

การออกแบบการทดลองเพื่อลดรอบเวลาของ กระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นโดยเครื่องพลาสมา

ชนาภรณ์ อางหาญ^{1*}, สุวิภรณ์ วิชกุล² และ รมิตายุ อยู่สุข³
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Received: 19 February 2023; Revised: 26 March 2023; Accepted: 25 April 2023

บทคัดย่อ

แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันความต้องการของลูกค้านำสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้บริษัทกรณีศึกษาจึงต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการได้อย่างรวดเร็ว ในการผลิตจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสะอาดเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อวงจรในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผ่านกระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลองเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตโดยการลดเวลาในการพลาสมาและหาพารามิเตอร์ในสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำไม่เกิน 30 องศา ตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมา ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอน โดยผู้วิจัยเลือกวิธีการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง จากผลพบว่าพารามิเตอร์ในสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ เวลาในการพลาสมาเท่ากับ 6.37 นาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที โดยค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของหยดน้ำจะมีค่าไม่เกิน 10.357 องศา ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และจากการลดเวลาในการพลาสมาลงจากเดิม 16.00 นาที เป็น 6.37 นาที ส่งผลให้กำลังการผลิตของกระบวนการพลาสมาเพิ่มขึ้น 52.97 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น, กระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศ, มุมสัมผัสของหยดน้ำ

* Corresponding author. E-mail: chanaporn.arc@ku.th

¹ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Design of Experiments for Reduce Cycle Time of Plasma Cleaning on Surface of Flexible Printed Circuits

Chanaporn Archan^{1,*}, Suwitchaporn Witchakul² and Ramidayu Yousuk³

Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

Received: 19 February 2023; Revised: 26 March 2023; Accepted: 25 April 2023

Abstract

Flexible Printed Circuits (FPC) are important components for various electronic devices. Currently, customer demand tends to increase over time. For this reason, the company must increase output capacity to meet the needs of customers. FPCs are applied low-pressure plasma process in order to control the quality to be clean and enhance connectivity in electronic devices. The objectives are to increase output capacity by reducing the cycle time and to identify the effect of low-pressure plasma cleaning parameters on the Water Contact angle (WCA). It must not exceed 30 degrees, which is in accordance with customer requirements. According to relevant researches, the factors affecting the optimizing of plasma parameters were plasma time, the power of the radio frequency, the flow rate of oxygen and the flow rate of argon. A central composite design was applied to design the experiments and response surface methodology was applied to analyze the experiments. The results revealed that the optimal parameters were a plasma time of 6.37 min, power of 4.20 kW, an oxygen flow rate of 0.10 l/min and an argon gas flow rate of 0.60 l/min. The average water contact angle does not exceed 10.357 degrees at a 95 percent confidence level. In addition, the plasma processing time was reduced from 16 minutes to 6.37 minutes, resulting in a 52.97 percent increase in plasma processing capacity.

Key words: flexible printed circuits, low-pressure plasma, water contact angle

* Corresponding author. E-mail: chanaporn.arc@ku.th

1 Engineering Management Program, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

2 Assistant Professor in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

3 Assistant Professor in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

1. บทนำ

แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดบาง น้ำหนักเบา ทนทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าและมีความยืดหยุ่นสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ต้องการของตลาดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ในปัจจุบันการแข่งขันของธุรกิจอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีเพิ่มมากขึ้น โดยปัจจัยที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการผลิตและการดำเนินธุรกิจในภาวะการแข่งขันที่รุนแรง คือ ต้นทุน คุณภาพ การบริการ และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งคุณภาพที่สำคัญของแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น คือ ความสะอาด จะต้องไม่มีฝุ่นผงหรือสิ่งปนเปื้อนเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากจะส่งผลต่อการเชื่อมต่อนั่นส่วนและวงจรทางไฟฟ้าภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการทำความสะอาดแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวในอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับนาโนได้ โดยกระบวนการพลาสมานั้นสามารถควบคุมได้ง่าย ราคาถูก และไม่ปล่อยสารพิษหรือสารเคมีที่เป็นอันตรายกับผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้กระบวนการพลาสมา ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติเปียก (Wettability) ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในยึดติดของพื้นผิวผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย [1] ซึ่งหลักการของพลาสมา คือ ก๊าซที่สภาวะอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า อนุภาคของก๊าซจะแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน จากนั้นไอออนจะไปทำลายหรือสร้างพันธะของสิ่งแปลกปลอมจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เพื่อเตรียมพื้นผิวสู่กระบวนการถัดไป [2]

บริษัทกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นเป็นหลัก และผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะต้องผ่านกระบวนการพลาสมาเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งจากการสำรวจปัญหาพบว่าลูกค้ามีความต้องการผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริษัทกรณีศึกษาต้องวางแผนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ทำให้กระบวนการพลาสมาจะต้องเพิ่มกำลังการผลิตตามแผนการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการที่

จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการพลาสมา และหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการพลาสมามีกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นและที่สำคัญผลิตภัณฑ์ต้องมีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า

งานวิจัยที่ศึกษากระบวนการพลาสมาและการควบคุมคุณภาพเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดย Borooj et al. [3] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารประกอบ Carbon Fiber/Epoxy ในกระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศ โดยทำการปรับพารามิเตอร์ ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน จากผลการวิจัยพบว่าทั้ง 3 ปัจจัยนั้นมีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับ Mandolino et al. [1] ได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงในแนวเฉือน โดยผ่านกระบวนการพลาสมา ปัจจัยที่สนใจจะศึกษา ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงในแนวเฉือน นอกจากนี้ Pizzomi et al. [4] ยังได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดของก๊าซในกระบวนการพลาสมา เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนทานของกาวต่อแรงดึงในแนวเฉือนและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ พบว่า การใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอนร่วมกันจะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงในแนวเฉือนมากกว่า การใช้ก๊าซออกซิเจนเพียงอย่างเดียว และการใช้ก๊าซอาร์กอนจะทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการพลาสมามีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

การวัดคุณภาพหลังกระบวนการพลาสมาในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากคุณสมบัติเปียก (Wettability) โดยทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Water Contact Angle) ซึ่ง Luque-Agudo et al. [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการพลาสมาที่มีผลต่อความสามารถในการยึดติดของ Polylactic Acid (PLA) โดยกระบวนการพลาสมาจะใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอน จากนั้นทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ จากผลพบว่าก่อนกระบวนการพลาสมาพื้นผิวของ PLA มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำประมาณ 70 องศา ถึง 80 องศา และเมื่อผ่านกระบวนการพลาสมา พื้นผิวของ PLA มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเกือบ 30 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ กระบวนการ

พลาสติกโดยใช้ก๊าซอาร์กอนและออกซิเจนมีผลทำให้ค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าลดลง และ Kapica et al. [6] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของรอยต่อระหว่างพื้นผิวของยางสังเคราะห์ที่มีชื่อทางการค้าคือ SBS กับ กาว Polyurethane โดยผ่านกระบวนการพลาสติก ซึ่งจะทดสอบด้วยวิธีการลอกในแนวนอน และมีความสัมพันธ์กับค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ โดยเมื่อค่าความหนาแน่นของกาวต่อแรงดึงมากจะทำให้ค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำที่น้อย เนื่องจากพื้นผิวถูกปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี ทำให้มีคุณสมบัติเปียกมากขึ้น ซึ่งจากผลพบว่าก๊าซที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของกาวต่อแรงดึงมากที่สุด คือ ก๊าซออกซิเจนและการใช้ก๊าซออกซิเจนจะให้ส่งผลให้มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าน้อยที่สุด

จากการศึกษางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสติกแบบสูญญากาศ ได้แก่ เวลาในการพลาสติก กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำทั้ง 4 ปัจจัยมาเป็นปัจจัยในการทดลองโดยมีตัวแปรตอบสนองเป็นค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ ซึ่งเป็นการวัดคุณภาพของกระบวนการพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน

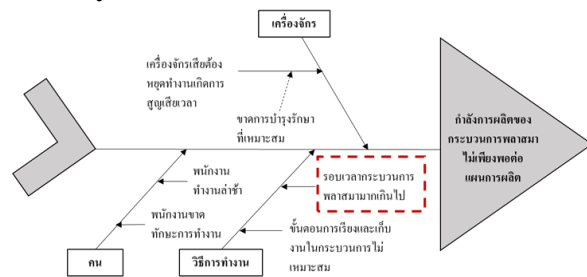
2. การศึกษาปัญหาที่พบในกระบวนการพลาสติก

ปัญหาที่พบในกระบวนการพลาสติก คือ ในปี พ.ศ. 2565 ลูกค้านี้มีความต้องการผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริษัทต้องวางแผนการผลิตเพิ่มมากขึ้น และจากการคำนวณกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติกในปัจจุบัน พบว่าไม่เพียงพอสำหรับความต้องการของลูกค้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องหาวิธีการเพิ่มกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติก เพื่อรองรับแผนการผลิตการผลิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากกำลังการผลิตไม่เพียงพอจะทำให้บริษัทกรณีศึกษาส่งมอบงานให้ลูกค้าไม่ทันตามแผนการผลิตที่วางไว้ ส่งผลให้บริษัทสูญเสียนายได้กว่า 22,485,000 บาทต่อวัน

3. การวิเคราะห์สาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติก

จากการพิจารณาโดยใช้แผนภูมิแกงปลา ร่วมกับทีมงานที่รับผิดชอบทั้งวิศวกรกระบวนการ วิศวกรคุณภาพ

และหัวหน้าฝ่ายผลิตเฉพาะส่วน ทำให้ได้สาเหตุและปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติก แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์สาเหตุที่กำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติกไม่เพียงพอ

จากแผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้กำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติกไม่เพียงพอ พบว่ามี 3 สาเหตุหลัก ได้แก่ เครื่องจักร คน และวิธีการทำงาน สาเหตุจากเครื่องจักร คือ เครื่องจักรเสียดังหยุดทำงานเนื่องจากขาดการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม แก้ไขโดยแจ้งให้หัวหน้าฝ่ายซ่อมบำรุงกำหนดช่วงเวลาการตรวจสอบและซ่อมบำรุงเครื่องจักรให้พร้อมใช้งานอย่างสม่ำเสมอ สาเหตุจากคน คือ พนักงานขาดทักษะในการทำงาน สามารถฝึกอบรมและจัดทำเอกสารการปฏิบัติงานที่ถูกต้องเพื่อให้มีเข้าใจมากขึ้น และสาเหตุจากวิธีการทำงาน คือ ขั้นตอนการเรียงงานเข้าเครื่องจักรไม่เหมาะสม ทำให้พนักงานทำงานล่าช้า แก้ไขโดยจัดสภาพการทำงานให้เหมาะสม หรือปรับปรุงวิธีการทำงานให้เกิดการเคลื่อนไหวน้อยที่สุด ส่วนสาเหตุที่ผู้วิจัยสนใจนำมาศึกษา คือ เวลาในการพลาสติกที่มากเกินไป เนื่องจากเวลาส่งผลต่อกำลังการผลิตของกระบวนการโดยตรง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการลดเวลาในการพลาสติก เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต โดยการปรับพารามิเตอร์เวลาของเครื่องพลาสติกเป็นวิธีการที่ควบคุมได้ง่ายที่สุด แต่อาจจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า เวลาในการพลาสติกมีผลต่อกระบวนการพลาสติก โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะวัดจากมูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ และในปัจจุบันกระบวนการพลาสติกของบริษัทกรณีศึกษามีค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำอยู่ที่ประมาณ 10-15 องศา ซึ่งน้อยกว่าข้อกำหนดของลูกค้าที่กำหนดว่าต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ให้ผู้วิจัยต้องการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการลดเวลาในการพลาสมาเพื่อให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำไม่เกินจากลูกค้ากำหนดและให้ได้ค่าใกล้เคียงกับปัจจุบัน และจากการคำนวณตามแผนการผลิตต้องลดเวลาในการพลาสมาปัจจุบันคือ 16 นาที ให้เหลือ 8 นาที กำลังการผลิตของกระบวนการพลาสมาจึงจะเพียงพอต่อแผนการผลิตที่เพิ่มขึ้น

4. การกำหนดตัวแปรตอบสนองต่อค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของชิ้นงาน

เนื่องจากเป็นข้อกำหนดของลูกค้าที่ต้องตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังกระบวนการพลาสมาด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Y) คือ ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ หรือ Water Contact Angle (WCA) โดยจะวัดด้วยเครื่องวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำยี่ห้อ Excimer รุ่น Slmage Entry 5 โดยมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.1 องศา

5. การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกแผนการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ซึ่งจะพิจารณาการกำหนดระดับปัจจัยจากประสิทธิภาพที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่สามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้

พารามิเตอร์	ช่วงของพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าได้
เวลาในการพลาสมา	มากกว่า 0 – 60 นาที
กำลังไฟฟ้า	มากกว่า 0 – 5.0 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	มากกว่า 0 – 1.0 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	มากกว่า 0 – 1.0 ลิตรต่อนาที

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพิจารณาการกำหนดระดับปัจจัยจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการปัจจุบัน โดยจะแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการปัจจุบัน

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
เวลาในการพลาสมา (นาที)	16.00
กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	3.00
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	0.20
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	0.80

จากตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการปัจจุบันซึ่งใช้เวลาในการพลาสมา 16 นาที ต้องการลดเวลาให้ไม่เกิน 8 นาที เพื่อทำให้กำลังการผลิตเพียงพอต่อแผนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงกำหนดปัจจัยระดับสูงเท่ากับ 8 นาทีและปัจจัยระดับต่ำเท่ากับ 6 นาที ในการกำหนดระดับปัจจัยของกำลังไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมา ดังนั้น จากค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าได้สูงสุดเท่ากับ 5.00 กิโลวัตต์ จึงกำหนดให้ปัจจัยระดับสูงเท่ากับ 4.00 กิโลวัตต์ และปัจจัยระดับต่ำเท่ากับ 3.00 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน ในส่วนอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนกำหนดให้ปัจจัยระดับสูงเท่ากับ 0.40 ลิตรต่อนาที และปัจจัยระดับต่ำเท่ากับ 0.20 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยจากการงานวิจัยของ Kapica et al. [6] พบว่า ก๊าซออกซิเจนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมาและลดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำได้ และ Gryta [7] ก๊าซอาร์กอนนั้นจะมีประสิทธิภาพได้จะต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม กล่าวคือ เวลาและกำลังไฟฟ้าจะต้องสมดุลกับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต้องมีความมากหรือน้อยลง จึงกำหนดให้ปัจจัยระดับกลางเท่ากับค่าปัจจุบัน คือ 0.80 ลิตรต่อนาที จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถกำหนดระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัยได้ดังตารางที่ 3

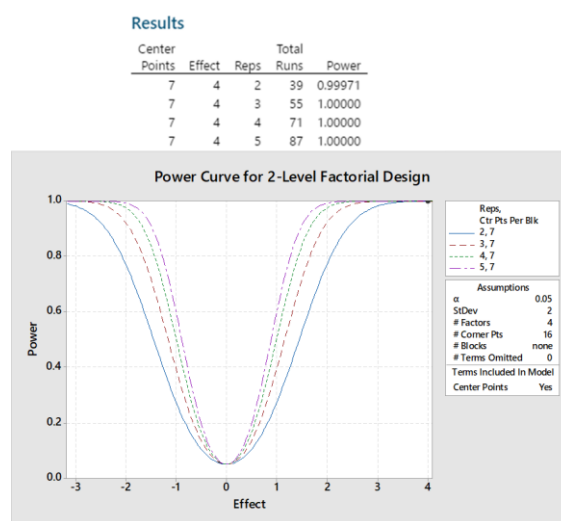
ตารางที่ 3 ปัจจัยและระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัย

ปัจจัยตัวแปร อิสระ	ระดับ				
	- α	-1	0	1	α
A คือ เวลาในการพลาสติก (นาทื)	5	6	7	8	9
B คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
C คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
D คือ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00

เมื่อผู้วิจัยได้กำหนดแผนการทดลองและปัจจัยแล้ว จึงทำการวิเคราะห์หาจำนวนการทำซ้ำที่เหมาะสม โดยใช้ Power Curve for General Full Factorial กำหนดจำนวนปัจจัยเท่ากับ 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ โดยเพิ่มจุดศูนย์กลาง จำนวน 7 การทดลอง และแทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.00 ซึ่งได้มาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุดของค่าคุณสมบัติของหยดน้ำในกระบวนการปัจจุบัน ได้ผลดังรูปที่ 2 ซึ่งจากผลพบว่าถ้าทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ซ้ำ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 จะได้ผลการทดลองที่มีค่าอำนาจการทดสอบ ($1 - \beta$) 99.971 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ซ้ำ ในงานวิจัยนี้

จากนั้นคำนวณแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยกำหนดแผนการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Designs แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ส่วนที่ 2 มีจุดศูนย์กลาง (Center Point) จำนวน 7 การทดลอง และส่วนที่ 3 จุดแกน (Axial Point) จำนวน 8

การทดลอง จำนวนทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 62 การทดลอง



รูปที่ 2 การหาจำนวนทำซ้ำที่เหมาะสมโดย Power Curve for General Full Factorial 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ

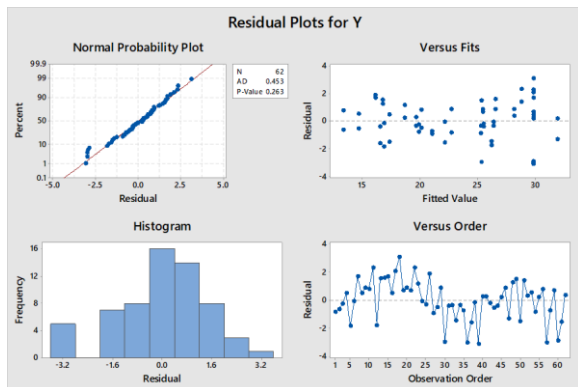
6. การทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการทดลองตามแผนการทดลอง Central Composite Designs และทดลองตาม Run Order จำนวนทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง เก็บข้อมูลจำนวนทั้งหมด 62 ครั้ง โดยจะปรับพารามิเตอร์ของเครื่องพลาสติกตามลำดับแผนการทดลอง หลังจากทำการทดลองในแต่ละการทดลองแล้ว จะนำชิ้นงานไปวัดค่าคุณสมบัติของหยดน้ำที่พื้นผิวของชิ้นงานทันที โดยทำการบันทึกค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) คือ ค่าคุณสมบัติของหยดน้ำ

7. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 18 เลือก Analyze Response Surface Design โดยใช้วิธีการ Stepwise เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติของหยดน้ำ (Y) โดยเริ่มจากการทำการวิเคราะห์ความค่าความคลาดเคลื่อนตามสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยกราฟการกระจายตัวของค่าความ

คลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของ Y ได้ผลการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่ามัมส์ผัดหน้า (Y)

จากกราฟการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของ Y สามารถสรุปตามสมมติทั้ง 4 ข้อ ดังนี้

1. จากกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ
2. จากกราฟ Residual plot VS Fitted value พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอยู่รอบเส้นศูนย์ของกราฟ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์
3. จากกราฟ Residual vs Fitted Value พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนไม่เป็นรูปลำโพง ความกว้างของแถบค่อนข้างคงที่ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่
4. จากกราฟ Residual vs Observation Order พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีรูปแบบ (Pattern) ที่แน่นอน แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน

หลังจากการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน พบว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปตามสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อโดยใช้วิธีการคัดเลือกปัจจัยนำเข้าด้วยวิธี Stepwise กำหนดให้ค่า Alpha to Enter เท่ากับ 0.15 และค่า Alpha to Remove เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรม Minitab ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังรูปที่ 4

Response Surface Regression: Y versus A, B, C, D

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	1842.47	167.497	69.15	0.000
Linear	4	1274.88	318.719	131.57	0.000
A	1	514.66	514.664	212.46	0.000
B	1	411.26	411.255	169.77	0.000
C	1	266.49	266.492	110.01	0.000
D	1	82.47	82.466	34.04	0.000
Square	4	723.54	180.886	74.67	0.000
A*A	1	280.28	280.281	115.71	0.000
B*B	1	309.49	309.492	127.76	0.000
C*C	1	249.52	249.523	103.01	0.000
D*D	1	97.77	97.774	40.36	0.000
2-Way Interaction	3	52.23	17.409	7.19	0.000
A*D	1	7.13	7.125	2.94	0.093
B*C	1	29.84	29.838	12.32	0.001
B*D	1	15.26	15.263	6.30	0.015
Error	50	121.12	2.422		
Lack-of-Fit	13	39.05	3.004	1.35	0.228
Pure Error	37	82.07	2.218		
Total	61	1963.58			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.55639	93.83%	92.47%	91.25%

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ามัมส์ผัดหน้า (Y)

ในการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit Test) ของค่ามัมส์ผัดหน้า (Y) โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติ (Statistic Hypothesis) สำหรับการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ ดังนี้

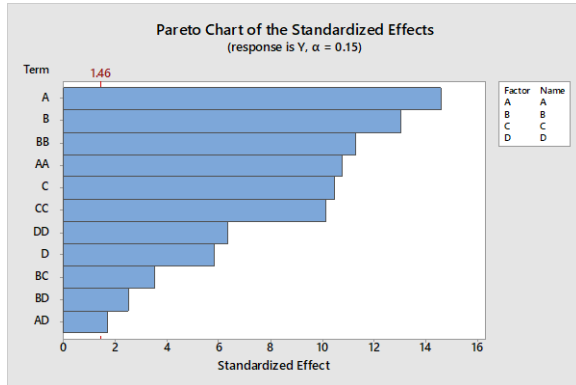
สมมติฐานหลัก (H_0) คือ สมการเหมาะสมแล้ว

สมมติฐานรอง (H_1) คือ สมการขาดความเหมาะสม

จากรูปที่ 4 ผลของการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ โดยดูจากค่า P-Value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.228 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นแสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ (H_0) จึงสรุปได้ว่ารูปแบบของสมการเหมาะสมแล้ว

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธีพหุคูณตอบสนองจากรูปที่ 4 และค่าผลกระทบมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อค่ามัมส์ผัดหน้าจากรูปที่ 5 สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมา ได้แก่ ปัจจัยพจน์กำลังสองของ A ปัจจัยพจน์กำลังสองของ B ปัจจัยพจน์กำลังสอง

ของ C ปัจจัยพจน์กำลังสองของ D อันตรกิริยาระหว่าง AD อันตรกิริยาระหว่าง BC และ อันตรกิริยาระหว่าง BD มีผลต่อค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) อย่างมีนัยสำคัญ

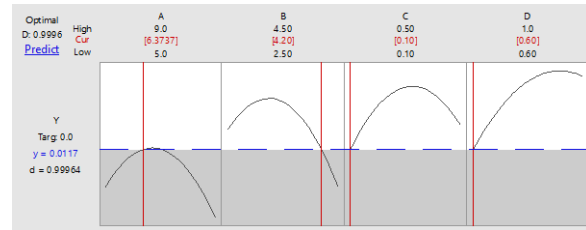


รูปที่ 5 พาเรโตของค่าผลกระทบมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y)

หลังจากการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองทำให้ได้สมการถดถอย (Regression) เพื่อใช้พยากรณ์ค่าที่เป็นไปได้ของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 1

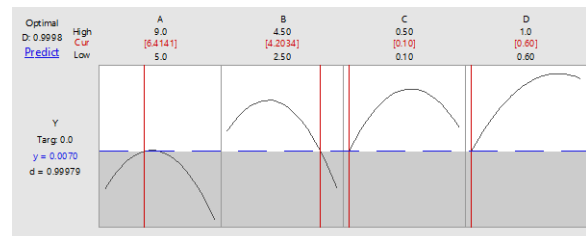
$$\begin{aligned} \hat{y} = & -288.3 + 32.54A + 54.02B + 216.5C \\ & + 211.6D - 2.214A^2 - 9.305B^2 \\ & - 208.9C^2 - 130.8D^2 - 4.72AD \\ & - 19.31BC + 13.81BD \end{aligned} \quad (1)$$

จากสมการถดถอยที่ได้ในสมการที่ 1 โดยการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นใช้เครื่องมือ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเป็นไปตามข้อกำหนดลูกค้า และเนื่องจากค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่มีค่าน้อยจะแสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมาที่ดีขึ้นและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงกำหนดค่า Y เป็นค่าเป้าหมาย (Target) มีค่าเท่ากับ 0 โดยได้ผลดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ค่า Target = 0

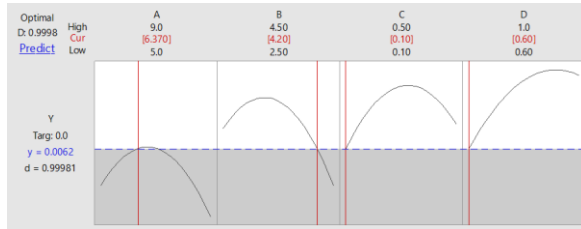
จากผลพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย คือ ปัจจัย A เวลาในการพลาสมาเท่ากับ 6.4141 นาที ปัจจัย B กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4.2034 กิโลวัตต์ ปัจจัย C อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และปัจจัย D อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที แต่เนื่องจากเครื่องพลาสมาสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เพียงทศนิยม 2 ตำแหน่ง จึงกำหนดให้ระดับปัจจัย C และ D คงที่เท่ากับ 0.10 และ 0.60 ลิตรต่อนาที พร้อมกับกำหนดให้ระดับปัจจัย B เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ B = 4.20 C = 0.10 และ D = 0.60

จากผลที่กำหนดให้ระดับปัจจัย B เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ ระดับปัจจัย C เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และระดับปัจจัย D เท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที จะได้ระดับปัจจัย A เท่ากับ 6.3737 นาที เนื่องจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้เพียงทศนิยมสองตำแหน่ง จึงต้องทำหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัย A ระหว่างค่าเท่ากับ 6.37 และ 6.38 นาที โดยจะเลือกจากค่าที่ทำให้ค่าพยากรณ์ของ Y มีค่าน้อยสุด ดังนั้นจากรูปที่ 8 กำหนดให้ระดับปัจจัย A เท่ากับ 6.37 นาที จะให้ค่าพยากรณ์ของ Y

เท่ากับ 0.0062 องศา ซึ่งให้ค่าพยากรณ์ของ Y ที่น้อยกว่า การกำหนดให้ระดับปัจจัย A เท่ากับ 6.38 นาที ที่ให้ค่า พยากรณ์ของ Y เท่ากับ 0.0210 องศา ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ A = 6.37 B = 4.20 C = 0.10 และ D = 0.60



รูปที่ 9 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ A = 6.38 B = 4.20 C = 0.10 และ D = 0.60

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) มีค่าน้อยที่สุด ได้แก่ เวลาในการพลาสมา (A) เท่ากับ 6.37 นาที กำลังไฟฟ้า (B) เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (C) เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ อาร์กอน (D) เท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที แสดงดังตารางที่ 4 และเมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว เพื่อยืนยันผล การทดลองว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น ทำให้มุมสัมผัสของ หยดน้ำมีค่าน้อยกว่า 30 องศาตามข้อกำหนดของลูกค้า หรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบในกระบวนการผลิต จำนวน 32 ตัวอย่าง พบว่าได้ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของหยดน้ำเท่ากับ 10.038 องศา และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.066 องศาและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้โดยใช้วิธีทดสอบสมมติฐาน ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสของหยดน้ำ ตามสมการที่ 2 และ สมการที่ 3

$$H_0: \mu_y = 30 \quad (2)$$

$$H_1: \mu_y < 30 \quad (3)$$

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ Y มีค่าน้อยที่สุด

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
A คือ เวลาในการพลาสมา (นาที)	6.37
B คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	4.20
C คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	0.1
D คือ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	0.6

เนื่องจากไม่ทราบความแปรปรวนที่แท้จริงของ ประชากร จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมมติฐานของ ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) ด้วยวิธี T-Test จะได้ผลดัง ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของ หยดน้ำ (Y) โดยวิธีการ T-Test

N	Mean	StDev	SE Mean	95% Upper Bound	T-Value	P-Value
32	10.038	1.066	0.188	10.357	-105.98	0.000

จากตารางที่ 5 พบว่าค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของหยดน้ำจะ มีค่าไม่เกิน 10.357 องศา ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าที่มุมสัมผัสของ หยดน้ำ (Y) ต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา

8. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการพลาสมาโดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อ กระบวนการพลาสมา มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ เวลาในการ พลาสมา กำลังไฟฟ้าของเครื่องพลาสมา อัตราการไหลของ ก๊าซออกซิเจน และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน จากนั้น จึงได้ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของจุด

แพคทอเรียลเต็มรูป ส่วนของจุดศูนย์กลาง และส่วนของจุดแกน และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมาและการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) มีค่าน้อยที่สุด ได้แก่ เวลาในการพลาสมา (A) เท่ากับ 6.37 นาที กำลังไฟฟ้า (B) เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (C) เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (D) เท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที ซึ่งจากการยืนยันผลการทดลองของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.038 องศา ผลการวิเคราะห์การทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ย พบว่าค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของหยดน้ำจะมีค่าไม่เกิน 10.357 องศา ด้วยระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าที่มุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) ต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา

จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพลาสมาที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำไม่เกิน 30 องศา ส่งผลให้ได้เวลาในการพลาสมาเท่ากับ 6.37 นาที ซึ่งลดลงจากกระบวนการปัจจุบันที่มีเวลาในการพลาสมาเท่ากับ 16 นาทีต่อรอบ ทำให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น 52.97 เปอร์เซ็นต์ หรือเพิ่มขึ้นจาก 1,141,088 ชิ้นต่อวัน เป็น 3,000,150 ชิ้นต่อวัน

9. กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณบริษัท ทรนศึกษาที่เอื้อเฟื้อข้อมูล วัตถุดิบและเครื่องมือในการทดลอง เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Mandolino, L. Cassettari, M. Pizzorni, S. Saccaroand and E. Lertora, "A design-of experiments approach to estimate the effect of plasma treatment parameters on the mechanical resistance of adhesive-bonded joints," *Journal of Manufacturing Processes.*, vol. 67, pp. 177-194, 2021.
- [2] อัจฉราภรณ์ บุญมา, "อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด," วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2556.
- [3] M. B. Borooj, M. A. Shoushtari, A. Haji and E. N. Sabet, "Optimization of plasma treatment variables for the improvement of carbon fibers/epoxy composite performance by response surface methodology," *Composites Science and Technology.*, vol. 128, pp. 215-221, 2016.
- [4] M. Pizzorni, C. Gambaro, E. Lertora and C. Mandolino, "Effect of process gases in vacuum plasma treatment on adhesion properties of titanium alloy substrates," *International Journal of Adhesion and Adhesives.*, vol. 86, pp. 113-122, 2018.
- [5] V. Luque-Agudo, M. Hierro-Oliva, A. M. Gallardo-Moreno and M. L. González-Martín, "Effect of plasma treatment on the surface properties of polylactic acid films," *Polymer Testing.*, vol. 96, 2021.
- [6] R. Kapica, J. Tyczkowski, J. Balcerzak, M. Makowski, J. Sielski and E. Worwa, "Enhancing adhesive joints between commercial rubber (SBS) and polyurethane by low-pressure plasma surface modification," *International Journal of Adhesion and Adhesives.*, vol. 95, 2019.
- [7] M. Gryta, "Application of polypropylene membranes hydrophilized by plasma for water desalination by membrane distillation," *Desalination.*, vol. 515, 2021.