

การดึงเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กโดยใช้แม่พิมพ์ขนาดความเที่ยงตรงสูง Copper Wire Drawing using High Precision Wire Drawing

เฉลิมชัย กุลเลียบ^{1*}, ดิลก ศรีประไพ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

150 ถนนศรีจันทร์ อ.เมือง ขอนแก่น 40000, โทร 043-237492,

Email: chalermchaikulliab@hotmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ถนนประชาธิปไตย แขวงคลองสาน เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140, โทร 02-470-9213 Email: dilok.s@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ:

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการดึงลวดนั้นได้พัฒนากันมาอย่างต่อเนื่องด้วยเทคนิคและวิธีการผลิตที่แตกต่างกันไป ซึ่งผลิตภัณฑ์เส้นลวดโลหะนั้น ได้มีการนำไปใช้งานกันเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ทำให้เกิดการแข่งพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคการผลิต และนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการศึกษาและหาวิธีควบคุมความเที่ยงตรงของเส้นลวดทองแดงด้วยวิธีการดึงลวด โดยใช้เส้นลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 , 1.4 และ 1.6 mm นำมาดึงผ่านแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น โดยมีขนาดมุมทางเข้าแม่พิมพ์ (Approach angle) เท่ากับ 25° , 30° และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในของแม่พิมพ์เท่ากับ 1.1, 1.2 และ 1.4 mm โดยชิ้นงานที่ได้หลังจากการผลิต จะนำมาทดสอบ ความเรียบผิวของชิ้นงาน ผลการทดลองที่ได้พบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน คือ มุมทางไหลเข้า โดยที่มุมขนาดทางไหลเข้าแคบ ค่าความเรียบผิวที่ได้จะดีกว่ามุมที่มีขนาดกว้าง และความเร็วที่ใช้ หากเพิ่มความเร็วในการดึงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นลวดก็จะมากตาม และการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานให้คงที่ จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและคุณสมบัติใกล้เคียงกันกับขนาดของรูทางไหลเข้าของแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีค่าเบี่ยงเบนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ประมาณ 0.5-0.9 μm

Abstract

Nowadays, Wire drawing process has been developed to many purpose applications for various industries in the different methods to improve the quality of wires

The purpose of this Research concerns about dimension accuracy control of copper wires, by using copper wires diameter

1.2 mm, 1.4 mm and 1.6 mm which drawn through Wire die drawing by Universal testing machine, all dies have approach angle 25° and 30° respectively, and using Laser Interferometer to test for surface roughness of samples

From the result of this experiment, factors which take effects to sample's quality, drawing speeds and forces, approach angles 25° and 30° have been use and test for mechanical properties, and result of comparison between diameter of wire coppers and dies show the deviation approximately 0.5-0.9 μm the results found for small angle obtained fine roughness more than wide angles.

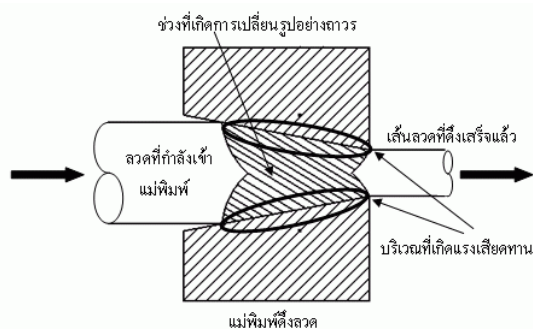
1. บทนำ

งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการศึกษาออกแบบและปรับปรุงการควบคุมมิติขนาดของเส้นลวดทองแดงเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการดึงลวด (Wire drawing) โดยใช้หลักการวิศวกรรมความเที่ยงตรงเข้ามาช่วย โดยใช้เส้นลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2, 1.4 และ 1.6 mm โดยนำมาดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดที่สร้างขึ้น โดยมีขนาดมุมทางเข้าแม่พิมพ์ (Approach angle) เท่ากับ 25° และ 30° ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางไหลออกของแม่พิมพ์เท่ากับ 1.1, 1.2 และ 1.4 mm โดยชิ้นงานที่ได้หลังจากการผลิต จะนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ความเรียบผิวของชิ้นงาน สมบัติเชิงกล โดยเน้นการศึกษาและปรับปรุงตัวแปรในการผลิต เช่น มุมทางเข้าแม่พิมพ์และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) และการทำ Surface finish หลังการผลิตให้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพที่ดีและใกล้เคียงกัน โดยเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสามารถควบคุมขนาดและ

คุณภาพที่ดีขึ้นในด้านทั้งขนาด ความเรียบ ความกลมของพื้นผิวและความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตลอดชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้จะรับเมื่อดำเนินการวิจัยและทดลองสรุปผลเรียบร้อยแล้วก็คือ คุณภาพของชิ้นที่ได้และแนวทางการควบคุมขนาดทางมิติของชิ้นงาน เส้นลวดทองแดงที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งจะเป็นแนวทางและตัวเลือกสำหรับเทคนิคในการพัฒนาการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้วิธีทางวิศวกรรมความเที่ยงเข้ามาช่วยในงานผลิตชิ้นงานแบบเส้นลวดทองแดงสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปในอนาคต

2. การดึงเส้นลวดทองแดงขนาดเล็ก (Copper wire drawing)

การดึงลวดนั้นเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะชนิดหนึ่งซึ่งทำให้ลวดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ด้วยการดึงผ่านแม่พิมพ์ขึ้นรูปที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการผลิตเส้นลวดชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น เส้นลวดทอง เส้นลวดอลูมิเนียม เส้นลวดเงิน หรือเส้นลวดทองแดง เป็นต้น โดยการลดขนาดหรือการเปลี่ยนรูปร่างของเส้นลวดทองแดงนั้นเกิดมาจาก แรงดึง (Tensile force) ที่มากกว่าความแข็งแรงของเส้นลวดทองแดงที่สามารถทนได้ ถูกดึงจนเส้นลวดทองแดงแสดงพฤติกรรมตามกราฟ Stress-Strain Diagram ที่เลยจุด Yield stress จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปด้วยพฤติกรรมแบบ Plastic deformation ซึ่งเส้นลวดขนาดเล็กเหล่านั้นนั้นได้นำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ และได้มีงานวิจัยออกมามากมายในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ หรือประสิทธิภาพของเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กที่ผ่านการดึงให้มีคุณภาพเพิ่มมากขึ้น โดยวิธีการดึงลวดคือ ใช้แรงกระทำภายนอก (Applied force) เป็นตัวดึงเส้นลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด (Wire drawing die) โดยขนาดและรูปร่างของเส้นลวดทองแดงนั้นจะเปลี่ยนลักษณะและลดลงตามขนาดรูภายในของแม่พิมพ์ดึงลวด ซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับรูภายในของแม่พิมพ์ดึงลวดที่นำมาใช้ แม่พิมพ์ดึงลวดก็มีอยู่หลากหลายรูปแบบ เช่น ทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยม หรือทรงหกเหลี่ยม เป็นต้น ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของเส้นลวดที่ได้หลังจากกระบวนการดึง ดังเช่น ความเร็ว (Speeds) แรงที่ใช้ในการดึง (Tensile force) ชนิดของสารหล่อลื่นที่ใช้ (Lubricants) และมุมทางเข้าแม่พิมพ์ (Approach angle) เป็นต้น โดยแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับดึงลวดนั้นจะมีหน้าตัดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดที่ผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ให้เล็กลงโดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ซึ่งในรูปที่ 1 นั้นอธิบายขั้นตอนการลดขนาดของเส้นลวดทองแดงที่ถูกดึงผ่านแม่พิมพ์



รูปที่ 1 ตัวอย่างการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

ตาราง 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุทองแดง

วัสดุ	Elastic modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Elongation %
ทองแดง (Cu)	110 - 112	40 - 47	0.33 - 0.36	55-330	10-50
ทองแดงผสม (Alloy)	120	47	-	760	4

ด้วยแรงจากเครื่องจักรดึงลวดที่สม่ำเสมอโดยมีแม่พิมพ์ดึงลวดเป็นตัวควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดให้ได้ตามที่ต้องการ แม่พิมพ์ดึงลวด ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนแรกตัวเรือนภายนอก (Die case) ทำจากเหล็กเหนียวหรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 8% มีสมบัติด้านความเหนียวแข็งแรง และส่วนที่สองคือตัวเรือนภายใน (Insert, Nib) ทำด้วยวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide, WC) ซึ่งมีสมบัติด้านคงทนต่อแรงกัดกร่อนและสึกหรอ (Wear) ได้ดี ความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิสูงได้ดี และมีส่วนผสมของคาร์บอนประมาณ 0.5% โดยในตารางที่ 1 นั้นแสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุทองแดงที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

3. ขั้นตอนการทำงาน

สำหรับลำดับขั้นตอนการทดลองนั้น ขั้นแรกจะทำการกำหนดค่าความเร็วที่ใช้ในการดึงลวดทองแดงออกเป็น 5 ระดับ โดยการทดลองแรกเริ่มต้นที่ความเร็ว 50, 100, 150, 200 และ 250 mm/min ตามลำดับ ให้ครบทุกขนาดของเส้นลวดทองแดงและแม่พิมพ์ โดยใช้แรงในการดึงคงที่เท่ากับ 400 N ของทุกความเร็วในการทดลอง เริ่มจากการนำเอาแม่พิมพ์ดึงลวดมาจับที่แท่นยึดและเริ่มทำการทดลองดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ โดยรูปตัวอย่างการดึงชิ้นงานเส้นลวดทองแดงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับเส้นลวดทองแดงที่กำลังถูกดึงผ่านแม่พิมพ์จะถูกลดขนาดเหลือเท่ากับมุมทางออกของแม่พิมพ์แต่ละชิ้น แล้วตัดเอาตัวอย่างชิ้นงานขนาดความยาว 10 cm มาทดสอบหาสมบัติต่างๆ เช่น ความเรียบผิวและสมบัติเชิงกลโดยการวัดพื้น

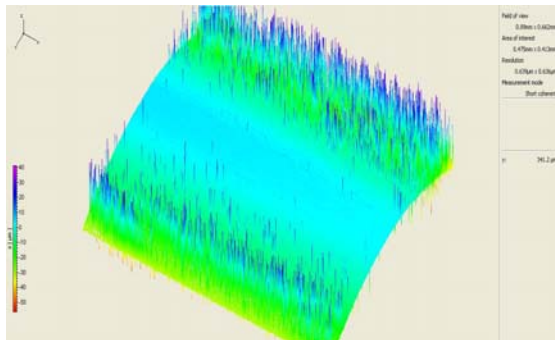


รูปที่ 2 เส้นลวดทองแดงขณะดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

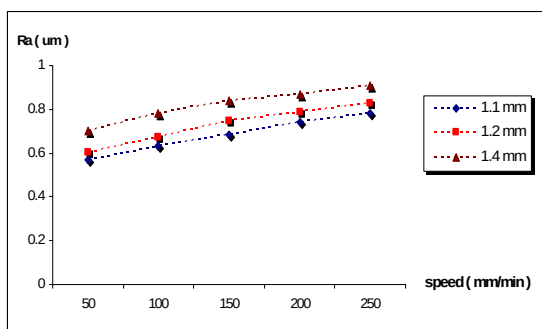
ผิวหน้าของวัสดุ วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบเลเซอร์อินเทอร์เฟอเมตอร์ยี่ห้อ Polytec รุ่น MSA-400 ได้รับความอนุเคราะห์ในด้านการใช้งานเครื่องมือจากห้องปฏิบัติการระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS lab) ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) โดยจะนำเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงผ่านแม่พิมพ์ มาทำการตรวจสอบ โดยใช้กำลังขยายขนาดเท่ากับ 10X จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

4. ผลการทดลอง สรุปและวิจารณ์

การขึ้นรูปเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปของเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กในขณะที่ทำการดึงเส้นลวดทองแดง โดยปัจจัยที่ทำให้เส้นลวดทองแดงมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันนั้น จากผลการทดลองครั้งนี้ พบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อคุณภาพของเส้นลวดทองแดงมากที่สุด คือขนาดของมุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach angle) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้มุมทางไหลเข้า 2 ขนาดด้วยกัน ก็คือ 25° และ 30° ซึ่งพบเส้นลวดที่ดึงผ่านมุมที่มีขนาดทางไหลเข้าแคบ (Narrow angle) นั้น จะมีค่าความเรียบผิวที่ดีกว่ามุมทางไหลเข้าขนาดกว้าง (Wide angle) เพอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นลวดก็จะมีมากตามเมื่อความเร็วและแรงดึงถูกเพิ่มเข้าไป [2] โดยเส้นลวดที่ดึงผ่านแม่พิมพ์แล้วขนาด 1.1 mm, และ 1.2 mm นั้น ซึ่งขนาดและสมบัติของเส้นลวดทองแดงและรูทางไหลเข้าของแม่พิมพ์นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อทำการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานแล้วมีค่าเบี่ยงเบน (Deviation) ระหว่างขนาดรูทางไหลเข้าของแม่พิมพ์และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทองแดง ซึ่งในรูปที่ 3 นั้นแสดงถึงค่าของความเรียบผิวที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการดึง



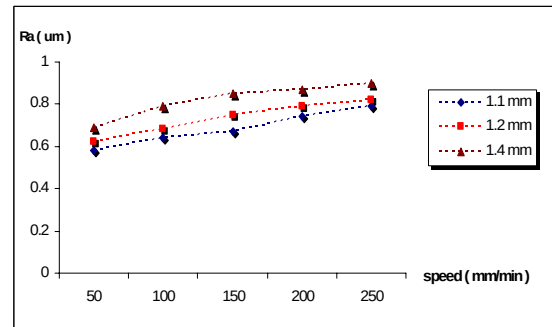
รูปที่ 3 ความเรียบผิวของเส้นลวดทองแดงที่วัดได้



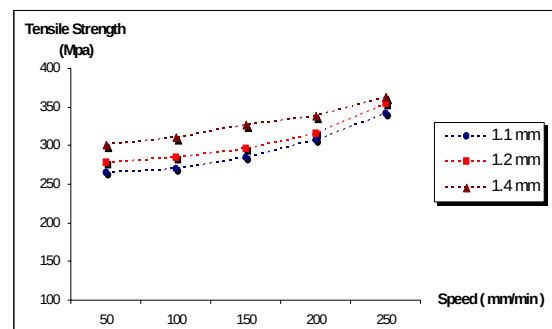
รูปที่ 4 ค่าความเรียบผิวของเส้นลวดทองแดงที่ดึงผ่านมุมขนาด 25°

เมื่อมีการใช้ความเร็วต่ำในการดึงเส้นลวด ทำให้เส้นลวดเกิดพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบ Plastic deformation ในช่วงที่ถูกดึงผ่านมุมทางไหลเข้าที่แคบ ทำให้เส้นลวดมีเวลาในการเปลี่ยนโครงสร้างและถ่ายเทเวก ทำให้เมื่อดึงออกมาแล้ว อัตราเปอร์เซ็นต์ค่าความเรียบผิวที่ได้ก็จะดีกว่า เส้นลวดทองแดงที่ถูกดึงด้วยความเร็วเท่ากันแต่มีมุมทาง

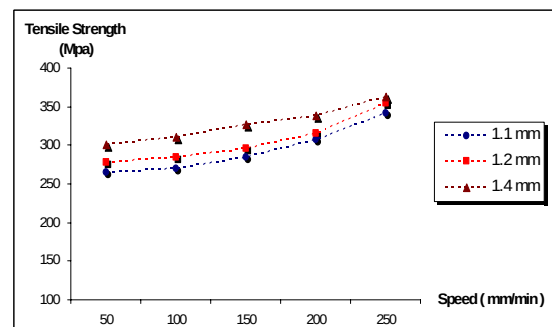
ไหลเข้าแม่พิมพ์ที่กว้างกว่า ถ้าหากเพิ่มอัตราเร็วแต่ดึงด้วยแม่พิมพ์มุมทางไหลเข้าที่แคบ คุณภาพผิวที่ได้ก็จะดีกว่าเส้นลวดที่ดึงด้วยความเร็วเท่ากันที่ถูกดึงด้วยแม่พิมพ์มุมกว้าง [3], [4] ในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 นั้นแสดงถึงค่าความเรียบผิวของชิ้นงานที่วัดได้หลังจากทำการดึงผ่านแม่พิมพ์และวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบ Laser Interferometer จะเห็นได้ว่าที่ชิ้นงานที่ดึงผ่านแม่พิมพ์มุม 25° ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันนั้น ความเรียบผิวจะมีมากกว่าชิ้นงานที่ดึงผ่านแม่พิมพ์มุม 30°



รูปที่ 5 ค่าความเรียบผิวของเส้นลวดทองแดงที่ดึงผ่านมุมขนาด 30°



รูปที่ 6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเร็วที่ใช้ในการดึงลวดทองแดงด้วยแม่พิมพ์มุม 25°



รูปที่ 7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเร็วที่ใช้ในการดึงลวดทองแดงด้วยแม่พิมพ์มุม 30°

รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความที่ใช้ในการดึงลวดทองแดงด้วยแม่พิมพ์มุมที่มีมุมแตกต่างกันนั้นสามารถสรุปได้ว่า ในการเพิ่มความเร็วก่อนขึ้นตามลำดับ การเกิด

ความเครียดแข็ง (Strain hardening) จะมีความเป็นไปได้สูง [1] ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า การลดพื้นที่หน้าตัด (Cross section area) เมื่อเนื้อวัสดุของเส้นลวดทองแดงทำการเสียดเสียกับผนังของแม่พิมพ์ที่ดึงลวดในขณะที่ถูกดึงผ่านรูภายในของแม่พิมพ์ สิ่งก็ตามมาก็คือการเกิดแรงเสียดทาน ขึ้นที่ผิวหน้าและโครงสร้างภายในของชิ้นงาน และเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ซึ่งทำให้เกิดความเครียดสะสมภายในชิ้นงานที่กำลังถูกดึง และเมื่อยังเพิ่มความเร็ว แรงที่กระทำต่อเส้นลวดทั้ง แรงเสียดทาน ความเค้นตกค้าง (Residual stress) และอัตราความเครียด (Strain rate) จะเพิ่มขึ้น

การทดสอบแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ซึ่งแสดงผลออกมาเป็นความสัมพันธ์ตามรูปที่ 6-7 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเร็วกว่าระบบในการดึงลวด อัตราการเกิดความเครียดแข็ง จะเพิ่มตามไปด้วย ส่งผลให้ความเครียดเพิ่มขึ้น โดยที่มุมทางไหลเข้าถ้ามีขนาดแคบ แรงที่ใช้ในการทดสอบก็จะน้อยตามไปด้วย และเมื่อมุมทางไหลเข้าสูง เส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงมานั้น เมื่อทำการทดสอบ ก็จะต้องใช้แรงดึงมากตาม ทั้งนี้ก็มาจากการเกิดค่าความเครียดแข็งขึ้นในเส้นลวดนั่นเอง

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีสำหรับทุนวิจัยในงานชิ้นนี้ และห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน

อ้างอิง

1. K. Karakulski, A. Morawski, "Purification of copper wire drawing emulsion by application of UF and RO" Desalination, Vol. 131, Issues 1-3, 2005, pp. 87-95.
2. P. Schade, "Wire drawing failure and tungsten fracture phenomena", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 24, No. 4, 2006, pp. 332-337.
3. F. Kraft, C. Chakkingal, "The effects of die angle on texture and annealing response of ETPcopper wire", Material Processing Technology, Vol. 60, 1996, pp. 171-178.
4. G. Khatibi, R. Stickler, "Tensile properties of thin Cu-wires with a bamboo microstructure", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 378, Issues 1-2, 2004, pp. 326-328.
5. S.Y. Yang, "Enhanced boundary lubrication by potential control during copper wire drawing", Wear, Vol. 210, Issues 1-2, 1997, pp.165-170.