



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการปรับปรุงผิวพลาสติกโดยเทคนิคลำพลาสมาที่ความดัน
บรรยากาศสำหรับประยุกต์เป็นวัสดุตกแต่ง

Surface Modification of Plastics using Atmospheric Pressure
Plasma Jet Technique for Decorative Applications

ธันัสถา รัตน์ะ

อรรถพล เขยศุภเกตุ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2560A10802200

สัญญาเลขที่ 63/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการปรับปรุงผิวพลาสติกโดยเทคนิคลำพลาสมาที่ความดัน
บรรยากาศสำหรับประยุกต์เป็นวัสดุตกแต่ง

Surface Modification of Plastics using Atmospheric Pressure
Plasma Jet Technique for Decorative Applications

ธันัสถา รัตน์ะ

อรรถพล เขยศุกร์เกตุ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 63/2560

ชื่อโครงการ:	การปรับปรุงผิวพลาสติกโดยเทคนิคลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ สำหรับประยุกต์เป็นวัสดุตกแต่ง	
นักวิจัย:	ดร.ธนัสถา รัตนะ	หัวหน้าโครงการ
	ดร.อรรณพผล เชยศุภเกตุ	นักวิจัย
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยบูรพา	
คณะ:	วิทยาศาสตร์	ภาควิชา: ฟิสิกส์

บทคัดย่อ

ผิวของพลาสติก (polypropylene, polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene) ถูกปรับปรุงผิวด้วยลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นผิวรองรับสำหรับการเคลือบ อลูมิเนียม ผิวของผิวของพลาสติกถูกปรับปรุงผิวภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา 2 เงื่อนไข ดังนี้ (1) พลาสมาของ อาร์กอนที่เวลาต่าง ๆ กัน (0-3 นาที) และ (2) แก๊สชนิดต่าง ๆ (แก๊สอาร์กอนและแก๊สอาร์กอนผสม ออกซิเจน) ลักษณะเฉพาะของผิวผิวของพลาสติกที่ถูกปรับปรุงผิวถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรง อะตอม เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีและเครื่องวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ การยึดเกาะของฟิล์มอลูมิเนียมบนผิวของพลาสติกถูกศึกษาด้วยวิธี cross-cut ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผิวของพลาสติกที่ถูกปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น C-O, C=O and O-C=O ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเพิ่มสมบัติการชอบน้ำของผิวพลาสติกและปรับปรุงการยึดเกาะของฟิล์มอลูมิเนียมบนผิวของพลาสติก นอกจากนี้ลักษณะทางสัญญาณและความขรุขระที่ผิวของพลาสติกเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเวลาในการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การปรับปรุงผิว/ลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ/พลาสติก

Research Title: Surface Modification of Plastics using Atmospheric Pressure Plasma Jet Technique for Decorative Applications
Researcher: Dr.Tanattha Rattana
Dr.Attapol Choeysuppaket
University: Burapha University
Faculty: Sciences **Department:** Physics

Abstract

The surface of plastics (polypropylene, polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene) was treated by an atmospheric pressure plasma jet for using as a substrate in aluminium coating application. The plastic surfaces were treated under two studied conditions including (1) Argon plasma at different times (0-3 min) and (2) different gases (Argon and Argon/O₂ gas mixture). The treated surface characteristics were investigated by atomic force microscopy (AFM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and contact angle measurement. The adhesion of aluminium film on plastic surfaces was studied by a cross-cut test. The results showed that the oxygen-containing functional groups such as C–O, C=O and O–C=O on the plastic surface were observed after plasma treatment. These functional groups can enhance the hydrophilic property and improve the adhesion of aluminium film deposited on plastic surface. In addition, the morphology and roughness of plastic surface were dramatically changed as a function of plasma treatment time.

Keywords: Surface modification/Atmospheric pressure plasma jet/Plastics

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
ABSTRACT	iii
สารบัญเรื่อง	iv
สารบัญตาราง	vi
สารบัญภาพ	vii
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พลาสมา	4
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพลาสมา	4
2.3 ประเภทของพลาสมา	5
2.4 การเกิดพลาสมา	6
2.5 ระบบผลิตพลาสมา	8
2.6 มุมสัมผัสหยดน้ำ	10
2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	13
3.2 การเตรียมผิวชิ้นงานพลาสติก	14
3.3 ขั้นตอนการผลิตลำพลาสมาเจ็ทที่ความดันบรรยากาศ	14
3.4 การทดลองปรับปรุงผิวของชิ้นงานพลาสติกโดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ	15
3.5 การทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนผิวพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิว	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)	18
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polypropylene (PP)	18
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polycarbonate (PC)	20
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	22
4.2 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)	24
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polypropylene (PP)	24
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polycarbonate (PC)	26
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	28
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ผลผลิต	44
ประวัตินักวิจัย	45

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 เนื้อหาของการศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิว	17
3-2 เนื้อหาของการศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกภายใต้เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว	17
3-3 เนื้อหาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม	18
4-1 หมู่ฟังก์ชันเทียบกับเลขคลื่นของแผ่นพลาสติก PP	21
4-2 หมู่ฟังก์ชันเทียบกับเลขคลื่นของแผ่นพลาสติก PC	23
4-3 หมู่ฟังก์ชันเทียบกับเลขคลื่นของแผ่นพลาสติก ABS	25
4-4 ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PP ที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา	37
4-5 ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PC ที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา	38
4-6 ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก ABS ที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา	38

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แสดงสถานะของพลาสติกมาเปรียบเทียบกับแก๊ส	4
2-2 แสดงสถานะทั้ง 4 สถานะของสสาร	5
2-3 หลักการผลิตพลาสติกแบบ DBD	9
2-4 หลักการผลิตพลาสติกแบบ APPJ	9
2-5 แสดงมุมสัมผัสของน้ำเมื่อสัมผัสกับผิววัสดุชนิดที่ไม่ชอบน้ำและชนิดที่ชอบ	10
3-1 กรอบแนวคิดการวิจัย	14
3-2 ระบบลำพลาสติกที่ความดันบรรยากาศที่ใช้ในงานวิจัย	16
3-3 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบโคสปีดเตอร์ริง	18
4-1 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PP ก่อนปรับปรุงผิวด้วยพลาสติกมา (no treatment) และปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ	20
4-2 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PP หลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว	21
4-3 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PC ก่อนปรับปรุงผิวด้วยพลาสติกมา (no treatment) และหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ	22
4-4 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PC หลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว	23
4-5 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก ABS ก่อนปรับปรุงผิวด้วยพลาสติกมา (no treatment) และหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ	24
4-6 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก ABS หลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว	25
4-7 สเปกตรัม XPS ของผิวพลาสติก PP ก่อนและหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ	27
4-8 สเปกตรัม XPS ของผิวพลาสติก PC ก่อนและหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ	28
4-9 สเปกตรัม XPS ของผิวพลาสติก ABS ก่อนและหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ	30
4-10 มุมสัมผัสหยดน้ำของพลาสติก PP	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-11	ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติก PP ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข	32
4-12	ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติก PC ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข	32
4-13	ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติก ABS ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข	33
4-14	ลักษณะพื้นผิวของผิวพลาสติก PP จากเครื่อง AFM ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ	34
4-15	ลักษณะพื้นผิวของผิวพลาสติก PC จากเครื่อง AFM ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ	35
4-16	ลักษณะพื้นผิวของผิวพลาสติก ABS จากเครื่อง AFM ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ	36
4-17	ผลการทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียม	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้หลายแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย เป็นฉนวนไฟฟ้าและทนความร้อนได้ดี ซึ่งในประเทศไทยได้มีการนำพลาสติกไปใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุและผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องดื่มและอาหาร อุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น โดยกระบวนการนำวัสดุพลาสติกไปใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวในบางกรณี จะมีขั้นตอนการเคลือบผิวพลาสติกด้วยชั้นฟิล์มประเภทต่าง ๆ ได้แก่ สีเคลือบ โพลีเมอร์ และฟิล์มบางโลหะ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ของพลาสติกให้ดีขึ้น เช่น ทำให้พลาสติกมีความคงทนขึ้น ป้องกันการกัดกร่อนของผิวพลาสติกหรือเพิ่มความเงางามและสวยงามให้แก่ผิวพลาสติก รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับตัวผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยเช่นกัน แต่ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ของการเคลือบฟิล์มบนผิวพลาสติกคือ การยึดเกาะของชั้นฟิล์มเคลือบกับผิวพลาสติกจะไม่ดี เกิดการหลุดร่อนได้ง่ายเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีผิวสัมผัสลื่น มีแรงตึงผิวที่ต่ำ ดังนั้นก่อนกระบวนการเคลือบผิวพลาสติกจะต้องมีการปรับปรุงผิวพลาสติกเพื่อให้ชั้นฟิล์มเคลือบมีการยึดเกาะที่ดีกับผิวพลาสติก ซึ่งกระบวนการปรับปรุงผิวก่อนการเคลือบฟิล์มมีหลายวิธี เช่น การปรับปรุงผิวด้วยวิธีทางเคมี เช่น การใช้สารเคมีในการกัดผิว การปรับปรุงผิวด้วยแสงเหนือม่วงและไอออน การปรับปรุงผิวโดยใช้พลาสมาที่สภาวะสุญญากาศและที่ความดันบรรยากาศ เป็นต้น (Tsuchiya, Akutu, & Iwata, 1998; Delplanque et al., 2014; Källrot, Edlund, & Albertsson, 2006; Sanchis, Fenollar, García, Sánchez, & Balart, 2008) โดยวิธีการปรับปรุงผิวโดยใช้พลาสมาที่ความดันบรรยากาศเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจเพราะไม่มีสารเคมีเหลือจากกระบวนการปรับปรุงผิว อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับการปรับปรุงผิวโดยใช้พลาสมาที่สภาวะสุญญากาศ เพราะไม่จำเป็นต้องใช้ภาชนะสุญญากาศ โดยตัวอย่างของกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศมีหลายวิธี เช่น วิธีโคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge) วิธีไดอิเล็กทริกแบร์เรียร์ดิสชาร์จ (dielectric barrier discharge) และวิธีลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure plasma jet) (Yong, Masahisa, & Chikahisa, 2006; Alenka, Miran, & Simona, 2011; Kostov, Nishime, Castro, Toth, & Hein, 2014; Niu, Liu, & Wu, 2011) โดยวิธีลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศมีข้อดีหลายประการคือ ระบบมีขนาดไม่ใหญ่และสามารถประยุกต์ใช้สำหรับปรับปรุงผิวที่ลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นจากรายละเอียดในข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษากระบวนการปรับปรุงผิวของพลาสติกก่อนการเคลือบฟิล์มโลหะ (Metallization) เพื่อความสวยงาม โดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความ

ต้นบรรยากาศ โดยจะศึกษาผลของชนิดของแก๊สและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวที่มีต่อสมบัติของผิวพลาสติก รวมถึงการยึดเกาะของชั้นฟิล์มที่เคลือบเพื่อความสวยงามบนผิวพลาสติกด้วย

คณะผู้วิจัยเชื่อว่าผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาองค์ความรู้ รวมถึงเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการปรับปรุงผิวพลาสติกก่อนการเคลือบเคลือบผิวในเชิงอุตสาหกรรมให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมในประเทศและต่างประเทศต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศสำหรับงานปรับปรุงผิวพลาสติก
2. เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงผิวพลาสติกโดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่มีต่อสมบัติของพื้นผิวพลาสติก
3. เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงผิวพลาสติกโดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่มีต่อการยึดเกาะของชั้นฟิล์มโลหะที่เคลือบเพื่อความสวยงามบนผิวพลาสติก

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กลุ่มเป้าหมายที่จะได้รับประโยชน์จากผลงานวิจัยนี้คือ โรงงานอุตสาหกรรม หรือ หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่มีการเคลือบผิววัสดุพลาสติกในกระบวนการผลิตหรือการวิจัย เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตกแต่งหรือใช้ในงานด้านอื่น ๆ ตลอดจนสถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมพื้นผิววัสดุก่อนกระบวนการเคลือบผิววัสดุ

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในงานเคลือบผิว ประกอบด้วย Polypropylene (PP) Polycarbonate (PC) และ Acrylonitrile Butadiene Styrene (abs) โดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ตัวแปรที่จะศึกษาคือ ชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิวและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิว ส่วนสมบัติทางกายภาพของผิวพลาสติกที่จะศึกษาคือ ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติการชอบน้ำ โดยใช้เทคนิค AFM, FTIR, XPS และ เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle) ตามลำดับ รวมถึงจะนำพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วไปทำการเคลือบด้วยฟิล์มอลูมิเนียมด้วยวิธีสเป็คโตรริง เพื่อศึกษายึดเกาะของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนผิวพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.1 พลาสมา (plasma)

พลาสมา ในทางฟิสิกส์และเคมี (อัจฉราภรณ์ บุญมา, 2556) คือ แก๊สที่มีสภาพเป็นไอออนและมักจะถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้ หมายความว่า จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุล ประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น

พลาสมาจัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (quasineutral) ซึ่งหมายความว่า อิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (collective behavior)

พฤติกรรมร่วมนี้หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุล จะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน

พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าปริมาณสูงแก่แก๊สที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้แก๊สแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด พลาสมามีความแตกต่างจากสถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะแก๊ส โดยมีเงื่อนไข 3 ประการ ซึ่งทำให้พลาสมามีความจำเพาะเจาะจงที่แตกต่างจากสถานะอื่นออกไปดังต่อไปนี้คือ

1. ความยาวคลื่นเดอบาย (Debye's wavelength, λ_D) มีค่าน้อยกว่าขนาดของพลาสมา (L) มาก ๆ

$$\lambda_D \ll L$$

2. โดยที่ λ_D คือความยาวคลื่นเดอบาย และ L คือขนาดพลาสมา จำนวนอนุภาคที่อยู่ภายในทรงกลมของเดอบาย (Debye's sphere) มีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ

$$N_D \gg 1$$

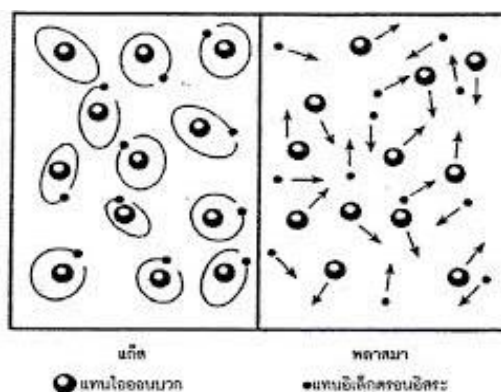
3. โดยที่ N_D คือ จำนวนอนุภาคที่อยู่ภายในทรงกลมของเดอบาย ความถี่ของการชนอย่างอิสระระหว่างอนุภาคกับอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งในหน่วยเวลามีค่ามากกว่า 1

$$\omega_p \tau > 1$$

โดยที่ ω_p คือ ความถี่ของการสั่นของพลาสมาและ τ คือ เวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของอะตอมหรืออนุภาคอิสระ





2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพลาสมา

พลาสมา คือ สภาวะที่แก๊สเกิดการแตกตัว(ionized) ประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคของแก๊สดังภาพที่ 2-1 ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ ทำให้โดยรวมแล้วพลาสมายังคงสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งคำนี้ถูกบัญญัติโดย แลงมัวร์ (Irving Langmuir) ในปี 1928 ใช้เพื่อบรรยายสภาพแก๊สที่ถูกทำเป็นไอออนในการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า (อัจฉราภรณ์ บุญมา, 2556)



ภาพที่ 2-1 แสดงสถานะของพลาสมาเปรียบเทียบกับแก๊ส (รังสรรค์ ศรีสาคร, 2543)

ดังนั้นจึงถือได้ว่าพลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน หากพิจารณาช่วงเปลี่ยนสถานะ ของแข็ง- ของเหลว - แก๊ส (solid - liquid - gas) ถ้าเพิ่มอุณหภูมิ (หรือให้พลังงานจลน์แก่อนุภาคของแก๊ส) ให้แกแก๊สต่อไปเรื่อย ๆ เช่น เมื่อเพื่ออุณหภูมิถึง 20,000 เคลวิน (K) ก็จะได้พลาสมาของแก๊สนั้น ดังแสดงในภาพที่ 2-2 (อุณหภูมิอาจต่ำกว่าก็ได้ แล้วแต่กลไกการทำให้เป็นไอออนของแก๊ส)

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Examples Ice H_2O	Examples Water H_2O	Examples Steam H_2O	Examples Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ > 10 electron Volts
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

ภาพที่ 2-2 แสดงสถานะทั้ง 4 สถานะของสสาร (กริพัฒน์ วิลัยทอง, 2549)

พลาสมามีลักษณะพิเศษที่น่าสนใจเพราะว่าแรงไฟฟ้าถือเป็นแรงชนิดไกล (long range force) และอนุภาคของพลาสมาทุกตัวกระทำต่ออนุภาคข้างเคียงกันและกัน เรียกว่าเป็นพฤติกรรมรวม (collective behavior) พฤติกรรมรวมนี้หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาซึ่งไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้นแต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัว ที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าพฤติกรรมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมาร่วมกัน พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่แก๊สที่เป็น เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมกระบวนการนี้ เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้แก๊สแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด (ธีรบรรณ บุญญวรรณ และสมฤทัย ตันมา, 2546)

2.3 ประเภทของพลาสมา

พลาสมาสามารถแบ่งออกเป็นพลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (nature plasma) เช่น ดาวหรือ interstellar matter และพลาสมาที่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory plasma) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ได้แก่พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาฟิวชัน (fusion plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือแก๊สดีสชาร์จ (gas discharge)

โดยทั่วไปนิยมแบ่งแก๊สดีสชาร์จออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมา ร้อน (hot plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาเย็น (cold plasma) ดังนี้

2.3.1 พลาสมาร้อน

พลาสมาร้อน (hot plasma หรือ thermal equilibrium) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบ อาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งจากการเกิดกระบวนการดิสชาร์จนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงจนกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สด้วยความถี่สูงและรุนแรง เกิดการปล่อยประจุในลักษณะของสปาร์ค (spark) ของประจุเป็นเส้นเล็ก ๆ จำนวนมาก (filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดันและพลังงานสูง โดยพลาสมาร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้ความดันบรรยากาศหรือมากกว่านั้น ใช้ในการผลิตพลาสมาสเปรย์ หรือใช้ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ

2.3.2 พลาสมาเย็น

พลาสมาเย็น (cold plasma หรือ non-equilibrium plasma) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharges) เป็นการสร้างพลาสมาที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อนเป็นการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลงโดยเกิดที่ประมาณ 10^{-3} – 10 ทอร์ โดยอุณหภูมิของอนุภาคหนึ่งจะมีค่าต่ำและมักจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงมากเพราะมีอุณหภูมिन้อยจึงถูกเร่งในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่าย การที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจากกระบวนการดิสชาร์จเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้เกิดบางส่วนแตกตัวและกลายเป็นประจุบวก และอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นประจุ อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและลงมาอยู่ในสถานะที่ต่ำลงมาทำให้เกิดแสงสว่างนิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น การกัด (etching) หรือการทำฟิล์มบาง (thin film) เป็นต้น

2.4 การเกิดพลาสมา (occur of plasma)

กระบวนการเกิดพลาสมามีดังนี้

2.4.1 การแตกตัวเป็นไอออน (ionization)

ในการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาในห้องสุญญากาศซึ่งมีแก๊สไหลผ่านในระดับคงที่และความดันต่ำมาก ๆ โมเลกุลหรืออะตอมของแก๊สในสุญญากาศอาศัยการชนกันของอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลหรืออะตอมเป็นสิ่งสำคัญโดยคลื่นวิทยุหรือคลื่นไมโครเวฟทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจนไปชนกับโมเลกุลหรืออะตอม ทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนและเกิดการรบกวนแสงเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาจะได้ชนิดของแก๊สที่มีการเปล่งแสง แสงเหนือม่วง (ultraviolet) ที่เกิดขึ้น ความถี่ในช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่นการรบกวนแสงของแก๊สอาร์กอนให้แสงสีชาวม่วงเงิน ดังสมการการแตกตัวและพลังงานมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3

ionization energy of Argon



2.4.2 การถูกกระตุ้น (excitation)

พลังงานที่ส่งผ่านเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า กระบวนการนี้คือกระบวนการกระตุ้นสถานะของอะตอม ซึ่งแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าพลังงานในการแตกตัวเป็นไอออนดังแสดงในสมการที่ 2



2.4.3 การแยกตัวออก (dissociation)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่แก๊สถูกกระทำโดยศักย์ของคลื่นความถี่วิทยุ เช่น กระบวนการแยกตัวออกของแก๊สออกซิเจนซึ่งสามารถแยกตัวออกได้เป็นออกซิเจน 2 อะตอม ดังสมการที่ 2.5



ผลของการแยกตัวจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี คือ ผลผลิตที่ได้จะมีปฏิกิริยาความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าตอนที่อะตอมยังไม่แตกตัว การแยกตัว (dissociation) อาจเกิดคู่กับการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือไม่ก็ได้ ถ้าเกิดคู่กันจะเรียกว่า dissociative ionization ตัวอย่างแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7



ผลของการรุ่มแสงของแก๊สที่ลดความดันและศักย์ของคลื่นวิทยุที่ถูกกระตุ้นจะสังเกตเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงที่เรียกว่า glow discharge ซึ่งหมายถึงแสงของพลาสมาที่เปล่งออกมาเนื่องจากพลังงานภายนอกที่ทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสถานะกระตุ้น โดยปกติอิเล็กตรอนสามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ ประมาณ 10^{-18} วินาที จากนั้นเวเลนซ์อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความถี่ของแสงในช่วงที่มองเห็น (visible light)

2.4.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (charge exchange)

เป็นการถ่ายเทพะจุกับอะตอมจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากหากเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับอะตอมของธาตุเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9



ในการทำงานเดียวกันจะยากขึ้น แต่ก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้ กรณีเป็นธาตุต่างชนิดกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.10



2.4.5 การถ่ายเทโมเมนตัม (momentum transfer)

เป็นกลไกเบื้องต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของแรงจากการชนของอะตอม กรณีแก๊สที่เป็นกลาง การถ่ายเทโมเมนตัมของอิเล็กตรอนไม่ได้มีความสำคัญมากนักในการเร่งแสง แต่เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดพลาสมาได้ เช่น แก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.11 และ 2.12



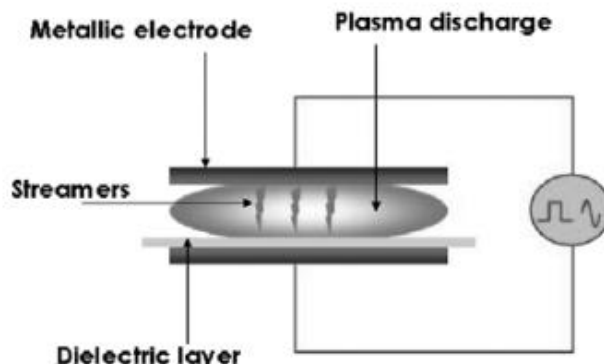
2.5 ระบบผลิตพลาสมา

การผลิตพลาสมาในปัจจุบันยังถูกจำกัดอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นหลักทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านระบบสุญญากาศและระบบการบำรุงรักษาที่สูงมาก การผลิตพลาสมาที่ ความดันบรรยากาศจึงข้ามข้อจำกัดเรื่องสภาวะสุญญากาศออกไปและคาดว่าจะมีส่วนสำคัญที่ช่วยทวีบทบาทของพลาสมาในระดับอุตสาหกรรมได้มากขึ้น (สมศักดิ์ แดงดีบ, 2552) ซึ่งการผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศมี 2 ระบบ คือ

2.5.1 ระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ (Dielectric barrier discharge: DBD)

การสร้างพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์นั้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนใหญ่ ๆ นั่นคือ

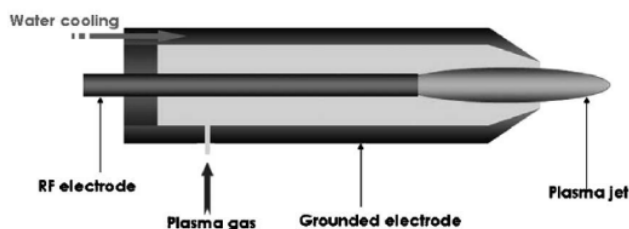
1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงความถี่ปานกลาง 2) ห้องกำเนิดพลาสมา มีข้อได้เปรียบกว่าระบบผลิตพลาสมาทั่วไป นั่นคือ สามารถจุดพลาสมาในความดันบรรยากาศได้และไม่ต้องการ บีมสุญญากาศซึ่งมีราคาแพง จากข้อได้เปรียบที่กล่าวมานั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน ระบบอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี โดยหลักการเบื้องต้นของพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ที่ความดันบรรยากาศ คือใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าจุดพลาสมาโดยขั้วไฟฟ้าจะถูกคั่นหรือปิดคลุม โดยวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อป้องกันการอาร์คของพลาสมาซึ่งจะทำให้วัสดุไดอิเล็กทริกถูกทำลาย ส่วนประกอบสำคัญของระบบผลิตพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์นั้นถูกแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 หลักการผลิตพลาสมาแบบ DBD (Tendero, Tixier, Tristant, Demaison, & Leprince 2006)

2.5.2 ระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบลำพลาสมา (Atmospheric pressure plasma jet: APPJ)

การสร้างพลาสมาแบบพลาสมาเจ็ทจะใช้แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency) การสร้างพลาสมาแบบนี้มีอุปกรณ์มีขนาดเล็ก ($L < 20$ เซนติเมตร) คลื่นวิทยุใช้พลังงานต่ำ จากภาพที่ 2-4 จะเห็นได้ว่า ส่วนประกอบสำคัญคือ อิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งมีอยู่ 2 ส่วน คือ อิเล็กโทรดส่วนแรกต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF electrode) และอีกส่วนหนึ่งต่อเข้ากับสายดิน (Grounded electrode) คลื่นวิทยุที่ใช้มีความต่างศักย์ระหว่าง 100 – 150 โวลต์ แก๊สที่ถูกไอออไนซ์จะวิ่งผ่านหัวฉีด ตั้งแต่แก๊สมีความเร็วประมาณ 12 เมตรต่อวินาที ซึ่งพลังงานหัวฉีดที่ต่ำแบบนี้จะช่วยให้ประจุพลาสมาที่ได้มีความเสถียรและป้องกันการเกิดอาร์คพลาสมา (Lim, Leed, Rhee, Leong, & Chen, 2015)



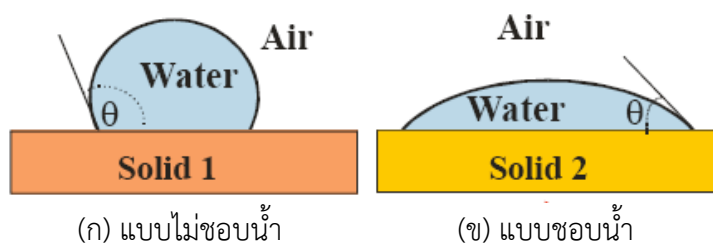
ภาพที่ 2-4 หลักการผลิตพลาสมาแบบ APPJ (Tendero et al., 2006)

แก๊สที่สามารถนำมาจุดพลาสมาในความดันบรรยากาศนั้นก็ได้หลายชนิด โดยมักใช้แก๊สอาร์กอน หรือฮีเลียมเป็นแก๊สหลัก เพื่อทำหน้าที่เป็นแก๊สนำพาเพื่อช่วยในการจุดพลาสมาและทำให้พลาสมานั้นมีความสม่ำเสมอ โดยแก๊สแต่ละชนิดจะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมการจ่ายและผสมแก๊สก่อนที่จะถูกส่งเข้าสู่ห้องกำเนิดพลาสมา

2.6 มุมสัมผัสหยดน้ำ

ในการพิจารณาการเปียกของของเหลวบนผิวของของแข็ง สภาพสมดุลของแรงสองแรงจะนำไปสู่ปริมาณที่สำคัญอีกปริมาณหนึ่ง ที่นิยมใช้วัดความเปียกเรียกว่า มุมสัมผัส (Contact angle) คือมุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกัน โดยสามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้โดยเครื่องวัดมุมสัมผัส ความสามารถต่อการเปียกของของเหลวเมื่อสัมผัสกับผิววัสดุสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. แบบไม่ชอบน้ำ หรือ hydrophobic หรือ non-wetting แสดงสมบัติแบบไม่ชอบน้ำเมื่อของเหลวสัมผัสกับผิววัสดุทำมุมกันมากกว่า 90° (ดังภาพที่ 2-5 ก)
2. แบบชอบน้ำหรือ hydrophilic หรือ wetting แสดงสมบัติแบบชอบน้ำ เมื่อของเหลวสัมผัสกับผิววัสดุทำมุมกันน้อยกว่า 90° (ดังภาพที่ 2-5 ข)



ภาพที่ 2-5 แสดงมุมสัมผัสของน้ำเมื่อสัมผัสกับผิววัสดุชนิดที่ไม่ชอบน้ำและชนิดที่ชอบ

นักวิทยาศาสตร์ใช้มุมสัมผัสเป็นเกณฑ์แบ่งการเปียกของเหลวบนของแข็งว่าเปียกได้ดีหรือไม่ดีเกณฑ์มีดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆ คลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือ เกิดการเปียกได้ดี ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา เรียกว่าผิวเปียกยาก คือของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆ ที่ฐานของหยดที่ของเหลวยังคงแตะกับผิวของแข็ง
4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา เรียกว่า ผิวไม่เปียก เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ

2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงผิววัสดุด้วยระบบพลาสมา สามารถสรุปเป็นรายละเอียดได้ดังนี้

Kim และคณะ (2003) ได้ทำการปรับปรุงผิวของสแตนเลสด้วยระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นพัลส์ที่มีค่าสูงสุดประมาณ 10 กิโลโวลต์และใช้แก๊สไนโตรเจนผสมกับแก๊สออกซิเจนในสัดส่วน 4:1 ส่วนชิ้นงานสแตนเลสที่ปรับปรุงผิวแล้วถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM, XPS และเครื่องวัดมุมสัมผัส ผลการทดลองพบว่าผิวสแตนเลสมีสภาพที่ชอบน้ำ (hydrophilic surface) เป็นผลจากอนุภาคของไนโตรเจนและออกซิเจนไปชนพื้นผิวสแตนเลสจนหลุดออกไปรวมทั้งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผิวสแตนเลสทำให้พลังงานพื้นผิวสแตนเลสมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Lin และคณะ (2006) ได้ทำการปรับปรุงผิวของฟิล์ม polyimide ชนิด Kapton E(N) และ Upilex S ในระบบสุญญากาศโดยใช้ระบบ glow discharge ของพลาสมาของอากาศ ที่ความดัน 60 mTorr เพื่อศึกษาผลการยึดเกาะของฟิล์ม polyimide กับชั้นฟิล์มทองแดงที่เคลือบด้วยวิธีสเปคโตรริง ผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานการลอก (peel strength) ของฟิล์ม Kapton E(N) และ Upilex S ที่ผ่านการปรับปรุงผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.7 g/mm และ 1.2 g/mm ไปเป็น 99.3 g/mm และ 91.5 g/mm ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าพลังงานพื้นผิวและความหยาบ (roughness) ของพื้นผิวฟิล์ม polyimide ที่เพิ่มสูงขึ้นจากการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา โดยค่าพลังงานพื้นผิวที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นบริเวณพื้นผิวทำให้สัดส่วนของออกซิเจนบริเวณพื้นผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Pelagade et al., 2012)

Kim และคณะ (2014) ได้ทำการทดสอบการยึดติดระหว่างพลาสติก polyphenylene sulfide กับผิวทองแดง โดยทำการเคลือบชั้นพลาสติก polyphenylene sulfide ลงบนแผ่นทองแดงด้วยวิธี thermal evaporation หลังจากนั้นทำการปรับปรุงผิวของชั้นพลาสติกด้วยวิธีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาโดยใช้แก๊สรีแอกทีฟชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน โดยให้กำลังไฟฟ้าในการปรับปรุงผิวมีค่าคงเป็น 120 วัตต์และเวลาในการปรับปรุงผิวมีค่าคงที่เป็น 2 นาที ผลการทดสอบการยึดเกาะด้วยวิธี lap shear พบว่าการปรับปรุงผิวโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนทำให้ค่า แรงยึดเกาะ (adhesive strength) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นสูงสุด โดยมีค่าประมาณ 23 MPa และทำให้พื้นผิวพลาสติกมีสภาพการไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพิ่มสูงขึ้น (Noh, Jo, & Jung, 2009)

Lim และคณะ (2015) ได้ทำการทดลองปรับปรุงผิวชิ้นงานอลูมิเนียมก่อนการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางทองแดงด้วยวิธีแมกนีตรอนสเปคโตรริง โดยใช้วิธีการทำความสะอาดผิวด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การกัดผิวด้วยกรด การปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาและการปรับปรุงผิวด้วยการอบด้วยความร้อน (thermal treatment) ร่วมกันเพื่อหาขั้นตอนการปรับปรุงผิวที่ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดีที่สุด พบว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนจะส่งผลต่อการยึดเกาะของพื้นผิวมากกว่าวิธีอื่นเพราะทำให้เกิดแรงยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นและช่วยขจัดสิ่งปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวออกไป ในขณะที่การอบด้วยความร้อนทั้งก่อน

หรือหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาจะทำให้เกิดการปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวอลูมินาเกิดขึ้น (Minzari, Moller, Kingshott, Christensen, & Ambat, 2008)

Pelagade และคณะ (2012) ได้ทำการปรับปรุงผิวพลาสติก Polytetrafluoroethylene โดยใช้การปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาจากแก๊สอาร์กอนและใช้เวลาในการปรับปรุงผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งงานที่ปรับปรุงผิวแล้วถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM , XPS และเครื่องวัดมุมสัมผัส ผลการทดลองพบว่า ค่าวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวพลาสติก ค่าความหยาบของพื้นผิวและสัดส่วนอะตอมของ F ต่อ C มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าพลังงานพื้นผิวและสัดส่วนอะตอมของ C ต่อ O มีค่าลดลงซึ่งเป็นผลจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่ขอบน้ำเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวพลาสติกหลังจากการปรับปรุงผิว (Ghasemi, Sohbatzadeh, & Mirzanejhad, 2015)

Noh และคณะ (2007) ได้ทำการปรับปรุงผิวพลาสติก polytetrafluoroethylene สำหรับงานทางด้านทางการแพทย์ โดยใช้การปรับปรุงผิวด้วยสารละลายทางเคมีร่วมกับการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน โดยใช้กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเป็น 35 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าหลังจากปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0.25 วินาที ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวพลาสติกมีค่าลดลงจาก 70.1° เป็น 35.8° เป็นผลจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนบริเวณพื้นผิวพลาสติก นอกจากนี้เมื่อเพิ่มเวลาในการปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นรวมทั้งลักษณะพื้นผิวของพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลจากการหลุดออกของพื้นผิวของพลาสติกที่เกิดจากการชนของลำพลาสมาของแก๊สออกซิเจน

Minzari และคณะ (2008) ได้ทำการปรับปรุงผิวของอลูมิเนียม AA 1050 ถูกกัดด้วยกรดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยพลาสมาโดยใช้วิธีโคโรนา ดิสชาร์จ (corona discharge) ที่ความดันบรรยากาศของอากาศ โดยให้กำลังไฟฟ้าเป็น 1 กิโลวัตต์ ทำให้พื้นผิวอลูมิเนียมหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาเกิดเป็นชั้นออกไซด์ของอลูมิเนียมเกิดขึ้นและเกิดหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนและไนโตรเจนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวอลูมิเนียม

Ghasemi และคณะ (2015) ได้ปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของผิวเซรามิกกับสีเคลือบ โดยใช้ลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศของแก๊สฮีเลียม โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเป็น 0.5 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าหลังจากปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิว เซรามิกที่วัดได้มีค่าลดลงและค่าพลังงานพื้นผิวที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงสภาพขอบน้ำของพื้นผิวเซรามิกที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งการยึดเกาะระหว่างผิวเซรามิกกับสีเคลือบที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของเซรามิกหลังจากปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา มีความหยาบเฉลี่ยที่ลดลงและมีพื้นผิวที่เรียบขึ้นซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการชนของลำพลาสมาที่บริเวณพื้นผิวเซรามิก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

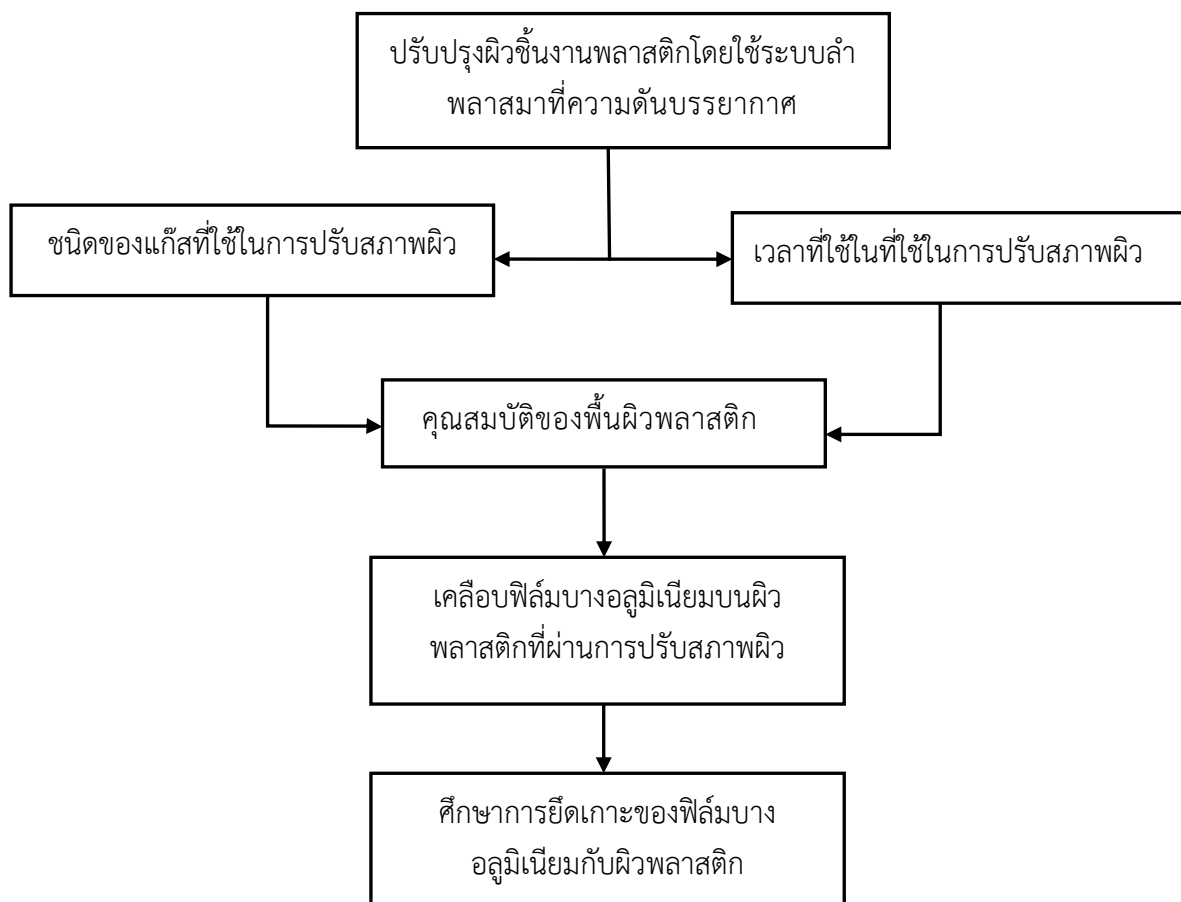
บทนี้กล่าวถึง อุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้ในการวิจัยตลอดจนถึงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานพลาสติก การปรับปรุงผิวพลาสติกด้วยระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด การศึกษาลักษณะเฉพาะของผิวพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิว และการศึกษาการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมบนผิวพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กรอบแนวคิดการวิจัย

ในงานวิจัยนั้นผู้วิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งสรุปได้ดังนี้ โดยช่วงที่ 1 เป็นการนำระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่พัฒนาขึ้นไปปรับปรุงผิวพลาสติก ภายใต้เงื่อนไขที่จะศึกษาประกอบด้วย

1. เวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวมีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของพื้นผิวพลาสติก
2. ชนิดของแก๊สที่ใช้การปรับปรุงผิวที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของพื้นผิวพลาสติก

ส่วนช่วงที่ 2 เป็นการขึ้นงานพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษาในช่วงที่ 1 มาเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางอลูมิเนียม เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงผิวพลาสติกที่มีต่อการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียม



ภาพที่ 3-1 กรอบแนวคิดการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

1. อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงผิวพลาสติกด้วยระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ประกอบด้วย
 - 1.1 ชุดทดลองพลาสมาเจ็ทระบบความดันบรรยากาศ
 - 1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
 - 1.2.1 วัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงผิวคือ แผ่นพลาสติก 3 ชนิดประกอบด้วย Polypropylene (PP) Polycarbonate (PC) และ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
 - 1.2.2 แก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิวคือ แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% และแก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.9%
2. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผิวพลาสติกที่ผ่านการสภาพผิวพลาสติกด้วยระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ประกอบด้วย

2.1 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

2.2 X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

2.3 Contact angle meter

2.4 Atomic Force Microscope (AFM)

3. อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและชุดอุปกรณ์การทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มอลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 เครื่องเคลือบสุญญากาศ เป็นระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอนโคสปีดเตอร์

3.2 วัสดุที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมเป็นเป้าสารเคลือบเป็นเป้าอลูมิเนียม มีความบริสุทธิ์ 99.9995 %

3.3 ชุดทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบ (Cross cut tester)

3.2 การเตรียมผิวชิ้นงานพลาสติก

ชิ้นงานพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ คือ แผ่นพลาสติก Polypropylene (PP) Polycarbonate (PC) และ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ซึ่งก่อนนำชิ้นงานพลาสติกมาปรับปรุงผิวจะต้องมีการทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่บนผิวของชิ้นงานพลาสติกเหล่านั้น ได้แก่ คราบไขมัน ฝุ่น และสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยชิ้นงานแช่ในน้ำด้วยน้ำและทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic cleaner เป็นเวลา 5 นาที และเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยลมร้อน

3.3 ขั้นตอนการผลิตลำพลาสมาเจ็ทที่ความดันบรรยากาศ

ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-2



(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 3-2 ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่ใช้ในงานวิจัย

- (a) แก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิวประกอบด้วย แก๊สอาร์กอนและออกซิเจน
- (b) ตัวควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Flow rate meter)
- (c) หัวฉีดพลาสมาเจ็ท (Plasma jet nozzle)
- (d) เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency generator)

ขั้นตอนการผลิตพลาสมาเจ็ทระบบความดันบรรยากาศมีดังนี้

1. จัดเตรียมชุดอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับผลิตลำพลาสมาให้พร้อมแล้วเปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนให้ไหลเข้าสู่เครื่องกำเนิดพลาสมาก่อน
2. ทำการปรับค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน
3. ทำการเปิดเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งมีกำลังอยู่ในช่วง 10-100 วัตต์ ความถี่อยู่ในช่วง 50-500 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยปรับค่าความต่างศักย์ เพื่อให้เกิดลำพลาสมา

3.4 การทดลองปรับปรุงผิวของชิ้นงานพลาสติกโดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

การทดลองในงานวิจัยนี้ จะศึกษาการปรับปรุงผิวของชิ้นงานพลาสติก โดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวและชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิวแล้วจึงนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่อไป โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.4.1 การศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิว

ทำการทดลองปรับปรุงผิวพลาสติกด้วยระบบลำพลาสมาที่บรรยากาศที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน โดยใช้แก๊สอาร์กอนในการปรับปรุงผิว โดยเงื่อนไขการทดลองแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 เงื่อนไขของการศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิว

เงื่อนไข	รายละเอียด
อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (L/min)	5
ระยะห่างระหว่างหัวฉีดเจ็ทกับชิ้นงาน (mm)	15
เวลาในการปรับปรุงผิว (sec)	30 ,60,180
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	80
กระแสไฟฟ้า (mA)	300
ชิ้นงานพลาสติก	พลาสติก PP PC และ ABS

3.4.2 การศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกภายใต้เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว

ทำการทดลองปรับปรุงผิวพลาสติกด้วยระบบลำพลาสมาที่บรรยากาศที่ระยะเวลาคงที่คือ 1 นาที แก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิวประกอบด้วยแก๊สอาร์กอนอย่างเดียวและแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สออกซิเจนที่อัตราการไหลค่าต่าง ๆ ในการปรับปรุงผิว โดยเงื่อนไขการทดลองแสดงในตารางที่ 3-2 โดยในการทดลองจะให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนไม่เกิน 1.0 L/min เนื่องจากข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าของระบบพลาสมาที่ใช้ ที่ไม่สามารถจุดลำพลาสมาให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อใช้ปริมาณแก๊สออกซิเจนในปริมาณสูงได้

ตารางที่ 3-2 เงื่อนไขของการศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกภายใต้เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว

เงื่อนไข	รายละเอียด
อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (L/min)	5
อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (L/min)	0 , 0.5 , 1.0
ระยะห่างระหว่างหัวฉีดเจ็ทกับชิ้นงาน (mm)	15
เวลาในการปรับปรุงผิว (sec)	60
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	80
กระแสไฟฟ้า (mA)	300
ชิ้นงานพลาสติก	พลาสติก PP PC และ ABS

3.4.3 ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของพื้นผิวพลาสติกที่ได้จากการปรับปรุงผิวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

นำชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวและเงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว มาศึกษาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขของการปรับปรุงพื้นผิวกับลักษณะและสมบัติของพื้นผิวพลาสติกที่ได้ โดยใช้เครื่องมือต่อไปนี้

1. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวพลาสติก
2. X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผิวพลาสติก
3. Contact angle meter เพื่อศึกษาสภาพขบน้ำของผิวพลาสติก
4. Atomic Force Microscope (AFM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของพลาสติก

3.5 การทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนผิวพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิว

ทำการเคลือบฟิล์มบางโลหะอลูมิเนียมลงบนชิ้นงานพลาสติกที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้วภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวและเงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอริง (รูปที่ 3-3) ในการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียม



ภาพที่ 3-3 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบโคสปีดเตอริง

โดยในตารางที่ 3-3 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนผิวพลาสติกด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ โคสปีดเตอริง

ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม

เงื่อนไข	รายละเอียด
ความดันพื้นฐาน (mbar)	5×10^{-5}
เป้าสารเคลือบ	อลูมิเนียม
อัตราการไหลของแก๊ส Ar (sccm)	4
ความดันรวมขณะเคลือบ (mbar)	4.0×10^{-3}
ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับชิ้นงาน (cm)	13
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (min)	10

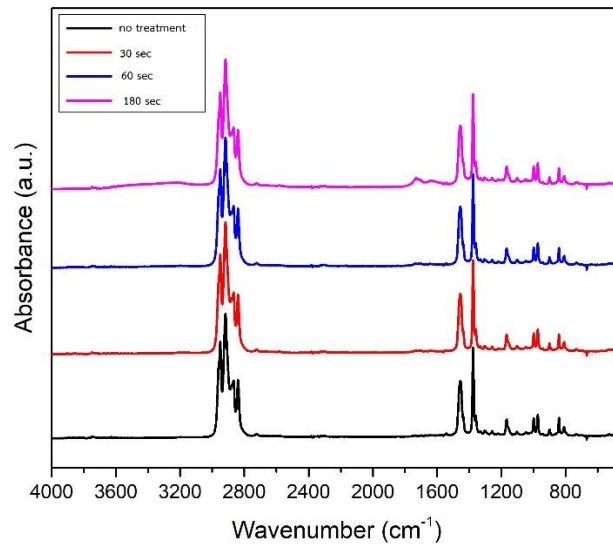
หลังจากทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว นำชิ้นงานพลาสติกดังกล่าวมาทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมด้วยเครื่อง cross cut tester เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงผิวด้วยระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่มีต่อการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบบนลงพื้นผิวพลาสติก

บทที่ 4 ผลการทดลอง

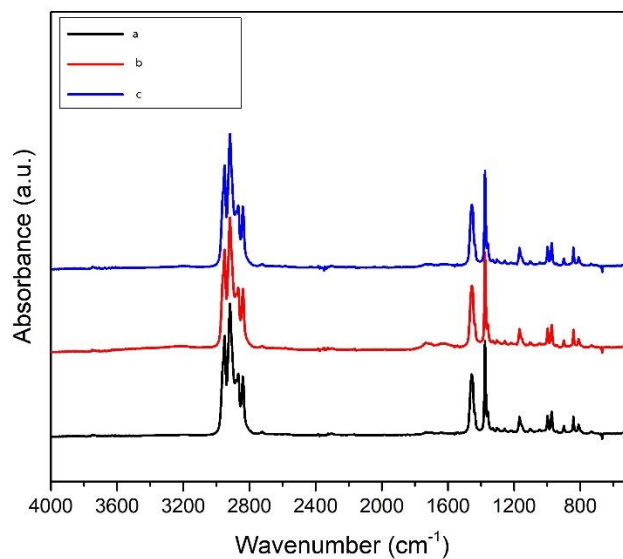
4.1 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

4.1.1 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polypropylene (PP)

ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวแผ่นพลาสติก PP ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4-1 โดยหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในสเปกตรัมของแผ่นพลาสติก PP ก่อนการปรับปรุงผิวแสดงใน ตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PP ก่อนปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา (no treatment) และปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 4-2 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PP หลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว a) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

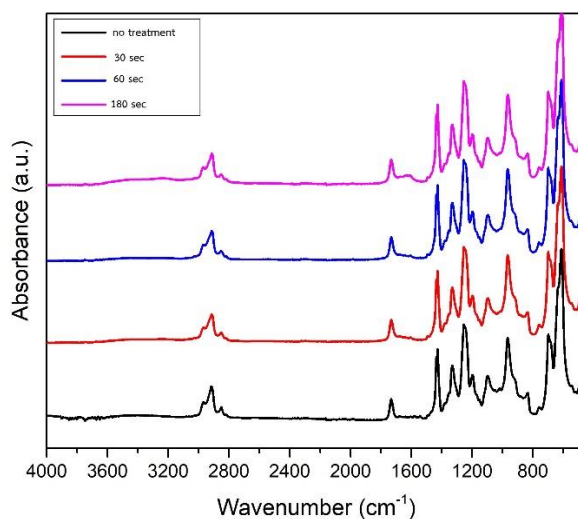
ตาราง 4-1 หมู่ฟังก์ชันเทียบกับเลขคลื่นของแผ่นพลาสติก PP (Asensio, Moya, Roja, & Gómez, 2009; Verleye, Roeges, & Moor, 2001; Noda, Dowrey, Haynes, Marcott, 2007)

Wavenumber (cm ⁻¹)	Functional group
2950	C-H stretch
2915	C-H stretch
2838	C-H stretch
1455	CH ₂ bend
1377	CH ₃ bend
1166	CH bend, CH ₃ rock, C-C stretch
997	CH ₃ rock, CH ₃ bend, CH bend
972	CH ₃ rock, C-C stretch
840	CH ₂ rock, C-CH ₃ stretch
808	CH ₂ rock, C-C stretch, C-CH stretch

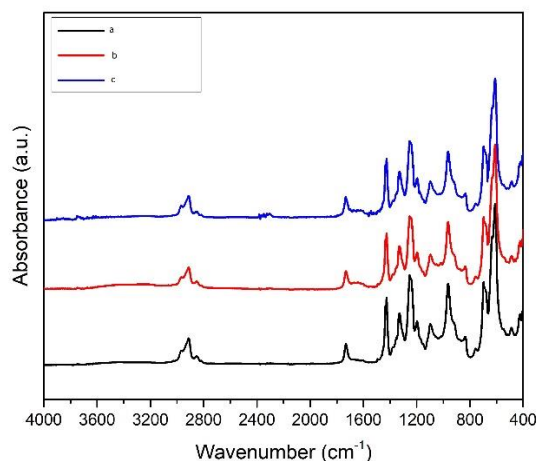
จากผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนภายใต้เวลาที่ต่างกัน (ภาพที่4-1) ผลการวัดพบพีคใหม่ในช่วงเลขคลื่น $1660 - 1730 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน $\text{C} = \text{O}$ หรือหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) โดยพีคในช่วงดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น ส่วนการทดลองภายใต้เงื่อนไขการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สชนิดต่างๆ (ภาพที่ 4-2) จะพบพีคในช่วงดังกล่าวด้วยเช่นกัน โดยความเข้มของพีคจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้แก๊สออกซิเจนในการปรับปรุงผิว ซึ่งการเกิดพีคดังกล่าวอาจเกิดจากไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ตกกระทบผิวพลาสติกเมื่อใช้ช่วงเวลาในการปรับปรุงผิวมากขึ้นส่งผลทำให้เกิด chain scission ขึ้นที่ผิวพลาสติกและทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน $\text{C} = \text{O}$ ขึ้น ในขณะที่การปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน แก๊สออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวพลาสติกทำให้ในการเกิดพันธะเกิด $\text{C} = \text{O}$ ได้ง่ายขึ้น

4.1.2 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polycarbonate (PC)

ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวแผ่นพลาสติก PC ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4-3 และ 4-4 โดยหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในสเปกตรัมของแผ่นพลาสติก PC ก่อนการปรับปรุงผิวแสดงในตารางที่ 4-2



ภาพที่ 4-3 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PC ก่อนปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา (no treatment) และหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 4-4 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก PC หลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว a) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

ตาราง 4-2 หมู่ฟังก์ชันเทียบกับเลขคลื่นของแผ่นพลาสติก PC (Asensio et al., 2009; Verleye et al., 2001; Noda et al., 2007)

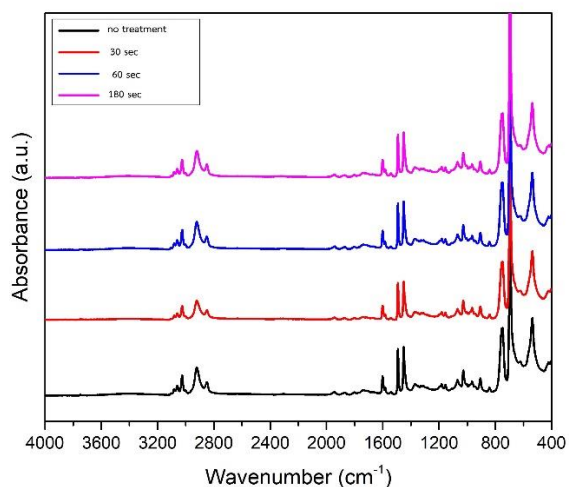
Wavenumber (cm ⁻¹)	Functional group
2966	CH stretch
1768	C=O stretch
1503	Aromatic ring stretch
1409	Aromatic ring stretch
1364	CH ₃ bend
1186	C-O stretch
1158	C-O stretch
1013	Aromatic CH in plane bend
828	Aromatic CH out of-plane bend

จากผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนภายใต้เวลาที่ต่างกัน (ภาพที่ 4-3) และการทดลองภายใต้เงื่อนไขการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สชนิดต่าง ๆ (ภาพที่ 4-4) ผลการวัดพบพีคใหม่ในช่วงมีช่วงของเลขคลื่น 1660 – 1720 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน C = O เกิดขึ้น โดยความเข้มของพีคจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้นหรือมีการใช้แก๊สออกซิเจนในการ

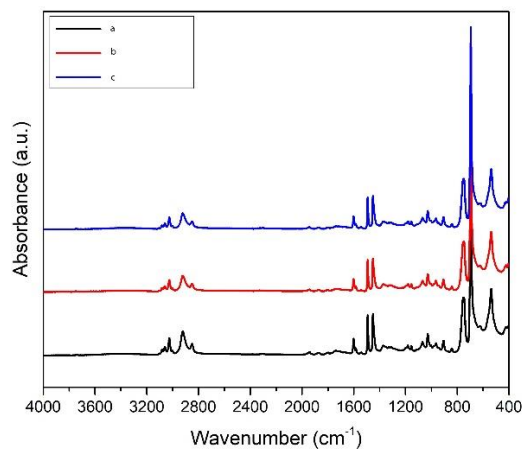
ปรับปรุงผิว ซึ่งอาจเกิดจากไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ตกกระทบผิวพลาสติกเมื่อใช้ช่วงเวลาในการปรับปรุงผิวมากขึ้นส่งผลทำให้เกิด chain scission ขึ้นที่ผิวพลาสติกและทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน C = O ขึ้น ในขณะที่การปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน แก๊สออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวพลาสติกทำให้ในการเกิดพันธะเกิด C = O ได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีลักษณะที่เหมือนกับผลการทดลองของแผ่น PP ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาในหัวข้อก่อนหน้า

4.1.3 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวแผ่นพลาสติก ABS ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4-5 และ 4-6 โดยหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในสเปกตรัมของแผ่นพลาสติก ABS ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงผิวแสดงใน ตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-5 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก ABS ก่อนปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา (no treatment) และหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 4-6 สเปกตรัม FTIR ของผิวพลาสติก ABS หลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ ในการปรับปรุงผิว a) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

ตาราง 4-3 หมู่ฟังก์ชันเทียบกับเลขคลื่นของแผ่นพลาสติก ABS (Verleye et al., 2001)

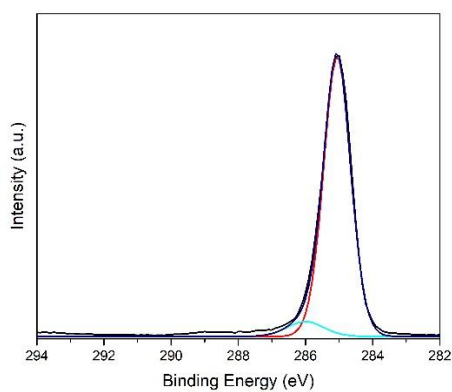
Wavenumber (cm ⁻¹)	Functional group
2950	C-H stretch
2915	C-H stretch
2838	C-H stretch
1455	CH ₂ bend
1377	CH ₃ bend
1166	CH bend, CH ₃ rock, C-C stretch
997	CH ₃ rock, CH ₃ bend, CH bend
972	CH ₃ rock, C-C stretch
840	CH ₂ rock, C-CH ₃ stretch
808	CH ₂ rock, C-C stretch, C-CH stretch

จากผลการทดลองก่อนและหลังปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนภายใต้เวลาที่ต่างกัน (ภาพที่ 4-5) และปรับปรุงผิวด้วยแก๊สชนิดต่างๆ (ภาพที่ 4-6) ผลการวัดพบพิกที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบในพลาสติก ABS ในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยความเข้มของพิกจะมีค่าไม่แตกต่างกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง

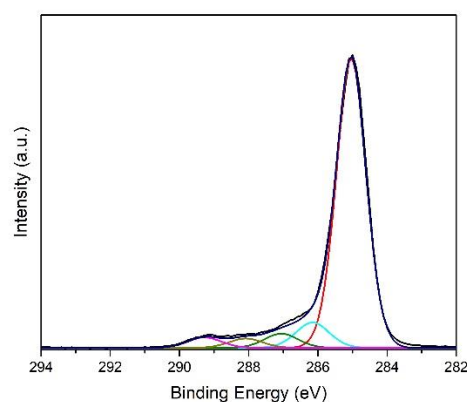
4.2 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

4.2.1 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polypropylene (PP)

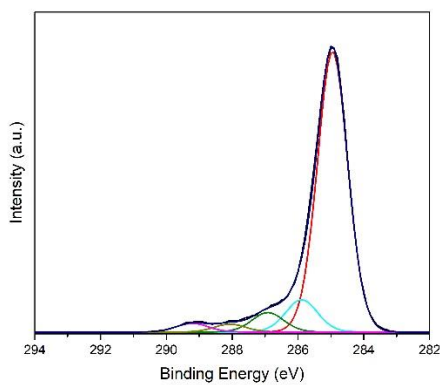
ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XPS ของพื้นผิวแผ่นพลาสติก PP ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขต่างๆแสดงในภาพที่ 4-7



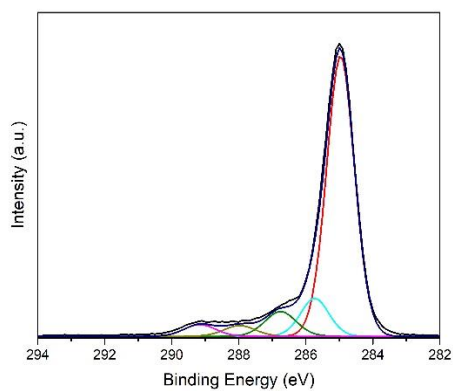
(a)



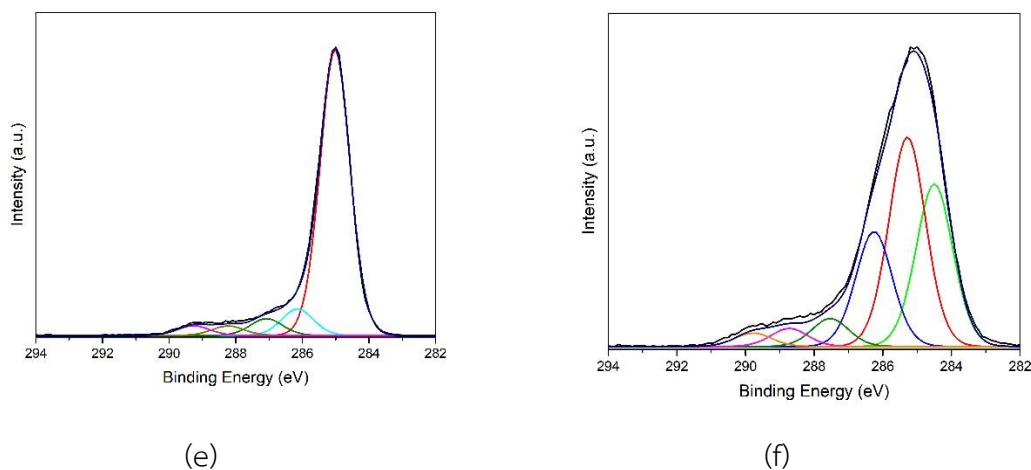
(b)



(c)



(d)

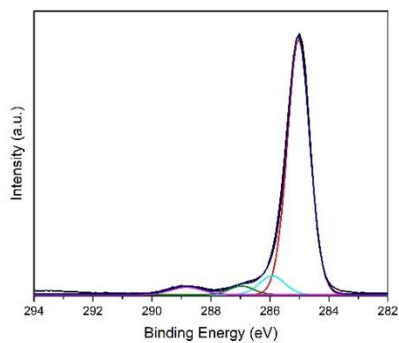


ภาพที่ 4-7 สเปกตรัม XPS ของผิวพลาสติก PP ก่อนและหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ a) พลาสติกก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 60 วินาที d) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที e) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min f) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

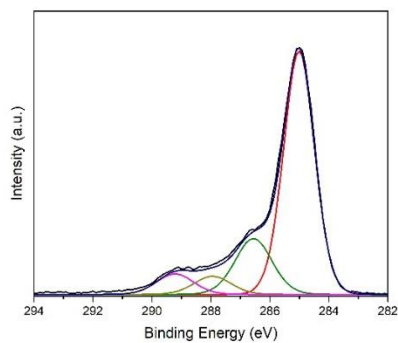
ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของแผ่นพลาสติก PP ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอนภายใต้เงื่อนไขเวลาปรับปรุงผิวที่แตกต่างกัน พบว่าก่อนการปรับปรุงผิว XPS สเปกตรัมของพลาสติก PP จะประกอบด้วยพีคหลักอยู่ 2 ตำแหน่ง คือที่ 285.0 286.2 eV ซึ่งจะเป็นพีค C1s ของ C-C และ -C-O ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติก PP ที่ใช้ทดลองมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนและออกซิเจน หลังจากรับปรุงผิวเป็นเวลา 30 วินาทีความเข้มของพีค -C-O จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มของพีค C-C มีค่าลดลง นอกจากนี้ ยังพบพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 287.9 และ 289.2 eV ซึ่งเป็นพีค C1s ของ C=O และ O=C=O (Koh, Cho, Kim, Han, & Beag, 2002) และเมื่อเพิ่มเวลาในการปรับปรุงผิว ความเข้มของพีค C1s ทุกพีคมีค่าเพิ่มสูงขึ้นยกเว้นพีค C-C ที่มีค่าลดลง ในส่วนการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขแก๊สชนิดต่างๆ ผลการทดลองก็จะมีลักษณะคล้ายๆ กัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สออกซิเจนในการปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้น ความเข้มของพีค -C-O C=O และ O=C=O มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวพลาสติก PP ด้วยพลาสมาทำให้เกิดเกิดพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนที่พื้นผิวพลาสติกเพิ่มมากขึ้น

4.2.2 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polycarbonate (PC)

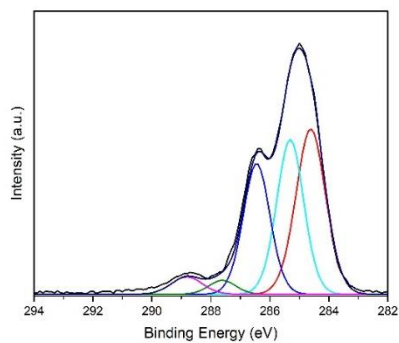
ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XPS ของพื้นผิวแผ่นพลาสติก PC ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4-8



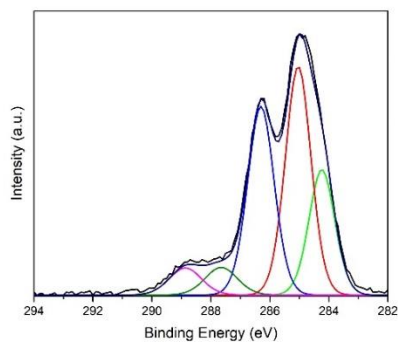
(a)



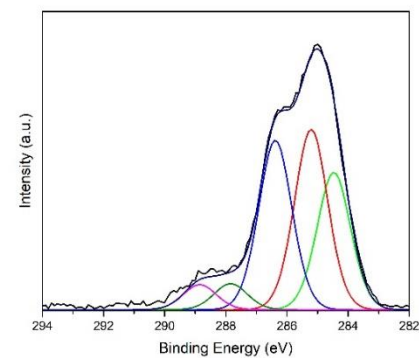
(b)



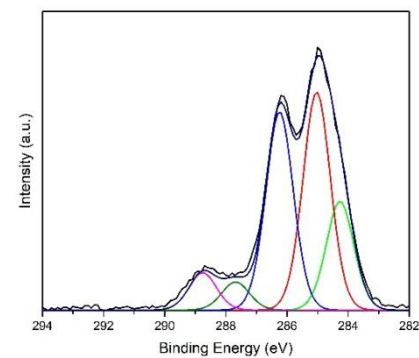
(c)



(d)



(e)



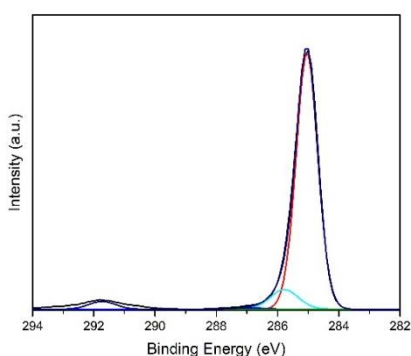
(f)

ภาพที่ 4-8 สเปกตรัม XPS ของผิวพลาสติก PC ก่อนและหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่างๆ
 a) พลาสติกก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที c) ปรับปรุงผิว
 ด้วยแก๊สอาร์กอน 60 วินาที d) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที e) ปรับปรุงผิวด้วย
 แก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min f) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊ส
 ออกซิเจน 1.0 L/min

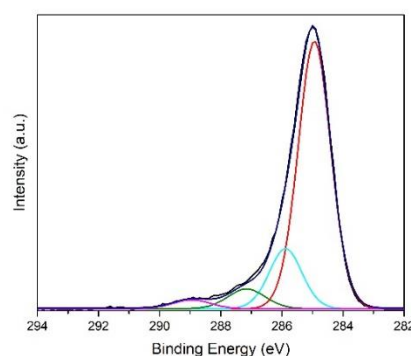
ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของแผ่นพลาสติก PC ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา ด้วยแก๊สอาร์กอนภายใต้เงื่อนไขเวลาปรับปรุงผิวที่ต่างกันและการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขแก๊สชนิดต่างๆแสดงในภาพที่ 4-8 พบว่าก่อนการปรับปรุงผิว XPS สเปกตรัมของพลาสติก PC จะประกอบด้วยพีคหลักอยู่ 4 ตำแหน่ง คือที่ 284.9 286.3 287.9 และ 289.2 eV ซึ่งจะเป็นพีค C1s ของ C-C -C-O C=O และ O-C=O ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติก PC ที่ใช้ทดลองมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนและออกซิเจน หลังจากทำการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาในทุกเงื่อนไขจะพบว่าความเข้มของพีค -C-O C=O และ O-C=O จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มของพีค C-C มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวพลาสติก PC ด้วยพลาสมาทำให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนที่พื้นผิวพลาสติกเพิ่มมากขึ้น

4.2.3 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

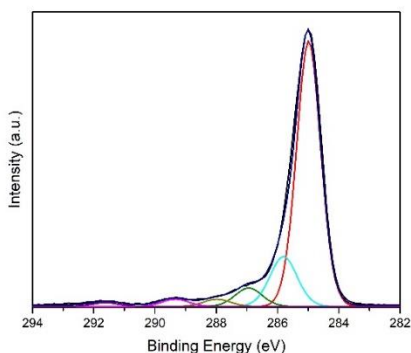
ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XPS ของพื้นผิวแผ่นพลาสติก ABS ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4-9



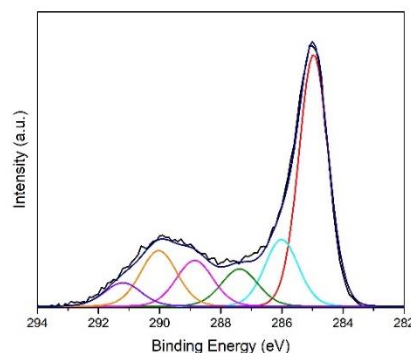
(a)



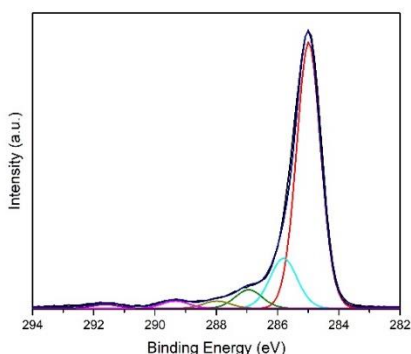
(b)



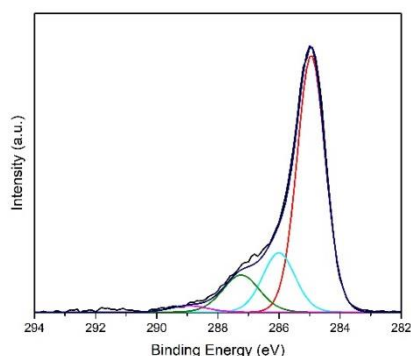
(c)



(d)



(e)



(f)

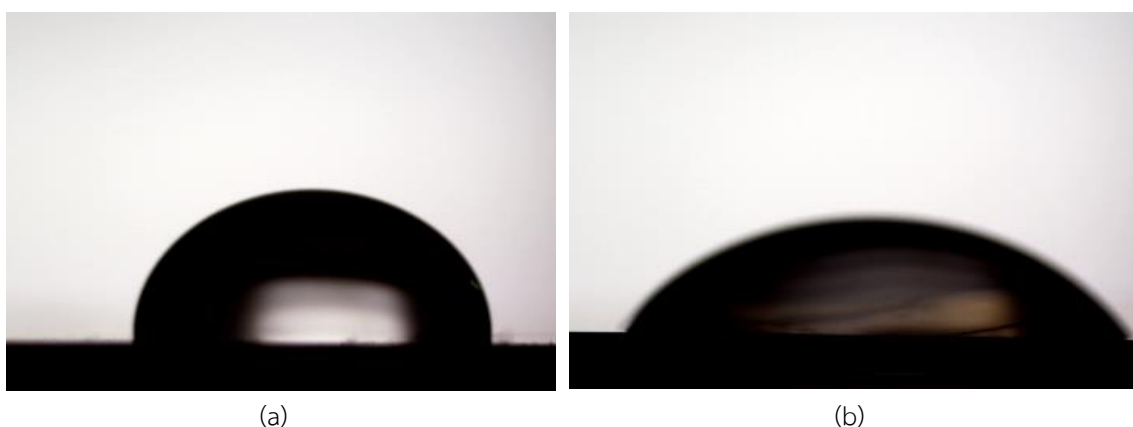
ภาพที่ 4-9 สเปกตรัม XPS ของผิวพลาสติก ABS ก่อนและหลังปรับปรุงผิวที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ a) พลาสติกก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 60 วินาที d) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที e) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min f) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS ของแผ่นพลาสติก ABS ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอนภายใต้เงื่อนไขเวลาปรับปรุงผิวที่แตกต่างกันและการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาภายใต้เงื่อนไขแก๊สชนิดต่างๆแสดงในภาพที่ 4-9 พบว่าก่อนการปรับปรุงผิว XPS สเปกตรัมของพลาสติก ABS จะประกอบด้วยพีคหลักอยู่ 3 ตำแหน่ง คือที่ 284.9 286.0 และ 291.6 eV ซึ่งจะเป็นพีค C1s ของ C-C -C-O และ shake-up satellite peak (Pandiyaraj et al., 2008) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติก ABS ที่ใช้ทดลองมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนและออกซิเจน หลังจากทำการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาในทุกเงื่อนไขจะพบว่าความเข้มของพีค -C-O จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มของพีค C-C มีค่าลดลง นอกจากนี้ ยังพบพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 287.7 และ 289.2 eV ซึ่งเป็นพีค C1s ของ C=O และ O-C=O แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงผิวจะทำให้ผิวพลาสติก ABS ด้วยพลาสมาทำให้เกิดเกิดพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนที่พื้นผิวพลาสติกเพิ่มมากขึ้น

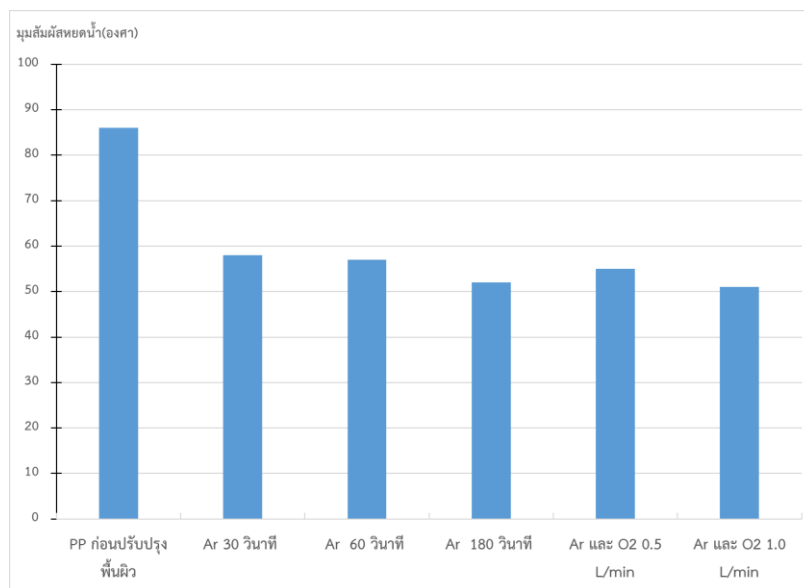
4.3 ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของแผ่นพลาสติก

ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาในทุกเงื่อนไข พบว่าค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของพื้นผิวพลาสติกทุกชนิดมีค่ามุมสัมผัสที่ลดลงค่อนข้างมาก โดยในภาพที่ 4-10 แสดงค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของพลาสติก PP ก่อนปรับปรุงผิว จะมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 86 องศา (ภาพ 4-10 a) เมื่อปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่เงื่อนไขแก๊สอาร์กอน 180 วินาที พบว่าพลาสติกมีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงเป็นประมาณ 52 องศา (ภาพ 4-10 b) ส่วนภาพที่ 4-11 ภาพ 4-12 และภาพ 4-13 แสดงผลการ

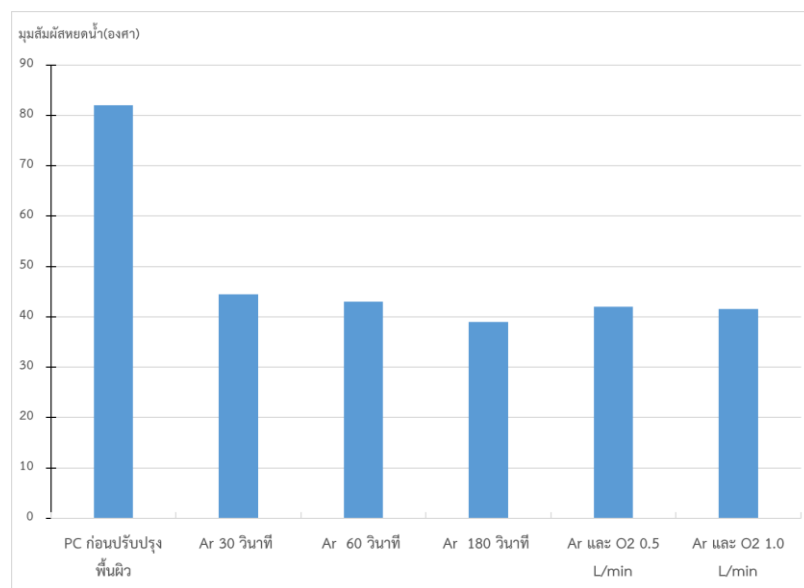
วัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติก PP PC และ ABS ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองพบว่าวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติกทุกชนิดที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาจะมีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงอย่างมาก เป็นผลจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนที่พื้นผิวพลาสติก เนื่องจากปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันมีขั้ว (polar functional group) ทำให้เมื่อหยดน้ำลงบนผิวพลาสติก ทำให้หยดน้ำมีการแผ่ตัวไปมากขึ้น (Ren, Wang, Nie, Wang, & Guo, 2008) ซึ่งเป็นการยืนยันผลการเกิดหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว ด้วยเทคนิค FTIR และ XPS ก่อนหน้านี้



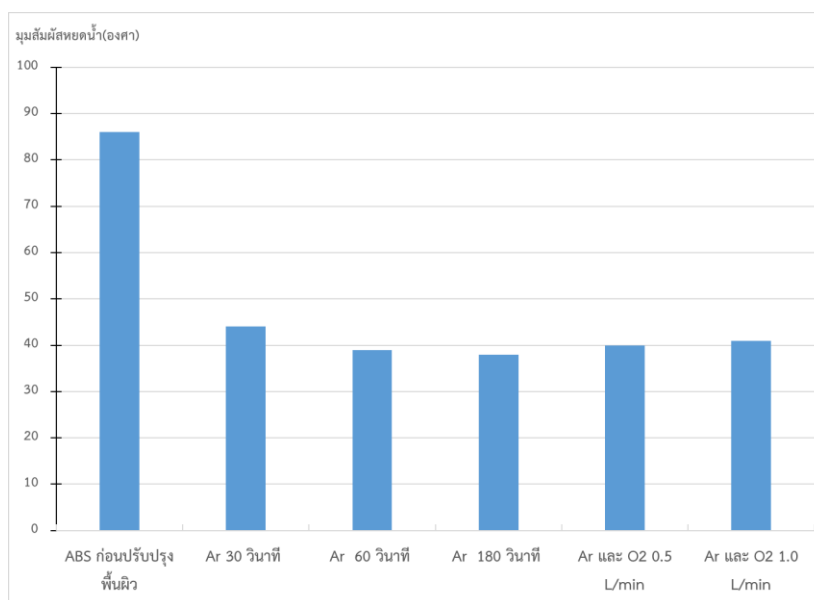
ภาพที่ 4-10 มุมสัมผัสหยดน้ำของพลาสติก PP a) ก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที



ภาพที่ 4-11 ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติก PP ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข



ภาพที่ 4-12 ผลการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของของแผ่นพลาสติก PC ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข

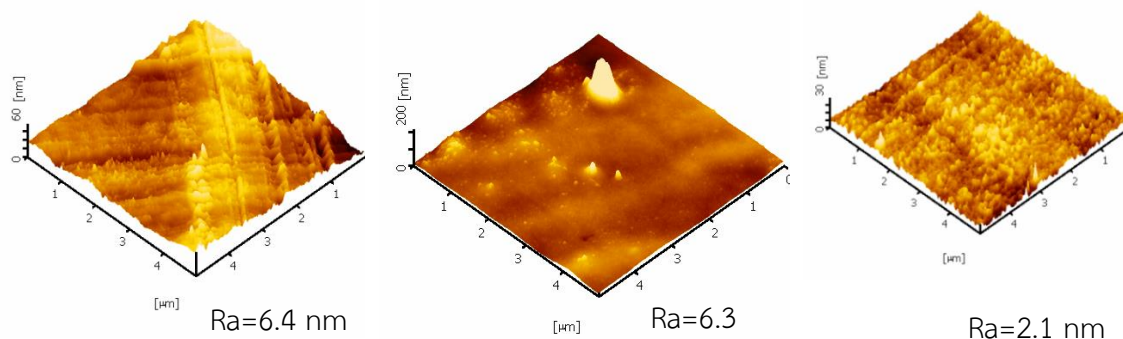


ภาพที่ 4-13 ผลการวัดมุมสัมผัสผิวน้ำของของแผ่นพลาสติก ABS ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในทุกเงื่อนไข

4.4 ผลการวัดลักษณะพื้นผิวด้วยด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM)

4.4.1 ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นพลาสติก Polypropylene (PP)

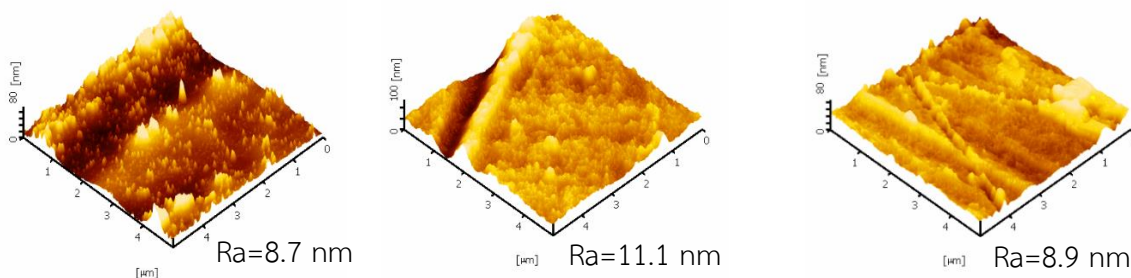
รูปร่างทางสัญญาณวิทยาของแผ่นพลาสติก PP ก่อนปรับปรุงผิวและหลังปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่เงื่อนไขการปรับปรุงผิวค่าต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM แสดงในภาพที่ 4-14



(a) พลาสติกก่อนปรับปรุงผิว

(b) Ar 30 วินาที

(c) Ar 60 วินาที



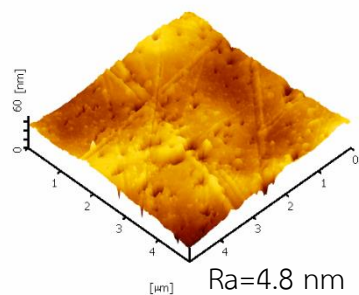
(d) Ar 180 วินาที

(e) Ar และ O₂ 0.5 L/min(f) Ar และ O₂ 1.0 L/min

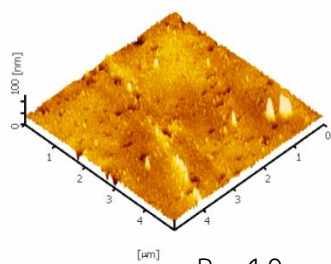
ภาพที่ 4-14 ลักษณะพื้นผิวของผิวพลาสติก PP จากเครื่อง AFM ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

- a) พลาสติกก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 60 วินาที d) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที e) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min f) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

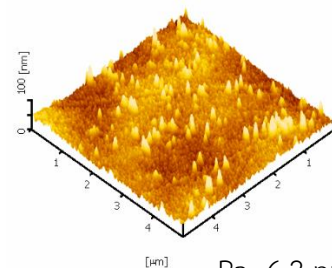
จากภาพ AFM พบว่าพื้นผิวพลาสติก PP ก่อนและหลังปรับปรุงผิวด้วยพลาสมามีลักษณะรูปร่างทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะในกรณีการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการชนของไอออนของแก๊สอาร์กอนจากลำพลาสมากับพื้นผิวพลาสติกเป็นเวลานานทำให้พื้นผิวพลาสติกบางส่วนเกิดการหลุดออก (etching) หรือเปลี่ยนสภาพไป (Abdel-Fattah, 2019)



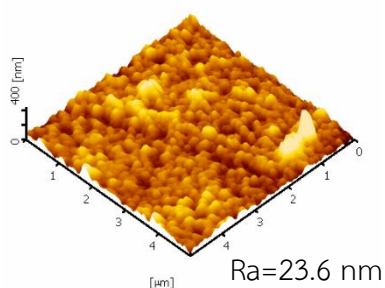
(a) พลาสติกก่อนปรับปรุงผิว



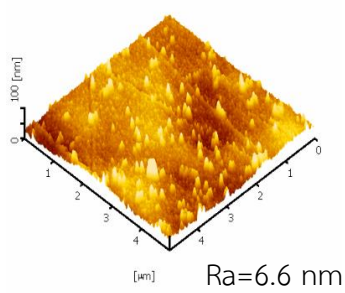
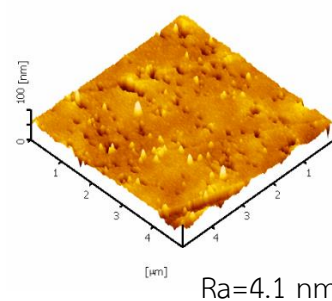
(b) Ar 30 วินาที



(c) Ar 60 วินาที



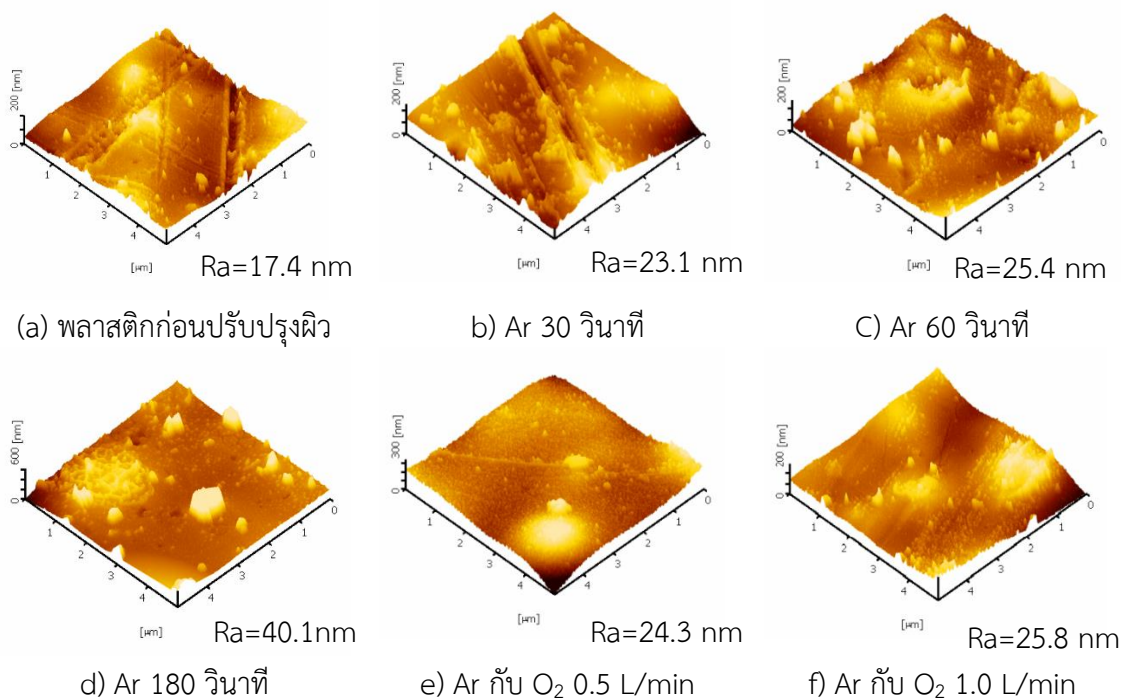
(d) Ar 180 วินาที

(e) Ar กับ O₂ 0.5 L/min(f) Ar กับ O₂ 1.0 L/min

ภาพที่ 4-15 ลักษณะพื้นผิวของผิวพลาสติก PC จากเครื่อง AFM ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

- a) พลาสติกก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 60 วินาที d) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที e) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min f) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

จากภาพ AFM พบว่าพื้นผิวพลาสติก PC ก่อนและหลังปรับปรุงผิวด้วยพลาสมามีลักษณะรูปร่างทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการปรับปรุงพื้นผิวของพลาสติก PP โดยเฉพาะในกรณีการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที ซึ่งทำค่าความขรุขระของพื้นผิวเฉลี่ย (Ra) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 23.6 nm ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการชนของไอออนของแก๊สอาร์กอนบนผิวพลาสติกที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้



ภาพที่ 4-16 ลักษณะพื้นผิวของผิวพลาสติก ABS จากเครื่อง AFM ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

a) พลาสติกก่อนการปรับปรุงผิว b) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที c) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 60 วินาที d) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที e) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 0.5 L/min f) ปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน 1.0 L/min

จากภาพ AFM พบว่าพื้นผิวพลาสติก ABS ก่อนและหลังปรับปรุงผิวด้วยพลาสมามีลักษณะรูปร่างทางสัญญาณวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปเหมือนผลการทดลองของแผ่นพลาสติก PP และ PC ก่อนหน้านี้ โดยเฉพาะในกรณีการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที ซึ่งทำค่าความขรุขระของพื้นผิวเฉลี่ย (Ra) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 40.1 nm

4.5 ผลการศึกษาการยึดเกาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมกับผิวพลาสติก

นำพลาสติกที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้วภายใต้เงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวและเงื่อนไขชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิว มาเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโลหะอลูมิเนียมลงบนชิ้นงาน โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ริง หลังจากนั้นนำชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านการเคลือบผิวมาทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D3359 ด้วยเครื่อง cross cut tester โดยทำการขีดชิ้นงานตามแนวขวางและตั้งด้วยเครื่อง cross cut tester แล้วใช้แปรงขัดเศษพลาสติกออก นำเทปกาวที่ใช้ทดสอบมายึดติดให้แน่นกับพื้นผิวที่ถูกขีด จากนั้นดึงเทปกาวออก อ่านผลการยึดเกาะของชิ้นงาน โดยดูพื้นที่ผิวพลาสติกที่หลุดออกโดยเทียบค่ากับเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกของผิวเคลือบตามมาตรฐาน ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PP แสดงในตาราง 4-4 พบว่าผิวพลาสติกที่ไม่มีการปรับปรุงผิว จะมีการหลุดลอกของผิวเคลือบอลูมิเนียมหมดเมื่อทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบ เมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที เปอร์เซ็นต์การหลุดลอกอยู่ที่ระดับ 1B หรือ 35-65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วยเงื่อนไขเวลาในการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น และเงื่อนไขปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน เปอร์เซ็นต์การหลุดลอกลดลงอยู่ที่ระดับ 2B หรือ 15-35 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 4-4 ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PP ที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสติก

เงื่อนไข	ผลทดสอบการยึดเกาะ	% การหลุดลอกของฟิล์มอลูมิเนียม
ไม่มีการปรับปรุงผิว	0B	มากกว่า 65 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 30 วินาที	1B	35-65 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 60 วินาที	2B	15-35 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 180 วินาที	2B	15-35 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar ร่วมกับแก๊ส O ₂ 0.5 L/min	2B	15-35 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar ร่วมกับแก๊ส O ₂ 1.0 L/min	2B	15-35 %

ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PC แสดงในตาราง 4-5 พบว่าผิวพลาสติกที่ไม่มีการปรับปรุงผิว จะมีการหลุดลอกของผิวเคลือบอลูมิเนียมหมดเมื่อทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบ เมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอน 30 วินาที เปอร์เซ็นต์การหลุดลอกอยู่ที่ระดับ 1B หรือ 35-65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วยเงื่อนไขเวลาในการปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น และเงื่อนไขปรับปรุงผิวด้วยแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สออกซิเจน เปอร์เซ็นต์การหลุดลอกลดลงอยู่ที่ระดับ 2B หรือ 15-35 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 4-5 ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PC ที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา

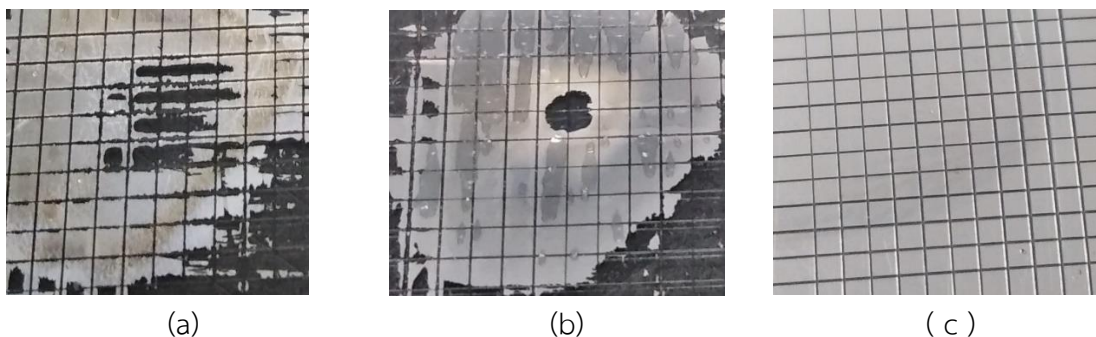
เงื่อนไข	ผลทดสอบการยึดเกาะ	% การหลุดลอกของฟิล์มอลูมิเนียม
ไม่มีการปรับปรุงผิว	0B	มากกว่า 65 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 30 วินาที	1B	35-65 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 60 วินาที	2B	15-35 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 180 วินาที	2B	15-35 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar ร่วมกับแก๊ส O ₂ 0.5 L/min	2B	15-35 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar ร่วมกับแก๊ส O ₂ 1.0 L/min	2B	15-35 %

ส่วนตาราง 4-6 แสดงผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก ABS พบว่าผิวพลาสติกที่ไม่มีการปรับปรุงผิว เปอร์เซ็นต์การหลุดลอกอยู่ที่ระดับ 1B หรือ 35-65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาในทุกเงื่อนไขพบว่าเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกอยู่ที่ระดับ 5B หรือไม่พบการหลุดลอกของผิวเคลือบอลูมิเนียม ซึ่งพลาสติก ABS มีการยึดเกาะที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับพลาสติก PP และ PC

ตาราง 4-6 ผลทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก ABS ที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา

เงื่อนไข	ผลทดสอบการยึดเกาะ	% การหลุดลอกของฟิล์มอลูมิเนียม
ไม่มีการปรับปรุงผิว	3B	5-15 %
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 30 วินาที	5B	ไม่พบการหลุดลอก
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 60 วินาที	5B	ไม่พบการหลุดลอก
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar 180 วินาที	5B	ไม่พบการหลุดลอก
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar ร่วมกับแก๊ส O ₂ 0.5 L/min	5B	ไม่พบการหลุดลอก
ปรับปรุงผิวด้วยแก๊ส Ar ร่วมกับแก๊ส O ₂ 1.0 L/min	5B	ไม่พบการหลุดลอก

ผลการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา เป็นผลจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน ที่มีสภาพเป็นขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบอลูมิเนียมกับผิวพลาสติกให้สูงขึ้น ส่วนภาพที่ 4-17 แสดงผลการทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบนผิวพลาสติก PP ที่ผ่านการปรับสภาพที่ด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที (ภาพที่ 4-17a) บนผิวพลาสติก PC ที่ผ่านการปรับสภาพที่ด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที (ภาพที่ 4-17b) และบนผิวพลาสติก ABS ที่ผ่านการปรับสภาพที่ด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที(ภาพที่ 4-17c)



ภาพที่ 4-17 ผลการทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบอลูมิเนียมบน (a) ผิวพลาสติกPP ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที (b) บนผิวพลาสติกPC ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที (c) บนผิวพลาสติก ABS ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแก๊สอาร์กอน 180 วินาที

ซึ่งจะพบว่า บริเวณที่มีการหลุดลอกของผิวเคลือบอลูมิเนียมในกรณีของผิวพลาสติก PP และ PC จะมีการหลุดลอกในบางบริเวณโดยเฉพาะบริเวณตรงกลางและบริเวณขอบของการทดสอบการยึดเกาะ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการปรับปรุงผิวด้วยลำพลาสมา ที่มีลักษณะเป็นพลาสมาเป็นลำเส้น ทำให้ไอออนพลาสมาที่พุ่งชนพื้นผิวมีค่าพลังงานที่ไม่เท่ากันในบางบริเวณ ส่งผลให้ค่าสามารถในการยึดเกาะของผิวเคลือบในบางบริเวณมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการนำระบบลำพลาสมาไปใช้ในการปรับปรุงผิวในระดับอุตสาหกรรมจึงอาจจะต้องปรับปรุงระบบให้มีลักษณะเป็นแถว (plasma jet array) เพื่อให้ผิวพลาสติกมีคุณสมบัติในการยึดเกาะกับผิวเคลือบสม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงผิวพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในงานเคลือบผิว ประกอบด้วย Polypropylene (PP) Polycarbonate (PC) และ Acrylonitrile Butadiene Styrene (abs) โดยใช้ระบบลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ตัวแปรที่จะศึกษาคือ ชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปรับปรุงผิวและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงผิว ส่วนสมบัติทางกายภาพของผิวพลาสติกที่จะศึกษาคือ ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติการชอบน้ำ โดยใช้เทคนิค AFM, FTIR, XPS และ เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle) ตามลำดับ รวมถึงศึกษาขีดเกาะของชั้นฟิล์มอลูมิเนียมที่เคลือบบนผิวพลาสติกที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว โดยผลงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1) การปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอนที่เงื่อนไขเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าจะทำให้ผิวพลาสติกเกิดหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน เช่นหมู่ฟังก์ชัน $-C-O$ $C=O$ และ $O-C=O$ จะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวและจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการปรับปรุงพื้นผิว เป็นผลจากการเกิดชนจากไอออนของแก๊สอาร์กอนที่กระทบผิวพลาสติกเมื่อใช้ช่วงเวลาในการปรับปรุงผิวมากขึ้นส่งผลทำให้เกิด chain scission ขึ้นที่ผิวพลาสติกและทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันมีขั้ว ซึ่งจะช่วยให้การยึดติดระหว่างชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมกับผิวพลาสติกให้สูงขึ้น รวมทั้งการเพิ่มเวลาในการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้ไอออนของแก๊สอาร์กอนชนกับกับพื้นผิวพลาสติกเป็นเวลานานขึ้นทำให้พื้นผิวพลาสติกบางส่วนเกิดการหลุดออก (etching) หรือเปลี่ยนสภาพไปอย่างชัดเจน

2) การปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาด้วยพลาสมาที่เงื่อนไขชนิดของแก๊สต่างๆ พบว่าจะทำให้ผิวพลาสติกเกิดหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน เช่นหมู่ฟังก์ชัน $-C-O$ $C=O$ และ $O-C=O$ เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวและจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สออกซิเจนในการปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแก๊สออกซิเจนจะช่วยให้การเกิดหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนที่พื้นผิวพลาสติกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การยึดติดระหว่างชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมกับผิวพลาสติกให้สูงขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณออกซิเจนจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสภาพพื้นผิวพลาสติกอย่างชัดเจนเหมือนในกรณีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอนที่เวลาในการปรับปรุงผิวเพิ่มมากขึ้น

3) ในการนำระบบลำพลาสมาไปใช้ในการปรับปรุงผิวในระดับอุตสาหกรรม ควรมีการปรับปรุงและออกแบบระบบลำพลาสมาให้มีลักษณะเป็นแถว (plasma jet array) เพื่อให้พื้นผิวที่ถูกปรับปรุงผิวมีคุณสมบัติในการยึดเกาะกับผิวเคลือบสม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- ถิรพัฒน์ วิลัยทอง. (2549). โครงการวิจัยทางเยวชนความคาดหวังของนักวิจัยอาวุโส. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธีรวรรณ บุญญวรรณ และสมฤทัย ตันมา. (2546). เจ็ทพลาสมาความดันบรรยากาศแบบดิวเทอเรียมเพื่อการลดเชื้อขึ้นงานการแพทย์และทันตกรรม. ศูนย์วิจัยพลาสมาและลำอนุภาค. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- รังสรรค์ ศรีสาคร. (2543). ทรงกลมพลาสมา. *วารสาร สสวท.*, 28(108), 31-34
- สมศักดิ์ แดงดี. (2552). ผลของพลาสมาที่ความดันบรรยากาศกับสมบัติพื้นผิวของฟิล์มบาง ITO. เอกสารการสอน. กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อัจฉราภรณ์ บุญมา. (2556). อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิว ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ASTM D3359. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Alenka, V., Miran, M., & Simona S. (2011). Improvement of adhesion of fucoidan on polyethylene terephthalate surface using gas plasma treatments. *Vacuum*, 85, 1083-1086.
- Delplanque, A., Henry, E., Lautru, J., Leh, H., Buckle M., & Nogues, C., (2014). UV/Ozone surface treatment increases hydrophilicity and enhances functionality of SU-8 photoresist polymer, *Applied Surface Science*, 314, 280-285.
- Ghasemi, M., Sohbatzadeh, F., & Mirzanejhad, S. (2015). Surface modification of raw and frit glazes by non-thermal helium plasma jet. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 9, 177-183.
- Källrot, M., Edlund, U., & Albertsson A. C., (2006). Surface functionalization of degradable polymers by covalent grafting. *Biomaterials*, 27, 1788-1796.
- Kim, J. Y., Ahn, K., Jeong, S. Y., Jeong, E. D., Bae, J. S., Kim, H. G., & Cho, C. R. (2014). Enhancement of adhesion between polyphenylene sulfide and copper by surface treatments. *Current Applied Physics*, 14, 118-121.
- Kim, M. C., Song, D. K., Shin, H. S., Baeg, S. H., Kim, G. S., Boo, J. H., Han, J. G., & Yang, S. H. (2003). Surface modification for hydrophilic property of stainless steel treated

- by atmospheric-pressure plasma jet. *Surface and Coatings Technology*, 171, 312–316.
- Kostov, K. G., Nishime, T. M. C., Castro, A. H. R., Toth, A., & Hein, L. R. O. (2014). Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*, 315, 367–375.
- Lim, J. D., Leed, P. M., Rhee, D. M. W., Leong, K. C., & Chen, Z. (2015) Effect of surface treatment on adhesion strength between magnetron sputtered copper thin films and alumina substrate. *Applied Surface Science*, 355, 509–515.
- Lin, Y.-S., Liu, H.-M., & Chen, C. L. (2006). Plasma surface modification of polyimide films by air glow discharge for copper metallization on microelectronic flex substrates. *Surface & Coatings Technology*, 200, 3775– 3785.
- Minzari, D., Moller, P., Kingshott, P., Christensen, L.H., & Ambat, R. (2008). Surface oxide formation during corona discharge treatment of AA 1050 aluminium surfaces. *Corrosion Science*, 50, 1321–1330.
- Mrad, O., Saunier, J., Aymes-Chodur, C., Mazel, V., Rosilio, V., Agnely, F., & Yagoubi, N. (2011). Aging of a medical device surface following cold plasma treatment: Influence of low molecular weight compounds on surface recovery. *European Polymer Journal*, 47, 2403–2413.
- Niu, J., Liu, D., & Wu, Y. (2011). Large-area and uniform surface modification of polymers by barrier discharge plasmas. *Surface and Coatings Technology*, 205, 3434–3437.
- Noh, B. I., Jo J. R., & Jung S. B., (2009). Effect of atmospheric-pressure plasma treatment on the adhesion characteristics of a flexible copper clad laminate. *Journal of the Korean Physical Society*, 54, 1217–1222.
- Pelagade, S. M., Singh, N. L., Rane, R. S., Mukherjee, S., Deshpande, U. P., Ganesan, V., & Shripathi T. (2012). Investigation of surface free energy for PTFE polymer by bipolar argon plasma treatment. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2, 132–136.
- Sanchis, R., Fenollar, O., García, D., Sánchez, L., & Balart, R., (2008). Improved adhesion of LDPE films to polyolefin foams for automotive industry using low-pressure plasma. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, 445–451.
- Schütze, A., Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Park, J., Selwyn, G. S., & Hicks, R. F., (1998). The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26, 1685–1694.

- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Demaison, J., & Leprince, P. (2006). Atmospheric Pressure Plasmas: A Review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2-30.
- Tsuchiya, Y., Akutu, K., & Iwata, A. (1998). Surface modification of polymeric materials by atmospheric plasma treatment. *Progress in Organic Coatings*, 34, 100-107.
- Yong, Z., Masahisa, O., & Chikahisa, H., (2006). Degradation of polymeric materials exposed to corona discharges. *Polymer Testing*, 25, 313-317.