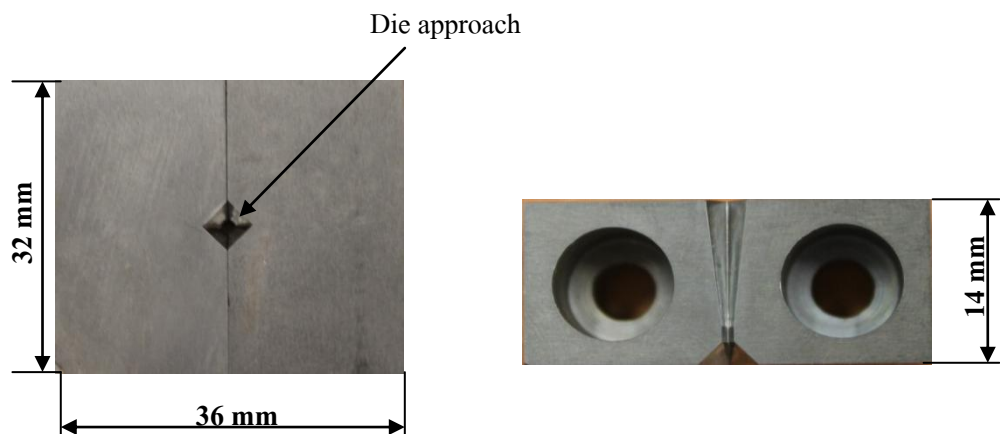


บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ ทำการทดลองดึงลวด โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในกระบวนการดึงลวด โลหะผสมจำรูปนิเกิล - ไทเทเนียม โดยใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกนและแนวขวาง โดยตัวแปรหลักที่ศึกษาคือ แรงดึงลวด ความหยาบผิวของลวด และความเที่ยงตรงของลวด ในการทดลองนี้ เริ่มจากการทดลองเบื้องต้นโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกนและแนวขวาง โดยเริ่มทดลองกับลวดอลูมิเนียม ไทเทเนียมและทองแดง จากนั้นจึงใช้ลวด SMA ซึ่งผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

5.1.1 กระบวนการดึงลวดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในแนวขวางโดยใช้คายผ่าซีก (Bisected dies)



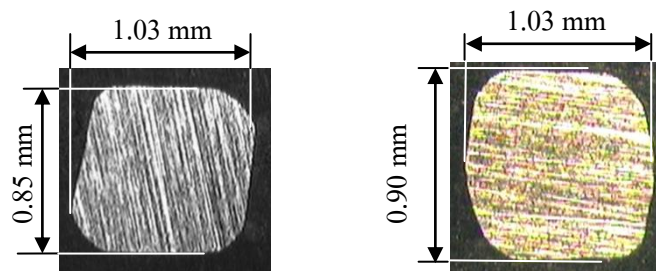
รูปที่ 5.1 รูปแม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูปร่างสูงใน 0.85×0.85 มิลลิเมตร สำหรับสั่นสะเทือนในแนวขวาง

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองดึงลวดโดยคายผ่าซีกสั่นสะเทือนในแนวขวาง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	1. ลวดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม, $S_{ut} = 248$ MPa, %Elongation = 8 % 2. ลวดไทเทเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม, $S_{ut} = 540$ MPa, %Elongation = 15 %
วัสดุทำแม่พิมพ์	ทังสเตนคาร์ไบด์
ความถี่การสั่นสะเทือน	19.5 kHz

แอมพลิจูดการสั่นสะเทือน	5 μm (no load condition)
ความเร็วดึง	0.1 m/s
สารหล่อลื่น	ไม่ใช้สารหล่อลื่น

5.1.1.1 ขนาดรูปร่างหน้าตัดของลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริงกับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดรูปที่ 5.2 ภาพตัวอย่างแสดงขนาดรูปร่างของลวดไทเทเนียมที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริง จากภาพจะพบว่ารูปร่างของลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริงจะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามที่ได้ออกแบบไว้ เนื่องจากระหว่างการทดลองแม่พิมพ์ประกบกันไม่สนิท



ก. ใช้การสั่นสะเทือน

ข. ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

รูปที่ 5.2 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดไทเทเนียมที่ขึ้นรูปจริง: (ก.) ใช้การสั่นสะเทือน (ข.) ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

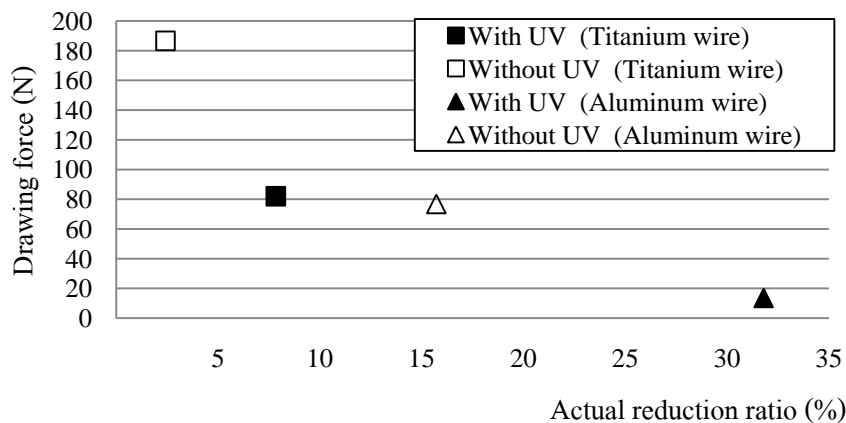
จากการทดลองจะพบว่ารูปร่างพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ขึ้นรูปมาจะแตกต่างจากรูปร่างในแม่พิมพ์เนื่องจากชุดจับยึดแม่พิมพ์มีความแข็งเกร็ง (Rigidity) ไม่พอ เมื่อใช้การสั่นสะเทือนจึงทำให้แม่พิมพ์ประกบไม่สนิท ขณะที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดที่ขึ้นรูปจริง แสดงดังตารางที่ 5.2 ซึ่งจากตารางที่ 5.2 อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่คาดไว้ของลวดไทเทเนียมและลวดอลูมิเนียมคือ 8% และ 36% ตามลำดับ ขณะที่เมื่อใช้การสั่นสะเทือน อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดไทเทเนียมและลวดอลูมิเนียมเทียบกับค่าอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่คาดไว้ห่างกัน 2% และ 11.69% ตามลำดับ ดังนั้นอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงที่ใช้การสั่นสะเทือนจึงมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่คาดไว้ ส่วนอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงโดยไม่ใช้การสั่นสะเทือนของลวดไทเทเนียมและอลูมิเนียมเทียบกับค่าอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่คาดไว้ห่างกัน 69.75% และ 56.33% ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเมื่อใช้การสั่นสะเทือนอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่คาดไว้

ตารางที่ 5.2 อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดไทเทเนียมและลวดอลูมิเนียม

วัสดุ	อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่คาดไว้	การสันสะเทือน	อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริง
ไทเทเนียม	8%	ใช้การสันสะเทือน	7.84%
		ไม่ใช้การสันสะเทือน	2.42%
อลูมิเนียม	36%	ใช้การสันสะเทือน	31.79%
		ไม่ใช้การสันสะเทือน	15.72%

5.1.1.2 ผลของแรงดึง

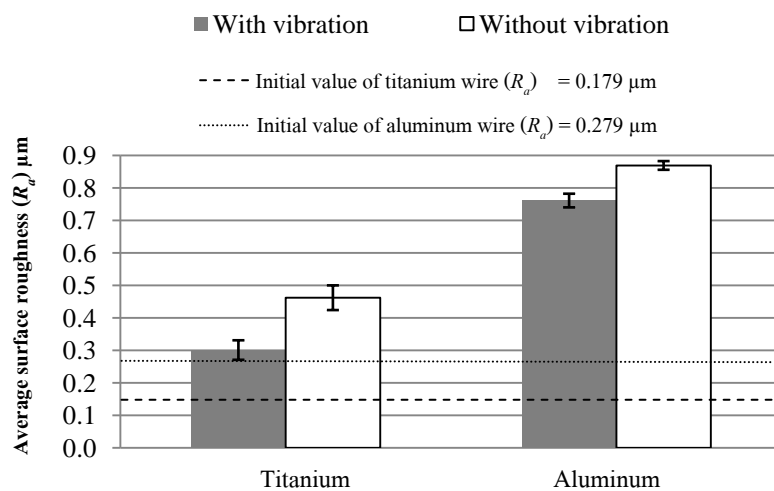
รูปที่ 5.3 แสดงผลของแรงดึงลวดไทเทเนียมและลวดอลูมิเนียม เนื่องจากอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้แรงดึงที่ใช้แปรเปลี่ยนไปตามอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทั้งสองชนิด จากรูปที่ 5.3 จะพบว่าเมื่อใช้การสันสะเทือน แรงดึงลวดที่ใช้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้การสันสะเทือน โดยลวดไทเทเนียมใช้แรงดึง 187 นิวตัน ลวดอลูมิเนียมใช้แรงดึง 77 นิวตัน ขณะที่ไม่ใช้การสันสะเทือน แรงดึงลวดไทเทเนียมและอลูมิเนียมมีค่า 82 นิวตันและ 14 นิวตันตามลำดับ โดยแรงดึงที่ลดลงเป็นเพราะเมื่อใช้การสันสะเทือน ทำให้แรงเสียดทานลดลง [5,19] ถ้าพิจารณาผลของอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่าอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทั้งสองชนิดที่ใช้การสันสะเทือนมีค่ามากกว่าอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงที่ไม่ใช้การสันสะเทือน แต่แรงดึงขึ้นรูปลวดทั้งสองชนิดกลับน้อยกว่าแรงดึงขึ้นรูปที่ไม่ใช้การสันสะเทือน แสดงให้เห็นชัดเจนว่าวิธีการสันสะเทือนโดยใช้ด้ายผ่าซีกช่วยลดแรงในการขึ้นรูปได้สูงมาก



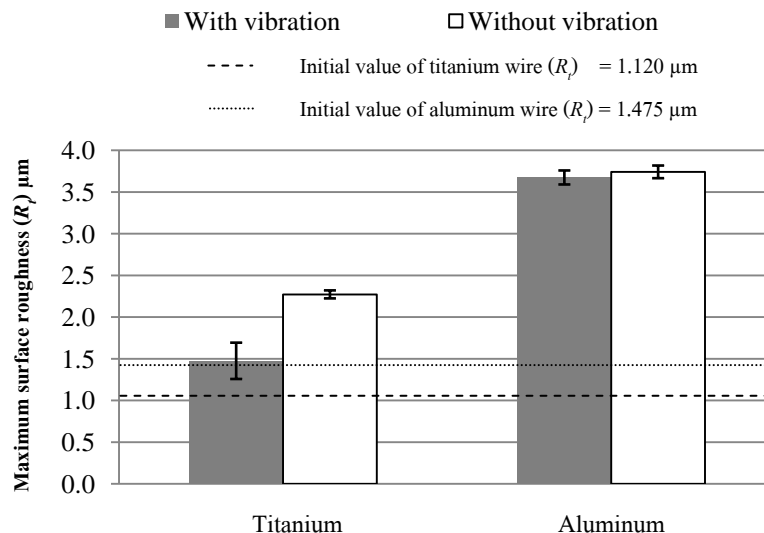
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดที่ขึ้นรูปจริง

5.1.1.3 ผลของความหยาบผิวลวดที่ขึ้นรูปจริง

รูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและความหยาบผิวสูงสุดของลวดที่ขึ้นรูปจริง โดยค่าความหยาบผิวลวดที่ได้จากการวัดค่าความหยาบผิวลวดแนวเส้นรอบวง ซึ่งวิธีนี้สามารถตรวจสอบรอยขีดข่วนของผิวลวดได้ด้วย จากรูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5 พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าความหยาบผิวสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกันคือ ผิวลวดที่ผ่านการขึ้นรูปมาจะมีค่าความหยาบผิวมากกว่าลวดเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ค่าความหยาบผิวลวดมีค่าน้อยกว่าค่าความหยาบผิวลวดที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง จากการใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง พบว่าคุณภาพผิวลวดยังดีขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์กับลวด ทำให้การเสียดสีกันระหว่างผิวแม่พิมพ์และผิวลวดลดลง [20] อีกทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นยังน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ส่งผลให้การเกิดการยึดติดกันระหว่างแม่พิมพ์กับลวดน้อยลง และรอยขีดข่วนที่พบยังคงลดลงด้วย



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดที่ขึ้นรูปจริง



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดที่ขึ้นรูปจริง

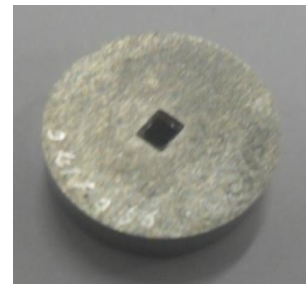
จากการทดลองเบื้องต้น โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนในแนวขวางกับแม่พิมพ์แบบผ่าซีก พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือน แรงดึงขึ้นรูปมีค่าลดลงกว่ากรณีที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือน อีกทั้งคุณภาพผิวลาดดีขึ้นด้วย แต่รูปร่างพื้นที่หน้าตัดลวดที่ขึ้นรูปมามีขนาดไม่ตรงตามทีออกแบบไว้ เพราะเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือน ทำให้แม่พิมพ์ประกบกันไม่สนิท เนื่องจากชุดจับยึดมีความแข็งแแกร่ง (Rigidity) ไม่พอ และการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดึงลวดมีขั้นตอนที่ซับซ้อนอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยจึงเปลี่ยนมาทดลองดึงลวดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกนแทน

5.1.2 กระบวนการดึงลวดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกน

การทดลองดึงลวดโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกน ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกวัสดุที่ใช้ทดลองคือลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มม ดึงผ่านแม่พิมพ์ให้มีขนาดรูปร่างเหลี่ยม 0.49×0.61 มม ส่วนที่สองใช้วัสดุเหมือนขั้นตอนแรก แต่ดึงผ่านแม่พิมพ์สองตัวคือ ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกให้มีขนาด 0.49×0.61 มม และผ่านแม่พิมพ์ตัวสองให้มีขนาด 0.41×0.56 มม แสดงดังรูปที่ 5.6 และเงื่อนไขที่ใช้ทดลอง แสดงดังตารางที่ 5.3 และ 5.4



ก). แม่พิมพ์ตัวที่หนึ่ง



ข). แม่พิมพ์ตัวที่สอง

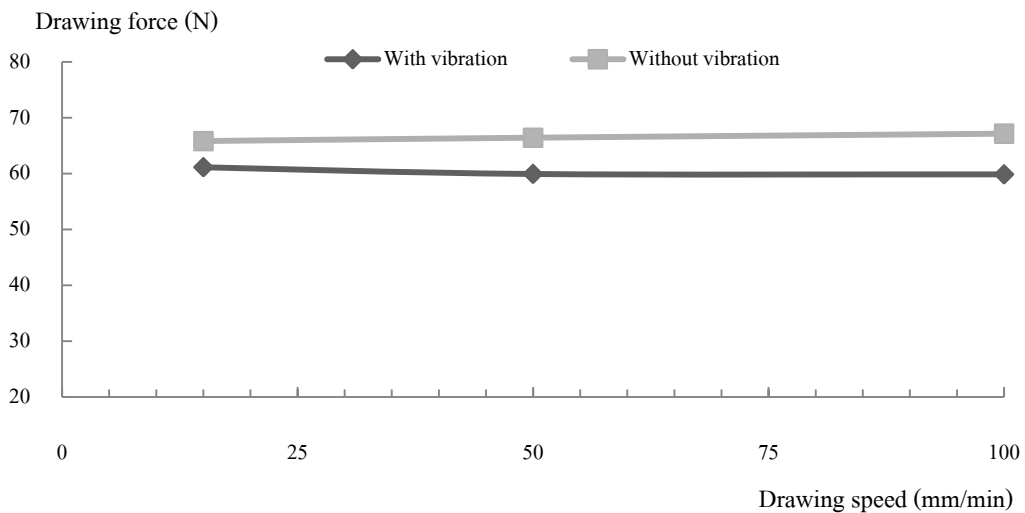
รูปที่ 5.6 รูปแม่พิมพ์ดึงลวด สำหรับสั่นสะเทือนในแนวแกน: (ก). แม่พิมพ์ตัวที่หนึ่งที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.49×0.61 มิลลิเมตร (ข). แม่พิมพ์ตัวที่สองที่มีขนาดรูปร่างรูใน 0.41×0.56 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขที่ใช้ทดลองดึงลวดทองแดงขั้นตอนที่หนึ่งโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกน

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มม, $S_{ut} = 170 \text{ MPa}$, %Elongation = 60 %
วัสดุทำแม่พิมพ์	ทังสเตนคาร์ไบด์
ความถี่การสั่นสะเทือน	20 kHz
แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน	10 μm (no load condition)
ความเร็วดึง	15, 50, 100 mm/min
สารหล่อลื่น	Iso-cut 570A

5.1.2.1 แรงดึงลวดทองแดงในขั้นตอนที่หนึ่ง

จากรูปที่ 5.7 พบว่าที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาที เมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือน แรงดึงมีค่า 60 นิวตัน เมื่อไม่ใช้การสั่นสะเทือนแรงดึงมีค่า 67 นิวตัน มีค่าลดลง 10% ส่วนที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตร/นาที เมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือน แรงดึงมีค่า 60 นิวตัน เมื่อไม่ใช้การสั่นสะเทือน แรงดึงมีค่า 66 นิวตัน มีค่าลดลงถึง 9.09% และที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตร/นาที เมื่อใช้การสั่นสะเทือน แรงดึงมีค่า 61 นิวตัน เมื่อไม่ใช้การสั่นสะเทือนแรงดึงมีค่า 66 นิวตัน ซึ่งแรงดึงลดลง 7.57% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วดึง แรงดึงขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป [37] ขณะที่เมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ทำให้สารหล่อลื่นไหลลงสู่รูตายได้ดีขึ้น แรงดึงขึ้นรูปลวดจึงลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานลดลง [5,19] ส่วนในการดึงลวดทองแดงขั้นตอนที่สอง ใช้ความเร็วดึงลวดต่ำกว่าก่อน คือ ความเร็ว 10 มิลลิเมตร/นาที เนื่องจากในการทดลองดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม ลวดมีความแข็งแรงสูง ดังนั้นจึงใช้ความเร็วดึงลวดที่ต่ำเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 5.13

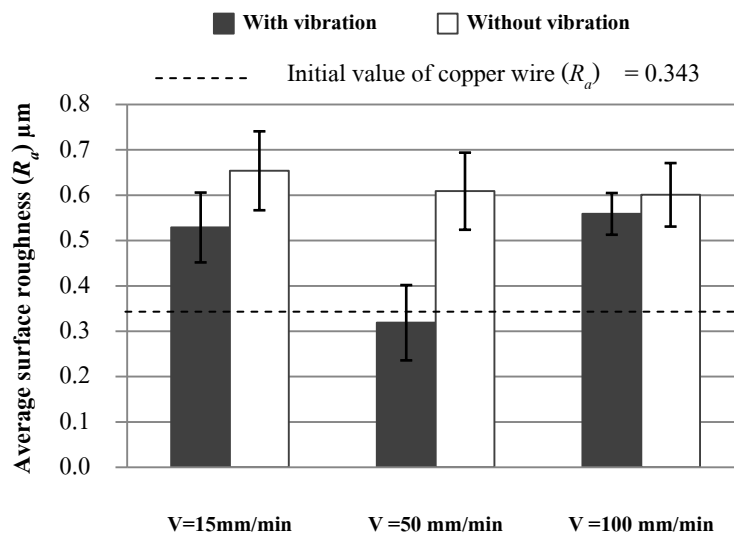


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงลวดทองแดงในขั้นตอนแรกกับความเร็วดึงลวดที่ 15, 50 และ 100 มิลลิเมตร/นาที โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

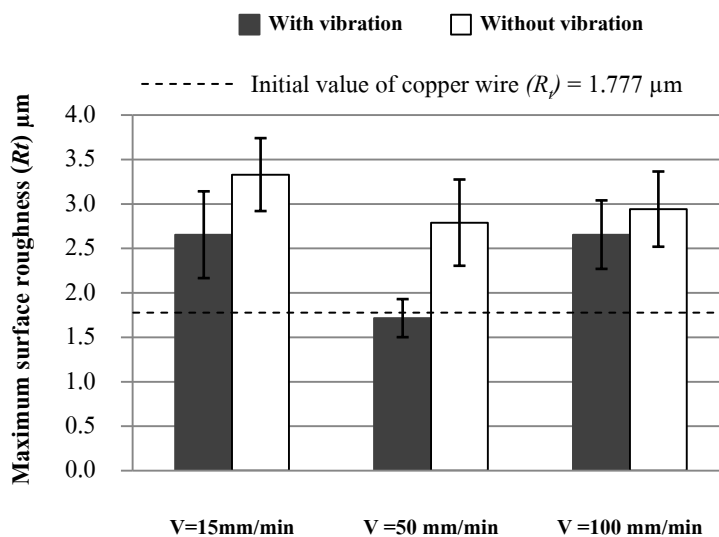
5.1.2.2 ผลของความหนาผิวลวดทองแดงในการดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่หนึ่ง

รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 แสดงค่าความหนาผิวเฉลี่ยและความหนาผิวสูงสุดของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปจริง โดยค่าความหนาผิวลวดที่ได้หาจากการวัดค่าความหนาผิวลวดแนวเส้นรอบวง ซึ่งวิธีนี้สามารถตรวจสอบรอยขีดข่วนของผิวลวดได้ด้วย จากรูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.9 พบว่าค่าความหนาผิวเฉลี่ยและค่าความหนาผิวสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกันคือ ผิวลวดที่ผ่านการขึ้นรูปมาจะมีค่าความหนาผิวมากกว่าลวดเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากลวดเริ่มต้นมีผิวที่เรียบโดยสังเกตจากภาพที่ 5.16 ที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหนาผิวมากที่สุด ส่วนที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตร/นาทีมีค่าความหนาผิวน้อยสุด ขณะที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหนาผิวใกล้เคียงกับที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตร/นาที ที่เป็นเช่นนี้

อาจจะเป็นเพราะลำดับในการทดลองโดยเริ่มทำการทดลองที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตร/นาทีก่อน และตามด้วยความเร็ว 50 มิลลิเมตร/นาที่ และ 100 มิลลิเมตร/นาที่ ตามลำดับ และเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ค่าความหยาบผิวลวดมีค่าน้อยลงกว่ากรณีที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือน เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นไหลตัวได้มากขึ้น ทำให้รอยขีดข่วนน้อยลง (Scratch) จากการใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงพบว่าคุณภาพผิวลวดยังดีขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์กับลวด อีกทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นยังน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง ส่งผลให้เกิดการยึดติดกันระหว่างแม่พิมพ์กับลวดน้อยลง และรอยขีดข่วนที่ผิวยังลดลงด้วย



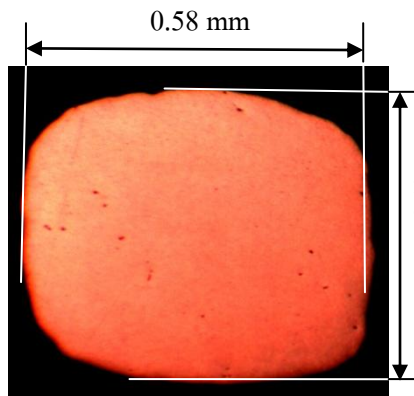
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดทองแดงที่ความเร็ว 15, 50, 100 มิลลิเมตร/นาที่โดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน



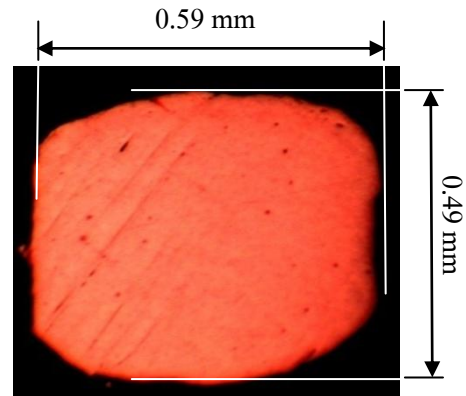
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดทองแดงที่ความเร็ว 15, 50, 100 มิลลิเมตร/นาที่โดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน

5.1.2.3 ขนาดรูปร่างหน้าตัดของลวดทองแดงที่ผ่านการขึ้นรูปจริงในขั้นตอนที่หนึ่ง

จากรูปที่ 5.10, 5.11 และ 5.12 ภาพตัวอย่างแสดงขนาดรูปร่างของลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริงในขั้นตอนแรก โดยใช้และไม่ใช้การสั้นสะเทือน จากภาพจะพบว่ารูปร่างของลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริงจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามที่ออกแบบไว้ (ภาคผนวก ค) ส่วนอิทธิพลของความเร็วดึงลวดที่มีต่อขนาดของเส้นลวดหลังดึงจะพบว่าเมื่อความเร็วดึงลวดเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดมีแนวโน้มที่จะเล็กลง

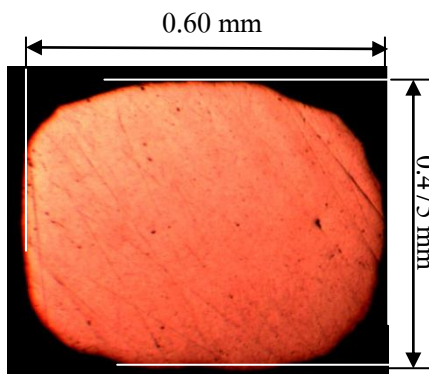


(ก) ไม่ใช้การสั้นสะเทือน

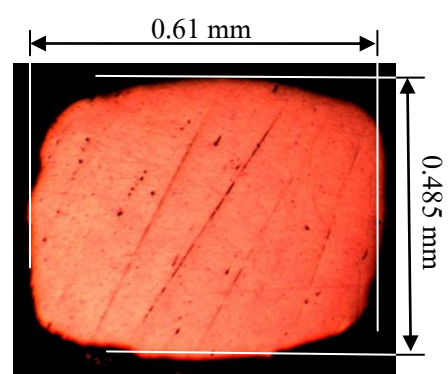


(ข) ใช้การสั้นสะเทือน

รูปที่ 5.10 ภาพแสดงอัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ความเร็วดึง 15 มิลลิเมตร/นาที

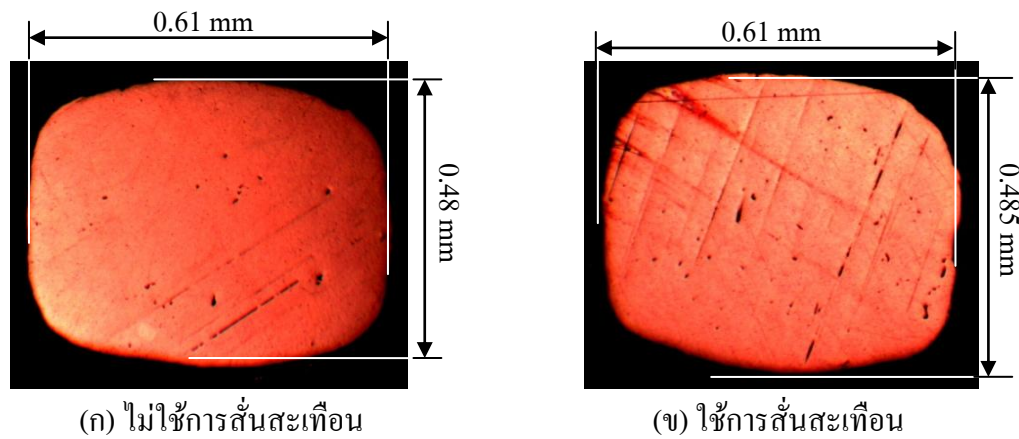


(ก) ไม่ใช้การสั้นสะเทือน



(ข) ใช้การสั้นสะเทือน

รูปที่ 5.11 ภาพแสดงอัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ความเร็วดึง 50 มิลลิเมตร/นาที



(ก) ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

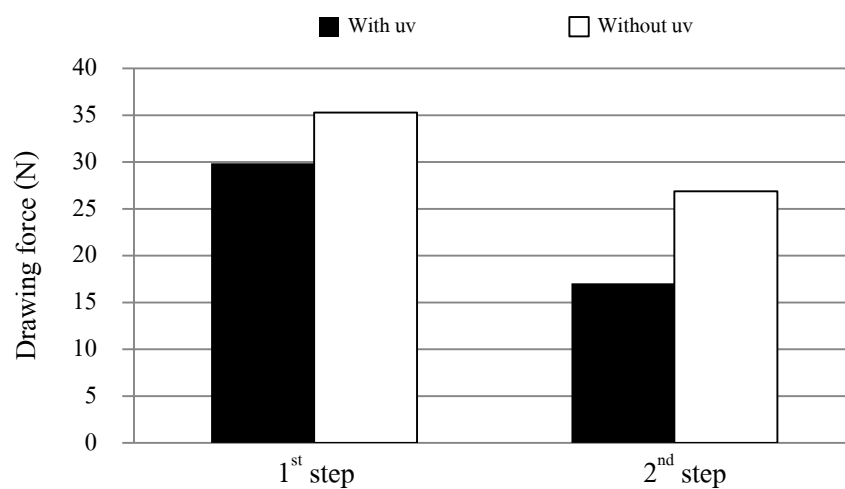
(ข) ใช้การสั่นสะเทือน

รูปที่ 5.12 ภาพแสดงอัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ความเร็วดึง 100 มิลลิเมตร/นาที

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขที่ใช้ทดลองดึงลวดทองแดงขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกน

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 mm, $S_{ut} = 170 \text{ MPa}$, %Elongation = 60 %
วัสดุทำแม่พิมพ์	ทังสเตนคาร์ไบด์
ความถี่การสั่นสะเทือน	20 kHz
แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน	10 μm (no load condition)
ความเร็วดึง	10 mm/min
สารหล่อลื่น	Iso-cut 570A and sodium stearate (ratio 1.0 : 0.5)

5.1.2.4 แรงดึงลวดทองแดงในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สอง

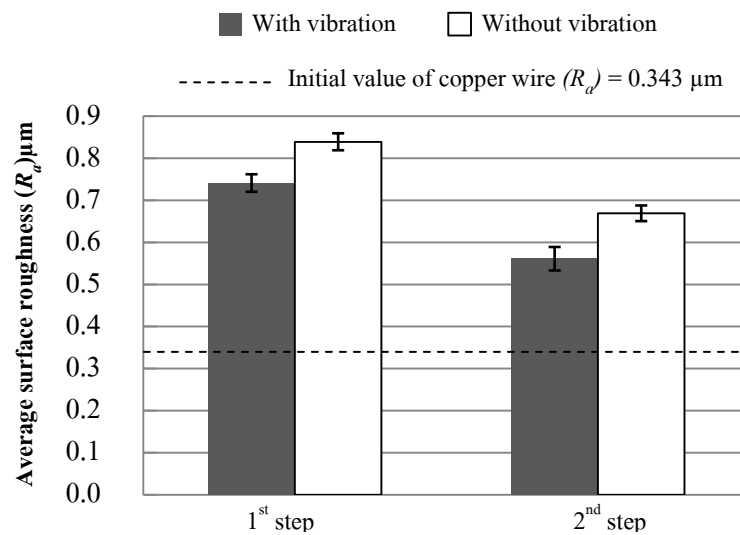


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดงในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน

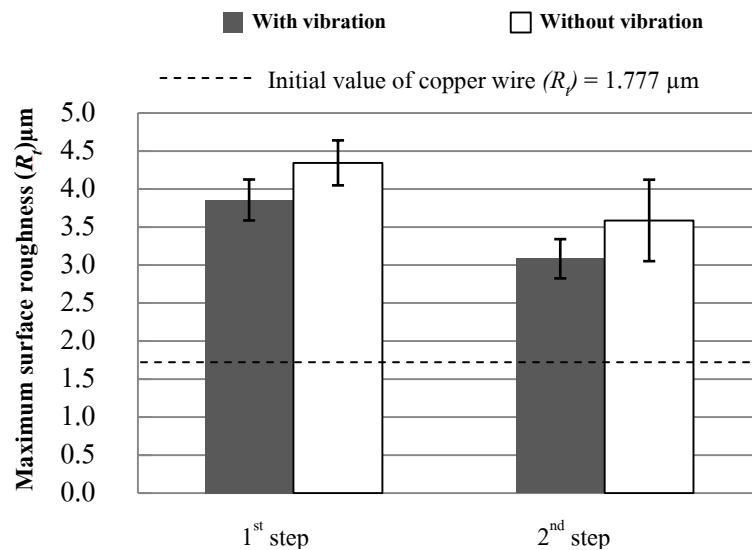
จากรูปที่ 5.13 พบว่าการดึงลวดทองแดงขึ้นตอนแรก ใช้แรงดึงขึ้นรูปลวดมากกว่าการดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่สอง เพราะว่าในการดึงขึ้นตอนนี้มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจากกลมไปเป็นเหลี่ยม ดังนั้นจึงต้องใช้แรงในการดึงลวดมากถึง 35 นิวตัน โดยมีอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด 22.32 % ส่วนในการดึงลวดขึ้นตอนที่สองนั้นใช้แรงเพียง 26 นิวตัน ในขณะที่มีอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด 23.18% ซึ่งไม่ต่างจากขั้นตอนที่หนึ่งมากที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าหลังจาก ดึงขึ้นรูปผ่านขั้นตอน แรกแล้ว ลวดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมากแล้วนั่นเอง การดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ สองจึงใช้แรงน้อยกว่าขั้นตอนแรก และเมื่อประยุกต์ใช้การสันสะท้อนในการดึงลวดขึ้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองพบว่าแรงดึงลดลง เนื่องจากแรงเสียดทานลดลง [5,19] โดยขั้นตอนแรกใช้แรงดึง 30 นิวตันและขั้นตอนที่สองใช้แรงดึง 17 นิวตัน ถ้าพิจารณาสารหล่อลื่นจะพบว่าการใช้ Sodium stearate ผสมกับน้ำมัน iso-cut ที่อัตราส่วน 1:0.5 [38] ใช้แรงดึงลวดน้อยกว่าการใช้น้ำมัน iso-cut อย่างเดียวตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจาก sodium stearate สามารถรับแรงกดระหว่างผิวลวดกับผิวแม่พิมพ์ภายใต้แรงดันที่เกิดขึ้นได้ ดีกว่า ขณะที่น้ำมันที่ใช้ขึ้นรูปมีความหนืดต่ำ ประกอบกับการดึงลวดจะเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งก็จะทำให้ความหนืดต่ำลงอีก จึงมีโอกาที่ชั้นฟิล์มน้ำมันแตกออก ทำให้ความเสียดทานสูงมากขึ้น [27]

5.1.2.5 ผลของความหยาบผิวลวดทองแดงในการดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สอง

จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและความหยาบผิวสูงสุดของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปจริงโดยใช้ความเร็วดึงลวดที่ 10 มิลลิเมตร/นาที วิธีการหาค่าความหยาบผิวลวดดึงที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งจะพบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าความหยาบผิวสูงสุดมีแนวโน้มเหมือนกันคือเมื่อทำการดึงขึ้นรูปลวด ความหยาบผิวของลวดจะมีค่าสูงขึ้น โดยการดึงขึ้นตอนแรกจะมีค่าความหยาบผิวมากกว่าการดึงในขั้นตอนที่สองเพราะการดึงขึ้นตอนแรก ลวดต้องผ่านการอบอ่อน (Annealing) ทำให้มีออกไซด์มาติดที่ผิวลวด ซึ่งขณะดึงขึ้นรูปลวดนั้น ลวดที่ขึ้นรูปมาจะมีออกไซด์ติดตามมา ส่งผลให้ความหยาบผิวสูงขึ้น ส่วนการดึงลวดในขั้นตอนที่สองนั้นความหยาบผิวลวดมีค่าน้อยกว่าขั้นตอนแรกเพราะในการดึงขึ้นตอนนี้การถ่ายผิวของแม่พิมพ์ไปยังลวดเกิดขึ้นได้มากขึ้น ทำให้ผิวลวดที่ออกมามีคุณภาพดีกว่า และเมื่อพิจารณาการใช้การสันสะท้อนด้วยความถี่สูงพบว่าผิวลวดดีขึ้นกว่าไม่ใช้การสันสะท้อน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อประยุกต์ใช้การสันสะท้อนด้วยความถี่สูง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์กับลวด น้ำมันหล่อลื่นจึงไหลได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการเสียดสีกันระหว่างผิวแม่พิมพ์และผิวลวด ทำให้ลวดที่ขึ้นรูปมามีคุณภาพดีขึ้น [19,20]



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปในแต่ละขั้นตอน โดยใช้การ สั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือนที่ความเร็วดึง 10 mm/min



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปในแต่ละขั้นตอน โดยใช้การ สั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือนที่ความเร็วดึง 10 mm/min

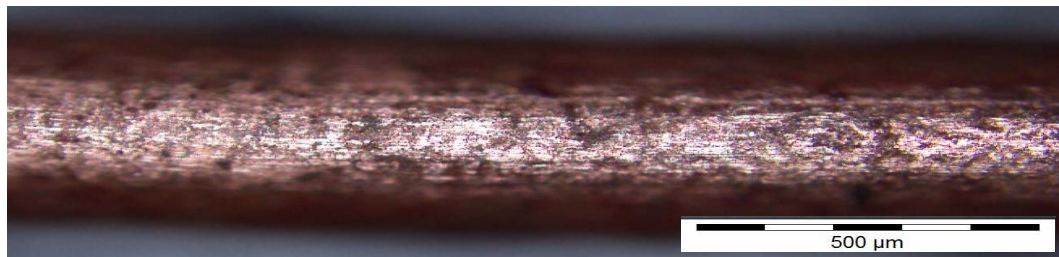
5.1.2.6 ผลของผิวลวดทองแดงในการดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สอง

จากรูปที่ 5.16 ตัวอย่างภาพถ่ายผิวลวดทองแดงเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าลวดทองแดงเริ่มต้นมีผิวเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน และเมื่อนำลวดทองแดงเริ่มต้นไปผ่านกระบวนการอบอ่อน ผิวลวดทองแดงจะมีเศษพลาสติกและออกไซด์ติดอยู่ที่ผิวลวดส่งผลให้คุณภาพผิวลวดแย่ลง โดยสังเกตได้จากรูปที่ 5.16 ข ส่วนผิวลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การ สั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในกระบวนการดึงลวดผิวลวดทองแดงมีคุณภาพดีขึ้น รอยขีดข่วนลดลง

เพราะว่าน้ำมันหล่อลื่นสามารถไหลตัวได้มากขึ้น ทำให้การเสียดสีกันระหว่างผิวแม่พิมพ์กับผิวลวดลดลง [36] ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.17ก และรูปที่ 5.18ก ขณะที่ถ้าไม่ใช้การสันสะเทือนด้วยความถี่สูง ในกระบวนการดึงลวดทองแดงในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ผิวลวดทองแดงที่ออกมาจะมีรอยขีดข่วนที่ลึก ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.17ข และรูปที่ 5.18ข

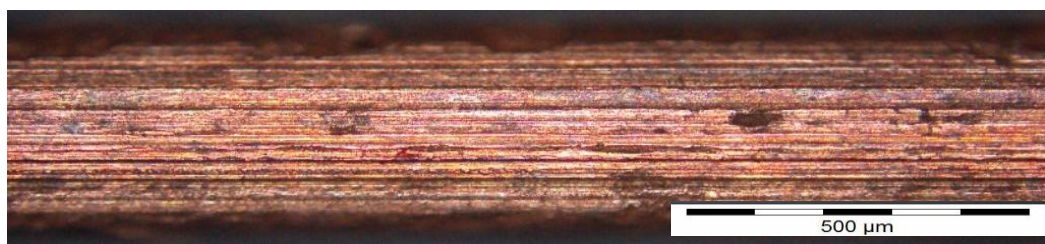


ก. ผิวลวดทองแดงเริ่มต้น

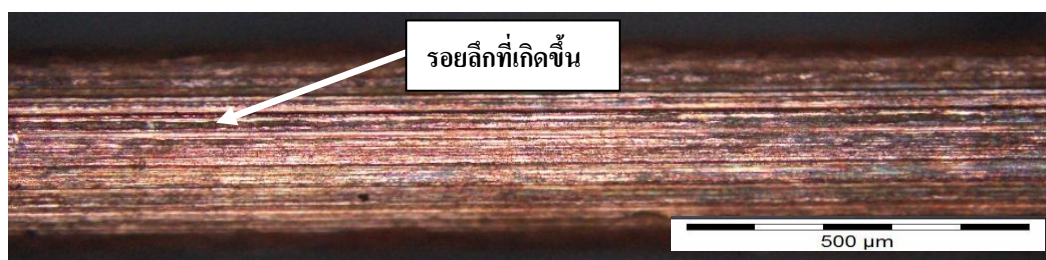


ข. ผิวลวดทองแดงเริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน

รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายผิวลวดทองแดงที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ผิวลวดทองแดงเริ่มต้น (ข). ผิวลวดทองแดงเริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน

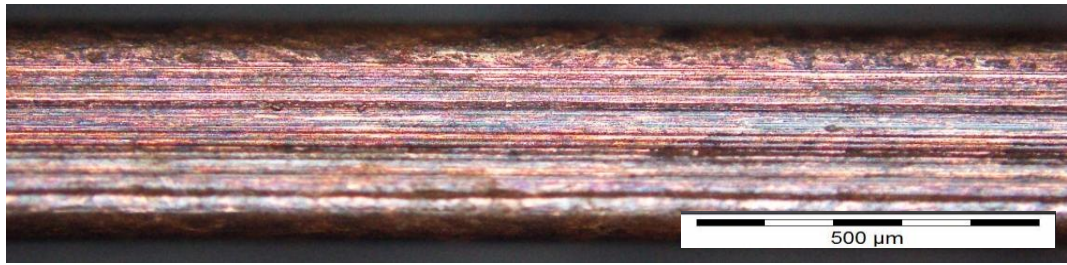


ก. ใช้การสันสะเทือน



ข. ไม่ใช้การสันสะเทือน

รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายผิวลวดทองแดงที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 1 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสันสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสันสะเทือน



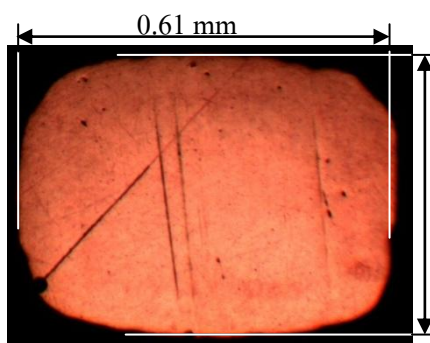
ก. ใช้การสันสะเทือน



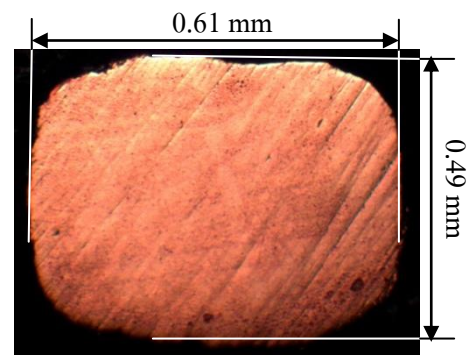
ข. ไม่ใช้การสันสะเทือน

รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายฝิวลวดทองแดงที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 2 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสันสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสันสะเทือน

5.1.2.7 ขนาดรูปร่างหน้าตัดของลวดทองแดงที่ผ่านการขึ้นรูปจริงในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สอง จากรูปที่ 5.19 และ รูปที่ 5.20 ภาพตัวอย่างแสดงขนาดรูปร่างของลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริง ในขั้นตอนแรก และขั้นตอนที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสันสะเทือน จากภาพจะพบว่ารูปร่างของลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปจริงมาในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามที่ออกแบบไว้ (ภาคผนวก ก) โดยการที่ใช้การสันสะเทือนและไม่ใช้การสันสะเทือนมีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดจริงที่ออกมาไม่ค่อยแตกต่างกัน

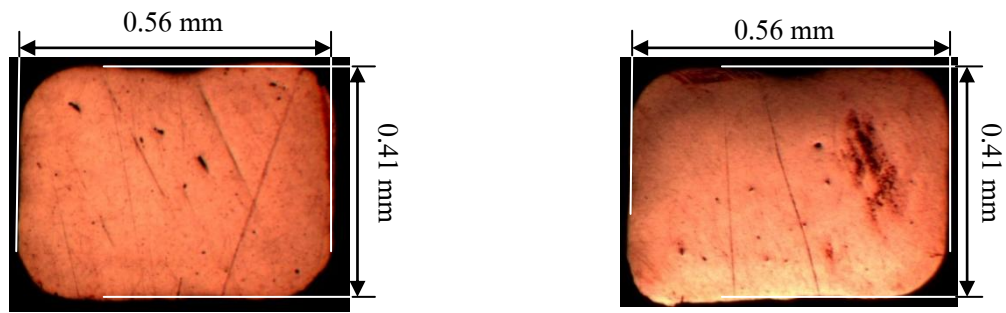


(ก) ไม่ใช้การสันสะเทือน



(ข) ใช้การสันสะเทือน

รูปที่ 5.19 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1



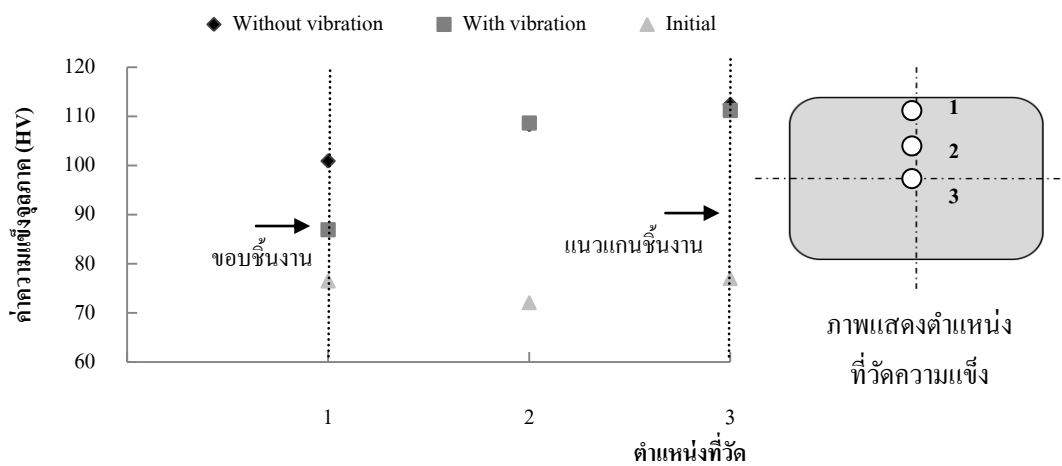
(ก) ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

(ข) ใช้การสั่นสะเทือน

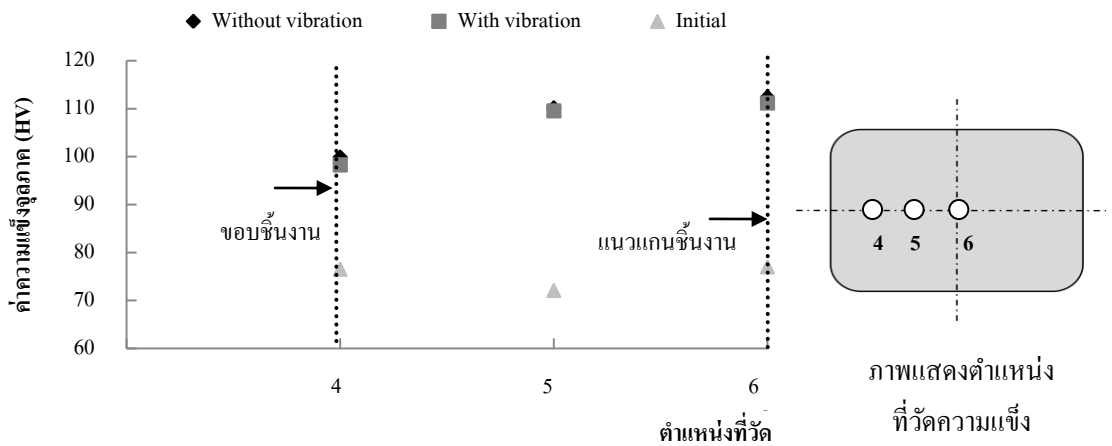
รูปที่ 5.20 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดทองแดงที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2

5.1.2.8 ผลของการวัดค่าความแข็งจุลภาคของลวดทองแดงที่ดึงขึ้นรูป

จากการที่ลวดผ่านการขึ้นรูปมาในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง (Work hardening) จึงทำให้ความแข็งลวดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 5.21ก และรูปที่ 5.21ข การดึงลวดโดยไม่ใช้การสั่นสะเทือนพบว่า ตำแหน่งใกล้กับจุดศูนย์กลางจะมีค่าความแข็งมากที่สุด ส่วนที่ขอบมีค่าความแข็งน้อยสุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากขณะที่ดึงขึ้นรูปลวดนั้น บริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดจะเกิดการเคลื่อนตัวของวัสดุมากกว่า ทำให้บริเวณนั้นเกิดความเครียดแข็งที่สูงมากกว่าบริเวณขอบนอกของชิ้นงาน ดังนั้นความแข็งจึงเพิ่มขึ้นตาม [40] ส่วนการใช้สั่นสะเทือนพบว่าความแข็งของลวดทองแดงที่ขึ้นรูปมาที่บริเวณขอบลวดจะมีค่าน้อยกว่าความแข็งของลวดทองแดงที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือน เพราะเมื่อใช้การสั่นสะเทือนจะช่วยลดความเค้นที่ผิวลวด [26]



(ก). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

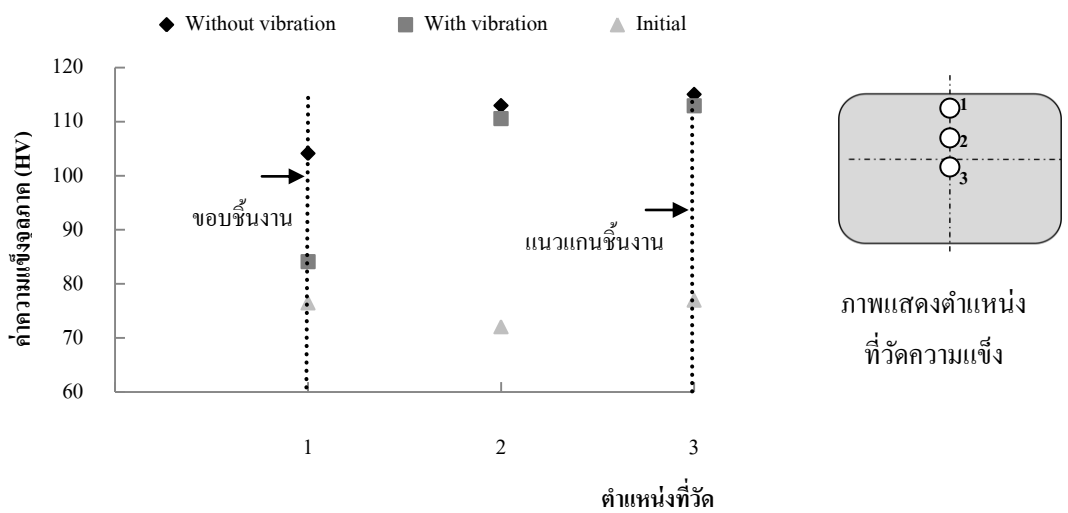


(ข). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดทองแดงที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

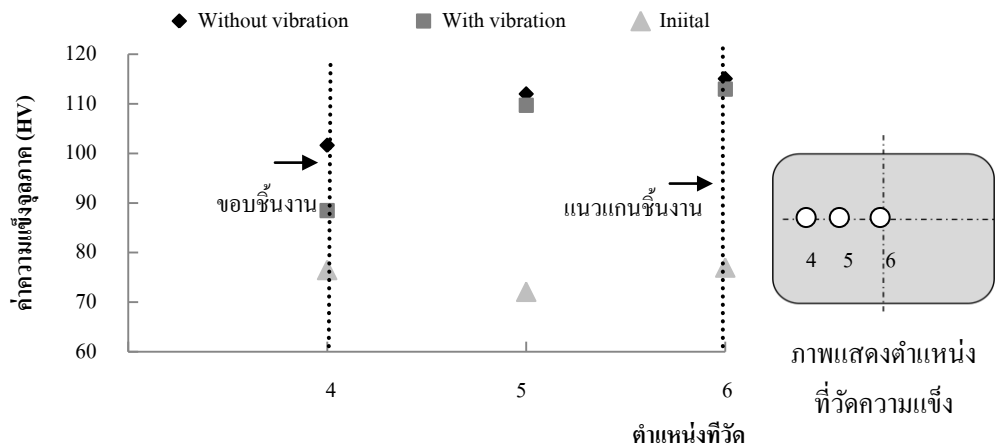
รูปที่ 5.21 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดทองแดงที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

(ข). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดทองแดงที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 5.22ก และรูปที่ 5.22ข แสดงผลของความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างและด้านยาวของลวดทองแดงที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน โดยพบว่าผลที่ออกมาเหมือนกับกระบวนการดิ่งลวดทองแดงในขั้นตอนแรก



ก). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดทองแดงที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน



(จ). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

รูปที่ 5.22 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

(ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดทองแดงที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

จากการทดลองเบื้องต้น โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกนกับลวดทองแดง เป็นการยืนยันว่าเครื่องมือที่ออกแบบและสร้างมามีความพร้อมที่จะทดลองดึงลวดโลหะผสมนิกเกิล - ไทเทเนียม โดยสังเกตจากผลของแรงดึงขึ้นรูปพบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือน แรงดึงลดลง คุณภาพผิวดีขึ้น และขนาดรูปร่างพื้นที่หน้าตัดที่ออกมาตรงตามที่คาดไว้ ดังนั้นชุดอุปกรณ์ดึงลวดจึงพร้อมใช้ทดลองดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนตามแนวแกนต่อไป

5.2 ผลการทดลองดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม (TiNi)

5.2.1 ผลการทดลองดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมโดยประยุกต์ใช้การ

สั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกนโดยใช้ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น

0.7 มม

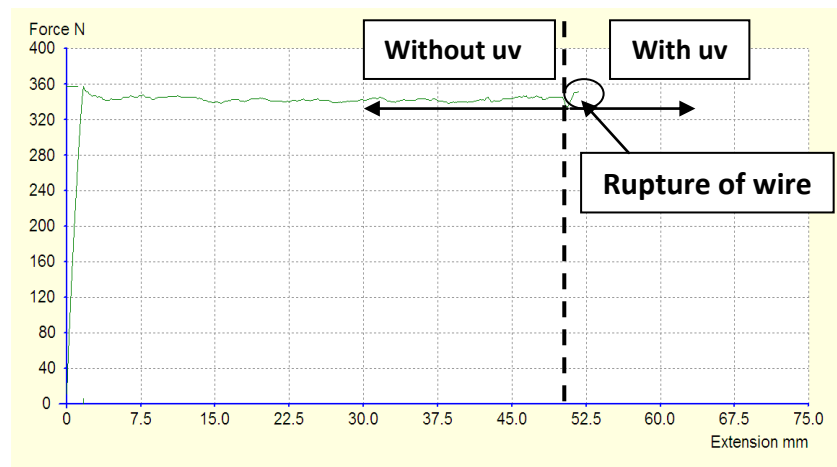
การทดสอบดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล - ไทเทเนียมโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกนนั้น ใช้ลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล - ไทเทเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มิลลิเมตร ทดสอบประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น และเก็บผลตัวอย่างต่างๆในกระบวนการดึงลวด ซึ่งเงื่อนไขและผลการทดลองต่างๆ แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองดึงลวด SMA โดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตาม
แนวแกน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มม)

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	ลวด SMA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มม, $S_{ut} = 977 \text{ MPa}$, %Elongation = 108 %
วัสดุทำแม่พิมพ์	ทังสเตนคาร์ไบด์
ความถี่การสั่นสะเทือน	20 kHz
แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน	10 μm (no load condition)
ความเร็วดึง	10 mm/min
สารหล่อลื่น	Iso-cut 570A : Sodium stearate = 1:0.5

5.2.1.1 แรงดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม

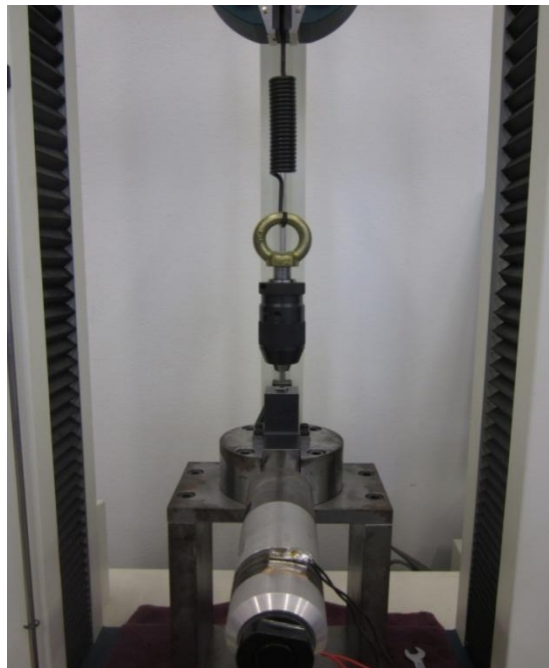
จากรูปที่ 5.23 เมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในการดึงลวดขึ้นตอนแรกพบว่าลวดจะขาดบริเวณปากจับ (Gripper) แสดงดังรูปที่ 5.24 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการสั่นพ้อง (Resonance) อย่างรุนแรงที่บริเวณปลายลวดที่ถูกจับยึด ดังนั้นจึงทดลองแก้ปัญหาโดยใช้สปริงเข้ามาช่วยเพื่อดูดซับพลังงานการสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ซึ่งจากรูปที่ 5.25 พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในการดึงลวดขึ้นตอนแรกนั้น ลวดยังคงขาดเหมือนเดิมบริเวณปากจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 5.23 ตัวอย่างกราฟแรงดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนแรก
แสดงให้เห็นถึงการขาดของชิ้นงานเมื่อใช้การสั่นสะเทือน

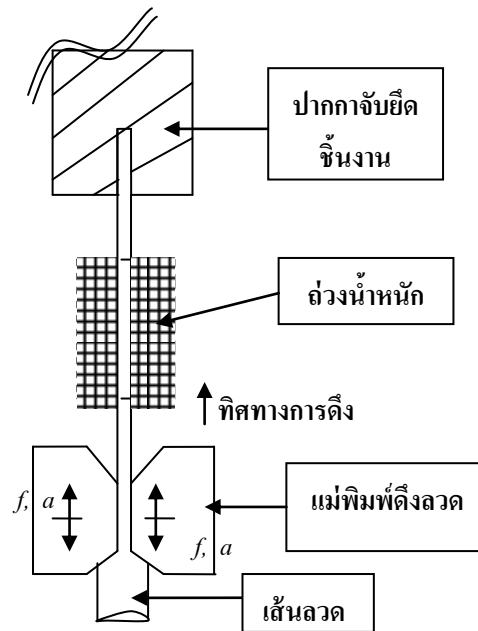


รูปที่ 5.24 ลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขาดบริเวณปากจับยึดชิ้นงานเมื่อประยุกต์ใช้การ
สันสะท้อนด้วยความถี่สูง

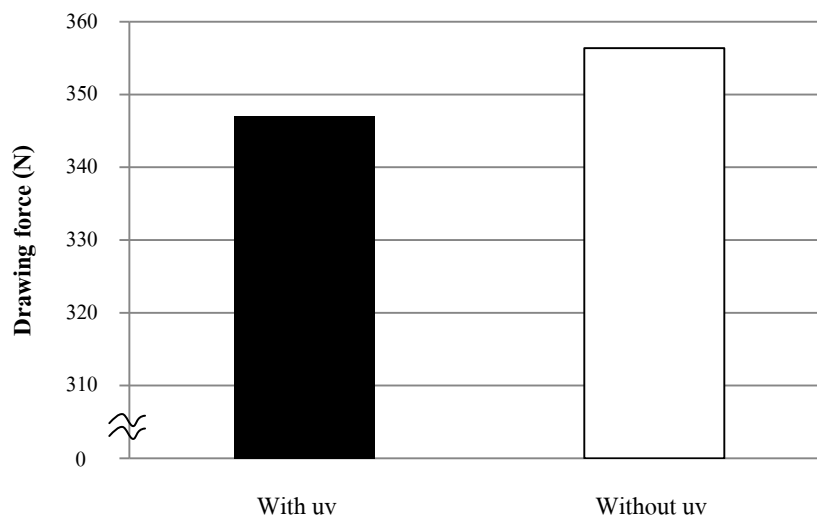


รูปที่ 5.25 การแก้ปัญหาการสันฟ้องที่ทำให้ลวดขาดโดยการดูดซับการสันสะท้อนบริเวณปากจับยึด
ลวด

ดังนั้นจึงแก้ปัญหาอีกแนวทางหนึ่งโดยทำการถ่วงน้ำหนักบริเวณลวดระหว่างแม่พิมพ์และปากจับยึดเส้นลวด เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นพ้องส่งไปถึงลวดบริเวณปากจับยึดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 5.26 ซึ่งผลที่ออกมาจะพบว่าสามารถดึงขึ้นรูปลวดได้

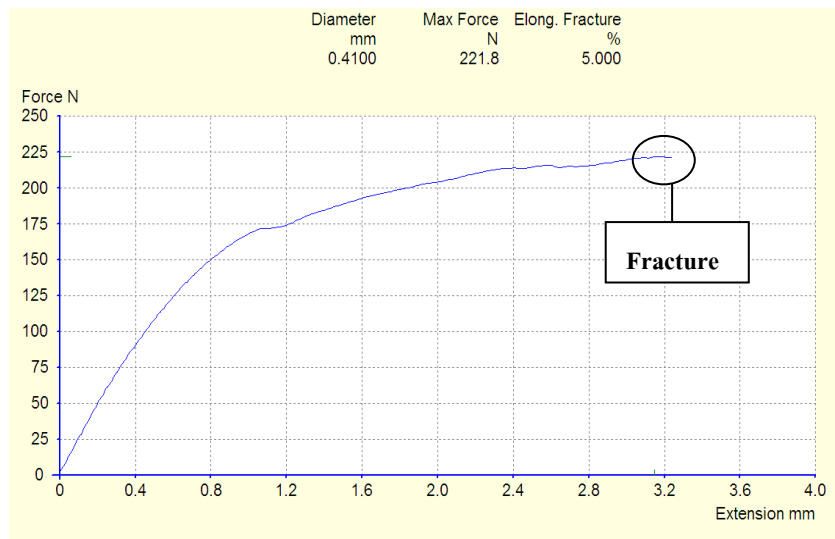


รูปที่ 5.26 การประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในการดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม โดยการถ่วงน้ำหนักลวดบริเวณระหว่างแม่พิมพ์และปากจับยึดเส้นลวด



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงแรงดึงขึ้นรูปลวด SMA ชั้นตอนแรกโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดศูนย์กลางผ่านกลางเริ่มต้น 0.7 มม)

จากรูปที่ 5.27 เมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในกระบวนการดึงลวดพบว่าแรงดึงลวด SMA มีค่า 347 N และเมื่อไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงแรงดึงลวด SMA มีค่า 356 N ลดลงจากเดิม 2.8% ตามเหตุผลที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.1.2.4 ถ้าพิจารณาพบว่าเมื่อใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง แรงดึงลวดมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับแรงดึงลวดที่ไม่ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง เนื่องจากลวด SMA เป็นลวดที่แข็ง ทำให้แอมพลิจูดขณะทดลองลดลงไปมาก ดังนั้นแรงดึงลวดจึงไม่ค่อยแตกต่างกัน ส่วนการดึงขึ้นรูปลวดในขั้นตอนที่สองนั้น ต้องนำลวดที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนแรกมาอบอ่อนก่อน เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูง โดยลวดที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนแรกมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent elongation) 11 % และเมื่อนำลวดที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนแรกมาอบอ่อนมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 105% (ภาคผนวก ก.) ซึ่งการดึงขึ้นรูปลวดในขั้นตอนที่สองแสดงดังรูปที่ 5.28 พบว่าลวดจะขาดบริเวณที่เตรียมผิวชิ้นงาน เนื่องจากตำแหน่งนั้นมีพื้นที่น้อย และเมื่อนำแรงดึงจากการทดลองมาคำนวณหาความเค้นในเส้นลวดพบว่าลวดรับความเค้นมากถึง 1,352.44 MPa ซึ่งเกินค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 1,307 MPa ดังนั้นลวดจึงขาด

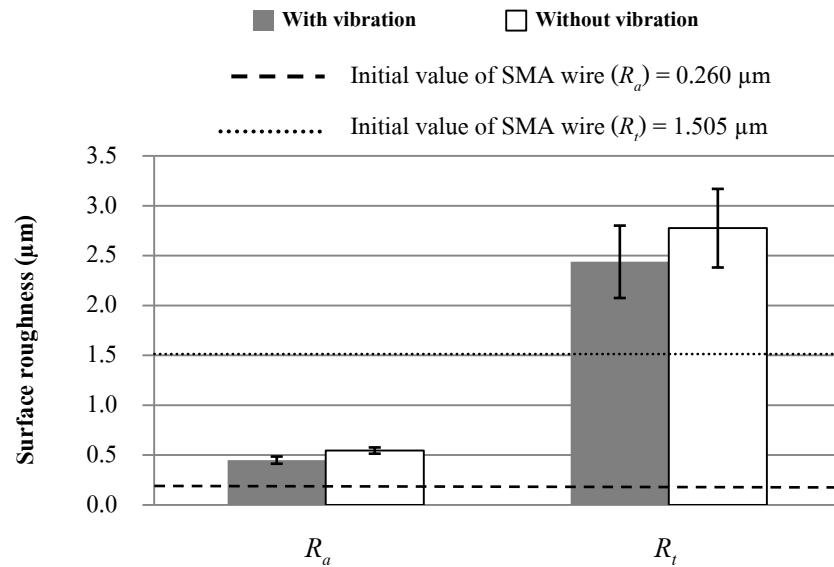


รูปที่ 5.28 ตัวอย่างกราฟแรงดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน

5.2.1.2 ผลของค่าความหยาบผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม (ขนาดลวดเริ่มต้น ๐ 0.7 มม.)

จากรูปที่ 5.29 พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าความหยาบผิวสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกันคือ ผิวลวดที่ผ่านการขึ้นรูปมาจะมีค่าความหยาบผิวมากกว่าลวดเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากลวดเริ่มต้นได้ผ่านการขัดผิวสังเกตได้จากรูปที่ 5.30ก ส่วนลวดที่ใช้ในการทดลองก่อนการทดลองนั้น ได้นำลวดไปอบอ่อนเพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง แต่เมื่ออบอ่อนแล้ว ทำให้ผิวลวดเริ่มต้นมีออกไซด์ติดอยู่ สังเกตได้

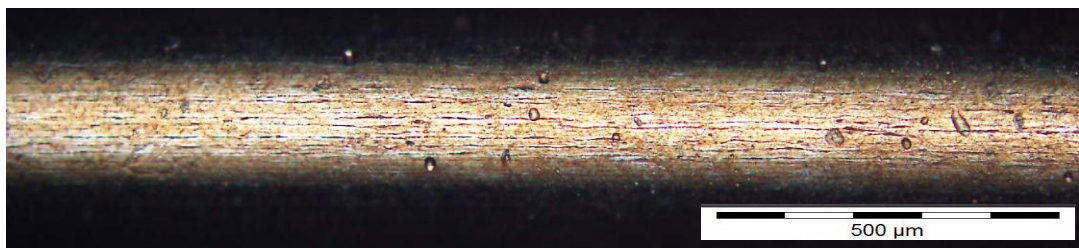
จากรูป 5.30 ข ค้างขึ้นเมื่อขึ้นรูปลวดมา จึงทำให้คุณภาพผิวลวดไม่ดีเท่าที่คาดไว้ และเมื่อประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงพบว่าผลที่ออกมามีแนวโน้มน่าเหมือนเดิม ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.1.2.2



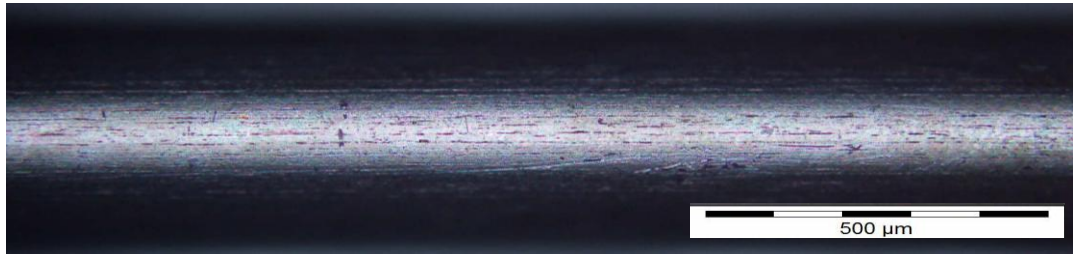
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปในขั้นตอนแรกโดยใช้การสั่นสะเทือนและไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.7 มม)

5.2.1.3 ผลการสังเกตผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

จากรูปที่ 5.30ก ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.7 มิลลิเมตร โดยพบว่าผิวลวดเริ่มต้นเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน เนื่องจากคาดว่าลวดเริ่มต้นผ่านกระบวนการขัดผิว ดังจะเห็นได้จากภาพถ่ายที่ 5.30ก ส่วนลวด SMA ที่ดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ตัวแรก โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน ผิวลวดไม่ค่อยแตกต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.31

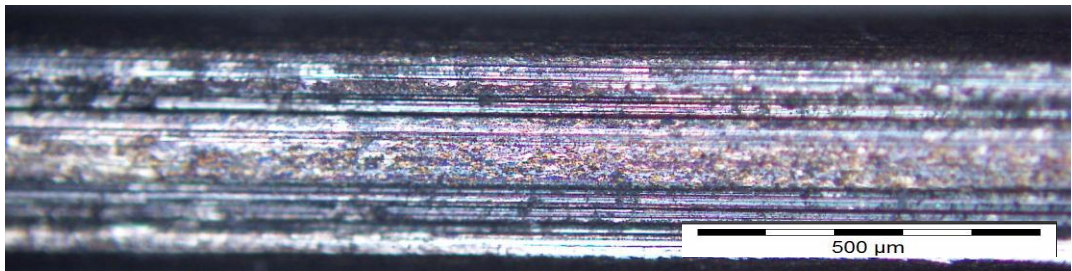


ก. ผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมเริ่มต้น

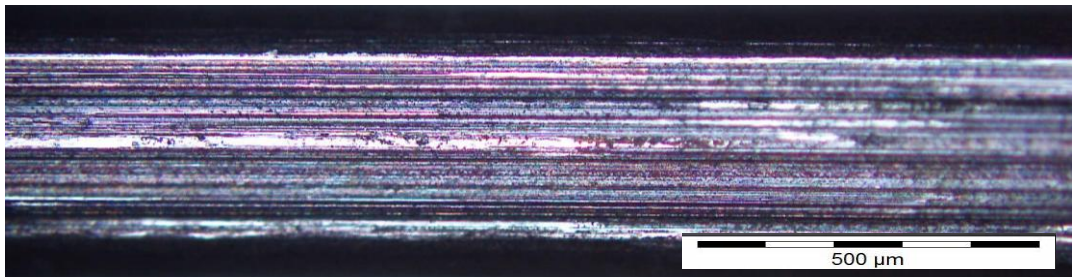


ข. ผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมเริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน

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



ก. ใช้การสั่นสะเทือน

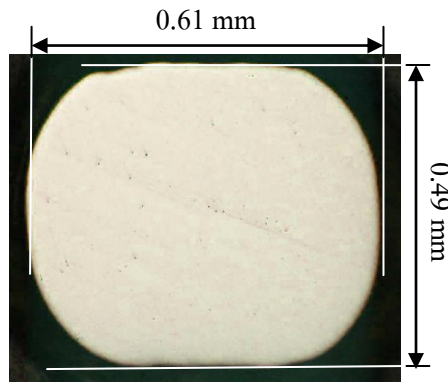


ข. ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

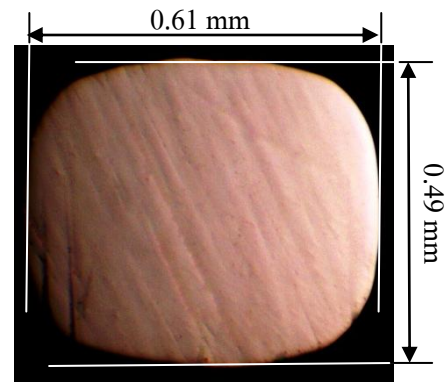
รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 1 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ลวดเริ่มต้น \varnothing 0.7 มม)

5.2.1.4 ขนาดรูปร่างหน้าตัดของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม

จากรูปที่ 5.32 ภาพตัวอย่างแสดงขนาดรูปร่างของลวด SMA ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน จากภาพจะพบว่ารูปร่างของลวด SMA ที่ดึงขึ้นรูปจริงในขั้นตอนที่ 1 จะมีขนาดรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามที่ออกแบบไว้ คือ ด้านยาว 0.61 มิลลิเมตรและด้านกว้าง 0.49 มิลลิเมตร (ภาคผนวก ค)



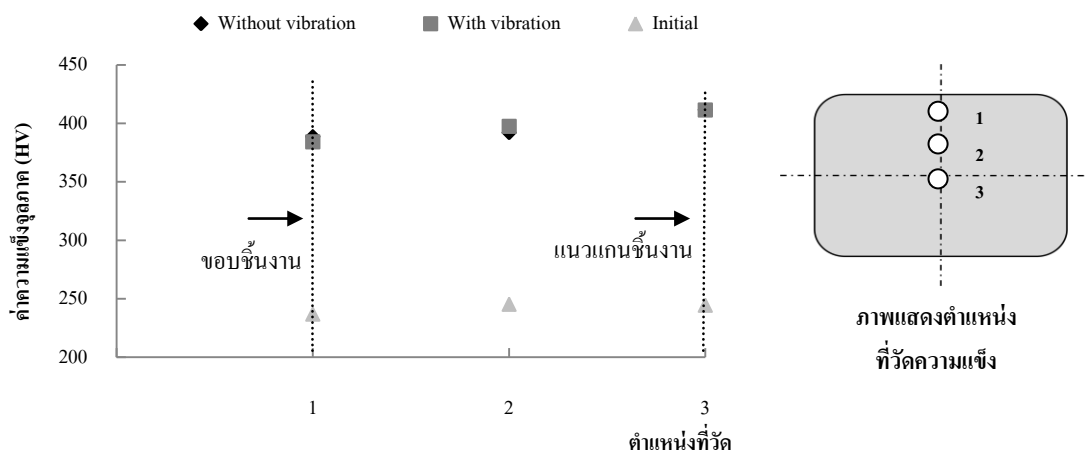
(ก). ใช้การสั่นสะเทือน



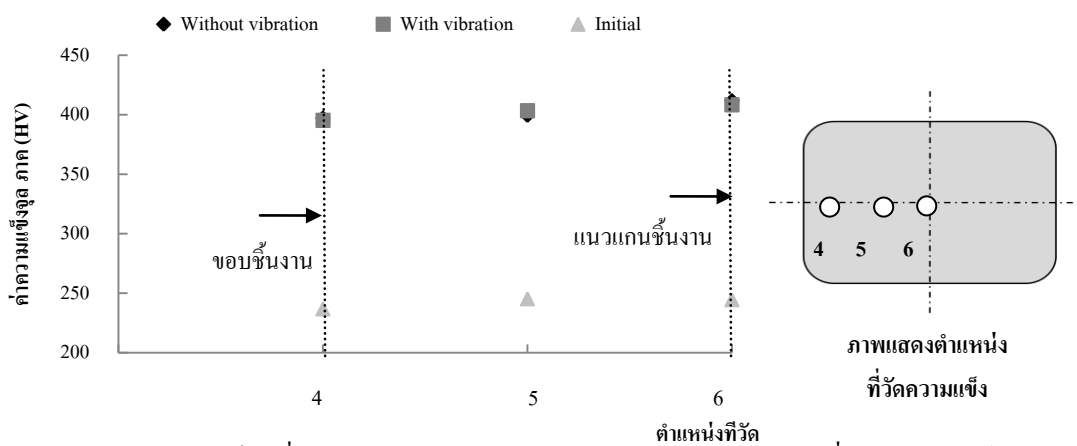
(ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

รูปที่ 5.32 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดโลหะผสมจํารูปนิกเกิล – โทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.7 mm)

5.2.1.5 ผลการวัดค่าความแข็งจุลภาคของลวดที่ดึงขึ้นรูป



ก). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจํารูปนิกเกิล – โทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.7 mm)



ข). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจํารูปนิกเกิล – โทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.7 mm)

- รูปที่ 5.33 (ก).**กราฟแสดงค่าความแข็งแรงเฉื่อยด้านกว้างของลวด โลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.7 mm)
- (ข).**กราฟแสดงค่าความแข็งแรงเฉื่อยด้านยาวของลวด โลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.7 mm)

จากรูปที่ 5.33ก และรูปที่ 5.33ข พบว่าจากการใช้การสั่นสะเทือน จะทำให้ความแข็งแรงบริเวณขอบลวดมีค่าลดลงกว่ากรณีไม่ใช้การสั่นสะเทือน [26] สาเหตุดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.1.2.8 แต่ค่าความแข็งแรงที่ขอบลวดลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากลวด SMA เป็นลวดที่แข็ง ทำให้แอมพลิจูดขณะทดลองลดลงไปมาก ส่วนการดึงลวดโดยไม่ใช้การสั่นสะเทือนพบว่าค่าความแข็งแรงของลวด SMA มีแนวโน้มเหมือนกับค่าความแข็งแรงของลวดทองแดงที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

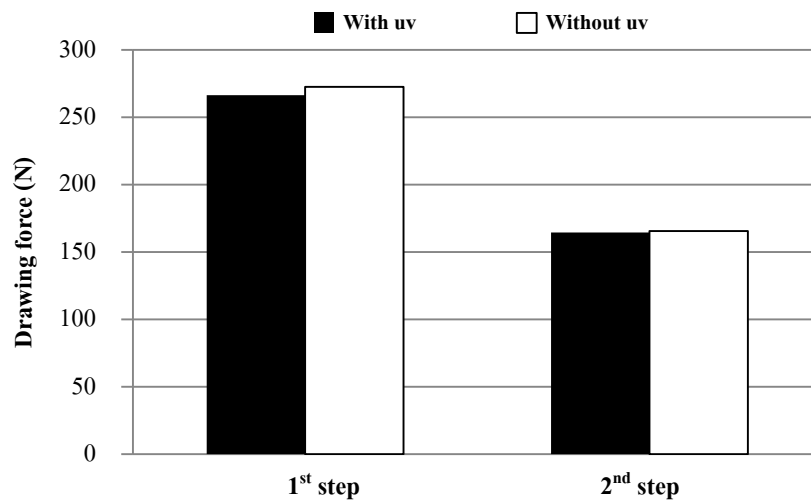
5.2.2 ผลการทดลองดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมโดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกนโดยใช้ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.64 มม

จากปัญหาในหัวข้อ 5.2.1.1 ทางผู้วิจัยจึงเปลี่ยนลวด โลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมให้มีอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดรวมลดลงโดยใช้ลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมเริ่มต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร แล้วทำการดึงขึ้นรูปลวดในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองใหม่โดยประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงในแนวแกน ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ทดลองแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองดึงลวด SMA โดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงตามแนวแกน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.64 มม)

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	ลวด SMA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.64 มม, $S_{ut} = 900$ MPa, %Elongation = 144 %
วัสดุทำแม่พิมพ์	ทังสเตนคาร์ไบด์
ความถี่การสั่นสะเทือน	20 kHz
แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน	10 μ m (no load condition)
ความเร็วดึง	10 mm/min
สารหล่อลื่น	Iso-cut 570A : Sodium stearate = 1:0.5

5.2.2.1 แรงดึงลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม



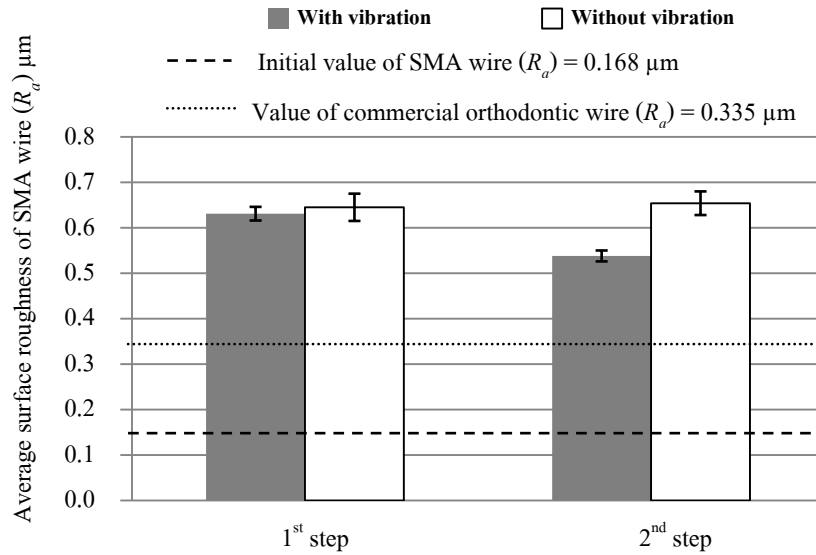
รูปที่ 5.34 กราฟแสดงแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด SMA ในแต่ละขั้นตอนโดยใช้การสันสะท้อนและไม่ใช้การสันสะท้อน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเริ่มต้น 0.64 มม)

จากรูปที่ 5.34 พบว่าในการดึงลวดในขั้นตอนที่แรก ใช้แรงดึงขึ้นรูปลวด 273 นิวตัน ซึ่งมากกว่าการดึงลวดในขั้นตอนที่สองที่ใช้แรงเพียง 166 นิวตัน เนื่องจากในการดึงขั้นตอนนี้มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจากกลมไปเป็นเหลี่ยม ดังนั้นจึงต้องใช้แรงดึงขึ้นรูปสูง ส่วนการดึงลวดในขั้นตอนที่สองใช้แรงน้อยกว่ากรณีการดึงขั้นตอนแรกเพราะว่าหลังจาก ดึงขึ้นรูปผ่านขั้นตอนแรกแล้วลวดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมากแล้วนั่นเอง ถ้าพิจารณาอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ดึงในขั้นตอนแรกพบว่ามีค่า 7.08 % แต่แรงดึงมากเป็นเพราะมุมการไหลเข้าแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม [6] ส่วนอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ดึงในขั้นตอนสองมีค่า 23.18% จากการประยุกต์ใช้การสันสะท้อนในการดึงลวดในขั้นตอนแรก และ ขั้นตอนที่สองพบว่าแรงดึงมีค่าลดลงจากเดิม 2.56% และ 0.6% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเหตุผลที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1.2.4 โดยแรงลดลงเพียงเล็กน้อยเพราะลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมมีความแข็งแรงมาก

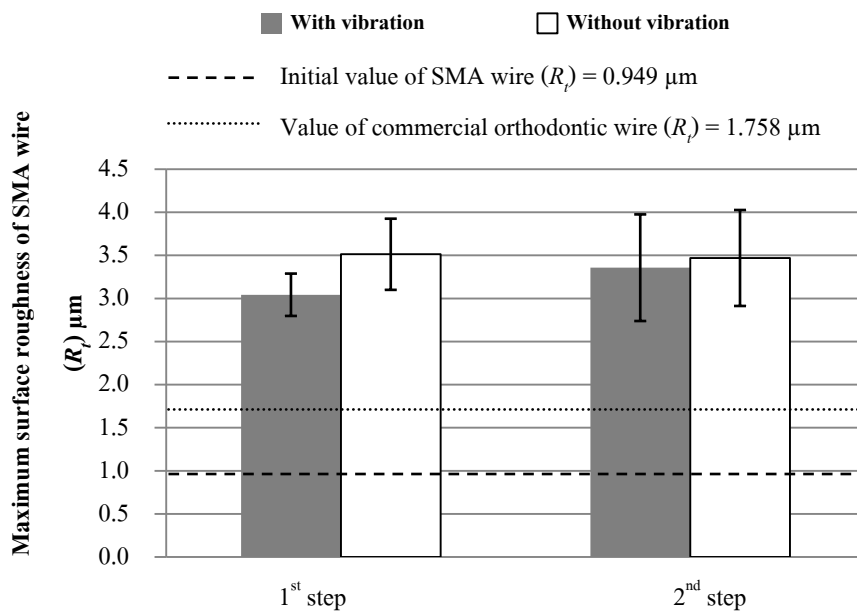
5.2.2.2 ผลของค่าความหยาบผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 มม.)

จากรูปที่ 5.35 และรูปที่ 5.36 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและความหยาบผิวสูงสุดของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปจริง โดยลวดเริ่มต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ซึ่งวิธีการวัดค่าความหยาบผิวดังได้ที่กล่าวไว้ข้างต้น จากรูปที่ 5.35 และ รูปที่ 5.36 พบว่าผลของความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าความหยาบผิวสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่การดึงลวดขั้นตอนที่สอง เมื่อใช้การสันสะท้อนค่าความหยาบผิวลวดดีขึ้นกว่าไม่ใช้การสันสะท้อนอย่างชัดเจน

ทั้งนี้ เป็นเพราะน้ำมันหล่อลื่นไหลได้มากขึ้น [19,20,36] อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาผลการวัดค่าความหยาบผิวของลวดจัดฟันเชิงพาณิชย์หือ Ormco ผลิตจากประเทศเม็กซิโก พบว่าลวดจัดฟันที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากลวดจัดฟันเชิงพาณิชย์ผ่านกระบวนการขัดผิวที่เรียกว่า wire grinding [39] แสดงให้เห็นว่าลวดที่ผ่านการดึงในงานวิจัยนี้ต้องนำไปผ่านกระบวนการขัดผิวทางเคมีในขั้นตอนสุดท้ายจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้



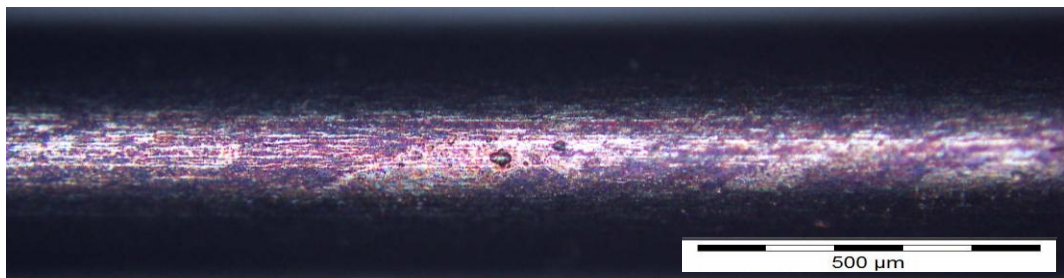
รูปที่ 5.35 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปแต่ละขั้นตอน โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 มม)



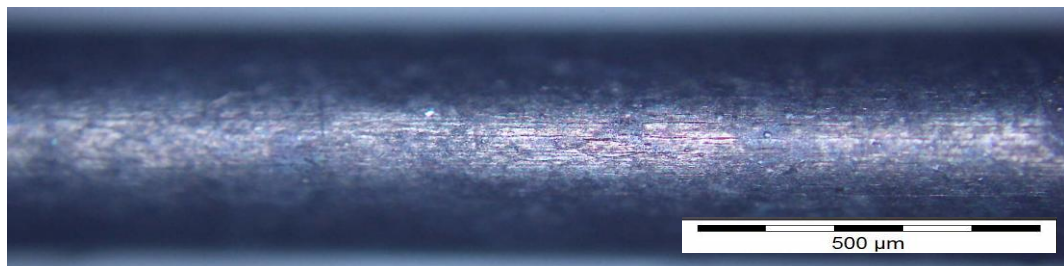
รูปที่ 5.36 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวสูงสุดของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปแต่ละขั้นตอน โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 มม)

5.2.2.3 ผลการสังเกตผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล-ไทเทเนียม

ผลการสังเกตผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล - ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.64 มม ดึงผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกและตัวที่สองโดยใช้และไม่ใช้การสันสะท้อน แสดงดังรูปที่ 5.37 และจากรูปที่ 5.38ข และรูปที่ 5.39ข แสดงผิวลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปโดยไม่ใช้การสันสะท้อน ผิวลวดที่ออกมาจะมีรอยขีดข่วนที่ลึก ส่วนการใช้การสันสะท้อนนั้น ผิวลวดมีรอยขีดข่วนน้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.38ก และรูปที่ 5.39ก เหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือเมื่อใช้การสันสะท้อน การเสียดสีกันระหว่างผิวลวดกับผิวแม่พิมพ์ลดลง ทำให้คุณภาพผิวดีขึ้น [36] ขณะที่ลวดจัดพื้นที่ใช้เชิงพาณิชย์มีผิวที่ดีกว่าลวดที่ดึงขึ้นรูปเอง เนื่องจากผิวลวดจัดพื้นที่ผ่านกระบวนการขัดผิวลวด (wire grinding) [39] สังเกตได้จากภาคผนวก จ.

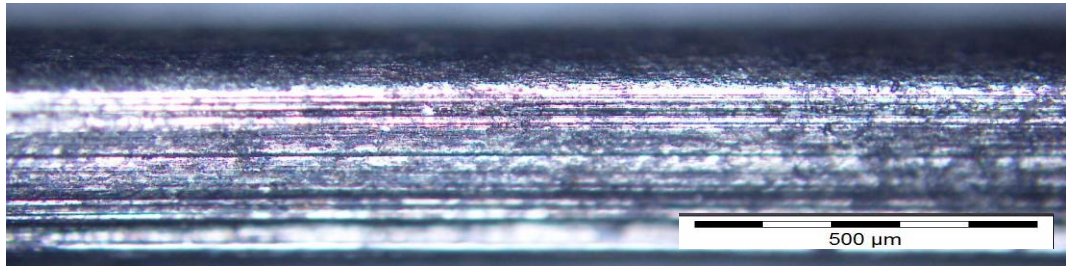


ก. ผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมเริ่มต้น

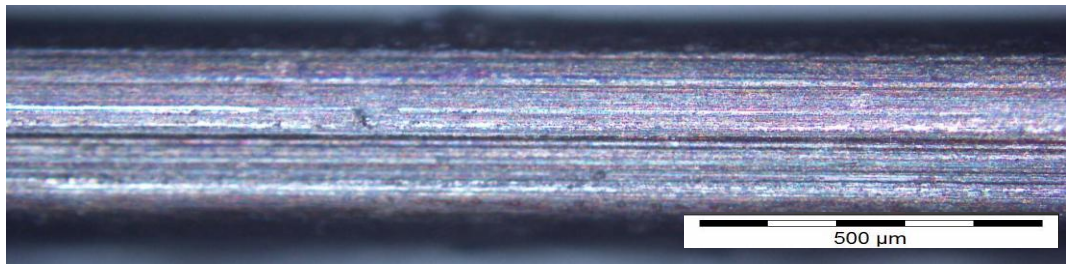


ข. ผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมเริ่มต้นที่ผ่านการอบอ่อน

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

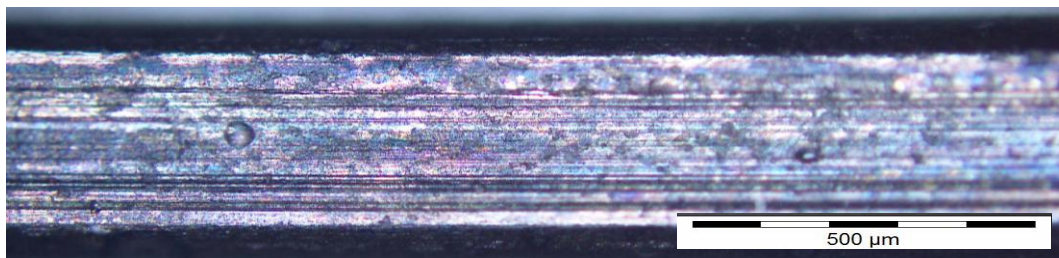


ก. ใช้การสั่นสะเทือน

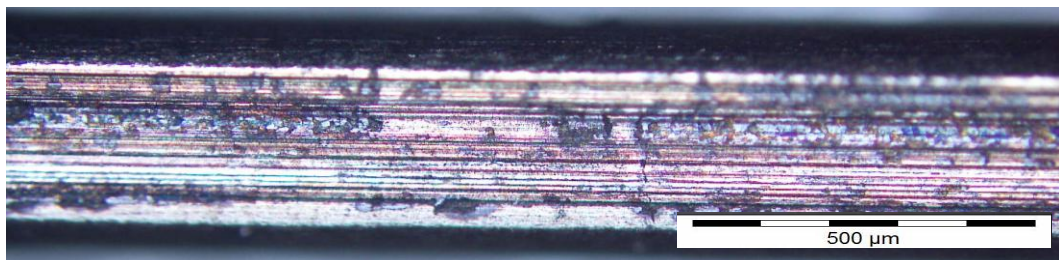


ข. ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

รูปที่ 5.38 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 1 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 มม)



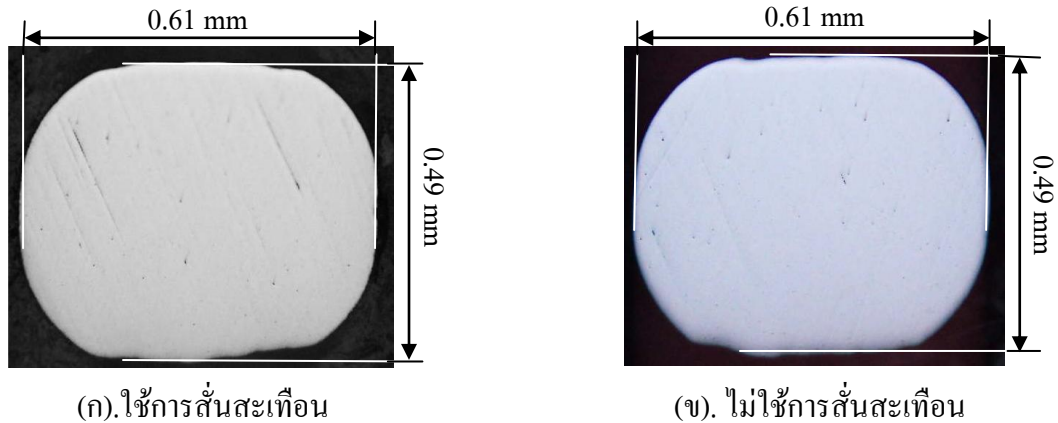
ก. ใช้การสั่นสะเทือน



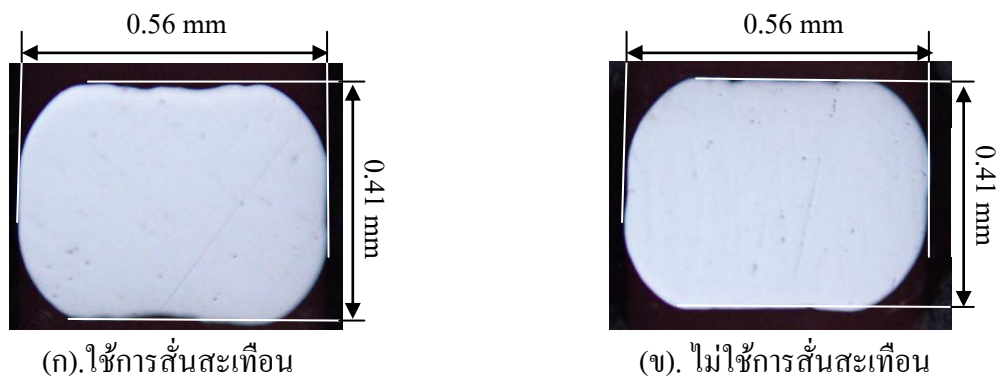
ข. ไม่ใช้การสั่นสะเทือน

รูปที่ 5.39 ภาพถ่ายผิวลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ขึ้นรูปมาในขั้นตอนที่ 2 ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (ก). ใช้การสั่นสะเทือน (ข). ไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 มม)

5.2.2.4 ขนาดรูปร่างหน้าตัดของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียม



รูปที่ 5.40 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.64 mm)

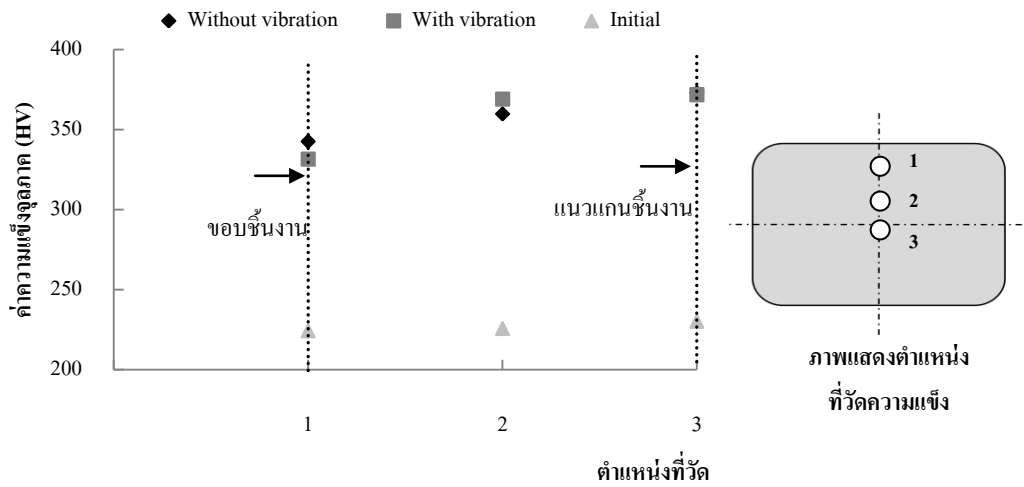


รูปที่ 5.41 ภาพแสดงอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจริงของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.64 mm)

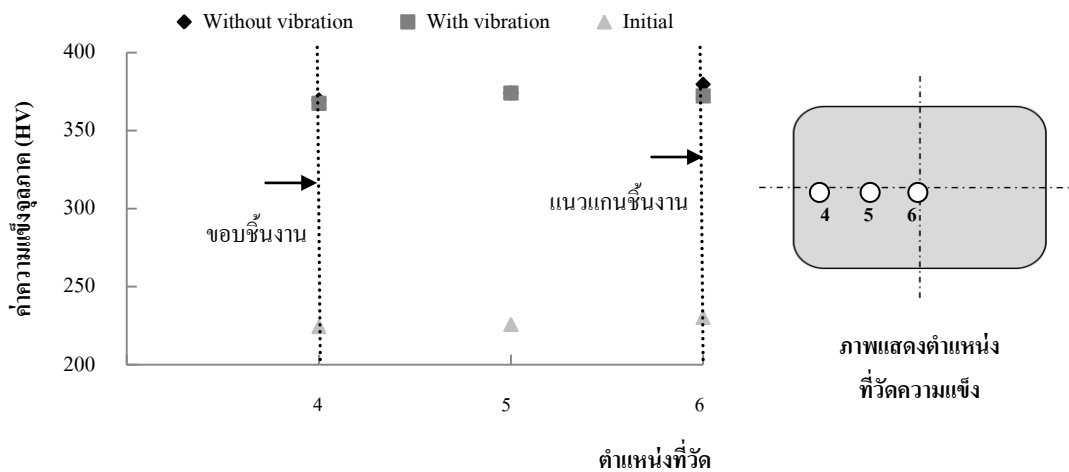
จากรูปที่ 5.40 และ รูปที่ 5.41 ภาพตัวอย่างแสดงขนาดรูปร่างของลวด SMA ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 โดยใช้และไม่ใช้การสั้นสะเทือน จากภาพจะพบว่ารูปร่างของลวด SMA ที่ดึงขึ้นรูปจริงในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 จะมีขนาดรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามที่ออกแบบไว้ คือ ในขั้นตอนที่ 1 มีขนาดด้านยาว 0.61 มิลลิเมตรและขนาดด้านกว้าง 0.49 มิลลิเมตร ส่วนในขั้นตอนที่ 2 มีขนาดด้านยาว 0.56 มิลลิเมตร และขนาดด้านกว้าง 0.41 มิลลิเมตร (ภาคผนวก ก) ซึ่งผลของการสั้นสะเทือนไม่ได้ส่งผลต่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของลวด

5.2.2.5 ผลการวัดค่าความแข็งจุลภาคของลวดที่ดัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 5.42 และรูปที่ 5.43 พบว่าลวดที่ดัดขึ้นรูปในขั้นตอนแรก และขั้นตอนที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน ผลที่ออกมาเหมือนกับผลข้างต้นตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2.1.5

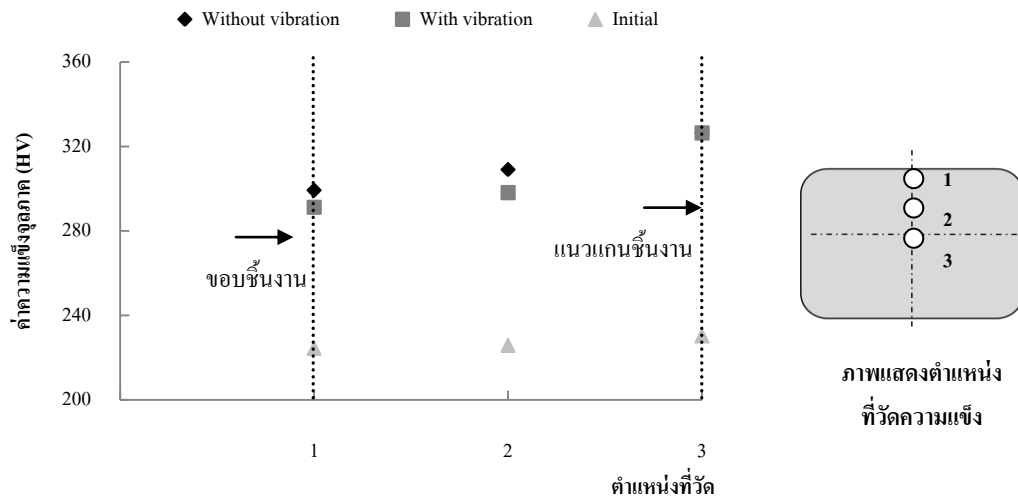


ก). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดัดผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 mm)

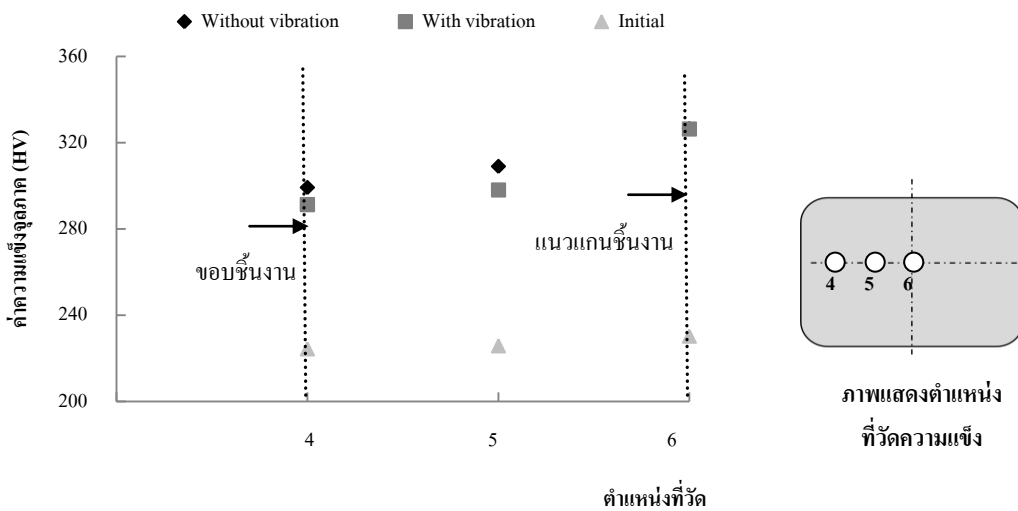


ข). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดัดผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 mm)

รูปที่ 5.42 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดัดผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 mm)
 (ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดัดผ่านแม่พิมพ์ตัวแรกโดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น ϕ 0.64 mm)



ก). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.64 mm)



ข). กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.64 mm)

รูปที่ 5.43 (ก).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านกว้างของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.64 mm)

(ข).กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยด้านยาวของลวดโลหะผสมจำรูปนิกเกิล – ไทเทเนียมที่ดิ่งผ่านแม่พิมพ์ตัวที่สอง โดยใช้และไม่ใช้การสั่นสะเทือน (ขนาดลวดเริ่มต้น \varnothing 0.64 mm)