# รายการรูปประกอบ

**รูป** **หน้า**


2.1 ภาพแสดงเครื่องดึงลวดแบบดรอเบ็นช์ 4
2.2 ภาพแสดงเครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว 5
2.3 ภาพแสดงเครื่องดึงลวดแบบหลายขั้นตอน 5
2.4 ภาพแสดงการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด 6
2.5 ภาพแสดงการดึงลวด เมื่อดึงผ่านแม่พิมพ์ 7
2.6 ภาพแสดงลักษณะของ Dead Zone 8
2.7 ภาพแสดงลักษณะของการปอกผิว 9
2.8 ภาพแสดงรอยแตกภายในชิ้นงาน 9
2.9 ภาพแสดงบริเวณเปลี่ยนรูปถาวรและผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูป 10
2.10 ภาพแสดงการวิเคราะห์แรงที่ใช้ในกระบวนการดึงลวด 10
2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในโลหะผสมจำรูป 13
2.12 แสดงลักษณะของความยืดหยุ่นยิ่งยวด (Superelasticity) 14
2.13 รูป (ก) การเกิดเลื่อนไถล รูป (ข) การจัดเรียงตัวแบบทวิน 15
2.14 การเคลื่อนที่ของ Twin Boundary 16
2.15 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์และเฟสออสเทนไนต์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลหะผสมจำรูป 18
2.16 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนตามแนวแกนของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการดึงลวด 19
2.17 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนตามแนวขวางของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการดึงลวด 20
2.18 ภาพแสดงการเปรียบเทียบการใช้งานของกระบวนการดึงลวดแบบปกติ, AUD, RUD 21
2.19 กราฟแสดงผลที่เกิดจากการขึ้นรูปลึกของ SPCC 22
2.20 กราฟแสดงแรงในการดันขึ้นรูปกับระยะพันช์ที่เคลื่อนที่ โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงที่แอมพลิจูด 5, 10 และ 20 ไมโครเมตรตามลำดับ 25
2.21 ภาพแสดง von-misses stress 25
2.22 ภาพแสดงความหยาบผิวของลวด ซึ่งไม่ใช้สารหล่อลื่นที่มีคลอรีน 26
2.23 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงในการดึงลวดแบบ CD โดยใช้ FEM 28
2.24 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงในการดึงลวดแบบ AUD โดยใช้ FEM 28
2.25 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงในการดึงลวด แบบ RUD โดยใช้ FEM 29
2.26 ภาพแสดงความเค้นในกระบวนการดึงลวดแบบ CD, AUD และ RUD ($V_d$ = 300 mm/s) 29

2.27 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงดึงที่ 15% Red 30

2.28 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงดึงที่ 25% Red 30

2.29 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงที่15% Red 31

2.30 กราฟแสดงอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงที่ 25% Red 31

2.31 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงดึงลวดโดยใช้น้ำมันสำหรับการขึ้นรูป 32

2.32 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรท 32

2.33 กราฟแสดงแรงในการดึงลวดของ $Ti_{49.7}Ni_{50.3}$ โดย (a) คือ ดึงขั้นตอนเดียว (b) คือดึงหลายขั้นตอน และ (c) ความแข็งของชิ้นงาน ที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดต่างๆ 33

2.34 กราฟแสดงความแข็งของลวด $Ti_{50}Ni_{50}$ 33

2.35 กราฟแสดงการทดสอบ DSC ของลวดโลหะผสมจำรูปทั้งสามชนิด 34

2.36 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสของโลหะผสมจำรูป $Ti_{49}Ni_{51}$ Ø 1 มิลลิเมตร 35

2.37 กราฟแสดงการอบลวดที่อุณหภูมิ 550 $^{\circ}$C ที่ 30%, 50% Red 36

2.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบกับค่า $A_f$ 36

2.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นยิ่งยวดกับเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด 37

2.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความยืดหยุ่นยิ่งยวดกับอุณหภูมิอบ 37

3.1 ภาพแสดงตำแหน่งการเกิดบัพและปฏิบัพ 38

3.2 ภาพแสดงการจับยึดฮอร์น (Horn) 38

3.3 ภาพแสดงครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงในเหล็ก 39

3.4 ภาพแสดงขนาดเหล็กที่ใช้ทำฮอร์นที่มีขนาดเทียบเท่ากับทังสเตนคาร์ไบด์ 39

3.5 ภาพแสดงความยาวฮอร์นโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวขวาง 40

3.6 ภาพแสดงการตรวจสอบเครื่องกำเนิดความถี่เหนือเสียง 40

4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 41

4.2 ชุดอุปกรณ์ดึงลวดที่ให้แม่พิมพ์สั่นสะเทือนในแนวขวาง 42

4.3 รูปแม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.85 × 0.85 มิลลิเมตร สำหรับสั่นสะเทือนในแนวขวาง 42

4.4 ชุดอุปกรณ์ดึงลวดที่ให้แม่พิมพ์สั่นสะเทือนในแนวแกน 43

4.5 ภาพตัดและรูปแม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.49×0.61 มิลลิเมตร สำหรับสั่นสะเทือนในแนวแกน 44

4.6 ภาพตัดและรูปแม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.41×0.56 มิลลิเมตร สำหรับสั่นสะเทือนในแนวแกน 44

| | | |
|---|---|---|
| 4.7 | ตำแหน่งการวัดขนาดหน้าตัดของลวด | 46 |
| 4.8 | ตำแหน่งของจุดกดวัดความแข็ง | 47 |
| 4.9 | การวัดขนาดเส้นทแยงมุมรอยกดบนจอภาพ | 48 |
| 4.10 | เครื่องทดสอบแรงดึง | 48 |
| 4.11 | เครื่องวัดความแข็งจุลภาค | 49 |
| 4.12 | ชุดกล้องจุลทรรศน์ | 49 |
| 4.13 | เครื่องวัดความหยาบผิว | 50 |
| 4.14 | ภาพแสดงเตาอบ | 50 |
| 4.15 | เครื่องขัดอัตโนมัติ | 51 |
| 4.16 | เครื่องขึ้นเรือนแบบร้อน | 51 |
| 4.17 | ไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล | 52 |
| 4.18 | ลวดโลหะผสมนิเกิล-ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร | 52 |
| 4.19 | สารหล่อลื่น (ก) โซเดียมสเตียเรท (ข) น้ำมัน ISO-CUT 570A | 53 |
| 5.1 | รูปแม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.85 × 0.85 มิลลิเมตร สำหรับสั่นสะเทือนในแนวขวาง | 54 |
| 5.2 | ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดไทเทเนียมที่ขึ้นรูปจริง: (ก) .ใช้การสั่นสะเทือน (ข.) ไม่ใช้การสั่นสะเทือน | 55 |
| 5.3 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดที่ขึ้นรูปจริง | 56 |
| 5.4 | กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดที่ขึ้นรูปจริง | 57 |
| 5.5 | กราฟแสดงค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดที่ขึ้นรูปจริง | 57 |
| 5.6 | รูปแม่พิมพ์ดึงลวด สำหรับสั่นสะเทือนในแนวแกน: (ก). แม่พิมพ์ตัวที่หนึ่งที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.49×0.61 มิลลิเมตร (ข). แม่พิมพ์ตัวที่สองที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.41×0.56 มิลลิเมตร | 58 |
| 5.7 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงลวดทองแดงในขั้นตอนแรกกับความเร็วดึงลวดที่ 15, 50 และ100 มิลลิเมตร/นาที โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน | 59 |
| 5.8 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดทองแดงที่ความเร็ว 15, 50, 100 มิลลิเมตร/นาทีโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน | 60 |
| 5.9 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดทองแดงที่ความเร็ว 15, 50, 100 มิลลิเมตร/นาทีโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน | 60 |
| 5.10 | ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ความเร็วดึง 15 มิลลิเมตร/นาที | 61 |
| 5.11 | ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ความเร็วดึง 50 มิลลิเมตร/นาที | 61 |

5.12 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ความเร็วดึง 100 มิลลิเมตร/นาที 62
5.13 กราฟแสดงแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดงในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสั่นสะเทือน และไม่ใช้การสั่นสะเทือน 62
5.14 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือนที่ความเร็วดึง 10 mm/min 64
5.15 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือนที่ความเร็วดึง 10 mm/min 64
5.16 ภาพถ่ายผิวลวดทองแดงที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ผิวลวดทองแดงเริ่มต้น (ข). ผิวลวดทองแดงเริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน 65
5.17 ภาพถ่ายผิวลวดทองแดงที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 1 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน 65
5.18 ภาพถ่ายผิวลวดทองแดงที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 2 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน 66
5.19 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 66
5.20 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 67
5.21 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน 68
(ข). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน
5.22 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน 69
(ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน
5.23 ตัวอย่างกราฟแรงดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนแรกแสดงให้เห็นถึงการขาดของชิ้นงานเมื่อใช้การสั่นสะเทือน 70
5.24 ลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขาดบริเวณปากจับยึดชิ้นงานเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง 71
5.25 การแก้ปัญหาการสั่นพ้องที่ทำให้ลวดขาดโดยการดูดซับการสั่นสะเทือนบริเวณปากจับยึดลวด 71
5.26 การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในการดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมโดยการถ่วงน้ำหนักลวดบริเวณระหว่างแม่พิมพ์และปากจับยึดเส้นลวด 72

5.27 กราฟแสดงแรงดึงขึ้นรูปลวด SMA ขั้นตอนแรกโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดศูนย์ผ่านกลางเริ่มต้น 0.7 มม) 72

5.28 ตัวอย่างกราฟแรงดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน 73

5.29 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปในขั้นตอนแรกโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.7 มม) 74

5.30 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มม ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ผิวลวดโลหะผสมจำรูป TiNi เริ่มต้น (ข). ผิวลวดโลหะผสมจำรูป TiNi เริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน 75

5.31 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 1 ที่กำลังขยาย100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ลวดเริ่มต้น ø 0.7 มม) 75

5.32 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.7 mm) \ 76

5.33 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.7 mm) (ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.7 mm) 77

5.34 กราฟแสดงแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด SMA ในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเริ่มต้น 0.64 มม) 78

5.35 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล –ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปแต่ละขั้นตอนโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 มม) 79

5.36 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 มม) 79

5.37 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.64 มม ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ผิวลวดโลหะผสมจำรูป TiNi เริ่มต้น (ข). ผิวลวดโลหะผสมจำรูป TiNi เริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน 80

5.38 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 1 ที่กำลังขยาย100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ลวดเริ่มต้น ø 0.64 มม) 81

5.39 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 2 ที่กำลังขยาย100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ลวดเริ่มต้น ø 0.64 มม) 81

5.40 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 mm) 82

5.41 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 mm) 82

5.42 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 mm) (ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 mm) 83

5.43 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 mm) (ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ø 0.64 mm) 84

ข.1 เครื่องวัดผิวหน้าแบบเข็มลาก 96

ข.2 การแปลงสัญญาณระหว่างเข็มลากและพื้นผิวเป็นเส้นโปรไฟล์ 97

ข.3 ลักษณะโปรไฟล์ของผิว 98

ข.4 การเลือกค่า คัท-ออฟที่เหมาะสมกับพื้นผิว 98

ข.5 ลักษณะการวิเคราะห์ของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $R_a$ 99

ข.6 ลักษณะการวิเคราะห์ของค่าความหยาบผิวสูงสุด $R_t$ 100

ค.1 ขนาดแม่พิมพ์ดึงลวดเหลี่ยม ตามาตรฐาน JIS B4111 102

ค.2 ภาพตัดแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49×0.61 มิลลิเมตร 104

ค.3 ภาพตัดแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.41×0.56 มิลลิเมตร 105

ค.4 ภาพแสดง Horn ที่ใช้ในการดึงลวดให้สั่นสะเทือนในแนวแกน 106

ค.5 ภาพแสดงตัวจับยึดHorn ที่ใช้ในการดึงลวดให้สั่นสะเทือนในแนวแกน 106

ค.6 ชุดประกอบฐานเครื่องวางสำหรับดึงลวด 107

ค.7 ชุดประกอบฐานเครื่องวางสำหรับดึงลวด 107

ค.8 ชุดประกอบฐานเครื่องสำหรับดึงลวด 108

ค.9 แบบภาพประกอบของชุดเครื่องดึงลวดที่แม่พิมพ์สั่นสะเทือนในแนวแกน 108

จ.1 แสดงตำแหน่งการวัดขนาดหน้าตัดของลวด 126

จ.2 ภาพถ่ายผิวลวดจัดฟันที่กำลังขยาย 100 เท่า 128