

การพัฒนาเทคนิคการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิงสำหรับชิ้นส่วน ผลิตภัณฑ์แอ็กทูเอเตอร์

Development of Electropolishing Technique for Actuator Component Product

ศุภลักษณ์ คำรัมย์ และ อรรถพล สมทคุปต์

Supaluk Kamrungsee and Uttapol Smutkupt

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ. ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University

239 HuayKaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

E-mail: Supaluk.k@gmail.com, Telephone Number: 089-5523488

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิง (Electropolishing) สำหรับชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์แอ็กทูเอเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยก่อนหน้านี้อินซันส่วนที่ทำการศึกษาได้ใช้กระบวนการเคลือบนิเกิลบนผิวผลิตภัณฑ์แอ็กทูเอเตอร์ เพื่อทำความสะอาดผิวผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นการใช้ระยะเวลาที่นาน ผู้วิจัยจึงได้ทดลองนำกระบวนการอิเล็กโทรโพลิซิงมาใช้ในการทำความสะอาดผิวผลิตภัณฑ์ โดยวัดจากค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ (Liquid Particle Counter; LPC) เพื่อให้ได้ค่า LPC ที่น้อยที่สุดเหมาะสมตามเกณฑ์ความต้องการของ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการนำเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาประยุกต์ใช้ในการทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิง ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ 1.ความเข้มข้นของสารเคมี 2.อุณหภูมิ 3.กระแสไฟฟ้า 4.เวลาในการขัดผิว ซึ่งจากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) ได้มีการกำหนดระดับของปัจจัยต่างๆ เป็น 3 ระดับ มีการทดลอง 2 ซ้ำ และมีการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง ซึ่งจากผลการทดลองและโปรแกรมทางสถิติพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพลิซิง คือ อุณหภูมิ และเวลาในการขัดผิวโดยค่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม คือ 90°C และ 40 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะให้ค่าที่น้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) คือ 357,523 count/part และให้ค่าความหยาบผิวเท่ากับ 469.12 nm

ABSTRACT

This study developed electropolishing technique for actuator or arm, an important component of hard disk drive. The previous technique for cleaning product surface was nickel coating process which was time consuming. Therefore, the electropolishing technique was used to study cleaning performance by measuring Liquid Particle Counter (LPC) value. The lowest and acceptable LPC was explored. Design of Experiment technique was used to analyze the effective factors in this study. Chemical concentration, temperature, electric intensity and polishing time were tested as the considered factors. For Box-Behnken design, the factors were defined in 3 levels with 2 replicates and 54 samples. The result showed that the effective factors were temperature and time. The 90 degrees

and 40 minutes, optimum temperature and time respectively, produced the significant lowest LPC value (357,523 count/part) at 469.12 nm surface roughness ($p < 0.05$).

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) และชิ้นส่วนประกอบผลิตภัณฑ์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อภาคการส่งออกของไทยมาเป็นเวลายาวนาน โดยในการส่งออกเครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบอันเป็นสินค้าส่งออกอันดับหนึ่งของไทยนั้น มากกว่าครึ่งมาจากอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จากความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะให้ความสำคัญในส่วนประกอบสำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือ ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์แอ็คทูเอเตอร์ หรือ อาร์ม



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของแอ็คทูเอเตอร์ ซึ่งจะถูกนำไปประกอบเป็นส่วนหนึ่งของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปัจจุบันมีการทำความสะอาดผิวผลิตภัณฑ์ด้วยการเคลือบผิวด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนการดำเนินการที่สูงมาก และมีอันตรายต่อผู้ปฏิบัติการเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า มีกระบวนการทำความสะอาดผิวอีกหลายวิธีนอกเหนือจากการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์และยังทำให้ค่า Liquid Particle Counter (LPC) มีค่าที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ของลูกค้า ซึ่งค่า LPC ที่มีค่าน้อย จะยังเป็นผลดีต่อการนำชิ้นงานไปใช้ในกระบวนการต่อไป ซึ่งค่า LPC ในทางอุตสาหกรรม เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจนำกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชมา

ใช้ในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการทำความสะอาดผิวผลิตภัณฑ์แอ็คทูเอเตอร์ เพื่อลดเวลาในกระบวนการทำความสะอาดผิวและลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์แอ็คทูเอเตอร์โดยกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิช เป็นกระบวนการขัดผิวโดยใช้สารเคมีและไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการ โดยมีขั้วแอโนดหรือขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนในระบบ เป็นชิ้นงานโลหะที่เราต้องการขัดผิว ส่วนขั้วแคโทดหรือขั้วลบ ซึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนในระบบ โดยส่วนมากเราจะเลือกใช้โลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ขัดผิว หรือเลือกโลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ยาก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

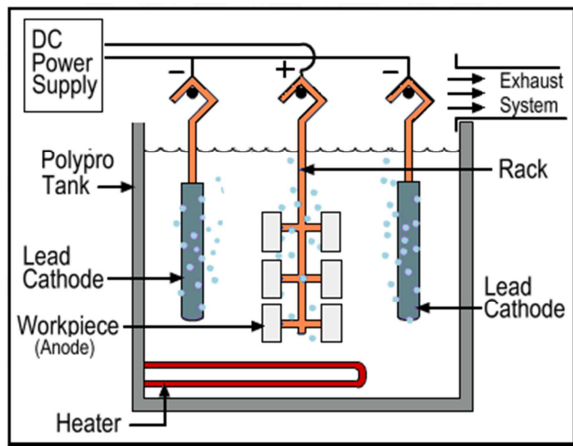
งานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 ทฤษฎีได้แก่

2.1 การขัดผิวโลหะด้วยอิเล็กโทรโพลิช

เป็นกระบวนการขัดผิว และทำความสะอาดผิวที่ต้องการความเรียบสูง ชิ้นงานที่ได้ต้องสะอาด งานวิจัยนี้เลือกกระบวนการนี้เนื่องจากชิ้นงานที่ต้องการ เป็นชิ้นงานที่มีลักษณะเฉพาะต้องการผิวที่เรียบและมีความสะอาดสูง ซึ่งการขัดผิวเชิงกลไม่สามารถให้ผลลัพธ์ตามลักษณะที่ต้องการได้ กระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้ โลหะที่สามารถขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชได้นั้น ควรเป็น โลหะที่มีเฟสเดียว (Single-Phase Alloy) ถ้าเป็นโลหะที่มีหลายเฟส (Multi-Phase Alloy) จะทำการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชได้ยากหรือบางครั้งอาจขัดไม่ได้เลย ตัวอย่างโลหะที่สามารถขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิช ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) อะลูมิเนียม (Aluminium) ทองแดง (Copper) แมกนีเซียม (Magnesium) เซอร์โคเนียม (Zirconium) และไททาเนียม (Titanium) เป็นต้นสำหรับการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชประกอบด้วย เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply), ภาชนะบรรจุ (Electro polishing Bath), ขั้วแอโนด (Anode), ขั้วแคโทด (Cathode) และสารเคมีที่

ใช้ในการกัดผิว (Electrolyte)

เครื่องจ่ายไฟ (Digital Power Supply) ที่ใช้ในงานกัดผิวต้องเป็นเครื่องที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น หรืออาจต้องมีตัวแปลงกระแส (Rectifier) เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงเสียก่อน วัสดุที่ใช้สำหรับทำภาชนะบรรจุ (Electro polishing Bath) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อาจจะเป็นแก้ว (Glass), เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel), โพลีเอธิลีน (Polyethylene) หรือโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ และระดับของการกัดผิว ถ้าหากเป็นในระดับห้องปฏิบัติการ ภาชนะบรรจุที่เป็นแก้วคงจะเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะสามารถทนสารเคมีได้หลากหลายชนิด สำหรับในระดับอุตสาหกรรม ภาชนะที่ทำจากโพลีเมอร์อาจจะสะดวกในการใช้งานมากกว่า ในกรณีที่มีการเลือกใช้ภาชนะที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม คงเป็นเพราะมีข้อดีตรงที่ภาชนะบรรจุจะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดด้วย



รูปที่ 2 ภาพองค์ประกอบสำหรับการกัดผิวด้วย อิเล็กโทรโพลิชิงที่ควรมี [1]

สำหรับขั้วแอโนดหรือขั้วซึ่งทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนในระบบ รูปที่ 2 จะหมายถึงชิ้นงาน โลหะที่เราต้องการกัดผิวนั่นเอง ส่วนขั้วแคโทดหรือขั้วซึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนในระบบ โดยส่วนมากเราจะเลือกใช้โลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้กัดผิว หรือเลือกโลหะที่สูญเสีย

อิเล็กตรอนได้ยาก (ความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนต้องดูจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะนั้นๆ) ขั้วแคโทดนิยมใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันนี้ ได้แก่ แพลทินัม ตะกั่ว เหล็กกล้าไร้สนิม ฯลฯ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับราคา และลักษณะการใช้งาน ในการทดลองนี้ใช้แผ่นเหล็กกล้า เนื่องจาก เหล็ก มีค่า E^0 สูงกว่าแพลทินัม ทำให้ปล่อยอิเล็กตรอนได้เร็วกว่า เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า แพลทินัม แผ่นเหล็กกล้าใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่า ทำให้ลดเวลาในการผลิต องค์ประกอบสุดท้ายคือ สารเคมีที่ใช้ในการกัดผิว ซึ่งต้องมีสมบัติเป็นกรดหนืด (Viscous Acid) เช่น กรดไฮเปอร์คลอริก ($HClO_4$), กรดซัลฟูริก (H_2SO_4), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4), หรืออาจเพิ่มความหนืดด้วยการเติมกลีเซอรอล (Glycerol)

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชิง นั้นมีอยู่หลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นชนิด/รูปร่างของชิ้นงาน โลหะ ความหนาของผิวชิ้นงานก่อนการกัดผิว ขั้วแคโทด อัตราส่วนระหว่างขนาดของชิ้นงาน และขั้วแคโทด ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบ อุณหภูมิ เวลา หรือแม้กระทั่งการจัดระยะห่างระหว่างขั้วก็ล้วนแต่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานภายหลังการกัดผิวทั้งสิ้น

2.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน (Box-Behnken)

Box and Wilson [2] ได้นำเสนอแผนการทดลองที่ใช้ในการหาตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง คือ แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-วินสัน ซึ่งต่อมานิยมเรียกว่าแผนการทดลองประกอบศูนย์กลาง (Central Composite Design) หรือเรียกย่อๆว่า CCD โดยพัฒนามาจากแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีระดับของปัจจัย 2 ระดับ (2^k Factorial design) หรือแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเชิงส่วน (Fractional Factorial design) โดยเพิ่มการทดลองตามแนวแกนซึ่งเป็นจุดตามแนวแกน (axial point) จำนวนการทดลอง 2^k การทดลอง และเพิ่มการทดลองจำนวน m จุด ที่จุดศูนย์กลางของการทดลอง เพื่อใช้ในการทดสอบความเหมาะสมของตัวแบบ Fit

Test) จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด (N) เท่ากับ $2^k + 2k + m$ การทดลอง โดยจำนวนครั้งของการทดลองของแผนการทดลองแบบบล็อกซ์- เวินสัน ที่ระดับปัจจัยต่างๆ แสดงดังตามตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าที่จำนวนปัจจัยเท่าๆกัน แผนการทดลองแบบ CCD จะต้องการจำนวนการทดลองที่น้อยกว่าแผนการทดลอง 3^k แฟคทอเรียล

ตารางที่ 1 จำนวนการทดลองของแผนการทดลองแบบ CCD ที่มีจำนวนปัจจัยต่างๆ

จำนวนปัจจัย (k)	2^k	การทดลองตามแนวแกน (2k)	จำนวนซ้ำ (m)	จำนวนการทดลองทั้งหมด (N)
2	4	4	5	13
3	8	6	6	20
4	16	8	7	31
5	32	10	10	52
6	64	12	15	91

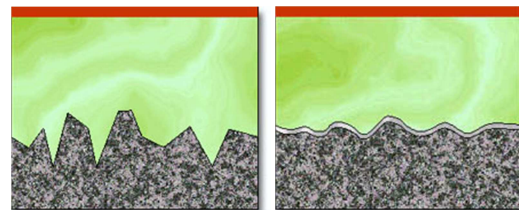
แผนการทดลองแบบ CCD โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้ระดับของปัจจัยถึง 5 ระดับ ซึ่งในการทดลองบางอย่างการที่จะเตรียมการทดลองถึง 5 ระดับ เป็นไปได้ยาก หรือไม่สามารที่จะทำได้ หรือเป็นการสิ้นเปลืองมาก ต่อมา Box and Wilson [2] ได้นำเสนอแผนการทดลองใหม่ในงานวิจัยเรื่อง การออกแบบปัจจัยสามระดับเพื่อศึกษาความแปรปรวนของปริมาณ ซึ่งต่อมานิยมเรียกแผนการทดลองดังกล่าวว่า แผนการทดลองแบบบล็อกซ์- เบินเคน (Box – Behnken Design) ซึ่งต้องการระดับของปัจจัยเพียง 3 ระดับเท่านั้น และหลังจากนั้นได้มีผู้เสนอแผนการทดลอง

แบบอื่นๆด้วยเช่นกัน แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้เท่ากับแผนการทดลองแบบ CCD และแผนการทดลองแบบบล็อกซ์- เบินเคน

3. วิธีการวิจัย

3.1 กระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิง

การขัดผิวโลหะด้วยอิเล็กโทรโพลิซิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการขัดผิวโลหะนอกเหนือจากการขัดผิวด้วยวิธีทางกล วิธีนี้นอกจากจะเหมาะกับงานโลหะที่มีรูปร่างเฉพาะที่ไม่สามารถทำการขัดผิวด้วยวิธีทางกลได้แล้ว ยังเหมาะกับงานโลหะที่ต้องการผิวเรียบสูง ผิวหน้าชิ้นงานที่ได้ต้องสะอาด และมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ยิ่งไปกว่านั้นการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิง จะมีประโยชน์อย่างมากกับงานโลหะที่ต้องการความสวยงามหรือความเงางามเป็นพิเศษตัวอย่างแสดงการเปรียบเทียบผิวของชิ้นงานก่อน และหลังการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิง แสดงดังรูปที่ 3



Before

After

รูปที่ 3 เปรียบเทียบผิวของชิ้นงานก่อน

และหลังการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิง [1]

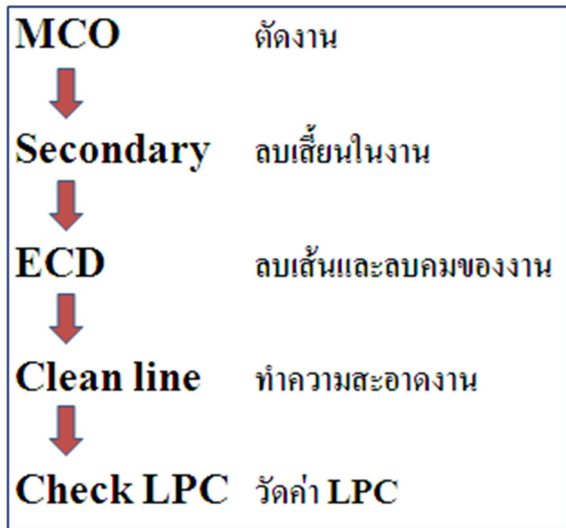
จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็น ถึงพื้นผิวชิ้นงานก่อนทำการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิงจะเห็นว่าผิวงานค่อนข้างขรุขระมีรอยหยักสูง แต่หลังการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิงพื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น

ในการทดลองนี้สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการดังนี้

สำหรับขั้วแอโนด หรือขั้วซึ่งทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนในระบบ ในการทดลองนี้จะหมายถึงชิ้นงานโลหะที่เราต้องการขัดผิวซึ่งก็คือ แอ็คทูเอเตอร์ทำจากโลหะอลูมิเนียม

ส่วนขั้วแคโทด หรือขั้วซึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนในระบบ โดยส่วนมากเราจะเลือกใช้โลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ สารเคมีที่ใช้ชุบผิว หรือเลือกโลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ ยาก ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยใช้ เหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งนี้ เลือกราคาของโลหะ และลักษณะการใช้งาน องค์ประกอบสุดท้ายคือสารเคมีที่ใช้ในการชุบผิว ซึ่งต้องมี สมบัติเป็นกรดหนืด (Viscous acid) ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยใช้ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄) เป็นสารละลายที่ใช้ใน กระบวนการทำความสะอาดผิว

3.2 ศึกษากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์แอ็ลคทูเอเตอร์อย่างละเอียด



รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนแอ็ลคทูเอเตอร์

จากรูปที่ 4 แสดงกระบวนการผลิต โดยเริ่มจากนำ แผ่นอลูมิเนียมผ่านกระบวนการตัดงาน ในแผนก (Machine Center Operator:MCO)เป็นชิ้นส่วนแอ็ลคทูเอเตอร์Secondary หลังจากได้ชิ้นงานออกมาดังรูป กระบวนการต่อมาคือ การลบเสี้ยนในชิ้นงาน หลังจากนั้น ลบเส้นและลบคมของงาน ในกระบวนการ (Electro Chemical Deposition: ECD)เป็นกระบวนการทางเคมี จากนั้นก็จะไปผ่านกระบวนการ Clean line (comb washing) เป็นการล้างเพื่อทำความสะอาดผิว หลังจากทำความสะอาดผิวแล้วก็จะส่งชิ้นงานไปยังกระบวนการวัดค่า

อนุภาคที่วัดได้ในน้ำLiquid Particle Counter (LPC) และเตรียมส่งไปกระบวนการต่อไป

3.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตผลิตภัณฑ์แอ็ลคทูเอเตอร์

จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสอบถามจาก วิศวกรโรงงานที่ดูแลกระบวนการชุบผิวชิ้นงาน ปัจจัยที่มี ผลต่อการชุบผิวโลหะด้วยอิเล็กโทรโพลีซิง มีดังนี้

- 1) ชนิด/รูปร่างของชิ้นงานโลหะ โลหะต่างชนิดกัน ใช้เวลาและสารเคมีในการชุบผิวต่างกัน
- 2) ความหยาบของผิวชิ้นงานก่อนการชุบผิว ชิ้นงานที่มีความหยาบมากจะใช้เวลาชุบผิวนานกว่า ชิ้นงานที่มีผิวหยาบน้อย
- 3) อัตราส่วนระหว่างขนาดของชิ้นงานและขั้วคาโทด มีผลกับการปล่อยและการรับอิเล็กตรอนของทั้ง 2 ขั้ว หากอัตราส่วนไม่เท่ากัน ก็ส่งผลกระทบต่อผิวของ ชิ้นงาน
- 4) ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ ชนิดของ สารเคมีที่แตกต่างกันให้ผิวของชิ้นงานที่ต่างกัน
- 5) อุณหภูมิ หากใช้อุณหภูมิสูงขึ้น การกัดกร่อนของ สารเคมีจะทำงานได้เร็วขึ้น
- 6) เวลา การใช้ระยะเวลาสั้นเกินไปจะทำให้ผิวของ ชิ้นงานถูกกัดออกไปมาก แต่หากน้อยเกินไป ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีก็จะยังไม่เริ่มทำงาน
- 7) กระแสไฟฟ้า การปล่อยกระแสไฟฟ้าสูงจะเกิด การกัดกร่อนได้เร็วกว่ากระแสไฟฟ้าต่ำ

3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการการชุบผิวผลิตภัณฑ์ แอ็ลคทูเอเตอร์

- 1) ความเข้มข้นของสารเคมี จากผลการทดลองเลือก กรดซัลฟูริกเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการชุบผิว โลหะด้วยไฟฟ้าเคมี เนื่องจากชิ้นงานเป็นอลูมิเนียม ผู้เชี่ยวชาญแนะนำให้ทำการทดลอง ไม่ควรใช้กรดที่ มีความเข้มข้นสูง ชิ้นงานอาจกัดกร่อนไปมากจน เสียรูป
- 2) อุณหภูมิ เมื่อใช้อุณหภูมิสูงสารเคมีจะเกิดปฏิกิริยา ทางเคมีได้อย่างรวดเร็ว หากใช้ต่ำจะเกิดปฏิกิริยา

ซ้ำ จึงนำปัจจัยนี้มาศึกษา เพิ่มหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม

- 3) เวลาที่ใช้ในการขัดผิว เวลาที่ใช้ในการขัดผิวโลหะด้วยอิเล็กโทรโพลิชิ่ง ให้จับเวลาตั้งแต่ปล่อยกระแสไฟฟ้าลงในกระบวนการทดลอง ยิ่งใช้เวลามากขึ้นการกัดกร่อนก็จะกัดได้มากขึ้น
- 4) กระแสไฟฟ้า ค่ากระแสมีผลต่อการกัดกร่อน เมื่อใส่ค่ากระแสมากขึ้น คือใส่ประจุเยอะขึ้นการกัดกร่อนก็ดีขึ้น เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น
- 5) ชนิด/รูปร่างของชิ้นงานโลหะ ความหยาบของผิวชิ้นงานก่อนการขัดผิวขั้วคาโทด และ อัตราส่วนระหว่างขนาดของชิ้นงานและขั้วคาโทด เนื่องด้วยชิ้นงานเป็นชนิดเดียวกันทั้งการทดลอง ชนิด/รูปร่าง และความหยาบของโลหะ ไม่มีผลต่อการทดลอง และมีการกำหนดอัตราส่วนระหว่างขนาดของชิ้นงานและขั้วคาโทดให้มีขนาดเท่ากัน จึงไม่นำมาพิจารณาในการทดลอง

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้เลือก 4 ปัจจัยในการทำการทดลองโดยแสดงค่าแต่ละปัจจัยดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย(Factors)	ระดับ		
	1	2	3
	(-1)	0	(+1)
ความเข้มข้นmol (A)	0.1	0.2	0.3
อุณหภูมิ°C (B)	70	80	90
เวลาmin (C)	20	50	60
กระแสไฟฟ้าA (D)	0.05	0.25	0.45

นำค่าปัจจัยที่ต้องการศึกษาไปทำการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกน (Box-Behnken) โดยกำหนดพารามิเตอร์ให้อยู่ในระดับต่างๆซึ่งทำการศึกษา

ทั้งหมด 4 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของสารเคมี กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลาใช้โปรแกรมMINI TAB

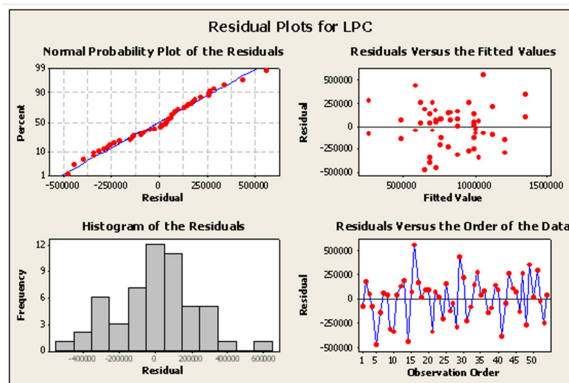
แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกน นำเสนอโดย Box and Wilson [2] เป็นแผนการทดลองที่ใช้ระดับของปัจจัย 3 ระดับที่ใช้กับตัวแปรเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นแผนการทดลองที่รวมแผนการทดลอง 2^k แฟกทอเรียลกับแผนการทดลองแบบบล็อกกลุ่มไม่สมบูรณ์ (Incomplete block design) เพื่อให้ได้จุดต่างๆในการทดลองที่เหมาะสมและเพียงพอในการหาตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง ซึ่งแต่ละปัจจัย (ตัวแปรอิสระ) จะมีระดับของปัจจัย 3 ระดับด้วยกัน ได้แก่ ระดับต่ำ (low, -) ระดับกลาง (middle, 0) และระดับสูง (high, +) โดยจะกำหนดค่าแต่ละระดับของปัจจัยด้วยตัวแปรรหัส (Code variable) คือ -1, 0, +1

ออกแบบการทดลองโดยใช้การทดลองแบบส่วนผสมกลาง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ทั้ง 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ซึ่งถ้าทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์จะต้องทำการทดลองเท่ากับ $3^4 = 81$ การทดลองซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายในการทดลองเป็นจำนวนมาก ดังนั้น จึงทำการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกน (Box-Behnken) ซึ่งจะเหลือ 27 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 54 หน่วยการทดลอง ซึ่งการกำหนดการทดลองรูปแบบสำหรับการทดลองและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองคือ ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) โดยที่จำนวนระดับเท่ากับ 3 ระดับปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” “กลาง” และ “สูง” จะแทนด้วยเครื่องหมาย “-” “0” และ “+” โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของสารเคมีเป็นปัจจัย A และประกอบไปด้วย 3 ระดับ คือ 0.1 ,0.2 และ 0.3 (หน่วย:mol) อุณหภูมิที่ใช้ในการขัดผิวเป็นปัจจัย B และประกอบไปด้วย 3ระดับ คือ 70 ,80และ 90 (หน่วย:°C) เวลาที่ใช้ในการขัดผิวเป็นปัจจัย C และประกอบไปด้วย 3 ระดับ คือ 40 ,50 และ 60 (หน่วย:นาท) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขัดผิวเป็นปัจจัย D และ

ประกอบไปด้วย 3 ระดับ คือ 0.05 ,0.25 และ 0.45 (หน่วย: A) มีการทดลองที่ค่ากลาง เพื่อวิเคราะห์หว่าแบบจำลอง ถดถอยอยู่ในรูปสมการกำลังสองหรือไม่ [2]

4. ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลของค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC)



รูปที่ 5 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC)

จากกราฟวิเคราะห์ข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง ถ้าข้อมูลที่ได้จากการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและไม่มีจุดใดออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน แสดงว่าข้อมูลส่วนตกค้างของข้อมูลค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) มีการกระจายตัวแบบปกติ

4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	D F	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	2.11E+12	2.11E+12	7.02E+11	11.01	0
Linear	2	1.46E+12	1.46E+12	7.31E+11	11.47	0
Square	1	6.43E+11	6.43E+11	6.43E+11	10.09	0.03
Lack-of-Fit	5	4.34E+11	4.34E+11	8.68E+10	1.42	0.236
Pure Error	45	2.75E+12	2.75E+12	5.88E+10	6.12E+10	
Total	53	5.29E+12				

จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า LPC สำหรับการทดลองนี้ผู้วิจัยกำหนดค่า $\alpha=0.10$ พบว่าค่า P-Value=0.00 และ Lack-of-Fit=0.00 ซึ่งน้อยกว่าค่า α แสดงว่าส่วนโค้งที่พินิจผลตอบ จึงสามารถสร้างสมการแบบจำลองกำลังสองในการทำนายค่า LPC อีกทั้งเป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นประกอบด้วยทุกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า LPC อย่างมีนัยสำคัญ ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ค่า P ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินผลกระทบ และค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทดลอง เพื่อตรวจสอบปัจจัยในช่วงความเชื่อมั่น 90% ($\alpha=0.10$)

Term	Coef	SE Coef	T	P	มี นัย - สำคัญ
Constant	936904	46107	20.32	0	-
อุณหภูมิ (B)	-			0	
เวลา (C)	245025	51549	-4.753		/
เวลา*เวลา (C*C)	30117	51549	0.584	0.56	-
	219656	69160	-3.176	0.00	3

4.3 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการขัดผิวโลหะด้วยอิเล็กโทรโพลิช

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะได้แบบจำลองถดถอยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง กับผลตอบโดยใช้ค่าจริง (Unicode) การเขียนสมการจะนำค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า LPC ซึ่งจากตารางที่ 4 จะมีค่า อุณหภูมิ (B) และ เวลา*เวลา (C²) การเขียนแบบจำลองจะต้องเพิ่ม เวลา (C) โดยมีรายละเอียดดังนี้

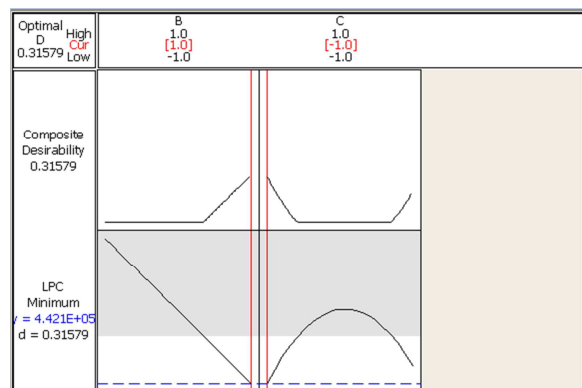
$$\hat{y}_1 = -2,744,879 - 24,502(B) + 222,668(C) - 2,197(C^2) \quad \text{---- (1)}$$

จากสมการที่ 1 เมื่อเราแทนค่าอุณหภูมิ (B) เท่ากับ 90°C และ ค่าเวลา (C) คือ 40 นาที จะให้ค่า $Y = 441,461$ เป็นค่า LPC ที่มีความเหมาะสมและทางโรงงานยอมรับได้

ดังนั้น จากแบบจำลองข้างต้น จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือ แบบจำลองและได้นำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขัดผิวโลหะด้วยอิเล็กโทรโพลิช โดยมีข้อจำกัดในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมดังนี้

ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ที่ทางโรงงานยอมรับได้อยู่ที่ 100,000-600,000

(Counts/part) โดยค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ยังมีค่าที่ยังน้อยยิ่งดี สามารถสรุปข้อจำกัดในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 4 และการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการการขัดผิวด้วยวิธีอิเล็กโทรโพลิชของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์แอ็กทูเอเตอร์สามารถใช้โปรแกรม MINITAB ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ได้ผลแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ในกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์แอ็กทูเอเตอร์

แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิชของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์แอ็กทูเอเตอร์ คือ ค่าอุณหภูมิ เท่ากับ 90°C และ ค่าเวลาที่เหมาะสมคือ 40 นาที

จากกราฟแสดงฟังก์ชัน Response Optimizer พิจารณาเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อค่า LPC จะเห็นได้ว่า เมื่อพล็อตแต่ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองจะได้ค่า

$$Y = 4.421 * 10^5$$

4.4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

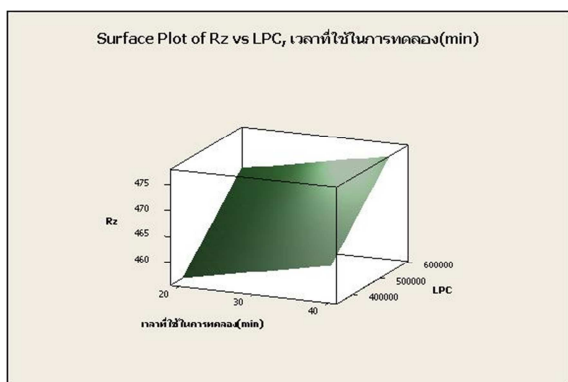
การทดลองโดยนำค่าปัจจัยที่ได้จากการคำนวณทางสถิติมาทดลองเพื่อตรวจสอบค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) อีกครั้งและนอกจากการเช็คค่า LPC แล้ว ผู้วิจัยยังได้มีการนำชิ้นงานที่ทดลองเพื่อยืนยันผลไปวัดค่าความหยาบผิวด้วยกล้อง Atomic Force Microscope (AFM) เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning Probe Microscopy หรือ SPM)

ประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรหรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5 แสดงการทดลองยืนยันผล

เวลาที่ใช้ในการทดลอง(นาที)	ค่า LPC (count/part)	ค่าความหยาบผิว (nm)
20	356,280	456.70
30	570,810	474.16
40	457,523	469.12

จากตารางเมื่อทดลองเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผิวเวลาที่ 20 นาที ให้ค่า LPC เท่ากับ 356,280 (count/part) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหยาบผิวซึ่งมีค่าเท่ากับ 456.70 nm และการทดลองเวลาที่ 30 นาที มีค่า LPC เพิ่มขึ้น และมีค่าความหยาบผิว เท่ากับ 474.16 nm แต่ในการทดลองที่ใช้เวลา 40 นาที ซึ่งเป็นค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองค่า LPC และค่าความหยาบของผิวลดลง จากการทดลองเวลาที่ 30 นาที ซึ่งค่าความหยาบผิวแตกต่างกันน้อยกว่า 10 nm ดังนั้น จากตารางสรุปได้ว่า ค่า LPC ที่มีค่าน้อย จะให้ค่าความหยาบผิวน้อย แสดงว่า ค่า LPC ที่มีค่าน้อยกว่าจะให้ผิวที่เรียบกว่า ชิ้นงานที่มีค่า LPC มาก ซึ่งจะสรุปการยืนยันผลตามกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทดลอง ค่า LPC และค่าความหยาบ

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ทดลองยืนยันผลค่า LPC และค่าความหยาบของผิวจะ

สังเกตได้ว่า เวลาที่ให้ค่า LPC และค่าความหยาบที่ดีที่สุดคือ 20 นาที การทดลองยืนยันผล โดยการลดเวลาเหลือ 20 นาที แสดงว่า ชิ้นงานถูกครดกัดในระยะเวลาอันสั้น จึงให้ค่าความหยาบที่ 456.70 nm

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุปผลวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ในการศึกษาปัจจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน (Box-Behnken 3^{k-n} หรือการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน (Box-Behnken) 3^{5-2} โดยกำหนดพารามิเตอร์ให้อยู่ในระดับต่างๆ ซึ่งทำการศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของสารเคมี กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.10 คือ อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งมีความเพียงพอในการนำปัจจัยดังกล่าวไปออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ที่ให้ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) โดยได้ทำการทดลองแบบการทดลองแบบส่วนประสมการ และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่สามารถกลึงให้ได้ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ที่เหมาะสมที่สุดคือ

- 1) อุณหภูมิ
- 2) เวลา

ส่วนปัจจัยอื่นในการทดลองมีผลกระทบต่อค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) น้อยมาก สรุปผลการทดลอง พบค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด คือ อุณหภูมิ และเวลา สำหรับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม เท่ากับ 90 °C และค่าเวลาที่เหมาะสมเท่ากับ 40 นาที จะให้ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 357,523 (count/part) และให้ค่าความหยาบผิวเท่ากับ 469.12 nm ซึ่งอยู่ในช่วง

ของค่า LPC ที่ยอมรับได้ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.2 อภิปราย

จากการออกแบบการทดลองหาค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ที่เหมาะสมที่สุด ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ในการออกแบบการทดลองประกอบไปด้วย การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกน (Box-Behnken) 3^{k-n} หรือการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกน (Box-Behnken) 3^{5-2} ทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลองและทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมทั้งหมด 54 การทดลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกน (Box-Behnken) เพื่อไปสร้างสมการทำนายค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) และผลตอบที่ได้คือ ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วพบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่สามารถทำให้ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) อยู่ในค่าที่เหมาะสม คือ ค่าอุณหภูมิ เท่ากับ 90°C ค่าเวลาที่เหมาะสม คือ 40 min และได้ค่าที่เหมาะสม มาทดลองด้วยกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิงเพื่อยืนยันผล จำนวน 5 ครั้ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาเทคนิคการขัดผิวด้วยกระบวนการขัดผิวด้วยอิเล็กโทรโพลิซิงสำหรับชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแนวทางในการวิจัยต่อไปสามารถกระทำได้โดยหาปัจจัยที่ดีที่สุด ที่ให้ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ที่เหมาะสมที่สุด กับชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์อื่น เนื่องจากชิ้นส่วน

ผลิตภัณฑ์ยังต้องการขัดผิว ที่ต้องให้ค่าอนุภาคที่วัดได้ในน้ำ Liquid Particle Counter (LPC) ที่เหมาะสมที่สุด

- หากมีเวลาการทำทดลองที่เหมาะสม ควรทำการทดลองในแต่ละกระบวนการซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดลองมากพอที่จะวิเคราะห์ และจะทำให้ความน่าเชื่อถือของผลการทดลองมีมากขึ้น

- การศึกษาเรื่องการลดต้นทุนต่อหน่วยต้องลงรายละเอียดในเทคโนโลยีสะอาด โดยประเมินกับวิศวกรที่ควบคุมกระบวนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานในด้านต่าง ๆ

- ในการทดลองในครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ มีการทดลองที่ละเอียดขึ้นแต่ในระดับอุตสาหกรรมต้องมีการประยุกต์ใช้กระบวนการขัดผิวที่ละเอียดหลายพันตัว

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดอกเตอร์อรุณพล สมุทกุลดีและคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ช่วยชี้แนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยและขอขอบคุณ บริษัท พูจิครุอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิจัย ขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัยศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดแวร์อิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] การขัดผิวโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี (2553). *E Blogger*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา

<http://siamkaewkumsai.blogspot.com>

[2] Bow and Wilson (1960), Some New Three-Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, 2; 455-475.