



การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิววงจรยึดหุ่นด้วยพลาสมา

ณรงค์ศักดิ์ จรุงเสนาะ ช่อแก้ว จตุรานนท์* และ วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมานุกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน โทรศัพท์ 0-2470-9175 อีเมล: chorkaew.jat@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.05.005

รับเมื่อ 6 กันยายน 2560 ตอรับเมื่อ 25 ตุลาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 22 พฤษภาคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหุ่นเป็นชิ้นส่วนประกอบหลักของหน้าจอแบบสัมผัสของโทรศัพท์มือถือในปัจจุบัน ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ต้องควบคุมคุณภาพไม่ให้เกิดฝุ่นละอองจับบนพื้นผิววงจร การทำความสะอาดพื้นผิววงจรด้วยพลาสมาเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานได้ดี อย่างไรก็ตามการปรับตั้งสถานะในการทำความสะอาดที่ไม่เหมาะสมทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการไหม้ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิววงจรยึดหุ่นด้วยพลาสมา โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ปริมาณก๊าซอาร์กอน กำลังของคลื่นวิทยุ และระยะเวลาในการพลาสมา และมีตัวแปรตอบสนองคือ ค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวชิ้นงาน จากผลการทดลองที่ได้พบว่า สถานะที่เหมาะสมในกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา คือ ปริมาณก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 8 ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อนาที กำลังของคลื่นวิทยุเท่ากับ 140 วัตต์ และความเร็วในการพลาสมาเท่ากับ 35 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยการใช้สถานะในการทำความสะอาดนี้ ค่ามัมสัมผัสที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 30 องศา ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่ทำให้เกิดชิ้นงานไหม้ และเมื่อนำสถานะในการทำความสะอาดนี้ไปประยุกต์ใช้ในสายการผลิตจริงพบว่า สามารถลดตำหนิประเภทชิ้นงานไหม้ลงจากเดิม 24.8% เหลือเพียง 3.21% ของ 3 ล้านชิ้นที่ผลิตได้ต่อเดือน หรือลดลงจาก 744,000 ชิ้น เหลือ 96,300 ชิ้น

คำสำคัญ: การทำความสะอาด, การไหม้, มุมสัมผัส, วงจรยึดหุ่น, พลาสมา

Optimization of Surface Cleaning Process for Flexible Printed Circuit Substrates Using Plasma

Narongsak Jornsanoth, Chorkaew Jaturanonda* and Viboon Tangwarodomnukun

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2470-9175, E-mail: chorkaew.jat@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.05.005

Received 6 September 2017; Accepted 25 October 2017; Published online: 22 May 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Flexible printed circuits are currently a key component of touch screen panels for mobile phones. The parts need a strict quality control to prevent dust from covering the circuit surface. Plasma cleaning of electronic circuits is an effective method to clean off small dust particles from the work surface. However, the improper setup of plasma cleaning process can lead to the burnt surface as a result. Hence, this research applies a technique of experimental design to determine an optimal condition of plasma cleaning process for flexible printed circuit substrates. Factors examined in the experiments were the amount of argon, power of radio frequency and speed of plasma cleaning. A response variable was the contact angle of deionized liquid on the workpiece surface. According to the experimental results, the optimal cleaning condition comprised of using 8 dm³/min argon gas, 140 W radio frequency and 35 mm/s cleaning speed. By using this condition, the contact angle was in the range of 10 to 30 degrees, which caused no burning on the workpiece surface. After applying such condition to a production line, the burning defect can be reduced from 24.8% to 3.21% of 3 million parts produced per month, which is equivalent to the reducing of 744,000 to 96,300 defectives found monthly.

Keywords: Cleaning, Burning, Contact Angle, Flexible Printed Circuit, Plasma

Please cite this article as: N. Jornsanoth, C. Jaturanonda, and V. Tangwarodomnukun, "Optimization of surface cleaning process for flexible printed circuit substrates using plasma," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 567-576, Jul.-Sep. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

การทำความสะอาดชิ้นงานในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความจำเป็นและมีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จที่ได้ การทำความสะอาดนอกจากจะช่วยขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานแล้ว ยังช่วยลดโอกาสในการเกิดความเสียหายอื่นๆ เช่น การลัดวงจรทางไฟฟ้า หรือการขัดขวางการส่งสัญญาณของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [1] ผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลเสียทั้งต่อต้นทุนในการผลิตคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และความเชื่อมั่นของลูกค้า

กระบวนการทำความสะอาดวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปนิยมใช้สารเคมีในการทำทำความสะอาด เนื่องจากมีราคาไม่แพงและสามารถทำความสะอาดชิ้นงานพร้อมกันได้ ในปริมาณมาก [1] อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีในการทำทำความสะอาดไม่สามารถขจัดฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กมาก และมีแรงยึดเกาะสูงบนผิวชิ้นงานได้ อีกทั้งการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตยังก่อให้เกิดต้นทุนทางสิ่งแวดล้อมที่สูง ซึ่งผกผันกับแนวคิดของการผลิตสมัยใหม่ที่เน้นเรื่องความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานด้วยพลาสมาเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดอนุภาคปนเปื้อนขนาดเล็กที่เกาะบนผิวชิ้นงานได้ดี อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลภาวะในกระบวนการผลิตที่ต่ำกว่าการทำความสะอาดด้วยสารเคมีแบบดั้งเดิม [2]

การทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยพลาสมาอาศัยพลังงานของก๊าซที่แตกตัวเป็นประจุในการทำลายพันธะของสิ่งแปลกปลอมที่เกาะบนผิวชิ้นงานออกไป [3], [4] นอกจากนี้ประจุของออกซิเจนในพลาสมายังสามารถรวมตัวกับอะตอมหรือโมเลกุลของของสิ่งแปลกปลอม ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซที่มีค่าแรงดันไอค่อนข้างสูง ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้สิ่งแปลกปลอมต่างๆ เกิดการระเหยตัวออกจากผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็วและให้ผิวชิ้นงานที่มีความสะอาดมากขึ้น

จากการสำรวจกระบวนการทำความสะอาดผิววงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นสำหรับใช้ประกอบเป็นหน้าจอสัมผัสที่มีชื่อของบริษัทการศึกษาแห่งหนึ่งพบว่า พื้นผิว

วงจรมักมีฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ไม่สามารถทำความสะอาดด้วยการใช้สารเคมีทั่วไปได้ ทางบริษัทจึงได้นำกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมามาใช้ อย่างไรก็ตามตามชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากทำความสะอาดด้วยพลาสมามักพบตำหนิประเภทชิ้นงานใหม่ ดังนั้นผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในการทำความสะอาดผิววงจรแบบยืดหยุ่นด้วยพลาสมาและการหาสภาวะในการทำทำความสะอาดที่เหมาะสมจึงเป็นประเด็นที่ควรแก่การศึกษาเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

การวิจัยเรื่องการควบคุมคุณลักษณะของพลาสมาและผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยพลาสมาได้มีการศึกษามาอย่างต่อเนื่อง Tamman *et al.* [3] ทำการศึกษาการควบคุมกำลังของพลาสมาโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และการปรับความหนาแน่นของพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ จากการศึกษาพบว่า กำลังของพลาสมาเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการปรับค่าแรงดันที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้พลาสมาที่เกิดขึ้นมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากการควบคุมกำลังของพลาสมาผ่านการปรับระดับของค่าความถี่ Yi *et al.* [4] ศึกษาพลาสมาในชั้นบรรยากาศสำหรับใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวชิ้นงาน 3 ชนิด ได้แก่ อินเดียมดีบุกออกไซด์ พอลิคาร์บอนเนต และวัสดุจำพวกเงิน Yi พบว่า ก๊าซที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนสามารถให้อัตราการปรับสภาพผิวชิ้นงานได้ดีที่สุดเนื่องจากอะตอมออกซิเจนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาได้ดีที่สุด

การตรวจวัดระดับความสะอาดของผิวชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากฉายด้วยพลาสมาสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของผิวชิ้นงาน หรือการตรวจวัดทางอ้อมผ่านการพิจารณาความสามารถในการเปียก (Wetability) ของพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งวิธีหลังนี้เป็นการตรวจวัดที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ Rakmak และ Sribusayakul [5] ได้ทำการตรวจวัดระดับความสะอาดของพื้นผิวกระจกที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมาจากความสามารถในการเปียกของผิวชิ้นงาน โดยทำการวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวชิ้นงาน

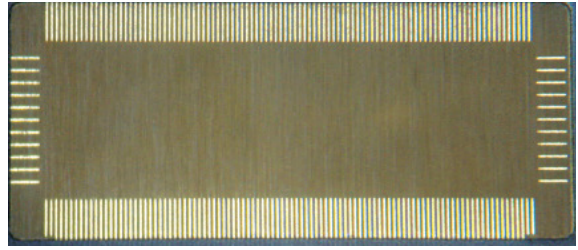
จากการทดลองที่ได้พบว่า ผิวชิ้นงานมีความสะอาดมากขึ้นเมื่อค่ามัมสัมผัสลดลงและแปรผันตามระยะเวลาในการฉายผิวชิ้นงานด้วยพลาสมา นอกจากนี้ Sooksaeen [6] และ Faibut [7] ได้ระบุว่าค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำที่แตกต่างกันบนผิวชิ้นงานเป็นผลมาจากลักษณะและความหยาบของพื้นผิว โดยพื้นผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นพื้นผิวที่มีค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า 90 องศา ปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้หยดน้ำสามารถกลิ้งออกจากผิวชิ้นงานได้โดยง่าย ในขณะที่พื้นผิวที่มีมุมสัมผัสของหยดน้ำน้อยกว่า 90 องศา จัดเป็นพื้นผิวชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งทำให้ผิวชิ้นงานชนิดนี้มีความเปียกและน้ำสามารถเกาะอยู่บนผิวได้ง่าย Lee et al. [8] ได้ใช้วิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวกระจกเคลือบด้วยฟิล์มออกไซด์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมา จากการทดลองที่ได้พบว่าการระยะเวลาในการทำความสะอาดที่นานขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าลดลง ซึ่งแปรผันตามระดับความสะอาดบนผิวกระจกเคลือบ

จากผลงานวิจัยในอดีตต่างๆ ทำให้ทราบว่า ปริมาณของก๊าซที่ใช้เพื่อให้เกิดเป็นพลาสมา ระดับกำลังของพลาสมา และระยะเวลาในการทำความสะอาด เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับของการปรับสภาพผิวชิ้นงาน ซึ่งรวมถึงผลข้างเคียงอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นเช่นการไหม้ของชิ้นงานหากได้รับพลังงานจากพลาสมาที่มากเกินไป เมื่อพิจารณาพร้อมกับปัญหาชิ้นงานใหม่ที่พบในบริษัท ทัศนศึกษา งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำความสะอาดวงจรยึดหุ่นด้วยพลาสมาและใช้วิธีการตรวจวัดระดับความสะอาดด้วยการวัดค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ ผลที่ได้จากการวิจัยนี้นอกจากจะช่วยให้เกิดความเข้าใจถึงพฤติกรรมในการทำความสะอาดวงจรยึดหุ่นด้วยพลาสมาให้มากขึ้นแล้ว สภาวะในการทำความสะอาดที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและลดต้นทุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นวงจรยึดหุ่นของบริษัท ทัศนศึกษา ได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชิ้นงานที่ต้องทำความสะอาดในงานวิจัยนี้คือวงจรยึดหุ่น



รูปที่ 1 แผ่นวงจรยึดหุ่นพอลิอิมิด

ที่ผลิตจากพอลิอิมิด (Polyimide) ซึ่งมีลักษณะเหมือนฟิล์มบาง พื้นผิวของแผ่นวงจรประกอบไปด้วยลายวงจรทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับรองรับการวางอุปกรณ์ไอซีด้วยเครื่องจักรในสายการผลิต ชนิดของก๊าซที่ใช้ในงานวิจัยนี้สำหรับการแตกตัวเป็นพลาสมาคือ ก๊าซออกซิเจนผสมอาร์กอน

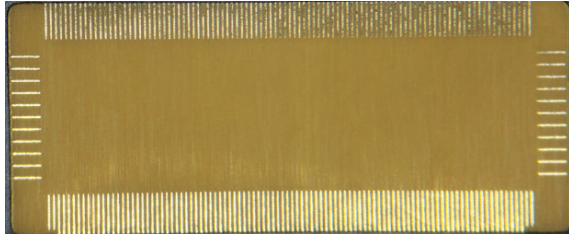
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในการทำความสะอาดผิววงจรด้วยพลาสมานั้น อนุภาคของพลาสมาจะทำการกัด (Etching) สิ่งสกปรกที่เกาะติดอยู่ตามตำแหน่งของการวางอุปกรณ์ไอซีให้หลุดออกไป เครื่องทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ชื่อ APP Plasma รุ่น ILP400-60CDH

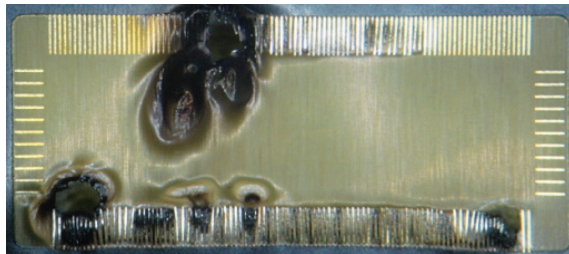
2.3 การวิเคราะห์สภาพของปัญหา

จากสำรวจกระบวนการทำความสะอาดวงจรยึดหุ่นด้วยพลาสมาในบริษัท ทัศนศึกษาพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดมีทั้งหมด 3 ล้านชิ้นต่อเดือน และพบปัญหาชิ้นงานใหม่ในกระบวนการทำความสะอาดคิดเป็น 24.8% จากจำนวนของเสียทั้งหมด นอกจากนี้ การปรับตั้งสภาวะในการทำความสะอาดของบริษัท ทัศนศึกษา ยังไม่มีค่ามาตรฐานที่ชัดเจน ซึ่งอาจส่งผลให้ชิ้นงานใหม่ในระหว่างการทำ ความสะอาดได้ สมมติฐานที่เป็นไปได้ อาจมาจากการปรับแรงให้พลังงานของพลาสมาทำปฏิกิริยากับผิวชิ้นงานที่รุนแรงมากเกินไป

ลักษณะของตำหนิที่เกิดจากกระบวนการทำความสะอาดผิววงจรด้วยพลาสมาสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะ



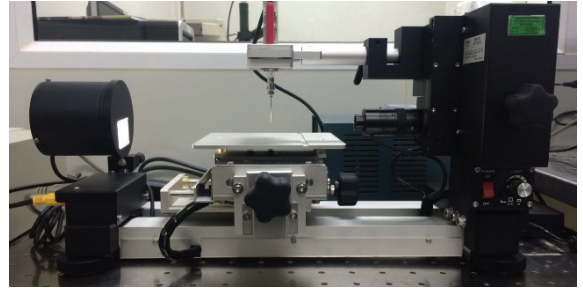
รูปที่ 2 ผิดชิ้นงานเกิดการลอก



รูปที่ 3 ชิ้นงานเกิดการไหม้รุนแรงภายหลังการทำความสะอาดด้วยพลาสมา

ได้แก่ ผิดชิ้นงานเกิดการลอก และชิ้นงานเกิดการไหม้รุนแรง ภายหลังการทำความสะอาดด้วยพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ผิดชิ้นงานที่เกิดการลอกเป็นผลมาจากพลาสมาได้กัดผิวของวงจรลึกลงไปและทำลายสารตัวนำไฟฟ้าตามหลักคุณลักษณะนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ชิ้นงานที่มีตำหนิเหล่านี้สามารถหลุดลอดผ่านไปยังกระบวนการประกอบจนเสร็จสมบูรณ์และถูกตรวจพบในส่วนของ การวัดค่าทางไฟฟ้าและกลายเป็นของเสียในการผลิต

ชิ้นงานที่มีการไหม้รุนแรงเกิดจากผิวชิ้นงานที่ได้รับพลังงานจากพลาสมาจนทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการหลุดลอกและเกิดการไหม้อย่างรุนแรง ซึ่งสามารถพบเห็นเป็นรอยเขม่าสีดำบนผิวชิ้นงาน ลักษณะตำหนิเช่นนี้สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่ไม่สามารถนำชิ้นงานที่มีตำหนิออกก่อนกระบวนการประกอบได้เนื่องจากเป็นสายการผลิตแบบต่อเนื่อง ชิ้นงานจึงถูกตรวจพบและนำออกจากสายการผลิตในขั้นตอนของการวัดค่าทางไฟฟ้า แม้การตรวจวัดงานเสียของผิววงจรยึดหยุ่นสามารถกระทำได้ที่ขั้นตอนการวัดค่าทางไฟฟ้าภายหลังการประกอบกับไอซีต่างๆ บนวงจรแล้ว



รูปที่ 4 ชุดเครื่องมือสำหรับวัดค่ามัมส์ฝัสดของหยดน้ำ

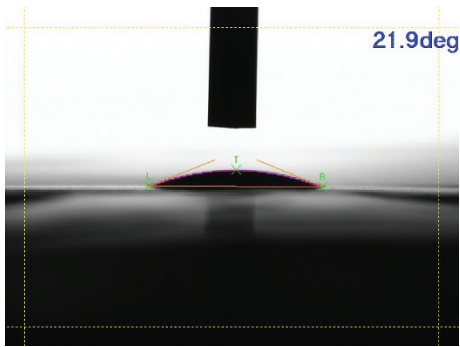
หากแต่ต้นทุนของอุปกรณ์ไอซีมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับต้นทุนของวงจร ดังนั้นหากผิววงจรที่ประกอบกับไอซีมีการไหม้เกิดขึ้นแล้ว แผ่นวงจรทั้งชิ้นจะถือเป็นงานเสียและไม่สามารถนำกลับมาแก้ไขซ้ำได้

2.4 การตรวจวัดผิวชิ้นงานด้วยการวัดค่ามัมส์ฝัสดและการทดลองเบื้องต้น

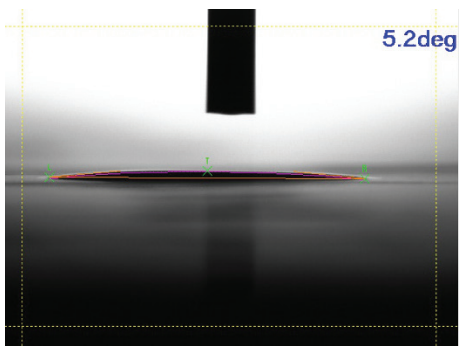
หยดน้ำที่เกาะบนผิวชิ้นงานที่มีลักษณะและความหนาของผิวที่แตกต่างกันจะให้ค่ามัมส์ฝัสดที่แตกต่างกัน ดังนั้นผิววงจรที่สกปรกและสะอาดจึงส่งผลต่อค่ามัมส์ฝัสดของหยดน้ำที่ไม่เหมือนกัน ในงานวิจัยนี้ หยดน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) ถูกปล่อยจากเข็มที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นวงจรยึดหยุ่นที่ซึ่งติดตั้งรูปที่ 4 การวัดค่ามัมส์ฝัสดของหยดน้ำทำได้โดยการวัดเงาของหยดน้ำที่เกาะบนผิวชิ้นงานจากภาพถ่าย

จากข้อกำหนดของลูกค้า ค่ามัมส์ฝัสดของหยดน้ำบนผิวชิ้นงานที่ได้ภายหลังการทำความสะอาดด้วยพลาสมาต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา อย่างไรก็ตาม ขอบเขตล่างของค่ามัมส์ฝัสดยังไม่ได้ถูกกำหนดอย่างชัดเจน ทำให้การควบคุมสภาวะในการทำความสะอาดและสภาพผิวชิ้นงานที่ได้ภายหลังการทำความสะอาดจึงไม่เป็นมาตรฐานและมักพบตำหนิเรื่องชิ้นงานไหม้ เพื่อหาช่วงของค่ามัมส์ฝัสดที่ไม่ก่อให้เกิดงานเสีย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสุ่มชิ้นงานในสายการผลิตจริงมาทั้งหมด 50 ชิ้น และทำการวัดค่ามัมส์ฝัสดก่อนที่จะส่งไปทำการประกอบกับอุปกรณ์ไอซีจนเสร็จสมบูรณ์เพื่อวัดค่าทางไฟฟ้าต่อไป

จากการทดสอบที่ได้พบว่า ชิ้นงานสามารถจำแนกออก



รูปที่ 5 ลักษณะหยดน้ำและค่ามุมสัมผัสสำหรับผิวชิ้นงานปกติ

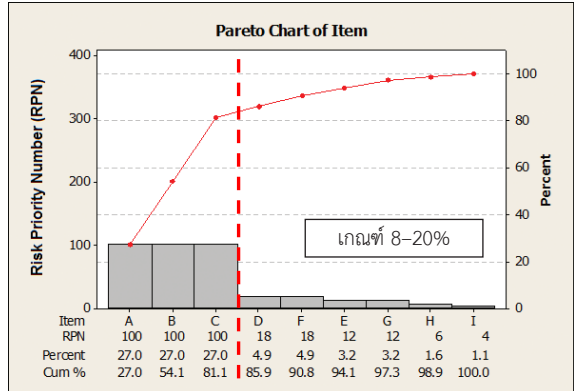


รูปที่ 6 ลักษณะหยดน้ำและค่ามุมสัมผัสสำหรับผิวชิ้นงานใหม่

เป็นชิ้นงานดีและชิ้นงานเสียในขั้นตอนของการตรวจวัดด้วยค่าทางไฟฟ้า โดยชิ้นงานดีทำให้ค่ามุมสัมผัสอยู่ในช่วง 10 ถึง 30 องศา (30 องศาเป็นค่าสูงสุดที่ยอมรับได้) ดังรูปที่ 5 ส่วนชิ้นงานเสียมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า 10 องศา ดังแสดงในรูปที่ 6

2.5 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและการออกแบบการทดลอง

สาเหตุของการไหม้บนผิววงจรยึดหุ่นภายหลังการทำความสะอาดด้วยพลาสมาเกิดได้จากหลายปัจจัย จากการทบทวนงานวิจัยในอดีต การพิจารณาข้อจำกัดต่างๆ ของเครื่องพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis) ทำให้ทราบว่าสาเหตุที่ส่งผลต่อการไหม้บนชิ้นงานมี 9 สาเหตุที่เป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาจากแผนภาพพาเรโตโดยใช้กฎ 80-20 ประกอบกับค่าลำดับ



- A คือ ปริมาณอาร์กอนไม่เหมาะสม
- B คือ ปริมาณคลื่นวิทยุ RF ไม่เหมาะสม
- C คือ ความเร็วในการพลาสมาไม่เหมาะสม
- D คือ สิ่งสกปรกบนพื้นผิวชิ้นงาน
- E คือ ผิวหน้าสัมผัสชิ้นงานเปลี่ยนแปลง
- F คือ ลำดับขั้นตอนการแก้ไขปัญหา (Work Instruction)
- G คือ โหลดจำนวนชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ
- H คือ ทักษะการควบคุมเครื่องจักรขณะทำงาน
- I คือ การซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องจักร

รูปที่ 7 สาเหตุที่ทำให้เกิดการไหม้ของชิ้นงานในการทำความสะอาดวงจรยึดหุ่นด้วยพลาสมา

คะแนนความเสี่ยง หรือ Risk Priority Number (RPN) ในการตัดสินใจ ปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้คือ ปริมาณก๊าซอาร์กอน กำลังของคลื่นวิทยุ และความเร็วของชิ้นงานที่เคลื่อนที่ผ่านพลาสมาในระหว่างการทำทำความสะอาด สำหรับปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่ผสมกับก๊าซอาร์กอนกำหนดให้คงที่ที่ 40 cm³/min และตั้งระยะความสูงในการพลาสมาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ปัจจัยที่ทั้งสองนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิตเครื่องพลาสมาและไม่สามารถปรับใช้เป็นค่าอื่นได้

ปัจจัยหลักที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ปัจจัย และเพื่อให้จำนวนการทดลองมีไม่มากจนเกินไปจึงได้กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ โดยเกณฑ์การเลือกค่าปัจจัยเป็นไปตามช่วงของค่าที่เคยปรับตั้งในสายการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1 ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้คือ 40

การทดลอง การวิเคราะห์ผลทางสถิติใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยกำหนดค่า α ไว้ที่ 0.05

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

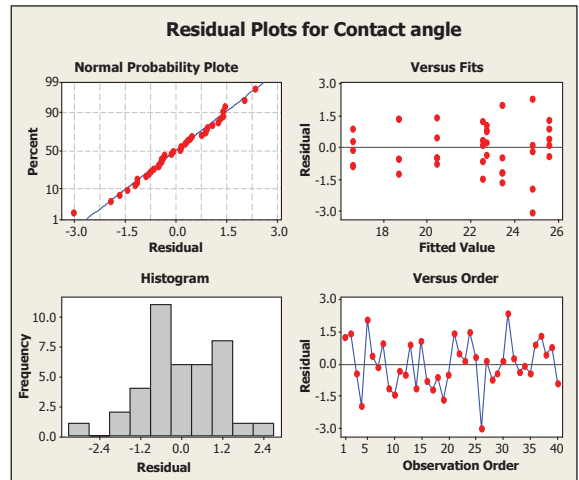
ปัจจัย (Factor)	ระดับของปัจจัย (Level)	
	ต่ำ	สูง
ปริมาณก๊าซอาร์กอน	5 dm ³ /min	8 dm ³ /min
กำลังของคลื่นวิทยุ	100 W	140 W
ความเร็วในการพลาสมา	20 mm/s	40 mm/s

หมายเหตุ: สภาวะเดิมที่ใช้ในการทำความสะอาด คือ ปริมาณก๊าซอาร์กอน 10 dm³/min กำลังของคลื่นวิทยุ 200 W และความเร็วในการพลาสมา 50 mm/s

3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์เริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้อง ของการทดลอง 3 ลักษณะ ได้แก่ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (Normal Distributed) การตรวจสอบเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Constant Variance) และการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) แสดงในรูปที่ 8 จากการตรวจสอบข้างต้นพบว่าค่า P-Value ทั้ง 3 การทดสอบมีค่ามากกว่า 0.05 คือค่าส่วนตกค้างของการแจกแจงปกติมีการเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง ช่วงของกลุ่มข้อมูลเหมาะสม เสถียรภาพของค่าความแปรปรวนคงที่ มีความสม่ำเสมอ ไม่มีความผิดปกติของกลุ่มข้อมูล และความเป็นอิสระของข้อมูลพบว่าไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ ดังนั้นจากการทดลองมีความเชื่อถือได้ สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ต่อไป

จากตารางที่ 2 พิจารณาผลการทดลองหลังจากการลดปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานใหม่ โดยเบื้องต้นสังเกตจากความผันแปรของปัจจัยมีความผันแปรหรือไม่อย่างไร เมื่อพิจารณาพบว่า ค่า R-sq = 82.93 เปอร์เซ็นต์ หมายถึง ถ้าหากมีค่าความผันแปรในระบบทั้งหมด 100 หน่วย สามารถอธิบายความผันแปรได้ 82.93 หน่วย ที่เหลืออีก 17.07 ไม่สามารถอธิบายได้โดยสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากค่าความคาดเคลื่อนในการทดลอง และค่า R-sq Adjust = 85.44 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการทดลองทั้งหมดมีข้อมูลให้



รูปที่ 8 การตรวจสอบสมมติฐานจากค่ามุมสัมผัส

ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจสูง สามารถอธิบายค่าความผันแปรเพื่อทำการวิเคราะห์ได้ การเก็บข้อมูลเพื่อทำการประมวลผลอยู่ในระดับที่ดี พิจารณาว่า P-Value ของเทอม Main Effect ทุกตัวมีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่อค่ามุมสัมผัสอันเป็นสาเหตุการไหม้ของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ

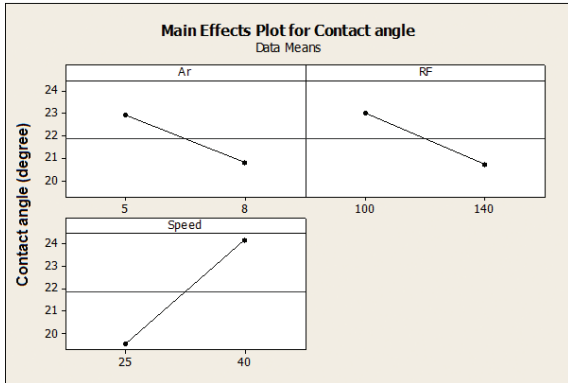
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลอง

Factor	P-Value	Coef
Constant		43.581
Ar (A)	0.000	-0.70500
RF (B)	0.000	-0.22558
Speed (C)	0.000	-0.31633
RF*Speed (B*C)	0.000	0.00518

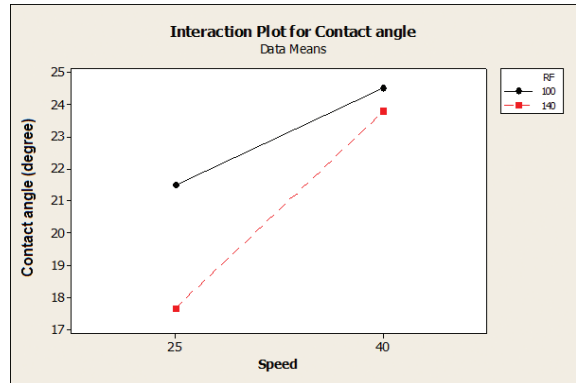
S = 1.193, R-sq = 82.93%, R-sq (adj) = 85.44

หมายเหตุ: Ar คือ ปริมาณก๊าซอาร์กอน RF คือ กำลังของคลื่นวิทยุ 200 W และ Speed คือ ความเร็วในการพลาสมา

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า ปริมาณก๊าซอาร์กอนที่ 8 dm³/min ให้ค่ามุมสัมผัสต่ำกว่าที่ 5 dm³/min โดยเฉลี่ยประมาณ 2-3 องศา เนื่องจากการเพิ่มปริมาณก๊าซอาร์กอนที่มากขึ้นส่งผลให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนมากขึ้นและสามารถดึงอนุภาคฝุ่นที่เกาะบนพื้นผิวชิ้นงานได้



รูปที่ 9 อิทธิพลของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย



รูปที่ 10 อิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย

ดีขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกำลังความถี่วิทยุที่ใช้ในการทำความสะอาดพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสลดลง ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับหลักการทฤษฎี [4], [5], [8] กล่าวคือ เมื่อก๊าซได้รับพลังงานจากคลื่นวิทยุมากขึ้น พลาสติกจะเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงมากขึ้นกับผิวชิ้นงาน สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพลาสติก พบว่า เมื่อความเร็วในการพลาสติกลดลงส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสที่ได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวชิ้นงานที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มพลาสติกที่ช้าลง ทำให้ชิ้นงานได้รับพลังงานจากพลาสติกเป็นระยะเวลาที่นานมากกว่าการใช้ความเร็วในการทำความสะอาดด้วยพลาสติกที่สูง ลักษณะเช่นนี้ทำให้พลาสติกเกิดปฏิกิริยากับพื้นผิวของชิ้นงานที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสที่น้อยลง นอกจากนี้ ค่ามุมสัมผัสทั้งหมดที่ได้จากทุกสภาวะในการทดลองยังอยู่ในช่วงของค่ามุมที่ยอมรับได้ในกระบวนการทำความสะอาดผิววงจรยึดหุ่นด้วยพลาสติก (10 ถึง 30 องศา)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างกำลังของความถี่วิทยุและความเร็วในการพลาสติก ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่า ปัจจัยร่วมดังกล่าวส่งผลกระทบต่อค่ามุมสัมผัสอันเป็นสาเหตุการไหม้ของผิวชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ กราฟปัจจัยร่วมระหว่างกำลังของความถี่วิทยุและความเร็วในการพลาสติก ดังรูปที่ 10 พบว่าการใช้กำลังของความถี่วิทยุที่ 140 W และความเร็วที่ 25 mm/s ให้ค่ามุมสัมผัสโดยเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม การปรับตั้งสภาวะในการทำความสะอาดที่ให้

ค่ามุมสัมผัสที่น้อยเกินไปก็มีความเสี่ยงที่ผิวชิ้นงานอาจเกิดการไหม้จากพลาสติกที่ถ่ายเทพลังงานในปริมาณที่สูงเกินไปสู่ผิวชิ้นงานได้ เช่น การใช้ปริมาณก๊าซอาร์กอนที่มาก ใช้กำลังของความถี่วิทยุที่สูง และใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ชิ้นงานผ่านกลุ่มพลาสติกที่ช้า ดังนั้นการหาสภาวะในการทำความสะอาดผิววงจรยึดหุ่นด้วยพลาสติกที่เหมาะสมเพื่อลดโอกาสในการเกิดตำหนิต่างๆ โดยเฉพาะการไหม้บนผิวชิ้นงาน จึงเป็นขั้นตอนที่ต้องดำเนินการต่อไป

การหาสภาวะในการทำความสะอาดที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม MINITAB โดยกำหนดให้ค่ามุมสัมผัสเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 20 องศา ซึ่งเป็นค่ากลาง และกำหนดช่วงของการวิเคราะห์อยู่ในช่วงของข้อมูลตั้งแต่ค่ามุมสัมผัส 10 ถึง 30 องศา จากผลการคำนวณที่ได้พบว่า ค่าปัจจัยที่ได้เป็นเลขที่มีทศนิยมซึ่งไม่สามารถปรับตั้งได้จริงในกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสติกในงานวิจัยนี้ ดังนั้นผลการคำนวณที่ได้จึงถูกปัดค่าเป็นเลขจำนวนเต็มและค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ ปริมาณก๊าซอาร์กอน 8 dm³/min กำลังของคลื่นวิทยุ 100 W และความเร็วในการพลาสติก 25 mm/s อย่างไรก็ตาม ระดับความเร็วในการพลาสติกที่ 25 mm/s นี้มีค่าน้อยกว่าความเร็วเดิมที่ 50 mm/s อยู่มากและส่งผลกระทบต่อตรงต่อกำลังการผลิต ระดับความเร็วในการพลาสติกจึงถูกปรับให้สูงขึ้นเป็น 35 mm/s ทำให้กำลังของคลื่นวิทยุเปลี่ยนไปเป็น 140 W ดังแสดงในรูปที่ 11 การใช้สภาวะในการทำความสะอาดแผ่น



New D 0.93142	High Cur Low	Ar	8.0 [8.0] 5.0	RF	140.0 [140.0] 100.0	Speed	40.0 [35.0] 25.0
Composite Desirability 0.93142							
Contact Targ: 20.0 y = 20.6858 d = 0.93142							

รูปที่ 11 ผลตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม

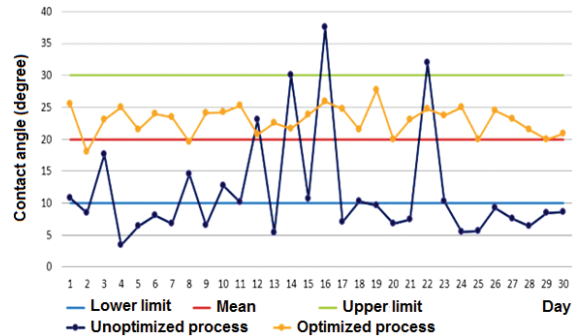
วงจรรีดหยุนด้วยพลาสติก ทำให้ได้มุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวชิ้นงานที่ 20.69 องศา

เพื่อเป็นการยืนยันผลการคำนวณที่ได้จาก Response Optimizer สถานะในการทำความสะอาดใหม่จึงได้นำไปใช้ในสายการผลิตจริงและทำการเก็บชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากในสายการผลิตจำนวน 30 ตัวอย่าง ชิ้นงานทั้งหมดถูกนำไปตรวจวัดค่ามุมสัมผัสและค่าทางไฟฟ้าของแผ่นวงจร ผลการตรวจวัดที่ได้นำไปทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยทางสถิติด้วยวิธี T-test

จากผลการทดสอบทางสถิติ ดังตารางที่ 3 พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.847 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่ามุมสัมผัสที่ได้เมื่อใช้สถานะในการทำความสะอาดใหม่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 20.69 องศา การกำหนดสมมติฐานหลักที่ให้ค่ามุมสัมผัสต้องมีค่ามากกว่าค่ากลางของช่วงมุมที่ไม่เกิดผลกระทบต่อพื้นผิวชิ้นงานเป็นการกำหนดที่ทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าผิวชิ้นงานจะไม่เกิดการไหม้ดังที่พบได้ในชิ้นงานที่มีค่ามุมสัมผัสน้อยๆ

ตารางที่ 3 ผลการยืนยันผลการทดลอง Test of mu = 20.69 vs < 20.69

Variable	N	Mean	SE Mean	Upper Bound	T	P
Contact Angle	30	21.143	0.435	21.883	1.04	0.847



รูปที่ 12 ค่ามุมสัมผัสก่อนและหลังการปรับปรุง

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ได้ก่อนและหลังการใช้สภาวะในการทำความสะอาดใหม่ในรอบ 30 วัน จากรูปสังเกตเห็นได้ว่า ค่ามุมสัมผัสที่ได้จากการใช้สภาวะการทำความสะอาดใหม่มีค่าอยู่ในช่วงควบคุมคือ 10 ถึง 30 องศา นอกจากนี้ระดับการแปรปรวนของค่ามุมสัมผัสที่ได้นั้นต่ำกว่าที่พบก่อนการปรับปรุงอีกด้วย เมื่อทำการตรวจติดตามผลภายหลังการใช้สภาวะในการทำความสะอาดใหม่พบว่าจำนวนชิ้นงานเสียที่เกิดจากการไหม้ลดลงจาก 24.8% เหลือเพียง 3.21% ของ 3 ล้านชิ้นที่ผลิตได้ต่อเดือน หรือลดลงจาก 744,000 ชิ้น เหลือ 96,300 ชิ้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาสภาวะในการทำความสะอาดผิววงจรรีดหยุนด้วยพลาสติกโดยพิจารณาปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการ 3 ปัจจัยคือ ปริมาณก๊าซอาร์กอน กำลังของคลื่นวิทยุ และความเร็วในการพลาสติก การตรวจวัดผิวชิ้นงานที่ได้ภายหลังการทำความสะอาดด้วยพลาสติกอาศัยการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวชิ้นงาน ค่ามุมสัมผัสที่ยอมรับได้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 10 ถึง 30 องศา จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การใช้ปริมาณก๊าซอาร์กอนที่ 8 dm³/min กำลังของคลื่นวิทยุที่ 140 W และความเร็วในการพลาสติก 35 mm/min สามารถควบคุมค่ามุมสัมผัสอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้โดยมีค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสที่ประมาณ 20 องศา เมื่อนำสภาวะในการทำความสะอาดนี้ไปใช้ในสายการผลิตจริงพบว่า จำนวนชิ้นงานที่เกิดการไหม้ลดลงจาก 24.8% เหลือ

เพียง 3.21% ของ 3 ล้านชิ้นที่ผลิตได้ต่อเดือน หรือลดลงจาก 744,000 ชิ้น เหลือ 96,300 ชิ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. B. Durkee, “Open-top cleaning equipment for vapor degreasing,” in *Cleaning with Solvents: Methods and Machinery*, pp. 1–65, 2014.
- [2] B. Dong, M. S. Driver, I. Emesh, R. Shaviv, and J. A. Kelber, “Surface chemistry and fundamental limitations on the plasma cleaning of metals,” *Applied Surface Science*, vol. 384, pp. 294–297, 2016.
- [3] A. Tamman, P. Saeung, and Y. Tirawanichakul, “Effect of plasma power control by varied-voltage frequency and pulse density modulation at atmospheric pressure,” *Journal of Burapha Science*, vol. 17, pp. 167–173, 2012.
- [4] C. H. Yi, Y. H. Lee, and G. Y. Yeom, “The study of atmospheric pressure plasma for surface cleaning,” *Journal of Surface and Coatings Technology*, vol. 171, pp. 237–240, 2003.
- [5] S. Rakmak and C. Sribusayakul, “Development of small plasma system for surface modification and cleaning,” in *Proceedings of the 5th Conference on Rajamangala University of Technology National*, Bangkok, Thailand, pp. 83–89, 2014.
- [6] P. Sooksaen, “Smart surfaces with nanotechnology,” *Journal of Burapha Science*, vol. 16, pp. 124–130, 2011.
- [7] N. Faibut, “Effect of surface roughness on wettability of daimond-like carbon thin films,” in *Proceedings of the Conference on Graduate Research*, Khon Koen University, Thailand, pp. 323–329, 2013.
- [8] E. S. Lee, J. H. Choi, and H. K. Baik, “Surface cleaning of indium tin oxide by atmospheric air plasma treatment with the steady-state airflow for organic light emitting diodes,” *Journal of Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 4973–4978, 2007.