การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น

# การศึกษาอิทธิพลของความสูงดายแลนด์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก

# Influences of Die land Height in Deep Drawing Process

พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์[1)] และ วารุณี เปรมานนท์[2)]
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-24709117 โทรสาร 0-2270-9111
E-mail: pongpan.kae@kmutt.ac.th[1)], varunee.pre@kmutt.ac.th[2)]

Pongpan Kaewtatip[1)] and Varunee Premanond[2)]
Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
91 Pracha-u-tid Rd, Bangmod Tungkru Bangkok 10140 Thailand
Tel 0-24709117 Fax 0-2470-9111
E-mail: pongpan.kae@kmutt.ac.th[1)], varunee.pre@kmutt.ac.th[2)]

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยชิ้นนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อศึกษาอิทธิพลของความสูงดายแลนด์ (Die land) ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก เนื่องจากในการผลิตดายผู้ผลิตต้องเจียระไนและขัดผิวดายตรงส่วนดายแลนด์ให้มีความเรียบ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยตรง แต่ที่ผ่านมาไม่มีงานวิจัยที่บ่งบอกอิทธิพลของดายแลนด์ไว้อย่างชัดเจน งานชิ้นนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงดายแลนด์ที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูป ความหนา ความเรียบผิว และการดีดตัวกลับของชิ้นงานสำเร็จ โดยการวิเคราะห์นั้นจะทำควบคู่กันระหว่างการทดลองจริง และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยใช้โปรแกรม OPTRIS ในการทดลองได้ทำการลากขึ้นรูปถ้วยกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 mm โดยใช้เครื่องทดสอบโลหะแผ่นทำการลากขึ้นรูป วัสดุชิ้นงานมีสี่ชนิดคือเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC) และอลูมิเนียม (A1100) เงื่อนไขที่ใช้ลากขึ้นรูปกำหนดไว้ดังนี้ รัศมีพันช์ 8 mm รัศมีดาย 5 mm ช่องว่างแม่พิมพ์ข้างละ 1.25 mm สารหล่อลื่นที่ใช้คือ TDN81 อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.8 ส่วนความสูงของดายแลนด์ที่ทำการศึกษามีขนาดดังนี้ คือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm จากผลการทดลองพบว่า ความสูงดายแลนด์จะไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงาน และความเรียบผิวของชิ้นงาน แต่จะมีอิทธิพลต่อการดีดตัวกลับของชิ้นงาน โดยที่ดายแลนด์ 0 mm จะเกิดการดีดตัวกลับมากที่สุด ในส่วนของผลที่ได้จาก FEM พบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองจริง หรืออาจกล่าวได้ว่าในกรณีของชิ้นงานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงในแง่ของการดีดตัวกลับของชิ้นงาน จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตดายลงได้ โดยการออกแบบดายให้มีความสูงของส่วนดายแลนด์ที่สั้นลง

**คำสำคัญ :** กรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก / ความสูงดายแลนด์ / คุณภาพชิ้นงาน / การดีดตัวกลับ

**Abstract**

The objective of this research is to study the influences of the die land height on the performances of a deep drawing process, which have not been reported anywhere yet. In die making procedures, the straight portion of the die, so called: the die land, must have been grinded and polished which leads to an increase of production cost. In this work, the influences of die land height on deep drawing force, cup wall thickness, surface roughness and springback of the drawn products were investigated. Both an experiment and a simulation using commercial FE code (OPTRIS) have been conducted. Universal sheet metal testing machine was used for deep drawing circular cups with diameter of 44 mm. Four types of sheet materials, i.e., stainless steel (SUS304), cold rolled steel (SPCC), galvanized steel (SGCC) and aluminum (A1100) were used in this work. Punch and die radii have been determined to be 8 and 5 mm, respectively, while tool clearance is 1.25 mm per side. The drawing ratio was fixed to be constant at 1.8. Commercial lubricant TDN81 was used in the experiment. The die land height has been varied as 40, 25, 20, 10 and 0 mm. From the results, the die land height has no effect on deep drawing force, cup wall thickness and surface roughness of the products. However, it

influences the quantity of springback. The die without die land gives the products having largest value of springback. The results obtained from experiment and simulation agreed well. It can be concluded that, in the case of springback being not a critical requirement, the cost of die making can be reduced by using dies having shorter die land height.

**Keyword :** Deep drawing process / Die land height / Quality of parts produced / Springback

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมมีความก้าวหน้ามาก และการแข่งขันกันทางด้านธุรกิจ ความต้องการในการผลิตสินค้าก็มีมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการที่จะผลิตชิ้นงานออกมาแต่ละอย่างนั้นเพื่อให้ได้ผลกำไรที่ดี และสามารถขายในราคาถูกพอที่จะแข่งขันกับสินค้าของผู้ผลิตรายอื่นได้ จำเป็นที่จะต้องลดต้นทุนในการผลิตสินค้าให้น้อยลง เพื่อที่จะทำให้ผู้ประกอบการประสบความสำเร็จในธุรกิจได้

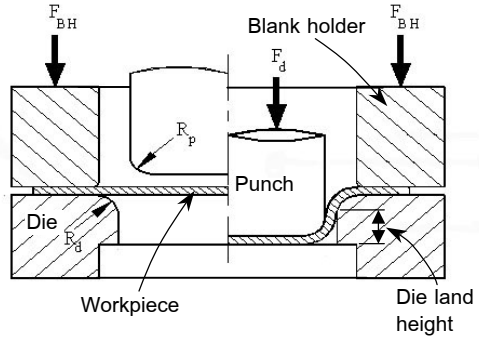
กรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก (ดังรูปที่1) ก็เป็นกรรมวิธีผลิตที่มีความจำเป็นในงานทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานต่าง ๆที่เป็นโลหะแผ่นที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆไป เช่น การผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ เป็นต้น ในกรรมวิธีลากขึ้นรูปนั้นเนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมักมีราคาที่ค่อนข้างสูง เพราะมีต้นทุนทั้งในส่วนของวัสดุทำพิมพ์ซึ่งเป็นเหล็กเครื่องมือหรือเหล็กเกรดพิเศษที่มีราคาสูง แล้วยังต้องผ่านกรรมวิธีการผลิตหลายขั้นตอนตั้งแต่การกัดให้ได้รูปร่างเบื้องต้น ก่อนที่จะนำไปชุบผิวแข็ง และเจียระไนขัดผิวเพื่อให้ได้ความเรียบตามที่ต้องการ ดังนั้นถ้าหากสามารถที่จะทำการลดราคาต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ในการลากขึ้นรูปลึกลงได้จะทำให้ต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ลดลง โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เน้นไปถึงการทำแม่พิมพ์ตัวเมียหรือดาย (Die) ซึ่งในส่วนของดายนั้นจะมีราคาที่ค่อนข้างสูงกว่าพันช์ (Punch) เพราะมีขนาดใหญ่กว่า ในการที่จะลดต้นทุนในการทำดายแต่ละตัว จะมุ่งพิจารณาไปยังส่วนที่เรียกว่าดายแลนด์ (Die land) โดยดายแลนด์จะเป็นส่วนเรียบตรงของดายที่ถัดลงมาจากบ่าดายดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะสัมผัสกับชิ้นงานขณะลากขึ้นรูป ดังนั้นส่วนของดายแลนด์ต้องมีผิวที่เรียบซึ่งสามารถทำได้โดยการเจียระไนและขัดผิว (Lapping) ถ้าดายแลนด์มีความยาวมากต้นทุนในการเตรียมผิวส่วนนั้นก็จะมากตาม ดังนั้นถ้าใช้ดายแลนด์ที่สั้นลงจะลดต้นทุนในส่วนนี้ลงได้ ซึ่งจากการเปรียบเทียบราคาของดายที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตแม่พิมพ์พบว่าดายที่มีความสูงของดายแลนด์แตกต่างกันจะทำให้ราคาแตกต่างกันได้มากถึง 30% อย่างไรก็ตามจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมา ยังไม่มีทฤษฎีและงานวิจัยไหนที่กล่าวถึงอิทธิพลของความสูงดายแลนด์อย่างชัดเจนมาก่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะศึกษาอิทธิพลของความสูงดายแลนด์ที่มีต่อคุณภาพชิ้นงาน และแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึก โดยจะทำการศึกษาทั้งการทำการทดลองจริง และการจำลองการทำงานโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อดูว่าผลที่ได้ออกมาสอดคล้องกันหรือไม่ จากผลการวิจัยที่ได้จะช่วยให้สามารถทราบถึงอิทธิพลของความสูงของดายแลนด์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก โดยจะสามารถกำหนดขนาดความสูงของดายแลนด์ที่มีความเหมาะสมได้ ซึ่งจะช่วยทำให้ประหยัดต้นทุนได้อีกทางหนึ่ง

## 2. วิธีการวิจัย

ในการทำวิจัยจะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่งคือการทดลองลากขึ้นรูปลึกแผ่นงานจริง และส่วนที่สองเป็นการจำลองการทำงานโดยใช้ซอฟท์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ OPTRIS ซึ่งเป็นซอฟท์แวร์ทางการค้าที่นิยมใช้สำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่น [1] โดยจะทำการจำลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC) และอลูมิเนียม (A1100) เพื่อให้ทราบว่าสำหรับการลากขึ้นรูปลึกวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกัน จะมีอิทธิพลของความสูงดายแลนด์แตกต่างกันหรือไม่ ความหนาเริ่มต้นของวัสดุทุกชนิดที่ใช้เท่ากับ 1.0 mm โดยทำการเตรียมแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm แล้วทำการลากขึ้นรูปเป็นถ้วยทรงกระบอกแบบไม่มีปีก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถ้วยเท่ากับ 44 mm ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio: DR) เท่ากับ 1.8 พันช์และดายที่ใช้มีรัศมีที่บ่าเท่ากับ 8 และ 5 mm ตามลำดับ ทั้งพันช์ ดาย และแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holder) ทำมาจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 โดยทำการชุบแข็งเพื่อให้มีความแข็งประมาณ 60 HRC แล้วทำการเจียระไนและขัดผิวโดยเฉพาะบริเวณที่มีการสัมผัสกับชิ้นงานให้เรียบ ช่องว่างระหว่างพันช์และดายมีขนาดข้างละ 1.25 mm ใช้น้ำมันทางการค้า TDN81 (ความหนืด 164 cSt ที่ 40°C) เป็นสารหล่อลื่นในการทดลอง ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความสูงของดายแลนด์ โดยจะใช้ดาย 5 ตัวที่มีความสูงของดายแลนด์แตกต่างกัน 5 ระดับคือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm การทดลองลากขึ้น




รูปที่ 1 กรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก

รูปที่ 2 เครื่องทดสอบโลหะแผ่น

รูปลึกจะใช้เครื่องทดสอบโลหะแผ่น (Universal sheet metal testing machine) ขนาด 30 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเครื่องทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปกับระยะทางที่พันช์เคลื่อนที่ได้ เมื่อทำการลากขึ้นรูปได้ชิ้นงานสำเร็จ จะนำมาวัดความหนาของผนังชิ้นงาน ความเรียบผิวภายนอก และปริมาณการดีดตัวกลับ (Springback) ของชิ้นงานที่ได้ โดยในการออกแบบการทดลอง จะต้องใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 7 ชิ้นสำหรับแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### 2.2 วิธีการทำไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม OPTRIS

ในการจำลองการขึ้นรูปด้วย FEM จะเริ่มจากการนำวัสดุที่ใช้ในการวิจัยทั้ง 4 ชนิด มาทำการทดสอบการดึง เพื่อที่จะหาสมบัติทางกลที่จำเป็นของวัสดุป้อนลงในโปรแกรม โดยจะทำการตัดชิ้นงานเริ่มต้นให้เป็นรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM [2] ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะถูกตัดในทิศทาง $0^{\circ}$ $45^{\circ}$ และ $90^{\circ}$ เทียบกับแนวรีด (Rolling direction) ผลที่ต้องการจากการทดสอบการดึง คือ ค่าอัตราส่วนความเครียดถาวร (Plastic strain ratio: r value) ของแต่ละแนวแกน และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร (Flow curve) โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการ

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \qquad (1)$$

ซึ่งผลจากการทดสอบการดึงของวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 1 ในการจำลองการทำงานจะกำหนดให้พันช์ ดาย และแผ่นจับยึดชิ้นงานเป็น Rigid body ในขณะที่ชิ้นงานจะเป็น Elasto-plastic body เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบ Shell element ที่กำหนดความหนาเริ่มต้นให้เท่ากับ 1.0 mm และจะทำการจำลองโดยเปลี่ยนขนาดของดายแลนด์เป็น 5 ระดับคือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm เหมือนกับในการทดลอง โดยจะทำการบันทึกผลแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของผนังชิ้นงาน และปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

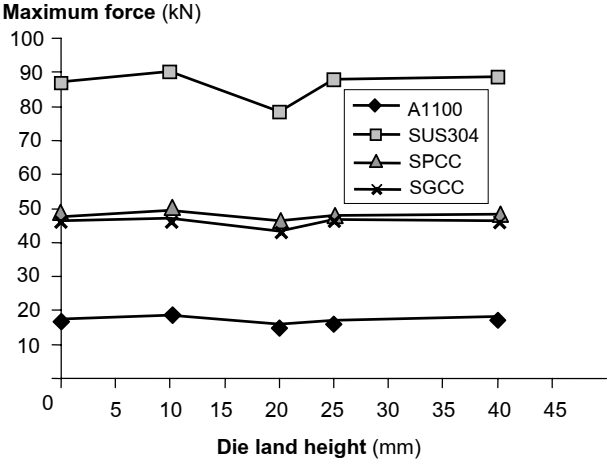
ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการดึง

| Materials | Direction | r value | K (MPa) | n |
|---|---|---|---|---|
| เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) | $90^{\circ}$ | 1.302 | 607 | 0.180 |
| | $45^{\circ}$ | 0.878 | | |
| | $0^{\circ}$ | 1.232 | | |
| เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) | $90^{\circ}$ | 0.978 | 1,647 | 0.422 |
| | $45^{\circ}$ | 1.180 | | |
| | $0^{\circ}$ | 0.861 | | |
| เหล็กเคลือบสังกะสี (SGCC) | $90^{\circ}$ | 1.790 | 312 | 0.211 |
| | $45^{\circ}$ | 1.077 | | |
| | $0^{\circ}$ | 1.298 | | |
| อะลูมิเนียม (A1100) | $90^{\circ}$ | 0.364 | 548 | 0.137 |
| | $45^{\circ}$ | 0.364 | | |
| | $0^{\circ}$ | 0.254 | | |

## 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

### 3.1 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปแสดงในรูปที่ 3 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปกับความสูงของดายแลนด์สำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด จากรูปดังกล่าวพบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของดายแลนด์ จะไม่มีอิทธิพลต่อขนาดของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ยกเว้นกรณีของดายที่มีความสูงดายแลนด์เท่ากับ 20 mm จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยที่สุด

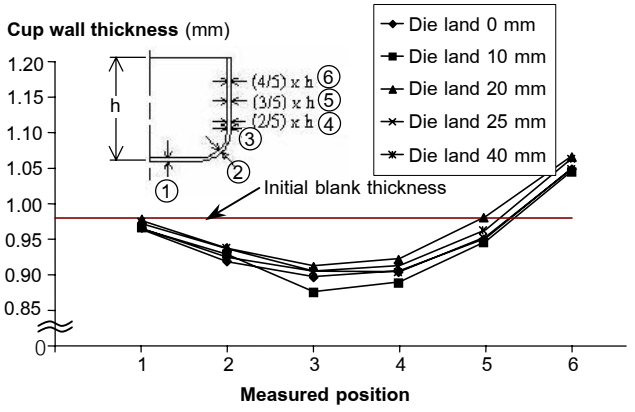



รูปที่ 3 ผลแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

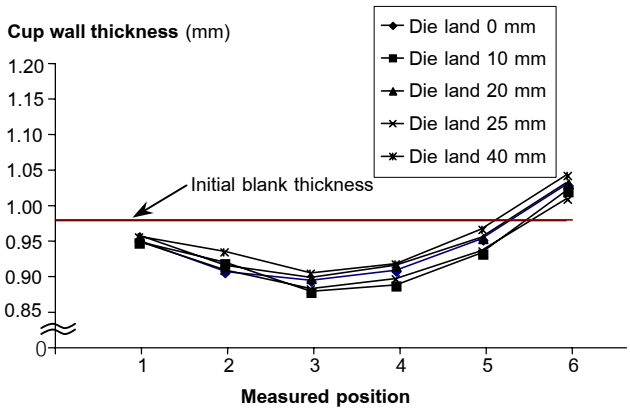
โดยปกติแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน [3] คือ (1) ส่วนที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน (2) ส่วนที่เอาชนะแรงเสียดทานระหว่างปีกของชิ้นงานกับดาย และปีกของชิ้นงานกับแผ่นจับยึดชิ้นงาน (3) ส่วนที่เอาชนะแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับบ่าดาย และ (4) ส่วนที่ใช้ในการดัดชิ้นงานบริเวณบ่าดาย ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของดายแลนด์จะมีผลต่อแรงเสียดทานในส่วนที่ (3) เท่านั้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขนาดของแรงรวมน้อยมาก ดังนั้นกรณีที่ดายซึ่งมีความสูงดายแลนด์เท่ากับ 20 mm ใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่าดายตัวอื่นๆ น่าจะเกิดมาจากสาเหตุอื่น ที่ไม่ใช่อิทธิพลของความสูงดายแลนด์โดยตรง ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า ในการทดลองจริงนั้นไม่สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆของการผลิตดาย ให้เป็นไปตามแบบที่ต้องการได้ โดยเฉพาะขนาดของรัศมีดาย ซึ่งจากการออกแบบให้ดายทุกตัวที่ใช้ในการทดลองมีขนาดรัศมีที่บ่าเท่ากันโดยให้เท่ากับ 5 mm นั้น แต่จากการตรวจสอบดายที่ได้สั่งทำมาจากผู้ผลิต พบว่ามีค่าความผิดพลาดของขนาดรัศมีดายอยู่ โดยดายที่มีขนาดของดายแลนด์ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm จะมีขนาดรัศมีที่บ่าจากการวัดจริงเท่ากับ 4.84, 4.79, 4.95, 4.80 และ 4.79 mm ตามลำดับ และความผิดพลาดนี้เองที่ส่งผลกระทบกับแนวโน้มของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป โดยสาเหตุที่แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของดายที่มีความสูงดายแลนด์ 20 มิลลิเมตรน้อยกว่าดายตัวอื่นๆ เพราะรัศมีที่บ่าของดายตัวดังกล่าวมีขนาดใหญ่กว่าของดายตัวอื่น ทำให้ขนาดของรัศมีในการดัดตัวของชิ้นงานบริเวณบ่าดายมีมากกว่า จึงทำให้ใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่าดายตัวอื่นๆนั่นเอง

### 3.2 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อความหนาของชิ้นงาน

ผลการวัดความหนาของผนังชิ้นงาน ที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก โดยใช้ดายที่มีความสูงของดายแลนด์แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีของวัสดุเหล็กกล้ารีดเย็น และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี การวัดความหนาของชิ้นงานจะวัดที่ตำแหน่งต่างๆตั้งแต่ก้นถ้วยจนกระทั่งถึงขอบ จากผลที่ได้จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความสูงของดายแลนด์จะไม่มีอิทธิพลต่อความหนาผนังของชิ้นงาน ทั้งนี้ผลการวัดความหนาของชิ้นงานวัสดุอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ก็ได้แนวโน้มเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นจากรูปจะเห็นว่าตรงบริเวณใกล้ๆกับรัศมีก้นถ้วยจะมีความหนาของผนังน้อยที่สุด เพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงในแนวแกนสูงสุด และต้องรับความเค้นดึงตลอดระยะเวลาของการขึ้นรูป ส่วนบริเวณขอบถ้วยจะมีความหนามากที่สุด และจะมีความหนาเพิ่มมากกว่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงบริเวณปีกถ้วยขณะขึ้นรูปนั่นเอง [4]




(ก) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC)

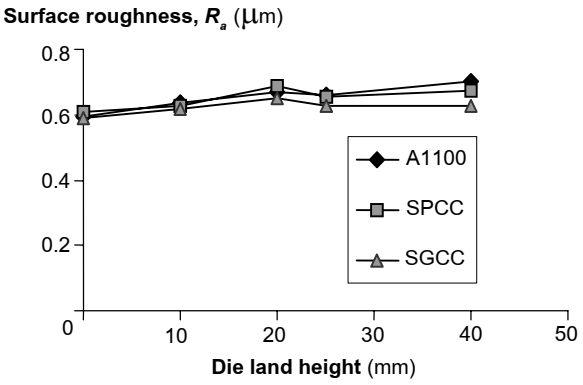



(ข) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC)

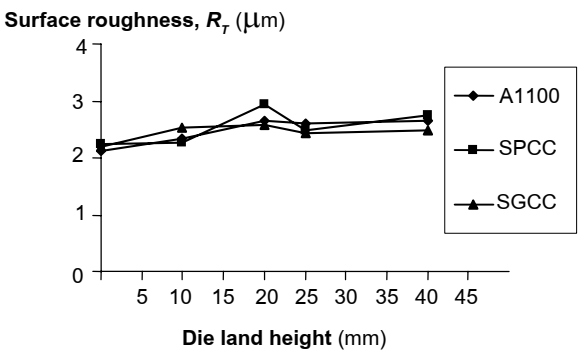
รูปที่ 4 ผลการวัดความหนาผนังของชิ้นงาน

### 3.3 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงดายแลนด์กับค่าความเรียบผิวเฉลี่ย ($R_a$) และค่าความเรียบผิวสูงสุด ($R_T$) ในแนวเส้นรอบวงของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยจะเป็นผลการทดลองสำหรับวัสดุ 3 ชนิดคือ อลูมิเนียม เหล็กกล้ารีดเย็น และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ส่วนกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่สามารถวัดความเรียบผิวในแนวเส้นรอบวงได้ เนื่องจากชิ้นงานของวัสดุดังกล่าวจะเกิดการแตกภายหลังจากการขึ้นรูปสำเร็จแล้ว (Delayed crack) จากกราฟจะเห็นว่าขนาดของดายแลนด์ไม่มีอิทธิพลที่ชัดเจนต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน ทั้งในกรณีของค่าความเรียบผิวเฉลี่ยและค่าความเรียบผิวสูงสุด อย่างไรก็ตามจะเห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าความเรียบผิวที่วัดได้อยู่บ้าง แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่มีแนวโน้มที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของขนาดดายแลนด์ นั่นคือกรณีที่ความสูงของดายแลนด์เท่ากับ 20 mm พบว่าชิ้นงานที่ได้จะมีค่าความเรียบผิวสูงสุดหรือมีผิวหยาบที่สุดนั่นเอง จึงเป็นไปได้ว่าความเรียบผิวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรแฝงอื่น ที่ไม่ใช่ขนาดของดายแลนด์ ซึ่งจากการตรวจสอบดายที่ได้รับจากผู้ผลิต พบว่าความเรียบผิวด้านบนของดายแต่ละตัวบริเวณที่สัมผัสกับปีกชิ้นงานจะมีความแตกต่างกัน โดยผลจากการวัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของดายแต่ละตัวบริเวณดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7 จากผลดังกล่าวจะเห็นว่า ดายที่มีผิวเรียบที่สุด (ดายที่ไม่มีดายแลนด์) จะให้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบที่สุด ส่วนดายที่มีผิวหยาบที่สุด (ดายที่มีขนาดดายแลนด์เท่ากับ 20 mm) จะให้ชิ้นงานที่มีผิวหยาบที่สุดเช่นเดียวกัน และสำหรับดายตัวอื่นๆ จะเห็นว่าความเรียบผิวของดายและของชิ้นงานที่ได้จะมีความสัมพันธ์กัน ทั้งนี้เกิดจากขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านผิวดายบริเวณดังกล่าว โดยมีแผ่นจับยึดชิ้นงานทำการกดชิ้นงานให้แนบกับผิวดาย ขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวทั้งสอง ทำให้เกิดการถ่ายผิวจากดายไปสู่ชิ้นงาน ส่งผลให้ความเรียบผิวของชิ้นงานที่ได้มีความสอดคล้องกับผิวดายที่ใช้ในการลากขึ้นรูปนั่นเอง




รูปที่ 5 ผลการวัดความเรียบผิวเฉลี่ย ($R_a$) ของชิ้นงาน

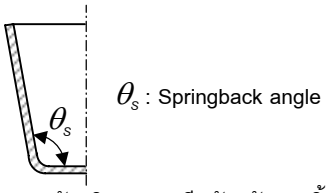



รูปที่ 6 ผลการวัดความเรียบผิวสูงสุด ($R_T$) ของชิ้นงาน

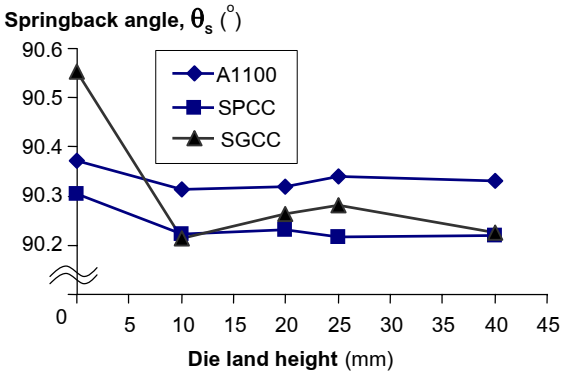
รูปที่ 7 ค่าความเรียบผิวเฉลี่ย ($R_a$) ของผิวด้านบนของดาย

### 3.4 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อการดีดตัวกลับของชิ้นงาน

การดีดตัวกลับ (Springback) ของชิ้นงาน จะทำการวัดจากมุมภายในของกันถ้วยดังรูปที่ 8 โดยถ้าค่ามุมที่วัดได้มีค่าเท่ากับ $90^{\circ}$ แสดงว่าไม่มีการดีดตัวกลับเกิดขึ้น และถ้ามุมที่วัดได้มีค่ามากจะแสดงถึงปริมาณการดีดตัวกลับที่มีมากด้วยนั่นเอง ผลการวัดการดีดตัวกลับของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของดายแลนด์กับปริมาณการดีดตัวกลับสำหรับวัสดุแต่ละชนิด (ในส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่มีผลการทดลอง เนื่องจากเหตุผลที่อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้) จากรูปจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยดายที่ไม่มีดายแลนด์ (ดายแลนด์เท่ากับ 0) จะเกิดการดีดตัวกลับมากที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในกรณีของเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี และจะพบว่าเมื่อขึ้นรูปโดยใช้ดายที่มีดายแลนด์ ขนาดของการดีดตัวกลับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ความสูงของดายแลนด์จะเปลี่ยนไปก็ตาม ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่ากรณีของดายที่ไม่มีดายแลนด์นั้น หลังจากขอบบนของชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านรัศมีบ่าดาย จะไม่มีส่วนของดายที่ช่วยประคองด้านข้างถ้วยไว้ ทำให้สามารถดีดกลับได้อย่างอิสระ ต่างจากกรณีการใช้ดายแลนด์ซึ่งจะมีพื้นผิวของดายบริเวณดายแลนด์ ช่วยประคองขอบถ้วยไว้ทำให้เกิดการดีดตัวกลับน้อยลงดังรูปที่ 10 แต่การเพิ่มขนาดของ

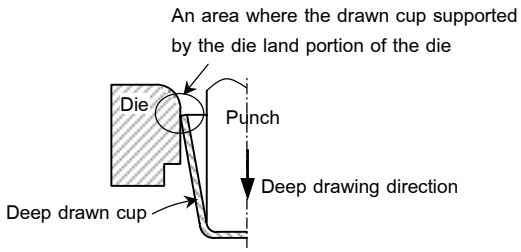



รูปที่ 8 การวัดปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงาน




รูปที่ 9 ผลการวัดปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงาน

ดายแลนด์มากกว่า 10 mm ก็จะไม่ช่วยลดขนาดการดีดตัวกลับที่เกิดขึ้น เพราะดายจะช่วยประคองชิ้นงานตรงบริเวณขอบบนเท่านั้น ดังนั้นการเพิ่มขนาดของดายแลนด์ก็ไม่ได้ช่วยให้เนื้อที่ที่ผิวดายสัมผัสกับชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นแต่อย่างใด

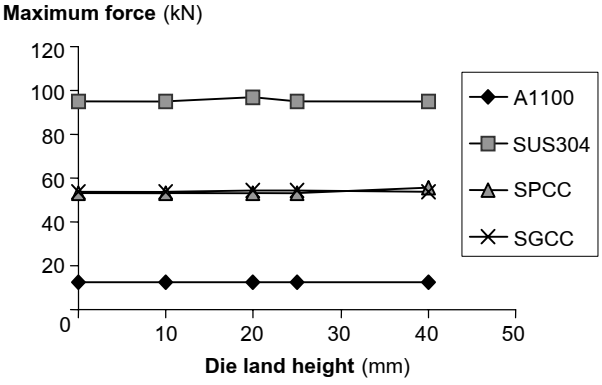



รูปที่ 10 การลดการดีดตัวกลับของชิ้นงานโดยใช้ดายที่มีดายแลนด์

## 4. ผลการจำลองการทำงานด้วย FEM

### 4.1 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

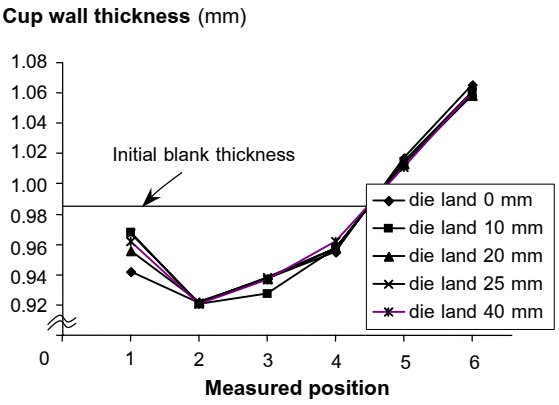
ผลของแรงสูงสุดที่ได้จาก FEM แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจากรูปดังกล่าว สามารถเห็นได้ชัดเจนกว่าผลการทดลองว่าความสูงของดายแลนด์ไม่มีอิทธิพลต่อขนาดของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป เนื่องจากในการจำลองการทำงาน สามารถควบคุมตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดรัศมีดายได้เป็นอย่างดี ทำให้ไม่มีอิทธิพลแฝงของตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนั้นค่าของแรงสูงสุดที่ได้จาก FEM ก็มีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม OPTRIS ได้



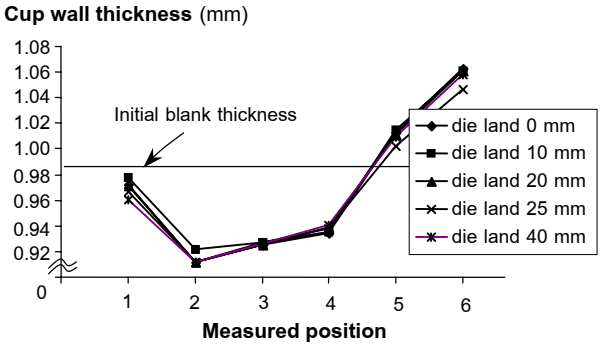

รูปที่ 11 ผลแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่ได้จาก FEM

### 4.2 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อความหนาของชิ้นงาน

ผลของความหนาของชิ้นงานเหล็กกล้ารีดเย็นและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีหลังผ่านการลากขึ้นรูปที่ได้จาก FEM แสดงในรูปที่ 12 จากผลดังกล่าวจะพบว่า ความสูงของดายแลนด์ไม่มีผลต่อความหนาของชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นจริงสำหรับอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาการกระจายของความหนาของชิ้นงานก็จะพบว่า บริเวณใกล้ๆรัศมีกันถ้วยชิ้นงานจะมีความหนาน้อยลง ส่วนบริเวณขอบด้านบนของผนังถ้วยจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ดังเหตุผลที่อธิบายไว้ข้างต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองและจาก FEM สอดคล้องกันเป็นอย่างดี




(ก) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC)

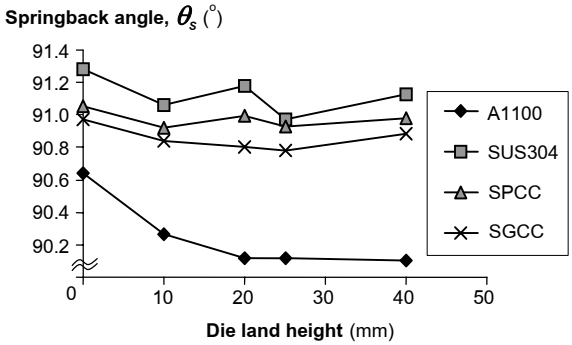



(ข) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC)

รูปที่ 12 ผลของความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จาก FEM

### 4.3 อิทธิพลของดายแลนด์ที่มีผลต่อการดีดตัวกลับของชิ้นงาน

ผลการวัดการดีดตัวกลับของชิ้นงานที่ได้จาก FEM แสดงในรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยดายที่ไม่มีดายแลนด์จะเกิดการดีดตัวกลับมากที่สุด และจะพบว่าเมื่อขึ้นรูปโดยใช้ดายที่มีดายแลนด์ ขนาดของการดีดตัวกลับจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ถึงแม้ความสูงของดายแลนด์จะเปลี่ยนไปก็ตาม ซึ่งแนวโน้มที่ได้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง แต่ค่ามุมของการดีดตัวกลับที่ได้จาก FEM และที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากการดีดตัวกลับจะขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ดังนั้นถ้าในการจำลองการทำงานไม่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้ได้แม่นยำ จะทำให้ปริมาณการดีดตัวกลับที่ได้ไม่ตรงกับค่าที่เป็นจริง อย่างไรก็ตามแนวโน้มของปริมาณการดีดตัวกลับที่ได้จะสามารถบอกถึงอิทธิพลของความสูงดายแลนด์ได้




รูปที่ 13 ผลของปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงานที่ได้จาก FEM

### 5. สรุป

5.1 ความสูงของดายแลนด์ไม่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของผนังชิ้นงาน และความเรียบผิวของชิ้นงาน

5.2 ดายที่ไม่มีดายแลนด์จะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีการดีดตัวกลับสูง การใช้ดายที่มีดายแลนด์จะทำให้การดีดตัวกลับลดลงได้ แต่การออกแบบให้ดายแลนด์มีค่ามากกว่า 10 mm ในงานวิจัยนี้ จะไม่ทำให้ปริมาณการดีดตัวกลับเปลี่ยนแปลงไป

5.3 ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย FEM มีแนวโน้มสอดคล้องกันดี ถึงแม้ค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกันบ้างก็ตาม

5.4 ในกรณีของชิ้นงานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงในแง่ของการดีดตัวกลับของชิ้นงานมาก จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตดายลงได้ โดยการออกแบบดายให้มีความสูงของส่วนดายแลนด์ที่สั้นลง


### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ นายเอกลักษณ์ กิตติอร่ามพงศ์ นายเฉลิมรัฐ โกศล และนายจิรเดช ประเสริฐศรี นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2546 ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บผลการทดลอง และการวิเคราะห์การทำงานด้วย FEM


### เอกสารอ้างอิง


[1] Frédéric Aberlenc and Jean-Luc Babeau, “OPTRIS and FICTURE: industrial tools to modelize sheet metal forming”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 34, Issues 1-4, September 1992, pp. 125-132.

[2] “Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 03.01, Designation E517-81, Reapproved 1987, pp. 560-565.

[3] Kurt Lange, et al, “Handbook of Metal Forming”, McGraw-Hill, 1985, pp.20.9.

[4] Betzalel Avitzur, “Handbook of Metal-Forming Processes”, John Wiley & Sons, 1983, pp.529-523.