

## ชนิดของการเคลือบและปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่มีผลต่อกรรมวิธี การลากขึ้นรูปลึงเหล็กกล้าไร้สนิม

คมกริช ละวรรณวงษ์<sup>1</sup> พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์<sup>2</sup> วารุณี เปรमानนท์<sup>3</sup>

และ กฤษณ์ ประสงค์เจริญ<sup>4</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 24 เมษายน 2549 ตอรับเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2550

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิว (Surface coating) แม่พิมพ์วัสดุ SKD11 (JIS) ด้วยฟิล์ม TiC, TiCN, TiN, TiAlN และ Hardchrome รวมทั้งการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ (Surface treatment) ด้วยวิธี Nitriding ต่อสมรรถภาพของกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ความหนา 1 มม. โดยทำการลากขึ้นรูปลึงขึ้นงานด้วยกลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. จากผลที่ได้พบว่า แม่พิมพ์ชนิด Nitriding เพิ่มความสามารถในการลากขึ้นรูปได้สูงสุด โดยทำให้ได้ค่า *LDR* เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4.8 เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว และใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำที่สุดโดยสามารถลดแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปได้ถึงประมาณร้อยละ 5 ซึ่งทำให้ถ้วยที่ได้มีการลดลงของความหนาผนังน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนฟิล์ม TiC และ TiCN มีแนวโน้มช่วยลดการยึดติดผิวแม่พิมพ์ (Adhesion) ที่เป็นสาเหตุของรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานได้ ในทางตรงกันข้ามแม่พิมพ์ชนิด Hardchrome มีแนวโน้มทำให้เกิดการยึดติดผิวแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น ส่วนฟิล์ม TiN และ TiAlN ทำให้ประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูปต่ำลง โดยเกิดการหลุดลอกของฟิล์มเกาะติดบนผิวชิ้นงาน เนื่องจากความหนาของฟิล์มเคลือบบางมาก

**คำสำคัญ :** การลากขึ้นรูปลึง / การเคลือบผิว / การปรับสภาพผิว / เหล็กกล้าไร้สนิม / ชิดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป

<sup>1</sup> นักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

<sup>4</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

## Influences of Surface Coatings and Surface Treatments on the Performances of Deep Drawing Operation of Stainless Steel Sheet

Komgrit Lawanwong <sup>1</sup>, Varunee Premanond <sup>2</sup>,  
Pongpan Kaewtatip <sup>3</sup>, and Krit Prasongcharoen <sup>4</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

*Received 24 April 2006 ; accepted 28 February 2007*

### Abstract

In this work, the influences of surface coating using TiC, TiCN, TiN, TiAlN film and hard chromium plating and surface treatment by nitriding on the performances of deep drawing operation of stainless steel sheet were investigated. The die material is SKD11 (JIS), and sheet material is SUS304 having thickness of 1 mm. The tests were performed by forming the cups having diameter of 40 mm by those coated dies. It has shown that the die which surface treated by nitriding gave the best results, i.e. giving maximum *LDR* value which is 4.8% higher than that of the non-coated die and giving the minimum deep drawing force which led to the most uniform wall thickness of the deep-drawn cup. The dies coated with TiC and TiCN film showed the potential to prevent an adhesion of the sheet material onto the die surface which is the cause of galling on the surface of the products. On the other hands, the die treated by hard chromium tended to increase the adhesions. Finally, the die coated with TiN and TiAlN provided poor results compared to those of the non-coated die. Since the thickness of both TiN and TiAlN films were very thin, they were found to be peeled off after a few times of drawing operations.

**Keywords :** Deep Drawing / Surface Coating / Surface Treatment / Stainless Steel / *LDR*

---

<sup>1</sup> Researcher, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Tool and Materials Engineering.

<sup>4</sup> Graduate Student, Department of Tool and Materials Engineering.

## 1. บทนำ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิจัยกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมโลหะแผ่นเป็นอย่างมาก โดยเป็นกรรมวิธีการควบคุมแรงกดที่พินช์ (Punch) ลงบนแผ่นชิ้นงานเปล่า (Blank) แล้วดันผ่านตาย (Die) ให้มีรูปร่างเป็นหลุมหรือเป็นโพรงลึกลงไป ในกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึกนั้น มีข้อจำกัดและความต้องการหลายประการ เช่น ชีตจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio: *LDR*) ของแผ่นวัสดุ ความเรียบผิวหลังการขึ้นรูปของชิ้นงาน ต้องมีผิวที่เรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยขีดข่วน เป็นต้น ในส่วนของปัจจัยที่มีผลต่อค่า *LDR* นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดวัสดุชิ้นงาน สารหล่อลื่น การกำหนดเงื่อนไขในการทำงาน เช่น แรงจับยึดแผ่นชิ้นงาน และอุณหภูมิในการทำงาน เป็นต้น ซึ่งจากที่ผ่านมากการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในการทำงานที่มีผลต่อ *LDR* สำหรับวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนหรืออะลูมิเนียมได้ทำกันอย่างแพร่หลายและเผยแพร่ในรูปของทฤษฎีพื้นฐานทั่วไป [1-3] อย่างไรก็ตาม ในส่วนของวัสดุอุตสาหกรรมชนิดใหม่ๆ หรือกลุ่มวัสดุที่ขึ้นรูปได้ยาก ยังขาดข้อมูลที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปให้สูงขึ้น เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีปัญหาแตกต่างกัน เช่น กรณีของแผ่นแมกนีเซียมจะมีปัญหาสำคัญคือ *LDR* ที่อุณหภูมิปกติจะมีค่าต่ำมาก งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาถึงการเพิ่มค่าขีดจำกัดดังกล่าวโดยใช้ความร้อนช่วย [4, 5] ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งเน้นไปที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนิติกเกรด JIS: SUS304 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน และอื่นๆ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดังกล่าวมีความสามารถในการยึดตัวสูง ทำให้ขีดจำกัดอัตราส่วนในการลากขึ้นรูปมีค่าค่อนข้างสูงเช่นกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัสดุชนิดดังกล่าวจะเกิดการยึดติดกับแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยเฉพาะแม่พิมพ์ที่ทำมาจากเหล็กเครื่องมือ (tool steel) ซึ่งเป็นวัสดุทำพิมพ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ในการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมบางครั้งจึงมีผู้ใช้วัสดุกลุ่มอื่น เช่น อะลูมิเนียมบรอนซ์ ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ยึดติดวัสดุชนิดดังกล่าว อย่างไรก็ตามเนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุดังกล่าวค่อนข้างต่ำจึง

เกิดปัญหาอื่นในด้านของการยุบตัวของแม่พิมพ์และการสึกหรอที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการหาแนวทางที่จะทำการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำมาจากเหล็กเครื่องมือเกรด JIS: SKD11 ซึ่งเป็นเกรดที่มีความนิยมใช้มากที่สุด ซึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวต้องป้องกันไม่ให้วัสดุชิ้นงานสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์โดยตรง ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรกทำการใช้สารหล่อลื่นที่มีหนืดสูงมีความสามารถในการรักษาสภาพความเป็นฟิล์มกั้นระหว่างผิวชิ้นงานและผิวแม่พิมพ์ได้ดีเยี่ยม หรือใช้สารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง เช่นแผ่นพลาสติก PE [6] อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาในแง่ของการกำจัดสารหล่อลื่น (Degreasing) หลังจากขึ้นรูปสำเร็จ หรือพิจารณาต้นทุนในกรณีของแผ่น PE แล้ว วิธีนี้คงไม่เหมาะสมนัก ในส่วนของวิธีที่ 2 คือการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เริ่มใช้กันมานาน และแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท รวมทั้งในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านมา พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเอาเทคโนโลยีการเคลือบผิวมาแก้ปัญหาเฉพาะด้านต่างๆ เช่น Pesch [7] ได้ทำการวิจัยทดสอบความสามารถของฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับงานดึง งานรีดเหล็กแผ่น โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดึงแผ่นเหล็ก (Strip-drawing-test) กับแผ่นเหล็กกล้าผ่านแม่พิมพ์เคลือบสารต่างชนิดและกรรมวิธีการเคลือบกัน คือ PVD-TiN, PVD-TiAlN, PVD-TiCN, TiN-Sputterd และ TiN-arc ได้ผลสรุปว่า TiN-sputtered เหมาะสมกับงานดึงรีดเหล็กแผ่นหรือแม่แตงงานที่มีการสั่นไถลของเหล็กแผ่นจำพวกงานลากขึ้นรูปลึกถึงแม้ว่าจะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงกว่าตัวอื่นแต่จะไม่มีสิ่งก่อกวนที่เคลือบแผ่นเหล็กหลุดมาเกาะติดและกรรมวิธีนี้สารเคลือบผิวสามารถครอบคลุมปกป้องสารพื้นได้อย่างทั่วถึงและต่อเนื่องกว่ากรรมวิธีอื่นๆ ในปีเดียวกัน Mitterer [8] ได้ทำศึกษารวมวิธีการเคลือบผิวที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการทำแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยได้ศึกษาสารเคลือบผิวที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบทั้ง 5 ชนิด คือ Nitriding, TiN, TiCN, TiBN และ TiAlN โดยกรรมวิธี PACVD ผลการทดสอบพบว่า TiN ที่เคลือบผิวด้วยกรรมวิธีนี้มีความเหมาะสมทั้งในแง่การ

ลดแรงเสียดทานในการทำงาน และการต้านทานการสึกหรอ อีกทั้งยังสามารถเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ดีอีกด้วยนอกจากนั้นยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิวอีกเป็นจำนวนมาก [9-11] อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วยังไม่พบว่ามีการวิจัยเรื่องใดที่ศึกษาชนิดของฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉพาะ ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อหาชนิดของฟิล์มเคลือบแข็งหรือการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่ทำมาจากวัสดุ JIS: SKD11 ที่เหมาะสม ที่ทำให้การลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณาในแง่ของ *LDR* แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป และคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งชนิดของฟิล์มเคลือบและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้ จะจำกัดเฉพาะที่สามารถทำได้ภายในประเทศเท่านั้น เพื่อให้ข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์กับภาคอุตสาหกรรมในประเทศโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผู้ผลิตและผู้ใช้แม่พิมพ์ที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปอ้างอิงในการพิจารณาเลือกใช้การเคลือบและปรับสภาพผิวได้อย่างเหมาะสมต่อไป

## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปและกรรมวิธี

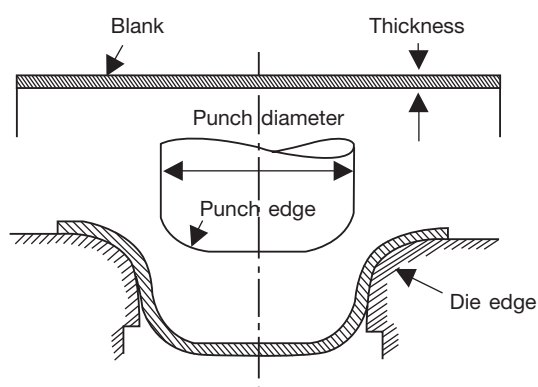
#### การเคลือบผิว

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาถึงการปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงานสำเร็จหลังผ่านกรรมวิธีการลากขึ้นรูปเหล็ก เมื่อปรับปรุงสภาวะเงื่อนไขการทำงานการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งชนิดต่างๆ โดยจะศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดสารเคลือบ เพื่อที่จะให้ได้คุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น สามารถเพิ่มค่า *LDR* ได้ และใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยลง โดยวัสดุทำพิมพ์คือเหล็ก JIS SKD11 วัสดุชิ้นงานคือ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 การเคลือบผิวแม่พิมพ์จะเคลือบทั้ง

ผิวตายและแผ่นจับยึดชิ้นงาน โดยในส่วนของตายจะเคลือบผิวส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานทั้งหมด คือ ผิวด้านบน บริเวณรัศมีที่ป่าและผิวในรูตาย ส่วนแผ่นจับยึดชิ้นงานจะเคลือบเฉพาะผิวด้านหน้าที่สัมผัสกับชิ้นงานเท่านั้น โดยไม่ทำการเคลือบผิวที่พื้นผิว เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ความเสียดทานที่พื้นผิวเพื่อทำให้แผ่นวัสดุชิ้นงานถูกดึงลงไปตาย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับสภาพผิวและเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มเคลือบและกระบวนการต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 ในการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์ม TiC, TiCN, TiN และ TiAlN ได้ใส่ชิ้นงานตัวอย่าง (Dummy) เข้าไปในเตาเคลือบพร้อมกับแม่พิมพ์ด้วย เพื่อนำชิ้นงานดังกล่าวมาตัดขวางเพื่อตรวจสอบความหนาของฟิล์มเคลือบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็ก

Punch edge radius ( $R_p$ )	8 มม.
Die edge radius ( $R_d$ )	2 มม.
Punch diameter ( $d_p$ )	40 มม.
Sheet material	SUS304 ( $t = 1$ มม.)
Clearance ( $CL$ )	1.5 มม.
Tools material	SKD11 ( $60 \pm 1$ HRC)



รูปที่ 1 รายละเอียดของพื้นที่และตาย

ตารางที่ 2 ชนิดของกรรมวิธีเคลือบผิวและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

Surface treatment or Coating	Hardness (HV)	Film thickness ( $\mu\text{m}$ )
Non coating	650	-
TiC : CVD	3,800**	3
TiCN : CVD (Multilayer*)	3,300**	8
TiN : PVD	2,200**	1
TiAlN : PVD	2,600**	3
Hardchrome (HC)	600**	-
Nitriding	800**	-

หมายเหตุ: \* TiCN เป็นแบบ Multilayer โดยเรียงจากชั้นล่างสุดถึงบนสุด คือ TiC-TiCN-TiN

\*\* ค่าที่ได้จากแคตตาล็อกผู้ผลิต

## 2.2 ชุดแม่พิมพ์ตัดสำหรับตัดแผ่นชิ้นงานเปล่า ขนาดต่างๆ

เพื่อให้ได้ค่า  $LDR$  ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างขนาดแผ่นชิ้นงานที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถลากขึ้นรูปได้สำเร็จ ( $d_{max}$ ) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์ ( $d_p$ ) จำเป็นต้องเตรียมแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นหลายขนาด จากการวิจัยได้ใช้ชุดแม่พิมพ์ตัดซึ่งสามารถตัดแผ่นชิ้นงานกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 80-90 มม. โดยมีความละเอียดในการในการเตรียมแผ่นชิ้นงานทุกๆ 1 มม. เพื่อให้ได้ความละเอียดของค่า  $LDR$  เท่ากับ 0.25

## 2.3 เครื่องทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป โลหะแผ่น (Sheet Metal Testing Machine SAS-350D)

ในการวิจัยทำการขึ้นรูปด้วยบนเครื่องทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นขนาด 350 kN ของบริษัท JT-TOSHI โดยการติดตั้งพินซ์ด้านล่างและคายอยู่ด้านบน ในการทำงานให้คายอยู่กับที่ และจะมีระบบไฮดรอลิกในการให้แรงจับยึดชิ้นงานที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-100 kN และจะใช้ไฮดรอลิกขับพินซ์ให้เคลื่อนที่เพื่อลากขึ้นรูปชิ้นงาน โดยเครื่องทดสอบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และสามารถแสดงกราฟความลัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางได้ในขณะที่ลากขึ้นรูป ในการทดลองกำหนดให้ความเร็วในการลากขึ้นรูปชิ้นงานคงที่

เท่ากับ 30 มม./นาที ขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานได้จากการทดลองจริง โดยทำการแปรค่าแรงจับยึดชิ้นงานเพื่อให้ได้แรงในการลากขึ้นรูปสำหรับแต่ละเงื่อนไขต่ำสุด และลากขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดรอยย่น (Wrinkle) หรือรอยแตก

## 2.4 เครื่องทดสอบไตรโบโลยี (Tribometer)

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองหาลัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารเคลือบผิวแม่พิมพ์แบบหมุดบนแผ่นจาน (Pin-on-Disk) ด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านไตรโบโลยี โดยเฉพาะค่าลัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแผ่นจานที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 กับหมุดที่ทำมาจากเหล็กทำพิมพ์ SKD11 ซึ่งผ่านการชุบแข็งและการเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวเหมือนกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

## 2.5 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขในการทดลองแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงเงื่อนไขทั้งสำหรับการทดลองลากขึ้นรูปลิกเปรีียบเทียบกับการทดสอบแบบหมุดบนจานหมุน ในการทดลองลากขึ้นรูปจะทำการทดลองซ้ำ 7 ครั้ง ในขณะที่การทดสอบแบบหมุดบนจานหมุนจะทำการทดสอบ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ระดับความเชื่อมั่นของผลการวิจัยไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95

ตารางที่ 3 เงื่อนไขในการทดลอง

สภาวะเงื่อนไข	การทดลองลากชั้นรูปลึก	การทดสอบหมุดบนจานหมุน
ความเร็วในการทำงาน	30 มม./นาที	
สารหล่อลื่นที่ใช้	ILOFORM TDN81 (Commercial forming oil)	
อุณหภูมิการทำงาน	อุณหภูมิห้อง	
ชนิดของวัสดุ	SUS304	
น้ำหนักกด	-	10 N
Maximum contact pressure	555.6 MPa*	0.35 MPa**

หมายเหตุ: \* Maximum contact pressure ในส่วนของการลากชั้นรูปลึกคำนวณโดยใช้ Commercial FE Code โปรแกรม DEFORM2D

\*\* Maximum contact pressure ในส่วนของการทดสอบ Pin-on-Disk ได้มาจากการตั้งสมมติฐานว่าน้ำหนักที่ใส่กลงเต็มหน้าสัมผัสของหมุดทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.

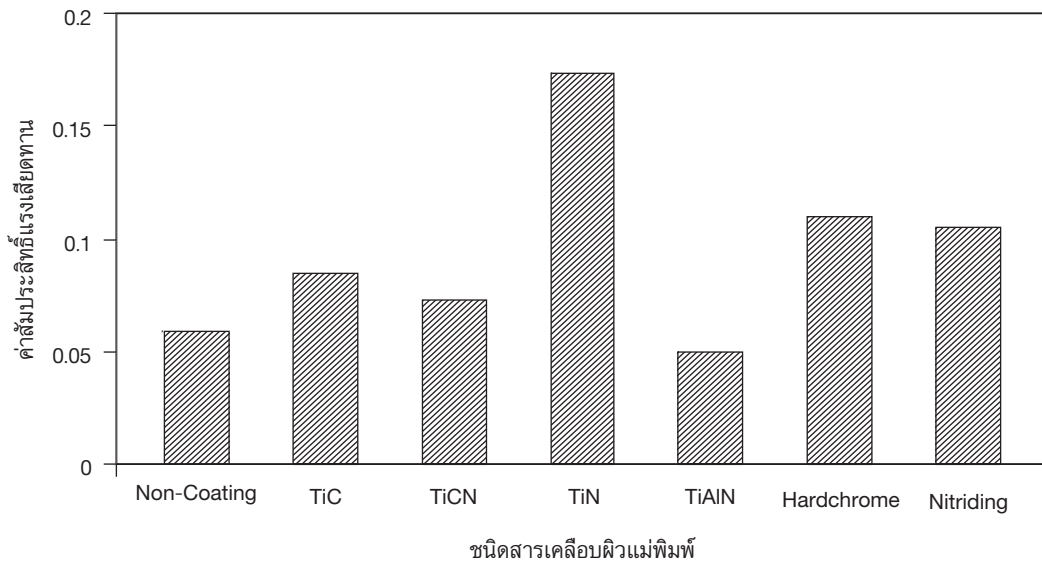
#### 4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

##### 4.1 ผลการศึกษาไตรโบโลยี (Tribology Test)

###### ของสารเคลือบผิวแม่พิมพ์

ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นชิ้นงาน SUS304 และหมุดที่เคลือบหรือปรับสภาพผิวด้วยกรรมวิธีแตกต่างกันโดยใช้เครื่องไตรบอมิเตอร์แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจากการวิจัยพบว่าการทดสอบโดยใช้หมุดที่เป็น SKD11 ที่ไม่ได้เคลือบสารใดๆ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อนข้างต่ำ คือมีค่าประมาณ 0.06 ในขณะที่การเคลือบด้วยฟิล์ม TiAlN เพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่ากรณีไม่เคลือบผิว แต่ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนหมุดที่เคลือบผิวด้วยสาร TiC และ TiCN จะให้ค่า

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน และมากกว่ากรณีที่ไม่เคลือบผิวอยู่เล็กน้อย ถัดมาคือหมุดที่ผ่านกรรมวิธีปรับสภาพผิว Hardchrome และ Nitriding ส่วนหมุดที่เคลือบผิวด้วยสาร TiN ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวแสดงให้เห็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการทดสอบแบบ Pin-on-Disk เท่านั้น ซึ่งในการทดสอบดังกล่าว ความดันจุดสัมผัส (Contact pressure) จะมีค่าต่ำกว่าในการขึ้นรูปจริงมาก (ดังแสดงในตารางที่ 3) จากการสังเกตผิวสัมผัสหลังการทดสอบ พบว่าไม่เกิดการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผิวหน้าของหมุดทุกอัน ซึ่งในการลากชั้นรูปจริงอาจจะเกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบ Pin-on-Disk ได้



รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

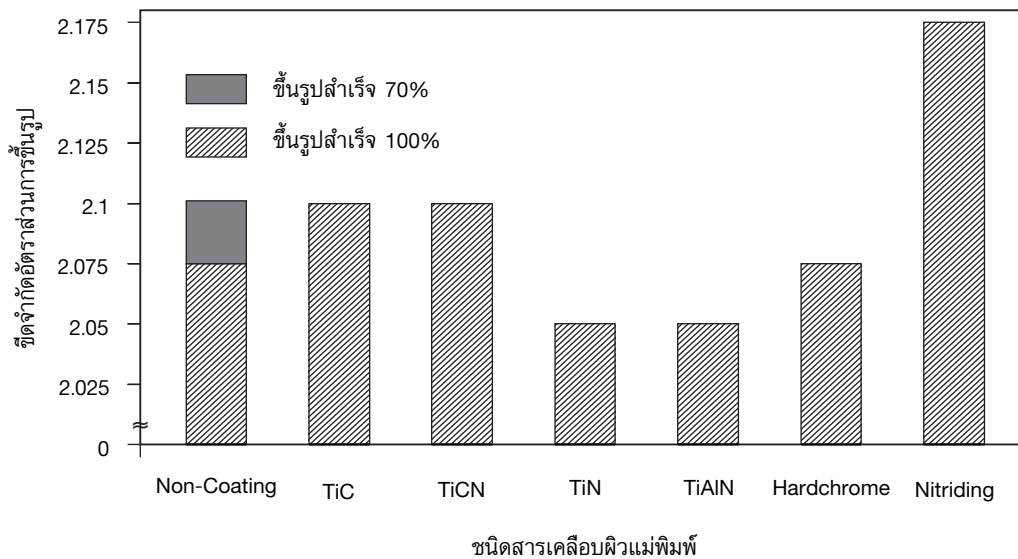
#### 4.2 อิทธิพลของชั้นเคลือบผิวต่อขีดจำกัดการลากขึ้นรูป

ผลการทดสอบหาค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio: *LDR*) โดยใช้แม่พิมพ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวหรือเคลือบผิวด้วยฟิล์มชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าวเห็นว่าแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบสารใดๆ มีขีดจำกัดในการลากขึ้นรูปที่ 2.075 อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 2.10 นั้นสามารถขึ้นรูปถ้วยได้สำเร็จร้อยละ 70 (5 ใน 7 ครั้ง) ขณะที่แม่พิมพ์ที่เคลือบสาร TiC และ TiCN สามารถเพิ่ม *LDR* ได้สูงขึ้นที่อัตราส่วน 2.10 ในขณะที่แม่พิมพ์ที่เคลือบสาร TiN และ TiAlN ทำให้ค่า *LDR* ลดลงไปอยู่ที่ 2.05 ในส่วนของแม่พิมพ์ที่ปรับสภาพผิวด้วยกรรมวิธี Hardchrome ให้อัตราส่วนการขึ้นรูปเท่ากับกรณีแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบผิวคือเท่ากับ 2.075 และจากผลการทดลองพบว่าแม่พิมพ์ที่ผ่านกระบวนการ Nitriding ทำให้อัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นถึง 2.175 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลดังกล่าวกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบแบบหมุน พบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบผิวและแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์ม TiAlN ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบแบบหมุนต่ำกว่า

แต่กลับให้ค่า *LDR* ต่ำด้วย ทั้งนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากสภาวะการทดสอบ โดยเฉพาะค่าความดัน ณ จุดสัมผัส (Contact pressure) ที่แตกต่างกันมาก ในการลากขึ้นรูปจริงมีความดันเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสสูงมาก ส่งผลให้เกิดการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบ ซึ่งส่วนที่ยึดติดผิวแม่พิมพ์จะมีความแข็งสูงมากและชุบผิวชิ้นงานหรือถ้วยที่ได้เป็นรอยขีดยาว ที่สามารถสังเกตเห็นได้ค่อนข้างชัดเจน ทำให้ *LDR* ของแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบมีค่าต่ำ นอกจากนั้น กรณีของแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์ม TiN และ TiAlN แบบ PVD ซึ่งให้ค่า *LDR* ต่ำที่สุดนั้น พบว่าที่ผิวถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นแถบสีดำ เหมือนกับมีคราบบางๆ มาเกาะติด และเมื่อพิจารณาที่ตายพบว่ามีการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบซึ่งบางส่วนหลุดไปเกาะติดที่ผิวถ้วย จากการถ่ายภาพตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความหนาชั้นฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 4 นั้น พบว่าชั้นฟิล์มเคลือบทั้ง 2 ชนิดค่อนข้างบางมาก นั่นคือมีความหนาประมาณ 1 และ 3 ไมโครเมตรเท่านั้นสำหรับ TiN และ TiAlN ตามลำดับ นอกจากนั้นผิวของแม่พิมพ์ที่ผ่านการลากขึ้นรูปก็พบว่า มีการหลุดลอกออกของฟิล์มเคลือบที่สังเกตเห็นได้จากสีของแม่พิมพ์บริเวณที่สัมผัสชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปหลังการลาก

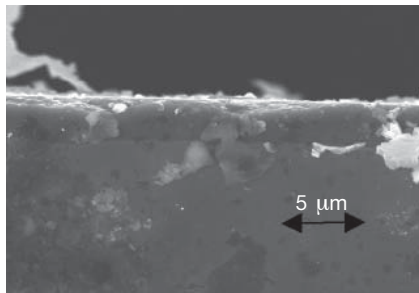
ชั้นรูป ส่วนกรณีของแม่พิมพ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ด้วยกรรมวิธี Nitriding ซึ่งให้ค่า *LDR* สูงสุดนั้น ส่วนหนึ่งเป็นเพราะโดยทั่วไปกรรมวิธี Nitriding ให้ความหนาของชั้นปฏิกิริยาดังกล่าวจะมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการเคลือบด้วยกรรมวิธี CVD หรือ PVD มาก นอกจากนี้ค่าความเรียบผิวของแม่พิมพ์ที่วัดได้ยังต่ำกว่าฟิล์มเคลือบทุกชนิด ทำให้ได้ค่า *LDR* สูงกว่ากรณีการใช้แม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบอื่นๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการเคลือบผิวแบบ Hardchrome พบว่าค่า *LDR* ที่ได้เท่ากับกรณีแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบหรือปรับสภาพผิว และกรณีนี้สามารถสังเกตเห็นรอยขีดข่วนเนื่องจากการยึดติดบนผิวถ้วยที่ได้จากการลากชั้นรูปเช่นกัน ในกรณีนี้อาจอธิบายได้ว่า เหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง (SUS304) นั้นมีธาตุโครเมียมผสมอยู่ถึงร้อยละ 18 โดยประมาณ ทำให้เกิดการยึดติดกับผิวแม่พิมพ์แบบ Hardchrome ได้ง่าย โดยเฉพาะตรงบริเวณที่มีความดันระหว่างผิวสัมผัสสูง ซึ่งสารหล่อลื่นที่ใช้อาจจะไม่สามารถคงตัวเป็นฟิล์มปกป้องการสัมผัสกันของผิวชิ้นงานและแม่พิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์ เหตุผลดังกล่าวสามารถอธิบายกรณีที่ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการยึดติดกับผิวเหล็กทำพิมพ์เกรด SKD11 ได้ง่ายเช่นเดียวกัน เนื่องจากเหล็กทำพิมพ์เกรด

ดังกล่าวเป็นประเภทที่ผสมธาตุคาร์บอนและโครเมียมสูง (High carbon- high chromium) นั้นเอง ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนนี้ สามารถสรุปได้ว่ากรรมวิธีการปรับสภาพผิว Nitriding สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการลากชั้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการเพิ่มค่า *LDR* ได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ข้างต้น ไม่ได้พิจารณาในแง่ของเงื่อนไขที่ใช้ในการเคลือบผิว หรือคุณภาพของผิวเคลือบแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองได้ใช้เงื่อนไขการเคลือบผิวที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมปกติซึ่งถูกกำหนดโดยผู้ผลิต ดังนั้นหากคุณภาพของผิวเคลือบเปลี่ยนไป เช่น ความหนาของชั้นฟิล์มแรงเกาะยึดระหว่างฟิล์มเคลือบกับผิวแม่พิมพ์เปลี่ยนแปลงไป ผลที่ได้ก็อาจเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน นอกจากนี้ จะเห็นว่าผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7, 8] ซึ่งได้รายงานไว้ว่าฟิล์มเคลือบ TiN จะให้ผลของการทดสอบที่ดี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัสดุชิ้นงานทดสอบที่แตกต่างกัน และกรรมวิธีการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้การเคลือบฟิล์ม TiN-Arc แบบ PVD ในขณะที่งานวิจัยที่ผ่านมาใช้การเคลือบแบบ TiN-Arc และ [7] และแบบ PACVD [8] ตามลำดับ

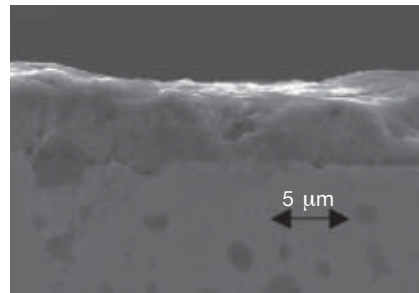


รูปที่ 3 ชีตจำกัดอัตราส่วนการชั้นรูป *LDR*

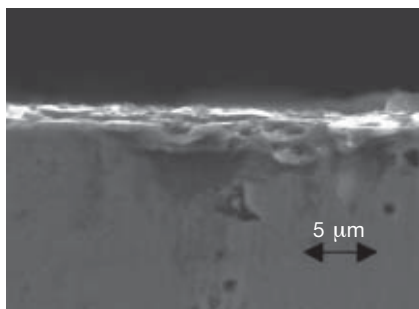




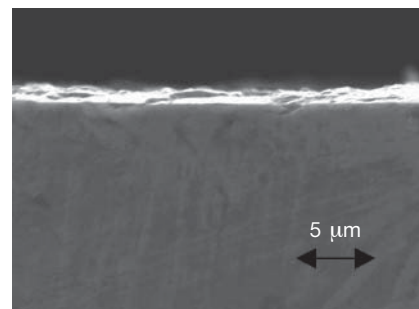
(ก) ผิวนเคลือบ TiC ความหนาของชั้นฟิล์ม  
ประมาณ 3 ไมโครเมตร



(ข) ผิวนเคลือบ TiCN ความหนาของชั้นฟิล์ม  
ประมาณ 6 ไมโครเมตร



(ค) ผิวนเคลือบ TiAlN ความหนาของชั้นฟิล์ม  
ประมาณ 3 ไมโครเมตร



(ง) ผิวนเคลือบ TiN ความหนาของชั้นฟิล์ม  
ประมาณ 1 ไมโครเมตร

#### รูปที่ 4 ชั้นฟิล์มเคลือบชนิดต่างๆ

#### 4.3 อิทธิพลของชั้นเคลือบผิวต่อแรงในการลาก ชั้นรูป

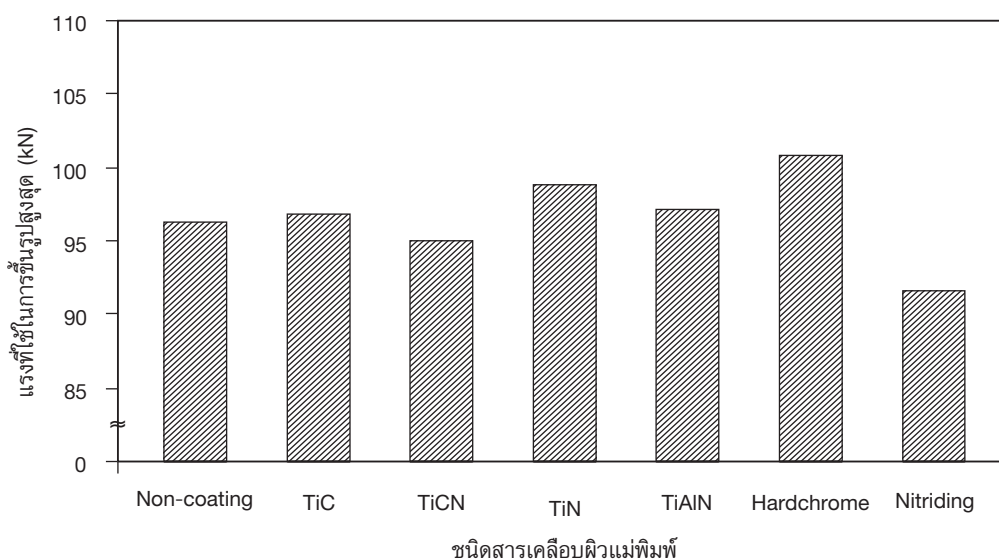
ผลการวัดแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากชั้นรูปด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้แม่พิมพ์ชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 5 โดยเป็นการวัดค่าแรงสูงสุดกรณีที่อัตราส่วนการลากชั้นรูปเท่ากับ 2.05 สำหรับทุกแม่พิมพ์ จะเห็นว่าแนวโน้มของแรงดังกล่าวจะสอดคล้องกับค่า *LDR* ที่ได้ นั่นคือ แม่พิมพ์ที่ทำให้แรงในการลากชั้นรูปต่ำ จะให้ค่า *LDR* สูง ทั้งนี้เพราะแรงที่ใช้ในการลากชั้นรูป ส่งผลโดยตรงกับค่าความเค้นดึงในแนวแกนของผนังถ้วย ซึ่งถ้าค่าความเค้นบริเวณดังกล่าวสูง จะทำให้ถ้วยเกิดการฉีกขาดเสียหายได้ง่าย ส่งผลให้ค่า *LDR* ต่ำ จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าแม่พิมพ์ที่ปรับสภาพด้วยกรรมวิธี Nitriding จะทำให้แรงในการลากชั้นรูปต่ำที่สุด โดยแรงที่ใช้จะน้อยกว่ากรณีลากชั้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่ไม่เคลือบผิวอยู่ประมาณร้อยละ 5 และน้อยกว่ากรณี Hardchrome อยู่ประมาณร้อยละ 11

#### 4.4 อิทธิพลของชั้นเคลือบผิวต่อความหนาของถ้วย

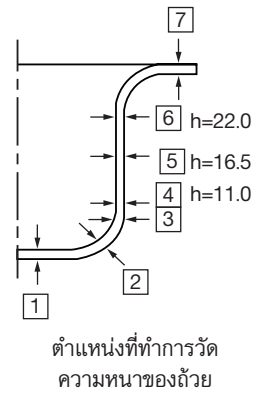
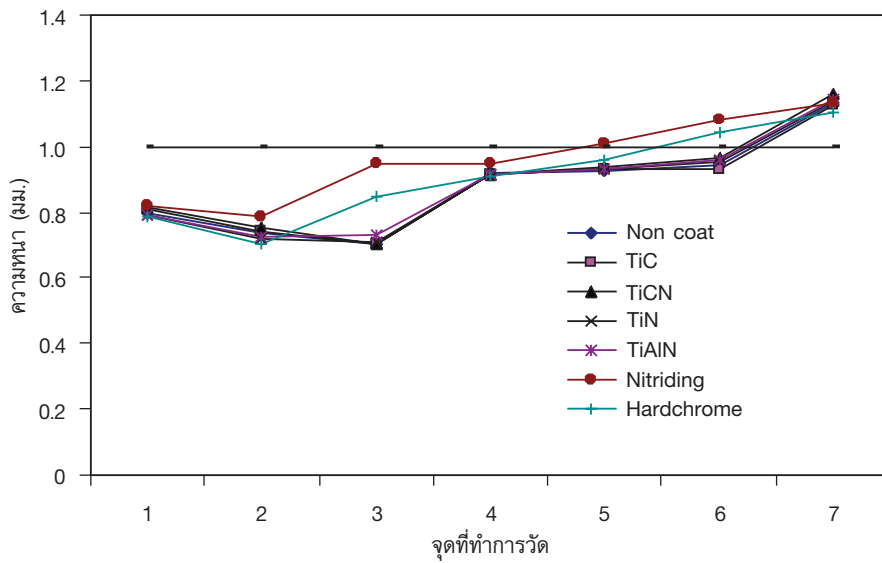
ในการลากชั้นรูปนั้น ถึงแม้จะเป็นกรรมวิธีที่ต้องการให้ความหนาของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่าเดิมคงที่ตลอดก็ตาม แต่เนื่องจากกลไกการเปลี่ยนรูป หรือสภาวะความเค้นที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณของถ้วย จะส่งผลให้ความหนาของถ้วยที่ได้ไม่คงที่ โดยบริเวณที่มักก่อให้เกิดปัญหามากที่สุด คือ ผนังถ้วยตรงตำแหน่งรัศมีก้นถ้วย ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่ถ้วยมีความบางมากที่สุด เนื่องจากผนังถ้วยบริเวณดังกล่าวต้องรับความเค้นดึงในแนวแกนเกือบตลอดเวลาขณะที่ทำการลากชั้นรูป รูปที่ 6 แสดงผลการวัดความหนาผนังของถ้วยที่ได้จากการลากชั้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ชนิดต่างๆ โดยจะทำการวัดตรงตำแหน่งต่างๆ ตั้งแต่ก้นถ้วยจนถึงบริเวณปีกถ้วย จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความหนาของถ้วยที่ได้จากการลากชั้นรูปด้วยแม่พิมพ์แต่ละชนิดคล้ายคลึงกัน นั่นคือบริเวณปีกถ้วยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความ

หนาของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงขณะขึ้นรูป ส่วนบริเวณรัศมีก้นถ้วย (ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 6) จะมีความหนาน้อยลงจากเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้น และเมื่อพิจารณาค่าความหนาของผนังถ้วยที่ได้ จะเห็นได้ชัดเจนว่าถ้วยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ Nitriding จะมีความหนาที่มากกว่าถ้วยที่ได้จากแม่พิมพ์ชนิดอื่นๆ ซึ่งเมื่อนำความหนาของถ้วยตรงตำแหน่งที่บางที่สุด (ตำแหน่งที่ 2 หรือ 3) มาพิจารณาเปรียบเทียบกันดังในรูปที่ 7 ซึ่งตำแหน่งดังกล่าว

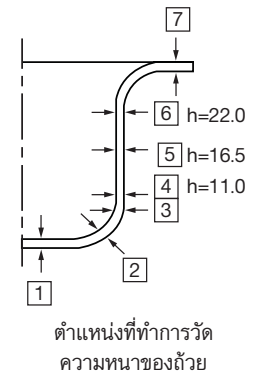
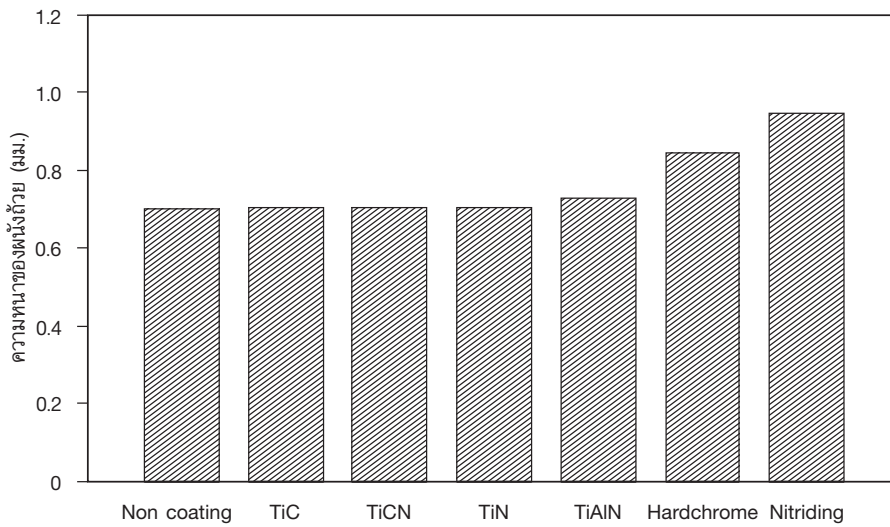
ถือเป็นจุดวิกฤติของถ้วยที่จะนำไปใช้งาน จากรูปดังกล่าวพบว่าความหนาตรงจุดที่บางที่สุดของถ้วยที่ได้จากแม่พิมพ์ Nitriding มากกว่าถ้วยที่ได้จากแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบผิวถึงประมาณร้อยละ 4.7 ทั้งนี้ เป็นเพราะกรณีแม่พิมพ์ Nitriding ต้องการแรงในการลากขึ้นรูปต่ำที่สุด จึงทำให้ความเค้นดึงในผนังถ้วยน้อยที่สุด ส่งผลให้ความหนาของถ้วยที่ได้ลดลงน้อยที่สุด (คงความหนาเดิมไว้ได้มากที่สุด) สอดคล้องกับผลการทดสอบหาค่า *LDR* ที่ผ่านมา



รูปที่ 5 อิทธิพลของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูป (กรณีที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.05)



**รูปที่ 6** อิทธิพลของสารเคลือบและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อความหนาบริเวณต่างๆ ของผนังถั่ว (กรณีนี้ที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.05)

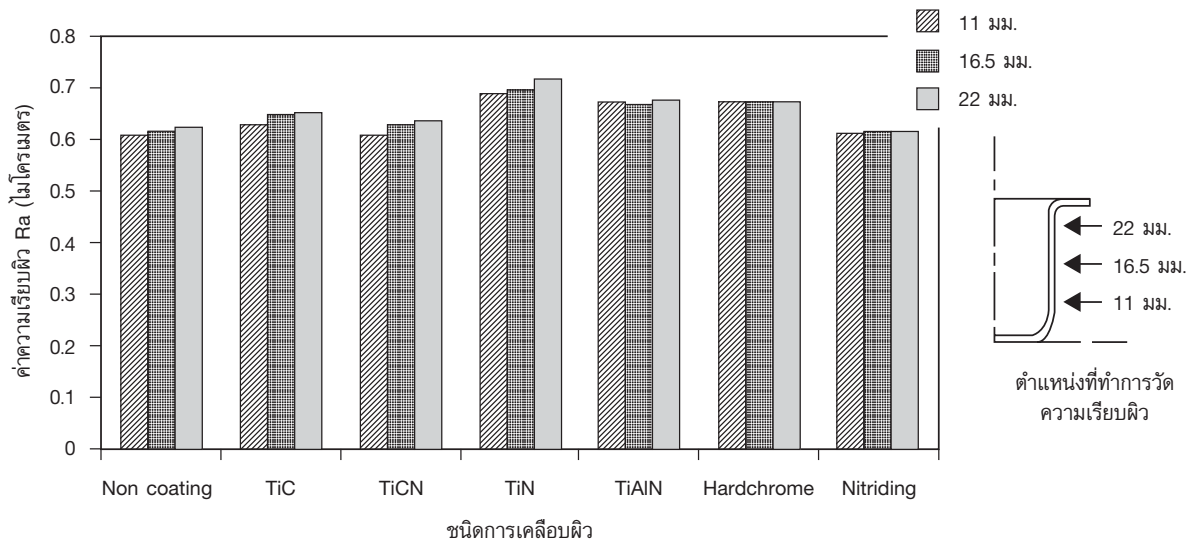


**รูปที่ 7** อิทธิพลของสารเคลือบและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อความหนาตรงตำแหน่งที่บางที่สุดของผนังถั่ว (กรณีนี้ที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.05)

#### 4.5 อิทธิพลของชั้นเคลือบผิวต่อค่าความเรียบผิว ถ้วยสำเร็จ

ในการทดลองนี้ทำการลากขึ้นรูปถ้วยแบบมีปีกโดยควบคุมความสูงถ้วยให้มีค่าคงที่คือเท่ากับ 33 มม. ในทุกอัตราส่วนการขึ้นรูป และได้ทำการวัดความเรียบผิว (Surface roughness:  $R_a$ ) ในแนวเส้นรอบวงของถ้วยที่ตำแหน่งความสูง 11, 16.5 และ 22 มม. จากกันถ้วย ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 8 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ความเรียบผิวที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกันของถ้วยที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับความเรียบผิวเริ่มต้นของแผ่นชิ้นงานซึ่งเท่ากับ 0.089 ไมโครเมตร พบว่าผิวถ้วยที่ได้หยาบขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะในการลากขึ้นรูปลึก กลไกการเปลี่ยนผิวที่เกิดขึ้นจะเป็นกลไกผสมระหว่าง 1) การถ่ายผิวจากแม่พิมพ์มาสู่ชิ้นงานเมื่อเกิดการสัมผัสกันของผิวทั้งสอง (Metal to metal contact) [12] และ 2) กลไกการเกิดผิวหยาบ (Surface roughening) เนื่องจากการเปลี่ยนรูปชิ้นงานแบบผิวอิสระ (Free surface deformation) [13] โดยที่กลไกอันแรกจะเกิดขึ้นเมื่อมีความดันระหว่างผิวสัมผัสสูง (High contact pressure) และมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวทั้งสอง เช่น กลไกที่เกิดขึ้นในกรรมวิธีรีดลดความหนาผนัง (Cup ironing) และการดึงท่อหรือลวดผ่านตาย (Tube or wire drawing) ทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าวเรียบเงาเนื่องจากการถ่ายผิวจากแม่พิมพ์ ส่วนในกรรมวิธีลากขึ้น

รูปลึก ชิ้นงานจะเกิดการสัมผัสกับแม่พิมพ์ตรงรัศมีบ่าตายและบริเวณตายแลนดบ้างส่วน แต่เนื่องจากช่องว่างแม่พิมพ์ที่ใช้มีค่ามากกว่าความหนาชิ้นงาน ดังนั้นความดันระหว่างผิวสัมผัสจึงมีค่าไม่มากนัก ผิวของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปจึงได้รับอิทธิพลจากกลไกการเกิดผิวหยาบมากกว่า เนื่องจากระหว่างการขึ้นรูปผนังถ้วยได้รับความเค้นดึงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้ผิวถ้วยที่ได้หยาบกว่าผิวแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดฟิล์มแข็งและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความเรียบผิวของถ้วยที่ได้ พบว่าความเรียบผิวของถ้วยที่ได้จากแม่พิมพ์ต่างชนิดกันไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะผิวถ้วยได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่จากกลไกการเปลี่ยนรูปแบบผิวอิสระนั่นเอง อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าถ้วยที่ได้จากแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์ม TiN, TiAlN และแม่พิมพ์ชนิด Hardchrome มีแนวโน้มที่จะให้ถ้วยที่มีผิวหยาบกว่าแม่พิมพ์ชนิดอื่นเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่มีฟิล์มเคลือบหลุดลอกออกมาเกาะที่ผิวถ้วยบางส่วน และเกิดการรอยขีดข่วนบนผิวถ้วยตามที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อ 4.1 โดยในการทดลองนี้ได้ขึ้นรูปถ้วยเพียงแค่ 7 ถ้วยต่อแม่พิมพ์แต่ละชนิดเท่านั้น ซึ่งถ้าหากจำนวนครั้งในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดการยึดติดรุนแรงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดรอยขีดข่วน รุนแรงขึ้นได้สำหรับแม่พิมพ์ทั้งสามตัวดังกล่าว และอาจรวมถึงแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว ที่พบรอยขีดข่วนบนผิวถ้วยด้วยเช่นกัน



รูปที่ 8 อิทธิพลของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อค่าความเรียบผิวชิ้นงานสำเร็จ (กรณีใช้อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.05)

## 5. สรุปผลการวิจัย

- แม่พิมพ์ชนิด Nitriding เพิ่มความสามารถในการลากขึ้นรูปได้สูงที่สุด โดยทำให้ได้ค่า *LDR* เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4.8 เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว และใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำที่สุดโดยสามารถลดแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปได้ถึงประมาณร้อยละ 5 ซึ่งทำให้ถ้วยที่ได้มีการลดลงของความหนาผนังน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน
- แม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์ม TiC และ TiCN ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูปให้สูงขึ้น แต่มีแนวโน้มป้องกันการเกิดการยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวแม่พิมพ์ได้
- แม่พิมพ์ชนิด Hardchrome ทำให้การยึดติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวแม่พิมพ์รุนแรงขึ้น ส่งผลให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานที่เห็นได้ค่อนข้างชัด และทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูง
- ฟิล์มเคลือบ TiN และ TiAlN เกิดการหลุดลอกของแผ่นฟิล์มขณะลากขึ้นรูป ทำให้ผลการทดสอบทั้งในแง่ของค่า *LDR* แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป และคุณภาพของ

ผิวถ้วยที่ได้ไม่ดัดนัก ซึ่งผลที่ได้ในกรณีของฟิล์ม TiN ขัดแย้งกับงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าไม่ใช่แค่ชนิดของสารเคลือบเท่านั้นที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป แต่กรรมวิธีการเคลือบก็มีผลเช่นเดียวกันโดยจากการวิจัยนี้ใช้การเคลือบผิวด้วย PVD-Arc ซึ่งให้ผลไม่ดีเหมือนกับการเคลือบด้วย TiN-Arc เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น

5. ผลที่ได้จากการทดสอบโตรบอไลย์แบบ Pin-on-Disk ไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบการลากขึ้นรูปเท่าที่ควร ทั้งนี้เพราะความดันระหว่างผิวสัมผัสของการทดสอบทั้งสองวิธีแตกต่างกันมาก ทำให้กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสกันของผิวแตกต่างกัน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และสถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยชิ้นนี้ รวมทั้งบริษัท U.T.T. Engineering ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเคลือบผิวแม่พิมพ์บางชนิด

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Lange, K., 1985, *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, New York, pp. 20.1-20.20.
2. Suchy, I., 1997, "Drawn Parts", *Handbook of Die Design*, McGraw-Hill, New York, pp. (9-1)-(9-83).
3. Schey, J.A, 1984, "Tribology in Metal-working", *The American Society for Metals*, USA pp. 17-23.
4. Naka, T. and Yoshida, F., 1999, "Deep Drawability of Type 5083 Aluminium-Magnesium Alloy Formability and Process Technology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, pp. 14-19.
5. Takuda, H., Yoshii, T., and Hatta, N., 1999, "Finite-element Analysis of the Formability of Magnesium-Based Alloy AZ31 Sheet", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89, pp. 135-140.
6. Pesch, P., 2003, "Performance of Hard Coated Steel Tools for Steel Sheet Drawing", *Journal of Surface and Coatings Technology*, Vol. 163-164, pp. 739-746.
7. Mitterer, C., Holler, F., Reitberger, D., and R. Kullmer, 2003, "Industrial Applications of PACVD Hard Coatings", *Journal of Surface and Coatings Technology*, Vol. 163-164, pp. 716-722.
8. Murakawa, M., Koga, N., and Kumagai, T., 1995, "Deep-Drawing of Aluminum Sheets without Lubricant by Use of Diamond-like Carbon Coated Dies", *Journal of Surface and Coatings Technology*, Vol. 76-77, Part 2, pp. 553-558.
9. Imbeni, V., Martini, C., Lanzoni, E., Poli, G., and Hutchings, I.M., 2001, "Tribological Behaviour of Multilayered PVD Nitride Coatings", *Wear*, Vol. 251, pp. 997-1002.
10. Takadoun, J. and Bennani, H.H., 1997, "Influence of Substrate Roughness and Coating Thickness on Adhesion, Friction and Wear of Tinfilms", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 96, pp. 272-282.
11. Lovell, M.R. and Deng, Z., 1999, "Experimental Investigation of Sliding Friction between Hard and Deformable Surfaces with Application to Manufacturing Processes", *Journal Wear*, Vol. 236, pp. 117-127.
12. Masami, S., Hiroyuki, S., and Nozomu, K., 1989, "Experimental Analysis of Ironing of Thin Metal Cups", *Journal Transactions of the ASME*, Vol. 111, pp. 60-62.