนามแม่เหล็กจึงเกิดจากค่าความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบ Scratch adhesion test รอยขูดขีดของผิวเคลือบที่เกิดขึ้นแสดงได้ ดังรูปที่ 53 ซึ่งรอยที่เกิดขึ้นสามารถที่เปรียบเทียบถึงพฤติกรรมการเสียรูปได้ โดยพบว่า ผิวเคลือบที่ผ่านการพ่นเคลือบภายใต้สภาวะที่ไม่มีแม่เหล็กและสภาวะที่มีแม่เหล็ก ที่น้ำหนัก 100 และ 200 นิวตัน การเสียรูปของผิวเคลือบจะมีลักษณะเป็นแบบ Ductile Ploughing คล้ายกัน แต่ในชิ้นงานที่ผ่านการพ่นเคลือบจากสภาวะที่มีสนามแม่เหล็ก พบว่ารอยแตกบริเวณรอยขีดมีความละเอียดมากกว่า เมื่อทำการทดสอบที่ใช้น้ำหนัก 300 นิวตัน ขึ้นไป พบว่าการพ่นเคลือบภายใต้สภาวะที่ไม่มีแม่เหล็ก ผิวเคลือบเกิดการเสียรูปแบบ Ductile Machining ผสมกับ Cracking แต่เมื่อทำการเคลือบภายใต้สนามแม่เหล็ก ผิวเคลือบเกิดการเสียรูปแบบ Brittle Machining ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Briscoe [15] ที่ได้ศึกษาลักษณะการเสียรูปที่เกิดจากการทดสอบรอยขีดข่วนของผิวพอลิเมอร์ ดังนั้น จากการที่ผิวเคลือบมีสภาพการเสียรูปที่ต่างกันเป็นผลมาจากความแข็งที่เพิ่มขึ้นดังผลการทดลองข้างต้น



รูปที่ 53 รูปลักษณะรอยที่เกิดจากการการทดสอบการขีดเกาะจากรอยขีด



รูปที่ 54 ผลการทดสอบของผิวเคลือบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนด้วยเทคนิค FTIR

ตารางที่ 9 ผลของอัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Wave number /cm^{-1}	Non magnetic		17 mT	
	Peak area / A . cm^{-1}	Absorbance ratio	Peak area / A . cm^{-1}	Absorbance ratio
929	3.92	0.09	4.53	0.10
1225	42.08	1.00	46.96	1.00
1490	29.19	0.69	32.93	0.70
1598	19.86	0.47	22.31	0.48
1646	9.25	0.22	9.81	0.21

เมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและการเลื่อนตำแหน่งพีคที่เกี่ยวข้องในสเปกตรัม FT-IR ของผิวเคลือบ PEEK เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่พ่นเคลือบในสภาวะปกติ และที่ผ่านการพ่นเคลือบภายใต้สนามแม่เหล็ก 17 มิลลิเทสลาด้วยเทคนิค FT-IR โดยผลที่ได้จากการทดสอบนี้เป็นค่าของปริมาณการดูดกลืนคลื่นที่ความยาวคลื่นต่างๆ เนื่องจากแต่ละหมู่ฟังก์ชันมีการดูดกลืนพลังงานความยาวคลื่นได้แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าปริมาณการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่ความยาวเลขคลื่น 929 1225 1490 1598 และ 1646 cm^{-1} ซึ่งทั้งหมดเป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ในโครงสร้างทางเคมีของ PEEK ดัง**รูปที่ 54** โดยพบว่า ทุกๆหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากผิวเคลือบที่ผ่านการพ่นเคลือบภายใต้สนามแม่เหล็ก มีลักษณะไม่ต่างจากผิวเคลือบที่เกิดจากการพ่นเคลือบในสภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก จาก**ตารางที่ 9** เป็นการเปรียบเทียบอัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของผิวเคลือบที่ผ่านการพ่นเคลือบที่ไม่อยู่ในสนามแม่เหล็กและผิวเคลือบที่พ่นเคลือบอยู่ในสนามแม่เหล็กที่ 17 มิลลิเทสลา พบว่าอัตราส่วนความสูงของพีคที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพ่นเคลือบชิ้นงานในสภาวะที่มีหรือไม่มีสนามแม่เหล็กไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี สมบัติต่างๆในทางเคมียังคงอยู่

งานส่วนที่ 2 การต้านทานต่อการสึกหรอของผิวเคลือบพอลิเมอร์คอมโพสิต

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต (Composite material)

4.1.1 ความหมายและองค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต [42]

วัสดุคอมโพสิต คือ ระบบของวัสดุที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหรือมากกว่า ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยไม่ละลายเข้าหากัน มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เมตริกซ์และสารเสริมแรง

เมตริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่เป็นเฟสหลัก ที่ห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน รวมทั้งป้องกันส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม เมตริกซ์เป็นส่วนที่ต่อเนื่องและทำหน้าที่ถ่ายเทแรงที่ได้รับไปยังส่วนเสริมแรง เมตริกซ์มักจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าส่วนเสริมแรง

สารเสริมแรง (Reinforcement) เป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะได้หลายแบบ เช่น เส้นใยแบบสั้น เส้นใยแบบยาว แบบอนุภาค แบบแผ่น ตัวเติมแบบรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งมีโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงต่างกัน

ข้อดีของวัสดุคอมโพสิต

1. ความแข็งแรงสูง เนื่องจากน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
2. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทำให้มีความเสถียรต่อรูปร่างสูง
4. ต้านทานการสึกหรอได้ดี ช่วยยืดอายุการใช้งาน
5. ทนทานต่อการล้าได้ดี

ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

1. สมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของเส้นใย
2. เชื่อมติดกับวัสดุอื่นยาก
3. การวิเคราะห์สมบัติค่อนข้างยาก
4. โอกาสที่จะนำกลับมาใช้งานใหม่ทำได้ยาก

4.1.2 การยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรง

ในวัสดุคอมโพสิต การยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรงที่บริเวณผิวสัมผัส (Interface) สามารถยึดเกาะด้วยกลไกหลัก 5 กลไก ดังนี้

1. การดูดซับและการเปียก (Adsorption and wetting) เกิดเมื่อพื้นผิว 2 พื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอจะเกิดแรงดูดเชิงกล เช่น การเปียกของของเหลวบนพื้นของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากในระดับจุลภาค ความขรุขระของพื้นผิวจะขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะ ในความเป็นจริงแรงนี้จะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากพื้นผิวของสารเสริมแรงอาจมีการสกปรก หรือเกิดการหดตัวของเมตริกซ์ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรง [43]
2. การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion) การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสมีการแพร่เข้าหากัน โดยความแข็งแรงในการยึดเกาะจะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล การใช้ตัวทำละลายทาที่บริเวณพื้นผิวทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและความสามารถในการแพร่เข้าหากันเพิ่มขึ้น เกิดการพันกันของสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงในการยึดเกาะสูง กลไกการยึดเกาะนี้สามารถเกิดกับสารเสริมแรงที่มีการปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมตริกซ์ ไม่เกิดกับวัสดุคอมโพสิตที่มีพื้นผิวของสารเสริมแรงแข็งที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล [44]
3. แรงดึงดูดของประจุหรือไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) เกิดเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน ความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุ แรงดึงดูดชนิดนี้ไม่ใช่แรงยึดเกาะหลัก แต่เกิดร่วมกับกลไกการยึดเกาะประเภทอื่นช่วยให้เกิดการยึดเกาะดีขึ้น [45]
4. พันธะเคมี (Chemical bonding) เกิดเมื่อสารเสริมแรงที่เติมเข้าไปมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวและเมตริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี ก่อให้เกิดเป็นพันธะเคมีที่เป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ซึ่งความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้น [46]
5. การยึดเกาะทางกล (Mechanical interlocking) เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูป กล่าวคือเมตริกซ์อยู่ในสภาพของไหลสามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระหรือช่องว่างของสารเสริมแรงแล้วแข็งติดอยู่กับพื้นผิวของสารเสริมแรง โดยความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถในการเปียกผิว ความสามารถในการแทรกตัวของเมตริกซ์ และความขรุขระของผิวสารเสริมแรง [47]

4.2 การสึกหรอ

การสึกหรอ เป็นความเสียหายของผิวหรือการแทนที่ของวัสดุจากผิวด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านของวัสดุด้วยการเคลื่อนที่แบบลื่นไถล การหมุน หรือการกระแทก โดยจะเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับอีกผิวหนึ่ง

4.2.1 ประเภทของการสึกหรอ

การสึกหรอสามารถแบ่งกลไกการเกิดการสึกหรอได้ 6 ประเภทหลัก คือ การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบติดกัน (Adhesive wear) การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Erosive wear) การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive wear) การสึกหรอแบบความล้า (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบการสั่น (Fretting wear) [48]

การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบขัดถู เป็นการสึกหรอที่เกิดจากผิวสัมผัสที่แข็งและขรุขระ หรืออนุภาคของแข็ง เช่น หิน อนุภาคโลหะแข็ง ทั้งที่หลุดออกมาจากชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอหรือการกัดกร่อนที่มาจากภายนอก เช่น ฝุ่นละออง มีการเคลื่อนที่หรือหมุนกลิ้งภายใต้แรงกด ผ่านไปบนผิวหน้าวัสดุอีกชิ้นหนึ่ง ทำให้เกิดการเสียดสีและเกิดการเสียหายบนผิววัสดุ ทั้งการแปรรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) และแบบแตกหัก (Fracture) โดยสูญเสียเนื้อวัสดุและเกิดร่องคล้ายรอยตัดบนผิววัสดุ (Cutting) ตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดการสึกหรอแบบขัดถู เช่น เครื่องไถ Scraper blades และ Ball mills

การสึกหรอแบบขัดถูไม่ว่าจะเกิดการการกระทำของเม็ดกริตหรือผิวที่ขรุขระ ก็มีลักษณะคล้ายกับการตัดด้วยเครื่องมือกล กลไกการสึกหรอแบบขัดถู แบ่งเป็น 4 กลไก **[48]** ดังนี้ คือ

<u>1. การตัด</u>

วัสดุที่มีความแข็งหรือผิวที่ขรุขระเคลื่อนที่ไปบนผิวที่มีความอ่อนกว่า วัสดุที่อ่อนกว่าจะเสียรูปและสูญเสียเนื้อออกไปเป็นเศษจากการสึกหรอ (Wear debris) แสดงดัง**รูปที่ 55a)** ในสภาวะที่มีสารหล่อลื่น สารหล่อลื่นจะช่วยลดแรงเสียดทาน ทำให้การสึกหรอในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นมีค่าต่ำกว่าสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น

2. การแตก

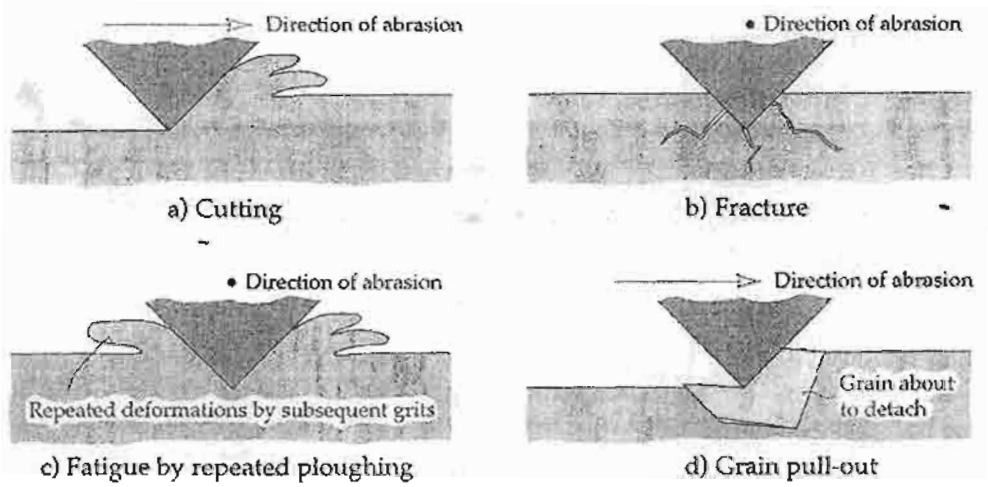
เมื่อวัสดุที่ถูกเสียดสีกันเป็นวัสดุที่มีความเปราะ เช่น เซรามิค ผิวที่สึกหรอจะแสดงลักษณะของการแตกหัก การแตกหักเริ่มจากอนุภาคที่มีความแข็งกดลงมาจนเกิดรูบนวัสดุที่เปราะ แล้วเกิดรอยร้าว (Crack) รอยร้าวจะขยายเข้าหาผิววัสดุ แสดงดังรูปที่ 55b) ทำให้ผิววัสดุบริเวณนั้นหลุดเป็นชิ้น เศษวัสดุที่หลุดออกมาจากการสึกหรอจะมีลักษณะที่แหลมคม เมื่อแรงกดที่กระทำยิ่งมากก็จะยิ่งทำให้การสึกหรอมาก ในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นการแตกหักจะต่ำกว่าสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น เพราะว่าสารหล่อลื่นจะช่วยกระจายแรงที่มากระทำ

3. ความล้าจากการไถลไปมา

เมื่อเม็ดกริตหรือผิวที่ขรุขระกระทำกับวัสดุที่อ่อนตัว (Ductile) มีการเคลื่อนที่ขัดสีกันตลอดเวลา วัสดุนั้นจะเกิดความเครียดซ้ำๆ และผิววัสดุจะถูกทำลายจากความล้า (Fatigue) ในกรณีที่มีเม็ดอนุภาคมากระทำจะก่อให้เกิดร่อง เนื้อชิ้นงานจะเคลื่อนไปอยู่บริเวณด้านข้างของร่อง เป็นการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) แสดงดังรูปที่ 55c)

4. เกรนหลุดออก

การสึกหรอจากการหลุดออกของเกรนเมื่อมีเม็ดกริตหรือผิวหยาบที่มีแรงกดเคลื่อนที่ผ่าน พบได้ในวัสดุพวกเซรามิค กลไกนี้จะรุนแรงถ้าแรงยึดเกาะระหว่างเกรนไม่มาก แต่ขนาดของเกรนใหญ่ การหลุดจะเป็นไปได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 55 d)

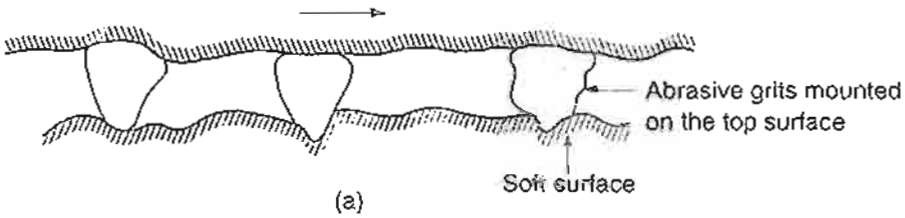


รูปที่ 55 กลไกการสึกหรอแบบขัดถู [48]

รูปแบบของการสึกหรอแบบขัดถู แบ่งเป็น 2 แบบ [49] คือ

1. Two-body abrasive wear

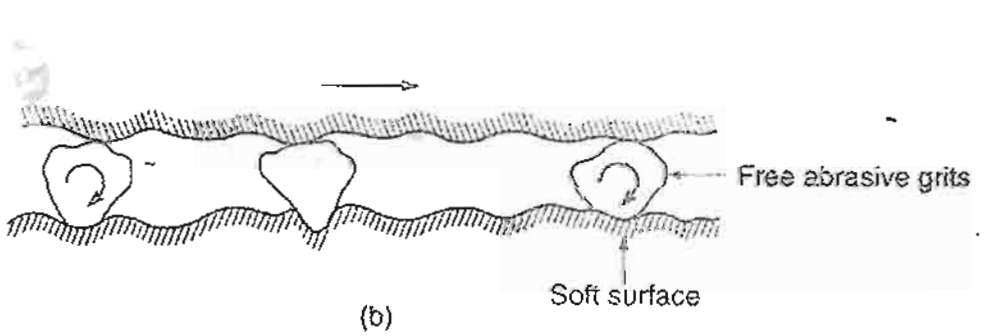
การสึกหรอแบบ Two-body abrasive คือการที่ผิววัสดุที่ขรุขระสองผิวเคลื่อนที่เสียดสีกัน ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถู ตัวอย่างของ Two-body abrasives wear ที่พบบ่อย คือ การกลึงหรือไสวัสดุ การเจียรนัย การขัดผิววัสดุด้วยกระดาษทราย การสึกหรอแบบ Two-body abrasive แสดงดัง**รูปที่ 56**



รูปที่ 56 การเกิดการสึกหรอแบบ Two-body abrasive [49]

2. Three-body abrasive wear

ลักษณะการสึกหรอแบบ Three-body abrasive คือการที่มีอนุภาคของแข็ง หรือเศษจากการสึกหรอ (Wear debris) ถูกกักอยู่ระหว่างผิวของวัสดุ 2 ผิวโดยอนุภาคเหล่านั้นเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การเคลื่อนที่อาจเป็นการไถลหรือหมุนกลิ้งไปบนผิวหน้าวัสดุก็ได้ แสดงดัง**รูปที่ 57** ซึ่งการสึกหรอแบบ Three-body abrasive wear อาจจะช้ากว่าแบบ Two-body abrasive wear ได้ถึง 10 เท่า

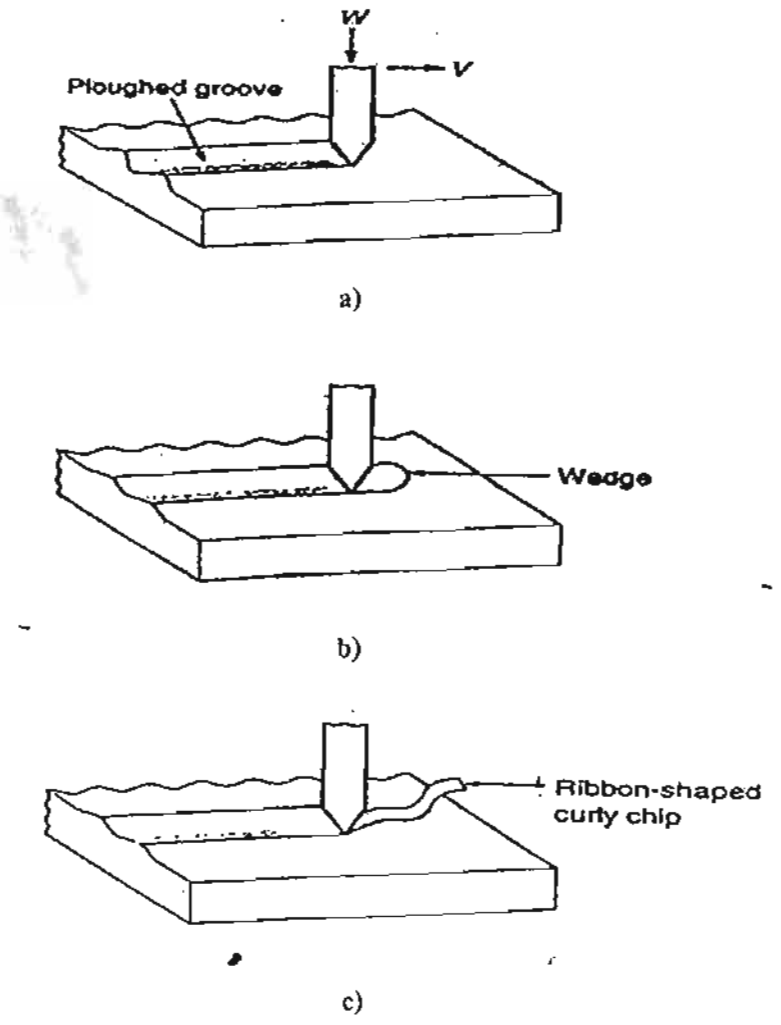


รูปที่ 57 การเกิดการสึกหรอแบบ Three-body abrasive [49]

การที่วัสดุเกิดการสึกหรอแบบขัดถูจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการแปรรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) และแบบแตกหัก (Fracture) อธิบายได้ดังนี้

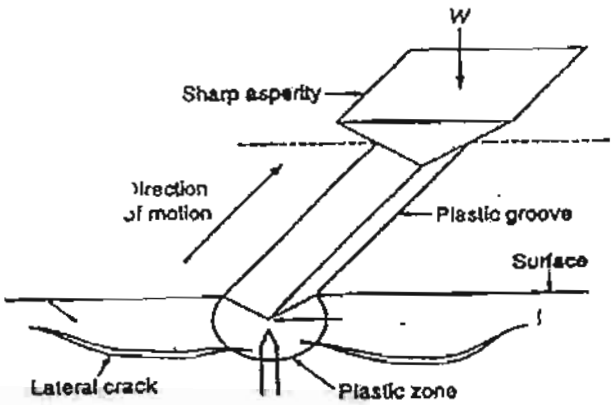
การสึกหรอแบบการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) เป็นการสึกหรอในลักษณะที่มักเกิดในวัสดุประเภท โลหะ พอลิเมอร์ หรือวัสดุผสม ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นดี (Ductile) การเกิดการสึกหรอในลักษณะนี้แบ่งตามความรุนแรงได้ 3 แบบ [50] แสดงดังรูปที่ 58 คือ

1. Ploughing เป็นการสึกหรอโดยไม่สูญเสียเนื้อวัสดุ แต่ให้แรงกระทำบนผิววัสดุจนเกิดการผิดรูปบนผิววัสดุ (ดังรูปที่ 58a)
2. Wedge เป็นการสึกหรอแบบที่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุไปเพียงเล็กน้อยและยังคงเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกบนผิววัสดุขึ้นด้วย (ดังรูปที่ 58b)
3. Cutting เป็นการสึกหรอในแบบที่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุไปมากที่สุด โดยเนื้อวัสดุที่หลุดออกมาจะมีรูปร่างลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon shaped) (ดังรูปที่ 58c)



รูปที่ 58 ลักษณะการสึกหรอแบบ a) Ploughing b) Wedge c) Cutting [50]

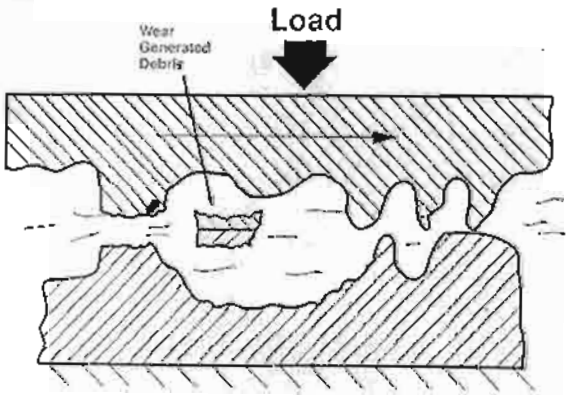
การสึกหรอแบบแตกหัก (Fracture) เป็นการสึกหรอที่มักจะเกิดกับวัสดุประเภทเซรามิค ที่มีสมบัติแข็งเปราะ (Brittle) และมีช่วงการแปรรูปแบบพลาสติกน้อยมาก เมื่อให้แรงกระทำกับวัสดุจำพวกนี้จนมากพอวัสดุจะเกิดการแตกหักออก กลไกในการแตกหักเกิดขึ้นเมื่อให้แรงกระทำบนผิววัสดุแล้วเคลื่อนที่ผ่านไป วัสดุที่รับแรงมากพอจะมีรอยร้าว (Crack) เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ต่อมาวัสดุจะเกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณขนานกับผิววัสดุลงไปในเนื้อวัสดุเรียกว่า Lateral crack ซึ่งจะเคลื่อนที่ออกสู่บริเวณผิวของวัสดุจนทำให้วัสดุบริเวณนั้นหลุดออกหรือแตกออก แสดงดัง**รูปที่ 59**



รูปที่ 59 กลไกการเกิดการสึกหรอแบบแตกหัก [49]

การสึกหรอแบบติดกัน (Adhesive wear) [49]

การสึกหรอแบบติดกัน จะเกิดเมื่อผิวหน้าของวัสดุสองชิ้นที่มีความขรุขระเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน และมีแรงกดกระทำกับวัสดุทั้งสองชิ้น ทำให้บริเวณจุดสัมผัสได้รับแรงกระทำสูง และเกิดการยึดติดของผิววัสดุทั้งสอง โดยการติดกันจะเกิดจากส่วนปลายยอดสัมผัสกับผิวหน้า เมื่อวัสดุทั้งสองชิ้นเคลื่อนที่ผ่านกัน ทำให้เกิดการเฉือนของผิววัสดุบริเวณที่สัมผัสกัน ทำให้มีการฉีกขาดจากผิวหน้าของวัสดุหนึ่งเกิดการเคลื่อนย้ายไปติดกับอีกผิวหนึ่ง และหลุดออกมาเป็นเศษการสึกหรอแสดงดัง**รูปที่ 60**



รูปที่ 60 การเกิดการสึกหรอแบบติดกันของวัสดุ [51]

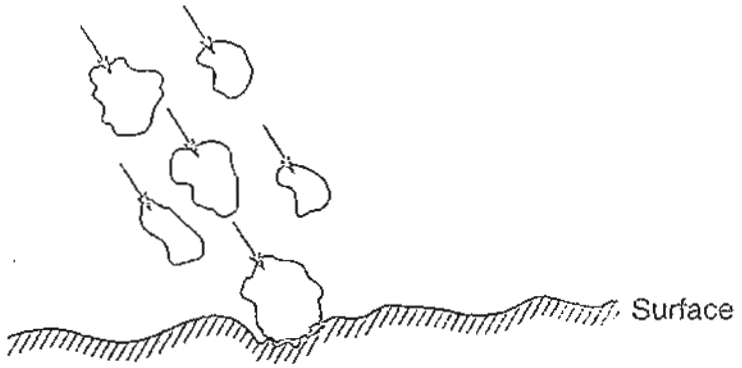
การสึกหรอแบบติดกันมักเกิดในสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น (Non lubricating) แต่ในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นก็สามารถเกิดได้เช่นกัน แต่การสึกหรอจะไม่รุนแรงเท่าสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น เนื่องจากสารหล่อลื่น เช่น Lubricating oils เป็นสารอินทรีย์ที่มีขั้ว จะถูกดูดซับไว้บนผิวหน้าของวัสดุ ทำให้ช่วยลดความเสียดทานและการยึดติดกันระหว่างผิวหน้าวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกัน ตัวอย่างการเกิดการสึกหรอแบบติดกัน เช่น เจอร์นัลแบริ่ง ซึ่งเมื่อเกิดการสึกหรอชิ้นส่วนวงนอกจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากขึ้น (Clearance ของแบริ่งมากขึ้น)

การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Erosive wear) [49]

การสึกหรอแบบกัดเซาะ เป็นการสึกหรอที่เกิดจากอนุภาคของแข็งหรือของเหลวพุ่งเข้ากระแทกกับผิววัสดุ แล้วเคลื่อนที่เสียดสีไปบนผิวของวัสดุ กลไกการสึกหรอแบบกัดเซาะนั้นมีโอกาสเกิดได้จากหลายกลไก โดยมีปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวควบคุมแต่ละกลไกคือ มุมตกกระทบที่อนุภาคกระทำต่อชิ้นงาน ความเร็วในการตกกระทบ และขนาดอนุภาคตกกระทบ

การสึกหรอแบบกัดเซาะแบ่งตามลักษณะอนุภาคที่ตกกระทบ ดังนี้

1. <u>การสึกหรอแบบกัดเซาะโดยอนุภาคของแข็ง (Solid particle erosion)</u> เป็นการตกกระทบของอนุภาคของแข็งบนผิววัสดุจนเกิดการสึกหรอ การสึกหรอในลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่ตกกระทบ ความเร็วของอนุภาค ขนาดอนุภาคตกกระทบ และมุมตกกระทบ (ดังรูปที่ 61)
2. <u>การสึกหรอแบบกัดเซาะโดยของเหลว (Liquid impingement erosion)</u> เป็นการสึกหรอเนื่องจากการหยดของของเหลวที่มีความเร็วสูงตกกระทบบนผิววัสดุ ซึ่งจะเกิดความดันสูงจนเกินจุด ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) ของวัสดุ และตกกระทบซ้ำๆจนเกิดการสึกหรอ (บางครั้งเรียก Pitting) เช่น การสึกหรอจากการกระทบของฝนกับเครื่องบิน
3. <u>การสึกหรอแบบกัดเซาะโดยการแตกออกของฟองอากาศ (Cavitation erosion)</u> เกิดจากการระเบิดของฟองอากาศในของเหลว จนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของเหลวเคลื่อนเข้ากระทบผิววัสดุทำให้เกิดการแปรรูปแบบถาวร (Plastic deformation) หรือการแปรรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) การเปลี่ยนรูปทั้งสองแบบนี้ จะก่อให้เกิดการสึกหรอ เช่น การสึกหรอของใบพัดเรือ



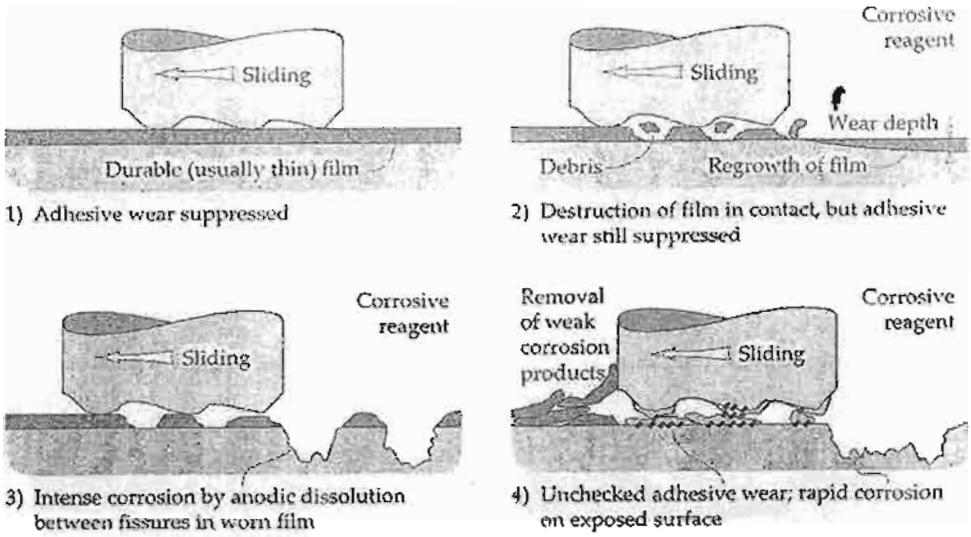
รูปที่ 61 การเกิดการสึกหรอแบบกัดเซาะโดยอนุภาคของแข็ง [49]

การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Corrosive wear)

การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Corrosive wear) เกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นและไม่มีสารหล่อลื่น เป็นการสึกหรอที่เกิดร่วมกันระหว่างการสึกหรอทางเคมี (Chemical wear) กับการสึกหรอทางกล (Mechanical wear) เนื่องจากการสึกหรอเกิดร่วมกับปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิววัสดุที่สึกหรอกับตัวกลางที่กัดกร่อน ซึ่งอาจเป็นสารเคมีต่างๆ สารหล่อลื่น หรืออากาศ เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วจะเกิดการสึกหรอด้วยอัตราที่รวดเร็วจากการเคลื่อนผ่านหรือขูดผิววัสดุออกจนเกิดความเสียหายของผิววัสดุ เช่น การสึกหรอจากการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมน้ำมัน หรือ อุปกรณ์ที่สัมผัสกับน้ำทะเล

กระบวนการเกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อน แสดงดัง**รูปที่ 62** อธิบายได้ดังนี้

1) การสร้างฟิล์มหล่อลื่น (Lubricating film) ซึ่งช่วยชะลอการกัดกร่อนและการสึกหรอของวัสดุ
2) ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีอายุสั้นและอ่อนแอในสภาวะที่มีการสัมผัสและการเคลื่อนที่ผ่านกันของวัสดุ ทำให้อัตราการสึกหรอสูงขึ้น มีการเกิดขึ้นและการถูกทำลายของฟิล์มเป็นระยะๆ
3) ออกไซด์ฟิล์มของโลหะเกิดการสึกหรอ เช่น เกิด Pitting และ Galvanic coupling ระหว่างฟิล์มที่เหลือกับชิ้นวัสดุ ทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณที่สึกหรอบนผิววัสดุอย่างรวดเร็ว
4) เกิดการกัดกร่อนขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีควบคู่ไปกับการสึกหรอ

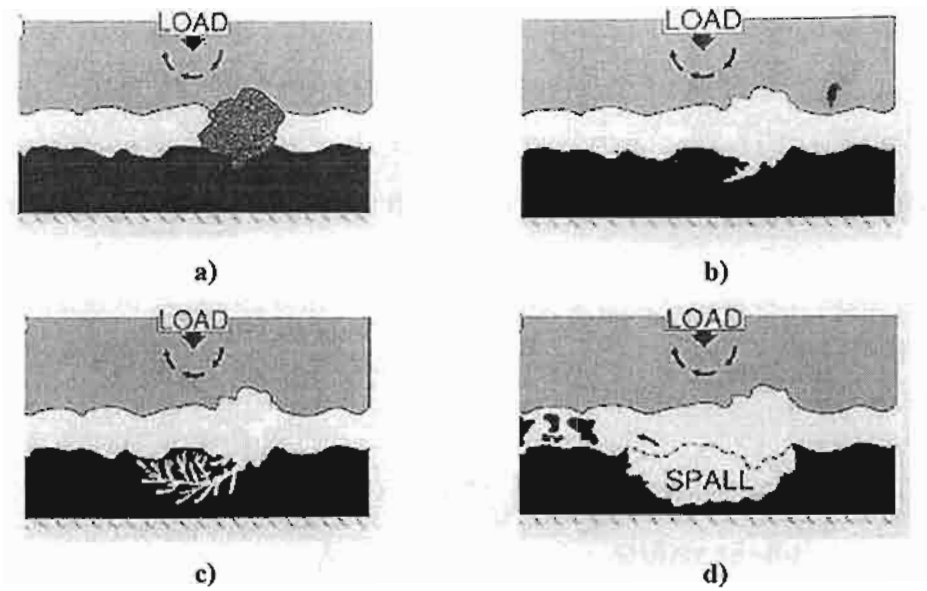


รูปที่ 62 การเกิดการสึกหรอแบบการกัดกร่อน **[48]**

การสึกหรอจากความล้า (Fatigue wear) [49]

การสึกหรอจากความล้าเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการให้แรงกระทำอยู่ตลอดเวลาบนผิววัสดุบริเวณที่มีอนุภาคกักขังอยู่จนเกิดความเค้นสะสมบนผิววัสดุ เมื่อความเค้นมีค่าสูงพอจะเกิดรอยร้าวขยายตัวไปตาม Slip planes เมื่อได้รับแรงซ้ำๆ รอยร้าวจะขยายใหญ่ขึ้นจนเชื่อมกับรอยร้าวอีกอันหนึ่ง และทำให้ผิวบริเวณนั้นแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ และหลุดออกไปออกไป การสึกหรอจากความล้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความล้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rolling fatigue) เกิดโดยไม่มีการสัมผัสกันของวัสดุ เนื่องจากมีสารหล่อลื่นคั่น แต่ความเค้นจะส่งผ่านฟิล์มบางของสารหล่อลื่น ทำให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการแตกหัก และความล้าแบบมีความเค้นสะสม (Static fatigue) เป็นการสึกหรอที่เกิดในวัสดุประเภทเซรามิก ความล้าชนิดนี้ขึ้นอยู่กับการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอน้ำกับความเค้นที่ผิว ส่วนปลายของรอยแตกจะเป็นจุดที่มีความเค้นสูงสุดและอาจทำให้เกิดการเติบโตของรอยแตกและทำให้เกิดการแตกหักได้

จากรูปที่ 63 แสดงกลไกการสึกหรอจากความล้า โดยวัสดุได้รับน้ำหนักซ้ำๆ จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่กักขังอยู่บนผิววัสดุ ดังรูปที่ 63a) บริเวณที่รับน้ำหนักผิวจะแน่นขึ้น และผิวจะเริ่มเกิดรอยแตก ดังรูปที่ 63b) เมื่อได้รับน้ำหนักซ้ำหลายรอบ รอยแตกจะเริ่มขยายตัวไปตามระนาบที่ไม่แข็งแรง เช่น ขยายตัวไปตาม Slip plane ดังรูปที่ 63c) เกิดความเสียหายบริเวณผิวที่แตกโดยแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ และหลุดออกผิว ดังรูปที่ 63d)



รูปที่ 63 การเกิดการสึกหรอจากความล้า **[49]**

การสึกหรอแบบการสั่น (Fretting wear)

การสึกหรอแบบสั่น คือ ความเสียหายของผิววัสดุทั้งสองที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน โดยเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระยะสั้นๆ รวมทั้งมีการสั่นสะเทือนในขณะเคลื่อนที่ การสึกหรอแบบการสั่นมักเกิดบริเวณที่เป็นรอยต่อ เช่นหมุดยึด สลัก ลวดยึด ที่ทำหน้าที่ยึดชิ้นส่วนอื่นให้อยู่กับที่ แต่ในการใช้งานจะมีการเคลื่อนที่เนื่องจากการสั่นสะเทือน

กลไกการเกิดการสึกหรอแบบการสั่น จะเป็นการสึกหรอแบบติดกันเกิดร่วมกับการสึกหรอแบบความล้า โดยกลไกการเกิดอธิบายได้ดังรูปที่ 64 **[52]**

1. เกิดการติดกัน (Initial adhesion)

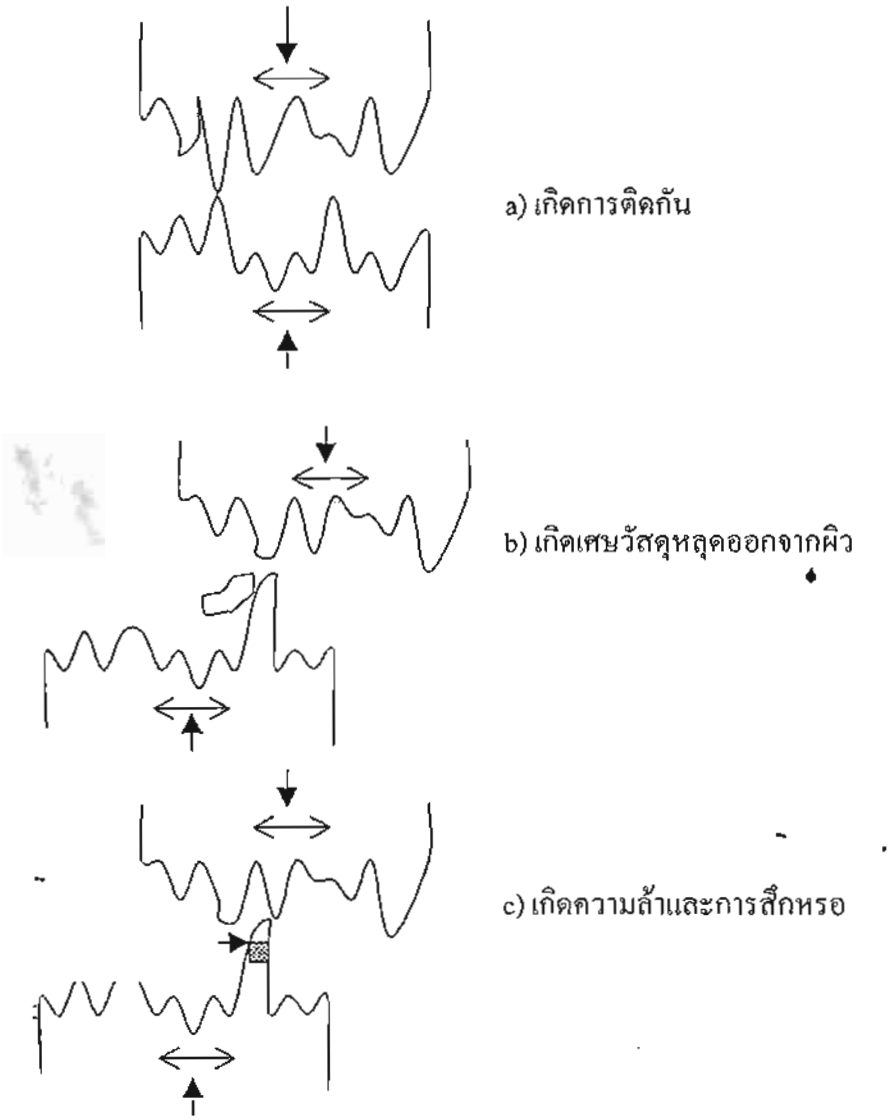
ผิวหน้าวัสดุเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันและมีการสั่นสะเทือน เมื่อมีแรงกดมากระทำจะทำให้ผิวที่สัมผัสกันบางจุดเชื่อมติดกัน เช่น หมุดยึด การเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันทำให้เกิดการเฉือนมีความร้อนเกิดขึ้น และเกิดการแปรรูปแบบพลาสติก แรงเฉือนจากการเสียดสีไปมาทำให้เกิดการฉีกขาดของผิววัสดุหนึ่งไปติดยังอีกผิววัสดุหนึ่ง ดังรูปที่ 64a)

2. เกิดเศษวัสดุหลุดออกจากผิว (Generation of debris)

ผิวหน้าที่ติดไปกับอีกผิวหนึ่งเคลื่อนที่ชนผิวที่ขรุขระบริเวณใกล้เคียง เมื่อรวมกับความล้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เศษวัสดุหลุดออกจากผิวหน้า แสดงดังรูปที่ 64b)

3. เกิดความล้าและการสึกหรอ (Fatigue and wear)

การเคลื่อนที่กลับไปมาของการสึกหรอแบบเฟรตติ้งทำให้เกิดความเค้นแบบซ้ำๆ (Cyclic stress) และการสัมผัสกันของผิวหน้าทำให้เกิดการแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue crack) แสดงดังรูปที่ 65c) โดยเกิดจากความเค้นตกค้างที่ผิวของวัสดุและทำให้เกิดการก่อตัวของรอยร้าวและขยายใหญ่ขึ้นจนผิวส่วนนั้นหลุดออกไป



รูปที่ 64 การเกิดการสึกหรอแบบการสั่น [52]