

## สารบัญ

|                                       | หน้า |
|---------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ                       | ก    |
| บทคัดย่อภาษาไทย                       | ข    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                    | ง    |
| สารบัญ                                | จ    |
| สารบัญตาราง                           | ช    |
| สารบัญภาพ                             | ฉ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ             | ณ    |
| บทที่ 1 บทนำ                          | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ            | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์                      | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                 | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ         | 5    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7    |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง             | 7    |
| 2.2 นิยามศัพท์ที่สำคัญ                | 8    |
| 2.3 ทฤษฎีที่สำคัญ                     | 8    |
| 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง     | 34   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน              | 37   |
| 3.1 แผนการดำเนินงาน                   | 37   |
| 3.2 วัสดุที่จะนำมาใช้ทำการขึ้นรูปลึง  | 38   |
| 3.3 การออกแบบชิ้นงานและชุดแม่พิมพ์    | 41   |
| 3.4 การประกอบแม่พิมพ์และติดตั้ง       | 44   |
| 3.5 การเตรียมชิ้นงาน                  | 46   |
| 3.6 ตัวแปรทดสอบ                       | 47   |
| 3.7 แรงกดชิ้นงาน (Blank holder force) | 49   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| 3.8 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นตัดเปล่า                                   | 49   |
| 3.9 ขั้นตอนการตีกรีดวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มม.              | 52   |
| 3.10 ขั้นตอนการทดสอบและการเก็บข้อมูล                               | 53   |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์                              | 58   |
| <u>กิจกรรมที่ 1</u>                                                | 58   |
| 4.1 ผลของการทดสอบด้วยชนิดรูปร่างของแผ่นตัดเปล่า                    | 58   |
| 4.2 ผลของการทดสอบด้วยแรงกดที่ชิ้นงาน                               | 62   |
| 4.3 ผลของการทดสอบด้วยชนิดสารหล่อลื่น                               | 66   |
| 4.4 ผลของการทดสอบด้วยชนิดของครอว์บีด                               | 71   |
| <u>กิจกรรมที่ 2</u>                                                | 75   |
| 4.5 ผลการทดสอบอิทธิพลของรูปร่างแผ่นตัดเปล่า                        | 75   |
| 4.6 ผลการทดสอบอิทธิพลแรงกดชิ้นงาน                                  | 80   |
| 4.7 ผลการทดสอบอิทธิพลของครอว์บีด                                   | 94   |
| 4.8 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปจากโปรแกรมทางสถิติ Minit | 96   |
| <u>กิจกรรมที่ 3</u>                                                | 99   |
| 4.9 ผลของการทดสอบด้วยชนิดของครอว์บีด                               | 99   |
| 4.10 ครอว์บีดชนิดสามเหลี่ยม                                        | 100  |
| 4.11 ครอว์บีดชนิดครึ่งวงกลม                                        | 105  |
| 4.12 ครอว์บีดชนิดสามเหลี่ยมเอียง                                   | 110  |
| 4.13 การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยครอว์บีด                            | 114  |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ                                | 128  |
| <u>กิจกรรมที่ 1</u>                                                | 128  |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง                                                 | 128  |

สารบัญ (ต่อ)

|                     | หน้า |
|---------------------|------|
| 5.2 ข้อเสนอแนะ      | 130  |
| <u>กิจกรรมที่ 2</u> | 131  |
| 5.3 สรุปผลการทดลอง  | 131  |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ      | 134  |
| <u>กิจกรรมที่ 3</u> | 134  |
| 5.5 สรุปผลการทดลอง  | 134  |
| 5.6 ข้อเสนอแนะ      | 137  |
| บรรณานุกรม          | 138  |
| ภาคผนวก ก           | 140  |
| การคำนวณ            | 140  |
| ภาคผนวก ข           | 147  |
| ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ | 147  |
| ประวัตินักวิจัย     | 155  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                | หน้า |
|----------|----------------------------------------------------------------|------|
| 2.1      | แรงดันที่เหมาะสมที่ใช้กดยึดแผ่นขึ้นงานตามวัสดุต่างๆ            | 19   |
| 2.2      | การจัดแบ่งประเภท และส่วนผสมทางเคมี                             | 28   |
| 2.3      | รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์                            | 35   |
| 2.4      | การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง                               | 35   |
| 3.1      | สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง                                 | 39   |
| 3.2      | สมบัติของวัสดุที่ใช้ทำการวิจัย                                 | 41   |
| 3.3      | สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง                                 | 41   |
| 4.1      | ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปขึ้นงานตามชนิดของแผ่นตัดเปล่า      | 76   |
| 4.2      | แสดงปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปขึ้นงานตามชนิดของแรงกดขึ้นงาน  | 80   |
| 4.3      | ผลการตรวจสอบขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ      | 81   |
| 4.4      | แสดงผลการตรวจสอบขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ  | 83   |
| 4.5      | แสดงผลการตรวจสอบขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ  | 85   |
| 4.6      | สรุปข้อสังเกตขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ     | 88   |
| 4.7      | สรุปข้อสังเกตขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ     | 90   |
| 4.8      | สรุปข้อสังเกตขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ     | 93   |
| 4.9      | แสดงปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปขึ้นงานตามชนิดของดรอว์บีด      | 94   |
| 4.10     | ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ                           | 97   |
| 4.11     | แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยแรงขึ้นรูปของดรอว์บีดทั้งสามชนิด            | 115  |
| 4.12     | Two-way ANOVA: Punch force(kN) versus Type draw bead, High(mm) | 117  |
| 4.13     | ค่าความเครียดเทียบเท่าของดรอว์บีดทั้งสามชนิดที่จุด A6          | 119  |
| 4.14     | Two-way ANOVA: Equivalentstrain versus type draw bead, high    | 121  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                 | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1    | การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป                                                 | 8    |
| 2.2    | การขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอก                                                      | 9    |
| 2.3    | ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม                                               | 9    |
| 2.4    | ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร                                                   | 10   |
| 2.5    | สิ่งบกพร่องที่เกิดกับชิ้นงานดึงขึ้นรูป                                          | 13   |
| 2.6    | แบบจังหวะเดียวไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน                                            | 13   |
| 2.7    | แบบจังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน                                               | 14   |
| 2.8    | แบบสองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่                               | 15   |
| 2.9    | แบบสามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวคายคู่ชั้น                       | 15   |
| 2.10   | (a) วิธีการลากขึ้นรูปลึก (b) ชิ้นงานทรงกระบอก (c) รูปถ้วยและแกนพิคัด<br>x, y, z | 16   |
| 2.11   | ลักษณะของแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึก                               | 17   |
| 2.12   | สภาวะความเค้นที่เกิดระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึก                               | 17   |
| 2.13   | ความเค้นที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปลึก                                              | 18   |
| 2.14   | พื้นที่ของความสามารถการไหลตัว                                                   | 20   |
| 2.15   | ความเค้นและจุดบกพร่องของโลหะระหว่างการขึ้นรูปลึก                                | 20   |
| 2.16   | การไหลตัวของโลหะหลังการขึ้นรูป                                                  | 21   |
| 2.17   | ลักษณะของครอว์บีคในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป                                           | 22   |
| 2.18   | ครอว์บีคแบบหน้าตัดกลม                                                           | 23   |
| 2.19   | ครอว์บีคแบบหน้าครึ่งตัดกลม                                                      | 23   |
| 2.20   | ครอว์บีคแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า                                              | 24   |
| 2.21   | ครอว์บีคแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า                                         | 24   |
| 2.22   | ครอว์บีคแบบหน้าตัดรูปตัววี                                                      | 25   |
| 2.23   | ชิ้นงานทดสอบแรงดึงในทิศทางต่างของโลหะแผ่น                                       | 26   |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                               | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------|------|
| 2.24   | รูปแบบของกริดวงกลม                            | 29   |
| 2.25   | อิเล็กทรอนิกส์                                | 30   |
| 2.26   | การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด                  | 31   |
| 2.27   | การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม                    | 31   |
| 3.1    | ไดอะแกรมวิธีดำเนินโครงการวิจัย                | 37   |
| 3.2    | ชิ้นงานทดสอบส่วนผสมทางเคมี                    | 38   |
| 3.3    | ชิ้นงานทดสอบส่วนผสมทางเคมี                    | 39   |
| 3.4    | เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test)             | 40   |
| 3.5    | ออกแบบชิ้นงาน                                 | 42   |
| 3.6    | รูปร่างของชิ้นงานสำเร็จ                       | 42   |
| 3.7    | ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก               | 43   |
| 3.8    | การใส่แผ่นเสริมรองขนาด                        | 44   |
| 3.9    | การสวมชุดแม่พิมพ์ตัวบนกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง   | 44   |
| 3.10   | การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องเพรส               | 45   |
| 3.11   | แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน                           | 45   |
| 3.12   | เครื่องกดอัดโนมตี เคน โปรแกรมตามที่ได้ตั้งไว้ | 46   |
| 3.13   | ชิ้นงานดรอปปีด                                | 46   |
| 3.14   | แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองพื้นผ้า                   | 47   |
| 3.15   | แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองพื้นผ้าเบากมูม            | 48   |
| 3.16   | แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า              | 48   |
| 3.17   | การขึ้นรูปชิ้นงานในขณะที่เกิดการเปลี่ยนรูป    | 49   |
| 3.18   | แผ่นตัดเปล่า                                  | 50   |
| 3.19   | การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด                       | 50   |
| 3.20   | การจับยึดแผ่นงานด้วยแคลมป์                    | 50   |
| 3.21   | แผ่นชิ้นงานที่ผ่านการกดด้วยเครื่องกดอัดโนมตี  | 51   |
| 3.22   | แผ่นชิ้นงานสำเร็จ                             | 51   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                 | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.23   | ทำความสะอาดแผ่นแบลงก์ด้วยน้ำยาอิล็คโทรไลต์และวางแผ่นแบลงก์บนถาด                                 | 52   |
| 3.24   | นำน้ำยาอิล็คโทรไลต์มาทาแผ่นผ้าสักหลาดแล้ววัดด้วยลูกกลิ้ง                                        | 52   |
| 3.25   | แผ่นแบลงก์ที่ผ่านการตีกริดเรียบร้อยแล้ว                                                         | 53   |
| 3.26   | แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน                                                                             | 54   |
| 3.27   | อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Mini data logger)                                                            | 54   |
| 3.28   | จุดที่ใช้ในการตรวจสอบวัดความหนาบนชิ้นงาน                                                        | 55   |
| 3.29   | แสดงการวัดขนาดของกริดบนชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วโดยการใช้โปรแกรม Microscopy image processing system | 56   |
| 3.30   | อุปกรณ์วัดความหนาผิวชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์                                                     | 57   |
| 4.1    | แผ่นตัดเปล่าบากบากมุมกับชิ้นงานสำเร็จหลังขึ้นรูปลึก                                             | 58   |
| 4.2    | แผ่นตัดเปล่าบากบากมุมกับชิ้นงานสำเร็จหลังขึ้นรูปลึก                                             | 59   |
| 4.3    | แผ่นตัดเปล่าโดยประมาณค่ากับชิ้นงานสำเร็จหลังขึ้นรูปลึก                                          | 59   |
| 4.4    | การเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปตามชนิดรูปร่างชิ้นงาน                                                   | 60   |
| 4.5    | แรงกดขึ้นรูปและแรงกดชิ้นงานต่อระยะกดลึก                                                         | 60   |
| 4.6    | บริเวณจุดที่ตรวจสอบวัดความเครียด                                                                | 61   |
| 4.7    | จุดที่ตรวจวัดกับความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ของชนิดแผ่นตัดเปล่า                     | 61   |
| 4.8    | ชิ้นงานสำเร็จด้วยแรงกด 10%                                                                      | 63   |
| 4.9    | ชิ้นงานสำเร็จด้วยแรงกด 30%                                                                      | 63   |
| 4.10   | ชิ้นงานสำเร็จด้วยแรงกด 50%                                                                      | 64   |
| 4.11   | ชิ้นงานสำเร็จด้วยแรงกด 70%                                                                      | 64   |
| 4.12   | แรงกดชิ้นงานกับแรงขึ้นรูป 10% 30% 50% และ 70% ต่อระยะกดลึก                                      | 65   |
| 4.13   | แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูปสูงสุด                                                                 | 66   |
| 4.14   | ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) กับปริมาณของแรงกดชิ้นงาน                                | 66   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                       | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.15   | แรงกดขึ้นรูปลึกและแรงกดขึ้นงานกับชนิดของสารหล่อลื่น                                                                   | 68   |
| 4.16   | แรงกดขึ้นงานต่อแรงขึ้นรูปสูงสุดตามชนิดของสารหล่อลื่น                                                                  | 69   |
| 4.17   | ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) กับชนิดสารหล่อลื่น                                                            | 70   |
| 4.18   | จุดบกพร่องขึ้นงานหลังการขึ้นรูปของดรอว์บีดความสูงเท่ากับ 8 มม.                                                        | 71   |
| 4.19   | ขึ้นงานสำเร็จที่ไม่ใช้ดรอว์บีด                                                                                        | 72   |
| 4.20   | ดรอว์บีดรูปสามเหลี่ยม (Three angle bead)                                                                              | 72   |
| 4.21   | ขึ้นงานใช้ดรอว์บีด (Draw bead) รูปปลายมนโค้ง                                                                          | 73   |
| 4.22   | แรงขึ้นรูปกับแรงกดขึ้นงานของดรอว์บีดชนิดต่างๆ                                                                         | 73   |
| 4.23   | แรงกดขึ้นรูปลึกกับแรงกดขึ้นงานตามชนิดของดรอว์บีด                                                                      | 74   |
| 4.24   | ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) กับชนิดของดรอว์บีด                                                            | 74   |
| 4.25   | ขึ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อวิเคราะห์ผล                                                | 76   |
| 4.26   | ขึ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุมเพื่อวิเคราะห์ผล                                         | 77   |
| 4.27   | ขึ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่าเพื่อวิเคราะห์ผล                                         | 77   |
| 4.28   | การเปรียบเทียบแรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด                                                                  | 78   |
| 4.29   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) เท่ากับ 49.69 kN. | 79   |
| 4.30   | การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้า                               | 81   |
| 4.31   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า                                                       | 82   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                            | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.32   | กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม                                                       | 83   |
| 4.33   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า                                                                                            | 84   |
| 4.34   | การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า ที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่า                                                    | 85   |
| 4.35   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่า                                                            | 86   |
| 4.36   | แสดงรูปร่างและตำแหน่งของดรอว์บีดที่ใช้ในการทดสอบ                                                                                                           | 87   |
| 4.37   | การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.       | 87   |
| 4.38   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้ดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.               | 89   |
| 4.39   | การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม โดยใช้ดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. | 90   |
| 4.40   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุมโดยใช้ดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.         | 91   |
| 4.41   | การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณและใช้ดรอว์บีด                                                            | 92   |
| 4.42   | การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่าโดยใช้ดรอว์บีด                                                    | 94   |
| 4.43   | อิทธิพลของดรอว์บีดที่ปัจจัยทดสอบ แรงกดชิ้นงาน 40% ของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า                                                                | 95   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                  | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.44   | อิทธิพลของครอว์ปิดที่ปัจจัยทดสอบ ความหนาของผนังชิ้นงานแผ่นตัด<br>เปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า | 96   |
| 4.45   | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม Minitab                                                   | 97   |
| 4.46   | ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเฉลี่ยความหนาของผนังชิ้นงาน                                      | 98   |
| 4.47   | การวิเคราะห์ความแม่นยำของ Interaction Plot ที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน                       | 98   |
| 4.48   | จุดบกพร่องชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของครอว์ปิด                                                       | 99   |
| 4.49   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมที่มีความสูง 3 มม.                                            | 100  |
| 4.50   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมที่มีความสูง 4 มม.                                            | 100  |
| 4.51   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมที่มีความสูง 5 มม.                                            | 101  |
| 4.52   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมที่มีความสูง 6 มม.                                            | 101  |
| 4.53   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมที่มีความสูง 7 มม.                                            | 102  |
| 4.54   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมที่มีความสูง 8 มม.                                            | 102  |
| 4.55   | แรงขึ้นรูปชิ้นงานของครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยม                                                       | 103  |
| 4.56   | จุดตรวจวัดที่ตรวจสอบความเครียด                                                                   | 104  |
| 4.57   | ความเครียดเทียบเท่าที่ไม่มีครอว์ปิด                                                              | 104  |
| 4.58   | ความเครียดเทียบเท่าของครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยม                                                     | 105  |
| 4.59   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีความสูง 3 มม.                                            | 105  |
| 4.60   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีความสูง 4 มม.                                            | 106  |
| 4.61   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีความสูง 5 มม.                                            | 106  |
| 4.62   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีความสูง 6 มม.                                            | 107  |
| 4.63   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีความสูง 7 มม.                                            | 107  |
| 4.64   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีความสูง 8 มม.                                            | 108  |
| 4.65   | แรงขึ้นรูปชิ้นงานของครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลม                                                       | 109  |
| 4.66   | ความเครียดเทียบเท่าของครอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลม                                                     | 109  |
| 4.67   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมเอียงที่มีความสูง 3 มม.                                       | 110  |
| 4.68   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมเอียงที่มีความสูง 4 มม.                                       | 110  |
| 4.69   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปิดชนิดสามเหลี่ยมเอียงที่มีความสูง 5 มม.                                       | 111  |

# สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                              | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.70   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียงที่มีความสูง 6 มม.                   | 111  |
| 4.71   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียงที่มีความสูง 7 มม.                   | 112  |
| 4.72   | ชิ้นงานที่ใช้ครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียงที่มีความสูง 8 มม.                   | 112  |
| 4.73   | แรงขึ้นรูปชิ้นงานของครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียง                              | 113  |
| 4.74   | ความเครียดเทียบเท่าของครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียง                            | 114  |
| 4.75   | กราฟ Residual plots for punch force (kN)                                     | 116  |
| 4.76   | กราฟ Individual value plot of punch force (kN) by type draw bead, high (mm)  | 117  |
| 4.77   | กราฟ Boxplot of punch force (kN) by type draw bead, high (mm)                | 118  |
| 4.78   | กราฟ Residual plots for equivalent strain                                    | 120  |
| 4.79   | กราฟ Individual value plot of equivalent strain by type draw bead, high (mm) | 121  |
| 4.80   | กราฟ Boxplot of equivalent strain by type draw bead, high (mm)               | 122  |
| 4.81   | ความหนาของชิ้นงานครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมหลังการขึ้นรูป                        | 124  |
| 4.82   | ค่าความเครียดความหนาของชิ้นงานครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมหลังการขึ้นรูป           | 124  |
| 4.83   | ความหนาของชิ้นงานครอว์ปีดชนิดครึ่งวงกลมหลังการขึ้นรูป                        | 125  |
| 4.84   | ค่าความเครียดความหนาของชิ้นงานครอว์ปีดชนิดครึ่งวงกลมหลังการขึ้นรูป           | 126  |
| 4.85   | ความหนาของชิ้นงานครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียงหลังการขึ้นรูป                   | 126  |
| 4.86   | ค่าความเครียดความหนาของชิ้นงานครอว์ปีดชนิดสามเหลี่ยมเอียงหลังการขึ้นรูป      | 127  |