

การออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อการทดลองทางทันตกรรม



นายพุฒิพร จันทร์แก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF HUMAN MASTICATION SIMULATOR FOR DENTAL
TESTING

Mr. Puttiporn Junkaew



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

พุดิพร จันท์แก้ว : การออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อการทดลองทางทันตกรรม (DESIGN AND DEVELOPMENT OF HUMAN MASTICATION SIMULATOR FOR DENTAL TESTING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ไพโรจน์สิงหนัดกิจ, 152 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อใช้สำหรับการทดสอบทางทันตกรรม เครื่องจำลองการเคี้ยวที่ออกแบบสามารถจำลองการขบกันของฟัน 1 คู่ คุณลักษณะหลัก ๆ ของเครื่องจำลองการเคี้ยว คือ สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของฟันล่างให้เกิดวิถีการเคี้ยว (chewing path) แบบการขบเคี้ยวที่ใกล้เคียงกับวิถีการเคี้ยวของมนุษย์ ชุดทดลองดังกล่าวใช้กลไกข้อต่อ 4 ชิ้น (four-bar linkage mechanism) ในการสร้างวิถีการเคี้ยว เครื่องจำลองการเคี้ยวนี้สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการทดสอบได้ระหว่าง 1 – 1.9 เฮิร์ตซ์ มีการควบคุมแรงในการเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนักที่สามารถปรับเปลี่ยนให้ได้แรงเคี้ยวได้สูงสุด 500 นิวตัน และสามารถปรับเปลี่ยนวิถีการเคี้ยวเป็นแบบการขบเคี้ยวและการกระแทกแนวตั้งได้ ชุดทดลองที่สร้างขึ้นสามารถวัดแรงกระแทกระหว่างการขบกันของฟันโดยใช้โพลดเซลล์ พร้อมทั้งอ่านและบันทึกแรงที่เกิดขึ้นผ่านชุดประมวลผลและชุดเก็บข้อมูล มีเครื่องนับรอบการหมุนของเพลลาสำหรับนับรอบการขบของฟันระหว่างการทดสอบ จากการสอบทวนชุดทดลองที่สร้างขึ้นพบว่า ชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนดการออกแบบ โดยสามารถควบคุมแรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบได้ต่ำสุด 70 นิวตัน และมีวิถีการเคี้ยวตามที่ออกแบบไว้ การทดลองทางทันตกรรมโดยใช้ชุดทดลองที่สร้างขึ้นทำโดยใช้ชิ้นงานที่เป็นฟันกรามกระแทกกับหัวกดชิ้นงานที่มีปลายทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ ผลการทดลองเปรียบเทียบความเสียหายของชิ้นงานโดยการทดลองด้วยวิถีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวและวิถีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง พบว่าฟันที่ทดลองด้วยวิถีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวมีการขยายตัวของรอยร้าวชัดเจนกว่าวิถีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง นอกจากนี้ในการทดลองบนฟันที่มีการอุดและให้ภาระในระดับที่สูงขึ้น พบว่าชิ้นงานที่ทดลองด้วยวิถีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวจำนวน 4 ตัวอย่าง เกิดการแตกหักเมื่อทดลองไปจำนวน 241, 577, 5,081 และ 2,073 รอบ ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ทดลองด้วยวิถีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้งสามารถรับภาระได้เกิน 100,000 รอบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและสร้างชุดทดลองทางทันตกรรมที่มีวิถีการเคี้ยวใกล้เคียงกับวิถีการเคี้ยวของมนุษย์ และได้แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่จำลองวิถีการเคี้ยวของมนุษย์มีความจำเป็นในการทดลองทางทันตกรรม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470559821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CHEWING SIMULATOR / HUMAN CHEWING PATH / FOUR BAR LINKAGE MECHANISM

PUTTIPORN JUNKAEW: DESIGN AND DEVELOPMENT OF HUMAN MASTICATION SIMULATOR FOR DENTAL TESTING. ADVISOR: ASSOC. PROF. PAIROD SINGHATANADGID, Ph.D., 152 pp.

This thesis presents the design and development of a human chewing simulator for using in dental experiments. Chewing simulator is designed to simulate the gnash of a pair of teeth. The simulator is able to simulate the movement of the lower teeth of human chewing path using a four bar linkage mechanism. The testing speed of the chewing simulator is adjustable according to the chewing frequency of 1 to 1.9 Hz. The chewing force is controlled by dead weights at the maximum load of 500 N. The chewing path can be adjusted between human chewing path and vertical linear path. The impact force generated during the gnash of the teeth can be measured using a load cell and recorded on the data acquisition system. The number of chewing cycles can be counted using a mechanical counter. According to the verification of the chewing simulator, the mechanism properly operated according to the design parameters with a minimum chewing force of 70 N. The chewing path of the simulator is also verified and found to be well compared with the designed path. In dental experiment, the chewing simulator is equipped with a 3-mm-diameter tungsten carbide indenter on the upper fixture, while a tooth specimen is fixed on the bottom fixture. The samples tested with human chewing path showed an apparent growth of cracks compared to those tested with vertical linear path. With tests on filled teeth with a higher load, a total of four specimens were fractured after 241, 577, 5,081 and 2,073 cycles, respectively. On the other hand, specimens which were tested with vertical linear path can sustain cyclic loading of more than 100,000 cycles. These results demonstrated the importance of using chewing simulator with human chewing path in dental experiments.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่เป็นผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาในขั้นตอนการดำเนินการจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามจุดประสงค์ นอกจากนี้ยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและการดำเนินชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่ และเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ กรรมการ และศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ กรรมการภายนอก ที่กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภิน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์สำหรับวิทยานิพนธ์นี้

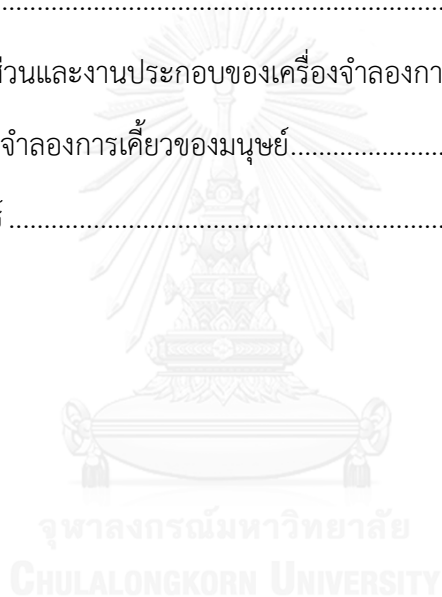
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	5
2.1 พฤติกรรมของการเคี้ยวและแรงที่เกิดขึ้นในขณะเคี้ยว	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบวัสดุ และเครื่องทดสอบทางทันตกรรม	8
2.2.1 วิธีการทดสอบโดยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine).....	8
2.2.2 วิธีการทดสอบโดยเครื่อง Willytec chewing machine.....	9
2.2.3 วิธีการทดสอบโดยหุ่นยนต์จำลองการเคี้ยว	11
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานและการออกแบบ.....	13
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	13
3.1.1 กลไกข้อต่อ 4 ชั้น (four-bar linkage mechanism)	13
3.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ (material properties).....	16

3.1.3 การวิเคราะห์ความเค้น (stress analysis)	17
3.2 แนวคิดและคุณลักษณะของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์	23
3.2.1 วิธีการเคี้ยว (chewing path)	23
3.2.2 แรงเคี้ยวและการวัดแรง	24
3.3 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง	24
3.3.1 การออกแบบชุดกลไกข้อต่อ 4 ชั้น	28
3.3.2 การออกแบบชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนัก	38
3.3.3 การออกแบบชุดจับยึดชิ้นงาน	39
บทที่ 4 การสอบทวนชุดทดลอง	41
4.1 ชุดทดลอง	41
4.2 การทดสอบการทำงานเบื้องต้นของชุดทดลอง	43
4.3 การสอบทวนชุดทดลอง	46
4.3.1 การสอบทวนวิธีการเคี้ยว	46
4.3.2 การสอบทวนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว	48
4.3.3 การทดสอบการขบเคี้ยวของฟันหรือชิ้นงานทดสอบ	58
4.4 สรุปผลการสอบทวนชุดทดลอง	59
บทที่ 5 การทดลองทางพันธุกรรม	60
5.1 การเตรียมการทดลอง	61
5.2 การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยใช้สปีดเปอร์ยต์ตรวจสอบรอยแตกร้าว	64
5.2.1 การทดลองชิ้นงานฟันที่ไม่มีการอุด	65
5.2.2 การทดลองชิ้นงานฟันที่มีการอุด	75
5.3 การทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก	78
5.3.1 การทดลองการขบเคี้ยว	78

5.3.2 การทดลองการกระแทกแนวตั้ง	82
5.3 สรุปผลการทดลอง	86
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	90
6.1 สรุป	90
6.2 ข้อจำกัดของชุดทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	92
รายการอ้างอิง	94
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก แบบชิ้นส่วนและงานประกอบของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์.....	96
ภาคผนวก ข รูปเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์.....	144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	152



สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ตารางการปรับค่าความถี่การเคี้ยว	45
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเทียบชุดฐานรองค้ำน้ำหนักและค้ำน้ำหนัก	48
ตารางที่ 4.3 แรงเคี้ยวที่วัดได้ที่ความถี่การเคี้ยว 1 เฮิร์ตซ์ และที่แรงเคี้ยวควบคุม 6.8 – 14.8 กิโลกรัม.....	53
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดแรงเคี้ยวที่แรงเคี้ยวควบคุม 9.8 กิโลกรัม (96.14 นิวตัน) ที่ความถี่ การเคี้ยว 0.1 – 1.9 เฮิร์ตซ์.....	57
ตารางที่ 5.1 แรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 1 และ 2 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดย การใช้สปีดสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	69
ตารางที่ 5.2 การเสียหายของชิ้นงานที่ 4 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีด สเปรย์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง.....	72
ตารางที่ 5.3 แรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 3 และ 4 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดย การใช้สปีดสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง	75
ตารางที่ 5.4 การเสียหายของชิ้นงานที่ 5 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีด สเปรย์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว.....	77
ตารางที่ 5.5 แรงเคี้ยวที่วัดได้สำหรับการทดลองชิ้นงานที่มีการอุดของการทดลองการเสียหาย ของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	82
ตารางที่ 5.6 แรงเคี้ยวที่วัดได้สำหรับการทดลองชิ้นงานที่มีการอุดของการทดลองการเสียหาย ของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง	86

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1	การเคลื่อนไหวของขากรรไกรล่างขณะเคี้ยวแบบขบเน้นและแบบบด [2].....	5
รูปที่ 2.2	วิธีการเคี้ยว (เส้นทึบเป็นการเคี้ยวอาหารแข็ง เส้นประเป็นการเคี้ยวอาหารอ่อน) [3].....	6
รูปที่ 2.3	การแบ่งช่วงวิธีการเคี้ยวเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงอ้าปาก ช่วงหุบปาก และช่วงที่ฟันขบกัน [5].....	7
รูปที่ 2.4	การทดสอบความเสียหายจากความล้าของทันตวัสดุของ Kim, J. H. et al. [11].....	9
รูปที่ 2.5	Willytec chewing machine [15]	10
รูปที่ 2.6	การทดสอบแบบ IVOCLAR [1].....	10
รูปที่ 3.1	กลไกข้อต่อ 4 ชั้น.....	14
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างกลไกข้อต่อ 4 ชั้น แต่ละประเภท [22]	15
รูปที่ 3.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [23]	16
รูปที่ 3.4	เพลารับแรงดึง	18
รูปที่ 3.5	เพลารับแรงบิด	19
รูปที่ 3.6	คานรับความเค้นดัด	20
รูปที่ 3.7	ระบบความเค้น 2 มิติ	20
รูปที่ 3.8	ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลรับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน	21
รูปที่ 3.9	ขอบเขตความเค้นผสมที่ปลอดภัยภายใต้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	23
รูปที่ 3.10	วิธีการเคี้ยวเมื่อฐานของข้อต่อยาว 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร.....	24
รูปที่ 3.11	กลไกการทำงานของเครื่องจำลองการเคี้ยว.....	25
รูปที่ 3.12	เครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์	27
รูปที่ 3.13	ชุดกลไกข้อต่อ 4 ชั้น.....	29
รูปที่ 3.14	ภาพขยายชุดกลไกข้อต่อส่วนที่รับแรงในการเคี้ยว	30
รูปที่ 3.15	แผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ของ Link 3	31
รูปที่ 3.16	แผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ของ Link 2	33

รูปที่ 3.17	แผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ของ Link 1	34
รูปที่ 3.18	แรงที่กระทำต่อเพลตามของชุดกลไก	38
รูปที่ 3.19	ชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนัก	39
รูปที่ 4.1	แผนผังการเตรียมเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์สำหรับการทดสอบ	42
รูปที่ 4.2	แสดงชิ้นส่วนของกลไกที่มีข้อบกพร่อง	43
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กับความถี่การเคี้ยว	44
รูปที่ 4.4	การพล็อตตำแหน่งวิธีการเคี้ยวจากการถ่ายวิดีโอ	47
รูปที่ 4.5	วิธีการเคี้ยวของชุดทดลองเปรียบเทียบกับวิธีการเคี้ยวจากการออกแบบ	47
รูปที่ 4.6	การควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนัก	49
รูปที่ 4.7	ชิ้นงานเหล็กทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบ	49
รูปที่ 4.8	หัวกดชิ้นงาน	50
รูปที่ 4.9	การติดตั้งชิ้นงานทดสอบและหัวกดชิ้นงานของชุดทดลอง	51
รูปที่ 4.10	ผลการสอบทวนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว 6.8-14.8 kg ความถี่การเคี้ยว 1 Hz	52
รูปที่ 4.11	ผลการสอบทวนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว 9.8 kg ความถี่การเคี้ยว 0.1-1.9 Hz	55
รูปที่ 4.12	ชิ้นงานฟันกรามของมนุษย์ที่หล่อติดกับเรซิน	58
รูปที่ 4.13	ผลการทดสอบการขบกันของฟัน	59
รูปที่ 5.1	ชิ้นงานฟันกรามของมนุษย์ที่ใช้ในการทดลอง	61
รูปที่ 5.2	ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างที่มีความลาดชัน 10°	62
รูปที่ 5.3	การจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงาน (ฟันกราม) และหัวกดชิ้นงาน	65
รูปที่ 5.4	การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานสำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	67
รูปที่ 5.5	การเสียหายของชิ้นงานที่ 1 (629 รอบการเคี้ยว) ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	67

รูปที่ 5.6 การเสียหายของชิ้นงานที่ 2 (357 รอบการเคี้ยว) ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์เซ็นต์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว.....	68
รูปที่ 5.7 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 1 และ 2 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์เซ็นต์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	68
รูปที่ 5.8 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานสำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง	71
รูปที่ 5.9 การเสียหายของชิ้นงานที่ 3 (30,229 รอบการเคี้ยว) ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์เซ็นต์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง	71
รูปที่ 5.10 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 3 และ 4 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์เซ็นต์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง	74
รูปที่ 5.11 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงาน สำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	75
รูปที่ 5.12 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 5 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์เซ็นต์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	76
รูปที่ 5.13 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานพื้นที่มีการอุด สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว.....	79
รูปที่ 5.14 การแตกหักของชิ้นงานในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว.....	79
รูปที่ 5.15 แรงเคี้ยวของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว	80
รูปที่ 5.16 การจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงานและหัวกดชิ้นงาน สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง	83

รูปที่ 5.17 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานพื้นที่มีการอุด สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง.....	83
รูปที่ 5.18 การเสียหายของชิ้นงานในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง.....	84
รูปที่ 5.19 แรงเคี้ยวของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง.....	84
รูปที่ 5.20 ตัวอย่างการแตกหักของพื้นที่มีการอุดจากการทดลองกดพื้นด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ [34, 35].....	88
รูปที่ ข.1 เครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์.....	148
รูปที่ ข.2 Top set.....	149
รูปที่ ข.3 Linkage set.....	149
รูปที่ ข.4 ชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน.....	150
รูปที่ ข.5 การจับยึดหัวกดชิ้นงานบนชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน.....	150
รูปที่ ข.6 การจับยึดชิ้นงานทดสอบบนชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน.....	151
รูปที่ ข.7 Load cell ขนาด 1 กิโลนิวตัน วัดแรงในแกนเดียว ยี่ห้อ Kyowa.....	151
รูปที่ ข.8 ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง.....	152
รูปที่ ข.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 0.2 กิโลวัตต์.....	152
รูปที่ ข.10 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Yaskawa รุ่น J1000.....	153
รูปที่ ข.11 Data acquisition สำหรับ Load cell ยี่ห้อ Kyowa รุ่น PCD-300A.....	153
รูปที่ ข.12 อุปกรณ์นับจำนวนรอบการเคี้ยว.....	154
รูปที่ ข.13 ตุ่มน้ำหนักขนาดต่าง ๆ.....	154

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ_y	คือ ความแข็งแรงดึงคราก
σ_u	คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุด
E	คือ โมดูลัสของยังส์
G	คือ โมดูลัสเฉือน
τ	คือ ความเค้นเฉือน
σ	คือ ความเค้นตั้งฉาก
ε	คือ ความเครียดตั้งฉาก
ΔL	คือ ระยะยืดของชิ้นงาน
T	คือ โมเมนต์บิด
r	คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางของเพลลาถึงตำแหน่งที่ต้องการหาความเค้น
J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมุมของหน้าตัดเพลลา
d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา
M	คือ โมเมนต์ดัด
σ_b	คือ ความเค้นดัด
I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมุมของพื้นที่หน้าตัดของคาน
y	คือ ระยะจากแกนสะเทินของคาน
c	คือ ระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวนอกสุดของคาน
σ_n	คือ ความเค้นตั้งฉากกับหน้าตัดของเอลิเมนต์
τ_n	คือ ความเค้นเฉือนขนานกับหน้าตัดของเอลิเมนต์
σ_1, σ_2	คือ ความเค้นตั้งฉากกับหน้าตัดของเอลิเมนต์
$\tau_{max-in-plane}$	คือ ความเค้นเฉือนในระนาบสูงสุด
$\tau_{max-abs}$	คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดสัมบูรณ์
τ_{max}	คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุ
N	คือ ค่าความปลอดภัย
F_P	คือ แรงที่กระทำต่อชุดกลไกข้อต่อ 4 ชิ้น
T_L	คือ แรงบิดสำหรับขับเคลื่อนชุดกลไก

T_M	คือ แรงบิดของมอเตอร์
η	คือ ประสิทธิภาพของชุดเฟืองทด
i	คือ อัตราทด
P	คือ กำลังมอเตอร์
ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
f	คือ ความถี่ของรอบการหมุนของมอเตอร์
τ_a	คือ ความเค้นเฉือนที่ยอมให้เกิดขึ้นในวัสดุที่ใช้ทำเพลลา
σ_B	คือ ความแข็งแรงดึงของวัสดุที่ใช้ทำเพลลา
Sf_1	คือ อัตราความปลอดภัยที่รวมเอาผลของขนาดและวัสดุที่เป็นเหล็กผสม
Sf_2	คือ อัตราความปลอดภัยสำหรับเพลลาที่มีร่องลิ้นหรือบ่า



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ฟันเป็นอวัยวะที่สำคัญอย่างหนึ่งของมนุษย์ ฟันมีส่วนที่เป็นรากฟันยึดอยู่กับขากรรไกร และมีส่วนที่เชื่อมต่อกับเส้นประสาทรับความรู้สึกที่โพรงประสาทฟัน นอกจากฟันจะทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหารแล้ว ฟันยังเป็นอวัยวะที่มีความสำคัญต่อบุคลิกภาพและช่วยให้มนุษย์สามารถออกเสียงพูดได้ อย่างเป็นที่ เป็น หากฟันเกิดความเสียหายก็จะทำให้ผู้ป่วยเกิดความรู้สึกเจ็บปวดและส่งผลกระทบต่อ การดำเนินชีวิตประจำวันได้ ฟันที่เสียหายไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้จึงต้องพึ่งพาการบูรณะฟัน (dental restoration) จากทันตแพทย์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในฟันอาจมีได้หลายรูปแบบ ดังนั้น ทันตแพทย์ต้องมีวิธีการรักษาที่หลากหลายและในบางกรณีอาจจำเป็นต้องรักษาด้วยวิธีการที่ต้องใช้ ทันตวัสดุ (Dental materials) ใหม่ ๆ แต่วิธีการรักษาเหล่านี้จำเป็นต้องได้รับการพิสูจน์ก่อนว่า สามารถให้ผลการรักษาที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานเพียงพอ สำหรับ การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการรักษานั้น ๆ อาจทำได้โดยการทดลองในคนไข้โดยตรงที่เรียกว่า การศึกษาทางคลินิก การทดลองในสัตว์ทดลอง การจำลองเชิงเลขเช่นการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) และการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ความเสียหายของฟันที่พบบ่อยคือความเสียหายจากการแตกหัก (fracture) และการสึกหรอ (wear) เนื่องจากภาวะการรับแรงจากการใช้งานซ้ำ ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งเกิดจากการบดเคี้ยว ภายในช่องปากที่มีการกระทบกันระหว่างฟันกับฟันหรือระหว่างฟันกับอาหาร ดังนั้นคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอของทันตวัสดุมีความสำคัญอย่างมากต่ออายุการใช้งานของฟันที่ได้รับการบูรณะ ทันตวัสดุแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ โลหะผสม, เซรามิก, อะมัลกัม, วัสดุเชิงประกอบ (composite materials) และพอลิเมอร์ [1] การเก็บข้อมูลอายุการใช้งานของทันตวัสดุเหล่านี้โดย การศึกษาทางคลินิกต้องใช้เวลานานอย่างน้อย 5 ปี มีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยากลำบากในการควบคุมตัวแปรในการทดลองต่าง ๆ การศึกษาด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น การทดลองในสัตว์ทดลองก็มีข้อจำกัดในเรื่อง พฤติกรรมการเคี้ยวและลักษณะของฟันที่แตกต่างกับของมนุษย์ การจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ก็มีความยากลำบากในการกำหนดตัวแปรและเงื่อนไขต่าง ๆ ให้มีความแม่นยำสมจริง ทำให้ผลที่ออกมาอาจคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้มาก

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การศึกษาโดยทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้ชุดทดลองที่ จำลองการเคี้ยวของมนุษย์เป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาปัญหาทางทันตกรรมที่น่าจะให้ผลที่ น่าเชื่อถือและใช้เวลาในการทดลองไม่นาน ข้อมูลจากการทดลองด้วยเครื่องจำลองการเคี้ยวในอดีต

ประเมินว่าการทดสอบการสีกหรือด้วยเครื่องจำลองการเคี้ยว 240,000 – 250,000 รอบ จะมีค่าเทียบเท่ากับการสีกหรือจากอายุการใช้งานจริง 1 ปีในทางคลินิก ดังนั้นการทดสอบการสีกหรือเทียบเท่ากับอายุการใช้งาน 5 ปี จะต้องทดสอบด้วยเครื่องจำลองการเคี้ยวประมาณ 1,200,000 รอบ ซึ่งหากทดลองด้วยความเร็วรอบในการเคี้ยวที่ 2 เฮิร์ตซ์ หรือ 172,800 รอบต่อวัน จะใช้เวลาทดลองประมาณ 7 วัน ซึ่งรวดเร็วกว่ามาก ดังนั้นการศึกษาพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวที่ถอดแบบมาจากพฤติกรรมการเคี้ยวของมนุษย์และปัจจัยแวดล้อมที่คล้ายกันจึงมีความจำเป็นเพื่อช่วยลดระยะเวลาการทดลองและลดค่าใช้จ่ายลงได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษา ออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์โดยจำลองการบดเคี้ยวของฟันกรามระหว่างฟันซี่บนและซี่ล่างจำนวน 1 คู่ ให้ใกล้เคียงกับการเคี้ยวจริงในช่องปากของมนุษย์มากที่สุด เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการทดสอบทางทันตกรรมแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบดเคี้ยวของฟันเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือและนำไปประเมินอายุการใช้งานของทันตวัสดุหรือผลหลังจากการรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทดลองในห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องใช้เครื่องทดสอบหรือวิธีการทดสอบที่สามารถก่อให้เกิดสภาพความเสียหายของฟันคล้ายกับที่เกิดขึ้นในทางคลินิกเพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นการทดลองในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้ใน 2 แนวทาง แนวทางแรกคือพัฒนาเครื่องทดสอบให้จำลองการเคี้ยวให้ใกล้เคียงกับการเคี้ยวของมนุษย์ ส่วนแนวทางที่สองคือปรับปรุงวิธีการทดลองโดยใช้สมมติฐานต่าง ๆ มาปรับใช้กับการทดลอง เช่น ทิศทางและขนาดของแรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ ความถี่หรือจำนวนรอบของการทดสอบ และสภาพแวดล้อมที่เสมือนจริง เป็นต้น ในปัจจุบันแนวทางที่ใช้ในห้องปฏิบัติการส่วนมากจะนิยมใช้การทดสอบแบบแนวทางที่สอง วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นลงไปในการพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวโดยเน้นให้มีการกระแทกหรือการขบกันของฟันอย่างสมจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์สำหรับใช้ในการทดลองทางทันตกรรม
2. สอบทวนเครื่องจำลองการเคี้ยวที่ออกแบบและสร้างโดยเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกับข้อมูลความเสียหายของฟันที่เกิดขึ้นจริงทางคลินิกหรือข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในอดีต
3. เปรียบเทียบผลการทดสอบการขบกันระหว่างหัวกดชิ้นงานและฟัน 1 ซี่ ด้วยเครื่องจำลองการเคี้ยว โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบที่มีวิธีการเคี้ยวเป็นลักษณะการกระแทก

แนวตั้งกับกรณีที่วิธีการเคี้ยวเป็นลักษณะการขบเคี้ยวเพื่อยืนยันความแตกต่างของการเสียหายของฟันที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ศึกษาพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อใช้สำหรับการทดสอบทางทันตกรรม โดยสร้างเครื่องจำลองการเคี้ยวที่จำลองการขบกันของฟัน 1 คู่ และทดสอบเปรียบเทียบความเสียหายของฟันที่ทดสอบกับลักษณะความเสียหายจริงของฟันในทางคลินิก การสอบทวนตัวเครื่องที่ออกแบบและสร้างว่าสามารถให้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำระดับใด และสามารถนำไปใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ คุณลักษณะของเครื่องจำลองการเคี้ยวในวิทยานิพนธ์นี้คือสามารถจำลองการเคลื่อนที่ของฟันตามแนวการเคลื่อนที่ของฟันล่างที่ได้จากการศึกษาในอดีตและสามารถปรับเปลี่ยนให้สามารถทดลองการกระแทกของฟันที่ไม่มีลักษณะของการขบเคี้ยวหรือการกระแทกแนวตั้งได้ เครื่องจำลองการเคี้ยวนี้จะต้องสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการทดสอบได้ระหว่าง 1 – 2 เฮิร์ตซ์ มีการควบคุมแรงในการเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนักที่สามารถให้แรงเคี้ยวได้สูงสุด 500 นิวตัน มีอุปกรณ์วัดแรงเช่น โหลดเซลล์ขนาด 1 กิโลนิวตัน กลไกขับเคลื่อนด้วยชุดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีกำลังเพียงพอในการขับเคลื่อนชุดทดลอง

1.4 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหา 6 บทและภาคผนวก 2 บท โดยมีลำดับเนื้อหาและรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญ ที่มาของปัญหา ขอบเขต และจุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์รวมทั้งเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับปริทัศน์วรรณกรรม ซึ่งกล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการศึกษาของวิทยานิพนธ์ การศึกษาจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การศึกษากลไกการเคี้ยวและแรงที่เกิดขึ้นในการเคี้ยว และการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบวัสดุและเครื่องทดสอบทางทันตกรรม

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับแนวคิดและคุณลักษณะของเครื่องจำลองการเคี้ยว รวมถึงการออกแบบและการสร้างชุดทดลอง

บทที่ 4 จะเป็นการนำชุดทดลองที่สร้างเสร็จในบทที่แล้วมาสอบทวนการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะที่ได้ออกแบบไว้ และนำข้อบกพร่องที่พบมาเป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงการทำงานของชุดทดลองต่อไป

บทที่ 5 จะเป็นการนำชุดทดลองมาใช้ในการทดลองทางพันธุกรรม ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นพันธุกรรมของมนุษย์ซึ่งมี 2 แบบ ได้แก่ พันที่ไม่มีการถอดพัน และพันที่มีการถอดพัน โดยการทดลองจะใช้วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง และการขบเคี้ยว

บทที่ 6 นำเสนอข้อสรุปของวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์จะเป็นภาคผนวก ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก แสดงแบบของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ ประกอบด้วยแบบประกอบของเครื่อง (assembly drawing) และแบบของชิ้นส่วน (part drawing) ต่าง ๆ โดยละเอียด และภาคผนวก ข แสดงรูปของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์



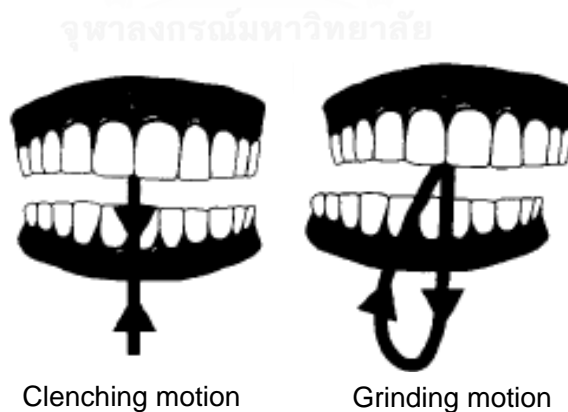
บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวเพื่อใช้ในการทดลองทางทันตกรรม ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั่วโลก สภาพแวดล้อมและแรงที่เกิดขึ้นในการเคี้ยวเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการเคี้ยวของมนุษย์ และงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการทดสอบและเครื่องทดสอบที่มีการพัฒนามาแล้ว เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการประดิษฐ์เครื่องจำลองการเคี้ยวสำหรับใช้ทดสอบทางทันตกรรมและวิธีการทดสอบที่เหมาะสม

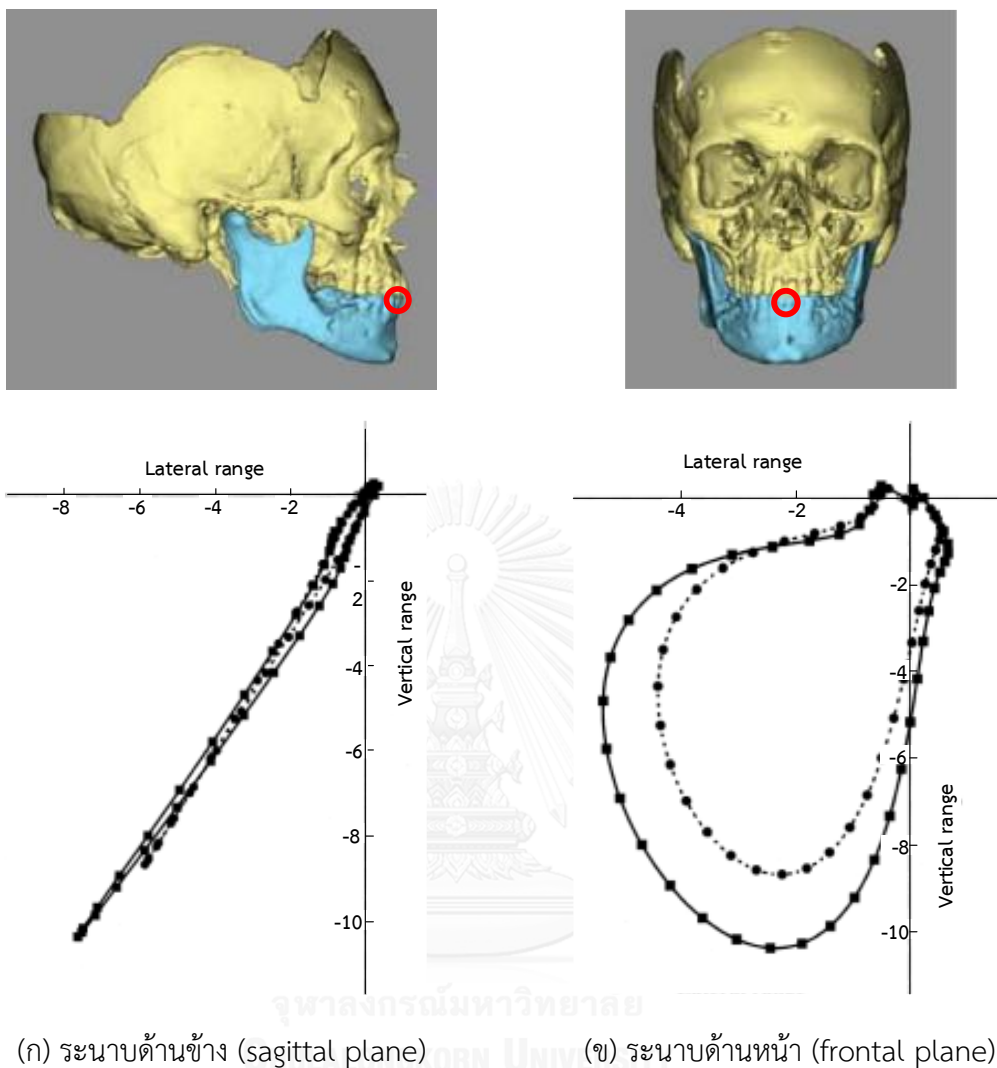
2.1 พฤติกรรมของการเคี้ยวและแรงที่เกิดขึ้นในขณะเคี้ยว

พฤติกรรมของการเคี้ยวเกิดจากการเคลื่อนที่ของขากรรไกรมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง การเคลื่อนที่ของขากรรไกรตามปกติคือขากรรไกรล่างเคลื่อนที่ไปขบกับขากรรไกรบนที่อยู่นิ่ง การเคลื่อนไหวของขากรรไกรล่างขณะเคี้ยวทำให้เกิดทิศทางการขบกันของฟัน 2 รูปแบบควบคู่กันไปคือการขบแน่น (clenching) เพื่อกัดฉีกเนื้ออาหาร และการบด (grinding) เพื่อเคี้ยวอาหารให้ละเอียด [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พื้นหน้าของขากรรไกรล่างเป็นจุดอ้างอิงของวิถีการเคี้ยว (chewing path) โดยวิถีการเคี้ยวคือเส้นทางการเคลื่อนที่ของขากรรไกรล่างขณะทำการเคี้ยว



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนไหวของขากรรไกรล่างขณะเคี้ยวแบบขบแน่นและแบบบด [2]

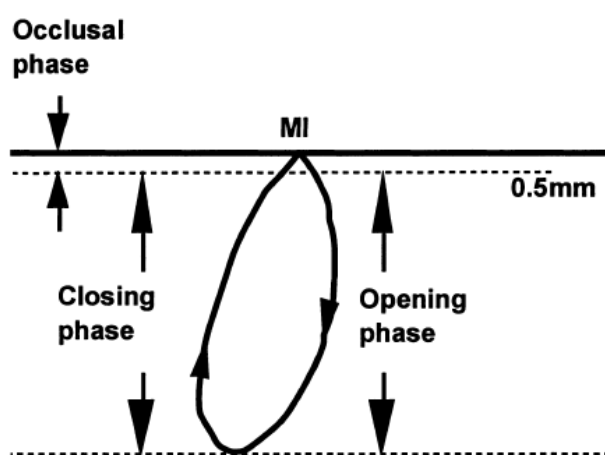
วิถีการเคี้ยวดังกล่าวมีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Anderson, K. et al [3] งานวิจัยดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมการเคี้ยวของมนุษย์เมื่อเคี้ยวอาหารที่มีความแข็งแตกต่างกัน พบว่าเส้นวิถีการเคี้ยว 3 มิติ เป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วิธีการเคี้ยว (เส้นทึบเป็นการเคี้ยวอาหารแข็ง เส้นประเป็นการเคี้ยวอาหารอ่อน) [3]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าวิธีการเคี้ยวขึ้นอยู่กับความแข็งของอาหารที่เคี้ยว เมื่อเคี้ยวอาหารที่อ่อนนุ่มกว่า วิธีการเคี้ยวก็จะแคบกว่าการเคี้ยวอาหารที่แข็งกว่า และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการเคี้ยวระหว่างระนาบด้านข้าง (sagittal plane) กับระนาบด้านหน้า (frontal plane) พบว่าวิธีการเคี้ยวในระนาบด้านข้างจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงหรือมีลักษณะการขบตรง ๆ ในขณะที่ระนาบด้านหน้าจะเป็นแบบการขบและบดไปพร้อมกัน ซึ่งวิธีการเคี้ยวดังกล่าวสอดคล้องกับผลการประเมินผลการรักษาทางคลินิกที่ศึกษาวิธีการเคี้ยวในกรณีเป็นผู้ป่วยที่มีอาการแตกหักของขากรรไกรล่างข้างใดข้างหนึ่งเปรียบเทียบกับคนปกติ [4]

ลักษณะการเคลื่อนที่ของขากรรไกรล่างขณะเคี้ยวแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่หนึ่งคือช่วง
 อ้าปาก (opening phase), ช่วงที่สองคือช่วงหุบปาก (closing phase) และช่วงที่สามคือช่วงที่ฟันขบ
 กัน (occlusion phase) และกำหนดให้ช่วงที่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการขบกันของฟัน เป็นช่วงระยะ 0.5
 มิลลิเมตรในแนวตั้ง นับจากจุดที่มีการสบกันของฟันฟันซี่บนและฟันซี่ล่างเต็มที่ (maximum
 intercuspation) หรือตำแหน่ง MI ในรูปที่ 2.3 เมื่อมองจากระนาบด้านหน้า [5, 6]



รูปที่ 2.3 การแบ่งช่วงวิถีการเคี้ยวเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงอ้าปาก ช่วงหุบปาก และช่วงที่ฟันขบกัน [5]

การศึกษาเกี่ยวกับแรงในการเคี้ยวส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบหาแรงกัดสูงสุด ส่วนการศึกษา
 แรงเคี้ยวในวัฏจักรเคี้ยวนั้นมีผลการทดสอบไม่มากนัก Homewood, C. I. [7] แสดงผลการวัดแรง
 การเคี้ยวของฟันกรามขากรรไกรล่างด้วยสเตรนเกจ (strain gages) พบว่าแรงที่เกิดขึ้นที่ฟันหนึ่งซี่อยู่
 ระหว่าง 70.6 นิวตัน และ 140 นิวตัน ขณะเคี้ยวเนื้อ ขนมปังกรอบ หรือแครอท แรงเคี้ยวนี้มีขนาดไม่
 มากนักเมื่อเทียบกับแรงที่ระบบปากและขากรรไกร (stomatognathic system) สามารถทำได้โดย
 จะสังเกตได้จากผลการวัดแรงกัดสูงสุดของฟันกรามซี่ที่ 1 (first molar) ซึ่งวัดได้ 880 นิวตัน ขณะที่
 Helkimo, E. et al. [8] วัดค่าเฉลี่ยของแรงกัดสูงสุดได้ 45.3 กิโลกรัม (444 นิวตัน) สำหรับเพศชาย
 และ 36.4 กิโลกรัม (357 นิวตัน) สำหรับเพศหญิง

แรงที่เกิดขึ้นในการเคี้ยวยังขึ้นอยู่กับความแข็งของอาหารที่เคี้ยวด้วย Kohyama, K. et al.
 [9] ศึกษาแรงที่ใช้ในการเคี้ยวที่มีความแข็งแตกต่างกัน 3 ชนิด โดยทดสอบวัดแรงเคี้ยวที่ฟันกราม
 และฟันหน้า ผลคือ วัดแรงเคี้ยวได้สูงสุดเมื่อเคี้ยวที่มีความแข็งสูงสุด ซึ่งเป็นไปตามข้อสรุปที่ว่า
 เมคาโนรีเซพเตอร์ (mechanoreceptors) หรือหน่วยรับความรู้สึกในเอ็นยึดปริทันต์ (periodontal
 ligament) ที่อยู่ใต้ฟันรับรู้ความแข็งของวัตถุที่ฟันเคี้ยวและส่งสัญญาณไปยังกล้ามเนื้อส่วนที่ออกแรง

ชากรรไกร แรงเคี้ยวเฉลี่ยของการเคี้ยวข้างทั้ง 3 ชนิดที่วัดได้คือ 127.2 นิวตัน สำหรับฟันกราม และ 36.8 นิวตัน สำหรับฟันหน้า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบวัสดุ และเครื่องทดสอบทางทันตกรรม

ในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องสำหรับใช้ทดสอบวัสดุทางทันตกรรมในห้องปฏิบัติการ (laboratory test) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือต้องการจำลองสภาวะการทดสอบที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะในช่องปากของมนุษย์มากที่สุด เพื่อให้เกิดผลการทดสอบที่มีความคล้ายคลึงกับที่เกิดขึ้นในทางคลินิก เนื่องจากหากผลการทดสอบทางห้องปฏิบัติการมีความแตกต่างกับผลที่เกิดขึ้นจริงในทางคลินิก ข้อมูลดังกล่าวอาจนำไปสู่การรักษาที่ผิดพลาดได้ [10] เส้นใยที่จำเป็นสำหรับการทดสอบทางห้องปฏิบัติการได้แก่ พื้นที่สัมผัสระหว่างแท่งหัวกดกับชิ้นงานทดสอบ, การจับยึดฟันต้องสัมพันธ์กับลักษณะการยึดในทางคลินิก, แรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบกระทำเป็นวัฏจักร (cyclic loading) โดยแรงกระทำต่อฟันมีลักษณะเป็นแรงกระทำแกว่งและแรงเฉือน และความเปียกชื้น (น้ำลาย)

2.2.1 วิธีการทดสอบโดยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine)

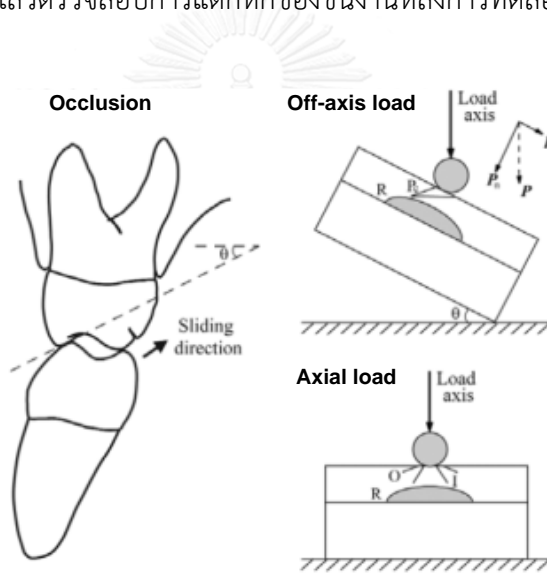
การวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบทันตวัสดุจำนวนมากมีการประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ มาใช้ทดสอบ โดยปรับเปลี่ยนวิธีการจับยึดชิ้นงานทดสอบ หัวกดที่ใช้กดส่งแรงผิวชิ้นงาน หรือเพิ่มเส้นใยสภาวะแวดล้อมในการทดสอบ

Kim, J. H. et al. [11] ทดสอบความเสียหายจากความล้า (fatigue test) ของทันตวัสดุโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Hertzian indentation fatigue test [12] อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ หัวกดที่ใช้มีส่วนหัวทรงกลมทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในการทดสอบจะวางชิ้นงานทดสอบที่เป็นชิ้นสี่เหลี่ยมให้มุมเอียง θ เท่ากับ 30° ดังรูปที่ 2.4 เพื่อให้เกิดแรงเฉือนจากการไถลของหัวกด ดังนั้นลักษณะการทดสอบที่เกิดขึ้นคือแท่งกดเลื่อนลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานในแนวตั้งและออกแรงกดค้างไว้ 0.35 วินาที หัวกดจะเลื่อนไถลตามระนาบที่เอียงของผิวชิ้นงานเป็นระยะประมาณ 0.5 มิลลิเมตร แล้วยกขึ้น นับเป็นหนึ่งรอบ โดยวิธีการนี้เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ มาใช้ในการทดสอบความล้าทันตวัสดุโดยปรับการจัดวางชิ้นงานทดสอบให้เกิดแรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบสอดคล้องกับแรงที่เกิดขึ้นจากการเคี้ยว แรงกดที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 50 – 510 นิวตัน

Stawarczyk, B. et al. [13] ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์เพื่อทดสอบการแตกหักเช่นเดียวกัน โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นฟันเทียมที่ส่วนเคลือบฟันทำจากวัสดุเซรามิกแบบต่าง ๆ ชิ้นงานทดสอบวางทำมุม 45° และใช้หัวกดเป็นแผ่นราบกดด้วยแรง 49 นิวตัน กระทำเป็นวัฏจักร

จำนวน 1.2 ล้านรอบด้วยความถี่ 1.7 เฮิร์ตซ์ ในน้ำ และมีการควบคุมอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 5°C กับ 50°C ทุก ๆ 120 วินาที การทดสอบวิธีนี้เรียกว่า Zurich method (ZURICH) [1]

Zahran, M. et al. [14] ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ในการทดสอบการแตกหักของทันตวัสดุประเภทเซรามิกที่ขึ้นรูปเป็นตัวฟันแล้วสวมกับรากฟันเทียมแล้วยึดติดชิ้นงานทดสอบกับเรซิน นำไปจับยึดกับตัวจับยึดชิ้นงานในอ่างน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเพื่อจำลองผลของ Hydrolytic effect ของน้ำลายต่อวัสดุเซรามิก ใช้หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม จัดให้กดลงบริเวณตำแหน่งร่องของฟัน (fossa) แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกทำการทดลองกดจนชิ้นงานทดสอบแตกหักด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในขณะที่กลุ่มที่สองใช้การกดเป็นวัฏจักร โดยใช้แรงกดแนวตั้งอยู่ระหว่าง 50 – 600 นิวตัน กระทำ 500,000 รอบด้วยความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ แล้วตรวจสอบการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

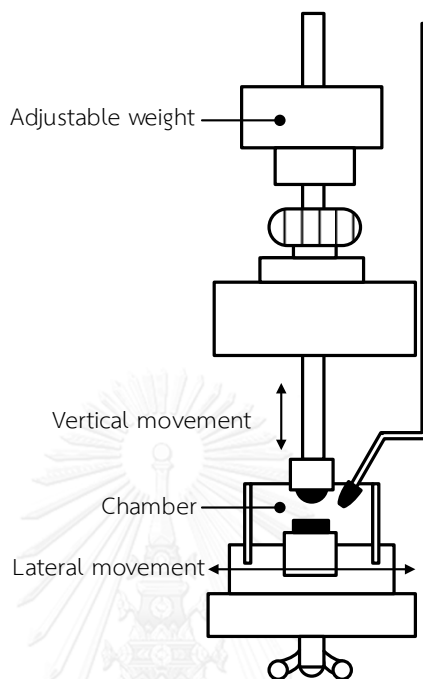


รูปที่ 2.4 การทดสอบความเสียหายจากความล้าของทันตวัสดุของ Kim, J. H. et al. [11]

2.2.2 วิธีการทดสอบโดยเครื่อง Willytec chewing machine

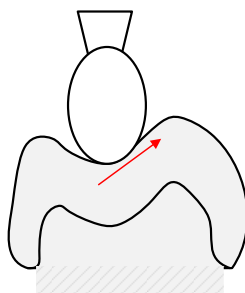
เครื่องทดสอบ Willytec [15] เป็นเครื่องสำหรับใช้ทดสอบทันตวัสดุโดยเฉพาะที่มีขายในเชิงพาณิชย์ มีหลักการทำงาน คือ เป็นเครื่องที่มีการเคลื่อนไหวใน 2 แกน คือ แนวตั้งและแนวนอน แต่ละแกนควบคุมโดย Step motor ตัวเครื่องมีก้านหัวกดที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระแทกกับผิวชิ้นงานในแนวตั้งโดยใช้ก้อนน้ำหนักรในการควบคุมแรงกดซึ่งสามารถปรับแรงกดได้ตามก้อนน้ำหนักที่ใช้ ส่วนความเร็วในการกดกระแทกชิ้นงานถูกควบคุมด้วย Step motor เช่นกัน สามารถเปลี่ยนขนาดรูปทรง และวัสดุของหัวกดได้ ตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบจะอยู่ในห้อง (chamber) ที่ทำหน้าที่รองรับน้ำกลั่นที่ปล่อยเข้าออกขณะทำการทดสอบ และการควบคุมอุณหภูมิจะกระทำอยู่ภายในห้องดังกล่าวนี้

ชุดจับยึดชิ้นงานทดสอบทั้งหมดตั้งอยู่บนฐานที่สามารถเลื่อนไปมาในแนวนอนที่ควบคุมด้วย Step motor เพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบในลักษณะเฉือน ลักษณะเครื่องเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Willytec chewing machine [15]

Heintze, S. D. et al. [16] ทดสอบการแตกหักของฟันกรามเทียมที่ใช้ทันตวัสดุประเภทเซรามิกสองชนิด ได้แก่ IPS Empress และ IPS e.max Press โดยใช้เครื่อง Willytec chewing simulator ทดสอบด้วยความถี่ 0.8 เฮิรตซ์ (Hz) จำนวน 100,000 รอบ และควบคุมอุณหภูมิของภาวะทดสอบให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเนื่องระหว่าง 5°C และ 55°C วิธีการทดสอบแบบนี้เรียกว่า Ivoclar Vivadent method (IVOCLAR) [1]



รูปที่ 2.6 การทดสอบแบบ IVOCLAR [1]

การทดสอบด้วยวิธี Munich method (MUNICH) [1] มีการทดสอบโดยรวมคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบ IVOCLAR แตกต่างกันที่การทดสอบแบบ MUNICH จะใช้หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุอลูมิเนียมออกไซด์ กดชิ้นงานตลอดเวลาด้วยแรงกด 50 นิวตันโดยไม่มีการยกหัวกดขึ้น ชิ้นงานทดสอบมีการเลื่อนในแนวนอนเป็นระยะทาง 8 มิลลิเมตร การเลื่อนไป-กลับหนึ่งครั้งนับเป็นหนึ่งรอบ ทำการทดสอบ 10,000 รอบ, 30,000 รอบ 50,000 รอบ ขณะทำการทดลองชิ้นงานทดสอบถูกแช่ล้างด้วยน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 37°C ตลอดเวลา

2.2.3 วิธีการทดสอบโดยหุ่นยนต์จำลองการเคี้ยว

หุ่นยนต์จำลองการเคี้ยว (robotic chewing simulator) [17, 18] มีหลักการทำงานคือ ขากรรไกรล่างสามารถเคลื่อนไหวเลียนแบบการพฤติกรรมเคี้ยวของมนุษย์โดยประยุกต์ใช้ Stewart platform [19] ซึ่งเป็นแท่นที่สามารถเคลื่อนไหวได้ 6 องศาอิสระ (degree of freedom) ประกอบด้วยกระบอกสูบ (actuator) 6 ชุดควบคุมการเคลื่อนไหวของแท่น โดยแท่นนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นขากรรไกรล่างของมนุษย์ หุ่นยนต์จำลองการเคี้ยวนี้จึงสามารถเคี้ยวได้แบบ 3 มิติ คือสามารถเคี้ยวในระนาบด้านหน้าและระนาบด้านข้างควบคู่กันไปได้

นอกเหนือจากงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบทันตวัสดุโดยตรงแล้ว ยังมีการพัฒนาเครื่องทดลองหรือหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเคี้ยวใกล้เคียงกับมนุษย์เพื่อวัตถุประสงค์อื่น เช่น การฟื้นฟูความผิดปกติของข้อขมับและขากรรไกรล่าง (temporomandibular joint disorders) และการใช้ทดสอบลักษณะของเนื้ออาหารหลังการเคี้ยว เป็นต้น งานวิจัยเหล่านี้ที่น่าสนใจในส่วนของกลไกที่ใช้ทำให้เกิดการเคี้ยวที่ใกล้เคียงกับการเคี้ยวของมนุษย์ ที่อาจสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการประดิษฐ์เครื่องทดสอบวัสดุทันตกรรมประดิษฐ์ได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างงานวิจัยหนึ่งที่ที่น่าสนใจเป็นของ Xu, W. L. et al. [20] ที่พัฒนากลไกการเคี้ยวให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมเคี้ยวของมนุษย์ทั้งในเรื่องของการเคลื่อนที่และแรงที่กระทำ โดยใช้กลไกที่ประกอบด้วยข้อต่อ 4 ชิ้น (four bar linkage mechanism) เป็นพื้นฐาน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะใกล้เคียงขากรรไกรล่างขณะเคี้ยว เมื่อมองจากด้านหน้า โดยมีพื้นหน้าเป็นจุดอ้างอิงหรือมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปที่ 2.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อทดสอบชิ้นอาหารก่อนและหลังการเคี้ยว ข้อดีของกลไกนี้คือไม่ซับซ้อน ใช้งานง่ายเนื่องจากใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนเพียงตัวเดียว และไม่ต้องมีระบบควบคุมที่ซับซ้อน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้มีการพัฒนาเพิ่มเติมการเคลื่อนไหวของขากรรไกรล่างในระนาบด้านข้างเพื่อใช้สำหรับเครื่องช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ที่มีความผิดปกติของข้อขมับและขากรรไกรล่าง [21] แต่งานวิจัยทั้งสองล้วนแล้วแต่มีการเคลื่อนไหวของขากรรไกรล่างในระนาบใดระนาบหนึ่งเท่านั้น ยังไม่ได้มีการรวมการเคลื่อนไหวของทั้งสองระนาบเข้าด้วยกัน

การทดสอบด้วยวิธีที่ได้กล่าวไปข้างต้นมีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบแตกต่างกันไป การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ มีข้อดีคือเครื่องทดสอบมีมาตรฐาน การควบคุมแรงและการวัดแรงสามารถทำได้โดยง่ายและมีความแม่นยำ เชื่อถือได้ แต่มีข้อจำกัดในการทดสอบทางทันตกรรมคือทิศทางของแรงหรือการกระทำที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบไม่เหมือนกับที่เกิดขึ้นในการเคี้ยวของมนุษย์ เมื่อพิจารณาถึงการทดลองโดยใช้เครื่อง Willytec ซึ่งเป็นเครื่องที่มีขายในเชิงพาณิชย์ก็เป็นเครื่องที่มีราคาแพง ถึงแม้ว่าการทดลองโดยใช้เครื่องนี้จะพัฒนาให้เหมาะสมกับการทดสอบทางทันตกรรมมากกว่าการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ แต่ยังเป็นเพียงการจำลองการบดเคี้ยวของฟันอย่างง่ายเท่านั้น กล่าวคือการประมาณช่วงการบดเคี้ยวของฟันเป็นการกระทำในแนวตั้งตรง ๆ และการเลื่อนไกลไปตามผิวของฟันเท่านั้น ในส่วนของหุ่นยนต์จำลองการเคี้ยวมีความสมบูรณ์ในแง่ของการสร้างวิธีการเคี้ยวได้ครบใน 3 มิติ แต่เป็นเครื่องที่มีระบบที่ซับซ้อน ทั้งกลไกและการควบคุม นอกจากนี้การควบคุมให้เกิดวิธีการเคี้ยวตามต้องการและการควบคุมแรงในการเคี้ยวให้เป็นไปตามค่าที่แม่นยำก็ทำได้ยาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกที่จะประยุกต์ใช้กลไกข้อต่อ เป็นกลไกที่ก่อให้เกิดวิธีการเคี้ยวที่ใกล้เคียงกับการเคี้ยวของมนุษย์ มีความซับซ้อนน้อย ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน การควบคุมแรงในการเคี้ยวใช้แนวคิดการควบคุมแรงแบบเครื่อง Willytec คือการถ่วงตุ้มน้ำหนักเพื่อให้ได้แรงกดตามต้องการ การทำงานของเครื่องนี้คือยังเป็นการจำลองการเคี้ยว 2 มิติ ในระนาบด้านหน้าเท่านั้น เหตุที่เลือกใช้กลไกจำลองการเคี้ยวในระนาบด้านหน้าเพราะวิธีการเคี้ยวในแนวนี้ประกอบด้วยการขบและการบดกันของฟัน ในขณะที่วิธีการเคี้ยวของระนาบด้านข้างเป็นการขบหรือการกระทำของฟันในแนวเฉียงเป็นหลัก มีการบดกันของฟันน้อยมาก (พิจารณาจากรูปที่ 2.2 (ก))

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานและการออกแบบ

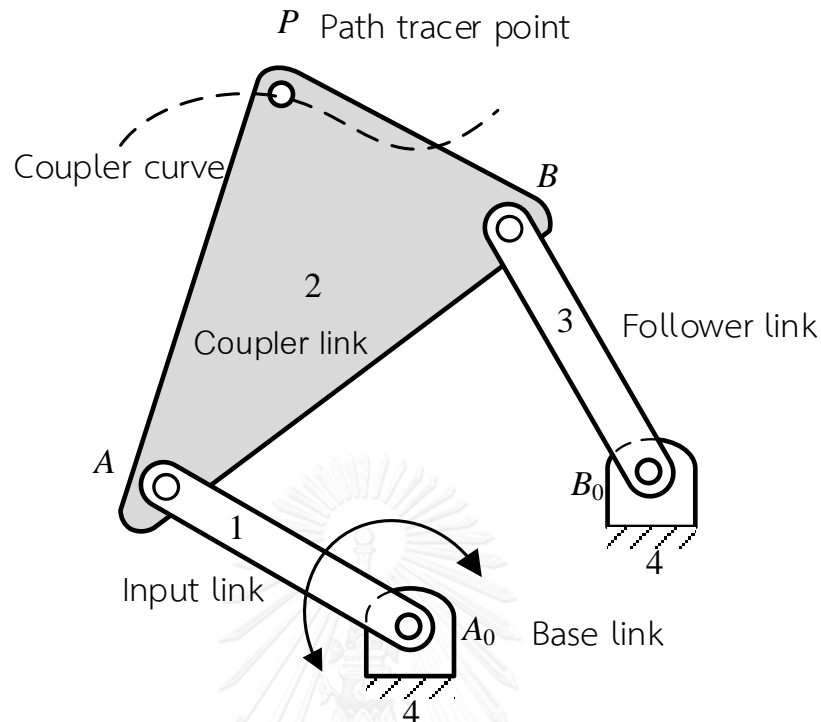
บทที่แล้วได้กล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และวิธีการทดสอบทางทันตกรรม ในบทนี้นำเอาแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ในการออกแบบเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์และทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมที่จำเป็นสำหรับการออกแบบกลไกข้อต่อ 4 ชั้น ที่เป็นหัวใจสำคัญของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ ถัดมาจะกล่าวถึงแนวคิดและคุณลักษณะของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ที่สร้างขึ้นพร้อมทั้งข้อกำหนดในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบวิธีการเคี้ยว การกำหนดแรงในการเคี้ยวที่เหมาะสมรวมถึงวิธีการควบคุมแรงวัดแรงเคี้ยว และการกำหนดสภาพแวดล้อมในการทดลอง หัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบทั้งหมดโดยใช้หลักการวิเคราะห์และข้อกำหนดการออกแบบที่ได้กล่าวถึงในส่วนต้น โดยรายละเอียดในการออกแบบประกอบด้วย โครงสร้างโดยรวมของกลไกและหลักการทำงานของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ การคำนวณด้านความแข็งแรงของกลไกข้อต่อ 4 ชั้น เพื่อให้สามารถรับภาระได้ตามข้อกำหนดการออกแบบและการเลือกใช้มอเตอร์ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนกลไกข้อต่อ 4 ชั้น รวมทั้งรายละเอียดที่สำคัญของการออกแบบ

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่กล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ หัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการออกแบบโดยจะกล่าวถึง กลไกข้อต่อ 4 ชั้น ที่นำมาใช้ในการสร้างวิธีการเคี้ยวที่ต้องการเพื่อให้เข้าใจถึงคุณสมบัติและจุดเด่นของกลไก รวมทั้งตัวอย่างการใช้งานของกลไกนี้ในงานอื่น ๆ ถัดมาจะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุซึ่งมีความสำคัญในการใช้ประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุและการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมมาใช้ในการออกแบบ ในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความเค้นบนชิ้นส่วนทางกลประเภทต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบ

3.1.1 กลไกข้อต่อ 4 ชั้น (four-bar linkage mechanism)

จากงานวิจัยในอดีตที่กล่าวถึงในบทที่ 2 วิทยานิพนธ์นี้จะจำลองวิธีการเคี้ยวโดยใช้กลไกข้อต่อ 4 ชั้น [22] กลไกดังกล่าวเป็นกลไกที่สามารถจำลองวิธีการเคี้ยวของมนุษย์ได้อย่างใกล้เคียง โดยกลไกชนิดนี้เป็นกลไกข้อต่อแบบวงปิด (closed loop) ที่เรียบง่ายที่สุด กลไกข้อต่อ 4 ชั้นโดยทั่วไปมีลักษณะดังรูปที่ 3.1



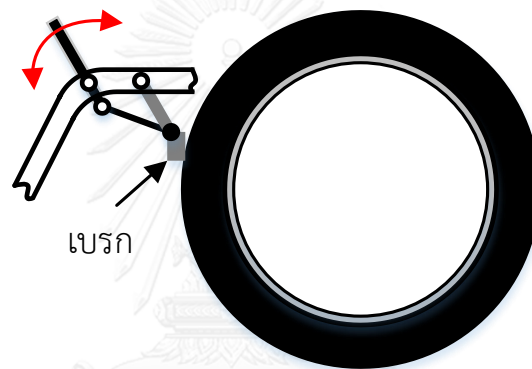
รูปที่ 3.1 กลไกข้อต่อ 4 ชั้น

ชุดกลไกประกอบด้วยชั้นข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่ 3 ชั้น และฐานข้อต่อ (base link) ซึ่งเป็นชั้นข้อต่อที่อยู่หนึ่งอีก 1 ชั้น รวมทั้งหมดเป็น 4 ชั้นด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่ทั้งสาม ได้แก่ ชั้นข้อต่อหมายเลข 1, ชั้นข้อต่อหมายเลข 2 และชั้นข้อต่อหมายเลข 3 ชั้นข้อต่อหมายเลข 1 และชั้นข้อต่อหมายเลข 3 เป็นข้อต่อที่มีปลายด้านหนึ่งติดอยู่กับฐานข้อต่อ โดยชั้นข้อต่อหมายเลข 1 เป็นข้อต่อที่ต่อเข้ากับระบบส่งกำลัง ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ ชั้นข้อต่อหมายเลข 1 เรียกว่า ข้อต่อรับกำลังเข้า (input link, A_0A) ข้อต่อนี้มีปลายด้านหนึ่งติดกับฐานและอาจมีรูปร่างเป็นแท่ง (bar) หรือจาน (disk) เพื่อใช้งานเป็นข้อเหวี่ยง (crank) ก็ได้แล้วแต่ลักษณะการใช้งาน ชั้นข้อต่อหมายเลข 3 เรียกว่า ข้อต่อตัวตาม (follower, B_0B) ชั้นข้อต่อสุดท้ายคือข้อต่อหมายเลข 2 เรียกว่า ข้อต่อตัวคู่ต่อ (coupler) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่ระหว่างข้อต่อรับกำลังเข้าและข้อต่อตัวตามดังกล่าวมาข้างต้น จุด P (path tracer point) บนข้อต่อตัวคู่ต่อจะเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง เส้นโค้งดังกล่าวเรียกว่า Coupler curve ซึ่งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามขนาดความยาวของข้อต่อแต่ละชั้นและรูปร่างของตัวคู่ต่อ กลไกข้อต่อ 4 ชั้น ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยสามารถแบ่งออกตามการใช้งานได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

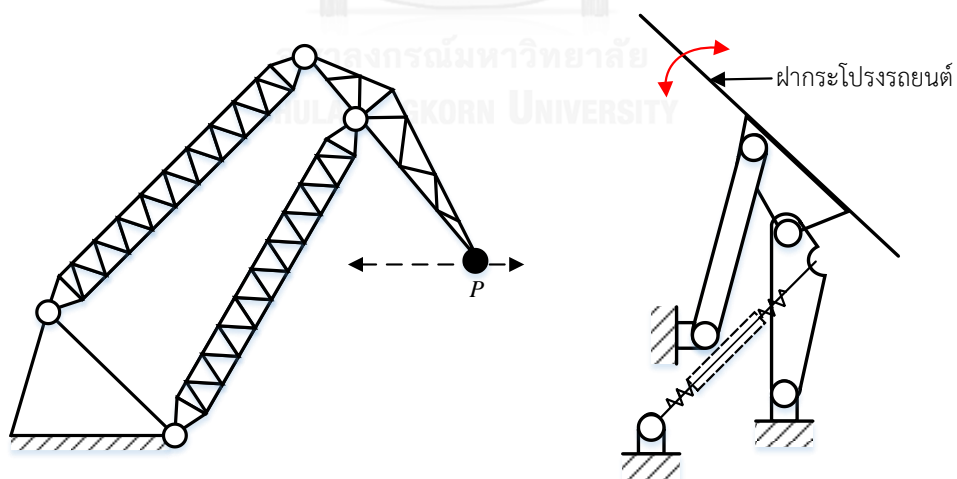
ประเภทที่ 1 Function generation กลไกข้อต่อ 4 ชั้น ประเภทนี้สนใจการเคลื่อนที่สัมผัสหรือแรงสัมผัสของชิ้นข้อต่อเทียบกับฐานโดยที่ไม่สนใจวิถีการเคลื่อนที่ ณ จุด P ของตัวคู่ต่อ ตัวอย่างการใช้งานกลไกชนิดนี้ ได้แก่ กลไกเบรกของรถเข็นผู้พิการ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก)

ประเภทที่ 2 Path generation กลไกประเภทนี้สนใจเฉพาะวิถีการเคลื่อนที่ ณ จุด P ของตัวคู่ต่อเท่านั้น และไม่สนใจการเคลื่อนที่ส่วนอื่น ๆ ตัวอย่างการใช้งานกลไกชนิดนี้ ได้แก่ ปั่นจั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข)

ประเภทที่ 3 Motion generation กลไกประเภทนี้สนใจทั้งวิถีการเคลื่อนที่ของจุด P ของตัวคู่ต่อและลักษณะการเคลื่อนที่ทั้งหมดของตัวคู่ต่อทั้งชิ้น ตัวอย่างการใช้งานกลไกชนิดนี้ ได้แก่ กลไกข้อพับของฝากระโปรงรถยนต์ ดังรูปที่ 3.2 (ค)



(ก) Function generation



(ข) Path generation

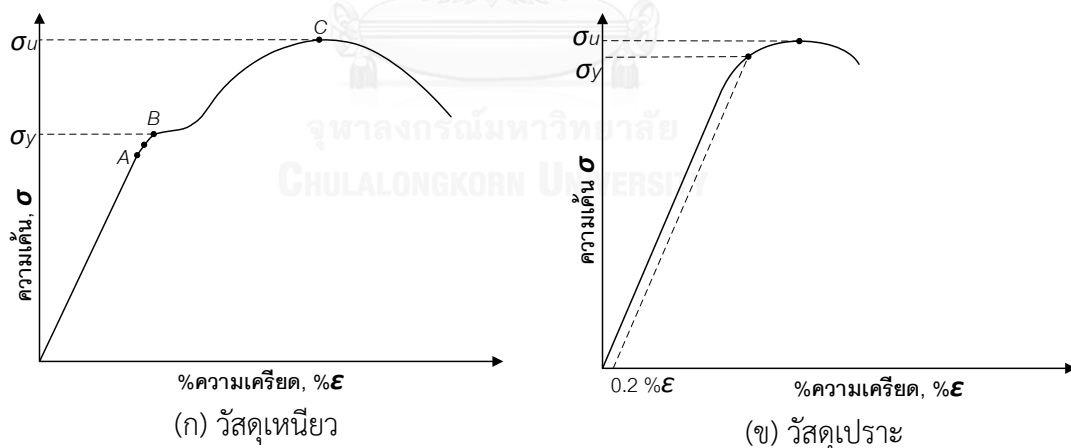
(ค) Motion generation

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกลไกข้อต่อ 4 ชั้น แต่ละประเภท [22]

ตัวอย่างอีกตัวอย่างของการใช้งานกลไกข้อต่อ 4 ชั้น ที่น่าสนใจคือ กลไกลูกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งก็จัดเป็นกลไกข้อต่อ 4 ชั้น อีกรูปแบบหนึ่งเช่นกัน โดยการเปลี่ยนชั้นข้อต่อตัวตามเป็นลูกสูบที่เคลื่อนที่เลื่อนในกระบอกสูบ สำหรับการออกแบบเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์จะประยุกต์ใช้กลไกข้อต่อ 4 ชั้นประเภทที่ 2 Path generation ในการสร้างวิถีการเคี้ยวของมนุษย์โดยการปรับเปลี่ยนขนาดความยาวของ A_0A , B_0B , A_0B_0 , AB และ BP รวมทั้งมุม ABP ให้มีความเหมาะสม ซึ่งขนาดความยาวและมุมองศาเหล่านี้มีความสัมพันธ์ระหว่างกันกันที่จะทำให้จุด P มีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นวิถีการเคี้ยวตามที่ต้องการ สำหรับรายละเอียดของขนาดความยาวของข้อต่อ มุมองศา และการควบคุมการเคลื่อนที่ของกลไกจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไป

3.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ (material properties)

คุณสมบัติของวัสดุ [23] เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบเพื่อใช้วิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ การพิจารณาคุณสมบัติทางกลของวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเลือกวัสดุที่เหมาะสมมาใช้งาน รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) จากการทดสอบที่รับภาระดึงของวัสดุ



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [23]

รูปที่ 3.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้มาจากการดึงวัสดุในแนวแกน (axial) วัสดุที่ใช้ทดสอบมี 2 ประเภท คือ วัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ ซึ่งทั้งสองวัสดุจะมีลักษณะของกราฟที่ต่างกัน จากรูปที่ 3.3 (ก) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว จะสังเกตเห็นมีจุดที่สำคัญบนกราฟหลายจุด ได้แก่ ความแข็งแรงดึงคราก

σ_y (yield strength) เป็นจุดสุดท้ายก่อนที่ชิ้นงานจะเกิดการครากหรือก่อนการที่ชิ้นงานจะยืดออกมากโดยที่ออกแรงเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อย ความเค้นที่จุดนี้มักจะใช้เป็นความแข็งแรงของวัสดุสำหรับการออกแบบโดยทั่วไป, ความต้านทานแรงดึงสูงสุด σ_u (ultimate tensile strength) หรือความแข็งแรงดึง (tensile strength) เป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้, ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit) ที่จุด A เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ค่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด โดยอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดที่กราฟเป็นเส้นตรงนี้เรียกว่า โมดูลัสของยังส์ (Young's modulus, E) หรือโมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และบริเวณระหว่างจุด A กับจุด B คือขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) เป็นจุดสุดท้ายที่ชิ้นงานยังสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อคลายแรงดึงออก วัสดุบางชนิดไม่ปรากฏจุดครากที่ชัดเจน เช่น เหล็กผสมชุบแข็ง เหล็กหล่อ อลูมิเนียม หรือวัสดุประเภทอื่น ๆ ประเภท เป็นต้น วัสดุเหล่านี้สามารถใช้ความเค้นที่จุดยืดถาวรหรือความเค้นพิสูจน์ (proof strength) แทนจุดครากได้ โดยการลากเส้นตรงจากจุดความเครียด 0.2% ขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟไปตัดกับเส้นกราฟด้านบนดังรูปที่ 3.3 (ข) นอกจากนี้ยังมีการทดสอบชิ้นงานโดยใช้แรงเฉือนก็จะทำให้ได้กราฟลักษณะเดียวกับการทดสอบแรงดึงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) และความเครียดเฉือน (shear strain) โดยอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนที่กราฟเป็นเส้นตรงเรียกว่า โมดูลัสเฉือน (shear modulus, G) หรือโมดูลัสความแข็งแรง (modulus of rigidity)

3.1.3 การวิเคราะห์ความเค้น (stress analysis)

การวิเคราะห์ความเค้น [23, 24] ที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องจักร การเคี้ยวของมนุษย์ประกอบด้วย ความเค้นดึงหรือความเค้นกดในแนวแกน ความเค้นดัด และความเค้นเฉือนจากแรงบิด การออกแบบชุดกลไกข้อต่อ 4 ชิ้น จะต้องใช้การวิเคราะห์ความเค้นดังกล่าวในการคำนวณความแข็งแรงของเพลลาของชุดกลไกข้อต่อดังจะได้อธิบายต่อไป

ความเค้นและความเครียดอย่างง่าย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงพื้นฐานของความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่รับแรงในแนวแกน โดยจะกล่าวถึงความเค้นตั้งฉาก σ (normal stress) และความเครียดตั้งฉาก ϵ (strain) ในวัสดุ เมื่อรับแรงดังรูปที่ 3.4 โดยความเค้นตั้งฉาก σ ได้แก่ ความเค้นดึง หรือความเค้นกดที่เกิดเนื่องจากแรงตั้งฉากในแนวแกน สามารถคำนวณได้จากแรงภายในซึ่งมีค่าเท่ากับแรงกระทำจากภายนอก F ที่กระทำต่อชิ้นงานหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน A ความเค้นตั้งฉากสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 3.1$$

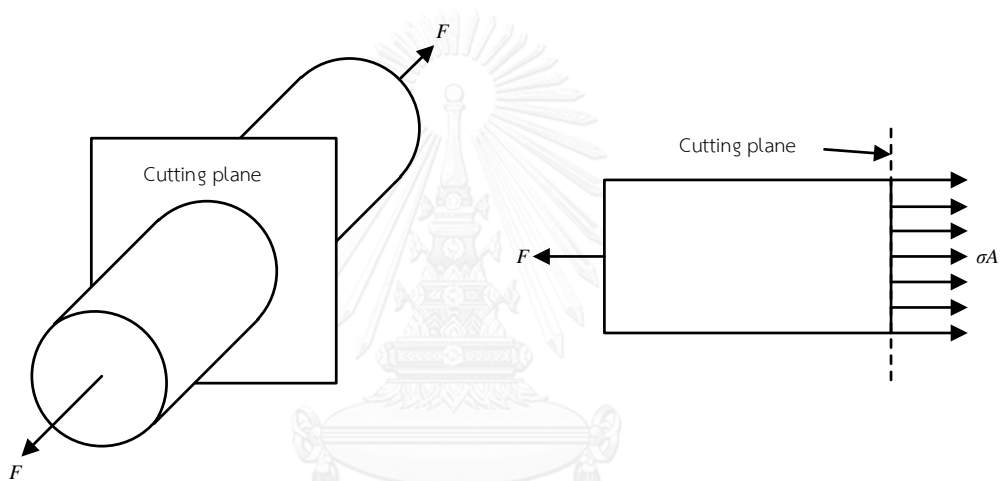
เมื่อวัสดุถูกดึงด้วยแรงดึง F จะทำให้วัสดุยืดตัวออกจากเดิม นั่นคือวัสดุเกิดความเครียดตั้งฉาก ε โดยความเครียด คือ ค่าอัตราส่วนของระยะยืดของชิ้นงาน ΔL เมื่อให้แรงดึงเทียบกับความยาวของชิ้นงานก่อนให้แรงดึง L สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad 3.2$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับชิ้นงานที่รับแรงในแนวแกนสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = E\varepsilon \quad 3.3$$

สมการ 3.1-3.3 เป็นสมการพื้นฐานในการหาความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนทางกลอย่างง่าย



(ก) เพลารับแรงดึง

(ข) ภาพตัดแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุ

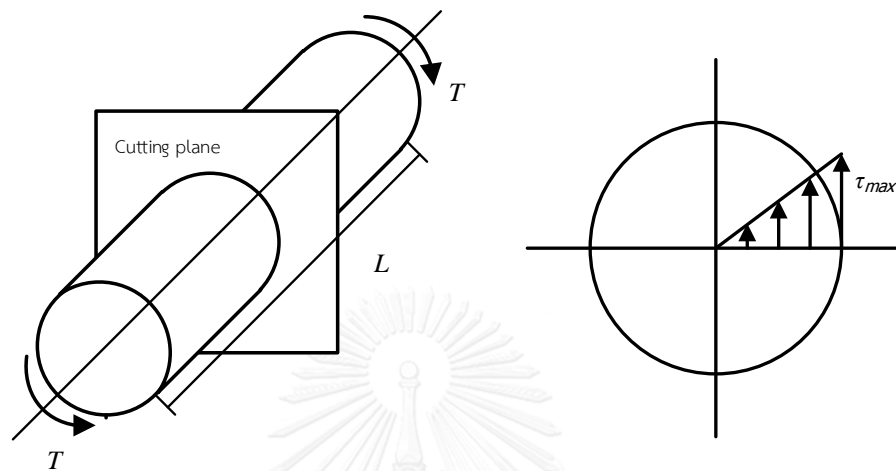
รูปที่ 3.4 เพลารับแรงดึง

ความเค้นเฉือนจากการบิด (torsional shear stress)

ในการออกแบบเพลาชงชุดกลไกข้อต่อ 4 ชั้น จะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานเป็นสำคัญ เพลาที่ทำหน้าที่เป็นเพลาชงของชุดกลไกจะต้องรับแรงบิดจากแหล่งส่งกำลัง ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ เป็นต้น แรงบิดดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้นเฉือนในวัสดุดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพลาหน้าตัดทรงกลมที่รับโมเมนต์บิด T จะเกิดความเค้นเฉือนจากการบิด τ ขึ้นที่หน้าตัดของเพลาดังสมการต่อไปนี้

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad 3.4$$

โดยที่ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมุมของหน้าตัดของเพลลา (polar moment of inertia) มีค่าเท่ากับ $\frac{\pi d^4}{32}$ โดย d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา และ r คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางเพลลาถึงตำแหน่งที่ต้องการหาความเค้น ความเค้นเฉือนจะมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านนอกสุดของเพลลา ($r = d/2$)



(ก) เพลารับแรงบิด

(ข) ภาพตัดแสดงความเค้นเฉือนที่

เกิดขึ้นในวัสดุ

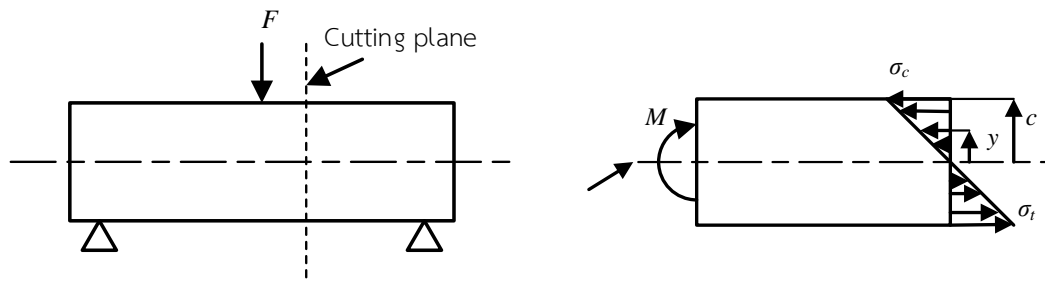
รูปที่ 3.5 เพลารับแรงบิด

คานรับความเค้นดัด (beam under bending stress)

ในการออกแบบเพลลาของชุดกลไกข้อต่อ 4 ขึ้น นอกจากความเค้นเฉือนจากแรงบิดที่กระทำต่อเพลลาแล้ว ยังมีความเค้นดัดที่เกิดเนื่องจากภาระที่กระทำกับเพลลาในแนวขวางดังแสดงในรูปที่ 3.6 แรงดั่งกล่าว ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด M (bending moment) ที่หน้าตัดต่าง ๆ โมเมนต์ดัดดังกล่าวเป็นโมเมนต์ดัดภายในจะทำให้เกิดความเค้นดัด σ_b (bending stress) และการโก่ง (deflection) ความเค้นดัดคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_b = \frac{My}{I} \quad 3.5$$

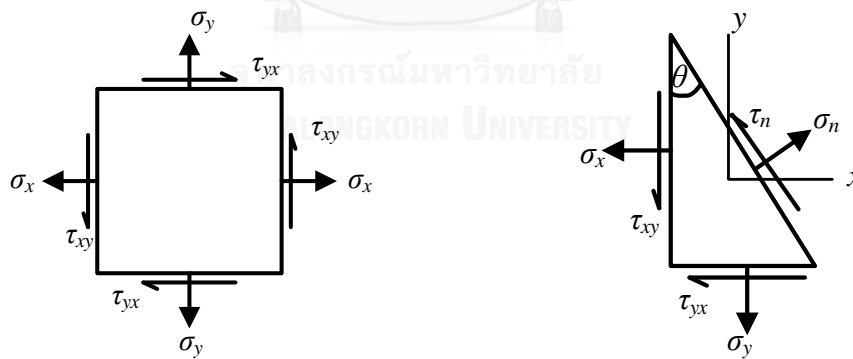
โดยที่ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด และ y คือระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ในกรณีนี้ ความเค้นดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของคานหรือที่ตำแหน่ง $y = c$ โดยที่ c คือระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวนอกสุด



(ก) คานวางตัวแนวระดับรับแรงกดในแนวขวาง (ข) ภาพตัดแสดงความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในวัสดุ
รูปที่ 3.6 คานรับความเค้นดัด

ความเค้นผสมและทฤษฎีความเสียหาย

ในการทำงานจริง ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลอาจเกิดความเค้นหลายชนิดพร้อม ๆ กัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการรวมความเค้นต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ความเค้นรวมที่เกิดจากภาระหลายประเภทเรียกว่าความเค้นผสม (combined stress) โดยปกติแม้ว่าชิ้นงานและความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจะเป็น 3 มิติ แต่เนื่องจากชิ้นงานส่วนใหญ่มักมีความยาวด้านหนึ่งน้อยกว่าอีกสองด้านมากและความเค้นที่เกิดขึ้นมักเป็นความเค้นระนาบ (plane stress) ดังนั้นการวิเคราะห์ความเค้นผสมสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมสามารถสมมุติให้เป็นการวิเคราะห์ความเค้นใน 2 มิติได้ รูปที่ 3.7 แสดงเอลิเมนต์ความเค้นในกรณีที่มีความเค้นระนาบ จะเห็นว่าความเค้น σ_x , τ_{xz} และ τ_{yz} มีค่าเป็นศูนย์ทั้ง 3 ค่า



(ก) ความเค้น 2 มิติของวัสดุสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ข) ความเค้น 2 มิติเมื่อหมุนแนวแกนเป็นมุม θ
รูปที่ 3.7 ระบบความเค้น 2 มิติ

จากเอลิเมนต์ความเค้นในรูปที่ 3.7 หากตัดเอลิเมนต์ดังกล่าวในแนว θ จะเกิดความเค้น σ_n ตั้งฉากกับหน้าตัด และความเค้นเฉือน τ_n ขนานกับหน้าตัดที่ตัดขึ้น ความเค้นทั้งสองมีค่าเป็นดังนี้

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \tag{3.6}$$

$$\tau_n = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \tag{3.7}$$

ความเค้นตั้งฉากที่มีค่าสูงสุดและน้อยสุด (σ_1 และ σ_2) เรียกว่าความเค้นหลัก (principal stresses) มุม θ ที่เกิดความเค้นหลักหาได้จากการหาค่าอนุพันธ์ของ σ_n เทียบกับ θ ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้สมการความเค้นหลักดังนี้

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad 3.8$$

ในทำนองเดียวกันความเค้นเฉือนในระนาบสูงสุด $\tau_{max-in-plane}$ มีค่าดังนี้

$$\tau_{max-in-plane} = \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad 3.9$$

ความเค้นเฉือนสูงสุดสัมบูรณ์ $\tau_{max-abs}$ สามารถหาได้จากความเค้นตั้งฉากสูงสุดและต่ำสุด สำหรับความเค้นระนาบในกรณีนี้ ความเค้นหลักค่าหนึ่ง คือ ความเค้นในแนวแกน z ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ความเค้นเฉือนสูงสุดสัมบูรณ์หาได้จาก

$$\tau_{max-abs} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad 3.10$$

กรณี σ_1 เป็นบวก, σ_2 เป็นลบ จะได้ $\sigma_{max} = \sigma_1$ และ $\sigma_{min} = \sigma_2$ ทำให้ได้

$$\tau_{max-abs} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad 3.11 \text{ (ก)}$$

กรณี σ_1 และ σ_2 เป็นบวก และ $\sigma_1 > \sigma_2$ จะได้ $\sigma_{max} = \sigma_1$ และ $\sigma_{min} = 0$ ทำให้ได้

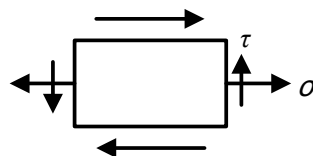
$$\tau_{max-abs} = \frac{\sigma_1}{2} \quad 3.11 \text{ (ข)}$$

กรณี σ_1 และ σ_2 เป็นลบ และ $\sigma_2 < \sigma_1$ จะได้ $\sigma_{max} = 0$ และ $\sigma_{min} = \sigma_2$ ทำให้ได้

$$\tau_{max-abs} = \frac{\sigma_2}{2} \quad 3.11 \text{ (ค)}$$

ความเค้นในชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมักจะถูกประกอบด้วยความเค้นตั้งฉาก σ และความเค้นเฉือน τ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทำให้สมการ 3.9 ลดรูปเป็นดังนี้

$$\tau_{max} = \left[\left(\frac{\sigma}{2} \right)^2 + \tau^2 \right]^{1/2} \quad 3.12$$



รูปที่ 3.8 ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลรับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน

อย่างไรก็ตาม การทำนายความเสียหายของวัสดุที่รับความเค้นหลายชนิดเป็นเรื่องที่ยากลำบาก การคำนวณหาความเค้นผสมดังที่กล่าวมาข้างต้นก็ยังไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นงานเพราะยังไม่สามารถบ่งบอกถึงสาเหตุที่ชิ้นงานจะเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาออกแบบโดยใช้ทฤษฎีความเสียหาย (failure theory) ทฤษฎีความเสียหายมีอยู่หลายทฤษฎีด้วยกัน โดยมีทฤษฎี 3 ทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับและนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ ทฤษฎีความเค้นตั้งฉากสูงสุด (maximum normal stress theory) ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress theory) และทฤษฎีพลังงานการเสียรูป (distortion energy theory) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด เนื่องจากเป็นทฤษฎีที่นิยมใช้และง่ายในการประยุกต์ใช้งาน ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดเหมาะที่จะใช้กับวัสดุไอโซทรอปิกที่เสียหายด้วยแรงดึงครากหรือแตกหักแบบวัสดุเหนียว ทฤษฎีนี้อธิบายว่าวัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับความต้านแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุ จากกลศาสตร์วัสดุพบว่าความต้านแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุมีค่าเท่ากับ $\sigma_{yield}/2$ บนระนาบเอียง 45° กับแนวแรงดึงวัสดุ กล่าวคือ จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด วัสดุจะเริ่มเกิดความเสียหายเมื่อ τ_{max} ในสมการ 3.11 (ก) มีค่าเท่ากับ $\sigma_{yield}/2$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \frac{\sigma_{yield}}{2N} \quad 3.13$$

เมื่อ N คือ ค่าความปลอดภัย (safety factor) และสมการสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

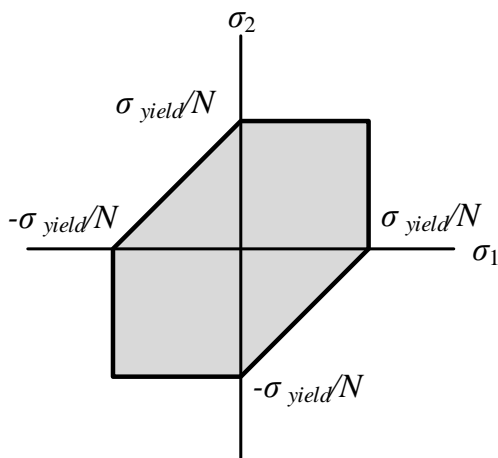
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \frac{\sigma_{yield}}{N} \quad 3.14 (ก)$$

ในทำนองเดียวกันหากพิจารณา τ_{max} จากสมการ 3.11 (ข) และ 3.11 (ค) จะได้สมการดังนี้

$$\sigma_1 = \pm \frac{\sigma_{yield}}{N} \quad 3.14 (ข)$$

และ
$$\sigma_2 = \pm \frac{\sigma_{yield}}{N} \quad 3.14 (ค)$$

นำสมการ 3.14 (ก) – 3.14 (ค) มาเขียนขอบเขตความเค้นผสมที่ยอมรับได้ในวัสดุสำหรับการได้ดังรูปที่ 3.9 ขอบเขตในรูปเป็นขอบเขตความเค้นของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานขณะใช้งานจะต้องมีค่าไม่เกินขอบเขตที่แรเงาในรูปนี้จึงจะมั่นใจได้ว่าชิ้นส่วนนั้น ๆ มีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการใช้งานโดยไม่เกิดการเสียหาย



รูปที่ 3.9 ขอบเขตความเค้นผสมที่ปลอดภัยภายใต้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

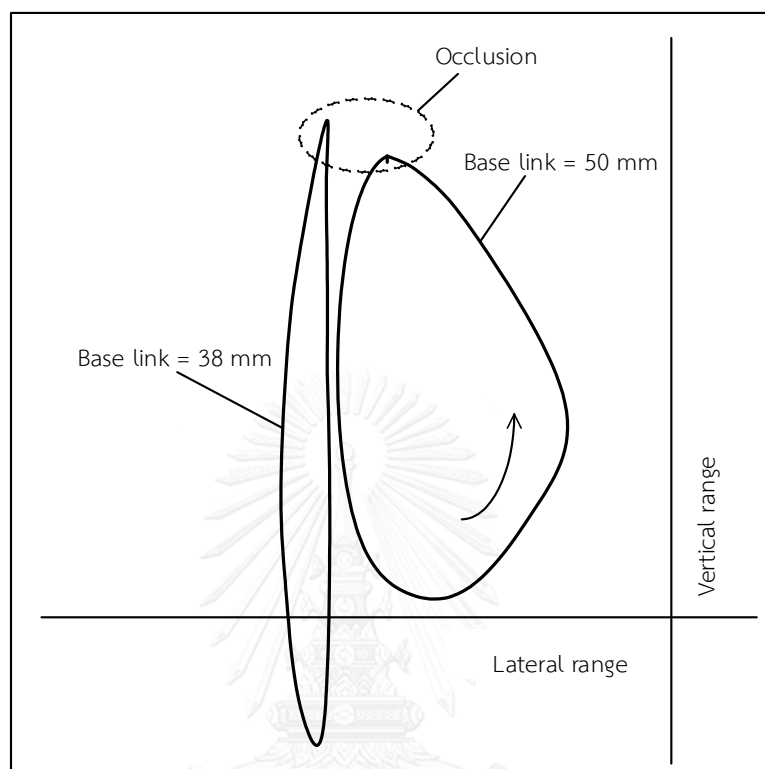
3.2 แนวคิดและคุณลักษณะของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์

การออกแบบเครื่องจำลองการเคี้ยวในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ โดยอ้างอิงจากผลการศึกษาเกี่ยวกับการเคี้ยวของมนุษย์ คุณลักษณะของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ที่เป็นข้อกำหนดในการออกแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีดังต่อไปนี้

3.2.1 วิธีการเคี้ยว (chewing path)

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบชุดทดลองจำลองการเคลื่อนที่ขบกันของฟัน ซึ่งอยู่บนขากรรไกรบนและฟันที่อยู่บนขากรรไกรล่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการขบกันของฟันในเคี้ยวของมนุษย์ แนวคิดของการออกแบบกลไกเพื่อให้การขบกันของฟันที่เป็นชิ้นงานทดสอบมีลักษณะใกล้เคียงกับการขบกันของฟันมนุษย์ในวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงกลไกของ Xu, W. L. et al. [20] กลไกดังกล่าวเป็นกลไกข้อต่อ 4 ชั้น (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) กลไกสามารถสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ของฟันที่ขากรรไกรล่างในวัฏจักรการเคี้ยว (chewing cycle) โดยตัวแปรที่สำคัญอยู่ที่มุมการเข้ากระทบกันของฟันและระยะที่ฟันขบกันซึ่งจะต้องมีความใกล้เคียงกับการเคี้ยวของมนุษย์มากที่สุด สำหรับวิธีการเคี้ยวที่ต้องการมี 2 แบบ คือ แบบแรกเป็นลักษณะของการขบเคี้ยว เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบทางทันตกรรมที่มีทั้งแรงกระแทกและแรงเฉือนเหมือนการเคี้ยวของมนุษย์ แบบที่สองเป็นลักษณะการกระแทกแนวตั้ง โดยวิธีการเคี้ยวทั้งสองแบบที่จะได้จากกลไกนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.10 โดยมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา วิธีการเคี้ยวดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวหรือวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้งได้โดยการปรับระยะของฐานของข้อต่อของกลไกข้อต่อ 4 ชั้น (ระยะ A_0B_0 ในรูปที่ 3.1) ให้เป็น 50 มิลลิเมตร และ 38 มิลลิเมตร ตามลำดับ [20]

ความถี่ในการเคี้ยวที่ต้องการ คือ 1 – 2 เฮิรตซ์ ซึ่งเท่ากับความถี่ในการเคี้ยวอาหารของมนุษย์ตามปกติ สำหรับรายละเอียดการออกแบบชุดกลไกจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.3



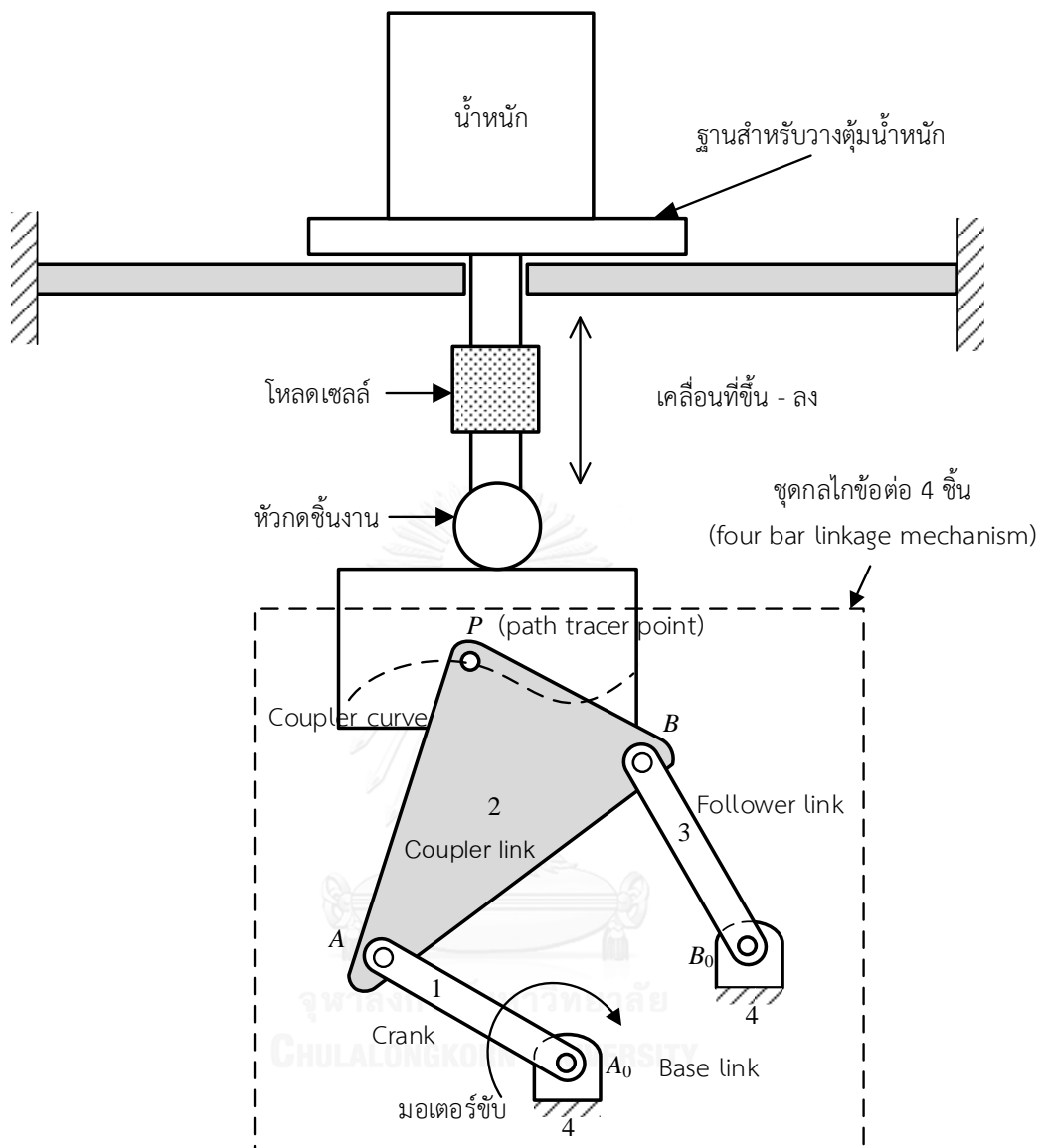
รูปที่ 3.10 วิธีการเคี้ยวเมื่อฐานของข้อต่อยาว 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร

3.2.2 แรงเคี้ยวและการวัดแรง

จากผลการศึกษาต่าง ๆ ในอดีตพบว่าแรงกัดเฉลี่ยสูงสุดของมนุษย์มีค่าประมาณ 444 นิวตัน ในขณะที่แรงขณะเคี้ยวอาหารมีค่าประมาณ 36.8 – 140 นิวตัน [7-9] ดังนั้นข้อกำหนดในการออกแบบแรงเคี้ยวสูงสุดที่ชุดทดลองจะต้องทำได้ คือ 500 นิวตัน เพื่อให้ครอบคลุมช่วงแรงดังกล่าว สำหรับการวัดแรงจะใช้อุปกรณ์วัดแรงประเภทโหลดเซลล์ (load cell)

3.3 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง

แนวคิดในการทำงานของชุดทดลอง คือ การประยุกต์ใช้กลไกข้อ 4 ชั้น เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของฟันกรามบนขากรรไกรล่างที่ใกล้เคียงกับการเคี้ยวของมนุษย์ หรือที่เรียกว่าวิธีการเคี้ยว และการควบคุมแรงเคี้ยวโดยใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วง แนวคิดดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.11

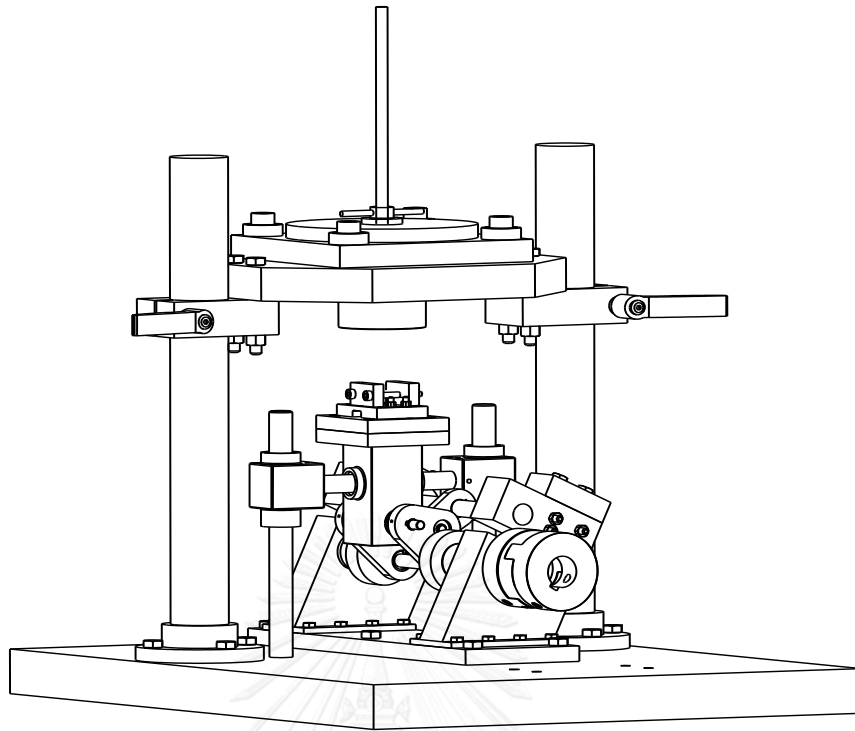


รูปที่ 3.11 กลไกการทำงานของเครื่องจำลองการเคี้ยว

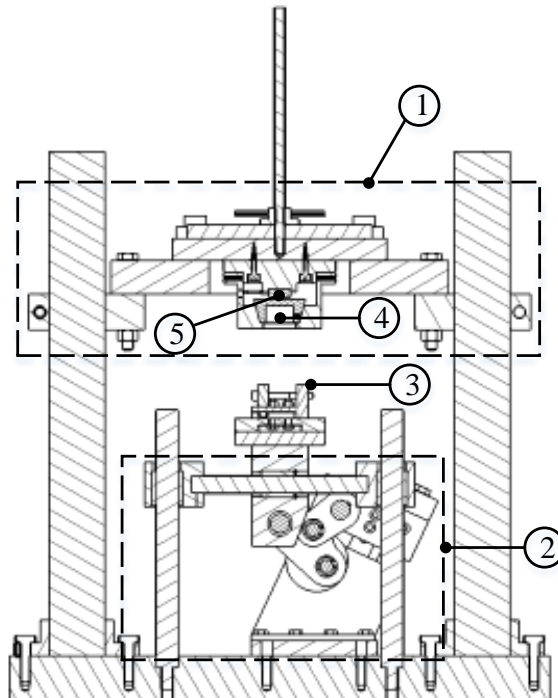
การทำงานของชุดจำลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือการสร้างวิถีการเคี้ยวตามที่กำหนดโดยใช้ชุดกลไกข้อต่อ 4 ชั้น (four bar linkage) ซึ่งประกอบด้วย ข้อเหวี่ยง (crank, ข้อต่อหมายเลข 1), ตัวคู่ต่อ (coupler, ข้อต่อหมายเลข 2), ตัวตาม (follower, ข้อต่อหมายเลข 3) และฐานของข้อต่อ (base, ข้อต่อหมายเลข 4) กลไกทั้งหมดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและเรียกรวมว่าชุดกลไกขับเคลื่อน มีหลักการทำงานโดยย่อดังนี้ มอเตอร์จะหมุนชุดกลไกข้อต่อโดยขับผ่านข้อเหวี่ยง 1 เมื่อข้อเหวี่ยงหมุนจะทำให้ชุดกลไกทั้งหมดเคลื่อนที่ไปตามตัวคู่ต่อทำให้จุด P บนตัวคู่ต่อเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งวิถีการเคี้ยวตามที่ต้องการ ซึ่งการที่จะทำให้เกิดวิถีการเคี้ยวดังกล่าวจะต้อง

กำหนดความยาวของข้อต่อต่าง ๆ ให้เหมาะสมดังนี้ คือ ข้อเหวี่ยง A_0A ยาว 10 มิลลิเมตร, ตัวคู่ต่อ AB ยาว 35 มิลลิเมตร BP ยาว 30 มิลลิเมตร, ตัวตาม B_0B ยาว 30 มิลลิเมตร, มุม \hat{ABP} เท่ากับ 120 องศา และฐานของข้อต่อ A_0B_0 สามารถปรับระยะห่างระหว่างจุด A_0 และ B_0 ได้ระหว่าง 38 และ 50 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถปรับวิธีการเคี้ยวเป็นแบบกระแทกแนวตั้ง ($A_0B_0 = 38$ มิลลิเมตร) และแบบการขบเคี้ยว ($A_0B_0 = 50$ มิลลิเมตร) [20] โดยที่จุด P ของตัวคู่ต่อจะติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานชุดล่างเพื่อจับชิ้นงานทดสอบ (พื้นล่าง) เพื่อให้เคลื่อนที่ขึ้นไปกระแทกกับชิ้นงานทดสอบที่ยึดติดกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานชุดบน (พื้นบนหรือหัวกดชิ้นงาน) ในทิศทางตามการเคลื่อนที่ของวิธีการเคี้ยว ส่วนที่สองคือส่วนควบคุมแรงในการเคี้ยวด้วยน้ำหนักที่ติดตั้งอยู่บนฐานด้านบนของชุดทดลอง โดยมีหลักการทำงานอย่างง่าย ๆ คือ เมื่อชุดกลไกขับเคลื่อนต้นชิ้นงานทดสอบที่ยึดติดอยู่กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานชุดล่างขึ้นไปชนกับชิ้นงานทดสอบที่ยึดติดอยู่กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานชุดบนแล้ว จะยกฐานสำหรับวางตุ้มน้ำหนักขึ้นทำให้น้ำหนักรวมของฐานสำหรับวางตุ้มน้ำหนักและตุ้มน้ำหนักส่งผ่านลงสู่ชิ้นงานและสามารถวัดแรงเคี้ยวที่เกิดขึ้นได้ด้วยโหลดเซลล์ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานชุดบนกับฐานสำหรับวางตุ้มน้ำหนัก อีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือสภาพแวดล้อมในการทดลอง ถึงแม้สภาพแวดล้อมในการทดลองควรมีสภาพคล้ายคลึงกับในช่องปากของมนุษย์ กล่าวคือมีน้ำลายขณะเคี้ยว แต่ในงานวิจัยนี้จะยังไม่ได้มุ่งเน้นไปในส่วนนี้เนื่องจากต้องการเน้นไปที่วิธีการเคี้ยวของชุดทดลองและการควบคุมต่าง ๆ ของชุดทดลองเป็นหลัก เมื่อใช้แนวทางดังกล่าวในการออกแบบจะทำให้สามารถออกแบบชุดทดลองได้ดังรูปที่ 3.12

การออกแบบชุดทดลองดังรูปที่ 3.12 โดยละเอียดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือชุดกลไกข้อต่อ 4 ชิ้น ส่วนที่สองคือชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนัก และส่วนสุดท้ายคือชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและชุดบน ดังนั้นเนื้อหาในหัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อย่อยเพื่ออธิบายรายละเอียดของการออกแบบในแต่ละส่วน หัวข้อแรกจะกล่าวถึงการออกแบบชุดกลไกข้อต่อ 4 ชิ้น และการเลือกมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนกลไก โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดในการคำนวณความแข็งแรงของเพลตต่าง ๆ ของกลไกที่จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอในการรับแรงที่เกิดจากการกระแทกกันของชุดทดลอง รวมทั้งการเลือกมอเตอร์ที่เหมาะสม หัวข้อถัดมาจะกล่าวถึงการออกแบบชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนักรวมทั้งชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงเคี้ยว หัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการออกแบบชุดจับยึดชิ้นงานให้มีความเหมาะสมกับชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในการทดลอง



(ก) ภาพไอโซเมตริก (isometric view)



- 1) ชุดกลไกข้อต่อ
- 2) ชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วย
ตุ้มน้ำหนัก
- 3) ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง
- 4) ชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน
- 5) โหลดเซลล์ (load cell)

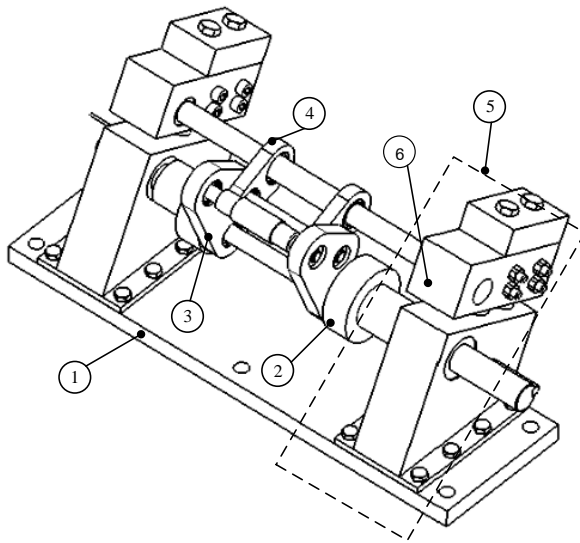
(ข) ภาพภาคตัด (section view)

รูปที่ 3.12 เครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์

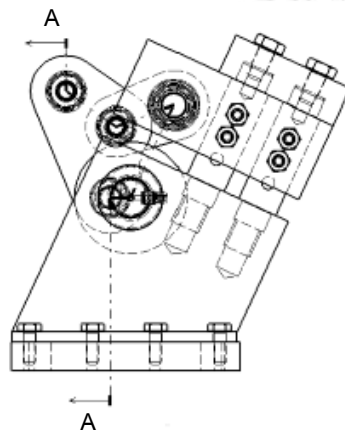
3.3.1 การออกแบบชุดกลไกข้อต่อ 4 ชั้น

กลไกข้อต่อ 4 ชั้น คือหัวใจสำคัญของชุดทดลองเนื่องจากทำหน้าที่สร้างวิธีการเคี้ยวที่ต้องการและรองรับแรงทั้งหมดที่กระทำกับชิ้นงานที่ยึดกับชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง ดังนั้นกลไกข้อต่อ 4 ชั้นจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ นอกจากนี้มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนกลไกจะต้องมีแรงบิดเพียงพอที่จะขับเคลื่อนกลไกเมื่อรับแรงเคี้ยวที่มีค่ามากที่สุดได้ เมื่อนำขนาดความยาวของข้อต่อแต่ละชั้นของกลไกข้อต่อ 4 ชั้นที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้นของหัวข้อนี้มาพิจารณาออกแบบรูปร่างให้มีความเหมาะสม สะดวกแก่การประกอบและใช้งาน จะได้ชุดกลไกที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.13 เมื่อออกแบบชุดกลไกในภาพรวมแล้ว ต่อมาจะต้องออกแบบขนาดเพลลาของชุดกลไกให้มีขนาดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากแรงที่กระทำกับชุดกลไกข้อต่อ แรงที่กระทำต่อชุดกลไกข้อต่อนี้จะนำมาคำนวณขนาดแรงบิดของมอเตอร์ที่จะใช้ขับเคลื่อนกลไกด้วย ต่อไปนี้จะแสดงรายละเอียดการคำนวณแยกเป็น 3 ข้อ ได้แก่ การคำนวณแรงที่กระทำกับเพลลาของชุดกลไก การเลือกขนาดมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนชุดกลไก และการคำนวณขนาดเพลลาที่เหมาะสมของชุดกลไก

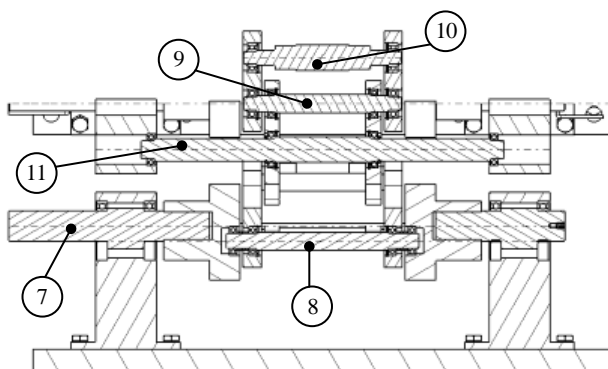




(ก) ภาพไอโซเมตริก (Isometric view)



(ข) ภาพด้านข้าง (Side view)



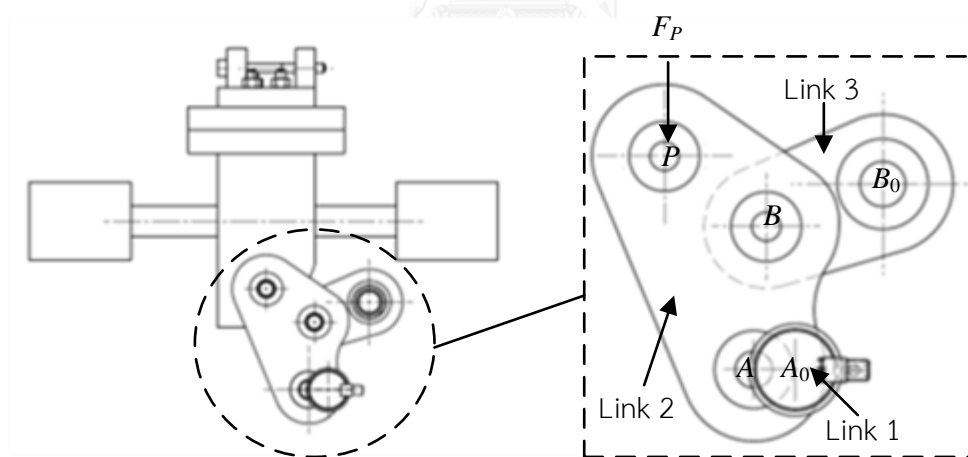
(ค) ภาพภาคตัดระนาบ A-A (Section view A-A)

- 1) ฐานชุดกลไก
- 2) ข้อเหวี่ยง (crank)
- 3) ตัวต่อคู่ (coupler)
- 4) ตัวตาม (follower)
- 5) ชุดฐานของข้อต่อ (base link)
- 6) ชิ้นส่วนเลื่อนปรับระดับ (moveable part)
- 7) เพลาขับ (driving shaft)
- 8) เพลาระหว่างข้อเหวี่ยงและตัวคู่อ
- 9) เพลาระหว่างตัวตามและตัวคู่อ
- 10) เพลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและตัวคู่อ
- 11) เพลา ระหว่างตัวตามและชิ้นส่วนเลื่อนปรับระดับ

รูปที่ 3.13 ชุดกลไกข้อต่อ 4 ชิ้น

1) การคำนวณแรงที่กระทำกับเพลลาของชุดกลไก

ก่อนที่จะสามารถพิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์และออกแบบขนาดเพลลาของชุดกลไกที่เหมาะสมจะต้องทราบแรงที่กระทำต่อส่วนต่าง ๆ ของชุดกลไกเสียก่อน เมื่อพิจารณาการทำงานของชุดทดลองจะพบว่าแรงจากการเคี้ยวทั้งหมดจะกระทำกับชุดกลไกผ่านเพลลาที่รองรับชิ้นข้อต่อที่เป็นฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง (bottom fixture joint) (หมายเลข 3 ในรูปที่ 3.12 (ข)) ดังนั้นแรงในการเคี้ยวจะส่งผ่านชิ้นงานไปสู่ชิ้นข้อต่อที่เป็นฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง และส่งต่อไปยังเพลลาที่รองรับซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าเพลลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและตัวคู่ต่อ (shaft between bottom fixture joint and coupler) (หมายเลข 10 ในรูปที่ 3.13 (ค)) โดยแรงสูงสุดที่กระทำเพลลาดังกล่าวคือแรงกัตสูงสุดและน้ำหนักของชิ้นส่วนของกลไกข้อต่อที่เพลลารองรับอยู่ แรงดังกล่าวประกอบด้วยแรงกัตสูงสุดคือ 500 นิวตันกระทำในแนวตั้งรวมกับน้ำหนักของชิ้นส่วนทั้งหมดที่เพลลาดังกล่าวรองรับอีก 43 นิวตัน ทั้งหมดรวมเป็นแรง 543 นิวตัน รูปที่ 3.14 แสดงภาพขยายชุดกลไกข้อต่อส่วนที่รับแรงในการเคี้ยว



รูปที่ 3.14 ภาพขยายชุดกลไกข้อต่อส่วนที่รับแรงในการเคี้ยว

รูปที่ 3.14 ตัดขยายมาจากรูปที่ 3.13 เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ จากรูปชิ้นส่วนของกลไกข้อต่อที่นำมาพิจารณาจะแบ่งออกเป็น 3 ชิ้น ได้แก่ Link 1 ข้อเหวี่ยง, Link 2 ตัวคู่ต่อ และ Link 3 ตัวตาม โดย ข้อต่อแต่ละชิ้นในรูปจะเชื่อมต่อกันด้วยเพลลา A, A₀, B, B₀ และ P แรงที่กระทำต่อชุดกลไกคือ

F_P มีขนาดเท่ากับ 543 นิวตันกระทำในแนวตั้งที่จุด P (ตำแหน่งของเพลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและตัวคู่ต่อในรูปที่ 3.13 (ค)) ในขั้นต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์การกระจายของแรงที่กระทำต่อส่วนต่าง ๆ ในรูปที่ 3.14 โดยจะพิจารณาสมดุลของแรงใน Link 3, Link 2 และ Link 1 ตามลำดับ ดังนี้

Link 3

การกระจายของแรงใน Link 3 ในรูปที่ 3.14 สามารถเขียนเป็นแผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ได้ดังรูปที่ 3.15

โดยที่ มวลของ Link 3 (m_3) เท่ากับ 0.102 กิโลกรัม

มวลของเพล่า B_0 (m_{B_0}) เท่ากับ 0.342 กิโลกรัม

ความยาวของ Link 3 (l_3) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร

มุม α เท่ากับ 20.24 องศา

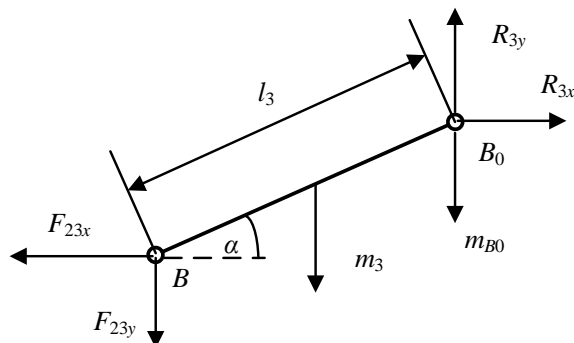
เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงใน Link 3 จะได้ว่า

$$\sum F_x = 0: 2R_{3x} - 2F_{23x} = 0 \quad 3.15 \text{ (ก)}$$

$$\sum F_y = 0: 2R_{3y} - 2F_{23y} - 2m_3g - m_{B_0}g = 0 \quad 3.15 \text{ (ข)}$$

$$\sum M_{B_0} = 0: -2F_{23y}(l_3 \cos \alpha) - 2m_3g(l_3 \cos \alpha) / 2 + 2F_{23x}(l_3 \sin \alpha) = 0 \quad 3.15 \text{ (ค)}$$

เมื่อได้สมการสมดุลของแรงใน Link 3 แล้ว ต่อไปเป็นการพิจารณาหาสมดุลของแรงใน Link 2



รูปที่ 3.15 แผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ของ Link 3

Link 2

แรงใน Link 2 ที่แสดงในรูปที่ 3.14 สามารถเขียนเป็นแผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ได้ดังรูปที่ 3.16

โดยที่ มวลของ Link 2 (m_2) เท่ากับ 0.268 กิโลกรัม

มวลของเพลลา A (m_A) เท่ากับ 0.101 กิโลกรัม

มวลของเพลลา B (m_B) เท่ากับ 0.075 กิโลกรัม

ความยาวของ Link 2 ด้าน AB (l_2) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร

ความยาวของ Link 2 ด้าน AP (l_2') เท่ากับ 56.35 มิลลิเมตร

มุม θ_1 เท่ากับ 85.11 องศา

มุม θ_2 เท่ากับ 67.43 องศา

แรง F_P เท่ากับ 543 นิวตัน กระทำในแนวตั้งที่จุด P

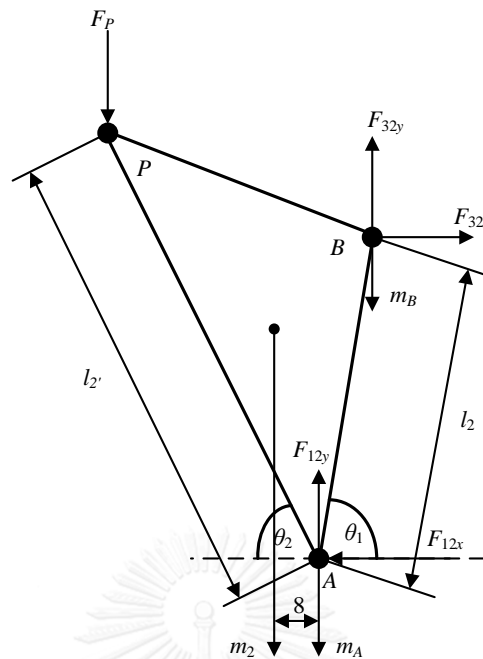
เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงใน Link 2 จะได้ว่า

$$\sum F_x = 0: 2F_{32x} - 2F_{12x} = 0 \quad 3.16 \text{ (ก)}$$

$$\sum F_y = 0: 2F_{12y} + 2F_{32y} - F_P - 2m_2g - m_Ag - m_Bg = 0 \quad 3.16 \text{ (ข)}$$

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0: & -2F_{32y}(l_2 \cos \theta_1) - P(l_2' \cos \theta_2) - 2m_2g \times 8 \\ & + m_Bg(l_2 \cos \theta_1) + 2F_{32x}(l_2 \sin \theta_1) = 0 \end{aligned} \quad 3.16 \text{ (ค)}$$

แก้สมการ 3.15 (ค) และ 3.15 (ค) จะได้ $F_{23x} = 174.502$ นิวตัน และ $F_{23y} = 64.843$ นิวตัน ทำให้สามารถหาค่า $F_{12x} = 174.502$ นิวตัน ได้จากสมการ 3.16 (ก), $F_{12y} = 210.15$ นิวตัน จากสมการ 3.16 (ข), $R_{3x} = 174.502$ นิวตัน จากสมการ 3.15 (ก) และ $R_{3y} = 67.521$ นิวตัน จากสมการ 3.15 (ข) ตามลำดับ ต่อไปจะเป็นการพิจารณาหาการกระจายของแรงของ Link 1 และแรงบิดสำหรับข้อเคลื่อนชุดกลไก T_L



รูปที่ 3.16 แผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ของ Link 2

Link 1

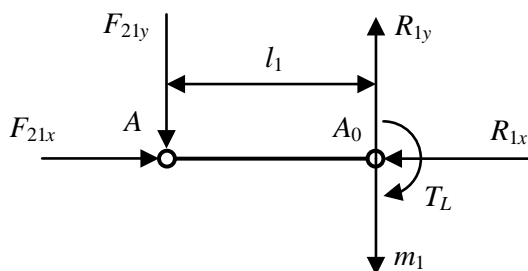
แรงที่เกิดขึ้นใน Link 1 ตามที่แสดงในรูปที่ 3.14 สามารถเขียนเป็นแผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ได้ดังรูปที่ 3.17 โดยที่น้ำหนักของ Link 1 (m_1) เท่ากับ 0.461 กิโลกรัม, ความยาวของ Link 1 (l_1) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และแรงบิดที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถขับเคลื่อนชุดกลไกได้ T_L เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงใน Link 1 จะได้ว่า

$$\sum F_x = 0: 2F_{21x} - 2R_{1x} = 0 \quad 3.17 \text{ (ก)}$$

$$\sum F_y = 0: 2R_{1y} - 2F_{21y} - 2m_1g = 0 \quad 3.17 \text{ (ข)}$$

$$\sum M_{A0} = 0: T_L - 2l_1F_{21y} = 0 \quad 3.17 \text{ (ค)}$$

เมื่อแทนค่าแรงที่หาได้จาก Link 2 และ Link 3 ลงในสมการ 3.17 (ก) ถึง 3.17 (ค) จะได้ $R_{1x} = 174.502$ นิวตัน, $R_{1y} = 214.672$ นิวตัน และ $T_L = 4.2$ นิวตัน-เมตร ตามลำดับ ซึ่งแรงทั้งหมดเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณขนาดมอเตอร์และขนาดเพลลาของชุดกลไกต่อไป



รูปที่ 3.17 แผนภาพวัตถุอิสระ (free body diagram) ของ Link 1

2) การเลือกขนาดมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนชุดกลไก

เนื่องจากชุดทดลองถูกออกแบบโดยใช้มอเตอร์เป็นตัวส่งกำลัง ดังนั้นจึงต้องเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับชุดทดลอง ซึ่งมอเตอร์ที่จะเลือกใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC motor) การเลือกมอเตอร์จะพิจารณาจากแรงบิดที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนชุดกลไกและความถี่การเคี้ยวสูงสุดที่ต้องการของชุดทดลอง แรงบิดที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนกลไก คือ $T_L = 4.2$ นิวตัน-เมตร ดังที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้านี้ และความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์ที่ต้องการคือ 2 เฮิร์ตซ์ หรือ 120 รอบต่อนาที (rpm) เมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขายทั่วไปในท้องตลาดพบว่าจะมีความเร็วรอบการหมุนอยู่ที่ 1,400 – 1,500 รอบต่อนาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการใช้งานที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที พบว่ามีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นหากจะนำมอเตอร์มาใช้จะต้องมีการทดรอบด้วยชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดประมาณ 12.5 เท่า ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในการส่งถ่ายแรงบิด ซึ่งจะต้องนำมาคำนวณรวมด้วย ซึ่งจากการสืบหาข้อมูลจากผู้ผลิตพบว่าชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดประมาณ 12.5 เท่าจะมีประสิทธิภาพของชุดเฟืองทด $\eta = 0.66$ ดังนั้นการเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดแรงบิดที่เหมาะสมนั้นนอกจากจะพิจารณาแรงบิด T_L และ ความเร็วรอบของการใช้งานแล้วยังต้องพิจารณาอัตราทด i และประสิทธิภาพของชุดเฟืองทด η ด้วย สมการสำหรับการคำนวณขนาดแรงบิดของมอเตอร์ T_M เป็นดังสมการ 3.18

$$\text{ขนาดแรงบิดของมอเตอร์} \quad T_M = \frac{T_L}{i \times \eta} \quad 3.18$$

เมื่อ $T_L = 4.2$ นิวตัน-เมตร, $i = 12.5$ และ $\eta = 0.66$ จะสามารถคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ T_M จากสมการได้เท่ากับ 0.51 นิวตัน-เมตร แต่ในการเลือกมอเตอร์สำหรับใช้งานจะต้องเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดมากกว่าค่าที่คำนวณได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเลือกให้มีค่าความปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 2 [25] ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้มอเตอร์ที่มีแรงบิดอย่างน้อย 1.02 นิวตัน-เมตร อย่างไรก็ตามผู้ผลิตมักจะระบุขนาดมอเตอร์เป็นกำลังวัตต์ (W) ทำให้ต้องแปลงขนาดแรงบิดของมอเตอร์ที่คำนวณได้เป็นวัตต์เสียก่อน การคำนวณกำลังมอเตอร์ P เป็นดังสมการ 3.19

$$\text{กำลังมอเตอร์} \quad P = T_M \omega = T_M (2\pi f) \quad 3.19$$

เมื่อ $T_M = 1.02$ นิวตัน-เมตร และเลือกใช้ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ในการคำนวณค่า f ที่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ จะสามารถคำนวณหาลำกำลังมอเตอร์ P ได้เท่ากับ 160 วัตต์

เมื่อพิจารณามอเตอร์ที่มีในท้องตลาดเปรียบเทียบกับมอเตอร์จากขนาดที่คำนวณได้ พบว่ามอเตอร์ที่เหมาะสมคือมอเตอร์พร้อมชุดเกียร์ขนาดกลาง (medium geared motor) ยี่ห้อ GTR ของบริษัท Nissei รุ่น G3 series ขนาด 0.2 กิโลวัตต์ คุณสมบัติของมอเตอร์ตามที่คุณผลิตระบุเป็นดังนี้ ความเร็วรอบ 1,420 รอบต่อนาที อัตราทด 15 เท่า ความเร็วรอบหลังการทดรอบเท่ากับ 100 รอบต่อนาที และให้แรงบิดหลังการทดรอบเท่ากับ 18.6 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์ และความเร็วรอบ 1,720 รอบต่อนาที ความเร็วรอบหลังการทดรอบเท่ากับ 120 รอบต่อนาที และให้แรงบิดหลังการทดรอบเท่ากับ 14.7 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ไฟฟ้า 60 เฮิรตซ์ ดังนั้นการออกแบบเพลลาของชุดกลไกจะใช้ค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ คือ 18.6 นิวตัน-เมตร

3) การคำนวณขนาดเพลลาที่เหมาะสมของชุดกลไก

ชุดกลไกข้อต่อประกอบด้วยชุดเพลลาที่ทำหน้าที่รองรับภาระน้ำหนักที่กระทำกับกลไกและแรงบิดที่ส่งถ่ายมาจากมอเตอร์ ดังนั้นการออกแบบเพลลาจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังกล่าวเพื่อให้เพลลามีความแข็งแรงเพียงพอและไม่เกิดการบิดหรือโก่งงอขณะใช้งาน [23, 25] จากการศึกษาข้อมูลจากผู้ผลิตพบว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเพลลาคือเหล็ก SCM 440 (Japan standard) หรือ AISI 4140 (USA standard) ซึ่งเป็นเหล็กผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม เหมาะสำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทก เฟืองขนาดเล็ก สลักเกลียว เพลลา และชิ้นส่วนเครื่องจักร มีค่าความแข็งแรงดึงดึง (tensile strength) เท่ากับ 850 เมกะปาสคาล (MPa) หรือ 86 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร การคำนวณขนาดของเพลลาจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท เพลลาประเภทที่ 1 คือ เพลลาขับ (driving shaft) เป็นเพลลาที่จะต่อเข้ากับมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนชุดกลไก ดังนั้นเพลลาขับจะรับแรงบิดเป็นหลัก และเพลลาประเภทที่ 2 คือ เพลลาตาม ซึ่งจะมีทั้งหมด 4 ชิ้น ได้แก่ เพลลาระหว่างข้อเหวี่ยงและตัวคู่ต่อ (shaft between crank and coupler), เพลลาระหว่างตัวตามและตัวคู่ต่อ (shaft between follower and coupler), เพลลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและตัวคู่ต่อ (shaft between bottom fixture joint and coupler) และเพลลาระหว่างตัวตามและชิ้นส่วนเลื่อนปรับระดับ (shaft between follower and moveable part) เพลลาตามเหล่านี้จะรับโมเมนต์ดัดเป็นหลัก สำหรับการคำนวณขนาดของเพลลาทั้งเพลลาขับและเพลลาตามนั้นจะใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ดังนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนคือความเค้นเฉือนที่ยอมให้เกิดขึ้นในวัสดุที่ใช้ทำเพลลา τ_d ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความ

แข็งแรงดึงของวัสดุ (tensile strength) σ_B ในที่นี้ใช้วัสดุเหล็ก SCM 440 จึงมีค่า $\sigma_B = 86$ กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร นำไปหารด้วยค่าความปลอดภัย (safety factor) ดังสมการ 3.20 [25]

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{Sf_1 \times Sf_2} \quad 3.20$$

โดย Sf_1 คือ อัตราเพื่อความปลอดภัยที่รวมเอาผลของขนาดของวัสดุและวัสดุที่เป็นเหล็กผสม มีค่าเท่ากับ 6.0

Sf_2 คือ อัตราเพื่อความปลอดภัยสำหรับเพลลาที่มีร่องลิ่มหรือมีป่า ซึ่งเป็นจุดรวมความเค้น โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 1.3 – 3.0 สำหรับการคำนวณในที่นี้จะใช้ค่าเท่ากับ 2.0

จากสมการข้างต้นจะได้ค่าความเค้นเฉือนที่ยอมให้เกิดขึ้นในวัสดุที่ใช้ทำเพลลา $\tau_a = 7.17$ กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งค่า τ_a ที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณขนาดเพลลาขับและเพลลาตามต่อไป

- การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาขับ

เนื่องจากเป็นเพลลาขับเป็นเพลลาที่รับการถ่ายทอดกำลังจากเพลลาของมอเตอร์โดยผ่านชุดต่อประภพเพลลาเพื่อขับเคลื่อนชุดกลไก ดังนั้นในกรณีนี้จะคิดเฉพาะแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์โดยใช้สมการ 3.12 โดยแทนค่า $\tau_{max} = \tau_a$, $\sigma = 0$ และ $\tau = \frac{Tr}{(\pi d^4 / 32)}$ ลงในสมการดังกล่าวแล้วจัดรูปจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาขับ d_s ดังสมการ 3.21 [25]

$$d_s = \left[\frac{5.1}{\tau_a} \times K_r \times C_b \times T \right]^{1/3} \quad 3.21$$

โดย T คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่ส่งมาที่เพลลา มีค่าเท่ากับ 1,896 กิโลกรัม-มิลลิเมตร

K_r คือ ตัวประกอบแก้ไขเมื่อพิจารณาธรรมชาติของโมเมนต์บิดที่เพลลาได้อยู่โดยมีค่าเท่ากับ 1.5 สำหรับกรณีมีการกระแทกเล็กน้อย (minor shock)

C_b คือ ตัวประกอบแก้ไขเมื่อการใช้งานมีภาระจากการดัดผสมเข้ากับการบิดด้วยโดยมีค่าเท่ากับ 2.0

ค่า K_r และ C_b ในสมการข้างต้นคือค่าความปลอดภัยที่นำมาคูณกับแรงบิดเนื่องจากในการใช้งานจริงจะมีแรงอื่น ๆ นอกจากแรงบิดกระทำกับเพลลาด้วย จากสมการดังกล่าวจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาขับ $d_s = 15.9$ มิลลิเมตร กล่าวคือจะต้องใช้เพลลาขับที่มีขนาด 16 มิลลิเมตรขึ้นไป

- การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาตาม

เพลลาตามของชุดกลไกเป็นเพลลาที่ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนและแรงที่เกิดจากการเคี้ยวเป็นหลัก ดังนั้นจึงพิจารณาให้เป็นเพลลาที่รับภาระดัดเป็นหลักซึ่งจะมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างไปจากเพลลาขับที่รับภาระแรงบิดเป็นหลัก การคำนวณจะใช้สมการ 3.12 โดยแทนค่า $\tau_{max} = \tau_a$, $\tau = 0$

และ $\sigma = \frac{M}{(\pi d^3 / 32)}$ ลงในสมการดังกล่าวแล้วจัดรูปจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาชับ d_s

ดังสมการ 3.22 [25]

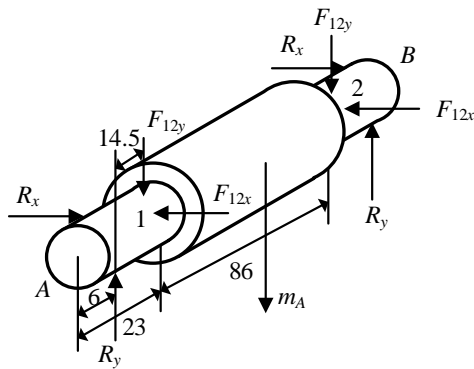
$$d_s = \left[\frac{5.1}{\tau_a} \times K_m \times M \right]^{1/3} \quad 3.22$$

โดย K_m คือ ตัวประกอบแก้ไขโมเมนต์ดัดโดยมีค่าเท่ากับ 2.0 สำหรับกรณีมีการกระแทกเล็กน้อย

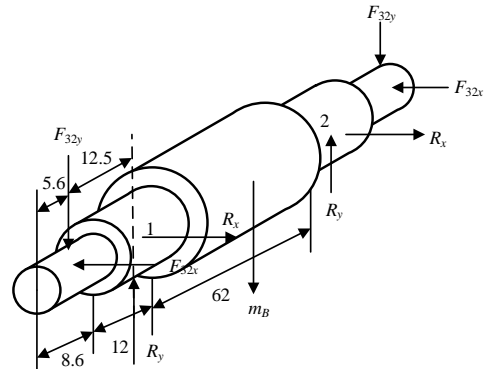
M คือ โมเมนต์ดัดมีหน่วยเป็นกิโลกรัม-มิลลิเมตร

สมการข้างต้นจะใช้ในการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาดำตามทั้ง 4 ชั้น ได้แก่ ได้แก่ เพลาระหว่างข้อเหวี่ยงและตัวคู่ต่อ, เพลาระหว่างตัวตามและตัวคู่ต่อ, เพลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและตัวคู่ต่อ และเพลาระหว่างตัวตามและชิ้นส่วนเลื่อนปรับระดับ จากสมการจะต้องคำนวณค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเพลาดำแต่ละชั้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาด ทิศทาง และตำแหน่งของแรงที่กระทำกับเพลาดำที่ได้คำนวณไปแล้วก่อนหน้า (ดูรูปที่ 3.15 - รูปที่ 3.17 ประกอบ) ทิศทางและตำแหน่งของแรงที่กระทำกับเพลาดำแสดงดังรูปที่ 3.18 จุดที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดบนเพลาดำตามทั้ง 4 ชั้นคือจุดที่ 1 และจุดที่ 2 เนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อเพลาดำมีความสมมาตรทำให้โมเมนต์ดัดที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 มีขนาดเท่ากัน เมื่อนำค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดดังกล่าวไปแทนค่าลงในสมการ 3.22 จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาดำตามทั้ง 4 ชั้น ดังนั้น เพลาระหว่างข้อเหวี่ยงและตัวคู่ต่อ, เพลาระหว่างตัวตามและตัวคู่ต่อ, เพลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างและตัวคู่ต่อ และเพลาระหว่างตัวตามและชิ้นส่วนเลื่อนปรับระดับ จะต้องมีความหนาเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาดำใหญ่กว่า 8.35 มิลลิเมตร, 6.96 มิลลิเมตร, 10.14 มิลลิเมตร และ 12.93 มิลลิเมตร ตามลำดับ

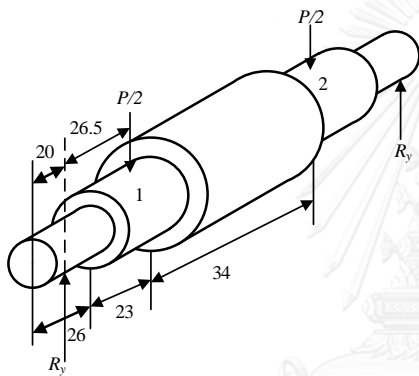
การออกแบบเพลาดำต่าง ๆ ทั้งเพลาชับและเพลาดำข้างต้นจะพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้นต่ำของเพลาดำที่คำนวณไว้ข้างต้นและต้องพิจารณาความเหมาะสมในการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ชุดกลไกข้อต่อสามารถรับแรงและทำงานได้ตามข้อกำหนดการออกแบบ



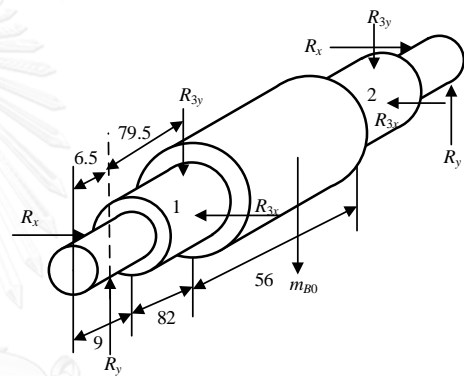
(ก) เพลาระหว่างข้อเหวี่ยงและตัวคู่ต่อ
(หมายเลข 8 ในรูปที่ 3.13)



(ข) เพลาระหว่างตัวตามและตัวคู่ต่อ
(หมายเลข 9 ในรูปที่ 3.13)



(ค) เพลาระหว่างข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงาน
ชุดล่างและตัวคู่ต่อ
(หมายเลข 10 ในรูปที่ 3.13)



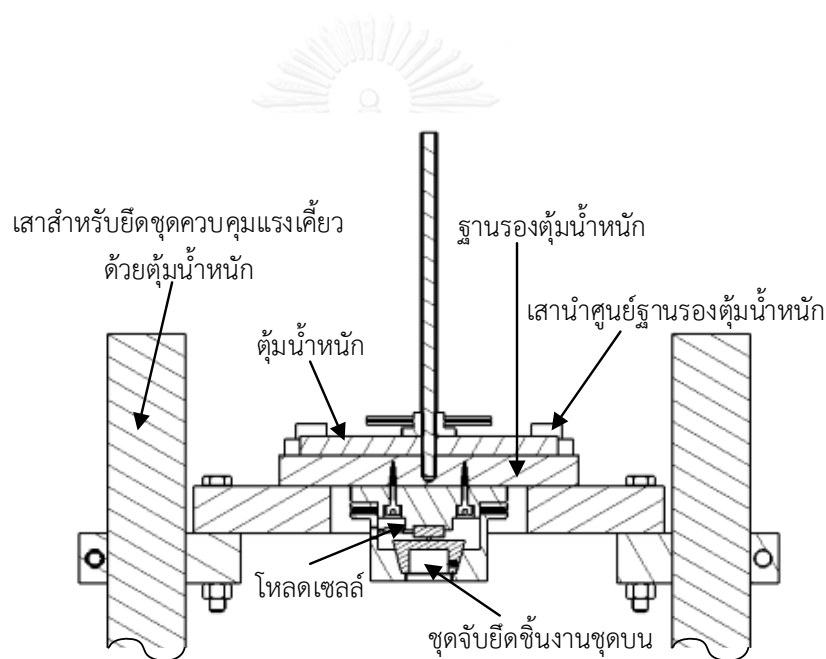
(ง) เพลาระหว่างตัวตามและชิ้นส่วนเลื่อนปรับ
ระดับ
(หมายเลข 11 ในรูปที่ 3.13)

รูปที่ 3.18 แรงที่กระทำต่อเพลาตามของชุดกลไก

3.3.2 การออกแบบชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนัก

การออกแบบชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนักได้แนวคิดมาจากการศึกษาเครื่อง Willytec [15] ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบทางทันตกรรมที่มีขายในเชิงพาณิชย์ดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้วในบทที่ 2 เครื่องดังกล่าวควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานด้วยการถ่วงน้ำหนัก (dead weight) ด้านบนหัวกดชิ้นงานทำให้หัวกดชิ้นงานกดลงบนชิ้นงานตามน้ำหนักที่ถ่วงไว้ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับชุดทดลอง ชุดควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนักที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 ชุดควบคุมแรงเคี้ยวประกอบด้วยฐานรองตุ้มน้ำหนักที่เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวตั้ง ฐาน ๆ นี้จะยึดกับ

โหลดเซลล์ (load cell) และชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน หลักการทำงานคือเมื่อวางตุ้มน้ำหนักบนฐาน ๗ จนน้ำหนักรวมเท่ากับแรงที่ต้องการแล้ว เมื่อชิ้นงานชุดล่างเลื่อนขึ้นกระแทกกับชิ้นงานชุดบนที่ยึดติดอยู่กับฐานรองน้ำหนัก จะทำให้ฐานรองตุ้มน้ำหนักเลื่อนขึ้นและน้ำหนักจะกดลงบนชิ้นงานทดสอบ แรงที่เกิดขึ้นในช่วงนี้สามารถวัดโดยโหลดเซลล์ โหลดเซลล์ที่เลือกใช้เป็นโหลดเซลล์ชนิดที่วัดแรงในแนวแกน (axial) ในทิศเดียว สาเหตุที่เลือกใช้โหลดเซลล์ชนิดนี้เพราะในการวัดแรงเค้นนั้น แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบจะเป็นแรงในแนวตั้งเป็นหลัก อีกทั้งโหลดเซลล์ชนิดที่วัดแรงในทิศทาง 3 แกน มีขนาดใหญ่ไม่สามารถนำมาติดตั้งบนชุดทดสอบได้ ดังนั้นการใช้โหลดเซลล์ชนิดที่วัดแรงในแนวแกนเพียงทิศเดียวจึงเหมาะสมและเพียงพอแล้ว สำหรับโหลดเซลล์ที่เลือกใช้เป็นยี่ห้อ Kyowa ประเภท Miniature load cell รุ่น LMA-A-1KN ขนาด 1 กิโลนิวตัน ชนิดวัดแรงในแนวแกนเพียงทิศเดียว



รูปที่ 3.19 ชุดควบคุมแรงเค้นด้วยตุ้มน้ำหนัก

3.3.3 การออกแบบชุดจับยึดชิ้นงาน

ลักษณะของชุดจับยึดชิ้นงานจะขึ้นกับลักษณะของชิ้นงานที่จะใช้ทดลองและการทำงานของชุดทดลอง ชุดทดลองมีชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างเป็นส่วนเคลื่อนที่ในแนวระดับและในแนวตั้ง แต่มีชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนอยู่กับที่ (ดูรูปที่ 3.12 ประกอบ) จนกระทั่งชิ้นงานที่ยึดกับชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างเคลื่อนเข้ามาชน เมื่อชนกันชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนจะเคลื่อนที่ขึ้น และเมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ออกจากกันชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนก็จะเคลื่อนที่ลงมาอยู่ในระดับเดิม ชิ้นงานที่นำมาทดลองมีลักษณะเป็นฟันทันตัวสதுที่หล่อติดอยู่กับเรซินหรือปูนพลาสติกอร์รูปลูกบาศก์ขนาดประมาณ 25x25x25 มิลลิเมตร

ดังนั้นจึงกำหนดให้ชุดจับยึดชิ้นงานมีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง 25, 25 และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อให้มีขนาดพอดีกับชิ้นงาน ชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนและชุดล่างที่ออกแบบจะต้องมีลักษณะเฉพาะดังนี้ ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างจะต้องออกแบบให้สามารถเลื่อนในแนวระดับได้ก่อนจะยึดแน่นเพื่อให้สามารถปรับตำแหน่งการขบกันของฟันหรือการกระแทกของชิ้นงานตามต้องการ สำหรับชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนจะอยู่นิ่งและต่อกับโพลดเซลล์ จะออกแบบให้ยึดชิ้นงานตามขนาดที่กำหนดและสามารถยึดกับโพลดเซลล์ได้ แบบโดยละเอียดของชุดจับยึดชิ้นงานจะอยู่ในภาคผนวก ก (ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง DWG – 001 – 025 และชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน DWG – 001 – 028)



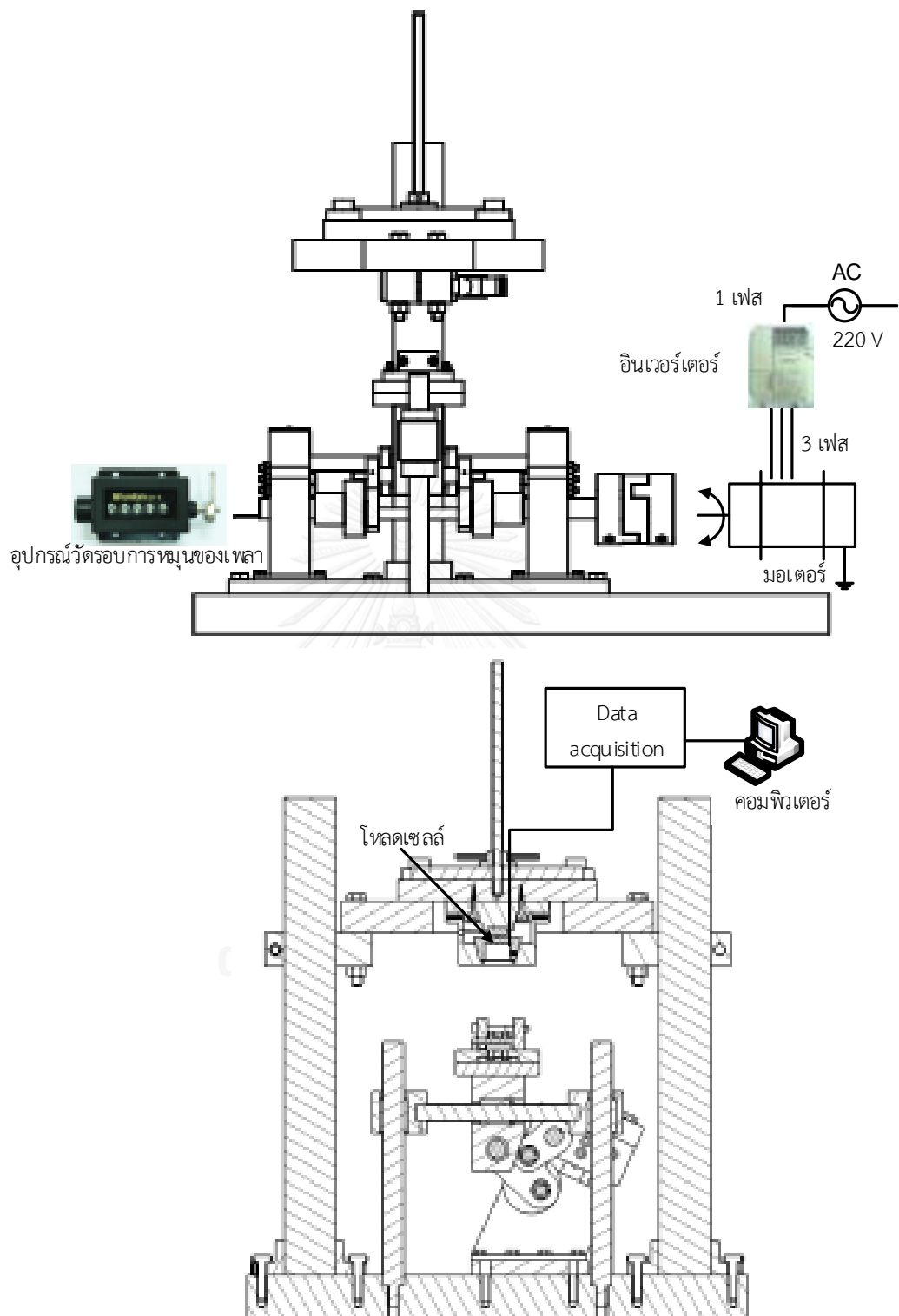
บทที่ 4

การสอบทวนชุดทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการสอบทวนชุดทดลองหลังจากที่ออกแบบและสร้างชุดทดลองแล้วเสร็จ การสอบทวนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของชุดทดลองเพื่อสังเกตการทำงานของชุดทดลองในภาพรวม ได้แก่ ลักษณะการทำงานของชุดทดลองข้อต่อ 4 ชิ้น การทำงานของชิ้นส่วนต่างๆ ของชุดทดลองขณะทำงาน และการปรับความถี่การเคี้ยว ส่วนที่สองเป็นการสอบทวนการทำงานของชุดทดลองโดยละเอียดเพื่อประเมินคุณสมบัติและประสิทธิภาพของชุดทดลองเทียบกับคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในการออกแบบ ซึ่งการสอบทวนในส่วนนี้จะประกอบด้วย 3 หัวข้อ หัวข้อแรกเป็นการสอบทวนวิธีการเคี้ยวของชุดทดลองเทียบกับวิธีการเคี้ยวที่ออกแบบไว้ หัวข้อที่สองเป็นการสอบทวนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยวของชุดทดลอง หัวข้อสุดท้ายเป็นการทดสอบการขบเคี้ยวของฟันหรือชิ้นงานทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะของฟันที่สัมผัสบริเวณผิวหน้าของฟันเมื่อฟันขบกัน ก่อนที่จะลงไปบรรยายละเอียดของการสอบทวนดังกล่าว จะอธิบายถึงชุดทดลองโดยสังเขปเพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของชุดทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ชุดทดลอง

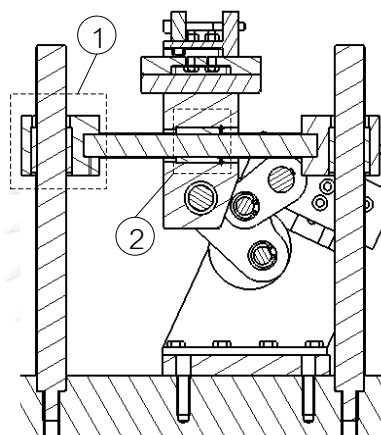
ชุดทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ชุดทดลองประกอบด้วยเครื่องต้นแบบ เพลาชับของกลไกข้อต่อจะต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 0.2 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบ 1720 รอบต่อนาที ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 60 เฮิร์ตซ์ อัตราทด 1:15 มอเตอร์ขับเคลื่อนกลไกข้อต่อโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Yaskawa รุ่น J1000 อินเวอร์เตอร์นี้ยังทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจาก 1 เฟส เป็น 3 เฟส ปลายของเพลาก็ด้านหนึ่งของกลไกข้อต่อจะต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดจำนวนรอบการหมุนของเพลาชับซึ่งเท่ากับจำนวนรอบการเคี้ยว โหลดเซลล์ที่ใช้สำหรับวัดแรงนั้นจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ประมวลผลยี่ห้อ Kyowa รุ่น PCD - 300A และเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.1 แผนผังการเตรียมเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์สำหรับการทดสอบ

4.2 การทดสอบการทำงานเบื้องต้นของชุดทดลอง

การทดสอบเบื้องต้นประกอบด้วยการทำงานทั่วไปของชุดทดลอง เริ่มต้นที่การสังเกตข้อบกพร่องของการเคลื่อนไหวของกลไกข้อต่อซึ่งจัดเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ เพื่อที่จะได้ปรับปรุงแก้ไขก่อนที่จะทำการทดสอบจริง การทดสอบทำโดยการเปิดให้มอเตอร์หมุนกลไกข้อต่อ พบว่ามีปัญหาการโยกคลอน 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งข้อต่อเลื่อน (sliding joint) ที่สวมกับเสานำ (guiding column) (หมายเลข 1 ในรูปที่ 4.2) และตำแหน่งข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างที่สวมกับท่อนเลื่อน (sliding rod) (หมายเลข 2 ในรูปที่ 4.2) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

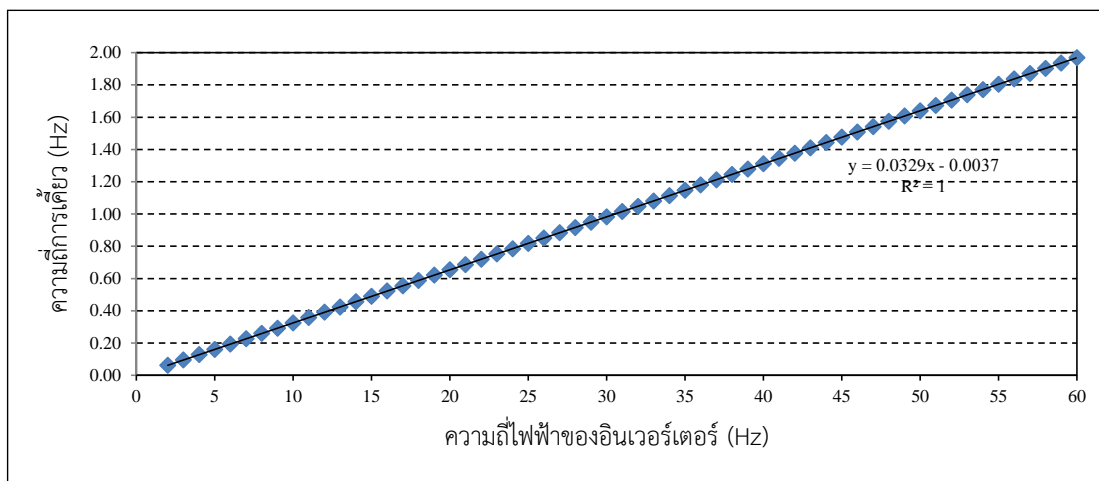


รูปที่ 4.2 แสดงชิ้นส่วนของกลไกที่มีข้อบกพร่อง

สาเหตุที่เกิดการโยกคลอนมาจากตลับลูกปืนที่ใช้มีขนาดสั้นเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของตลับลูกปืน การแก้ไขคือออกแบบชิ้นส่วนข้อต่อเลื่อนและข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างใหม่ โดยให้มีพื้นที่สำหรับสวมตลับลูกปืนที่มีความยาวเพิ่มขึ้นได้ และเปลี่ยนขนาดตลับลูกปืนใหม่ กล่าวคือ ตลับลูกปืนของข้อต่อเลื่อนเดิมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูใน 20 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร ในการปรับปรุงชุดทดลองจึงเปลี่ยนตลับลูกปืนให้มีความยาว 60 มิลลิเมตร และตลับลูกปืนของข้อต่อฐานของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างเดิมใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูใน 16 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร เปลี่ยนเป็นความยาว 60 มิลลิเมตร รายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงการออกแบบในส่วนนี้สามารถดูได้ในภาคผนวก ก หลังการปรับปรุงพบว่าสามารถแก้ไขปัญหาการโยกคลอนได้

ต่อมาเป็นการทดลองปรับเปลี่ยนความถี่การเคี้ยวด้วยอินเวอร์เตอร์ การปรับความถี่การเคี้ยวจะปรับที่ความถี่ทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งปรับได้ในช่วง 1.50 – 60.00 เฮิร์ตซ์ การทดลองเริ่มทำที่ความถี่ไฟฟ้า 2 เฮิร์ตซ์ แล้วบันทึกความถี่ของรอบการหมุน จากนั้นเพิ่มความถี่ไฟฟ้าขึ้นทีละ

1 เฮิร์ตซ์ จนถึง 60 เฮิร์ตซ์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 ความถี่การเคี้ยวสูงสุดคือ 1.97 เฮิร์ตซ์ เมื่อความถี่ไฟฟ้าเป็น 60 เฮิร์ตซ์ และที่ความถี่ไฟฟ้า 2 เฮิร์ตซ์ จะมีความถี่การเคี้ยวอยู่ที่ 0.06 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กับความถี่การเคี้ยว

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่ออกแบบไว้ที่ 1 – 2 เฮิร์ตซ์ จะเห็นว่าเครื่องต้นแบบจะมีช่วงความถี่การเคี้ยวที่กว้างกว่าที่ออกแบบไว้แต่ไม่สามารถทำความถี่การเคี้ยวสูงสุดที่ 2 เฮิร์ตซ์ ได้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ที่นำมาใช้กับเครื่องต้นแบบนี้มีความเร็วรอบสูงสุด 1720 รอบต่อนาทีที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์และความถี่ไฟฟ้า 60 เฮิร์ตซ์ โดยมีอัตราทดของมอเตอร์เท่ากับ 1:15 ทำให้ความเร็วรอบสูงสุดลดเหลือประมาณ 114 รอบต่อนาที หรือเท่ากับความถี่การเคี้ยว 1.9 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงแก้ไขส่วนนี้ไม่ได้ นอกจากจะเปลี่ยนตัวมอเตอร์หรือเปลี่ยนอัตราทดให้ลดลง อย่างไรก็ตามความถี่การเคี้ยวสูงสุด 1.9 เฮิร์ตซ์ ก็เพียงพอกับการทดลองและแตกต่างจากความถี่สูงสุดที่ต้องการคือ 2 เฮิร์ตซ์ เพียงเล็กน้อย จากสมการของเส้นแนวโน้มที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.3 ทำให้สามารถกำหนดค่าสำหรับการปรับเปลี่ยนความถี่การเคี้ยวได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งในที่นี่จะกำหนดช่วงการปรับความถี่การเคี้ยวให้อยู่ในช่วง 0.1 – 1.9 เฮิร์ตซ์ เพื่อให้ง่ายในการนำไปใช้งานจริง

ตารางที่ 4.1 ตารางการปรับค่าความถี่การเคี้ยว

ความถี่การเคี้ยว (Hz)	ความถี่ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ (Hz)
0.1	3.15
0.2	6.19
0.3	9.23
0.4	12.27
0.5	15.31
0.6	18.35
0.7	21.39
0.8	24.43
0.9	27.47
1.0	30.51
1.1	33.55
1.2	36.59
1.3	39.63
1.4	42.67
1.5	45.71
1.6	48.74
1.7	51.78
1.8	54.82
1.9	57.86

ต่อมาเป็นการทดสอบการทำงานของโพลเซลล์และการถ่วงน้ำหนักเพื่อควบคุมแรงเคี้ยว จากการทดลองพบว่าแรงเสียดทานระหว่างตลับลูกปืนและเสาทำให้แรงที่วัดได้จากโพลเซลล์มีขนาดมากกว่าน้ำหนักที่ถ่วง สาเหตุดังกล่าวเกิดจากค่าพิกัดความถี่ของเสามากเกินไปทำให้การสวมระหว่างตลับลูกปืนแน่นเกินไปทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากปรับวิธีการเคี้ยวของชุดทดลองเป็นวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวจะทำให้เกิดแรงใน 2 แนวแกน คือ แรงแนวตั้ง และแรงแนวระดับ แรงแนวตั้งเกิดขึ้นขณะยกฐานวางตุ้มน้ำหนักขึ้นในขณะที่ขึ้นงานด้านล่างกระแทกกับชิ้นงานด้านบน และแรงในแนวระดับเกิดจากการที่ชิ้นงานด้านล่างเคลื่อนที่เฉือนกับผิวหน้าของชิ้นงานด้านบน แรงในแนวระดับนี้ทำให้ตลับลูกปืนของฐานวางตุ้มน้ำหนักเบียดกับเสาที่สวมอยู่และเพิ่มแรง

เสียดทาน ดังนั้นจึงต้องกลึงปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาที่สวมกับตลับลูกปืนใหม่โดยกลึงปรับจากพิกัดความเผื่อเดิม h6 เป็นพิกัดความเผื่อ g6 สำหรับการวัดแรงและการควบคุมแรงโดยละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไป

4.3 การสอบทวนชุดทดลอง

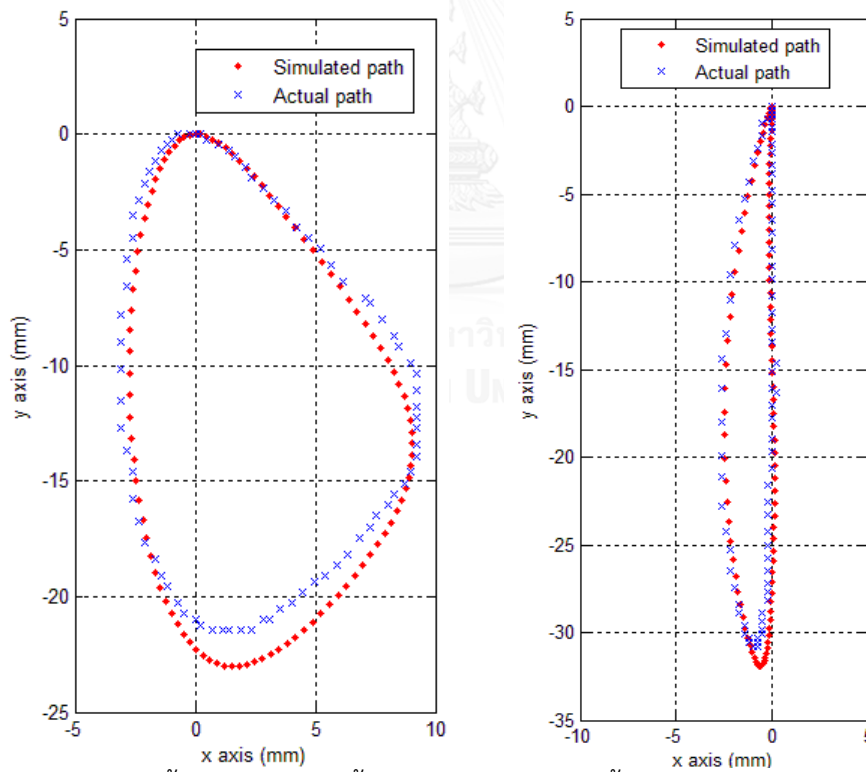
การทดสอบทำเพื่อประเมินคุณสมบัติและความสามารถของเครื่องต้นแบบเทียบกับคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในการออกแบบ นอกจากนี้ยังเป็นการประเมินข้อบกพร่องของเครื่องต้นแบบเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงต่อไป ดังนั้นการทดสอบในขั้นนี้จะเป็นแนวทางที่จะใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่องของชุดทดลองก่อนที่จะใช้ในการทดสอบชิ้นงานจริง ซึ่งการทดสอบการทำงานชุดทดลองจะมีการทดสอบใน 2 หัวข้อหลัก คือ การทดสอบวิธีการเคี้ยว และการทดสอบการวัดและควบคุมแรงเคี้ยว ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไป แต่ก่อนหน้านั้นจะต้องทำการทดสอบเบื้องต้นก่อน ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไปนี้

4.3.1 การสอบทวนวิธีการเคี้ยว

การสอบทวนทำโดยบันทึกการเคลื่อนไหวของกลไกในรูปแบบไฟล์ภาพยนตร์แล้วนำจุดบริเวณมุมขอบของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างมาพล็อตตำแหน่งเพื่อสร้างวิธีการเคี้ยว รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างการพล็อตจากไฟล์ภาพยนตร์ที่บันทึกไว้ รายละเอียดในการสอบทวนวิธีการเคี้ยวประกอบด้วย การถ่ายวิดีโอการเคี้ยวของชุดทดลองใน 1 รอบการเคี้ยว ที่ความถี่การเคี้ยว 0.4 เฮิรตซ์ จากนั้นตัดเอาภาพในแต่ละเฟรมของวิดีโอออกมาแล้วนำแต่ละภาพมาเปิดด้วยโปรแกรม Techdig ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ผู้ใช้สามารถพล็อตจุดลงบนรูปและสามารถทราบตำแหน่งของจุดที่พล็อตในแนวแกน $x - y$ โดยโปรแกรมจะหาจุดตำแหน่งจาก pixel ของรูปที่นำมาพล็อตจุด เมื่อกำหนดสเกลขนาดจริงในโปรแกรมแล้วพล็อตตำแหน่งของวิธีการเคี้ยวจนครบ 1 รอบการเคี้ยว จะได้จุดที่พล็อตทั้งหมดดังรูปที่ 4.4 จากนั้นนำข้อมูลตำแหน่งของจุดที่พล็อตดังกล่าวมาเขียนกราฟก็จะได้วิธีการเคี้ยวของการสอบทวน รูปที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบวิธีการเคี้ยวที่ออกแบบไว้และวิธีการเคี้ยวที่วัดได้จากชุดทดลองโดยวิธีการเคี้ยวมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.4 การพล็อตตำแหน่งวิถีการเคลื่อนที่จากการถ่ายภาพวิดีโอ



(ก) วิถีการเคลื่อนที่แบบการขบเคี้ยว

(ข) วิถีการเคลื่อนที่แบบการกระแทกแนวตั้ง

รูปที่ 4.5 วิถีการเคลื่อนที่ของชุดทดลองเปรียบเทียบกับวิถีการเคลื่อนที่จากการออกแบบ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าได้ว่าวิธีการเคี้ยวของเครื่องมีความใกล้เคียงกับวิธีการเคี้ยวที่ต้องการ โดยส่วนที่มีความสำคัญที่สุดคือบริเวณตำแหน่งด้านบนสุดของวิธีการเคี้ยวที่จะเป็นบริเวณที่ฟันล่าง เข้าขบกับฟันบน สังเกตได้ว่าวิธีการเคี้ยวของชุดทดลองจะไม่ทับกันกับวิธีการเคี้ยวที่ออกแบบไว้อย่าง สมบูรณ์แบบ ทั้งนี้เพราะในการทำงานจริงของชุดทดสอบมีเรื่องของค่าพิคัดความเผื่อ (tolerance) ของขนาดชิ้นส่วนต่าง ๆ และค่าความความพอดีในการสวม (fit) ของการประกอบเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้วิธีการเคี้ยวของชุดทดสอบคลาดเคลื่อนไปจากวิธีการเคี้ยวที่ออกแบบไว้ในระดับหนึ่ง

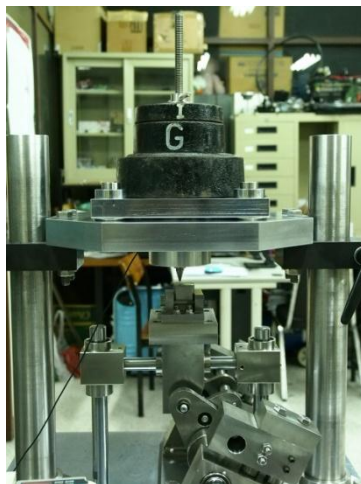
4.3.2 การสอบทนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว

หลังจากทราบวิธีการเคี้ยวของชุดทดลองได้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้แล้ว ในหัวข้อนี้จะ สอบทนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยวของชุดทดลองเพื่อตรวจสอบว่าชุดทดลองสามารถควบคุม แรงเคี้ยวได้ตามที่กำหนดและสามารถวัดแรงเคี้ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมแรงเคี้ยวใช้ตุ้ม น้ำหนักถ่วง น้ำหนักที่ใช้ในการสอบทนมีค่าอยู่ระหว่าง 6.8 – 14.8 กิโลกรัม โดยในขณะที่ยังไม่มีตุ้ม น้ำหนัก จะมีเฉพาะน้ำหนักของชุดฐานรองตุ้มน้ำหนักซึ่งหนัก 6.8 กิโลกรัม ในการสอบทนจะใช้ตุ้ม น้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม 2 ก้อน (1 kg No.1 และ No.2) 2 กิโลกรัม 1 ก้อน และ 5 กิโลกรัม 1 ก้อน โดยเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม ผลการสอบเทียบชั่งน้ำหนักของชุดฐานรองตุ้มน้ำหนักและตุ้ม น้ำหนักดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเทียบชุดฐานรองตุ้มน้ำหนักและตุ้มน้ำหนัก

แทนน้ำหนัก	น้ำหนักที่ชั่งได้ (กิโลกรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ชุดฐานรองแทนน้ำหนัก	6.815	6.806	6.801	6.807
1 kg No.1	1.000	1.000	0.995	0.998
1 kg No.2	1.000	0.995	0.995	0.997
2 kg	1.995	1.995	1.995	1.995
5 kg	4.985	4.985	4.985	4.985

จากตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่ชั่งได้จะนำไปใช้ในการอ้างอิงกับการสอบทนการวัดแรงและ การควบคุมแรงเคี้ยวต่อไป รูปที่ 4.6 แสดงการควบคุมแรงเคี้ยวโดยใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วงบนชุดฐานรอง ตุ้มน้ำหนัก



รูปที่ 4.6 การควบคุมแรงเคี้ยวด้วยตุ้มน้ำหนัก

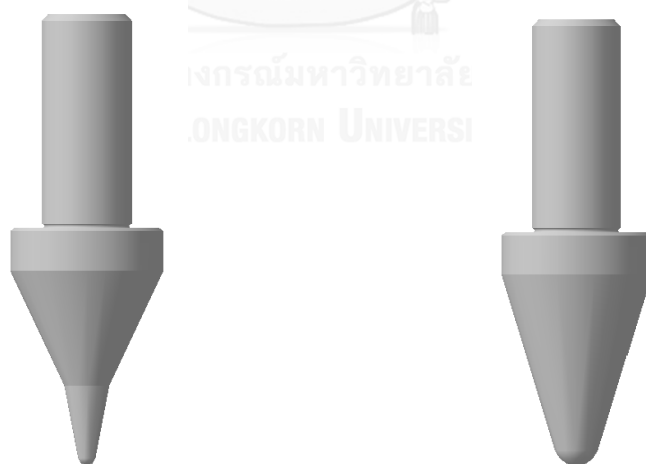
นอกจากตุ้มน้ำหนักแล้ว ส่วนอื่นที่สำคัญสำหรับการสอบทนการวัดแรงและการควบคุมแรงเคี้ยว ได้แก่ ชิ้นงาน และหัวกดชิ้นงานซึ่งจะเคลื่อนที่มาขบกัน การสอบทนจะติดตัวชิ้นงานเหล็กสี่เหลี่ยมที่มีผิวเรียบขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และสูง 30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.7 กับชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างแล้วให้กลไกเคลื่อนที่เข้ากระแทกหรือขบกับชิ้นงานที่ยึดกับชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนที่อยู่นิ่ง เหตุผลที่ใช้ชิ้นงานลักษณะนี้แทนที่จะใช้ฟันจริงหรือฟันเทียมของมนุษย์ เพราะฟันมีรูปร่างของผิวบนหน้าฟันเป็นส่วนเว้าส่วนโค้งมาก ทำให้แรงที่วัดได้ไม่สม่ำเสมอเพราะชิ้นงานสัมผัสกันไม่สม่ำเสมอและมีการกระแทกเป็นระยะ ๆ ตามรูปร่างของฟัน ยากต่อการวิเคราะห์แรงเคี้ยวที่วัดได้ นอกจากนี้การจัดตั้งตำแหน่งของหัวกดชิ้นงานบนผิวของชิ้นงานก็ทำได้ยาก เพราะฟันแต่ละซี่หรือจากคนละคนกันก็มีรูปร่างแตกต่างกัน ทำให้การทดลองซ้ำทำไม่ได้ แต่ถ้าใช้ฟันเทียมก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงและใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างนาน ดังนั้นชิ้นงานเหล็กสี่เหลี่ยมที่มีผิวเรียบนี้จึงเหมาะสมสำหรับการสอบทนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว



รูปที่ 4.7 ชิ้นงานเหล็กทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ

จากการศึกษาการทดลองทางทันตกรรมต่าง ๆ พบว่ามีการใช้หัวกดที่มีรูปร่าง ขนาด และวัสดุที่ใช้ทำหัวกดที่แตกต่างกัน รูปร่างของหัวกดที่ใช้มี 2 แบบ คือทรงกรวย และทรงกลม [26] โดยหัวกดทรงกรวยมีปลายเป็นทรงกลมรัศมี 0.6 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุเซรามิก ซึ่งรูปทรงและขนาดของหัวกดดังกล่าวได้มาจากการอ้างอิงรูปร่างของปุ่ม (cusp) หรือส่วนปลายเขี้ยวของฟันกรามบนซี่ที่สามของมนุษย์ซึ่งเป็นส่วนที่จะขบกับฟันกรามล่าง ปุ่มดังกล่าวมีรูปร่างคล้ายโดมที่มีขนาดเล็ก ส่วนโค้งของโดมดังกล่าวสามารถแทนได้ด้วยส่วนโค้งของทรงกลมที่มีรัศมี 0.6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยทางทันตกรรมอื่น ๆ ที่เลือกใช้หัวกดชนิดนี้ในการทดลองกับทั้งวัสดุทางทันตกรรมและฟันเทียม [27, 28] ส่วนหัวกดทรงกลมที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ตั้งแต่ 3 มิลลิเมตร จนถึง 13 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำหัวกด คือ เซรามิก เหล็กกล้าไร้สนิม และทังสเตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide) ใช้ในการทดสอบทั้งการสึกหรอและการแตกหักกับวัสดุทางทันตกรรมและฟันปลอม [11, 14, 15, 29-33]

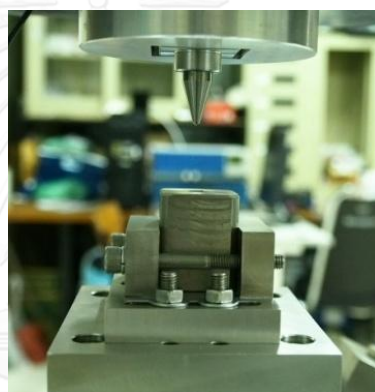
งานวิจัยนี้ได้ทำหัวกด 2 แบบ คือ หัวกดทรงกรวยที่มีปลายขนาดรัศมี 0.6 มิลลิเมตร และหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง ค่าความแข็งประมาณ 81.5 – 95.5 HRA (rockwell scale A) เหมาะสำหรับนำมาใช้ทดสอบวัสดุทางทันตกรรมซึ่งมักจะเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น เซรามิก เป็นต้น เมื่อออกแบบหัวกดดังกล่าวให้เหมาะสมกับเครื่องต้นแบบแล้วจะได้หัวกดที่มีมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.8



(ก) หัวกดทรงกรวยที่มีปลายขนาดรัศมี 0.6 มิลลิเมตร (ข) หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

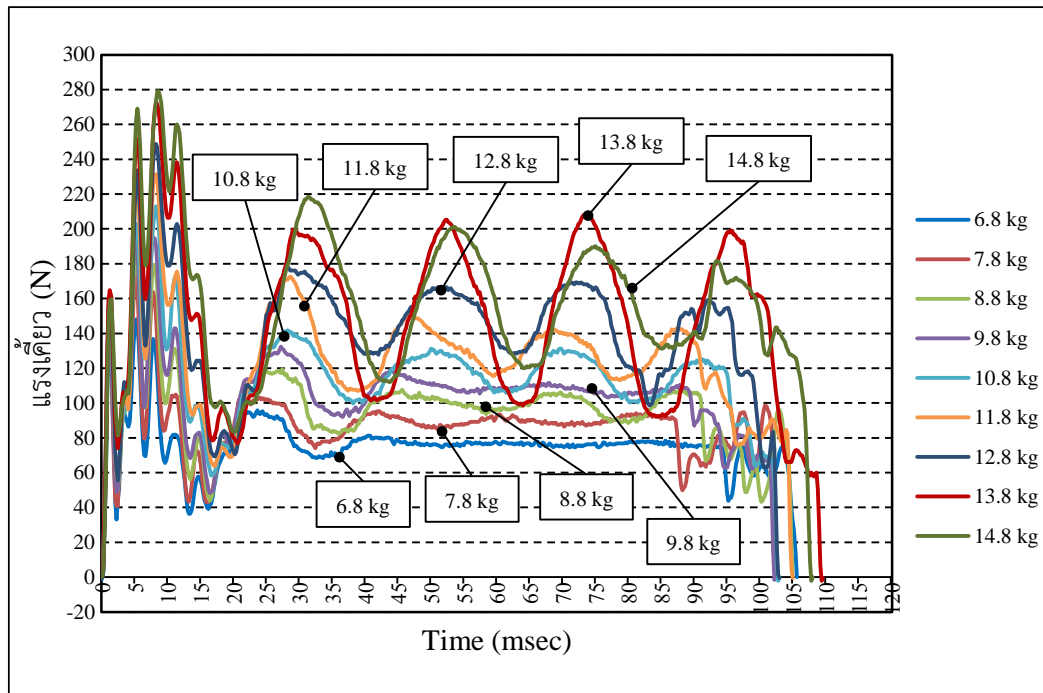
รูปที่ 4.8 หัวกดขึ้นงาน

การใช้หัวกดกดชิ้นงานมีข้อดีที่สามารถปรับตั้งตำแหน่งที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อผิวหน้าของชิ้นงานตามความต้องการในการทดลองได้ง่าย ส่วนข้อเสียคือให้ผลการทดสอบแตกต่างจากผลทางคลินิกเพราะหัวกดมีลักษณะแตกต่างจากฟัน ลักษณะของการสัมผัสระหว่างหัวกดชิ้นงานกับชิ้นงานจึงแตกต่างจากการขบเคี้ยวของฟันมนุษย์ นอกจากนี้คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำหัวกดก็อาจเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนไปจากผลทางคลินิก แม้ว่าการใช้หัวกดในการทดลองอาจทำให้การเสียหายของชิ้นงานแตกต่างกับการเสียหายของฟันในทางคลินิก แต่การทดลองในลักษณะนี้สามารถแสดงแนวโน้มอายุการใช้งานและเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานหรือวัสดุแบบต่าง ๆ ได้ การสอบทวนการวัดแรงและการควบคุมแรงเคี้ยวจะใช้หัวกดชิ้นงานที่มีปลายทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.8 (ข) การติดตั้งชิ้นงานทดสอบและหัวกดชิ้นงานของชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9

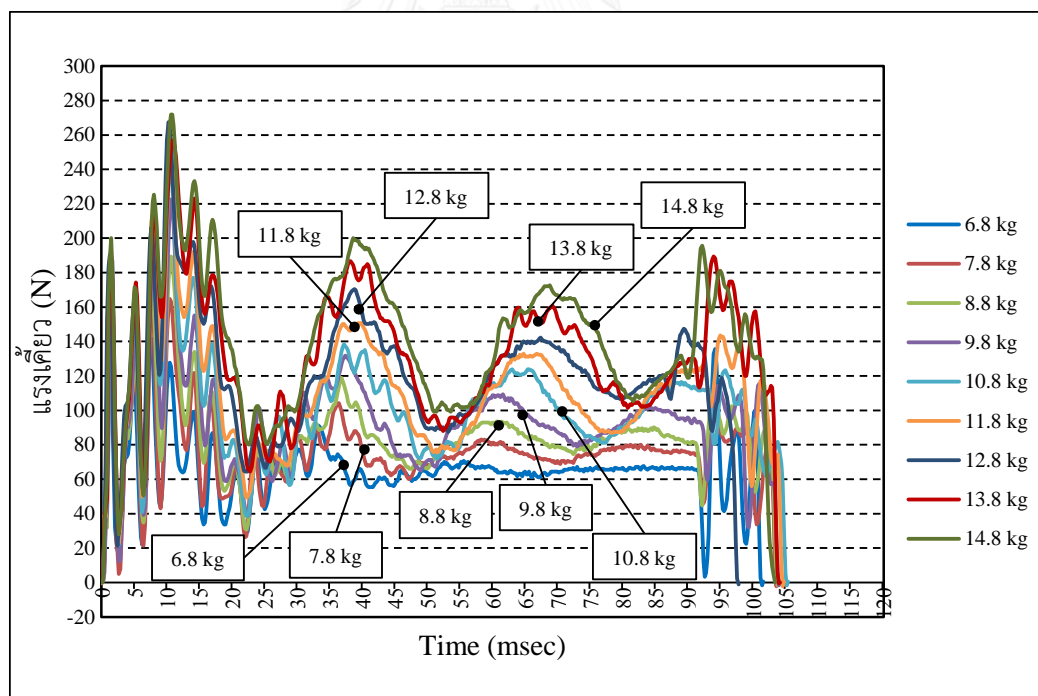


รูปที่ 4.9 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบและหัวกดชิ้นงานของชุดทดลอง

การสอบทวนจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด แต่ละชุดทดลองกับวิธีการเคี้ยว 2 แบบ คือวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว และวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกในแนวตั้งดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว การทดลองชุดที่ 1 กำหนดความถี่การเคี้ยว 1 เฮิร์ตซ์ และเปลี่ยนแรงเคี้ยวโดยใช้น้ำหนักถ่วง 6.8 ถึง 14.8 กิโลกรัม โดยเพิ่มทีละ 1 กิโลกรัม ความถี่ของการเก็บข้อมูล (sampling rate) ของ PCD – 300A จากโพลดเซลล์ คือ 5,000 จุดข้อมูลต่อวินาที (5,000 เฮิร์ตซ์) ผลการสอบทวนได้ผลดังรูปที่ 4.10



(ก) วิธีกรเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว



(ข) วิธีกรเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

รูปที่ 4.10 ผลการสอบทวนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว 6.8-14.8 kg

ความถี่การเคี้ยว 1 Hz

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้นขึ้นงานจะกระแทกกับหัวกดทำให้กราฟแรงมีลักษณะเป็นแรงกระแทก (impact) แรงที่จึงมีค่ามากก่อนจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ขนาดของแรงเคี้ยวมีแนวโน้มแปรผันตามน้ำหนักถ่วง เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.10 มาคำนวณแรงเฉลี่ยและแรงสูงสุดจะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.3 แรงเฉลี่ยจะคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดหารด้วยจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด (ข้อมูลดิบที่ได้การเก็บข้อมูลของ PCD – 300A จะแสดงเป็นลำดับของข้อมูล ไม่ได้แสดงตามหน่วยเวลา หน่วยเวลาในแกนของกราฟเป็นการแปลงลำดับของข้อมูลเป็นหน่วยเวลาในภายหลัง โดยคำนวณจากความถี่การเก็บข้อมูล 5,000 เฮิร์ตซ์)

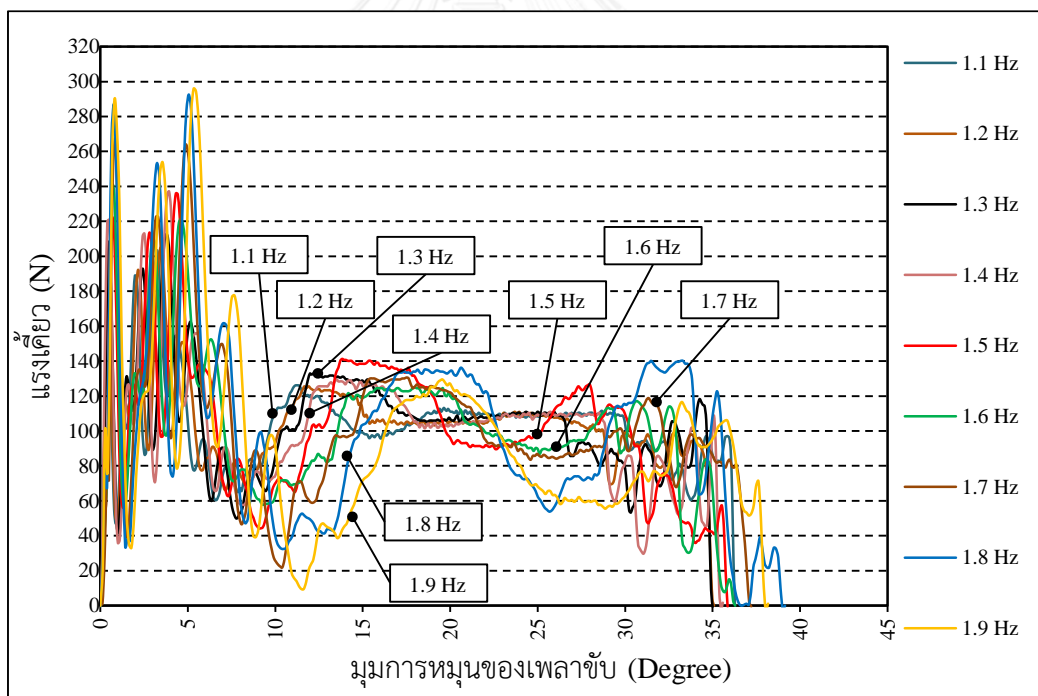
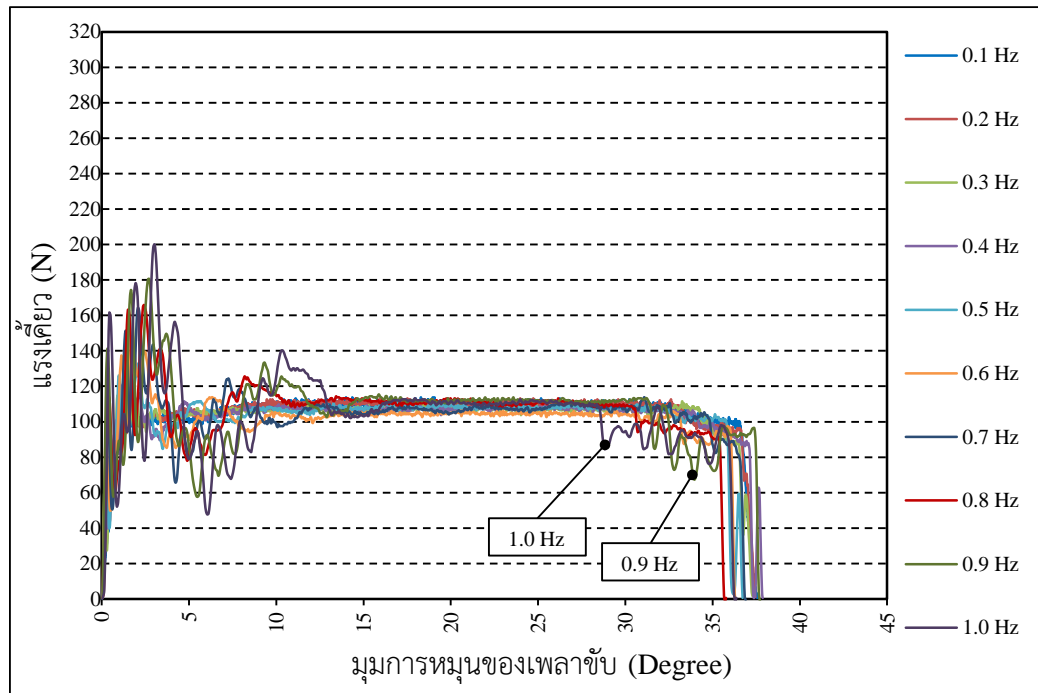
ตารางที่ 4.3 แรงเคี้ยวที่วัดได้ที่ความถี่การเคี้ยว 1 เฮิร์ตซ์ และที่แรงเคี้ยวควบคุม 6.8 – 14.8 กิโลกรัม

น้ำหนักถ่วง		แรงเคี้ยวที่วัดได้ (N)			
		การขบเคี้ยว		การกระแทกในแนวตั้ง	
kg	N	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
6.8	66.78	75.18	147.61	66.01	160.87
7.8	76.57	87.63	171.53	75.83	181.43
8.8	86.35	95.08	184.42	84.61	191.33
9.8	96.14	104.33	198.06	93.73	222.16
10.8	105.92	114.32	214.13	102.04	240.47
11.8	115.68	123.34	234.68	110.64	250.56
12.8	125.47	138.93	249.25	122.22	263.08
13.8	135.25	145.56	273.92	131.92	260.28
14.8	145.04	155.88	277.47	140.77	269.25

จากตารางที่ 4.3 น้ำหนักของตุ้มน้ำหนักในตารางที่ 4.2 ใช้เปรียบเทียบกับแรงเคี้ยวที่วัดได้จากโพลดเซลล์ เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่แสดงในตารางจะพบว่าแรงเคี้ยวที่วัดได้ทั้งในวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกในแนวตั้งและวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวมีแนวโน้มเดียวกันกับขนาดของแรงเคี้ยวควบคุมที่กำหนด นั่นคือเมื่อเพิ่มขนาดของแรงเคี้ยวควบคุม แรงเคี้ยวที่วัดได้ก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยแรงเคี้ยวที่วัดได้ในวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวมีค่ามากกว่าแรงเคี้ยวควบคุม 9.67 นิวตัน โดยเฉลี่ย ในขณะที่แรงเคี้ยวที่วัดได้ในวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกในแนวตั้งมีค่าน้อยกว่าแรงเคี้ยวควบคุม 2.82 นิวตัน โดยเฉลี่ย สาเหตุที่ทำให้แรงเคี้ยวที่วัดได้ในวิธีการเคี้ยวแบบการขบ

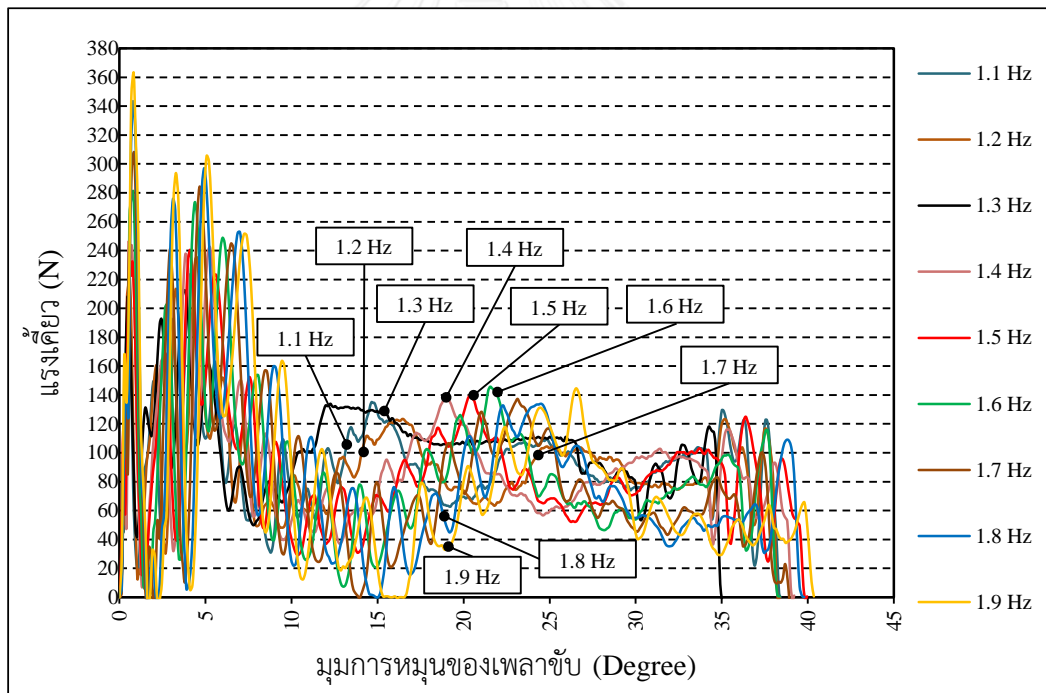
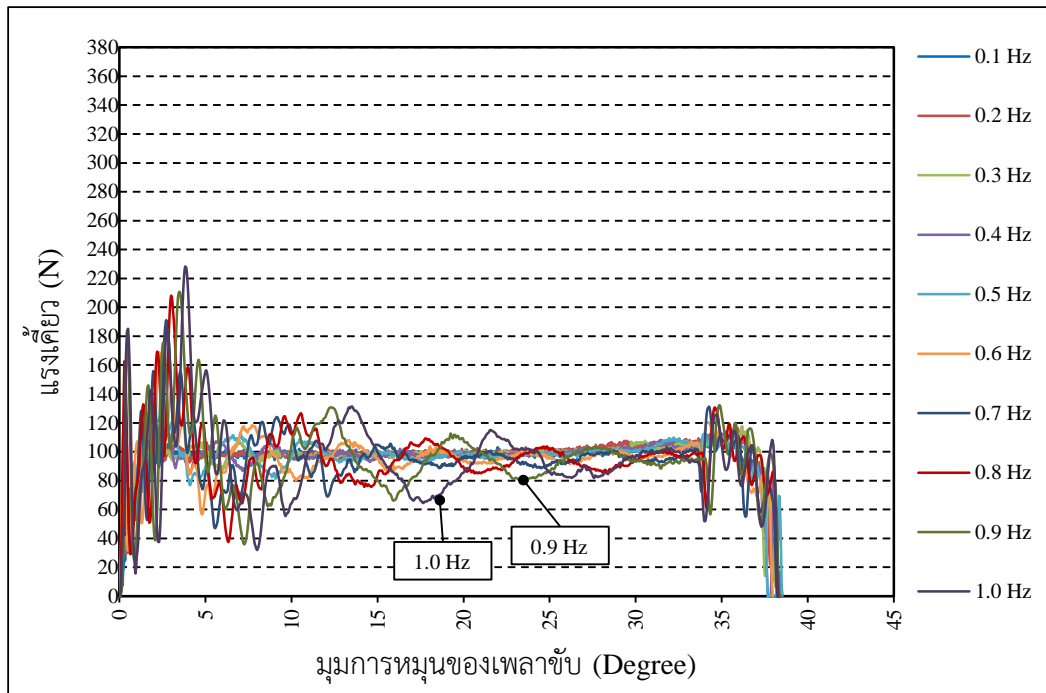
เคียวมีค่ามากกว่านั้นน่าจะเกิดจากแรงเสียดทานของระบบ กล่าวคือ เมื่อชิ้นงานเคลื่อนเข้ากระทบกับหัวกดและดันหัวกดขึ้น ก็เกิดแรงดันหัวกดให้เคลื่อนไปในแนวระนาบตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้นด้วย ทำให้ตั้ลบลูกปืนของฐานรองแท่นน้ำหนักไปเบียดเข้ากับเสาที่สวมประกอประกกันอยู่เกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นจากปรกติทำให้แรงที่วัดได้มีขนาดมากกว่าแรงเคียวควบคุม ในขณะที่วิธีการเคียวแบบกระแทกแนวตั้งจะไม่เกิดแรงในลักษณะนี้หรือถึงแม้จะเกิดก็มีขนาดน้อยกว่า อีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการที่การเริ่มต้นกระแทกกันระหว่างชิ้นงานกับหัวกดขึ้นงานมีลักษณะเป็นแรงกระแทก (impact) ทำให้แรงที่วัดได้ในช่วงแรกมีค่าดังจะเห็นได้จากค่าแรงเคียวสูงสุดที่วัดได้ในตารางที่ 4.3 ที่มีค่ามากกว่าแรงเคียวเฉลี่ยค่อนข้างมาก อีกทั้งมีการผันผวนของแรงในช่วงดังกล่าวมาก ส่งผลให้แรงเคียวเฉลี่ยที่คำนวณได้อาจแตกต่างไปจากแรงเคียวควบคุม การผันผวนของแรงที่วัดได้จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดหากลดความถี่การเคียวให้ช้าลงดังจะกล่าวถึงในการทดลองชุดที่ 2

การทดลองชุดที่ 2 จะทดสอบการขบเคียวเมื่อถ่วงแท่นน้ำหนักควบคุมแรงเคียวอยู่ที่ 10 กิโลกรัม ในขณะที่ปรับเปลี่ยนความถี่การเคียวตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.9 เฮิร์ตซ์ โดยเพิ่มความถี่การเคียวไปครั้งละ 0.1 เฮิร์ตซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของแรงเคียวที่วัดได้เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่การเคียว โดยมีการถ่วงตุ้มน้ำหนักควบคุมแรงเคียวอยู่ที่ 9.8 กิโลกรัม ผลการสอบทวนการควบคุมแรงเคียวและการวัดแรงได้ผลดังรูปที่ 4.11 ในรูปเป็นการพล็อตกราฟระหว่างแรงเคียวและมุมการหมุนของเพลลาขับ จะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้นการกระแทกระหว่างชิ้นงานกับหัวกดขึ้นงานกราฟแรงจะมีลักษณะเป็นแรงที่เป็นแรงกระแทก (impact) ทำให้แรงที่เกิดขึ้นมีค่ามากแล้วจึงมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง และเมื่อความถี่การเคียวเพิ่มขึ้นกราฟแรงเคียวที่วัดได้มีขนาดของแรงในช่วงแรกที่เป็นแรงกระแทกมีค่ามากขึ้น กล่าวคือชิ้นงานจะขบกับหัวกดขึ้นงานด้วยความเร็วที่สูงขึ้นทำให้ความเร็วในการกระแทกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงที่เกิดจากการกระแทกในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความถี่การเคียวถึง 0.9 เฮิร์ตซ์ กราฟจะเริ่มมีความผันผวนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.11 มาคำนวณแรงเฉลี่ยจะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.4



(ก) วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

รูปที่ 4.11 ผลการสอบทวนการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว 9.8 kg
ความถี่การเคี้ยว 0.1-1.9 Hz



(ข) วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

รูปที่ 4.11 ผลการสอบทานการวัดแรงและควบคุมแรงเคี้ยว 9.8 kg
ความถี่การเคี้ยว 0.1-1.9 Hz (ต่อ)

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดแรงเคี้ยวที่แรงเคี้ยวควบคุม 9.8 กิโลกรัม (96.14 นิวตัน) ที่ความถี่การเคี้ยว 0.1 – 1.9 เฮิรตซ์

ความถี่การเคี้ยว	แรงเคี้ยวที่วัดได้ (N)			
	การขบเคี้ยว		การกระแทกในแนวตั้ง	
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
0.1 Hz	104.15	113.60	95.50	110.05
0.2 Hz	104.71	113.42	97.34	115.66
0.3 Hz	103.31	126.68	97.04	117.90
0.4 Hz	102.71	128.74	96.42	124.81
0.5 Hz	103.01	134.90	96.07	138.45
0.6 Hz	102.51	148.54	96.01	169.10
0.7 Hz	104.71	164.61	95.52	190.77
0.8 Hz	103.62	172.09	96.05	208.89
0.9 Hz	105.64	183.30	95.52	213.75
1.0 Hz	105.43	197.68	94.19	224.40
1.1 Hz	105.00	200.86	93.25	225.15
1.2 Hz	103.94	208.71	91.91	237.48
1.3 Hz	104.92	214.13	91.68	236.55
1.4 Hz	103.19	235.43	90.21	244.6
1.5 Hz	102.27	233.75	88.84	252.99
1.6 Hz	102.70	243.65	87.66	287.74
1.7 Hz	102.46	265.88	83.86	305.68
1.8 Hz	101.86	282.51	84.12	346.79
1.9 Hz	95.76	300.08	82.28	363.79

จากตารางที่ 4.4 สังเกตได้ว่าผลการทดลองชุดนี้เป็นการทดลองที่เปลี่ยนความถี่การเคี้ยวโดยคงแรงเคี้ยวควบคุมไว้ที่ 9.8 กิโลกรัม แรงเคี้ยวของวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวมีค่ามากกว่าแรงเคี้ยวของวิธีการเคี้ยวแบบกระแทกแนวตั้งเช่นเดียวกับการทดลองชุดแรกที่แปรผันแรงเคี้ยวควบคุมโดยคงความถี่การเคี้ยวไว้ที่ 1 เฮิรตซ์ ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแรงเคี้ยวที่วัดได้ในแต่ละค่าความถี่การเคี้ยว พบว่าเมื่อความถี่การเคี้ยวมีค่ามากขึ้นจะทำให้

ให้แรงเคี้ยวที่วัดได้มีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการทดลองด้วยวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทก ในแนวตั้งจะเห็นแนวโน้มการลดลงของแรงเคี้ยวที่วัดได้อย่างชัดเจน ในขณะที่การทดลองด้วยวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว แรงเคี้ยวที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละความถี่การเคี้ยวแต่จะเริ่มมีค่าลดลงที่ความถี่ 1.7 – 1.9 เฮิรตซ์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่อทำการทดลองด้วยความถี่การเคี้ยวที่สูงจะทำให้ชิ้นงานด้านล่างเข้ากระทบกับหัวกดชิ้นงานที่อยู่ด้านบนด้วยความเร็วที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงกระแทกมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการผันผวนของแรงมากขึ้นดังจะสังเกตเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 4.11 ที่จะเห็นว่ากราฟมีการผันผวนของแรงมากขึ้นเมื่อความถี่การเคี้ยวมีค่าสูง นอกจากนี้เมื่อชิ้นงานเกิดการกระแทกกันแล้วดันหัวกดชิ้นงานที่อยู่ด้านบนให้เคลื่อนที่ขึ้นอย่างแรงทำให้มีบางช่วงที่หัวกดชิ้นงานไม่สัมผัสกับชิ้นงาน สิ่งเหล่านี้ทำให้การวัดแรงด้วยโพลดเซลล์มีค่าลดลงจากที่ควรจะเป็น การที่การทดลองด้วยวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวมีผลกระทบจากปัญหานี้น้อยกว่าเป็นเพราะแรงเสียดทานดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว

จากผลการวัดแรงเคี้ยวของชุดทดลองโดยใช้โพลดเซลล์ทั้งหมดดังกล่าวมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากขนาดของน้ำหนักที่ใช้ถ่วงเพื่อควบคุมแรงเคี้ยวเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบนี้เป็นแรงแบบพลศาสตร์ (dynamic force) และเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่ามีแรงในลักษณะที่เป็นแรงกระแทก (impact force) ในตอนเริ่มต้นที่ชิ้นงานเริ่มกระแทกกัน จึงทำให้แรงเฉลี่ยที่คำนวณออกมามีค่าต่างไปจากขนาดของน้ำหนักที่ใช้ควบคุมแรงเคี้ยว อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแรงที่โพลดเซลล์วัดได้แปรผันตามน้ำหนักที่วางไว้ ซึ่งตรงตามแนวคิดในการออกแบบ

4.3.3 การทดสอบการขบเคี้ยวของฟันหรือชิ้นงานทดสอบ

การสอบทวนการขบกันของฟันทำได้โดยสังเกตลักษณะการขบกันของฟันในชุดทดลองโดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นฟันกรามของมนุษย์ที่หล่อติดกับวัสดุเรซิน 2 ชุด เพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะการสัมผัสกันของฟันบนและฟันล่างขณะเคี้ยวเมื่อใช้เครื่องจำลองการเคี้ยว ชิ้นงานดังกล่าวเป็นดังรูปที่

4.12

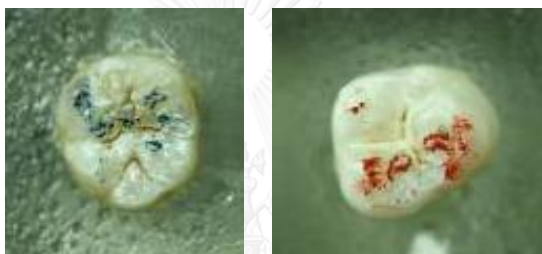


รูปที่ 4.12 ชิ้นงานฟันกรามของมนุษย์ที่หล่อติดกับเรซิน

ชิ้นงานจะยึดกับชุดจับยึดชิ้นงานทั้งชุดบนและชุดล่างเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นพื้นบนและพื้นล่าง การทดสอบจะใช้แผ่นกระดาษสีสำหรับพิมพ์รอยการขบของฟันที่ใช้ในงานทันตกรรม แผ่นกระดาษชนิดนี้แต่ละหน้ามีสีต่างกัน ด้านหนึ่งเป็นสีน้ำเงินอีกด้านเป็นสีแดง ฟันที่ขบกันโดยมีกระดาษนี้คั่นกลางจะติดสีของกระดาษ ลักษณะการขบกันของฟันที่ทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.13



(ก) ภาพฟันขณะขบกัน



(ข) ฟันกรามสีล่าง

(ค) ฟันกรามสีบน

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการขบกันของฟัน

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าบริเวณสัมผัสของฟันล่างจะเป็นแนวอยู่กลางฟันตามแนวการเคลื่อนที่ของฟันล่าง ในขณะที่ฟันบนส่วนที่สัมผัสกันจะเป็นส่วนที่นูนขึ้นมาของฟัน การสอบทวนในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการสัมผัสกันของฟันเป็นแบบกระแทกที่มีการไถลในเวลาเดียวกัน

4.4 สรุปผลการสอบทวนชุดทดลอง

จากผลการสอบทวนชุดทดลองพบว่ามีการทำงานเป็นไปตามตามข้อกำหนดการออกแบบ กล่าวคือ วิธีการเคี้ยวเป็นไปตามวิธีการเคี้ยวที่ออกแบบไว้ให้มีความคล้ายคลึงกับวิธีการเคี้ยวของมนุษย์ในลักษณะของการบดเคี้ยวและสามารถปรับเปลี่ยนวิธีการเคี้ยวให้เป็นแบบการกระแทกในแนวตั้งได้ ในส่วนของการควบคุมแรงเคี้ยวด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักจัดว่ามีความแม่นยำโดยสังเกตได้จากแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักที่ตั้งไว้และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเพิ่มน้ำหนัก ในส่วนต่อมาเมื่อพิจารณาลักษณะของฟันในส่วนที่สัมผัสกันขณะเกิดการขบเคี้ยวจะมีลักษณะที่มีการกระแทกและไถลไปตามผิวฟันตามที่ต้องการให้เกิดขึ้นเหมือนกับที่เกิดในการเคี้ยวของมนุษย์

บทที่ 5

การทดลองทางทันตกรรม

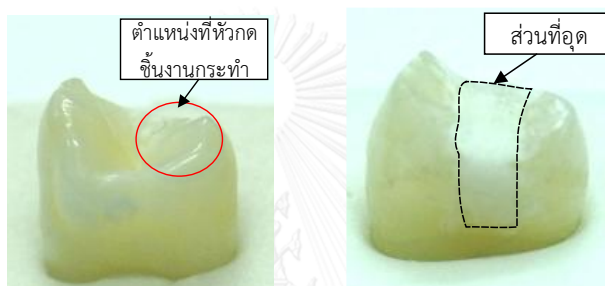
บทที่แล้วได้กล่าวถึงการสอบทวนเครื่องต้นแบบเพื่อให้แน่ใจว่าชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ และใช้ผลการสอบทวนเป็นแนวทางการปรับปรุงชุดทดลองเพื่อให้พร้อมสำหรับใช้ในการทดลองทางทันตกรรม ในบทนี้จะนำชุดทดลองมาใช้ในการทดลองจริงทางทันตกรรม เนื้อหาในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการทดลองทางทันตกรรมไปบางส่วนแล้ว จากการศึกษาพบว่า การทดลองทางทันตกรรมที่เกี่ยวกับการทดสอบทันตวัสดุโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การทดสอบการแตกหัก (fracture test) และการทดสอบการสึกหรอ (wear test) การทดสอบแต่ละแบบอาจใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะต่างกันออกไป ได้แก่ การทดสอบกับวัสดุที่จะนำไปใช้ทางทันตกรรม (อุดฟัน, ครอบฟัน, ฟันเทียม ฯลฯ) และการทดสอบวัสดุที่นำมาใช้กันฟันแล้ว เป็นต้น

หัวข้อแรกในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมการทดลองเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยที่อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้สำหรับการทดลองในบทนี้ประกอบด้วย ชุดทดลองที่สอบทวนแล้ว, หัวกดชิ้นงาน, ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างซึ่งมีต่างกับชุดที่ใช้ในบทที่ 4 เล็กน้อย กล่าวคือชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างที่ใช้ในบทที่ 4 จะทำหน้าที่จับยึดชิ้นงานให้อยู่ในแนวระดับ แต่ชุดจับยึดชิ้นงานที่ใช้ในบทนี้จะมีความลาดชันทำให้สามารถจับยึดชิ้นงานให้มีความเอียงเทียบกับแนวระดับเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองดังจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป, กระดาษสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสของฟันที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งและลักษณะการกระแทกของหัวกดชิ้นงานบนผิวหน้าของฟันที่เป็นชิ้นงานทดลอง และสปีดเพอร์ตรวจสอบรอยแตกร้าวที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการทดลอง เนื้อหาทั้งหมดนี้จะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป หลังจากกล่าวถึงการเตรียมการทดลองแล้ว หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดลอง โดยที่การทดลองในบทนี้จะเป็นการทดลองกับชิ้นงานที่เป็นฟันของมนุษย์ ฟันที่นำมาทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ฟันที่ไม่มีการอุด และ ฟันที่มีการอุด ดังนั้นการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ การทดลองกับชิ้นงานกลุ่มแรกที่ไม่มีการอุดฟัน และการทดลองกับชิ้นงานกลุ่มหลังที่มีการอุดฟัน ดังจะได้อธิบายรายละเอียดต่อไป โดยการทดลองในบทนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ข้อ ได้แก่ 1) เพื่อศึกษา ลักษณะการเสียหายของฟันที่ไม่มีการอุดและฟันที่มีการอุดว่ามีอาการเสียหายแตกต่างกันอย่างไร และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ มีผลไปในทางเดียวกันหรือไม่ 2) การเสียหายของชิ้นงานในการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวต่างจากการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้งอย่างไร ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลอง

5.1 การเตรียมการทดลอง

1) ชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ชิ้นงานสำหรับการทดลองในบทนี้เป็นฟันกรามของมนุษย์ที่หล่อติดกับปูนปลาสเตอร์ โดยที่ชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งคือฟันที่ไม่มีการอุดตั้งรูปที่ 5.1 (ก) และกลุ่มที่สองคือฟันที่มีการอุดตั้งรูปที่ 5.1 (ข) โดยการอุดฟันทำได้โดยการกรอเนื้อฟันบริเวณกลางตัวฟันออกทั้งหมด (บริเวณเส้นประในรูปที่ 5.1 (ข)) แล้วอุดด้วยวัสดุอุดฟันแทนเนื้อฟันเดิมให้เข้ากับรูปร่างของฟัน ในการทดลองชิ้นงานทุกชิ้นกำหนดให้ตำแหน่งที่หัวกดชิ้นงานกระทำกับผิวชิ้นงานอยู่ที่บริเวณเขี้ยวที่มีขนาดเล็กของฟัน (บริเวณที่วงกลมสีแดงในรูปที่ 5.1 (ก))



(ก) ตัวอย่างฟันที่ไม่มีการอุด (ข) ตัวอย่างฟันที่มีการอุด

รูปที่ 5.1 ชิ้นงานฟันกรามของมนุษย์ที่ใช้ในการทดลอง

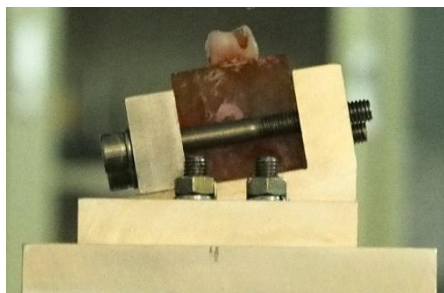
2) หัวกดชิ้นงาน

หัวกดชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในการทดลองในบทนี้เป็นหัวกดชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุสังเคราะห์คาร์ไบด์เช่นเดียวกับที่ใช้ในการสอบทวนในบทที่ 4

3) ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง

ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างที่จะใช้สำหรับการทดลองในส่วนนี้เป็นชุดจับยึดชิ้นงานที่มีความลาดชัน 10° ลักษณะและการใช้งานโดยทั่วไปของชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างเป็นเช่นเดียวกับชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างที่ใช้ในการสอบทวนในบทที่ 4 เพียงแต่จะแตกต่างกันที่ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่างที่ใช้ในการทดลองในบทนี้จะมีความลาดชัน 10° เทียบกับพื้นระนาบ ดังรูปที่ 5.2 สาเหตุที่ต้องใช้ชุดจับยึดชิ้นงานลักษณะนี้เพราะชิ้นงานที่จะใช้ในการทดลองคือฟันซึ่งจะมีรูปร่างเป็นปลายแหลมที่ขอบ (เขี้ยว) และมีส่วนเว้าลงตรงกลางของตัวฟัน (ดูรูปที่ 5.1) ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เมื่อวางชิ้นงานในแนวระนาบปกติแล้วจะทำให้ผิวด้านนอกของตัวฟันที่อยู่สูงกว่า เป็นเหตุให้ส่วนที่เป็นเขี้ยวใหญ่กระแทก

กับหัวกดขึ้นงานก่อน แทนที่จะกระทบกับหน้าฟันที่อยู่ต่ำกว่าหรือเขี้ยวเล็ก ดังนั้นการเอียงขึ้นงาน 10° จะทำให้หัวกดขึ้นงานสัมผัสกับหน้าฟันบริเวณเขี้ยวเล็กได้อย่างที่ต้องการ ในส่วนของรายละเอียดในการตั้งขึ้นงานและตำแหน่งการกดของหัวกดบนขึ้นงานจะได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อการทดลอง



รูปที่ 5.2 ชุดจับยึดขึ้นงานชุดกลางที่มีความลาดชัน 10°

4) กระจกสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสของฟัน

บทที่ 4 ได้มีการทดลองเพื่อสังเกตลักษณะของหน้าสัมผัสของฟันที่ขบกันโดยใช้เครื่องจำลองการเคลื่อนของมนุษย์โดยใช้กระจกชนิดนี้มาแล้วในหัวข้อ 4.3.3 สำหรับการทดลองในบทนี้จะนำกระจกชนิดนี้มาใช้ตรวจสอบหน้าสัมผัสระหว่างผิวหน้าของฟันที่เป็นขึ้นงานทดสอบกับหัวกดขึ้นงานก่อนเริ่มการทดลองเพื่อสังเกตตำแหน่งและรูปร่างของของการขบของหัวกดขึ้นงานบนหน้าฟันของขึ้นงานทดสอบ โดยการใช้งานกระจกจะให้ด้านที่มีสีน้ำเงินสัมผัสกับหน้าฟัน

5) สีสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกร้าว

สีสเปรย์ตรวจสอบรอยร้าวเป็นเครื่องมือที่จะนำมาใช้ตรวจสอบรอยแตกร้าวของขึ้นงานก่อนและหลังการทดลองเพื่อบ่งชี้ตำแหน่งที่เกิดรอยแตกร้าวบนขึ้นงานและเพื่อสังเกตลักษณะการขยายตัวของขนาดรอยแตกร้าวเมื่อจำนวนรอบการเคี้ยว (การทดสอบ) เพิ่มขึ้น สีสเปรย์ตรวจสอบรอยร้าวที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ คือ สี Super check ของบริษัท Marktec ซึ่งในสีสเปรย์ 1 ชุดจะประกอบด้วยสารเคมี 3 ประเภทโดย กระจกป้องกันที่ 1 คือ Cleaner (กระจกป้องกันสีเหลือง) ใช้สำหรับทำความสะอาดผิวขึ้นงาน กระจกป้องกันที่ 2 คือ Penetrant (กระจกป้องกันสีแดง) เป็นสีที่มีสีแดงใช้พ่นเพื่อให้สีแทรกซึมเข้าไปในรอยแตกร้าวของขึ้นงาน และกระจกป้องกันที่ 3 คือ Developer (กระจกป้องกันสีฟ้า) เป็นสเปรย์สีขาวใช้พ่นเพื่อให้มองเห็นรอยแตกร้าวที่ Penetrant แทรกซึมเข้าไปได้ โดยรอยร้าวที่มองเห็นจะเป็นเส้นที่มีสีแดง สำหรับวิธีการใช้งานสีสเปรย์ดังกล่าวประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) พ่น Cleaner เพื่อทำความสะอาดผิวขึ้นงานและรอให้แห้ง 2) พ่น Penetrant ให้ทั่วผิวขึ้นงานและทิ้งไว้ประมาณ 5 ถึง 20

นาที่ เพื่อให้สีแทรกซึมเข้าไปในรอยแตก ร้าว 3) ฟัน Cleaner อีกครั้งเพื่อล้างเอา Penetrant ที่ผิวชิ้นงานออกให้หมดแล้วรอให้แห้ง และ 4) ฟัน Developer ให้ทั่วผิวชิ้นงานโดยฟันห่างจากผิวชิ้นงานประมาณ 15 ถึง 25 เซนติเมตร เพื่อให้สีเกาะที่ผิวของชิ้นงานโดยมีความหนาของสีใกล้เคียงกัน จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 ถึง 10 นาที เมื่อสีแห้งจะสามารถมองเห็นรอยแตก ร้าวเป็นเส้นสีแดง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สีสเปร์ยตรวจสอบรอยแตก ร้าว และการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก การทดลองทั้งสองชุดกำหนดให้ทดลองด้วยความถี่การเคียว 1 เฮิร์ตซ์ และกำหนดแรงเคียวควบคุมอยู่ที่ 9.8 กิโลกรัม สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สีสเปร์ยตรวจสอบรอยแตก ร้าว และ 19.8 กิโลกรัม สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก

ชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฟันที่ไม่มีการอุด และฟันที่มีการอุด การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สีสเปร์ยตรวจสอบรอยแตก ร้าว ใช้ชิ้นงานฟันที่ไม่มีการอุด 4 ซี่ และฟันที่มีการอุด 1 ซี่ การทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก เริ่มแรกมีชิ้นงานฟันมีการอุด 8 ซี่ แต่มีชิ้นงาน 1 ชิ้น เกิดการเสียหายก่อนการทดลองจึงทำให้เหลือชิ้นงานสำหรับการทดลองนี้เป็นฟันที่มีการอุด 7 ซี่ รายละเอียดของการทดลองจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

ขั้นตอนการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สีสเปร์ยตรวจสอบรอยแตก ร้าว โดยสังเขปเป็นดังนี้ 1) นำชิ้นงานที่ต้องการทดลองมาตรวจสอบรอยแตก ร้าวก่อนที่จะทำการทดลองด้วยการฟันสีสเปร์ยตรวจสอบรอยแตก ร้าว จากนั้นบันทึกภาพรอยแตก ร้าวของชิ้นงานก่อนการทดลองไว้ 2) ติดตั้งชิ้นงานบนชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง และปรับให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งสูงสุดด้วยการหมุนเพลลาจับจนกระทั่งชิ้นงานเลื่อนขึ้นสู่จุดสูงสุด 3) ปรับเลื่อนชิ้นงานให้ตำแหน่งปลายของหัวกดชิ้นงานที่จับยึดอยู่กับชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการให้กระทบกับชิ้นงาน จากนั้นปรับระดับความสูงของชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนให้หัวกดชิ้นงานสัมผัสกับผิวชิ้นงาน เมื่อหัวกดชิ้นงานสัมผัสกับผิวชิ้นงานแล้ว ให้ปรับลดระดับความสูงของชุดจับยึดชิ้นงานชุดบนลงอีก 0.5 มิลลิเมตร ตามข้อกำหนดการใช้งานของวิธีการเคียวที่ได้ออกแบบไว้ 4) สอดกระดาษสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสของฟันเข้าไประหว่างผิวหน้าของชิ้นงานและหัวกดชิ้นงานโดยให้หน้ากระดาษสีน้ำเงินอยู่ด้านเดียวกับชิ้นงาน ในขณะที่หน้ากระดาษสีแดงที่อยู่ด้านตรงข้ามอยู่ด้านเดียวกับหัวกดชิ้นงาน จากนั้นเปิดสวิทช์มอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ ๆ โดยหมุน 1 รอบ ให้ชิ้นงานเข้าขบกับหัวกดชิ้นงานและแยกออกจากกัน จะได้รอยการขบระหว่างผิวหน้าของฟันที่เป็นชิ้นงานกับหัวกดชิ้นงานบนผิวหน้าของฟันบันทึกรูปรอยการขบ 5) วางน้ำหนักตามที่กำหนดสำหรับการทดลอง 6) ปรับความถี่การเคียวตาม

ต้องการโดยปรับค่าความถี่ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ตามตารางที่ 4.1 7) เริ่มการทดลองโดยมีการหยุดเพื่อตรวจสอบและบันทึกภาพรอยแตกร้าวของชิ้นงานตามจำนวนรอบการเคี้ยวที่กำหนด

ขั้นตอนการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหักโดยสังเขปเป็นเช่นเดียวกับขั้นตอนการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์ตรวจสอบรอยแตกร้าว แต่ไม่มีขั้นตอนการตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยสปีดเปอร์ โดยการทดลองจะยุติเมื่อชิ้นงานแตกหัก หรือเมื่อทดลองครบ 100,000 รอบการเคี้ยว หากชิ้นงานไม่แตกหัก รายละเอียดของการทดลองจะกล่าวถึงหัวข้อถัดไป

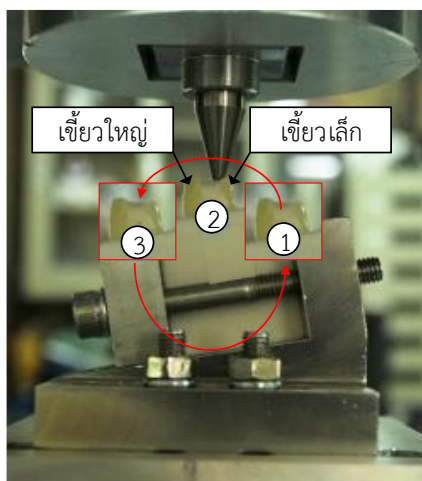
5.2 การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์ตรวจสอบรอยแตกร้าว

การทดลองการเสียหายของชิ้นงานในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเมื่อใช้แรงเคี้ยวควบคุม 9.8 กิโลกรัม และความถี่การเคี้ยว 1 เฮิร์ตซ์ ทำการทดลอง ซึ่งทำได้โดยปรับความถี่ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เป็น 30.51 เฮิร์ตซ์ ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.1 แรงเคี้ยวสำหรับการทดลองที่กำหนดให้เป็น 9.8 กิโลกรัม สามารถควบคุมแรงเคี้ยวได้โดยการถ่วงตุ้มน้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม (No.1) และตุ้มน้ำหนักขนาด 2 กิโลกรัม ที่ได้สอบเทียบไว้แล้วในตารางที่ 4.2

การตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานจำเป็นต้องใช้สปีดเปอร์สำหรับตรวจสอบรอยแตกร้าว เพราะรอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ง่าย ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นฟันที่ไม่มีกรอด 4 ซี่ และฟันที่มีการกรอด 1 ซี่ กำหนดให้เป็นชิ้นงานที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ การทดลองฟันที่ไม่มีกรอดมีการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว (ใช้ชิ้นงานที่ 1 และ 2) และการทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง (ใช้ชิ้นงานที่ 3 และ 4) แต่ละการทดลองใช้ชิ้นงาน 2 ชิ้น ส่วนชิ้นงานฟันที่มีการกรอดที่มีอยู่ 1 ชิ้น (ชิ้นงานที่ 5) ทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

ชิ้นงานในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์ตรวจสอบรอยแตกร้าวใช้ชุดจับยึดชิ้นงานที่มีความลาดชัน 10° เพื่อจับยึดชิ้นงานให้เอียงในระดับที่เหมาะสมกับการเข้าขบกับหัวกดชิ้นงาน โดยกำหนดให้การขบกันของฟันและหัวกดชิ้นงานเป็นลักษณะที่หัวกดชิ้นงานเข้ากระแทกกับผิวหน้าของฟันบริเวณที่เป็นซี่ขี้เหล็ก หัวกดจะต้องเคลื่อนเข้าหาชิ้นงานโดยที่ไม่กระทบกับซี่ขี้เหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าดังแสดงในรูปที่ 5.3 ชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาหัวกดชิ้นงานจากขวาไปซ้ายตามลูกศรสีแดงจากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ชิ้นงานขบกับหัวกดชิ้นงาน แล้วเคลื่อนออกจากหัวกดไปยังตำแหน่งที่ 3 โดยหัวกดชิ้นงานจะไม่สัมผัสกับผิวของฟันยอดแรกหรือซี่ขี้เหล็กที่มีขนาดใหญ่ที่เคลื่อนเข้าหาหัวกดชิ้นงานก่อนซี่ขี้เหล็ก แต่จะเริ่มสัมผัสกับผิวหน้าของฟันที่ตั้งแต่หลังบริเวณ

กึ่งกลางของฟัน (ดูรูปที่ 5.3 ประกอบ) จนกระทั่งฟันเคลื่อนที่ออกไป ซึ่งการขบกันในลักษณะนี้มีรูปแบบคล้ายกับการขบกันของฟันกรามของมนุษย์



รูปที่ 5.3 การจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงาน (ฟันกราม) และหัวกดชิ้นงาน

5.2.1 การทดลองชิ้นงานฟันที่ไม่มีการอุด

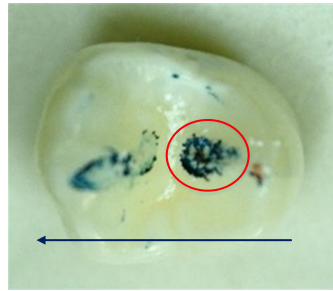
1) การทดลองแบบการขบเคี้ยว

การทดลองจะดำเนินการตามข้อกำหนดการทดลองที่ได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ โดยปรับวิธีการเคี้ยวของชุดทดลองให้เป็นวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว จากนั้นจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงานกับหัวกดชิ้นงานดังรูปที่ 5.3 ลำดับต่อมาจะต้องตรวจสอบลักษณะที่หัวกดชิ้นงานกระทบกับผิวหน้าของชิ้นงานด้วยการใช้กระดาษสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสของฟันสอดระหว่างชิ้นงานกับหัวกด โดยให้หน้ากระดาษสีน้ำเงินหันเข้าหาชิ้นงาน จากนั้นเปิดมอเตอร์ให้หมุน 1 รอบ เพื่อให้ชิ้นงานกับหัวกดชิ้นงานขบกัน 1 รอบ จะได้รอยที่หัวกดกระทำบนผิวหน้าชิ้นงานดังรูปที่ 5.4 โดยที่ชิ้นงานเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายตามลูกศรสีฟ้าในรูปและบริเวณวงกลมสีแดงคือส่วนที่เป็นหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงาน

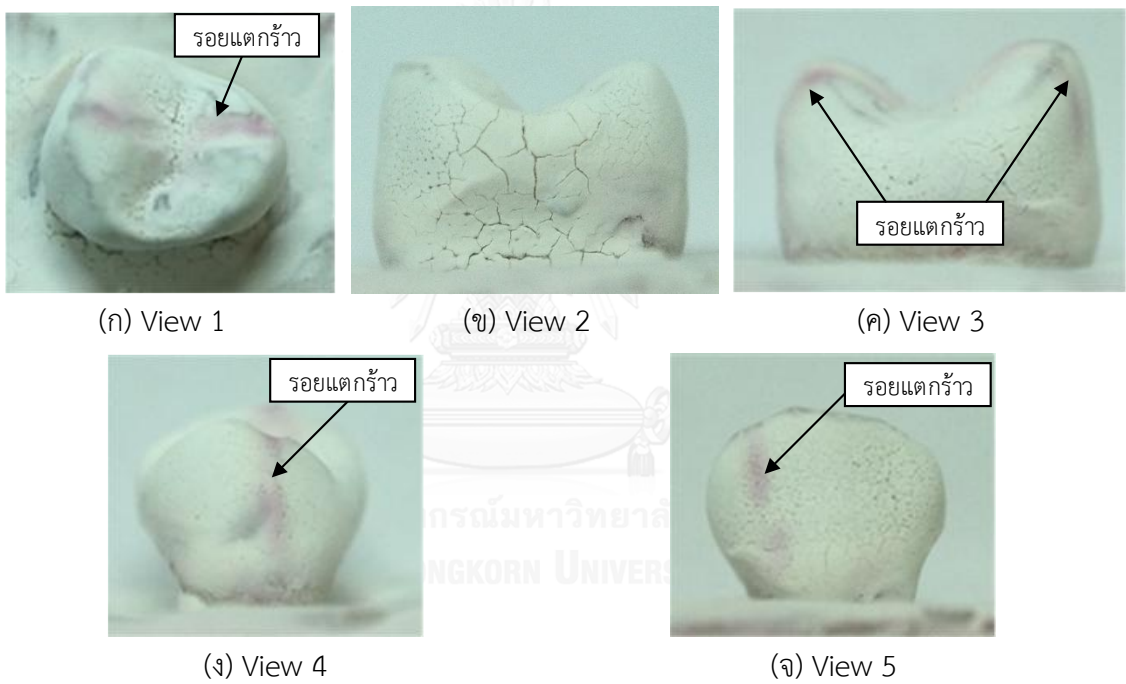
เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนเตรียมการทดลองข้างต้นแล้วจึงดำเนินการทดลอง ปรากฏว่าชิ้นงานทั้งสองชิ้นมีการเสียหายอย่างรวดเร็ว การเสียหายของชิ้นงานดังกล่าวสามารถระบุได้ในระหว่างการทดลองโดยการสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟแรงเคี้ยวที่วัดได้ และเสียงที่เกิดจากการกระทบของชิ้นงานกับหัวกด ชิ้นงานที่ 1 เกิดความเสียหายเมื่อเริ่มการทดลองไปได้ 629 รอบการเคี้ยว ในขณะที่ชิ้นงานที่ 2 เกิดความเสียหายเมื่อเริ่มการทดลองไปได้ 357 รอบการเคี้ยว เมื่อนำชิ้นงานทั้งสองมาพ่นสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว จะสังเกตเห็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 5.5 และ

รูปที่ 5.6 รูปทั้งหมดนี้เป็นรูปของด้านต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังพ่นสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกแล้ว ทั้งหมด 5 ด้าน เรียกเป็น view 1 ถึง 5 โดยประกอบด้วยรูปผิวหน้าของชิ้นงาน (view 1) รูปด้านข้างตามแนวยาวของชิ้นงาน 2 รูป (view 2 และ 3) และรูปด้านข้างตามแนวขวางชิ้นงานอีก 2 รูป (view 4 และ 5) เพื่อให้สามารถมองเห็นได้ทั่วทุกด้านของชิ้นงาน จากรูป view 1 จะสังเกตเห็นความเสียหายของชิ้นงานทั้งสองใน 2 ลักษณะ ได้แก่ ผิวหน้าของชิ้นงานที่สึกหรือจากการขบกับหัวกดชิ้นงาน ซึ่งรอยนี้จะมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปที่ 5.4 และความเสียหายอีกชนิดหนึ่งที่เกิดคือการแตกหักของชิ้นงาน โดยที่รอยแตกร้าวที่เป็นเส้นสีแดงยาวพาดผ่านผิวหน้าของชิ้นงานได้อย่างชัดเจนในชิ้นงานทั้งสอง และเมื่อพิจารณารูป View 2 ถึง 5 จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกร้าวดังกล่าวยาวเป็นเส้นเดียวกันจนถึงโคนของชิ้นงาน กล่าวคือชิ้นงานทั้งสองมีรอยแตกร้าวตามยาวผ่ากลางชิ้นงานในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามชิ้นงานทั้งสองเกิดความเสียหายรุนแรงไม่เท่ากัน ดังจะเห็นว่าชิ้นงานที่ 2 มีเนื้อของชิ้นงานแตกหลุดออกไป 1 ซีก ในขณะที่ชิ้นงานที่ 1 ยังคงเป็นชิ้นเดียวกันอยู่

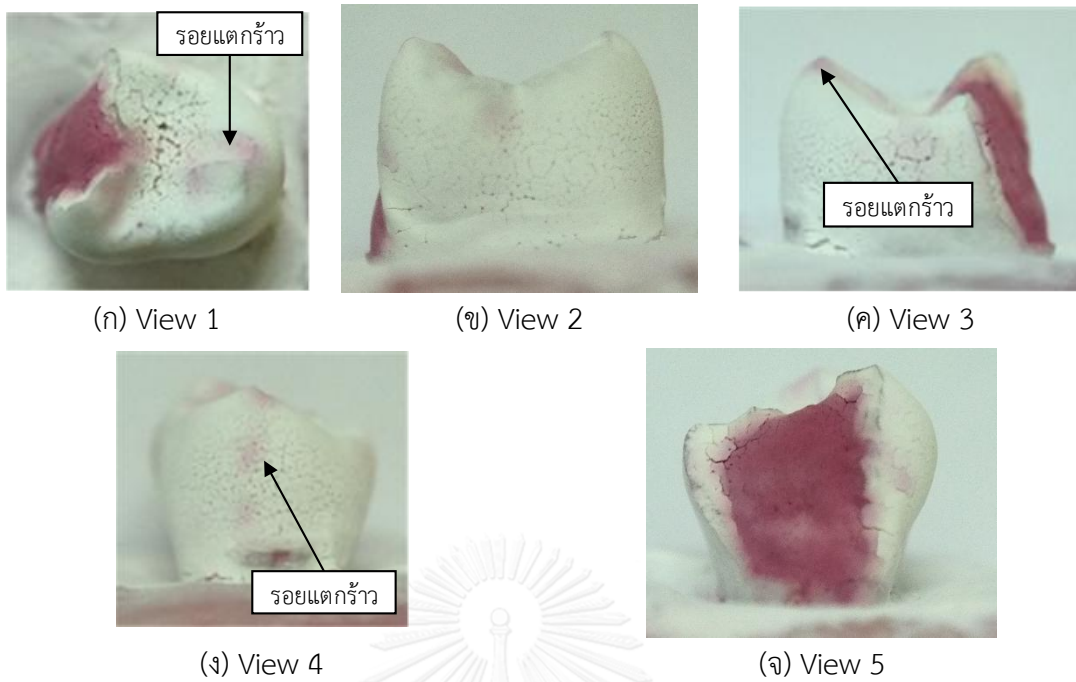
แรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 1 และ 2 เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยกราฟแรงเคี้ยวที่แสดงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ กราฟแรงเคี้ยวช่วงต้นการทดลอง และกราฟแรงเคี้ยวช่วงปลายการทดลอง ข้อมูลในกราฟแรงเคี้ยวสามารถมาคำนวณแรงเคี้ยวเฉลี่ยและแรงเคี้ยวสูงสุดได้ดังตารางที่ 5.1 พิจารณากราฟแรงเคี้ยวพบว่ากราฟแรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 1 และ 2 มีลักษณะค่อนข้างแตกต่างกัน แต่สิ่งที่มีความคล้ายคลึงกัน คือ กราฟช่วงปลายการทดลองมีความผันผวนกว่ากราฟช่วงต้นการทดลองค่อนข้างมาก นั่นคือมีบางช่วงที่แรงมีขนาดเพิ่มขึ้นมากและบางช่วงที่แรงลดลงเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาร่วมกับรูปที่ 5.5 View 1 จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวและรอยสึกที่ผิวชิ้นงานซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการทดลอง สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อแรงเคี้ยวที่วัดได้ผ่านทางการสัมผัสของหัวกดบนผิวชิ้นงาน กล่าวคือผิวชิ้นงานมีลักษณะที่แตกต่างไปจากในช่วงต้นการทดลอง กล่าวคือชิ้นงานมีร่องรอยแตก ผิวไม่เรียบหรือเป็นหลุมจากการสึกหรือ ส่งผลให้ช่วงที่หัวกดสัมผัสกับผิวชิ้นงานอาจเกิดการกระแทกกับจุดที่ผิวไม่เรียบ หรือไม่สัมผัสกับผิวชิ้นงานทำให้แรงที่วัดได้แตกต่างช่วงต้นการทดลอง



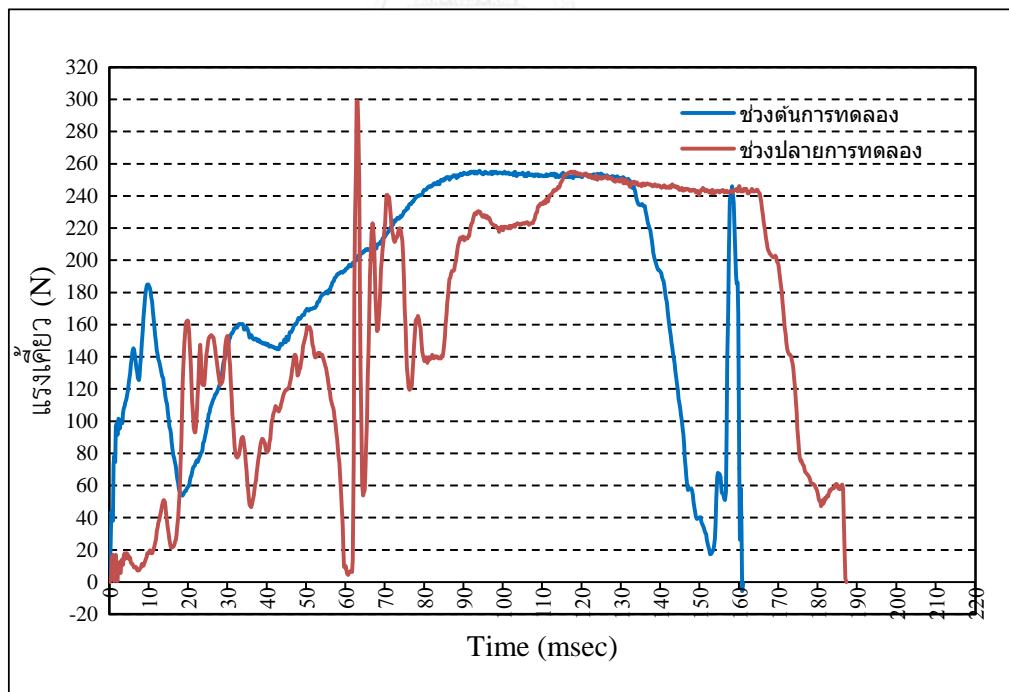
รูปที่ 5.4 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานสำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว



รูปที่ 5.5 การเสียหายของชิ้นงานที่ 1 (629 รอบการเคี้ยว) ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

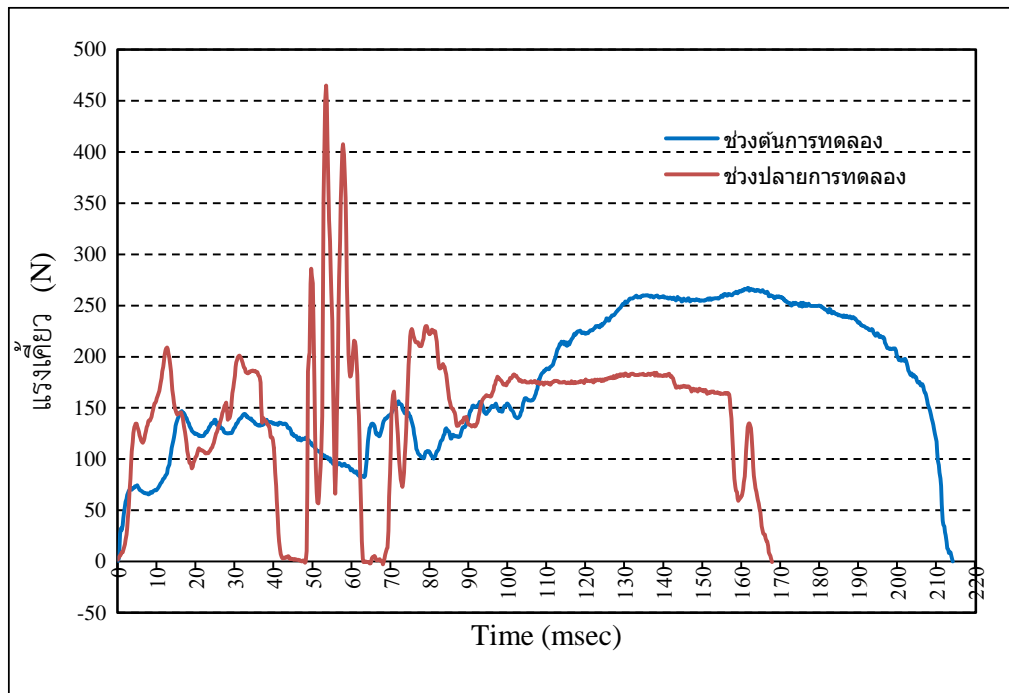


รูปที่ 5.6 การเสียหายของชิ้นงานที่ 2 (357 รอบการเคี้ยว) ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว



(ก) ชิ้นงานที่ 1

รูปที่ 5.7 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 1 และ 2 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว



(ข) ชิ้นงานที่ 2

รูปที่ 5.7 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 1 และ 2 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สี่สเปร์ย์ ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว (ต่อ)

ตารางที่ 5.1 แรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 1 และ 2 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สี่สเปร์ย์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

ชิ้นงานที่	แรงเคี้ยวที่วัดได้ (N)			
	ช่วงต้นการทดลอง		ช่วงปลายการทดลอง	
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
1	182.50	255.61	174.02	226.46
2	163.28	267.38	146.44	168.72

2) การทดลองแบบการกระแทกแนวตั้ง

การทดลองแบบการกระแทกแนวตั้งทำได้เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้เพียงแต่ปรับวิธีการเคี้ยวของชุดทดลองให้เป็นวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง จากนั้นจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงานกับหัวกดชิ้นงาน และตรวจสอบลักษณะที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าของชิ้นงานจะได้รอยที่หัวกดกระทำบนผิวหน้าชิ้นงานดังรูปที่ 5.8 โดยที่ชิ้นงานเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายตามลูกศร

สีฟ้าในรูปและบริเวณวงกลมสีแดงคือส่วนที่เป็นหน้าสัมผัสที่หวัคคั้งงานกระทำต่อชิ้นงาน จะเห็นรอยสัมผัสมีลักษณะเป็นวงกลมมากกว่ารอยสัมผัสในการทดลองแบบขบเคี้ยวที่มีลักษณะเป็นวงรีรูปร่างของรอยดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นจุดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับปลายหวัคคั้งงานที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานหากชิ้นงานมีผิวเรียบและมีระนาบในแนวระดับ แต่รอยที่เห็นในรูปที่ 5.8 มีความแตกต่างจากที่กล่าวไปเล็กน้อยเพราะชิ้นงานที่เป็นพื้นผิวที่มีความชันในบริเวณที่สัมผัสกับหวัคคั้งงาน ทำให้มีผิวส่วนหนึ่งของชิ้นงานสัมผัสกับด้านข้างของหวัคคั้งงาน

เมื่อเสร็จขั้นตอนเตรียมการทดลองข้างต้นแล้วจึงดำเนินการทดลองต่อไปจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก ซึ่งในการทดลองปรากฏว่าชิ้นงานชิ้นที่ 3 ที่นำมาทดลองก่อนไม่เกิดการแตกหักในลักษณะที่สามารถเห็นได้ชัดเจนเหมือนกับชิ้นงานที่ 1 และ 2 ก่อนหน้านี้ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของกราฟแรงเคี้ยวที่วัดได้ก็ไม่มี ความแตกต่างชัดเจนที่จะใช้ระบุได้ว่าชิ้นงานเกิดการเสียหาย ดังนั้นจึงกำหนดให้การทดลองในขั้นนี้จะหยุดการทดลองเมื่อดำเนินการทดลองครบ 30,000 รอบการเคี้ยวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง การเสียหายของชิ้นงานที่ 3 เป็นดังรูปที่ 5.9 ในรูปเป็นสภาพของชิ้นงานที่ 3 ที่พ่นสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกแล้วหลังจากดำเนินการทดลอง 30,229 รอบการเคี้ยว จากรูป View 1 จะสังเกตเห็นความเสียหายของชิ้นงานได้ 2 ชนิด ได้แก่ ผิวหน้าของชิ้นงานที่สึกจากการกระทบกับหวัคคั้งงาน ซึ่งรอยนี้จะมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปที่ 5.8 ที่เป็นการตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หวัคคั้งงาน และ ความเสียหายอีกชนิดหนึ่งที่พบคือรอยแตกร้าวที่เป็นเส้นสีแดง แต่จะเห็นไม่ชัดเจนเท่ากับการทดลองชิ้นงานที่ 1 และ 2 ที่เป็นการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว และมีลักษณะที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณารูป View 2 ถึง 5 จะเห็นรอยแตกร้าวเป็นเส้นทั้ง 4 ด้าน แต่เส้นรอยแตกร้าวแต่ละเส้นไม่มีลักษณะเชื่อมต่อกันเป็นเส้นเดียวกันและอยู่แนวเดียวกันเหมือนกับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นในการทดลองชิ้นงานที่ 3 แล้ว จึงกำหนดให้การทดลองชิ้นงานที่ 4 จะมีการตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานก่อนการทดลอง และดำเนินการทดลองโดยหยุดตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานเมื่อถึงรอบที่กำหนด ซึ่งกำหนดให้หยุดตรวจสอบทั้งหมด 6 ครั้ง ที่ 1,000 3,000 6,000 10,000 20,000 และ 30,000 รอบการเคี้ยว ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 4 เป็นดังรูปที่แสดงในตารางที่ 5.2 รูปในตารางเป็นรูปชิ้นงานหลังจากพ่นสเปรย์ตรวจสอบรอยแตกร้าวในแต่ละครั้งที่หยุดการทดลองเมื่อครบรอบการเคี้ยวที่กำหนด จะสังเกตเห็นว่าก่อนการทดลองชิ้นงานที่ 4 ก็มีรอยแตกร้าวปรากฏบนผิวอยู่ก่อนแล้ว จากนั้นเมื่อทดลองต่อถึง 1,001 รอบการเคี้ยว พบว่ารอยแตกร้าวดังกล่าวขยายตัวออกเป็นเส้นยาวขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ผิวหน้าของชิ้นงานก็มีการสึกจากการขบกับหวัคคั้งงานเช่นเดียวกับชิ้นงานชิ้นที่ 3 และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของชิ้นงานเมื่อครบรอบการเคี้ยวที่ 3,001 6,001 10,001 20,001 และ 30,001 แล้ว พบว่าไม่มีรอยแตกร้าวอื่นเพิ่มขึ้นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการตรวจสอบโดยใช้สปีเรย์

ตรวจสอบรอยแตกร้าว ทั้งนี้ลักษณะของรอยแตกร้าวก็เป็นลักษณะที่เป็นรอยเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ 3 เพียงแต่มีจำนวนและรูปร่างที่แตกต่างกัน

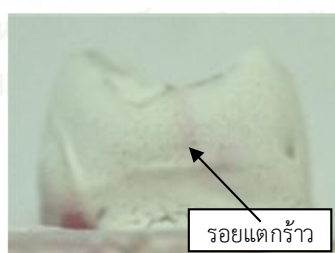
แรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 3 และ 4 เป็นดังรูปที่ 5.10 โดยกราฟแรงเคี้ยวจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ กราฟแรงเคี้ยวช่วงต้นการทดลอง และกราฟแรงเคี้ยวช่วงปลายการทดลอง ข้อมูลในกราฟแรงเคี้ยวสามารถมาคำนวณแรงเคี้ยวเฉลี่ยและแรงเคี้ยวสูงสุดได้ดังตารางที่ 5.3 เมื่อพิจารณากราฟแรงเคี้ยวพบว่ากราฟแรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 3 และ 4 จะค่อนข้างมีลักษณะที่แตกต่างกัน แต่สิ่งที่มีความคล้ายคลึงกัน คือ กราฟช่วงปลายการทดลองมีความผันผวนกว่ากราฟช่วงต้นการทดลองค่อนข้างมาก นั่นคือมีบางช่วงที่แรงมีขนาดเพิ่มขึ้นมากและบางช่วงที่แรงลดลงเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาร่วมกับรูปที่ 5.9 View 1 จะสังเกตเห็นรอยสีเป็นหลุมที่ผิวชิ้นงาน ส่งผลให้ลักษณะที่หักกุดชิ้นงานสัมผัสกับผิวชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปทำให้แรงที่วัดได้แตกต่างช่วงต้นการทดลอง



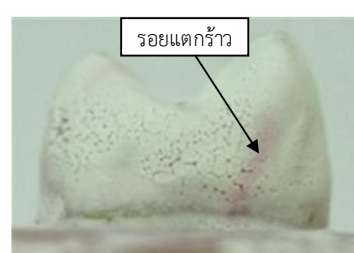
รูปที่ 5.8 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หักกุดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานสำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง



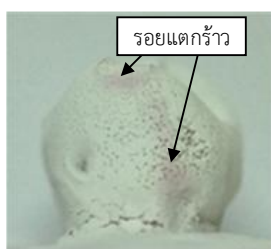
(ก) View 1



(ข) View 2



(ค) View 3







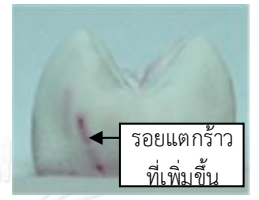
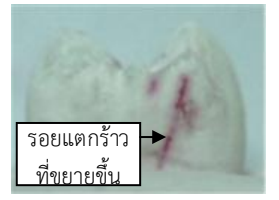

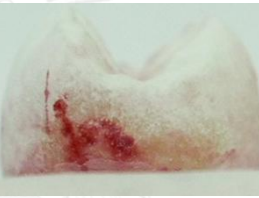



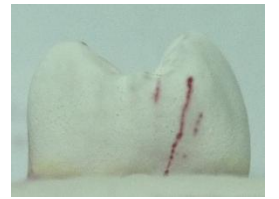







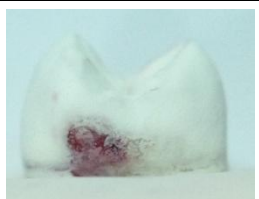

(ง) View 4




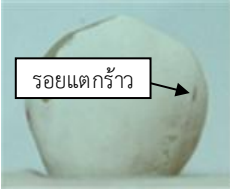


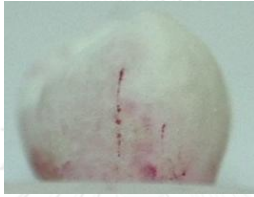


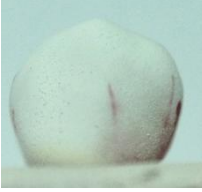





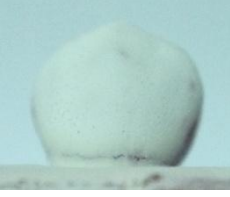
(จ) View 5

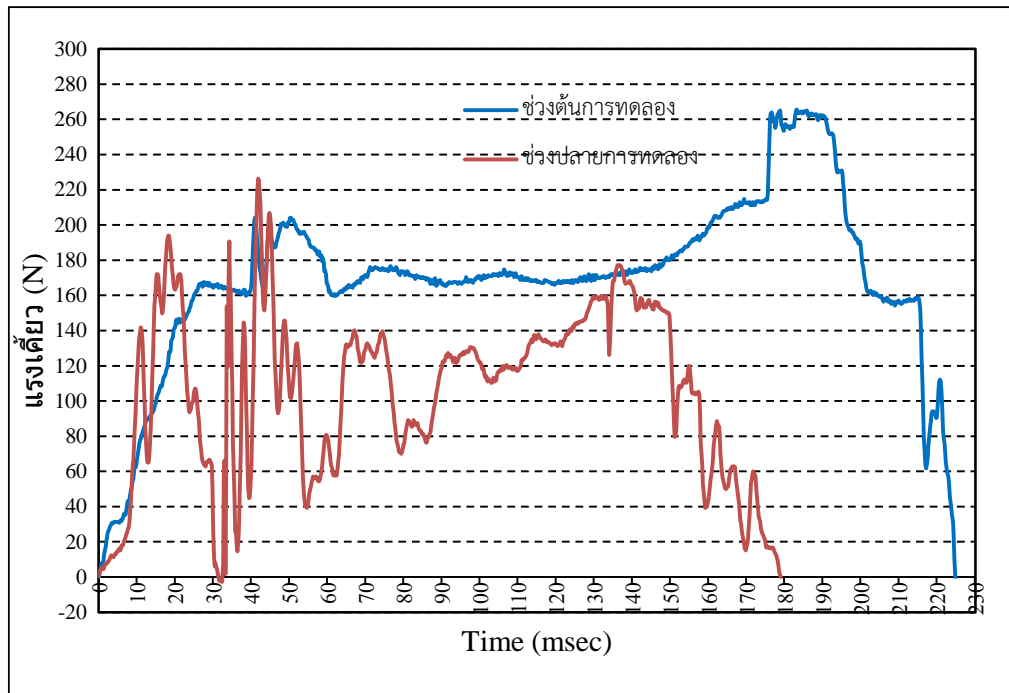
รูปที่ 5.9 การเสียหายของชิ้นงานที่ 3 (30,229 รอบการเคี้ยว) ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงาน โดยการใช้สปีดปรีย์ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

ตารางที่ 5.2 การเสียหายของชิ้นงานที่ 4 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยใช้สปีดเปอร์ย
ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

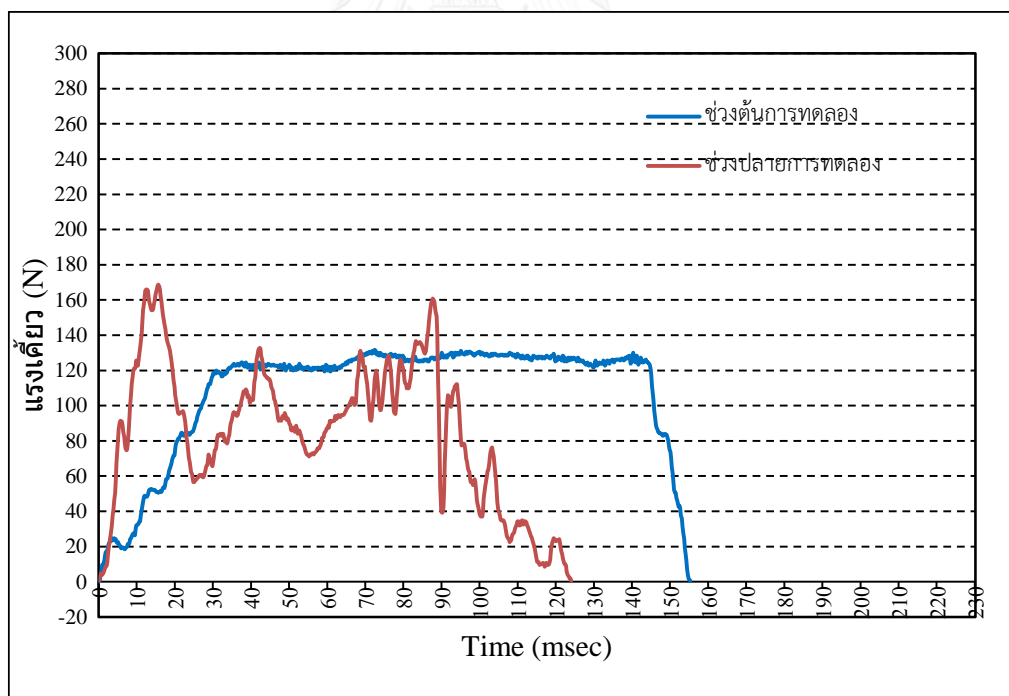
รอบการเคี้ยว	View 1	View 2	View 3
ก่อนทดลอง			
1,001			
3,001			
6,001			
10,001			
20,001			
30,001			

ตารางที่ 5.2 ต่อ

รอบการเคียว	View 4	View 5
ก่อนทดลอง		
1,001		
3,001		
6,001		
10,001		
20,001		
30,001		



(ก) ชิ้นงานที่ 3



(ข) ชิ้นงานที่ 4

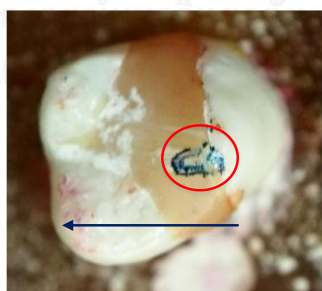
รูปที่ 5.10 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 3 และ 4 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สี่สเปร์ย์
ตรวจสอบรอยแตกช้าๆ วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

ตารางที่ 5.3 แรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 3 และ 4 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดเปอร์เซ็นต์ตรวจสอบรอยแตกกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

ชิ้นงานที่	แรงเคี้ยวที่วัดได้ (N)			
	ช่วงต้นการทดลอง		ช่วงปลายการทดลอง	
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
3	169.10	265.70	104.81	226.42
4	107.69	131.73	84.56	168.72

5.2.2 การทดลองชิ้นงานฟันที่มีการอุด

ดำเนินการทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว การจับยึดชิ้นงานจะใช้ชุดจับยึดชิ้นงานที่มีความลาดชัน 10° และการจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงาน (ฟันกราม) และหัวกดชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.3 เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ชิ้นงานที่ 5 ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นฟันที่มีการอุดและมีขนาดใหญ่กว่าฟันที่ไม่มีการอุดที่ใช้ในการทดลองก่อนหน้านี้ค่อนข้างมาก เมื่อจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงานและหัวกดชิ้นงานแล้ว จึงตรวจสอบลักษณะที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าของชิ้นงานด้วยการใช้กระดาษสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัส ซึ่งรอยที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.11 โดยที่ชิ้นงานเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายตามลูกศรสีฟ้าในรูปและบริเวณวงกลมสีแดงคือส่วนที่เป็นหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงาน

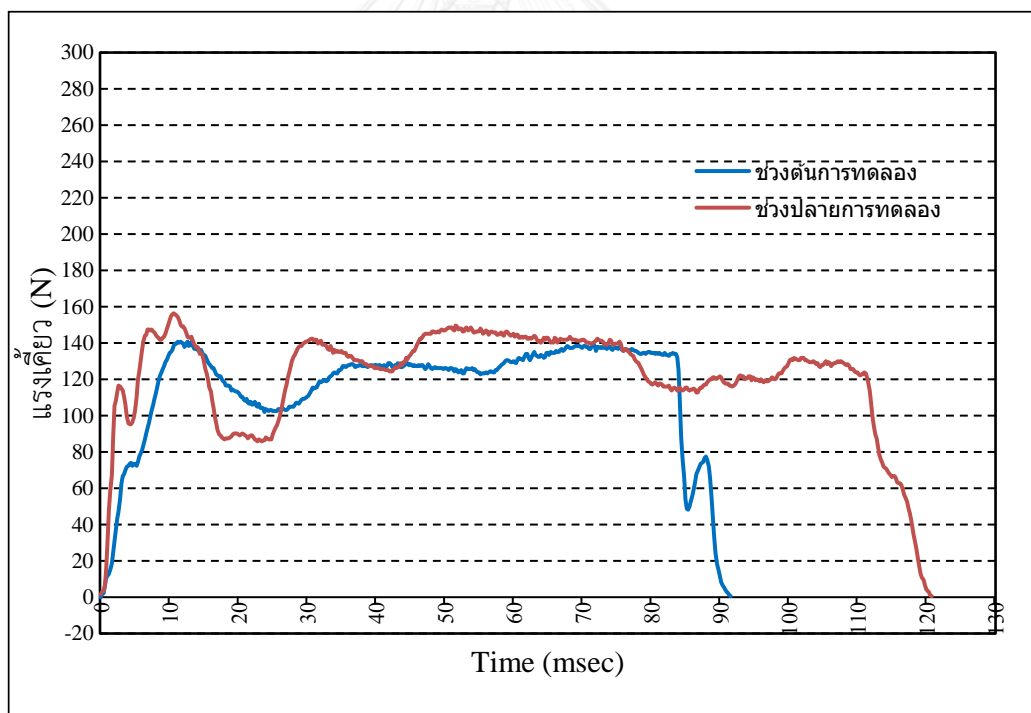


รูปที่ 5.11 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงาน สำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนเตรียมการทดลองข้างต้นแล้วจึงดำเนินการทดลองต่อไปเป็นจำนวน 10,000 รอบการเคี้ยว เมื่อทดลองครบ 10,000 รอบ ปรากฏว่าชิ้นงานมีการสึกของผิวบริเวณที่ถูกกระทำโดยหัวกดและมีรอยแตกตรงบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างเนื้อฟันกับเนื้อวัสดุอุดฟันด้านที่หัวกดกระทำโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.4 ซึ่งรูปที่แสดงในตารางนี้จะเป็นรูปของด้านต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังฟัน



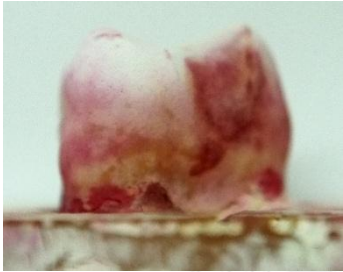
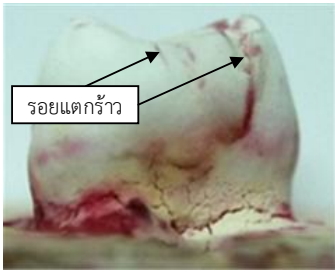






สเปร์ย์ตรวจสอบรอยแตกแล้วทั้งหมด 5 ด้าน คือ View 1 ถึง 5 โดยประกอบด้วยรูปผิวหน้าของชิ้นงาน (view 1) รูปด้านข้างตามแนวยาวของชิ้นงาน 2 รูป (view 2 และ 3) และรูปด้านข้างตามแนวขวางชิ้นงานอีก 2 รูป (view 4 และ 5) เพื่อให้สามารถมองเห็นได้ทั่วทุกมุมของชิ้นงาน เมื่อพิจารณารูปชิ้นงานก่อนการทดลอง โดยเฉพาะ View 2 ถึง View 4 จะสังเกตเห็นว่ามีช่องที่เป็นรอยต่อระหว่างเนื้อฟันและเนื้อวัสดุอุดฟันบนผิวของชิ้นงาน (เส้นสีแดงเข้ม) จากนั้นเมื่อพิจารณารูปชิ้นงานหลังการทดลอง จะสังเกตเห็นรอยแตกที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นตามรอยต่อระหว่างเนื้อฟันและเนื้อวัสดุอุดฟันดังกล่าว รวมทั้งมีการสึกหรอที่ผิวหน้าของฟันตรงบริเวณที่ชิ้นงานขบกับหัวกดชิ้นงาน

แรงเคี้ยวที่วัดได้ของการทดลองชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 5.12 โดยกราฟแรงเคี้ยวจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ กราฟแรงเคี้ยวช่วงต้นการทดลอง และกราฟแรงเคี้ยวช่วงปลายการทดลอง เมื่อนำข้อมูลในกราฟแรงเคี้ยวข้างต้นมาคำนวณแรงเคี้ยวจะได้ค่าแรงเคี้ยวเฉลี่ยและแรงเคี้ยวสูงสุดช่วงต้นการทดลองเท่ากับ 114.21 นิวตัน และ 121.18 นิวตัน ตามลำดับ ส่วนค่าแรงเคี้ยวเฉลี่ยและแรงเคี้ยวสูงสุดช่วงปลายการทดลองมีค่าเท่ากับ 140.70 นิวตัน และ 156.39 นิวตัน ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 แรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 5 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สเปร์ย์ตรวจสอบรอยแตกแล้ว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

ตารางที่ 5.4 การเสียหายของชิ้นงานที่ 5 ในการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยใช้สี่สเปร์ย์
ตรวจสอบรอยแตกร้าว วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

View	ก่อนการทดลอง	ทดลอง 10,001 รอบ
1		
2		
3		
4		
5		

5.3 การทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก การทดลองชิ้นงานแต่ละชิ้นมีเกณฑ์ที่กำหนดอยู่ 2 กรณี คือ ทดลองจนกว่าชิ้นงานจะแตกหัก หรือทดลองจนครบ 100,000 รอบ การเคี้ยวหากชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก ทดลองด้วยความถี่การเคี้ยว 1 เฮิรตซ์ และกำหนดแรงเคี้ยวควบคุมที่ 19.8 กิโลกรัม ซึ่งสามารถควบคุมแรงเคี้ยวได้โดยการถ่วงตุ้มน้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม (No.1), ต้มน้ำหนักขนาด 2 กิโลกรัม และตุ้มน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม 2 ก้อน (No.1 และ No.2) ที่ได้สอบเทียบไว้แล้วในตารางที่ 4.2

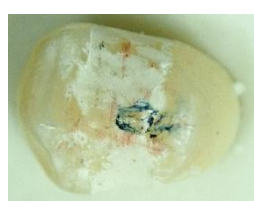
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นพินที่มีการอุดทั้งหมด 7 ซี่ กำหนดให้เป็นชิ้นงานที่ 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว ใช้ชิ้นงาน 4 ชิ้น (ชิ้นงานที่ 6, 7, 8 และ 9) และการทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง ใช้ชิ้นงาน 3 ชิ้น (ชิ้นงานที่ 10, 11 และ 12) รายละเอียดการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

5.3.1 การทดลองการขบเคี้ยว

ในการจับยึดชิ้นงานจะใช้ชุดจับยึดชิ้นงานที่มีความลาดชัน 10° และการจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงาน (พินกราม) และหัวกดชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.3 เมื่อติดตั้งชิ้นงานแล้วจึงตรวจสอบลักษณะที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าของชิ้นงานโดยการใช้กระดาษสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับหัวกดชิ้นงาน รอยที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.13 จากนั้นดำเนินการทดลองจนกระทั่งชิ้นงานแตกหักจึงหยุดการทดลอง ชิ้นงานที่แตกหักแสดงดังรูปที่ 5.14 โดยชิ้นงานที่ 6, 7, 8 และ 9 แตกหักที่ 241, 577, 5,081 และ 2,073 รอบการเคี้ยว ตามลำดับ

แรงเคี้ยวที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 5.15 โดยกราฟแรงเคี้ยวจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ กราฟแรงเคี้ยวช่วงต้นการทดลอง และกราฟแรงเคี้ยวช่วงปลายการทดลอง เมื่อนำข้อมูลในกราฟมาคำนวณแรงเคี้ยวจะได้ค่าแรงเคี้ยวเฉลี่ยและแรงเคี้ยวสูงสุดดังตารางที่ 5.5 พิจารณากราฟแรงเคี้ยวพบว่ากราฟแรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 6 และ 7 จะค่อนข้างมีลักษณะที่แตกต่างกับชิ้นงานที่ 8 และ 9 นั่นคือหากเปรียบเทียบลักษณะของกราฟช่วงต้นกับช่วงปลายการทดลองจะเห็นว่ากราฟช่วงปลายการทดลองของชิ้นงานที่ 6 และ 7 มีความผันผวนน้อยกว่าชิ้นงานที่ 8 และ 9 และมีขนาดของแรงในแต่ละช่วงใกล้เคียงกับช่วงต้นการทดลองมากกว่า เมื่อพิจารณาประกอบกับจำนวนรอบการเคี้ยวเมื่อชิ้นงานแตกหักจะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานที่ 6 และ 7 เสียหายที่จำนวนรอบการเคี้ยวที่น้อย (241 และ 577 รอบ) ในขณะที่ชิ้นงานที่ 8 และ 9 เสียหายที่จำนวนรอบการเคี้ยวที่สูงกว่า (5,081 และ 2,073

ตามลำดับ) จำนวนวนรอบการเคี้ยวที่ต่างกันมากนี้อาจส่งผลให้ชั้นงานที่ 8 และ 9 มีการสึกหรือการเสียหายที่ผิวหน้าที่หวัคดสัมผัสมากกว่า ทำให้ผิวชั้นงานเปลี่ยนไปจากเดิม (ผิวไม่เรียบหรือเป็นหลุมลึก) ส่งผลให้ช่วงที่หวัคดสัมผัสกับผิวชั้นงานอาจเกิดการกระแทกกับจุดที่ผิวไม่เรียบ หรือไม่สัมผัสกับผิวชั้นงานทำให้แรงที่วัดได้มีความผันผวนสูงกว่าช่วงต้นการทดลอง ดังจะเห็นได้จากกราฟช่วงปลายการทดลองของชั้นงานที่ 8 และ 9 ว่ามีบางช่วงที่แรงมีขนาดเพิ่มขึ้นมากและบางช่วงที่แรงลดลงเป็นศูนย์



(ก) ชั้นงานที่ 6



(ข) ชั้นงานที่ 7



(ค) ชั้นงานที่ 8



(ง) ชั้นงานที่ 9

รูปที่ 5.13 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หวัคดชั้นงานกระทำต่อชั้นงานฟันที่มีการอุด สำหรับการทดลองการเสียหายของชั้นงานจนกระทั่งชั้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว



(ก) ชั้นงานที่ 6 แตกหักที่ 241 รอบการเคี้ยว



(ข) ชั้นงานที่ 7 แตกหักที่ 577 รอบการเคี้ยว

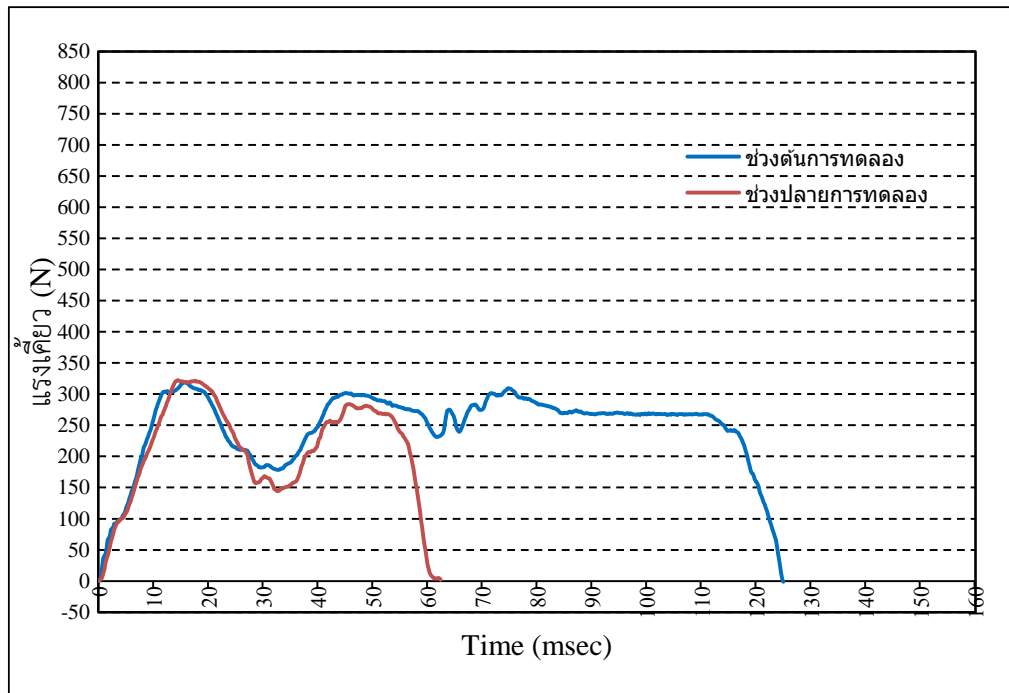


(ค) ชั้นงานที่ 8 แตกหักที่ 5,081 รอบการเคี้ยว

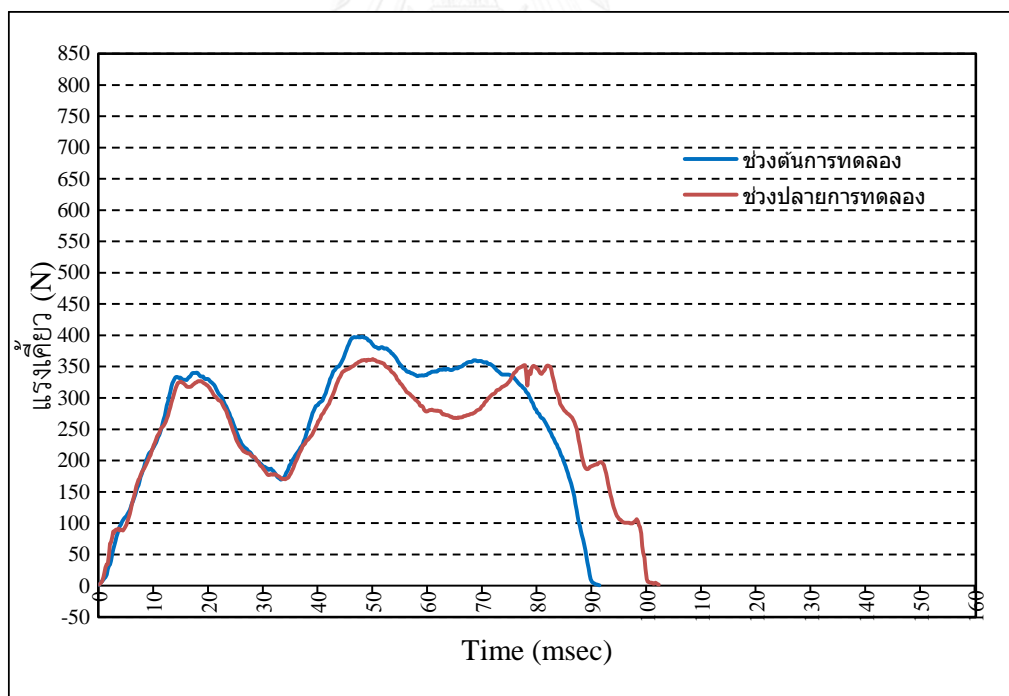


(ง) ชั้นงานที่ 9 แตกหักที่ 2,073 รอบการเคี้ยว

รูปที่ 5.14 การแตกหักของชั้นงานในการทดลองการเสียหายของชั้นงานจนกระทั่งชั้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

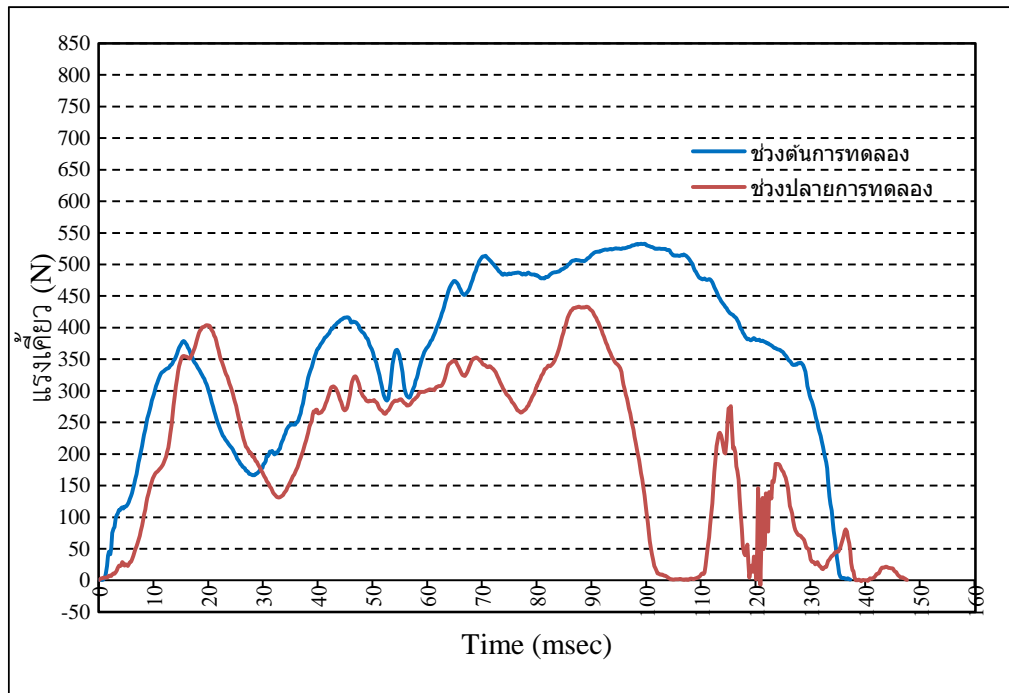


(ก) ชิ้นงานที่ 6

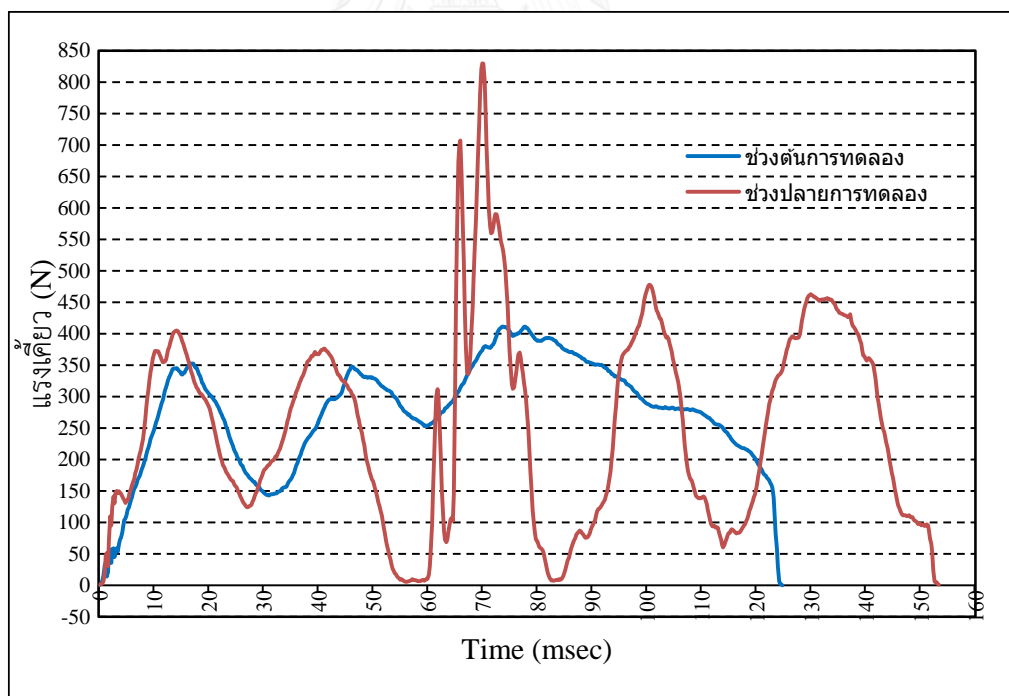


(ข) ชิ้นงานที่ 7

รูปที่ 5.15 แรงเคี้ยวของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว



(ค) ชิ้นงานที่ 8



(ง) ชิ้นงานที่ 9

รูปที่ 5.15 แรงเคี้ยวของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว (ต่อ)

ตารางที่ 5.5 แรงเคี้ยวที่วัดได้สำหรับการทดลองชิ้นงานที่มีการถอดของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว

ชิ้นงานที่	แรงเคี้ยวที่วัดได้ (N)			
	ช่วงต้นการทดลอง		ช่วงปลายการทดลอง	
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
6	246.30	318.95	208.55	322.31
7	269.13	397.98	246.82	362.11
8	364.93	533.07	202.91	433.30
9	275.31	411.44	249.70	830.16

5.3.2 การทดลองการกระแทกแนวตั้ง

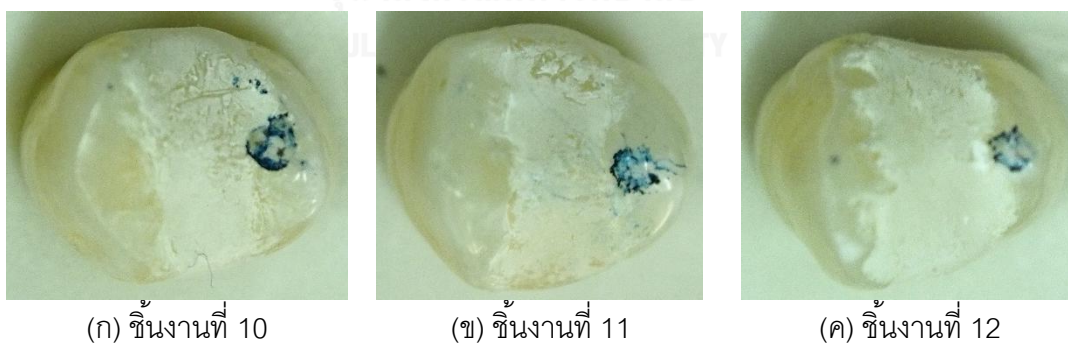
การจับยึดชิ้นงานในการทดลองส่วนนี้ใช้ชุดจับยึดชิ้นงานที่มีความลาดชัน 10° และการจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงานและหัวกดชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.16 ซึ่งแตกต่างจากการทดลองก่อนหน้า (ดูรูปที่ 5.3 เปรียบเทียบ) กล่าวคือ ชิ้นงานมีการเอียงในทิศตรงข้ามกันกับการทดลองที่ผ่านมา เหตุที่ต้องจัดตำแหน่งการขบกันในลักษณะที่แตกต่างกับการทดลองแบบขบเคี้ยวเพื่อให้ได้แรงกระแทกที่ทำกับฟันในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือแรงกระทำในทั้งสองกรณีมีแนวโน้มที่จะทำให้อุดฟันด้านที่เป็นซี่งเล็กเกิดความเสียหาย และเพื่อจัดตำแหน่งให้ปลายของหัวกดชิ้นงานสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน (ผิวหน้าของชิ้นงานมีความชันค่อนข้างมากทำให้ผิวของชิ้นงานสัมผัสกับด้านข้างของหัวกดชิ้นงานมากเกินไป การจัดชิ้นงานในลักษณะนี้สามารถช่วยลดความชันได้) เมื่อติดตั้งชิ้นงานแล้วจึงตรวจสอบลักษณะที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าของชิ้นงานด้วยการใช้กระดาษสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับหัวกดชิ้นงาน รอยที่หัวกดชิ้นงานกระทำบนผิวหน้าชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.17 จากนั้นดำเนินการทดลองจนกระทั่งชิ้นงานแตกหักหรือครบ 100,000 รอบการเคี้ยว จึงหยุดการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก มีเพียงการเสียหายที่ผิวชิ้นงานบริเวณที่มีการกระแทกกับหัวกดเท่านั้น การเสียหายของชิ้นงานเมื่อทดลองครบ 100,000 รอบการเคี้ยว เป็นดังรูปที่ 5.18

แรงเคี้ยวที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 5.19 โดยกราฟแรงเคี้ยวจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ กราฟแรงเคี้ยวช่วงต้นการทดลอง และกราฟแรงเคี้ยวช่วงปลายการทดลอง เมื่อนำข้อมูลในกราฟมาคำนวณแรงเคี้ยวจะได้ค่าแรงเคี้ยวเฉลี่ยและแรงเคี้ยวสูงสุดดังตารางที่ 5.6 พิจารณากราฟแรงเคี้ยวพบว่ากราฟแรงเคี้ยวของชิ้นงานที่ 10, 11 และ 12 จะมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน กราฟช่วงปลายการทดลองยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟช่วงต้นการทดลองแต่มีระยะเวลาที่สั้นกว่าเล็กน้อยและมีความผันผวนของ

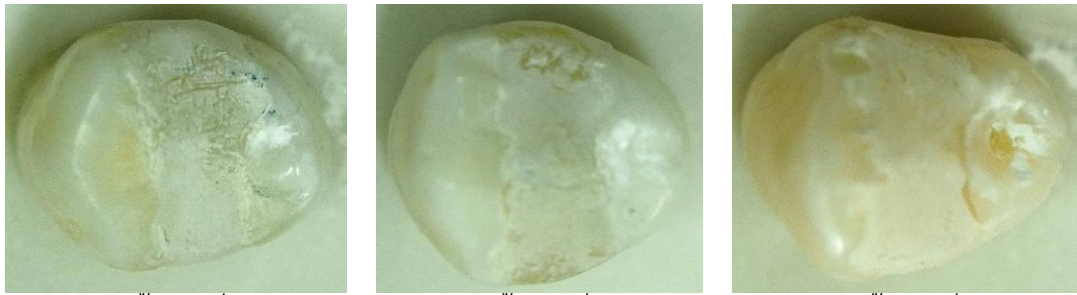
กราฟในแต่ละช่วงมากกว่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อดำเนินการทดลองไปเรื่อย ๆ ผิวชิ้นงานก็จะค่อย ๆ สึกไป และเนื่องจากการทดลองนี้เป็นการกระแทกแนวตั้งทำให้ระยะเวลาที่หัวกดชิ้นงานสัมผัสกับผิวชิ้นงานขึ้นอยู่กับเนื้อของชิ้นงานตอนจัดตั้งชิ้นงานกับหัวกดชิ้นงานก่อนการทดลอง หากเนื้อดังกล่าวสึกไปก็จะทำให้หัวกดชิ้นงานต้องเคลื่อนลงไปลึกขึ้นกว่าจะสัมผัสกับผิวชิ้นงาน ส่งผลให้ระยะเวลาที่หัวกดชิ้นงานสัมผัสกับผิวชิ้นงานลดลง ซึ่งทำให้กราฟช่วงปลายการทดลองมีระยะเวลาที่สั้นลงกว่าช่วงต้นการทดลอง



รูปที่ 5.16 การจัดตำแหน่งการขบกันระหว่างชิ้นงานและหัวกดชิ้นงาน สำหรับการทดลองการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง



รูปที่ 5.17 การตรวจสอบหน้าสัมผัสที่หัวกดชิ้นงานกระทำต่อชิ้นงานฟันที่มีการอุด สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง



(ก) ชั้นงานที่ 10

(ข) ชั้นงานที่ 11

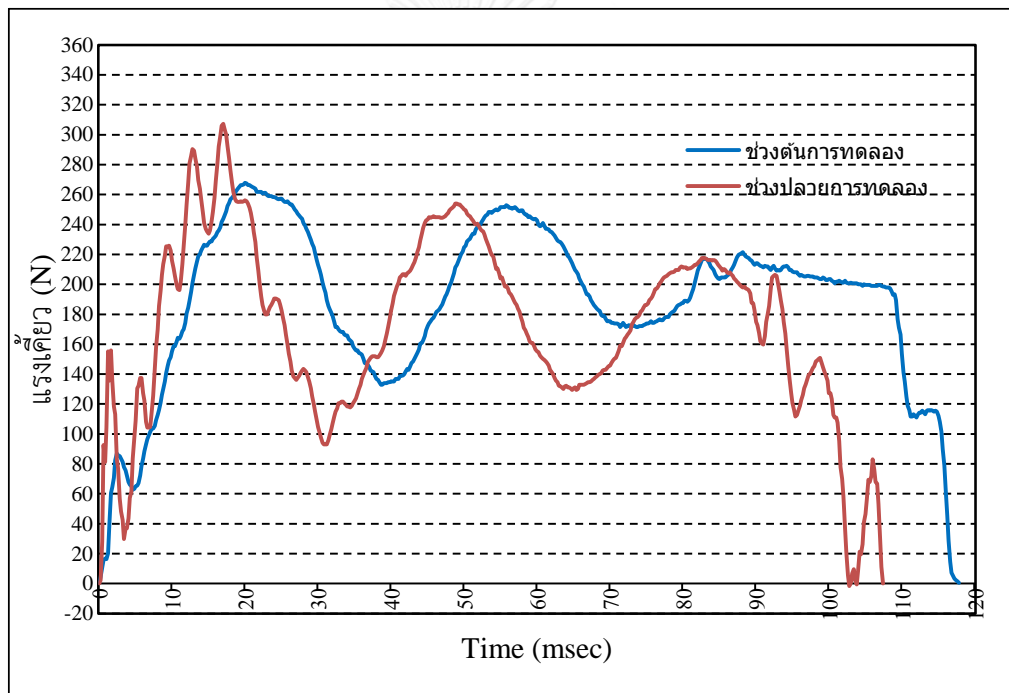
(ค) ชั้นงานที่ 12

(111,001 รอบการเคี้ยว)

(100,005 รอบการเคี้ยว)

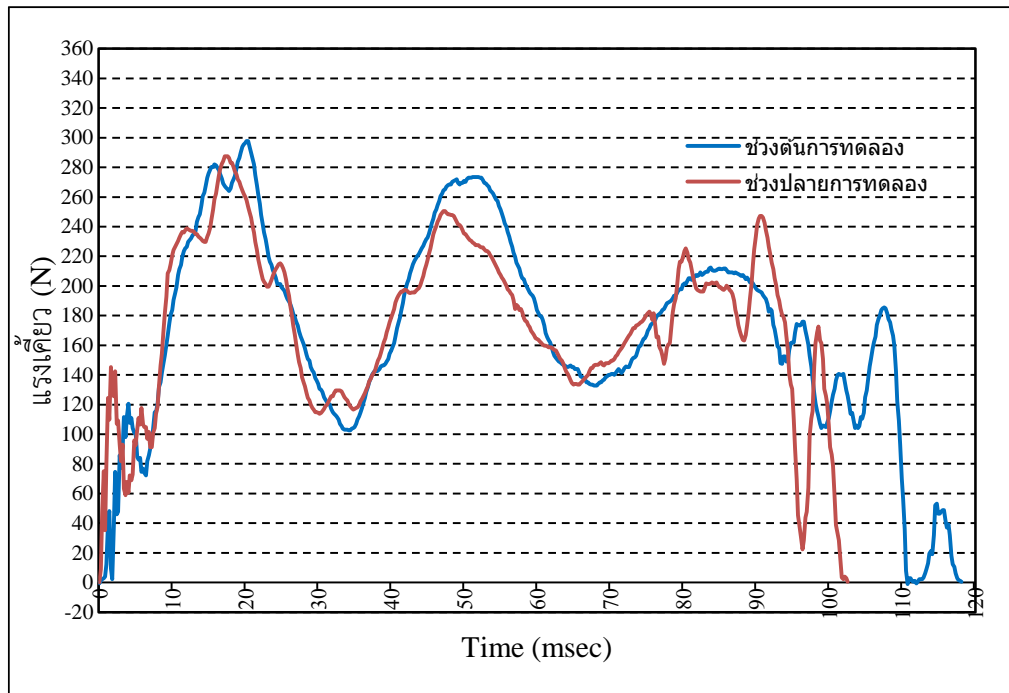
(100,101 รอบการเคี้ยว)

รูปที่ 5.18 การเสียหายของชั้นงานในการทดลองการเสียหายของชั้นงานจนกระทั่งชั้นงานแตกหัก วิธี
การเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

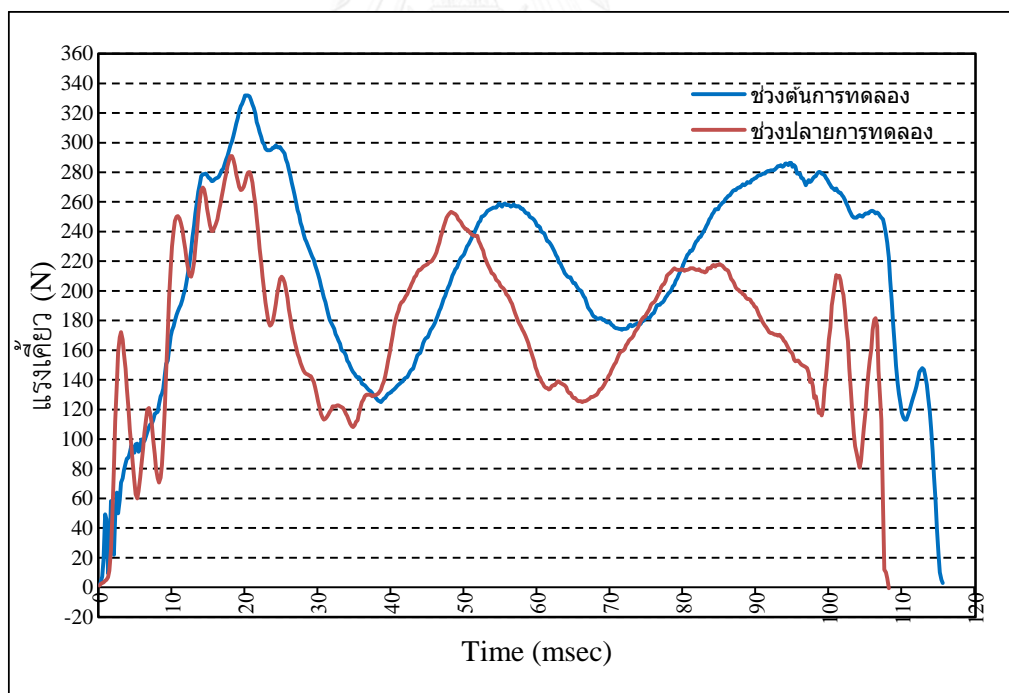


(ก) ชั้นงานที่ 10

รูปที่ 5.19 แรงเคี้ยวของการทดลองการเสียหายของชั้นงานจนกระทั่งชั้นงานแตกหัก วิธี
การเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง



(ข) ชิ้นงานที่ 11



(ค) ชิ้นงานที่ 12

รูปที่ 5.19 แรงเคี้ยวของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง (ต่อ)

ตารางที่ 5.6 แรงเคี้ยวที่วัดได้สำหรับการทดลองชิ้นงานที่มีการถอดของการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง

ชิ้นงานที่	แรงเคี้ยวที่วัดได้ (N)			
	ช่วงต้นการทดลอง		ช่วงปลายการทดลอง	
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
10	187.02	267.94	171.34	307.18
11	167.58	297.65	173.79	287.56
12	210.09	331.84	174.10	290.92

5.3 สรุปผลการทดลอง

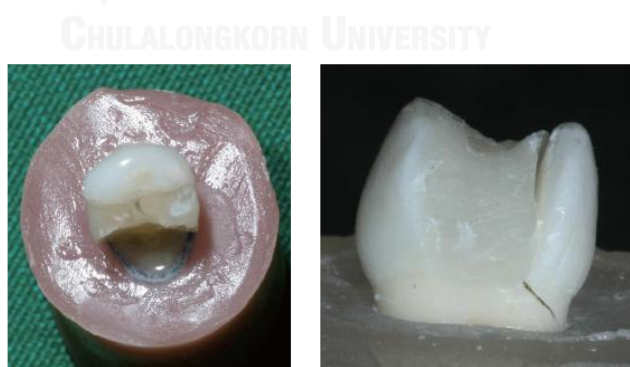
บทนี้เป็นการประยุกต์ใช้ชุดทดลองที่ผ่านการสอบทวนแล้วทำการทดลองทางทันตกรรม การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดตรวจสอบรอยแตกช้า และการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก การทดลองทั้งสองชุดกำหนดให้ทดลองด้วยความถี่การเคี้ยว 1 เฮิร์ตซ์ และกำหนดแรงเคี้ยวควบคุมอยู่ที่ 9.8 กิโลกรัม สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดตรวจสอบรอยแตกช้า และ 19.8 กิโลกรัม สำหรับการทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก ชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฟันที่ไม่มีการอุด และฟันที่มีการอุด การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดตรวจสอบรอยแตกช้าใช้ชิ้นงานฟันที่ไม่มีการอุด 4 ซี่ และฟันที่ไม่มีการอุด 1 ซี่ (ชิ้นงานที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ) การทดลองการเสียหายของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานแตกหักใช้ชิ้นงานฟันมีการอุด 7 ซี่ (ชิ้นงานที่ 6 ถึง 12) ผลการทดลองเป็นดังนี้

การทดลองการเสียหายของชิ้นงานโดยการใช้สปีดตรวจสอบรอยแตกช้าเป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะรอยแตกช้าที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน การทดลองแบ่งออกเป็น การทดลองฟันที่ไม่มีการอุด และการทดลองฟันที่มีการอุด โดยการทดลองฟันที่ไม่มีการอุดทดลองทั้งวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว (ชิ้นงานที่ 1 และ 2) และวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง (ชิ้นงานที่ 3 และ 4) ส่วนการทดลองฟันที่มีการอุดทดลองเฉพาะวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว (ชิ้นงานที่ 5) เมื่อเริ่มการทดลองแล้ว การทดลองฟันที่ไม่มีการอุดกำหนดให้หยุดการทดลองเมื่อสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟแรงเคี้ยวที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ข้อกำหนดนี้สามารถใช้ได้ในการทดลองแบบการขบเคี้ยว ชิ้นงานที่ 1 และ 2 มีการเสียหายเป็นรอยแตกช้าขนาดใหญ่ให้เห็นอย่างชัดเจนดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 แต่สำหรับการทดลองแบบการกระแทกแนวตั้งไม่สามารถใช้วิธีนี้เป็นเกณฑ์ในการหยุดการทดลองได้ เนื่องจากกราฟแรงเคี้ยวไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน จึงกำหนดให้หยุดการทดลองชิ้นงานที่ 3 ที่

30,000 รอบการเคี้ยว (หยุดทดลองชิ้นงานที่ 3 จริงที่ 30,229 รอบการเคี้ยว) และใช้เป็นเกณฑ์สำหรับหยุดการทดลองของชิ้นงานที่ 4 เช่นกัน แต่เพิ่มควมถี่ในการหยุดตรวจสอบรอยแตกร้าวที่รอบการเคี้ยวที่ 1,000 , 3,000, 6,000, 10,000, 20,000 และ 30,000 รอบ เพื่อศึกษาแนวโน้มการเติบโตของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ 4 ซึ่งผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานที่ 3 และ 4 (ดูรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ) พบว่ามีการเสียหายของชิ้นงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวอย่างมาก และเมื่อพิจารณาแนวโน้มการขยายตัวของรอยแตกร้าวในชิ้นงานที่ 4 พบว่ารอยแตกร้าวมีขนาดยาวขึ้นและมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นใหม่จำนวนหนึ่งเมื่อหยุดตรวจสอบที่รอบการเคี้ยวที่เพิ่มขึ้น ส่วนกราฟแรงเคี้ยวช่วงปลายการทดลองจะมีลักษณะที่มีความผันผวนมากกว่ากราฟช่วงต้นการทดลอง และมีขนาดของแรงเฉลี่ยที่ลดลงจากช่วงต้นการทดลอง โดยลักษณะของกราฟช่วงปลายการทดลองกับช่วงต้นการทดลองดังกล่าวไม่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเหมือนกับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวที่กราฟช่วงปลายการทดลองจะมีความผันผวนมากและทรงกราฟเปลี่ยนไปจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของการทดลองชิ้นงานฟันที่มีการอุด (ชิ้นงานที่ 5) วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว ใช้เกณฑ์การเปลี่ยนแปลงของกราฟแรงเคี้ยวที่วัดได้เช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดลองชิ้นงานที่ 1 และ 2 ในการหยุดการทดลอง ผลการทดลองปรากฏว่ากราฟแรงเคี้ยวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจึงหยุดการทดลองเมื่อครบ 10,001 รอบการเคี้ยว เมื่อตรวจสอบชิ้นงานพบว่ามียรอยแตกร้าวตามรอยต่อระหว่างเนื้อฟันกับวัสดุอุดฟันดังรูปในตารางที่ 5.4 ด้านที่หักของชิ้นงานสัมผัสกับชิ้นงาน แต่ไม่มีรอยแตกร้าวรุนแรงเหมือนกับชิ้นงานที่ 1 และ 2 เมื่อพิจารณากราฟแรงเคี้ยวที่วัดได้ของชิ้นงานที่ 5 (ดูรูปที่ 5.12) พบว่าลักษณะของกราฟช่วงปลายการทดลองคล้ายกับช่วงต้นการทดลองและมีขนาดของแรงเคี้ยวเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่กราฟช่วงปลายการทดลองมีระยะเวลาสั้นกว่า

การทดลองชุดที่สองเป็นการทดลองการเสียหายของชิ้นงาน โดยทำการทดลองจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นฟันที่มีการอุด การทดลองกำหนดความถี่การเคี้ยว 1 เฮิร์ตซ์ และแรงเคี้ยวควบคุม 19.8 กิโลกรัม การทดลองแบ่งออกเป็น การทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว (ชิ้นงานที่ 6 ถึง 9) และการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง (ชิ้นงานที่ 10 ถึง 12) ดำเนินการทดลองจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก หรือจนกว่าจะครบ 100,000 รอบการเคี้ยว หากชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก ผลการทดลองพบว่าในการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว ชิ้นงานที่ 6 ถึง 9 เกิดการแตกหักทั้งหมด โดยชิ้นงานแตกหักที่ 241, 577, 5,081 และ 2,073 รอบการเคี้ยว ตามลำดับ การแตกชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้น มีลักษณะที่เป็นการแตกตรงรอยต่อระหว่างเนื้อฟันกับวัสดุอุดฟันโดยที่เนื้อฟันจะแตกหลุดออก (ดูรูปที่ 5.14 ประกอบ) ซึ่งการแตกลักษณะเช่นนี้คล้ายคลึงกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งแรงของฟันที่มีการอุดโดยใช้หวัคชิ้นงานจนแตกหักด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) [34, 35] ดังรูปที่ 5.20 ใน

รูปเป็นชิ้นงานฟันที่มีการถอดลักษณะเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ โดยชิ้นงานเกิดการแตกหักตามรอยต่อระหว่างเนื้อฟันกับวัสดุอุดฟันแล้วแตกออกที่บริเวณโคนฟันเช่นเดียวกับการทดลองในวิทยานิพนธ์ เมื่อพิจารณารูปแรงเคี้ยวพบว่ากราฟช่วงปลายการทดลองของชิ้นงานที่ 6 และ 7 มีความผันผวนน้อยกว่าชิ้นงานที่ 8 และ 9 และมีขนาดของแรงในแต่ละช่วงใกล้เคียงกับช่วงต้นการทดลองมากกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจำนวนรอบการเคี้ยวของชิ้นงาน 8, 9 ที่มากกว่าชิ้นงาน 6, 7 ค่อนข้างมาก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ 8 และ 9 มีการสึกหรอหรือการเสียหายที่ผิวหน้าที่หวดสัมผัสมากกว่า ทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนไปจากเดิม (ผิวไม่เรียบ มีร่องรอยแตกร้าว หรือเป็นหลุมลึก) ส่งผลให้ช่วงที่หวดสัมผัสกับผิวชิ้นงานอาจเกิดการกระแทกกับจุดที่ผิวไม่เรียบ หรือไม่สัมผัสกับผิวชิ้นงานทำให้แรงที่วัดได้มีความผันผวนสูงกว่าช่วงต้นการทดลอง ดังจะเห็นได้จากกราฟช่วงปลายการทดลองของชิ้นงานที่ 8 และ 9 ว่ามีบางช่วงที่แรงมีขนาดเพิ่มขึ้นมากและบางช่วงที่แรงลดลงเป็นศูนย์ สำหรับการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง ชิ้นงานที่ 10 ถึง 12 ไม่เกิดการแตกหักแบบการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว แต่มีการเสียหายของชิ้นงานเป็นลักษณะการสึกหรอที่ผิวบริเวณที่สัมผัสกับหวดชิ้นงานเป็นหลุมดังรูปที่ 5.18 เมื่อพิจารณารูปแรงเคี้ยวพบว่ากราฟของชิ้นงานที่ 10, 11 และ 12 มีความคล้ายคลึงกัน กราฟช่วงปลายการทดลองยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟช่วงต้นการทดลองแต่มีระยะเวลาที่สั้นกว่าเล็กน้อยและมีความผันผวนของกราฟในแต่ละช่วงมากกว่า (ดูรูปที่ 5.19 ประกอบ) ที่เป็นเช่นนี้เพราะผิวชิ้นงานเกิดการสึกหรอ ประกอบกับการทดลองนี้เป็นการกระแทกแนวตั้งทำให้ระยะเวลาที่หวดชิ้นงานสัมผัสกับผิวชิ้นงานขึ้นอยู่กับเนื้อของชิ้นงานตอนจัดตั้งชิ้นงานกับหวดชิ้นงานก่อนการทดลอง หากเนื้อดังกล่าวสึกไปก็จะทำให้ระยะเวลาที่ผิวชิ้นงานสัมผัสกับหวดชิ้นงานน้อยลง ทำให้กราฟช่วงปลายการทดลองมีระยะเวลาที่สั้นลงกว่าช่วงต้นการทดลอง



รูปที่ 5.20 ตัวอย่างการแตกหักของฟันที่มีการถอดจากการทดลองกัดฟันด้วยเครื่องทดสอบ
อเนกประสงค์ [34, 35]

ผลการทดลองในบทนี้สามารถสรุปได้ว่าการทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวทำให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานแตกต่างจากการทดลองโดยใช้วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง กล่าวคือ การทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวทำให้ฟันที่ไม่มีการอุดเกิดรอยแตกร้าขนาดใหญ่ที่ผิวหน้าชิ้นงานที่ 1 และชิ้นงานที่ 2 เกิดการแตกหัก ส่วนฟันที่ไม่มีการอุดเกิดการเสียหายอย่างรุนแรงจนชิ้นงานเกิดการแตกหักทุกชิ้น ในขณะที่การทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้งทำให้ชิ้นงานเกิดการสึกหรอที่ผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกับหัวกดชิ้นงาน และทำให้เกิดรอยแตกร้าขยายตัวขึ้นที่ผิวชิ้นงานเมื่อตรวจสอบด้วยสีสเปร์ยตรวจสอบรอยแตกร้า และการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวทำให้เกิดการแตกหักของฟันที่ไม่มีการอุดและฟันที่มีการอุดคล้ายคลึงกับผลการทดสอบของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบการแตกหักของชิ้นงานที่เป็นฟันโดยการกดชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์โดยใช้แรงสถิติจนชิ้นงานแตกหัก อย่างไรก็ตามฟันที่ไม่มีการอุดที่นำมาทดลองมีจำนวนน้อย และการทดลองเน้นไปที่การตรวจสอบรอยแตกร้า จึงควรทดลองโดยใช้ฟันที่ไม่มีการอุดจนชิ้นงานแตกหักเพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลองฟันที่มีการอุดเพิ่มเติมในอนาคต



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

การทดสอบการใช้งานทันตวัสดุที่ดีที่สุดคือการทดลองจริงในคลินิก อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยากลำบากในการเก็บข้อมูลเพราะมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้หลายอย่าง เช่น พฤติกรรมของผู้เข้ารับการรักษา บุคลากรที่ติดตามเก็บข้อมูล เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลยาวนานประมาณ 3 – 4 ปี ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดการวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบทันตวัสดุในห้องปฏิบัติการแทนที่การทดสอบทางคลินิกขึ้น การทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปประกอบด้วย การทดสอบกับวัสดุที่เป็นชิ้นงานมาตรฐาน เช่น เป็นแท่งหรือแผ่นวัสดุ และการทดสอบวัสดุที่ประกอบอยู่บนฟัน ในยุคแรก ๆ รูปแบบการทดสอบส่วนใหญ่จะใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ในการให้แรงกดขึ้นงานซึ่งอาจเป็นการกดแบบวัฏจักร (cyclic load) หรือการกดแบบแรงสถิต (static load) จนวัสดุเกิดความเสียหาย ต่อมาได้มีการปรับปรุงการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ให้มีความคล้ายคลึงกับการเคี้ยวของมนุษย์มากขึ้น ตัวอย่างการปรับปรุงดังกล่าวได้แก่ งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาความแตกต่างของห้วงกดขึ้นงานทดสอบต่อผลการทดสอบเพื่อพัฒนาห้วงกดที่สามารถให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับการทดสอบทางคลินิกที่สุด การปรับปรุงให้มีการเคลื่อนไหวที่ในแนวระดับของชิ้นงานทดสอบรวมกับการกดขึ้นงานแนวตั้งเพื่อจำลองการขบเคี้ยวของฟันที่ไม่ได้มีแต่การกระแทกแนวตั้งเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีกรไถลบนผิวหน้าร่วมด้วย ซึ่งการทดสอบในลักษณะนี้มักจะใช้ทดสอบการสึกหรอของทันตวัสดุ รวมทั้งการควบคุมอุณหภูมิและจำลองสภาพความชื้นให้เหมือนกับในช่องปากของมนุษย์เพิ่มเติมเข้ามาในการทดสอบ อย่างไรก็ตามแม้ว่าการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ จะมีข้อได้เปรียบที่มีความแม่นยำในการกำหนดแรงกดขึ้นงาน แต่การเตรียมชุดทดลองให้มีลักษณะการเคี้ยวเหมือนการเคี้ยวของมนุษย์นั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยที่พยายามศึกษาพัฒนาเครื่องทดสอบทันตวัสดุ นอกเหนือจากการใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ เพื่อผลการทดสอบที่มีความใกล้เคียงกับการทดสอบทางคลินิกยิ่งขึ้น โดยงานวิจัยเหล่านี้ได้กล่าวถึงโดยละเอียดไปแล้วในบทที่ 2 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ในการทดสอบของงานวิจัยดังกล่าว อาจกล่าวได้ว่าการทดสอบทันตวัสดุจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ใหญ่ ๆ คือ การทดสอบการแตกหัก และการทดสอบการสึกหรอ

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ทำให้ได้แนวคิดในการออกแบบกลไกจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ และการควบคุมแรงเคี้ยวสำหรับการสร้างเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อการทดลองทางทันตกรรม โดยกลไกจำลองการเคี้ยวของมนุษย์มีแนวคิดมาจากการใช้กลไกข้อต่อ 4 ชั้น กลไกข้อ

ต่อ 4 ชั้น นี้ เป็นกลไกที่มีการใช้งานโดยทั่วไปในเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพราะเป็นกลไกข้อต่อแบบวงปิดที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดทำให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน กลไกนี้ประกอบด้วยข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่ 3 ชั้น (input link, coupler link และ follower link) และฐานของข้อต่อที่นับเป็นข้อต่อที่อยู่กับที่อีก 1 ชั้น (base link) การเคลื่อนที่ของกลไกจะทำให้เกิดเส้นโค้งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของจุดที่สนใจบน Coupler รูปร่างของเส้นโค้งจะขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของข้อต่อแต่ละชั้นและรูปร่างของ Coupler ดังนั้นจึงสามารถใช้เส้นโค้งดังกล่าวเป็นวิธีการเคี้ยวตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้กลไกที่จะใช้สร้างวิธีการเคี้ยวได้แล้ว การควบคุมแรงเคี้ยวและการวัดแรงของเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ก็เป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาในการออกแบบชุดทดลอง จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า การควบคุมแรงเคี้ยวด้วยวิธีการถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนักที่สอบเทียบแล้วเป็นวิธีหนึ่งที่มีความแม่นยำและง่ายในการนำมาประยุกต์ใช้ สำหรับการวัดแรงเคี้ยวจะใช้โหลดเซลล์เป็นอุปกรณ์วัดแรง โหลดเซลล์ที่เลือกใช้เป็นโหลดเซลล์ที่วัดแรงในแนวแกนเดียวขนาด 1 กิโลนิวตัน

เมื่อสร้างเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์แล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสอบทวนการทำงานของชุดทดลองดังกล่าว การสอบทวนประกอบด้วย การทดสอบการทำงานเบื้องต้น การสอบทวนวิธีการเคี้ยว การสอบทวนการวัดและควบคุมแรงเคี้ยว และการทดสอบการขบเคี้ยวของฟันโดยใช้ชุดทดลอง จากผลการสอบทวนชุดทดลองพบว่ามีการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ การปรับความถี่การเคี้ยวสามารถปรับได้ในช่วง 0.1 – 1.9 เฮิรตซ์ และวิธีการเคี้ยวเป็นไปตามวิธีการเคี้ยวที่ออกแบบไว้ คือ สามารถปรับให้มีวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวของมนุษย์และสามารถปรับเปลี่ยนวิธีการเคี้ยวให้เป็นแบบการกระแทกในแนวตั้งได้ ในส่วนของการควบคุมแรงเคี้ยวด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักนั้นสามารถอ่านแรงเคี้ยวได้จากโหลดเซลล์ซึ่งแรงเคี้ยวที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักที่ตั้งไว้และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเพิ่มน้ำหนัก ในส่วนต่อมาเมื่อพิจารณาลักษณะของฟันในส่วนที่สัมผัสกันขณะเกิดการขบเคี้ยวจะมีลักษณะที่มีการกระแทกและไถลไปตามผิวฟันตามที่ต้องการให้เกิดขึ้นเหมือนกับที่เกิดในการเคี้ยวของมนุษย์

วิทยานิพนธ์นี้บรรลುವัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ที่ตั้งไว้ทั้ง 3 ข้อ กล่าวคือ สำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 งานวิจัยนี้สามารถออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อใช้ในการทดลองทางทันตกรรมได้ ผลการสอบทวนเครื่องต้นแบบแสดงว่าการทำงานของเครื่องเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ กล่าวคือ การควบคุมความถี่การเคี้ยว วิธีการเคี้ยว และการควบคุมแรงสามารถทำได้ตามที่กำหนดไว้ โดยชุดทดลองสามารถปรับความถี่การเคี้ยวได้ในช่วง 0.1 – 1.9 เฮิรตซ์ วิธีการเคี้ยวสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 แบบ ได้แก่ วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว และวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้ง ชุดทดลองมีการควบคุมแรงเคี้ยวโดยใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วงซึ่งสามารถควบคุมแรงเคี้ยวให้อยู่ในช่วง 70 – 500 นิวตัน สำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ที่เกี่ยวข้องกับผลการทดลองชิ้นงานฟันที่มีการอุดฟัน วิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวในบทที่ 5 แสดงให้เห็นลักษณะการแตกหักของฟันที่

สอดคล้องกับผลการทดสอบในงานวิจัยในอดีต กล่าวคือ การทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวที่มีชิ้นงานเป็นฟันที่มีการอุด 4 ซี่ พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักทั้งหมด โดยชิ้นงานแตกหักที่ 241, 577, 5,081 และ 2,073 รอบการเคี้ยว ตามลำดับ การแตกหักของชิ้นงานมีลักษณะที่เป็นการแตกตรงรอยต่อระหว่างเนื้อฟันกับวัสดุอุดฟัน โดยที่เนื้อฟันจะแตกหลุดออก เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานดังกล่าวกับงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งแรงฟันที่มีการอุด โดยใช้หัวกดชิ้นงานจนแตกหักด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ [34, 35] พบว่าการแตกหักมีความคล้ายคลึงกัน สำหรับวัสดุประสังค์ข้อที่ 3 สามารถแสดงได้ว่าผลการทดสอบระหว่างวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวมีความแตกต่างกันโดยสังเกตได้จากการเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานดังกล่าวไปแล้วในบทที่ 5 กล่าวคือ ผลการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยวชิ้นงานจะสึกเป็นแนวยาวตามลักษณะการเข้ากระทบกับหัวกดและมีการไหลของหัวกดไปบนชิ้นงานจนกระทั่งจากออกจากกัน ในขณะที่ผลการทดลองวิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้งชิ้นงานจะสึกเป็นวงกลมที่มีขนาดตามหน้าสัมผัสของปลายหักดที่กระทบกับผิวหน้าของชิ้นงาน นอกจากนี้การทดลองแบบการขบเคี้ยวเช่นนี้จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างรวดเร็วและรุนแรง กล่าวคือ ในการทดลองชิ้นงานที่เป็นฟันที่ไม่มีการอุดด้วยวิธีการเคี้ยวแบบการขบเคี้ยว เมื่อฟันสี่สเปียร์ตรวจสอบรอยแตกแล้วพบว่าชิ้นงานมีรอยแตกแล้วเป็นแนวยาวอย่างเห็นได้ชัดที่ผิวหน้าชิ้นงาน รอยแตกแล้วมีลักษณะเป็นรอยผ่าตามยาวชิ้นงานลงมาจนถึงโคนของชิ้นงาน และผลการทดลองฟันที่ไม่มีการอุดก็พบว่าชิ้นงานมีการแตกหักอย่างรวดเร็วดังที่ได้กล่าวไปในวัสดุประสังค์ข้อที่ 2 ในขณะที่วิธีการเคี้ยวแบบการกระแทกแนวตั้งทำให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานในลักษณะที่เป็นการสึกหรือเป็นจุดบริเวณที่มีหัวกดชิ้นงานกระทบกับผิวชิ้นงาน และชิ้นงานยังสามารถรับภาระต่อไปได้เกิน 100,000 รอบการเคี้ยว การบรรจุวัสดุประสังค์ของวิทยานิพนธ์ทั้งหมดเป็นการยืนยันได้ในขั้นต้นว่าเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำงานได้ และสามารถใช้ในการทดลองทางทันตกรรมได้ตามที่กำหนดไว้ในตอนต้น

6.2 ข้อจำกัดของชุดทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ชุดทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการสำหรับการนำไปใช้ในการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพ ข้อจำกัดเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องแก้ไขปรับปรุง ต่อไปนี้จะกล่าวถึงข้อจำกัดและแนวทางการแก้ไข

- 1) การสัมผัสระหว่างหัวกดชิ้นงานกับผิวชิ้นงาน เมื่อการทดลองดำเนินไประยะเวลาหนึ่ง ผิวหน้าของชิ้นงานจะเกิดการสึกหรือเป็นหลุมลึกลงไปบนผิวชิ้นงานทำให้ระยะเวลาที่หัวกดสัมผัสกับผิวชิ้นงานลดลงไป สิ่งนี้ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับผลการทดลอง นั่นคือหัวกดชิ้นงานจะสร้างความเสียหายให้กับชิ้นงานได้น้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อการสึกหรือที่ผิวหน้าของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เมื่อการทดลอง

ดำเนินต่อไปจนถึงจุดหนึ่งแล้วชิ้นงานยังไม่เกิดการแตกหักแต่การสึกหรอกลับมีมากจนหวัคชิ้นงานแทบจะไม่สัมผัสกับผิวของชิ้นงาน การทดลองนี้ก็จะไม่สามารถทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายต่อไปได้อีก ดังนั้นจึงต้องมีการหยุดการทดลองเป็นระยะเพื่อปรับระดับการกดของหัวกดบนผิวชิ้นงานให้อยู่ในระดับที่กำหนด ทั้งนี้ชุดทดลองยังมีความไม่สะดวกในการปรับระดับการกดดังกล่าวเนื่องจากการออกแบบชุดทดลองในตอนต้นไม่ได้คำนึงถึงในส่วนนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบเพิ่มเติมในส่วนของการปรับระดับการกดของหัวกดชิ้นงานบนผิวชิ้นงานให้มีความเหมาะสม

2) แรงเสียดทานจากการที่ฐานรองตุ้มน้ำหนักเปียดกับเสาวเวลาที่ชิ้นงานด้านล่างเคลื่อนที่เข้าด้านชิ้นงานด้านบนหรือหัวกดชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเกิดกับวิธีการเคี้ยวที่เป็นแบบการขบเคี้ยว นอกจากนี้ Clearance ของเสากับ Linear bearing ของฐานรองแผ่นน้ำหนักมีค่ามากเกินไป อีกทั้งขนาดของ Linear bearing ดังกล่าวสั้นเกินไป (ยาว 20 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูใน 20 มิลลิเมตร) จึงทำให้มีการคลอนเกิดขึ้นเมื่อฐานรองแผ่นน้ำหนักขยับขึ้นลง แนวทางแก้ไขควรเปลี่ยน Linear bearing ให้มีขนาดความยาวอย่างน้อย 30 มิลลิเมตร (ยาวกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูใน) เช่นเดียวกับที่เคยใช้แก้ปัญหาการคลอนของกลไกข้อต่อ 4 ชิ้น ไปแล้วในบทที่ 3 และกลึงทำเสาใหม่ให้มีค่าพิคัดความเผื่อเป็น h6 พิกัดงานสวมของ Linear bearing กับเสามีความสำคัญมากเพราะหากสวมแน่นเกินไปก็มีข้อดีคือไม่คลอนเมื่อฐานรองตุ้มน้ำหนักขยับขึ้นลง แต่ก็ทำให้เกิดแรงเสียดทานที่มากเกินไป ในทางกลับกันหากสวมหลวมเกินไปจะทำให้เกิดการสั่นคลอนเมื่อฐานรองตุ้มน้ำหนักขยับขึ้นลง แต่จะมีข้อดีคือแรงเสียดทานจะลดลง นอกจากนี้ควรพิจารณาออกแบบฐานรองแผ่นน้ำหนักใหม่ให้เป็นแบบสวมกับเสาเพียง 2 เสา แทนจากเดิมที่เป็น 4 เสา เพื่อลดปัญหาการเปียดเสา

3) ปัญหาเศษชิ้นงานที่เกิดจากการสึกของผิวชิ้นงาน ปัญหานี้พบในการทดลองวัดแรงโดยใช้หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร กดกับชิ้นงานเหล็กสี่เหลี่ยมผิวเรียบในบทที่ 3 พบปัญหาว่าเมื่อทดลองไประยะหนึ่ง เศษของชิ้นงานที่เกิดจากการกระแทกกันจะมีบางส่วนเกาะติดที่ปลายหัวกดและบางส่วนติดอยู่ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ทำให้กราฟของแรงที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยแรงที่วัดได้มากขึ้นกว่าปรกติประมาณ 10 นิวตัน ในการทดลองใช้น้ำหนัก 7 กิโลกรัม (ช่วง 30 วินาทีแรกจะวัดได้ประมาณ 73-75 เทียบกับช่วง 30 วินาทีหลังหลังที่วัดได้ 81 – 85 นิวตัน) ดังนั้นแนวทางการปรับปรุงในอนาคตควรจะทำที่เป่าเศษวัสดุเพิ่มเติมเพื่อแก้ไขปัญหานี้

งานวิจัยในอนาคตที่น่าสนใจได้แก่ การประยุกต์ใช้เครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์นี้กับการทดลองทางทันตกรรมในกรณีต่าง ๆ โดยอาจจะทดลองกับวัสดุที่ใช้ในงานทันตกรรมชนิดต่าง ๆ การทดสอบกับครอบฟันหรือฟันเทียมเพื่อศึกษาถึงลักษณะการสึกหรอหรือการแตกหัก นอกจากนี้ยังอาจใช้ทดสอบเพื่อทำนายอายุการใช้งานของฟันที่จำลองการรักษาทางคลินิก เช่น การอุดฟัน การใส่ครอบฟัน เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Heintze, S. D., Zappini, G., and Rousson, V. Wear of ten dental restorative materials in five wear simulators-Results of a round robin test. Dental Materials, 21 (2005): 304-317.
- [2] Takanobu, H., Yajima, T., Nakazawa, M., Takanishi, A., Ohtsuki, K., and Ohnishi, M. Quantification of masticatory efficiency with a mastication Robot. IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1635-1640. Leuven, Belgium, 1998.
- [3] Anderson, K., Throckmorton, G. S., Buschang, P. H., and Hayasaki, H. The effects of bolus hardness on masticatory kinematics. Journal of Oral Rehabilitation, 29 (2002): 689-696.
- [4] Throckmorton, G. S., Ellis, E., and Hayasaki, H. Jaw kinematics during mastication after unilateral fractures of the mandibular condylar process. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 124 (6) (December 2003): 695-707.
- [5] Ogawa, T., Ogawa, M., and Koyano, K. Different responses of masticatory movements after alteration of occlusal guidance related to individual movement pattern. Journal of Oral Rehabilitation, 28 (2001): 830-841.
- [6] Gallo, L. M., Airoidi, G. B., Airoidi, R. L., and Palla, S. Description of mandibular finite helical axis pathways in asymptomatic subjects. Journal of Dental Research, 76(2) (1997): 704-713.
- [7] Homewood, C. I. Cracked tooth syndrome incidence, clinical findings and treatment. Australian Dental Journal, 43(4) (1998).
- [8] Helkimo, E., Carlsson, G. E., and Helkimo, M. Bite force and state of dentition. Acta Odontologica Scandinavica, 35 (August 1976): 297-303.
- [9] Kohyama, K., Hatakeyama, E., Sasaki, T., Dan, H., Azuma, T., and Karita, K. Effects of sample hardness on human chewing force: a model study using silicone rubber. Archives of Oral Biology, 49 (2004): 805-816.

- [10] Kelly, J. R. Clinically relevant approach to failure testing of all-ceramic restorations. The Journal of Prosthetic Dentistry, 81(6) (June 1999): 652-661.
- [11] Kim, J. H., Kim, J. W., Myoung, S. W., Pines, M., and Zhang, Y. Damage maps for layered ceramics under simulated mastication. Journal of Dental Research, 87(7) (2008): 671-675.
- [12] Guiberteau, F., Padture, N. P., Cai, H., and Lawn, B. R. Indentation fatigue a simple cyclic Herzian test for measuring damage accumulation in polycrystalline ceramics. Philosophical Magazine A, 68(5) (1993): 1003-1016.
- [13] Stawarczyk, B., Ozcan, M., Roos, M., Trottmann, A., and Hammerle, C. H. F. Fracture load and failure analysis of zirconia single crowns veneered with pressed and layered ceramics after chewing simulation. Dental Materials Journal, 30(4) (2011): 554-562.
- [14] Zahran, M., Mowafy, O. E., Tam, L., Watson, P. A., and Finer, Y. Fracture strength and fatigue resistance of all-ceramic molar crowns manufactured with CAD/CAM technology. Journal of Prosthodontics, 17 (2008): 370-377.
- [15] Kern, M., Strub, J. R., and Lu, X. Y. Wear of composite resin veneering materials in a dual-axis chewing simulator. Journal of Oral Rehabilitation, 26 (1999): 372-378.
- [16] Heintze, S. D., Albrecht, T., Cavalleri, A., and Steiner, M. A new method to test the fracture probability of all-ceramic crowns with a dual-axis chewing simulator. Dental Materials, 27 (2011): e10-e19.
- [17] Alemzadeh, K. and Raabe, D. Prototyping Artificial Jaws for the Bristol Dento-Munch Robo-Simulator 'A parallel robot to test dental components and materials'. The 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS Cité Internationale, pp. 1453-1456. Lyon, France, 2007.
- [18] Conserva, E., Tealdo, T., Bevilacqua, M., Pera, F., Ravera, G., and Pera, P. Robotic chewing simulator for dental materials testing on a sensor-equipped implant setup. The International Journal of Prosthodontics, 21(6) (2008): 501-508.
- [19] Stewart, D. A platform with six degrees of freedom. The Institution of Mechanical Engineers, pp. 371-386, 1965.

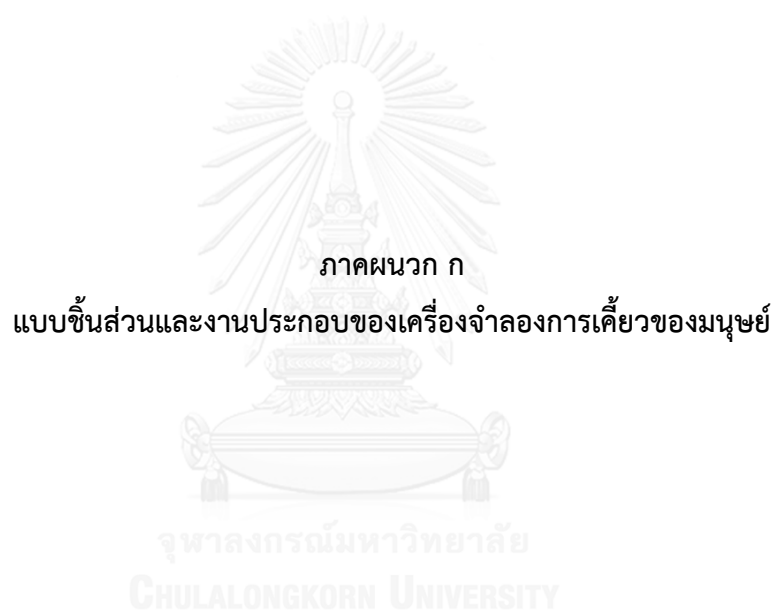
- [20] Xu, W. L., Lewis, D., Bronlund, J. E., and Morgenstern, M. P. Mechanism, design and motion control of a linkage chewing device for food evaluation. Mechanism and Machine Theory, 43 (2008): 376-389.
- [21] Wang, X. Y., Xu, W. L., Etzel, K., Potgieter, J., and Diegel, O. Mechanism design and analysis of a wearable device for rehabilitation of temporomandibular disorder. The 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1674-1679. Tianjin, China, 2010.
- [22] Arthur, G. E. and George, N. S. *Mechanism design analysis and synthesis*. Vol. 1, 3 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [23] วรวิทย์ อิงภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล. เล่มที่ 1, พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2544.
- [24] Jack, A. C. *Mechanical design of machine elements and machines*. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [25] สมยศ จันเกษม และ ศิโยคัตตี สีงะ. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, 2523.
- [26] Krejci, I., Albert, P., and Lutz, F. The influence of antagonist standardization on wear. Journal of Dental Research, 78(2) (February 1999): 713-719.
- [27] Heintze, S. D., Zellweger, G., Cavalleri, A., and Ferracane, J. Influence of the antagonist material on the wear of different composites using two different wear simulation methods. Dental Materials, 22 (2006): 166-175.
- [28] Heintze, S. D., Zellweger, G., Grunert, I., Munoz-Viveros, C. A., and Hagenbuch, K. Laboratory methods for evaluating the wear of denture teeth and their correlation with clinical results. Dental Materials, 28 (2012): 261-272.
- [29] Garoushi, S., Lassila, L. V. J., Tezvergil, A., and Vallittu, P. K. Static and fatigue compression test for particulate filler composite resin with fiber-reinforced composite substructure. Dental Materials, 23 (2007): 17-23.
- [30] Attia, A. and Kern, M. Influence of cyclic loading and luting agents on the fracture load of two all-ceramic crown systems. The Journal of Prosthetic Dentistry, 92(6) (December 2004): 551-556.

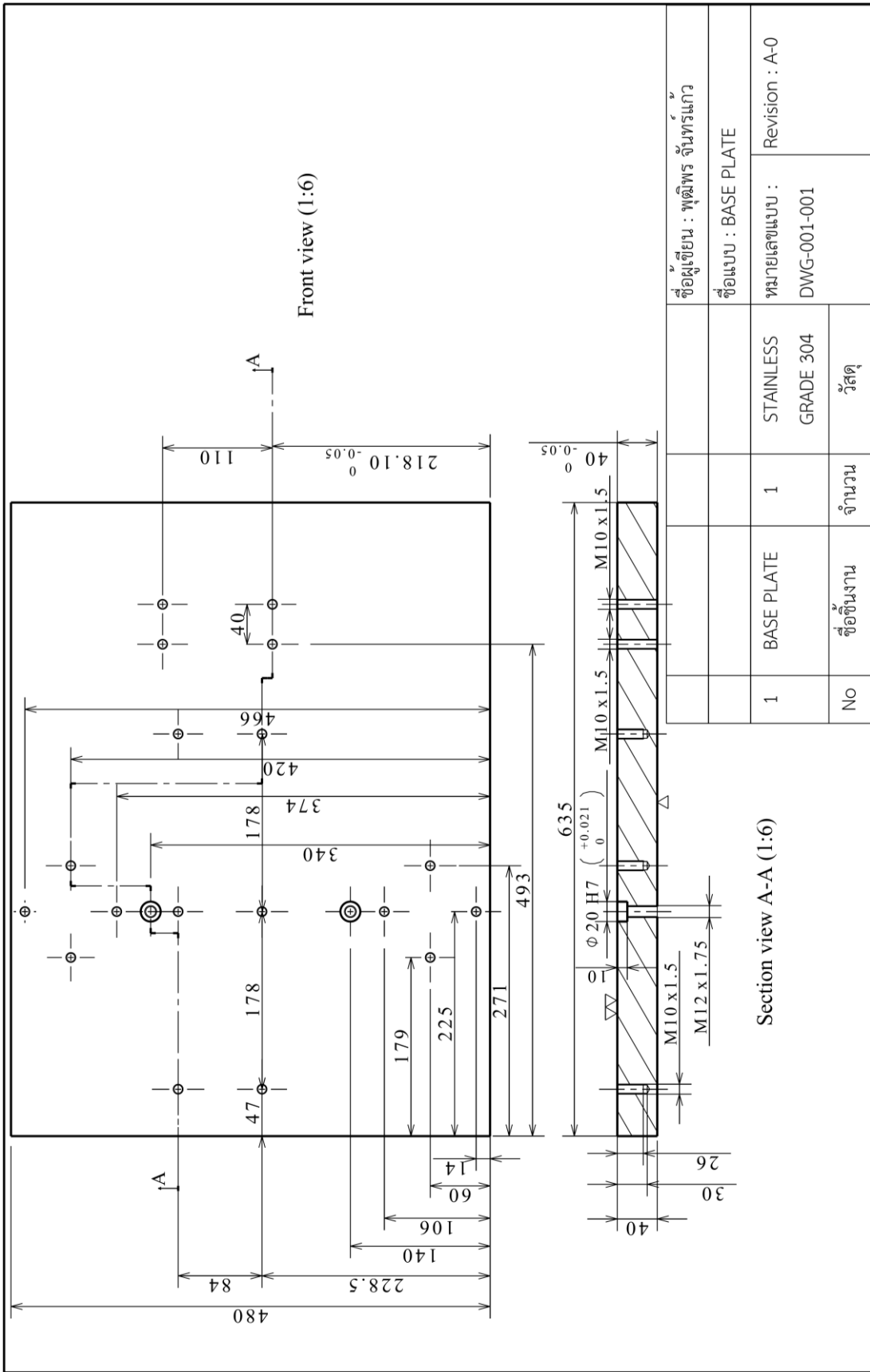
- [31] Coelho, P. G., Silva, N. R., Bonfante, E. A., Guess, P. C., Rekow, E. D., and Thompson, V. P. Fatigue testing of two porcelain–zirconia all-ceramic crown systems. Dental Materials, 25 (2009): 1122-1127.
- [32] Santana, T., Zhang, Y., Guess, P. C., Thompson, V. P., Rekow, E. D., and Silva, N. R. Off-axis sliding contact reliability and failure modes of veneered alumina and zirconia. Dental Materials, 25 (2009): 892-898.
- [33] Coelho, P. G., Bonfante, E. A., Silva, N. R. F., Rekow, E. D., and Thompson, V. P. Laboratory simulation of Y-TZP all-ceramic crown clinical failures. Journal of Dental Research, 88(4) (2009): 382-386.
- [34] Shafiei, F., Tavangar, M. S., Ghahramani, Y., and Fattah, Z. Fracture resistance of endodontically treated maxillary premolars restored by silorane-based composite with or without fiber or nano-ionomer. Journal of Advanced Prosthodontics, 6 (2014): 200-206.
- [35] Wu, W. C., Lin, T. M., Liu, P. R., Ramp, L. C., and Pan, Y. H. In vitro compressive fracture resistance of human maxillary first premolar with different mesial occlusal distal cavity. Journal of Dental Sciences, 9 (2014): 221-228.

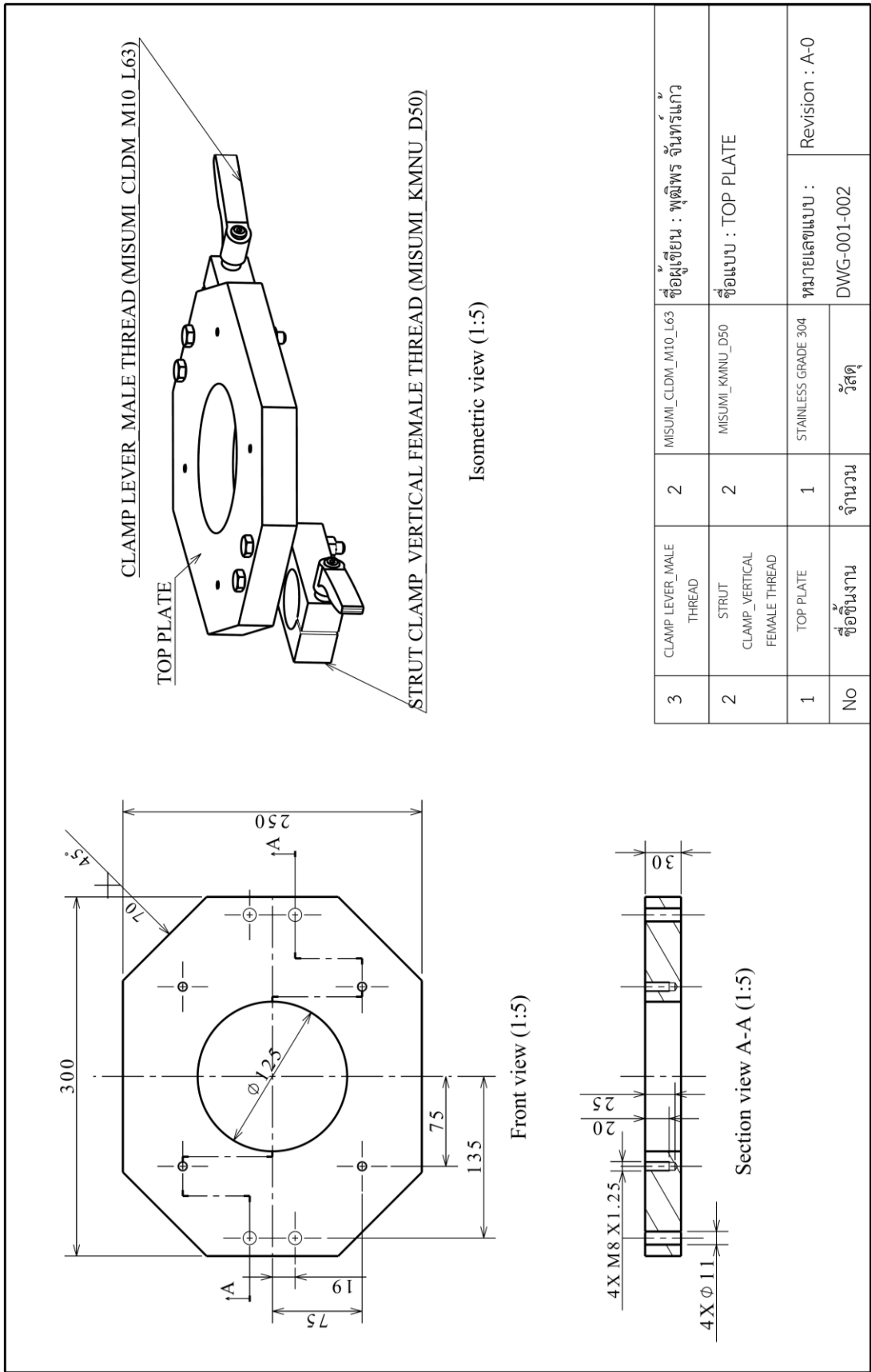


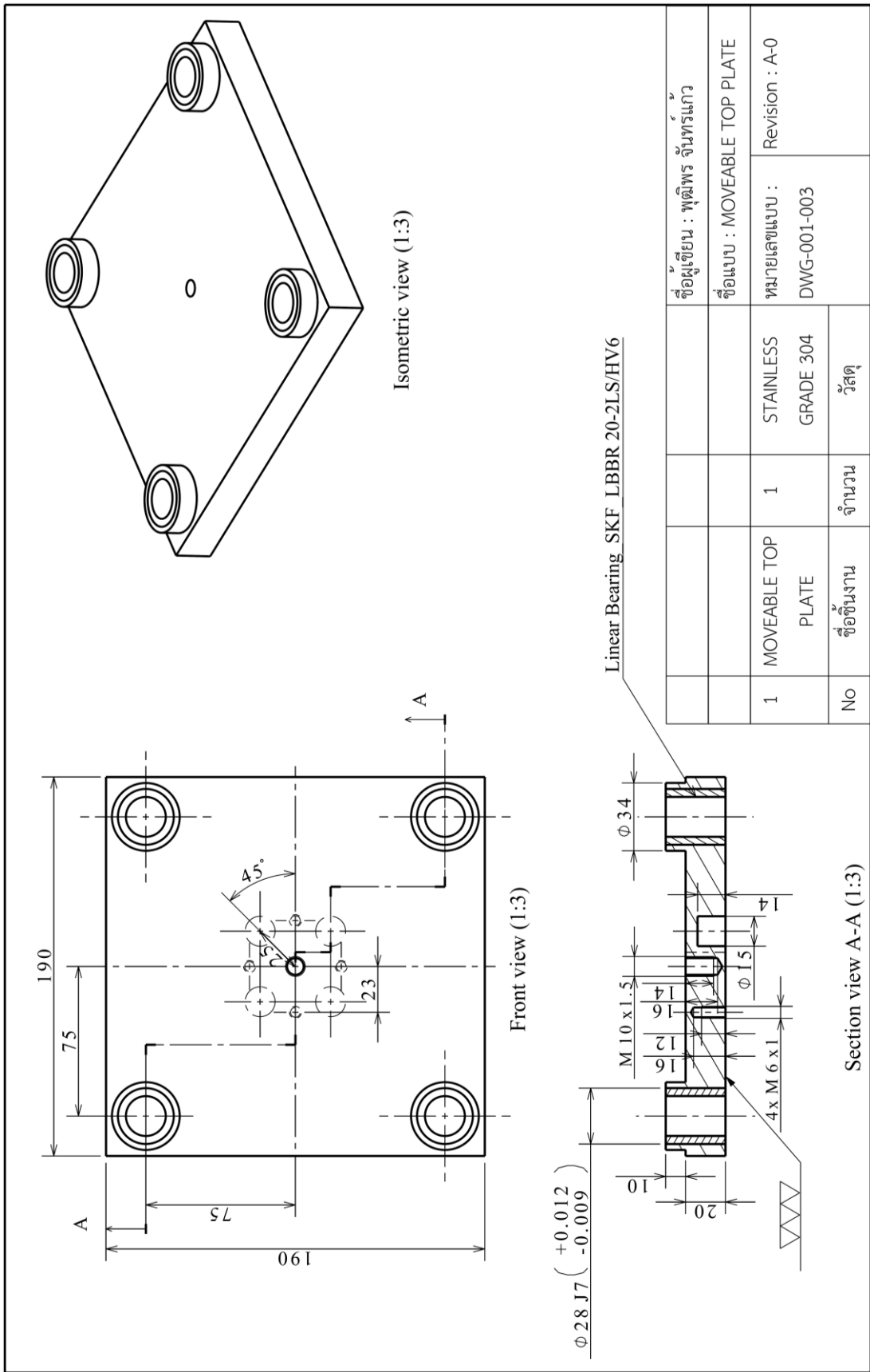
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY





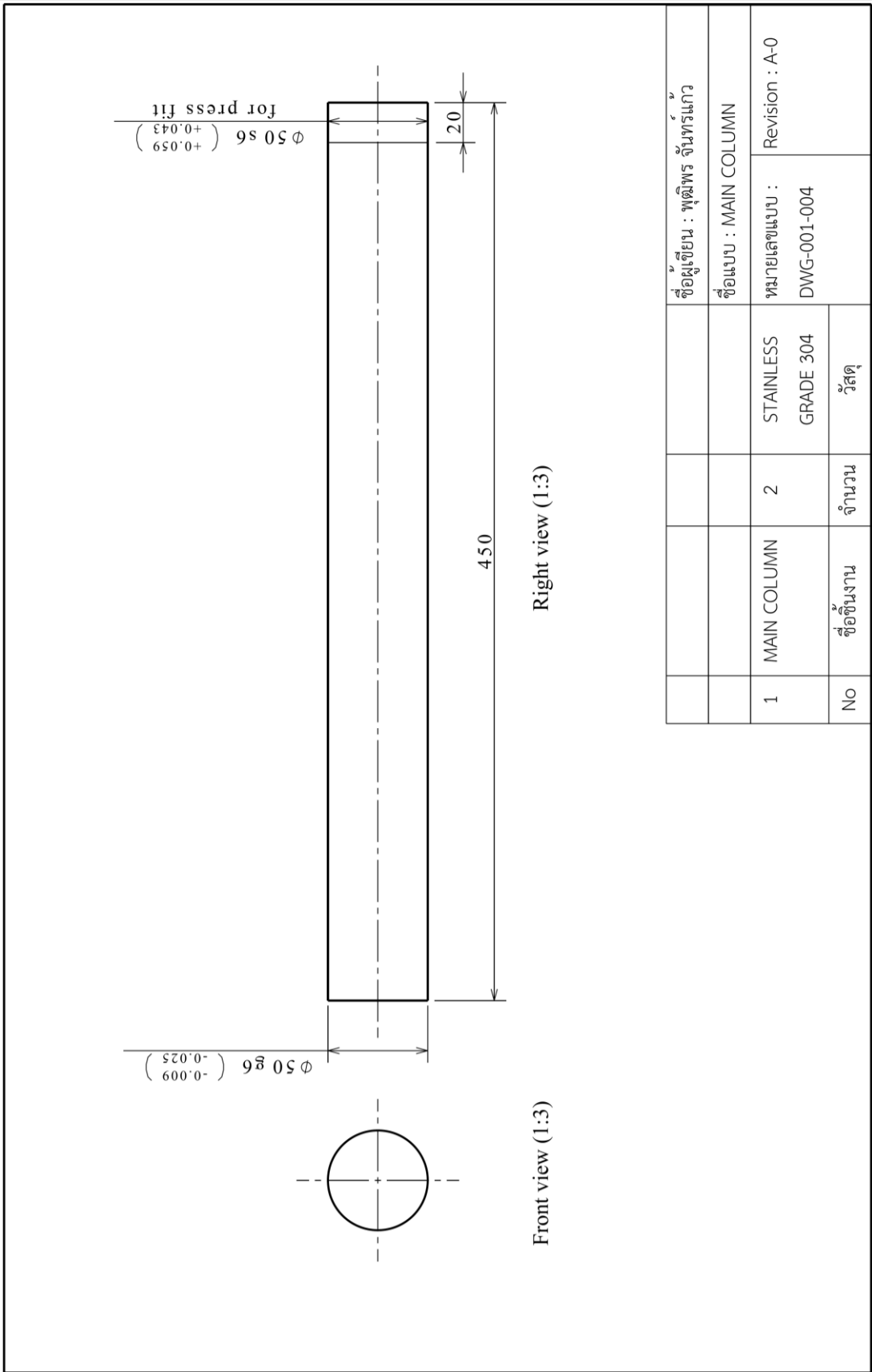




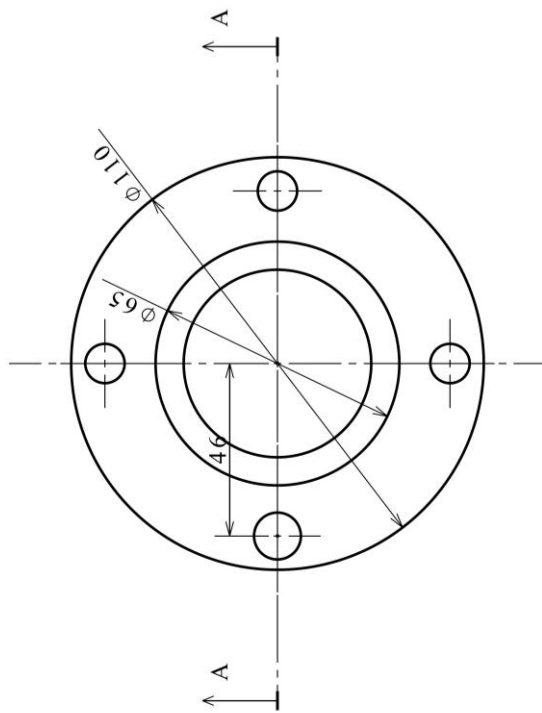
$\phi 28 J7 \left(\begin{matrix} +0.012 \\ -0.009 \end{matrix} \right)$

Linear Bearing SKF LBBR 20-2LS/HV6

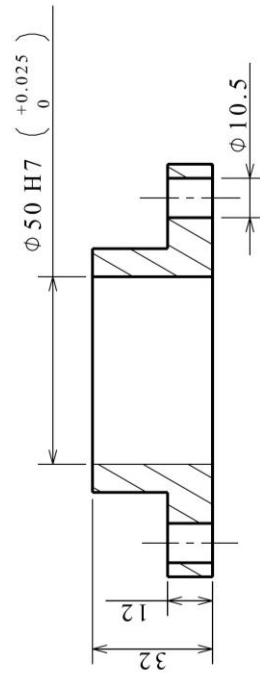
Section view A-A (1:3)



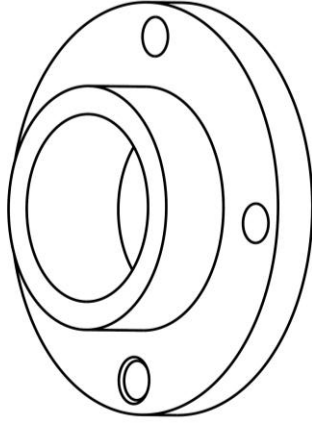
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : MAIN COLUMN
1	MAIN COLUMN	2	STAINLESS GRADE 304	หมายเลขแบบ : DWG-001-004
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0



Front view (1:2)

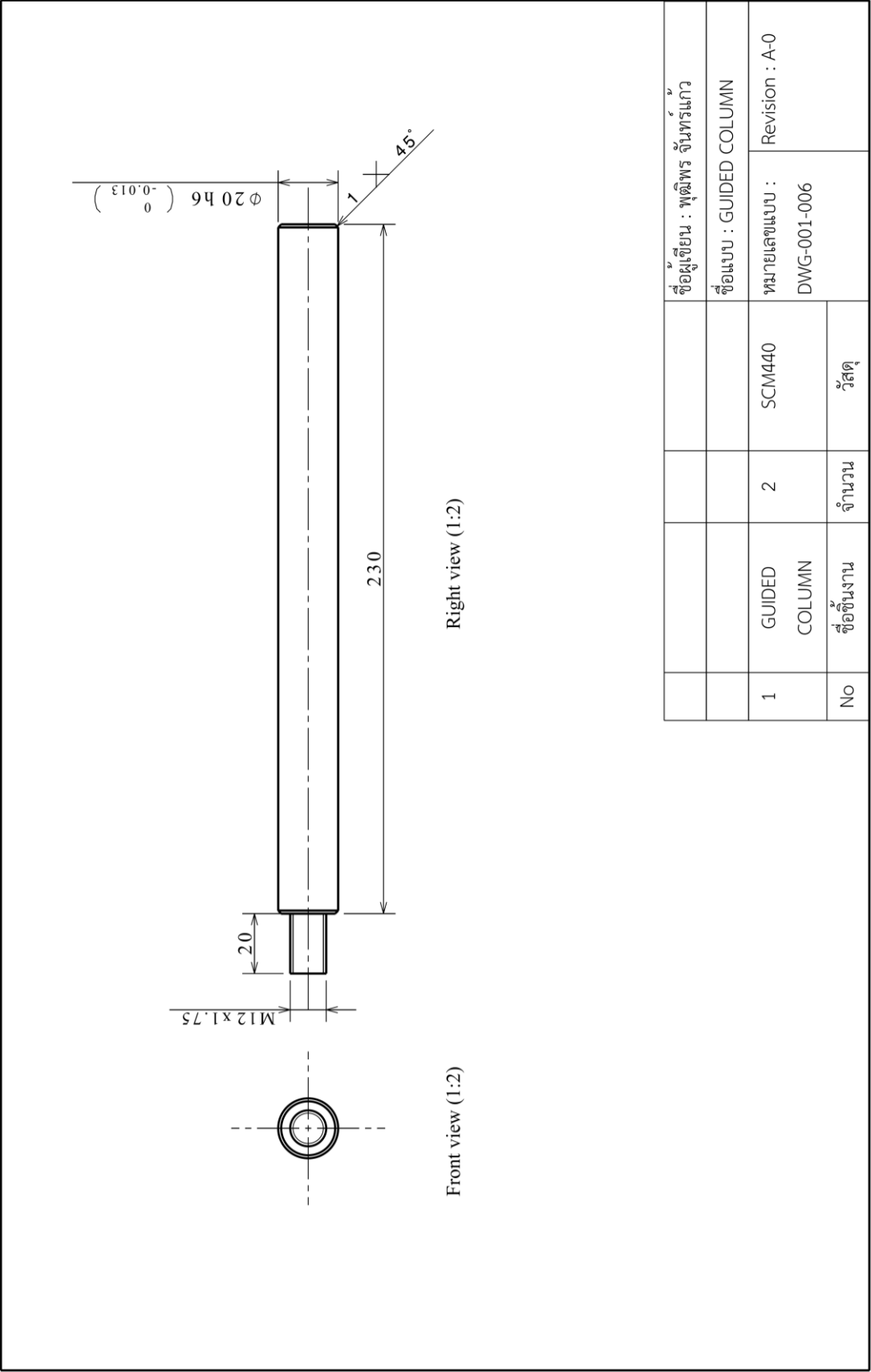


Section view A-A (1:2)

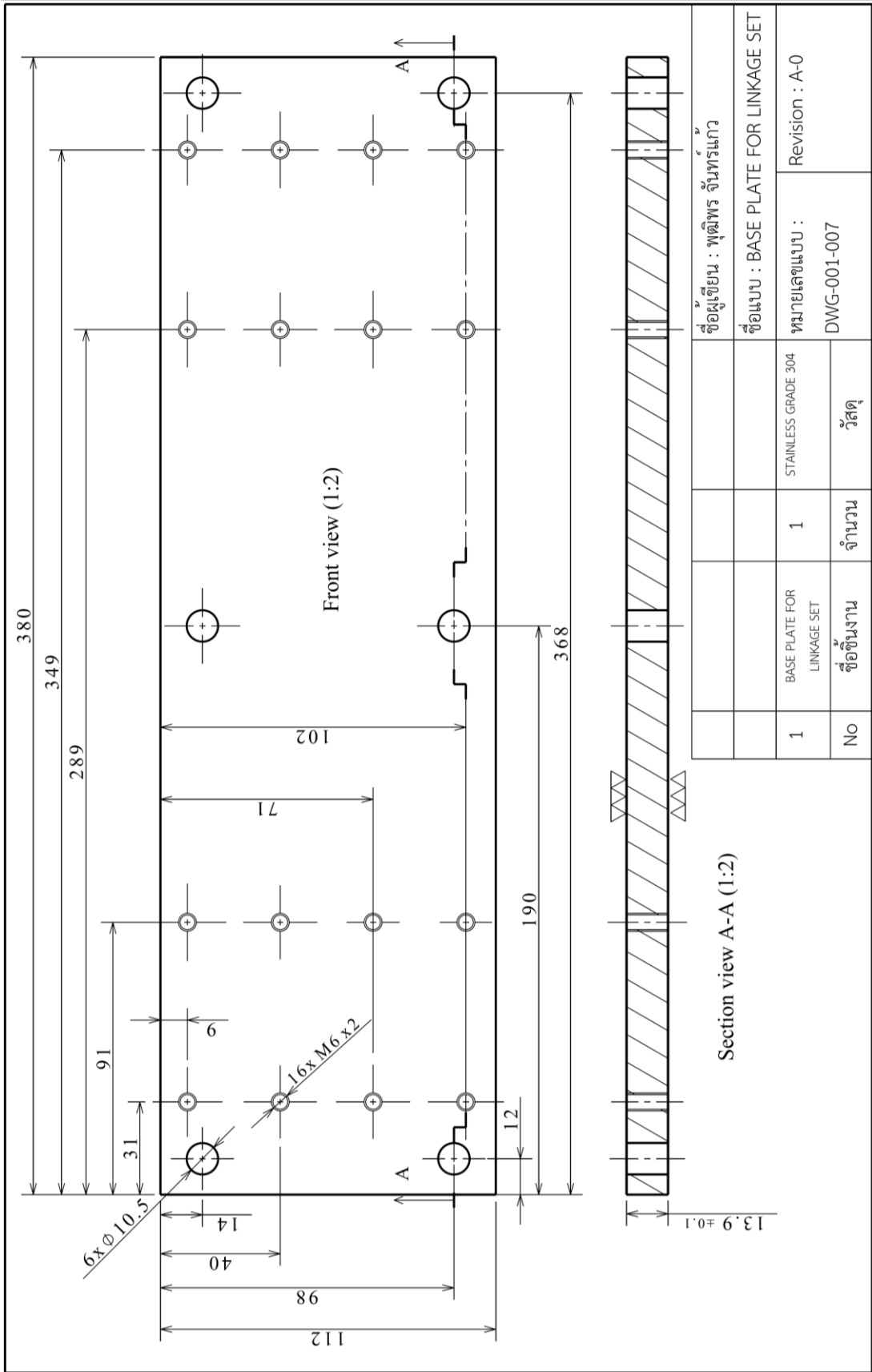


Isometric view (1:2)

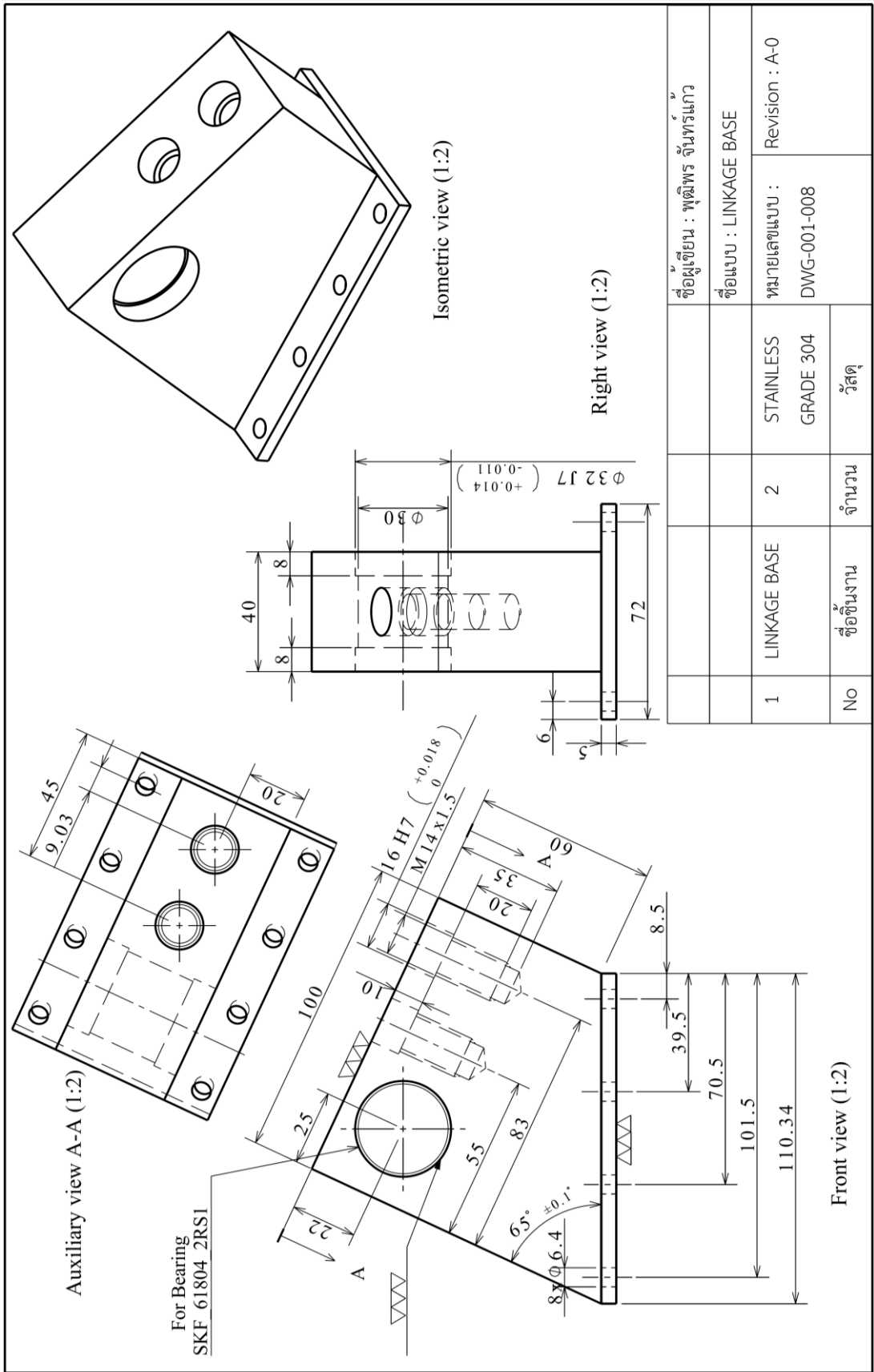
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : FLANGE
1	FLANGE	2	STAINLESS GRADE 304	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	DWG-001-005

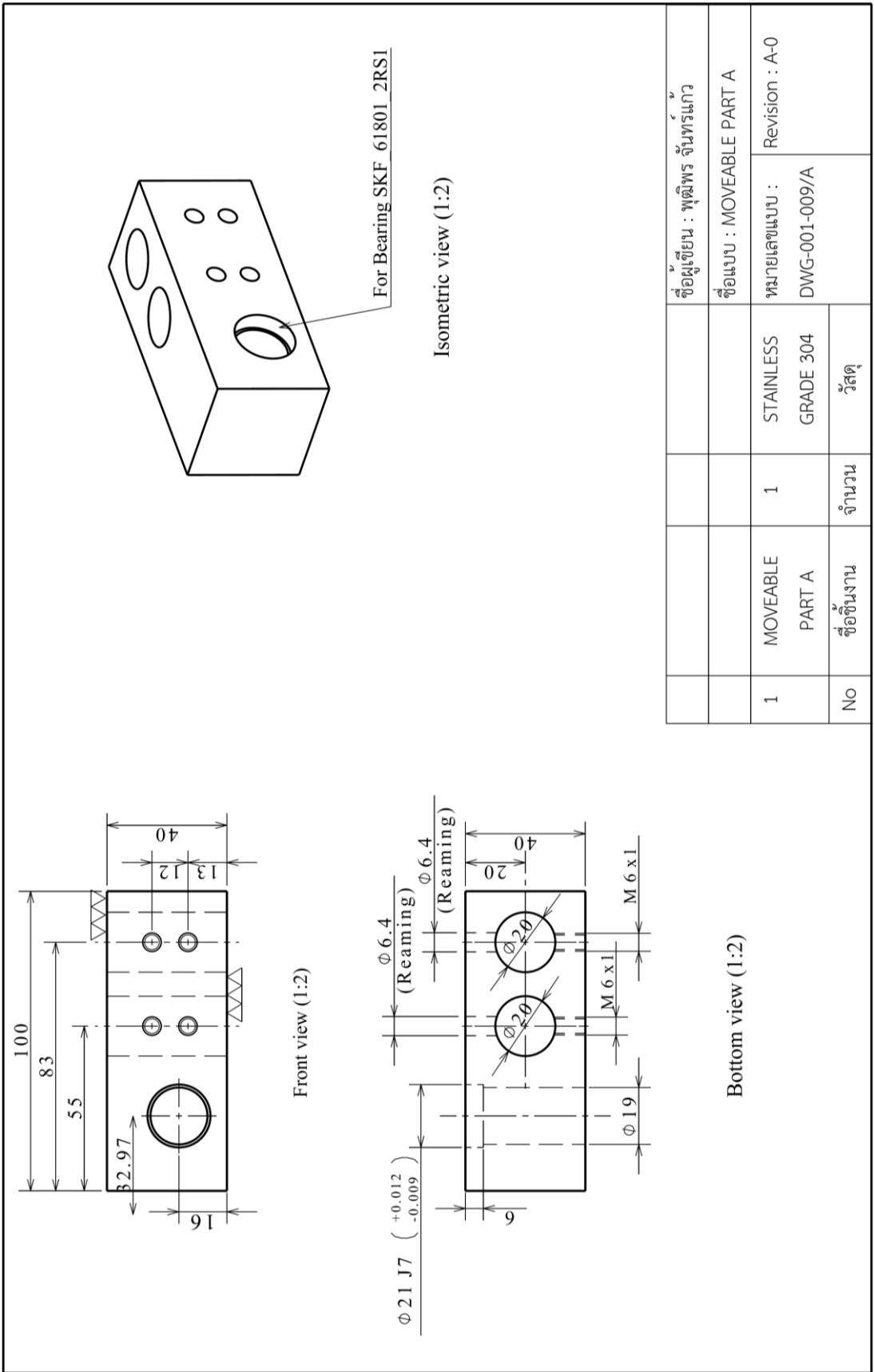


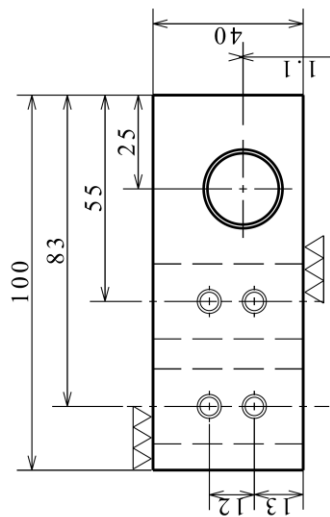
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : GUIDED COLUMN
1	GUIDED COLUMN	2	SCM440	หมายเลขแบบ : Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	DWG-001-006



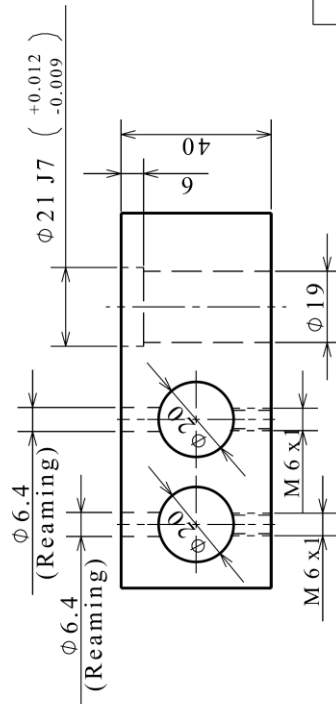
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทรวงศ์		ชื่อแบบ : BASE PLATE FOR LINKAGE SET		Revision : A-0	
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทรวงศ์		หมายเลขแบบ : DWG-001-007		วัสดุ	
1		BASE PLATE FOR LINKAGE SET		จำนวน	
No		ชื่อชิ้นงาน		วัสดุ	



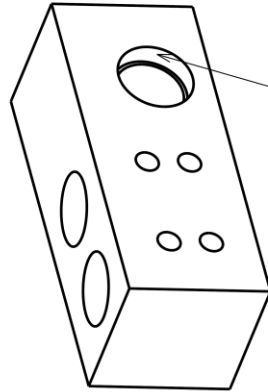




Front view (1:2)



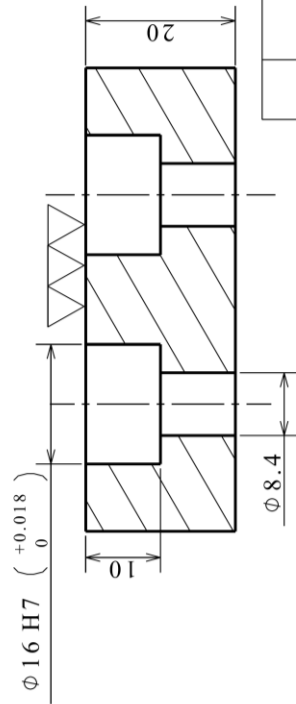
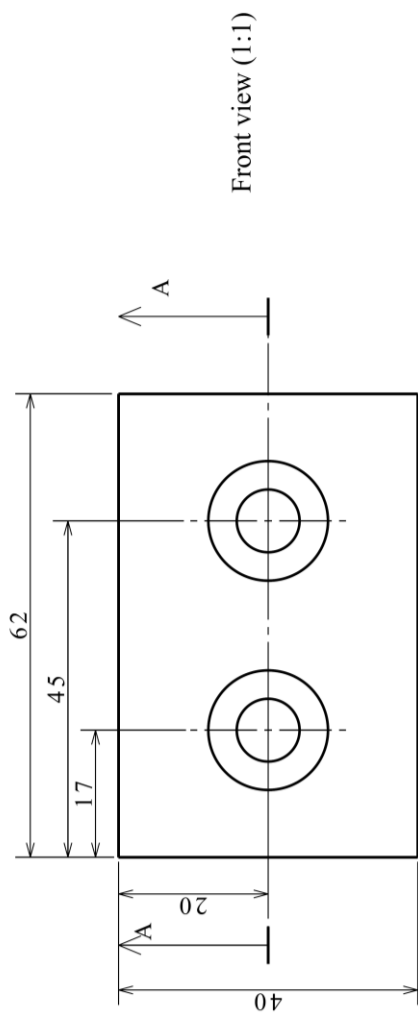
Bottom view (1:2)



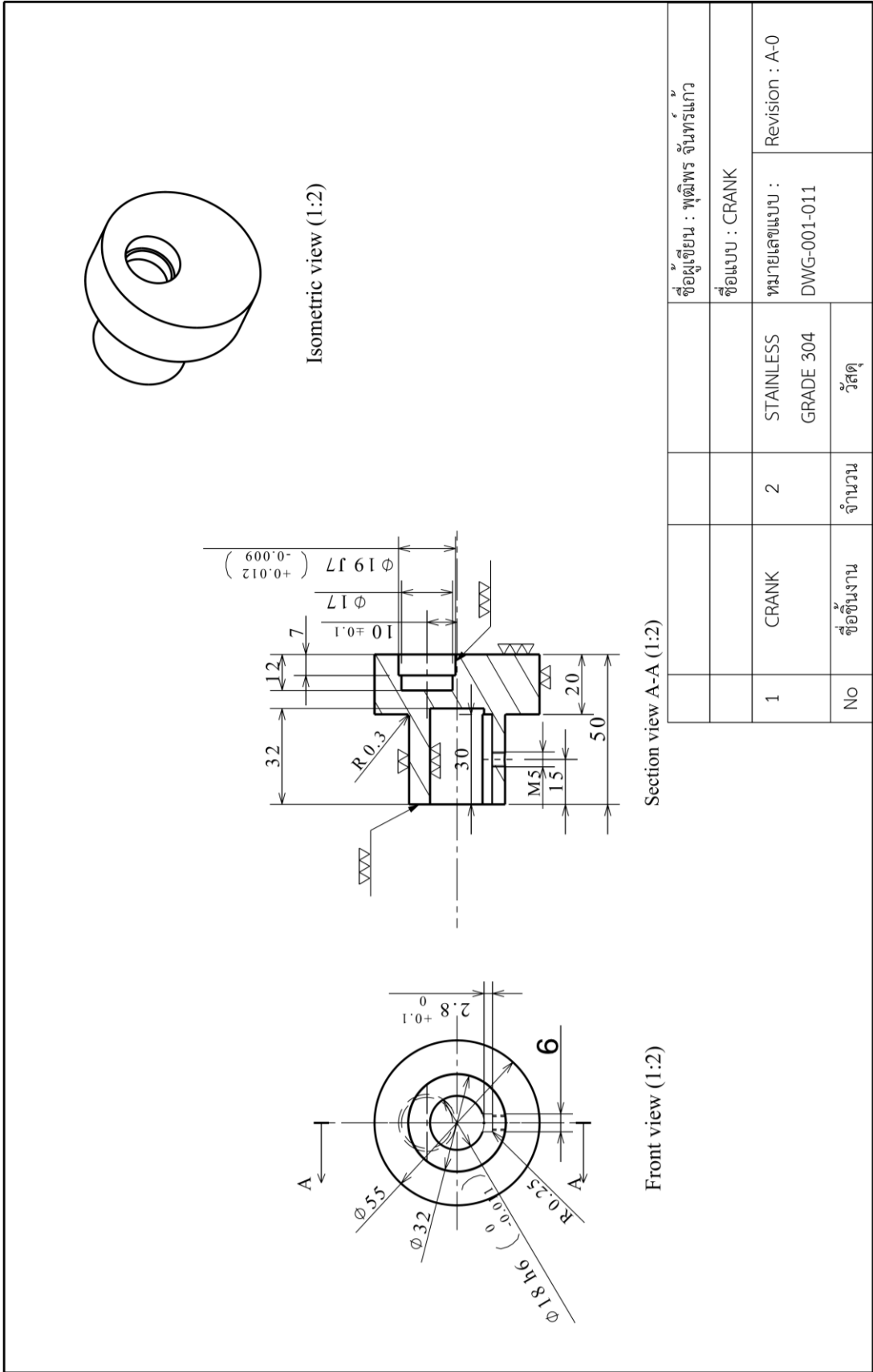
Isometric view (1:2)

For Bearing SKF 61801_2RS1

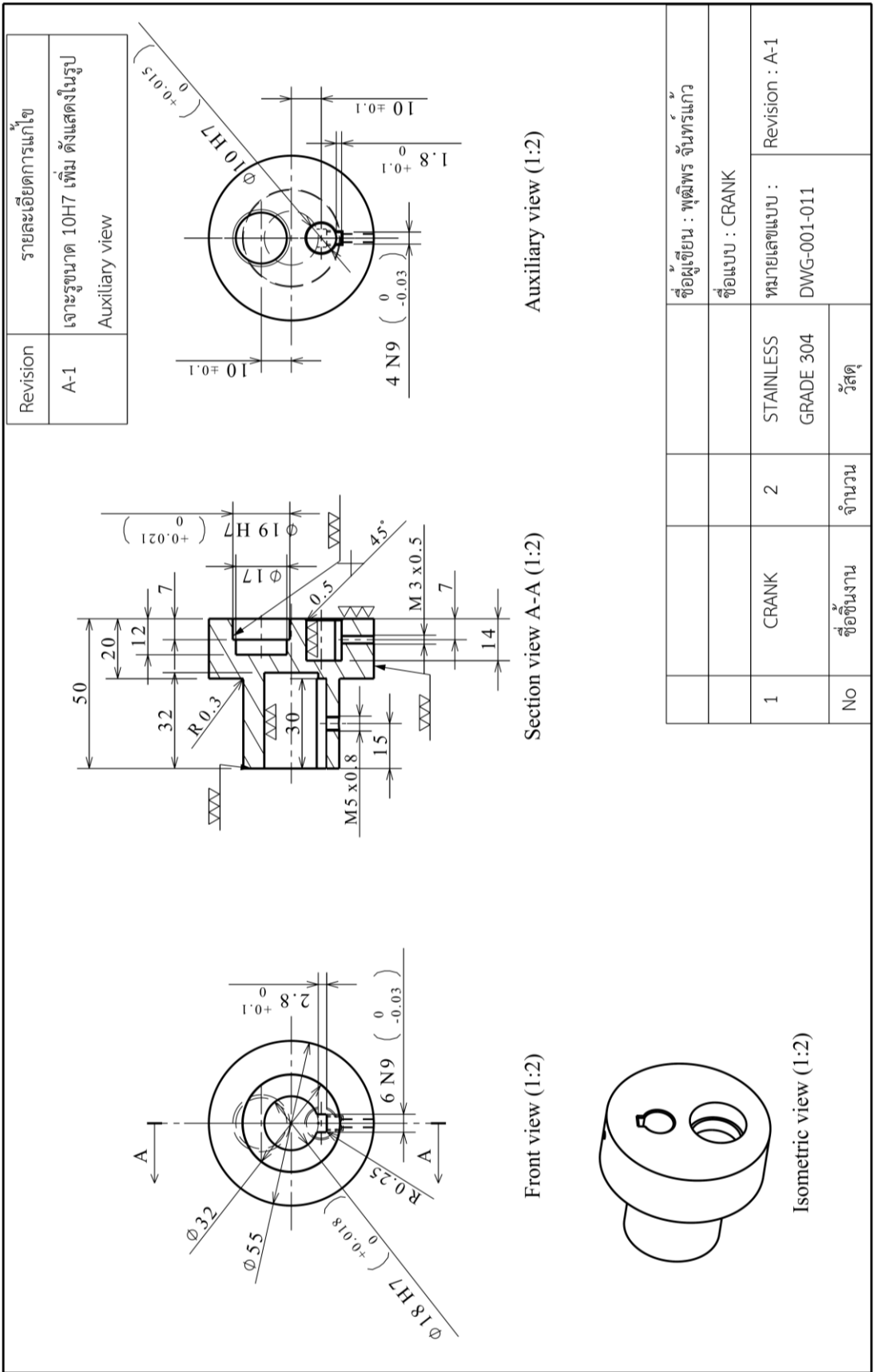
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : MOVEABLE PART B
1	MOVEABLE PART B	1	STAINLESS GRADE 304	หมายเลขแบบ : DWG-001-009/B
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0

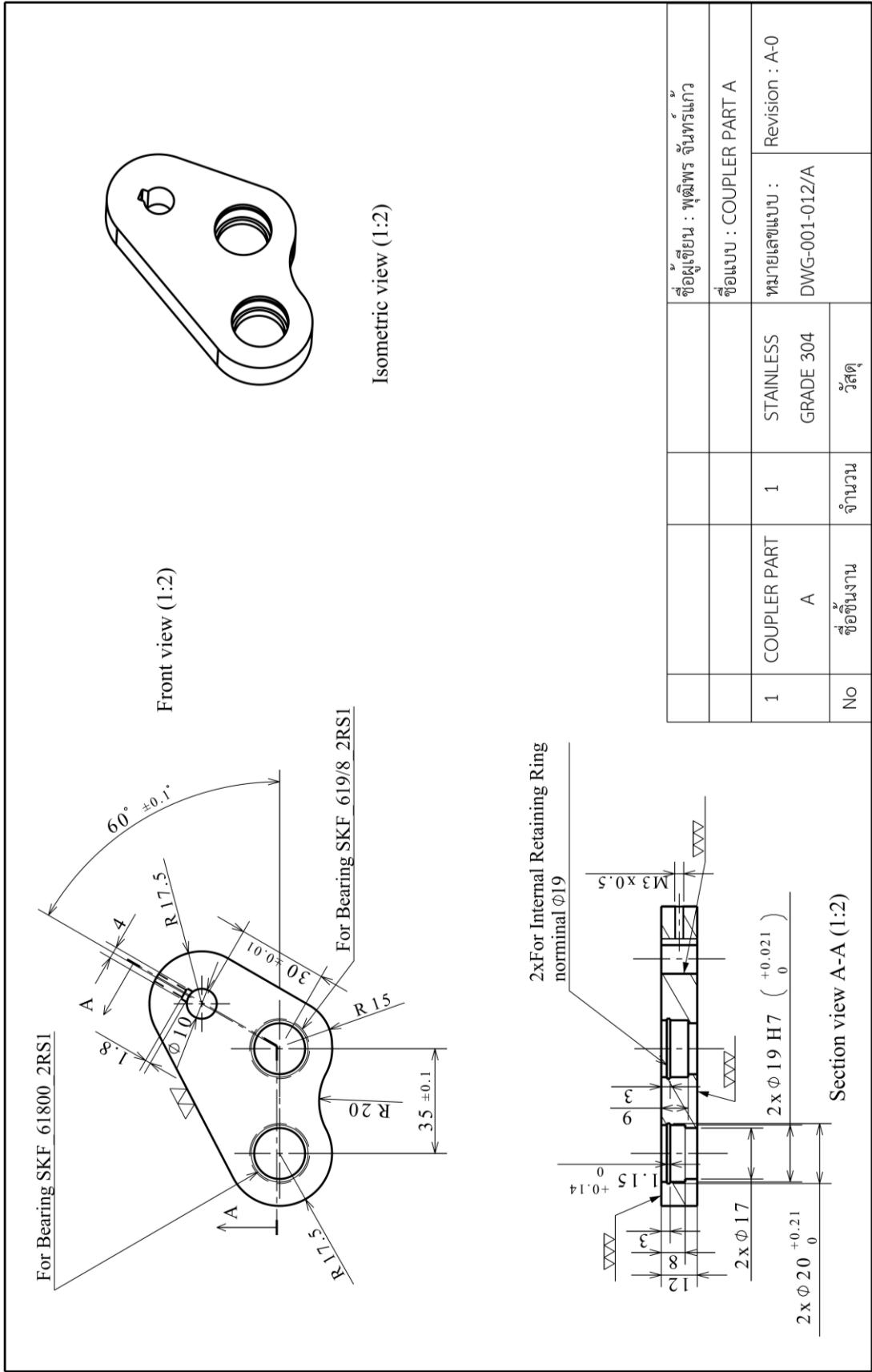


		ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว	
		ชื่อแบบ : MOVEABLE PART COVER	
1	MOVEABLE PART COVER	2	STAINLESS GRADE 304
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ
		Revision : A-0	
		หมายเลขแบบ : DWG-001-010	

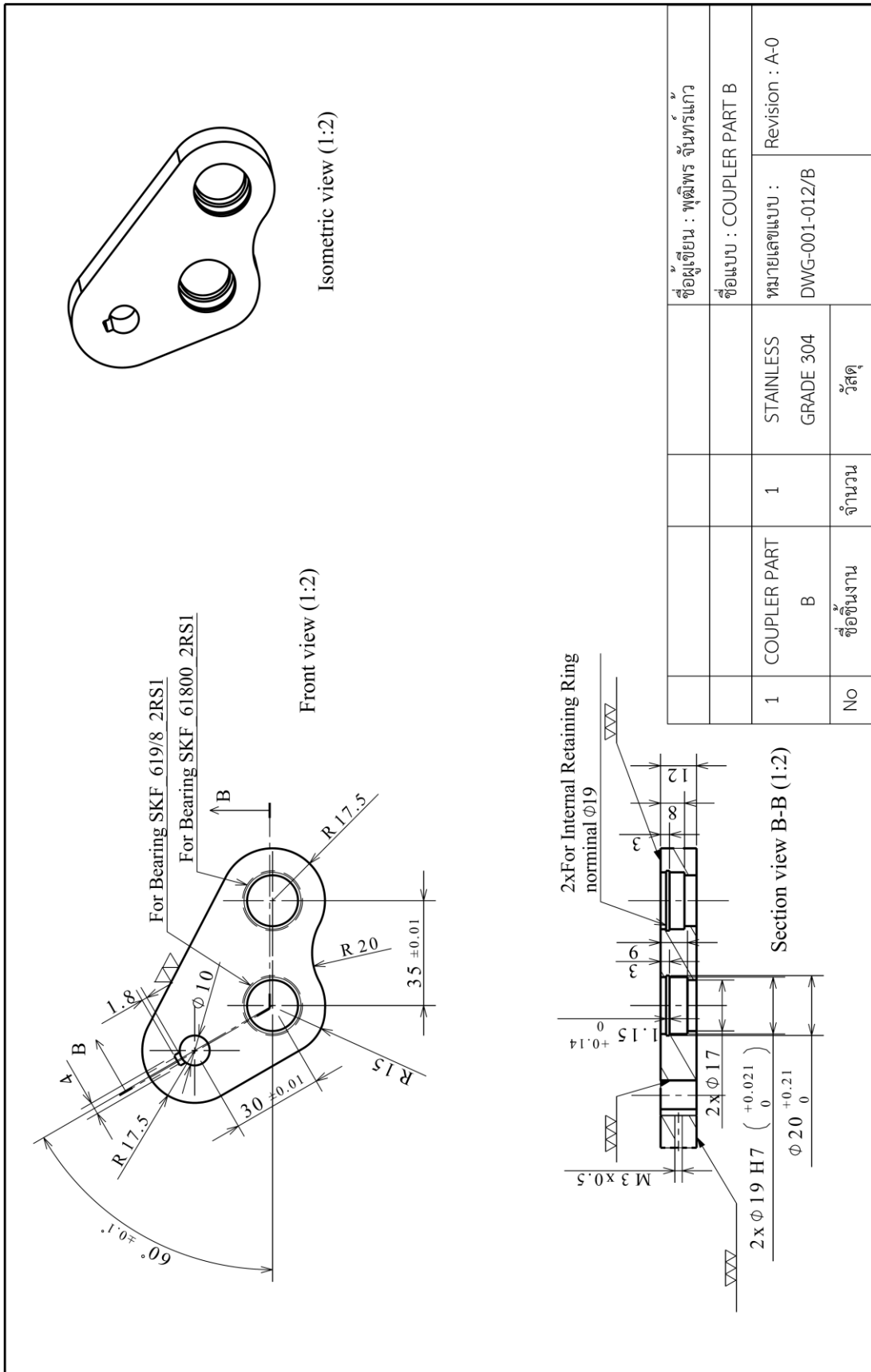


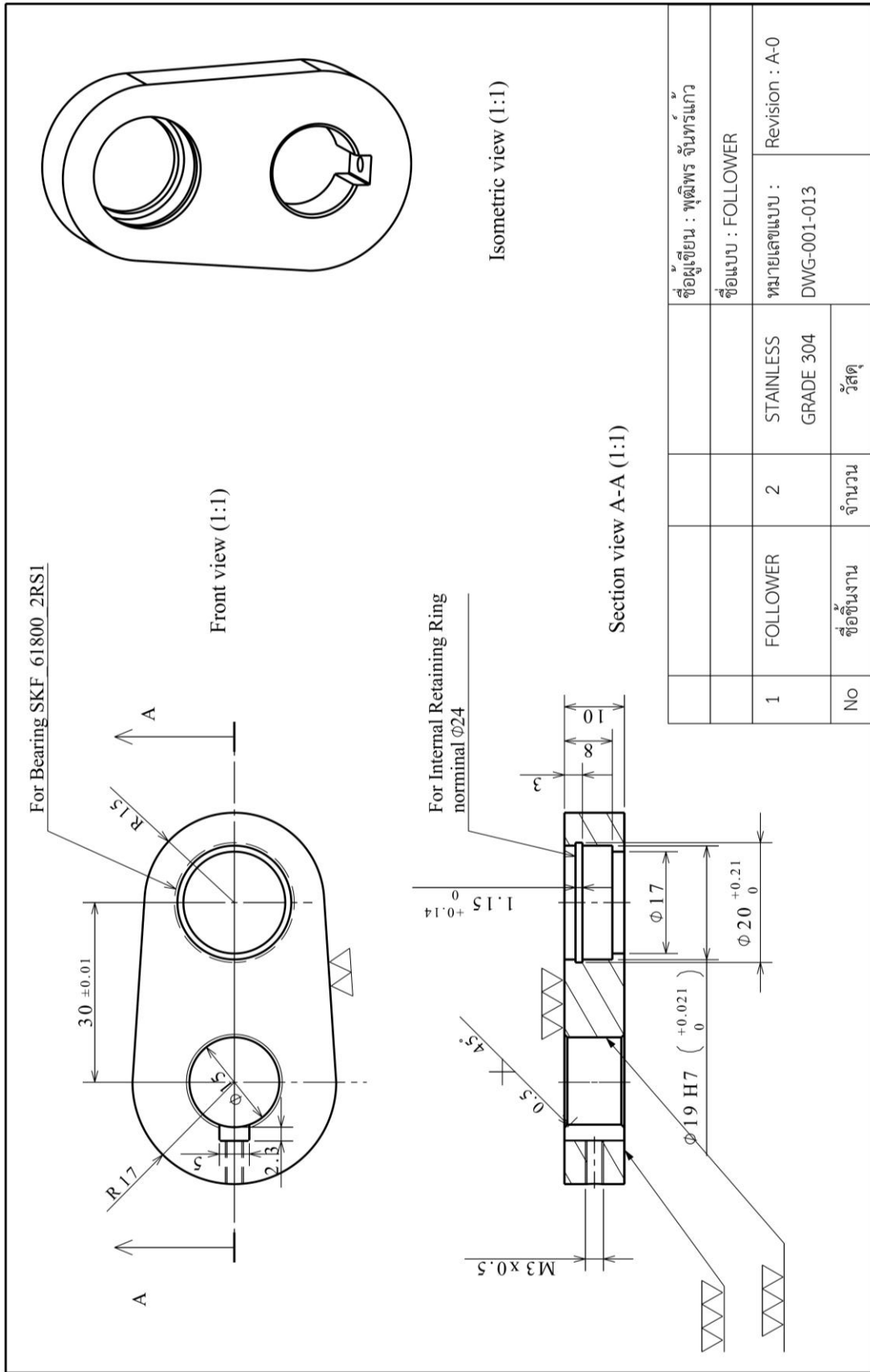
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว		ชื่อแบบ : CRANK		Revision : A-0	
ชื่อแบบ : CRANK		หมายเลขแบบ : DWG-001-011			
1	CRANK	2	STAINLESS GRADE 304	จำนวน	วัสดุ
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน		วัสดุ	

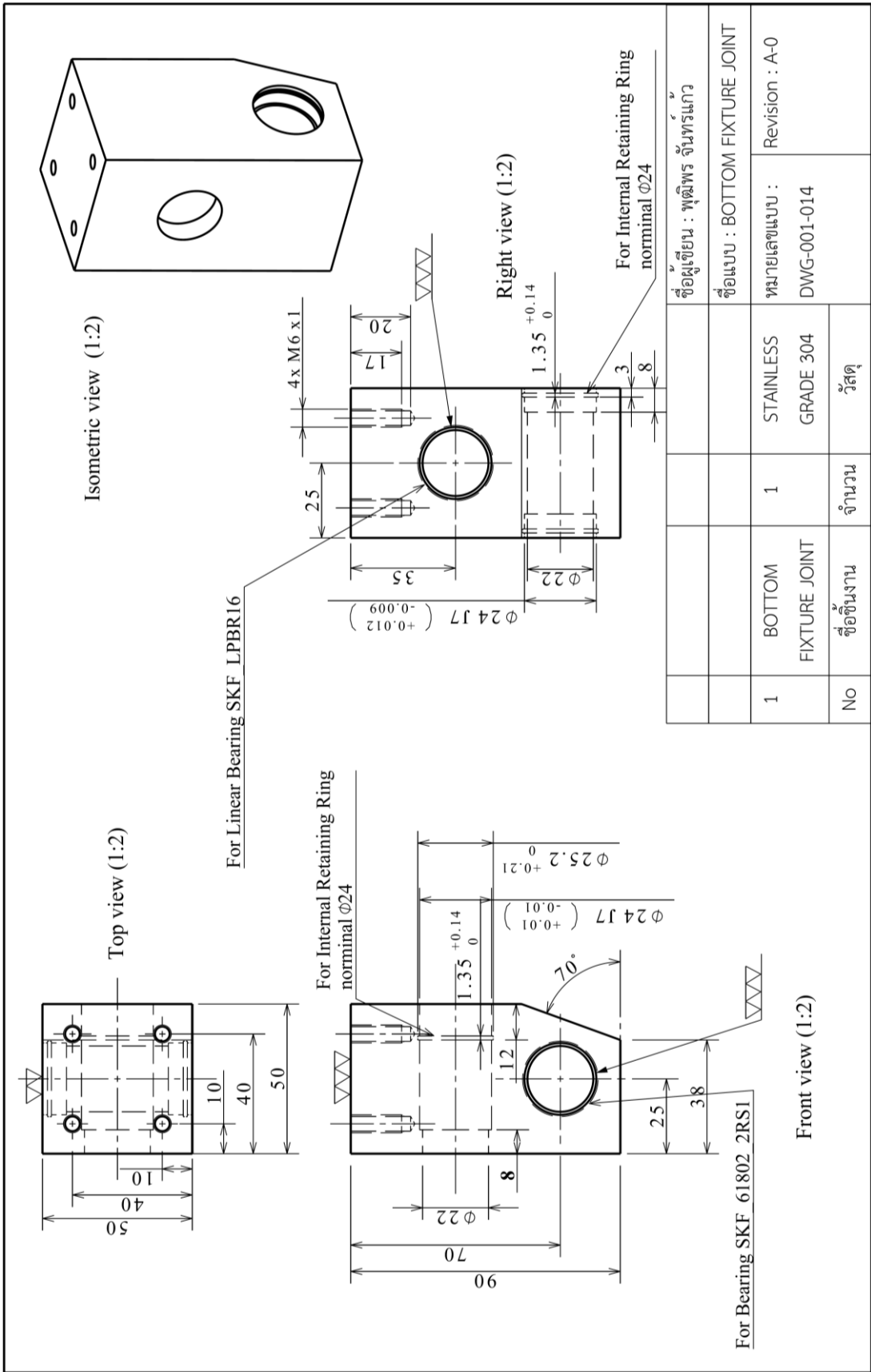




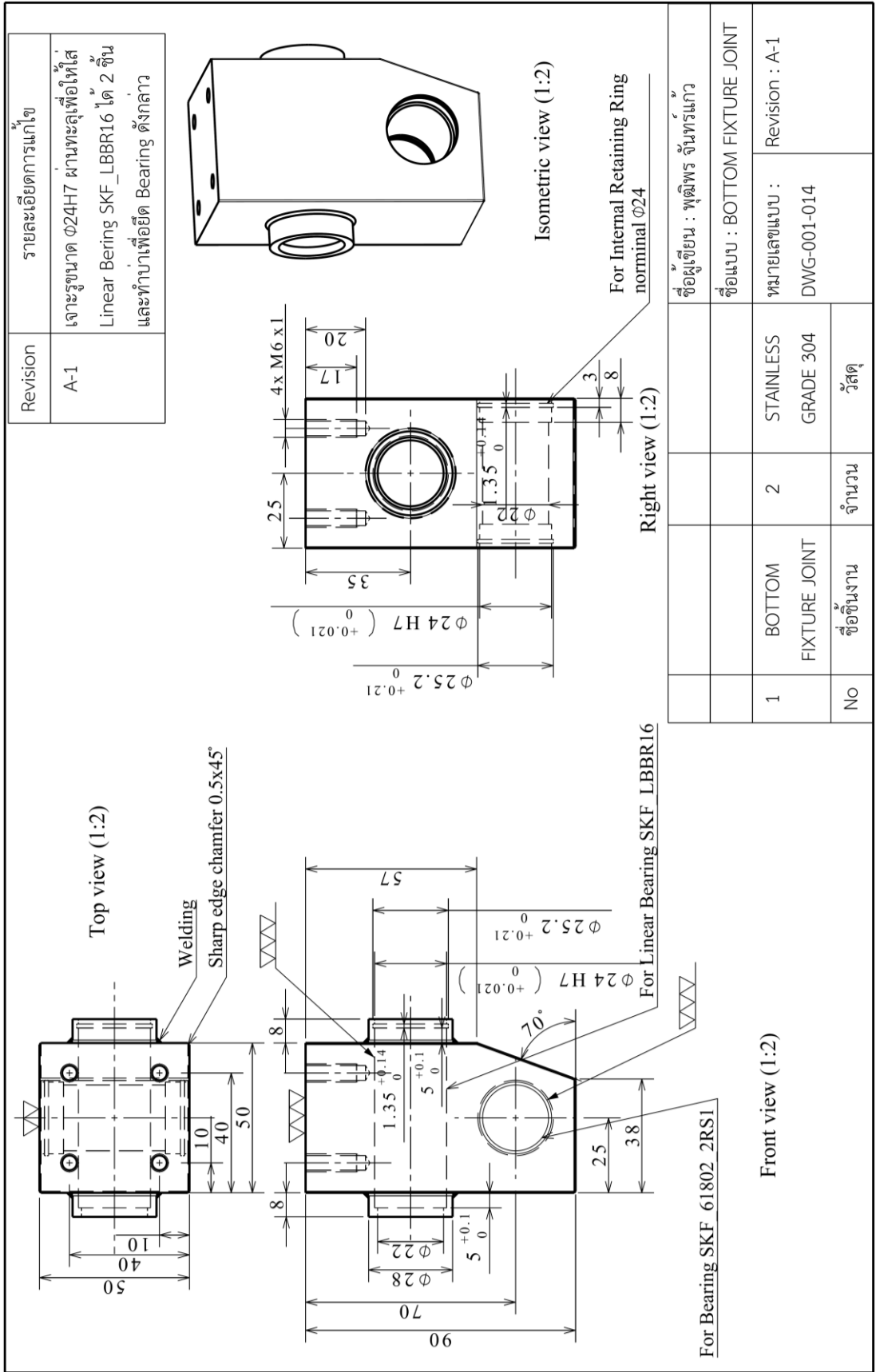
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : COUPLER PART A
1	COUPLER PART A	1	STAINLESS GRADE 304	หมายเลขแบบ : DWG-001-012/A
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0







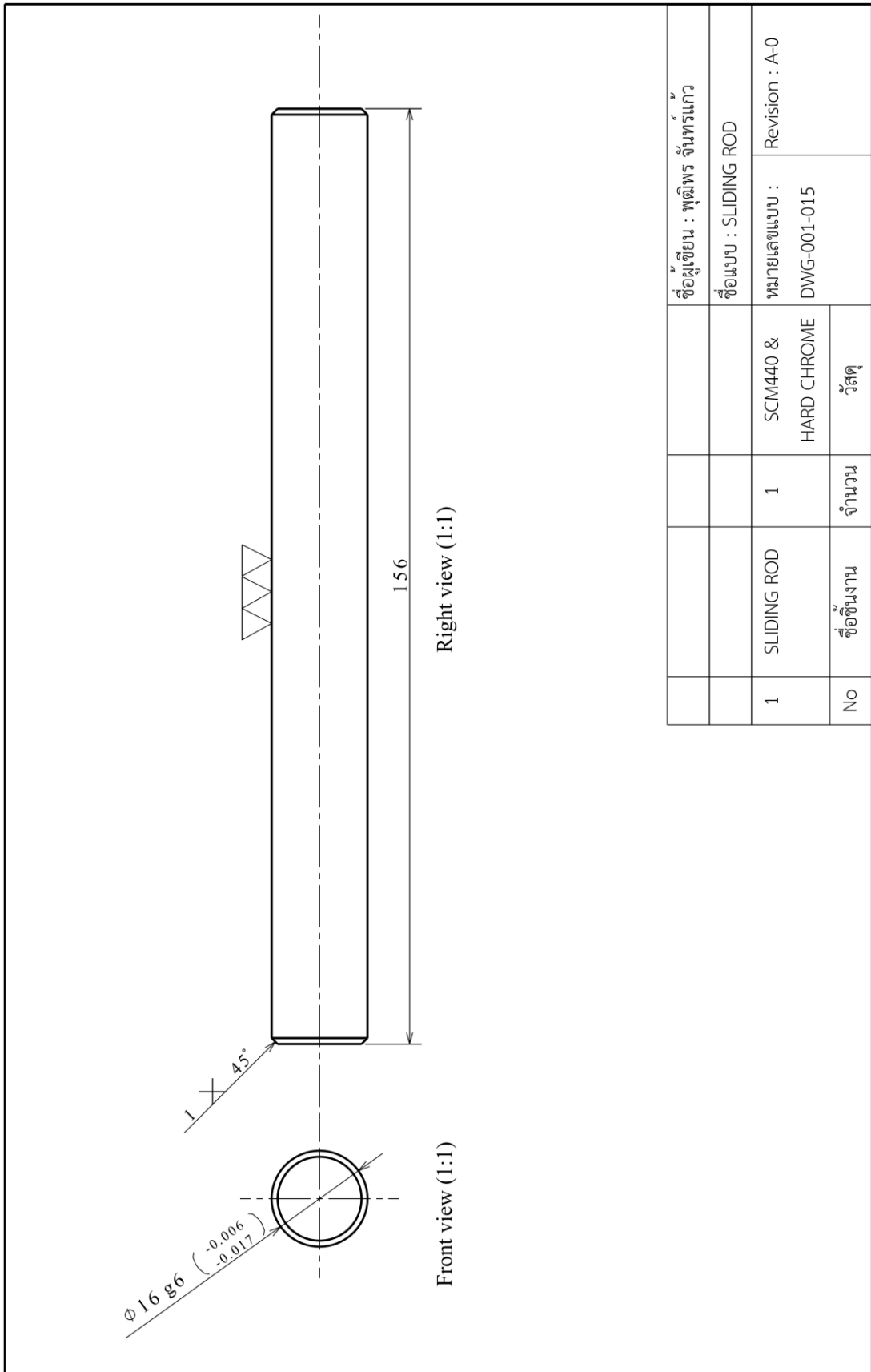
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทพรแก้ว	
ชื่อแบบ : BOTTOM FIXTURE JOINT	
1	BOTTOM FIXTURE JOINT
1	STAINLESS GRADE 304
	วัสดุ
	จำนวน
No	ชื่อชิ้นงาน
	หมายเลขแบบ : DWG-001-014
	Revision : A-0



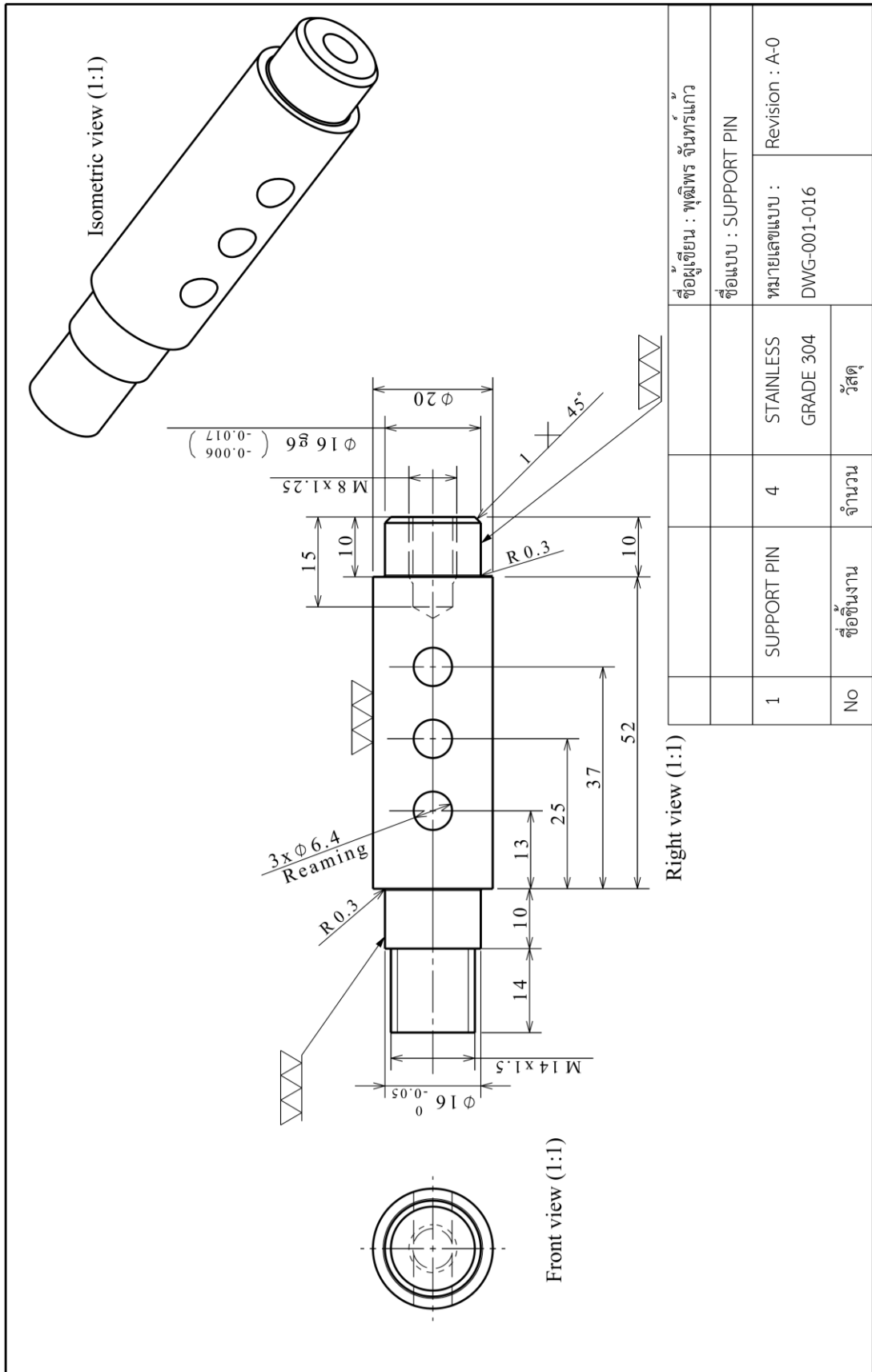
Front view (1:2)

Right view (1:2)

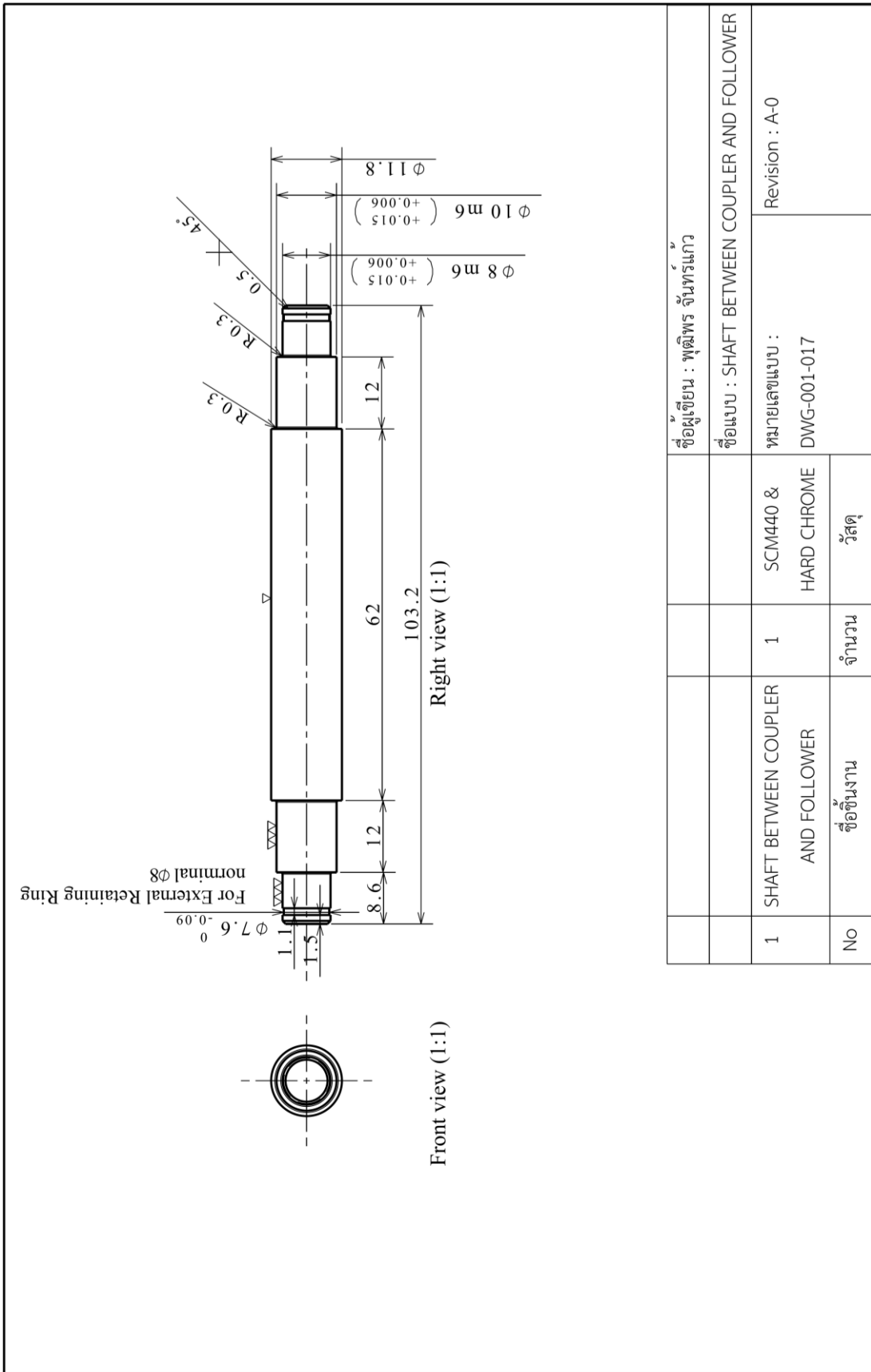
Isometric view (1:2)



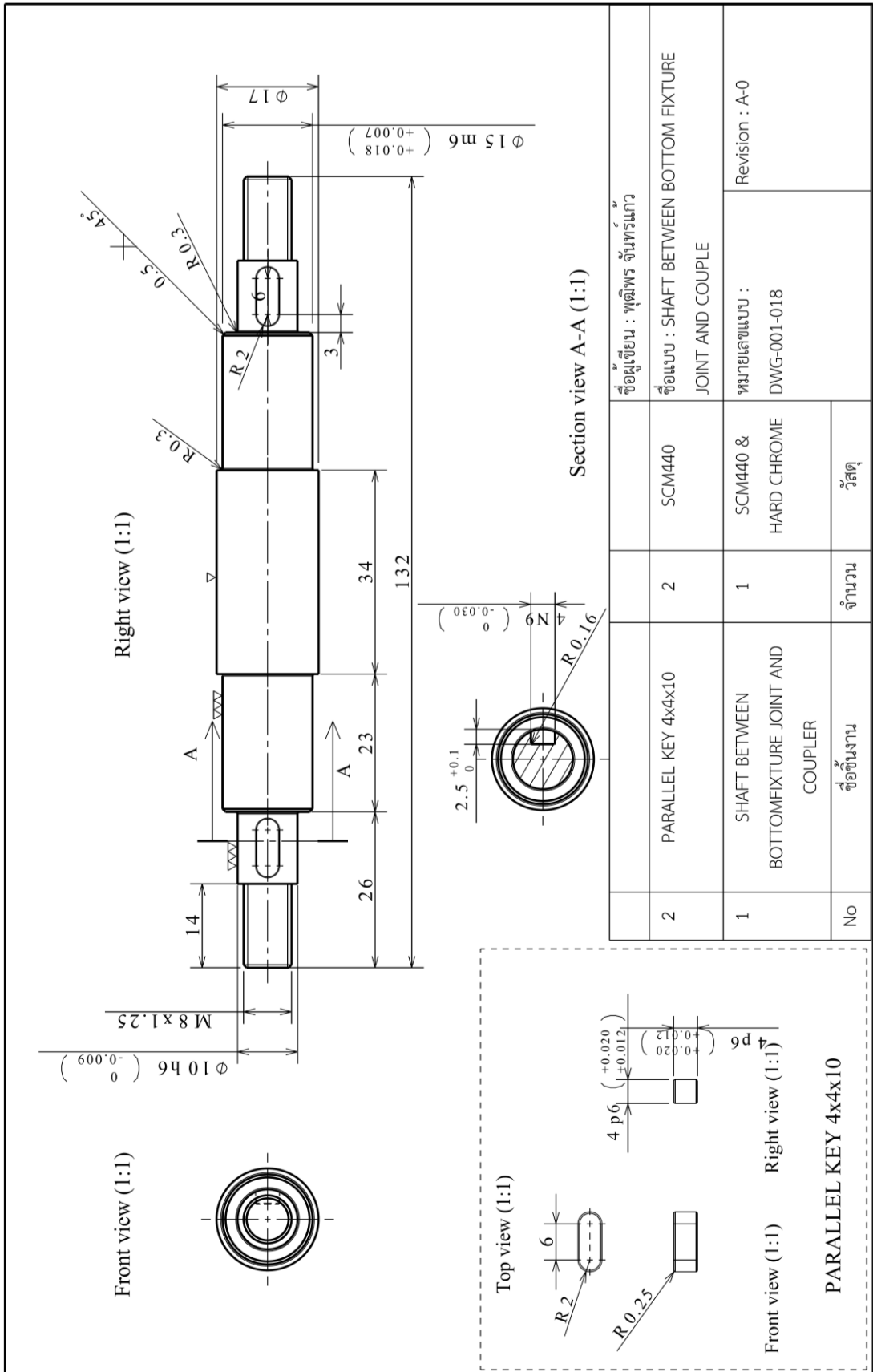
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : SLIDING ROD
1	SLIDING ROD	1	SCM440 & HARD CHROME	หมายเลขแบบ : DWG-001-015
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0



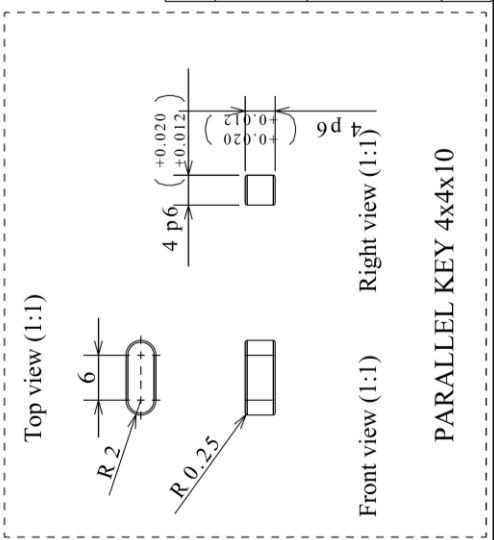
ชื่อผู้เขียน : พุทธิพร จันทร์แก้ว						
ชื่อแบบ : SUPPORT PIN						
1	SUPPORT PIN	4	STAINLESS GRADE 304	วัสดุ	จำนวน	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน					DWG-001-016

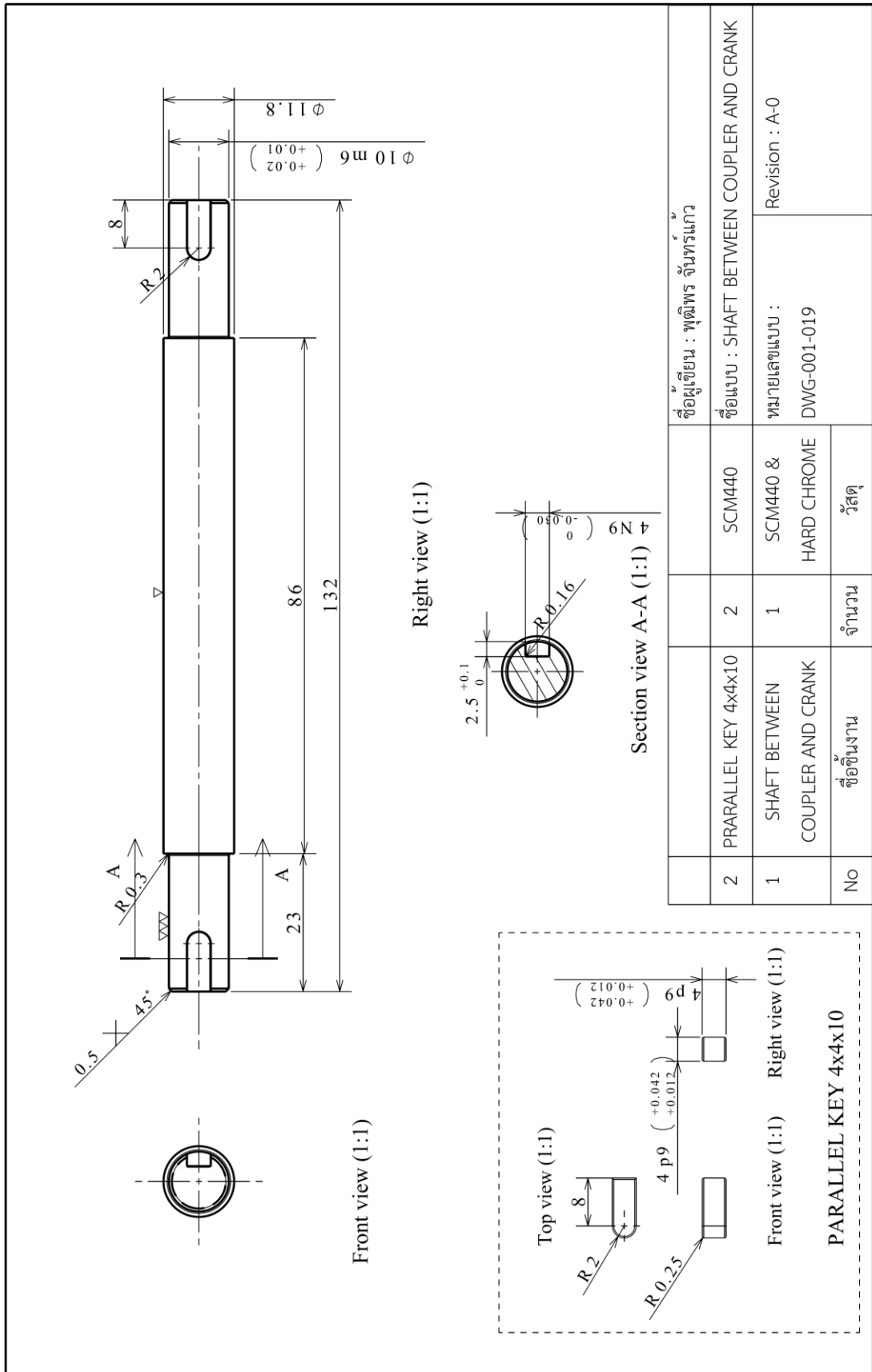


ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว		ชื่อแบบ : SHAFT BETWEEN COUPLER AND FOLLOWER	
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว		ชื่อแบบ : SHAFT BETWEEN COUPLER AND FOLLOWER	
1	SHAFT BETWEEN COUPLER AND FOLLOWER	SCM440 & HARD CHROME	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	DWG-001-017
		วัสดุ	

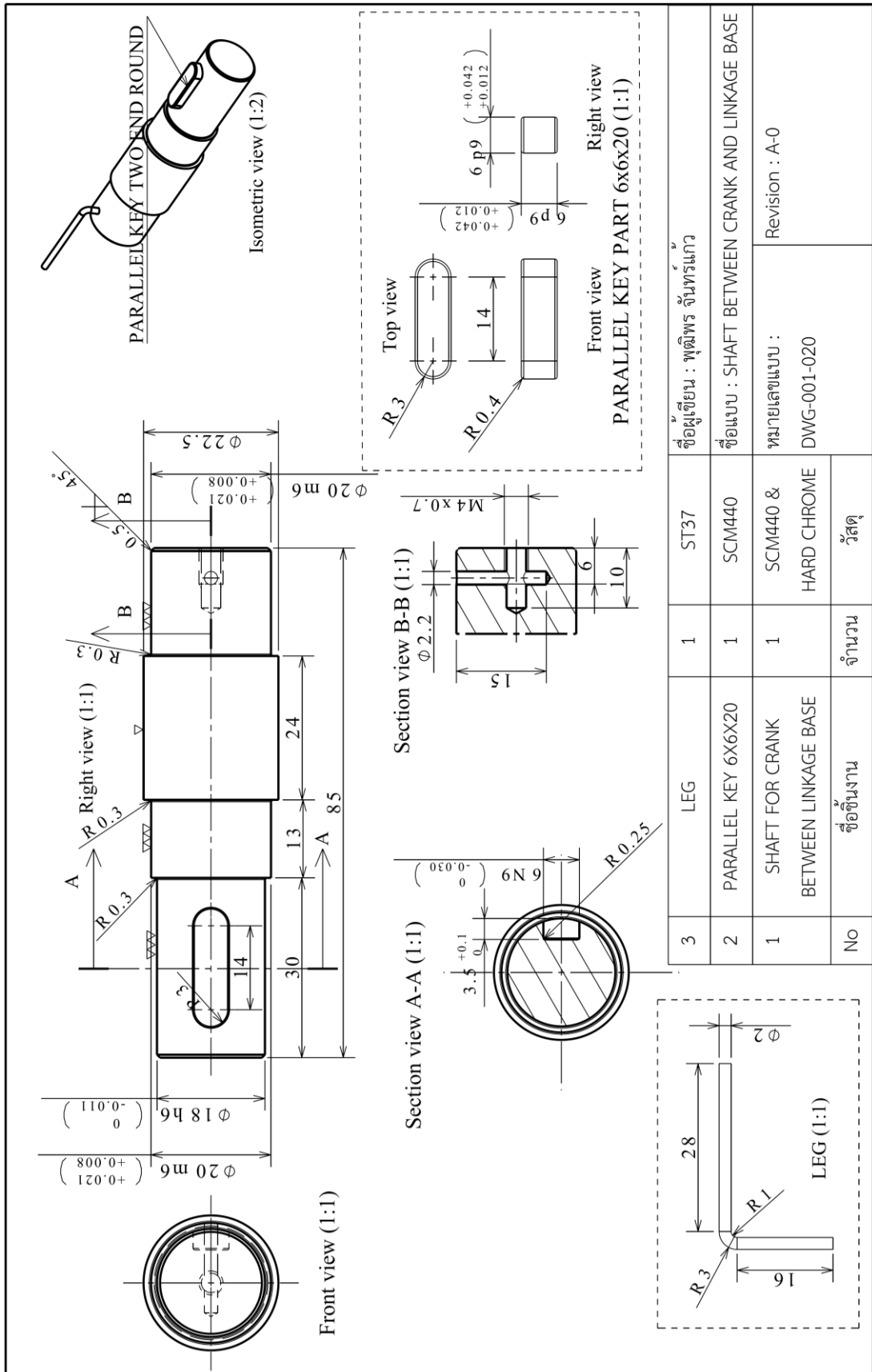


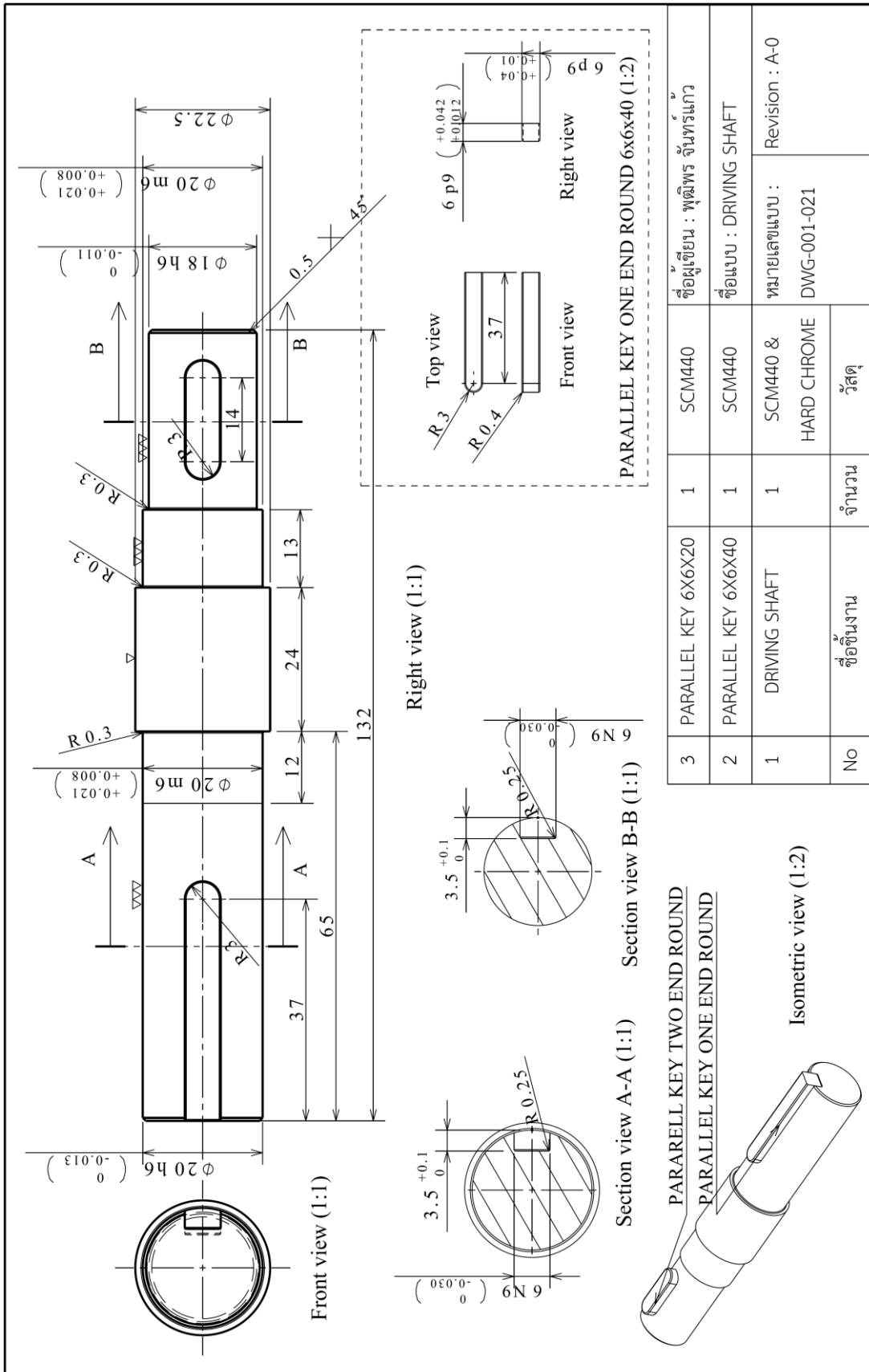
ชื่อผู้เขียน : พุทธิพร จันทรวงศ์		ชื่อแบบ : SHAFT BETWEEN BOTTOM FIXTURE JOINT AND COUPLE		Revision : A-0	
2	PARALLEL KEY 4x4x10	2	SCM440	1	SCM440 & HARD CHROME
1	SHAFT BETWEEN BOTTOMFIXTURE JOINT AND COUPLER	1	SCM440 & HARD CHROME	หมายเลขแบบ : DWG-001-018	
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ		



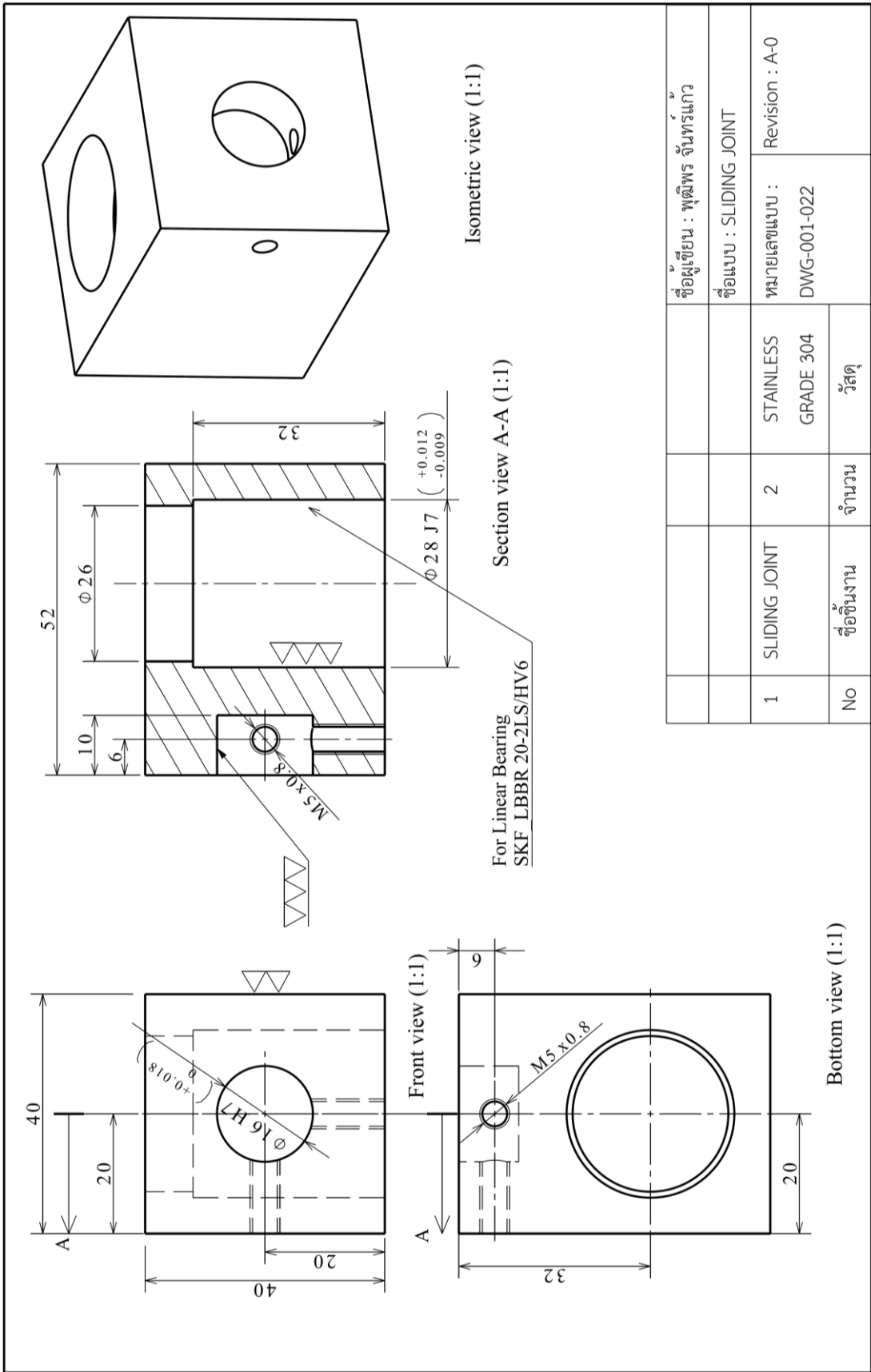


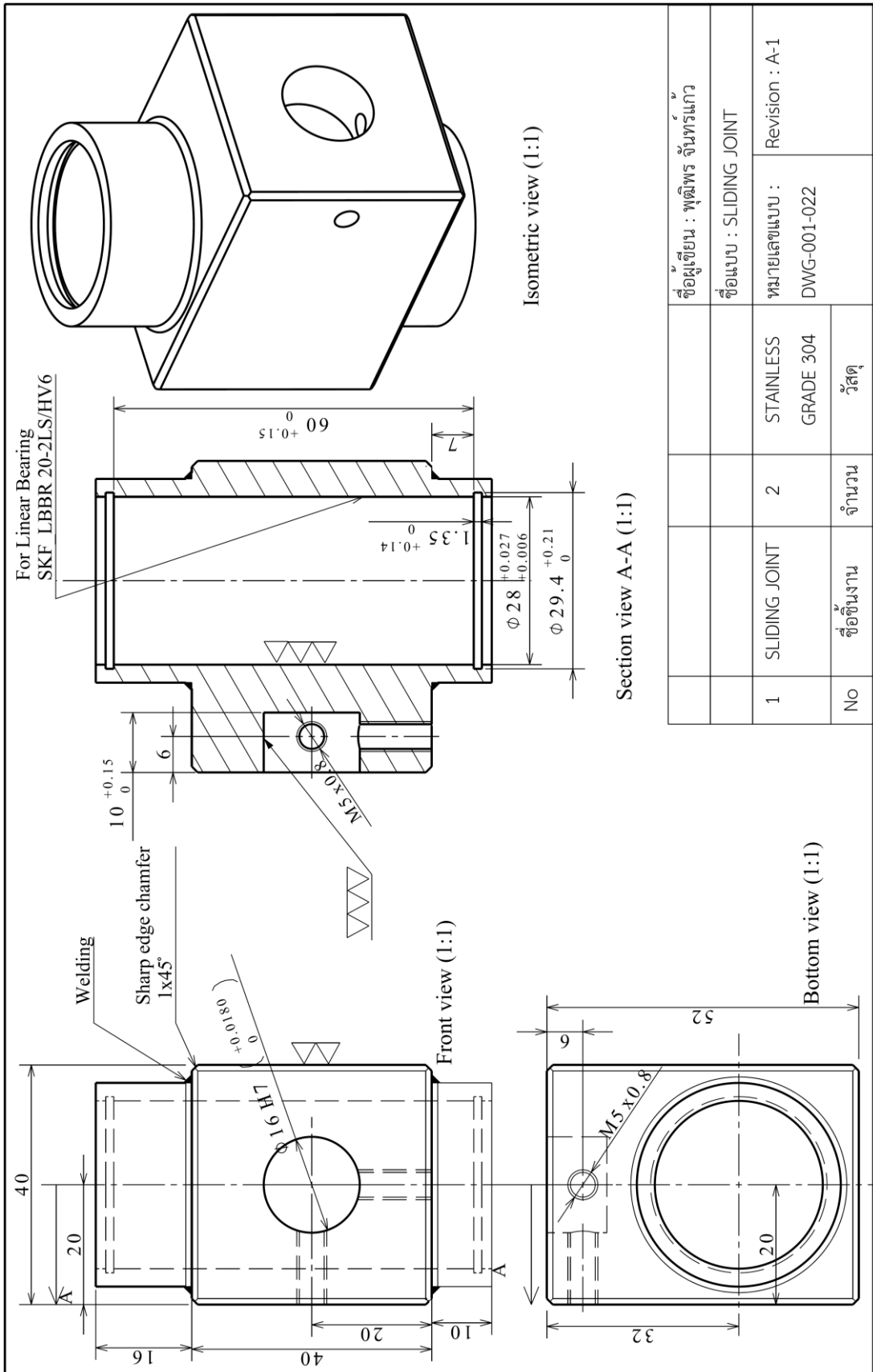
ชื่อผู้เขียน : พุทธิพร จันทร์แก้ว		ชื่อแบบ : SHAFT BETWEEN COUPLER AND CRANK		Revision : A-0	
2	PRARALLEL KEY 4x4x10	2	SCM440	1	SCM440 & HARD CHROME
1	SHAFT BETWEEN COUPLER AND CRANK	1	SCM440 & HARD CHROME	จำนวน	วัสดุ
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ		

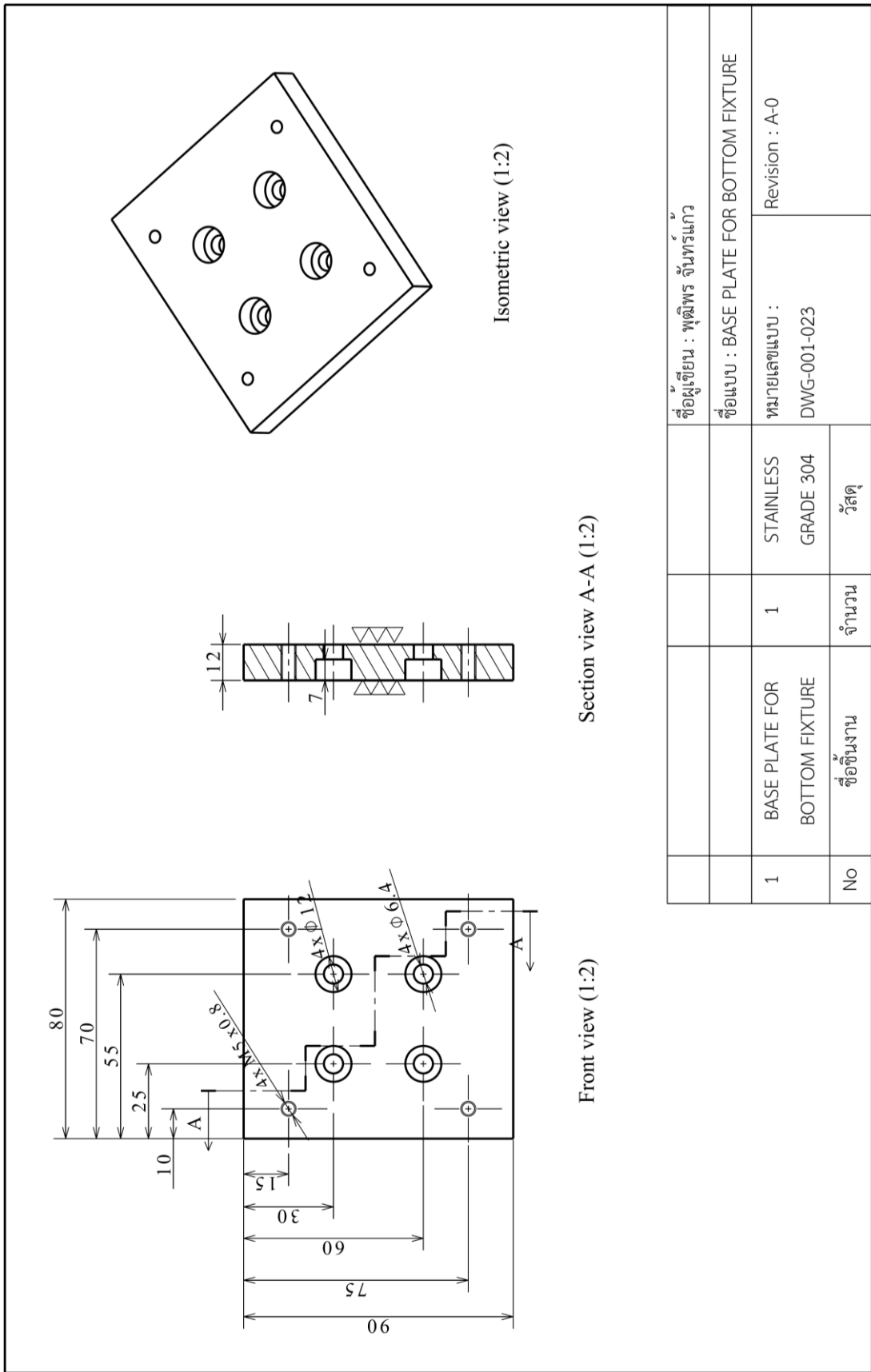




3	PARALLEL KEY 6X6X20	1	SCM440	ชื่อผู้เขียน : พศิพร จันทรวงศ์
2	PARALLEL KEY 6X6X40	1	SCM440	ชื่อแบบ : DRIVING SHAFT
1	DRIVING SHAFT	1	SCM440 & HARD CHROME	หมายเลขแบบ : DWG-001-021
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0



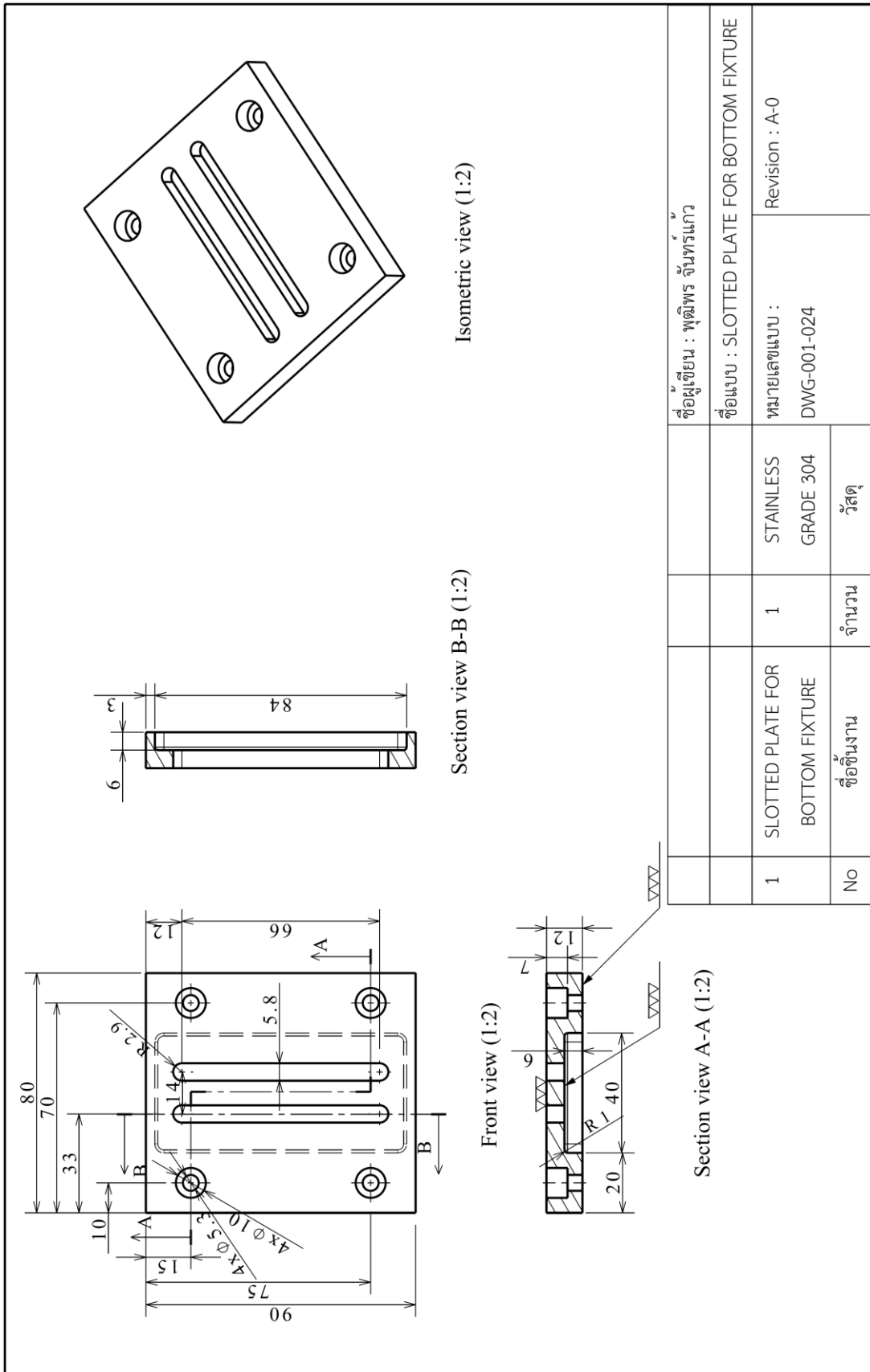


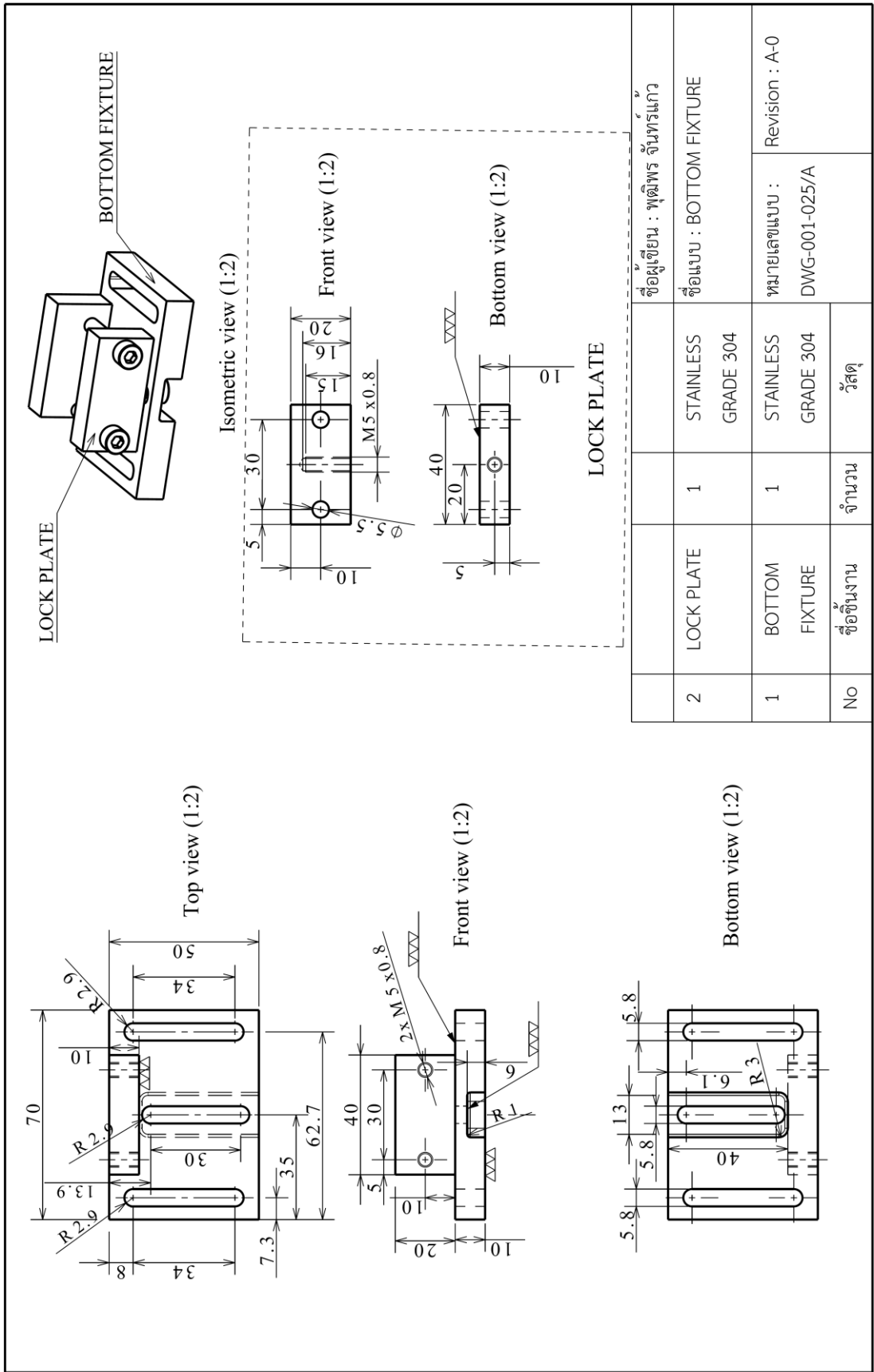


Section view A-A (1:2)

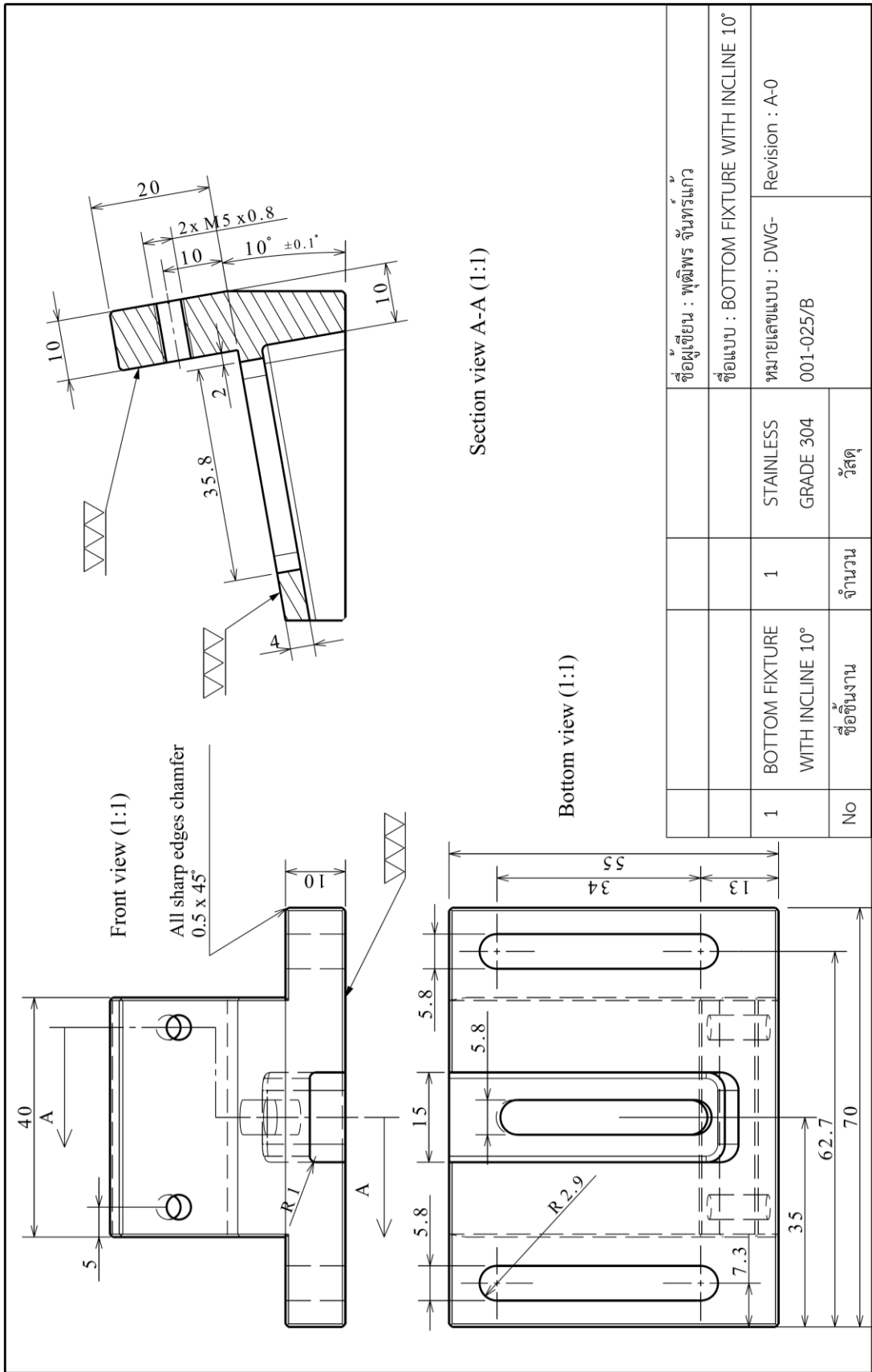
Front view (1:2)

ชื่อผู้เขียน : พุทธิพร จันทร์แก้ว			
ชื่อแบบ : BASE PLATE FOR BOTTOM FIXTURE			
1	BASE PLATE FOR BOTTOM FIXTURE	1	STAINLESS GRADE 304
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ
			วีสต
			Revision : A-0
			DWG-001-023

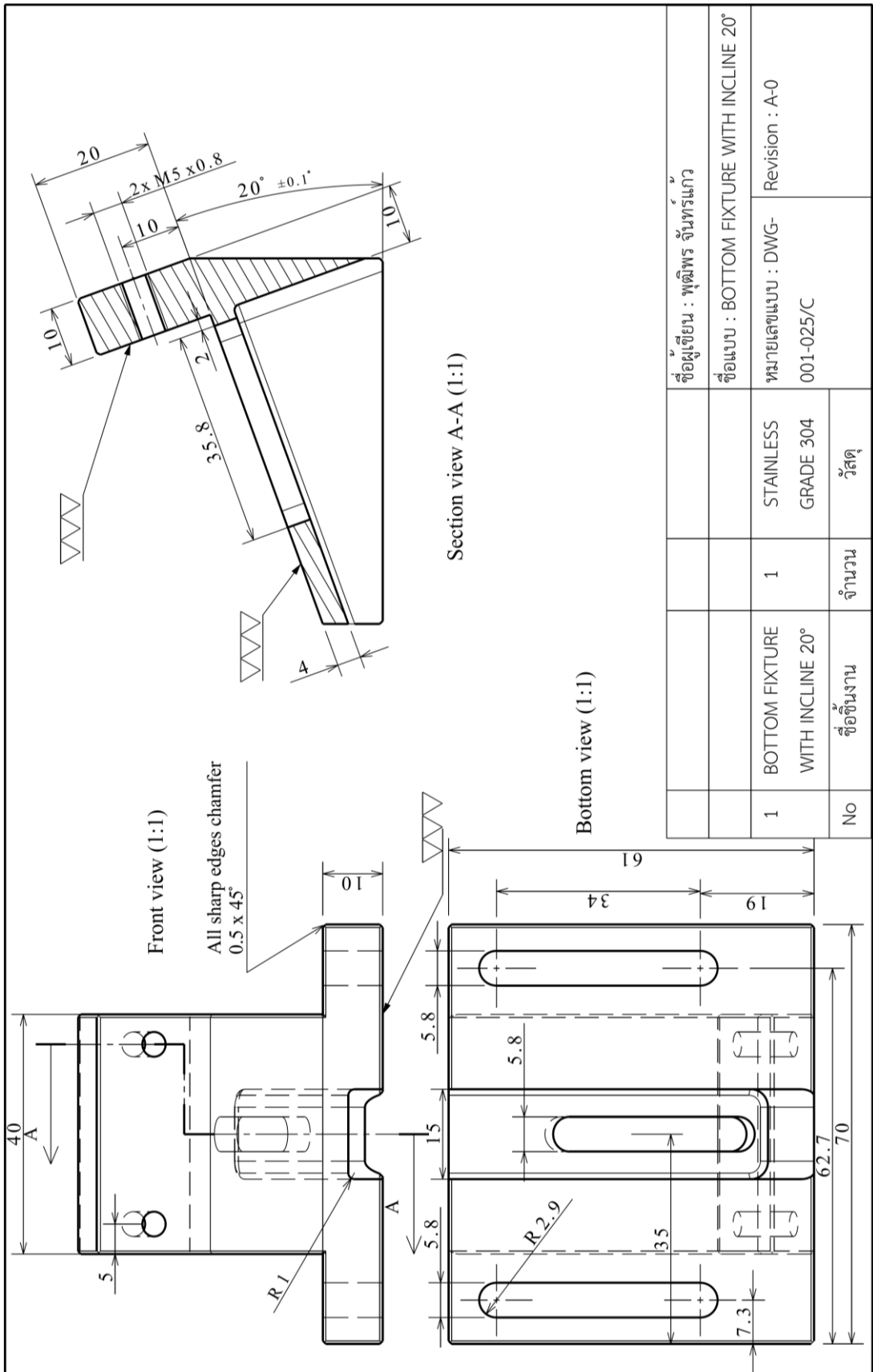


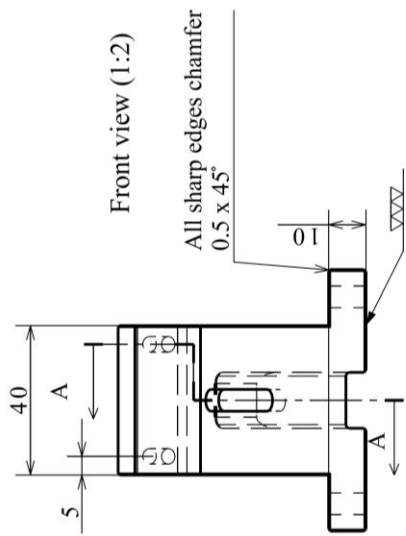


ชื่อผู้เขียน : พุทธิพร จันทรวงศ์		ชื่อแบบ : BOTTOM FIXTURE		Revision : A-0	
2	LOCK PLATE	1	STAINLESS GRADE 304		
1	BOTTOM FIXTURE	1	STAINLESS GRADE 304	หมายเลขแบบ : DWG-001-025/A	
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ		



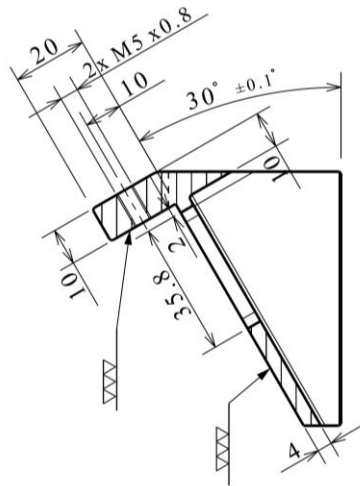
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว		ชื่อแบบ : BOTTOM FIXTURE WITH INCLINE 10°	
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว		ชื่อแบบ : BOTTOM FIXTURE WITH INCLINE 10°	
1	BOTTOM FIXTURE WITH INCLINE 10°	STAINLESS GRADE 304	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ
		1	001-025/B



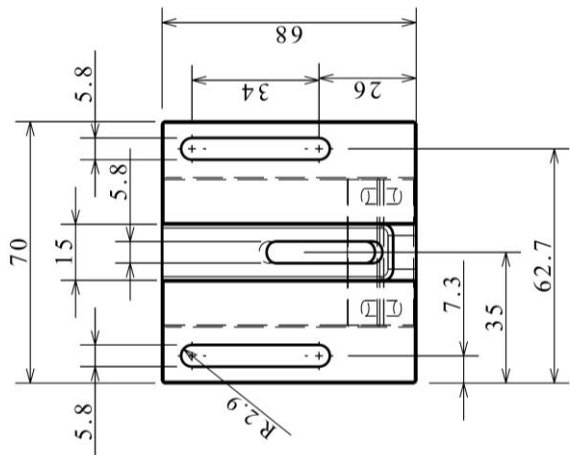


Front view (1:2)

All sharp edges chamfer
0.5 x 45°

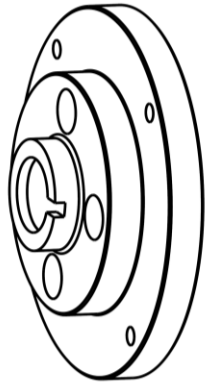


Section view A-A (1:2)

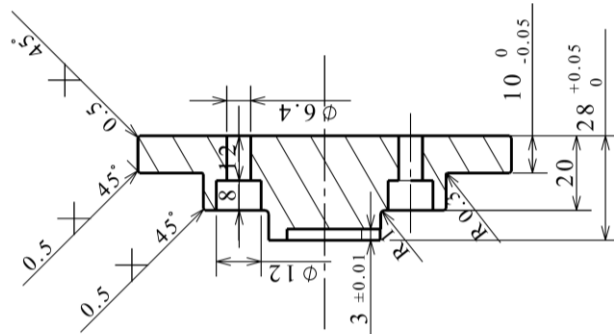


Bottom view (1:2)

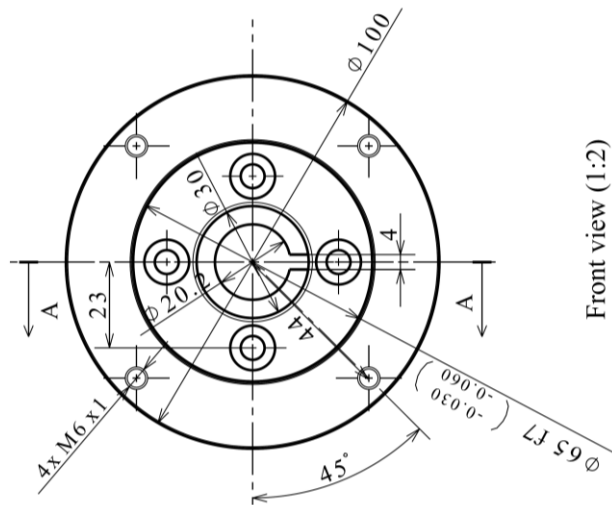
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว			
ชื่อแบบ : BOTTOM FIXTURE WITH INCLINE 30°			
1	BOTTOM FIXTURE WITH INCLINE 30°	1	STAINLESS GRADE 304
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ
			Revision : A-0
			หมายเลขแบบ : DWG-001-025/D



Isometric view (1:2)

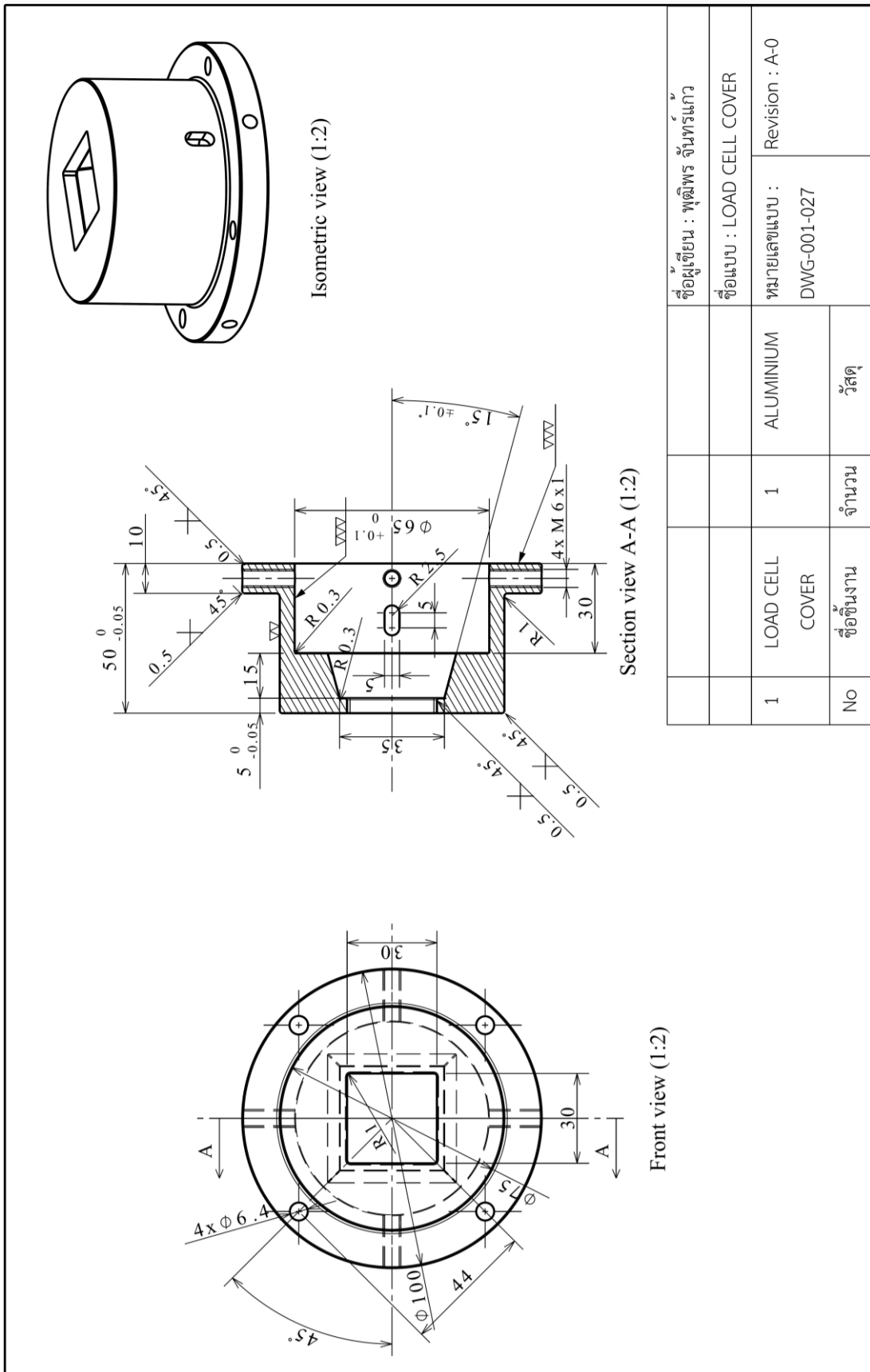


Section view A-A (1:2)

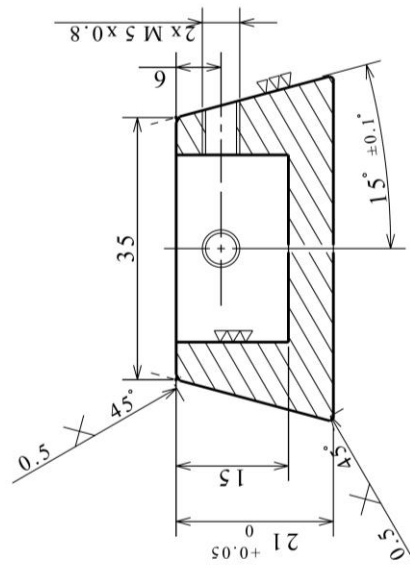
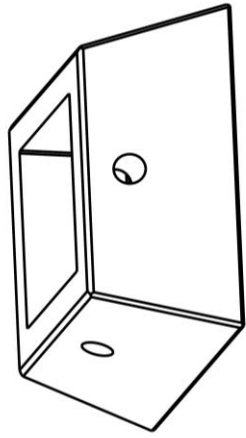
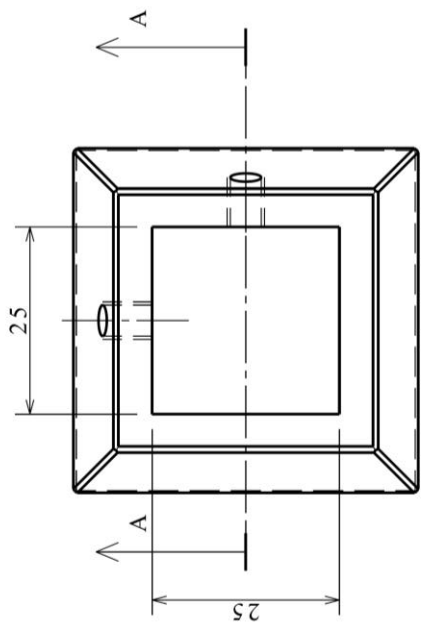


Front view (1:2)

				ชื่อผู้เขียน : พศิมพร จันทรมแก้ว
				ชื่อแบบ : LOAD CELL PLATE
1	LOAD CELL PLATE	1	STAINLESS GRADE 304	หมายเลขแบบ : DWG-001-026
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0

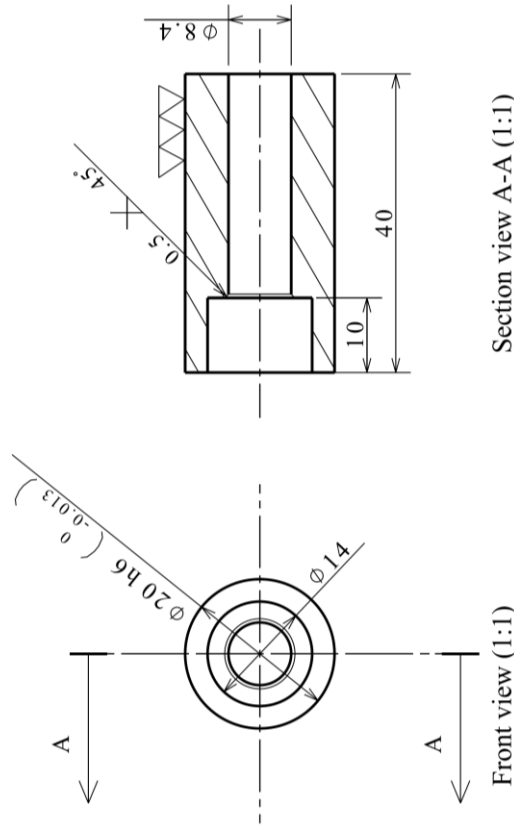


ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว	
ชื่อแบบ : LOAD CELL COVER	
1	LOAD CELL COVER
1	ALUMINIUM
หมายเลขแบบ : Revision : A-0	
DWG-001-027	
No	ชื่อชิ้นงาน
	จำนวน
	วัสดุ



Section view A-A (1:1)

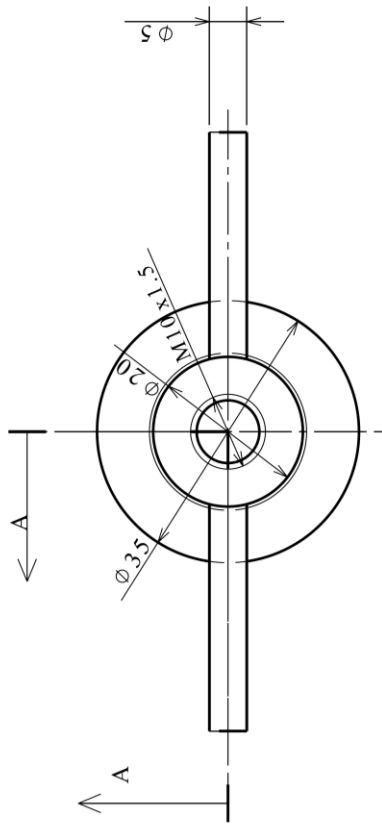
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : UPPER FIXTURE
1	UPPER FIXTURE	1	STAINLESS GRADE 304	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	DWG-001-028



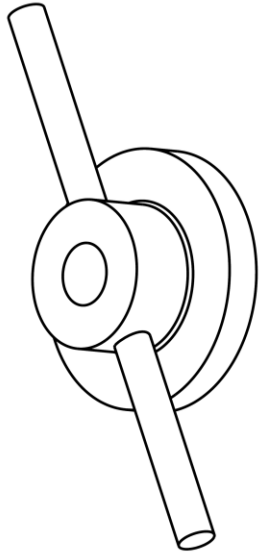
Section view A-A (1:1)

Front view (1:1)

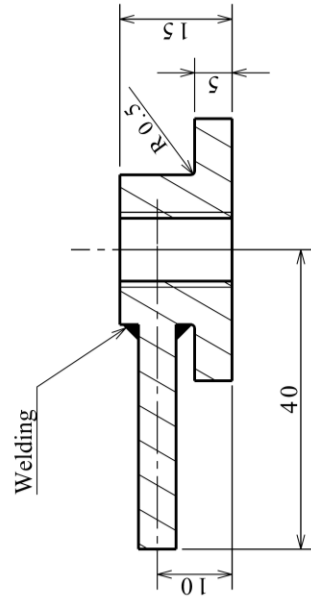
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว	
ชื่อแบบ : GUIDING FOR MOVEABLE TOP PLATE	
1	GUIDING FOR MOVEABLE TOP PLATE
4	STAINLESS GRADE 304
วัสดุ	วัสดุ
จำนวน	จำนวน
ชื่อชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน
No	No
Revision : A-0	Revision : A-0
หมายเลขแบบ : DWG-001-029	หมายเลขแบบ : DWG-001-029



Front view (1:1)

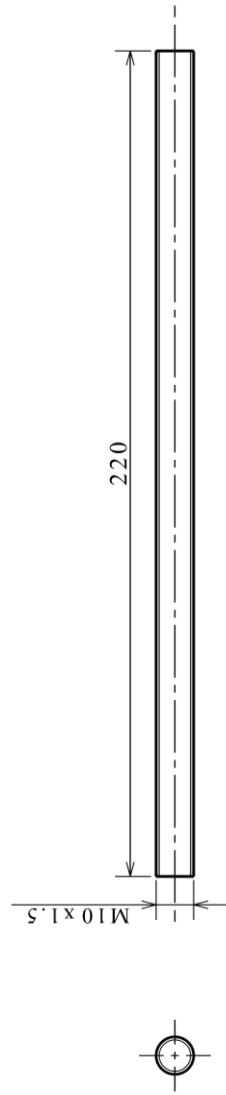


Isometric view (1:1)



Section view A-A (1:1)

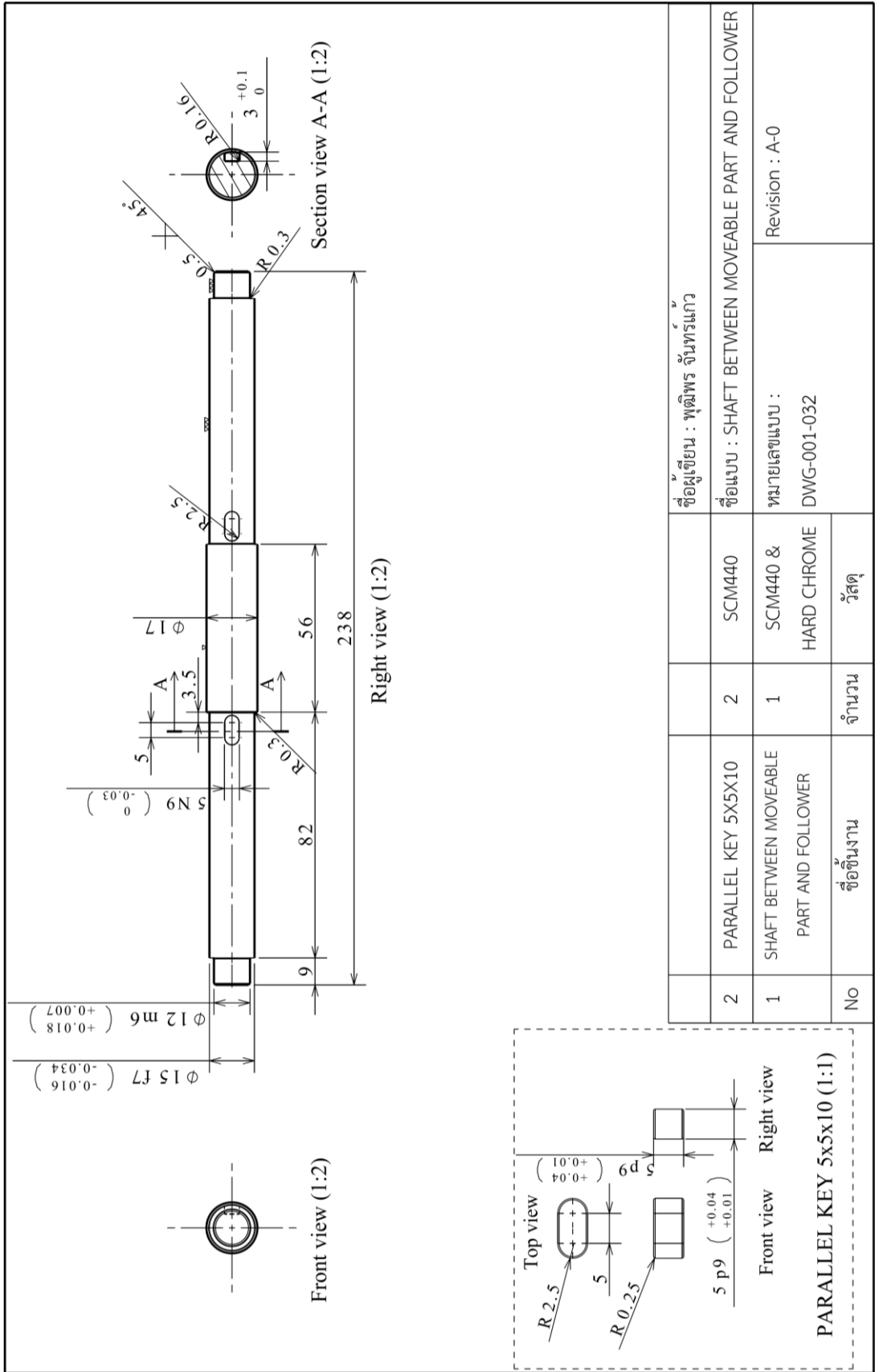
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : WEIGHT COVER
1	WEIGHT COVER	1	STAINLESS GRADE 304	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	DWG-001-030



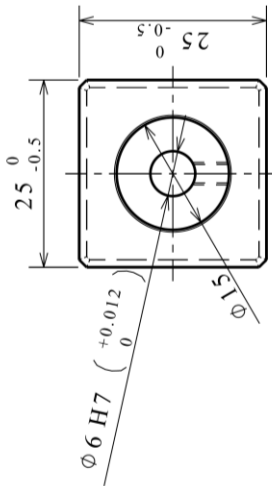
Front view (1:2)

Right view (1:2)

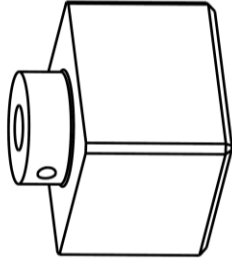
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : LOCK SCREW
1	LOCK SCREW	1	STAINLESS GRADE 304	หมายเลขแบบ : DWG-001-031
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0



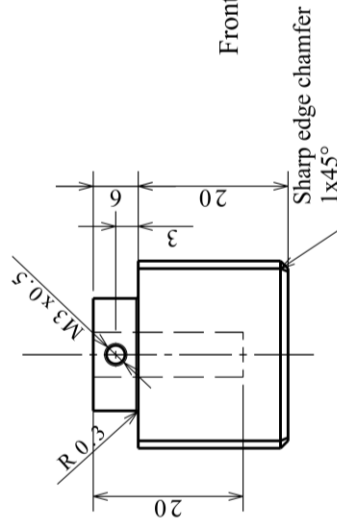
PARALLEL KEY 5x5x10 (1:1)



Top view (1:1)



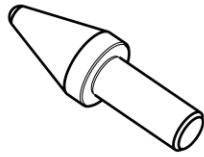
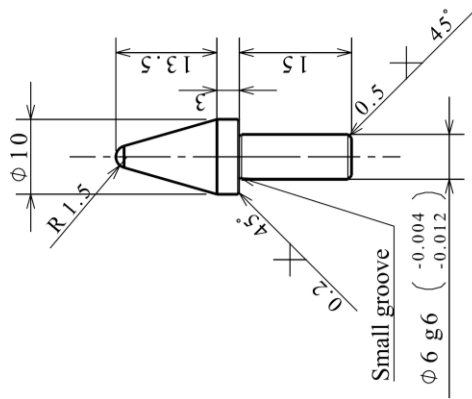
Isometric view (1:1)



Front view (1:1)

*Surface roughness 

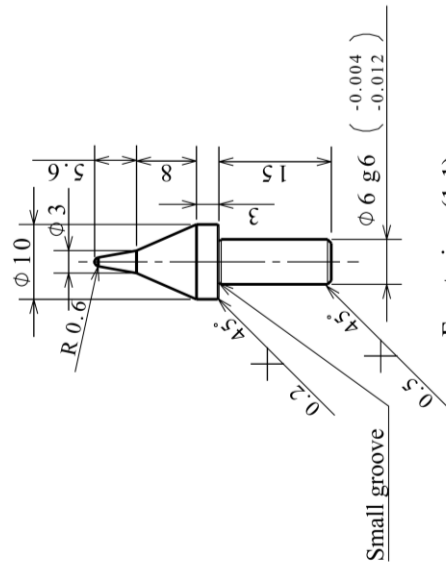
				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทรมักแก้ว
				ชื่อแบบ : STYLUS HOLDER
1	STYLUS HOLDER	1	STAINLESS GRADE 304	Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	DWG-001-033



Isometric view (1:1)

*Surface roughness

				ชื่อผู้เขียน : พุดิพร จันทรวง
				ชื่อแบบ : STYLUS BALL ϕ 3 mm
1	STYLUS BALL ϕ 3 mm	1	TUNGSTEN CARBIDE	หมายเลขแบบ : Revision : A-0
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	DWG-001-034/A



Isometric view (1:1)

Front view (1:1)

*Surface roughness

				ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว
				ชื่อแบบ : STYLUS_CONICAL R 0.6 mm
1	STYLUS_CONICAL R 0.6 mm	1	TUNGSTEN CARBIDE	หมายเลขแบบ : DWG-001-034/B
No	ชื่อชิ้นงาน	จำนวน	วัสดุ	Revision : A-0

รายการชิ้นส่วน

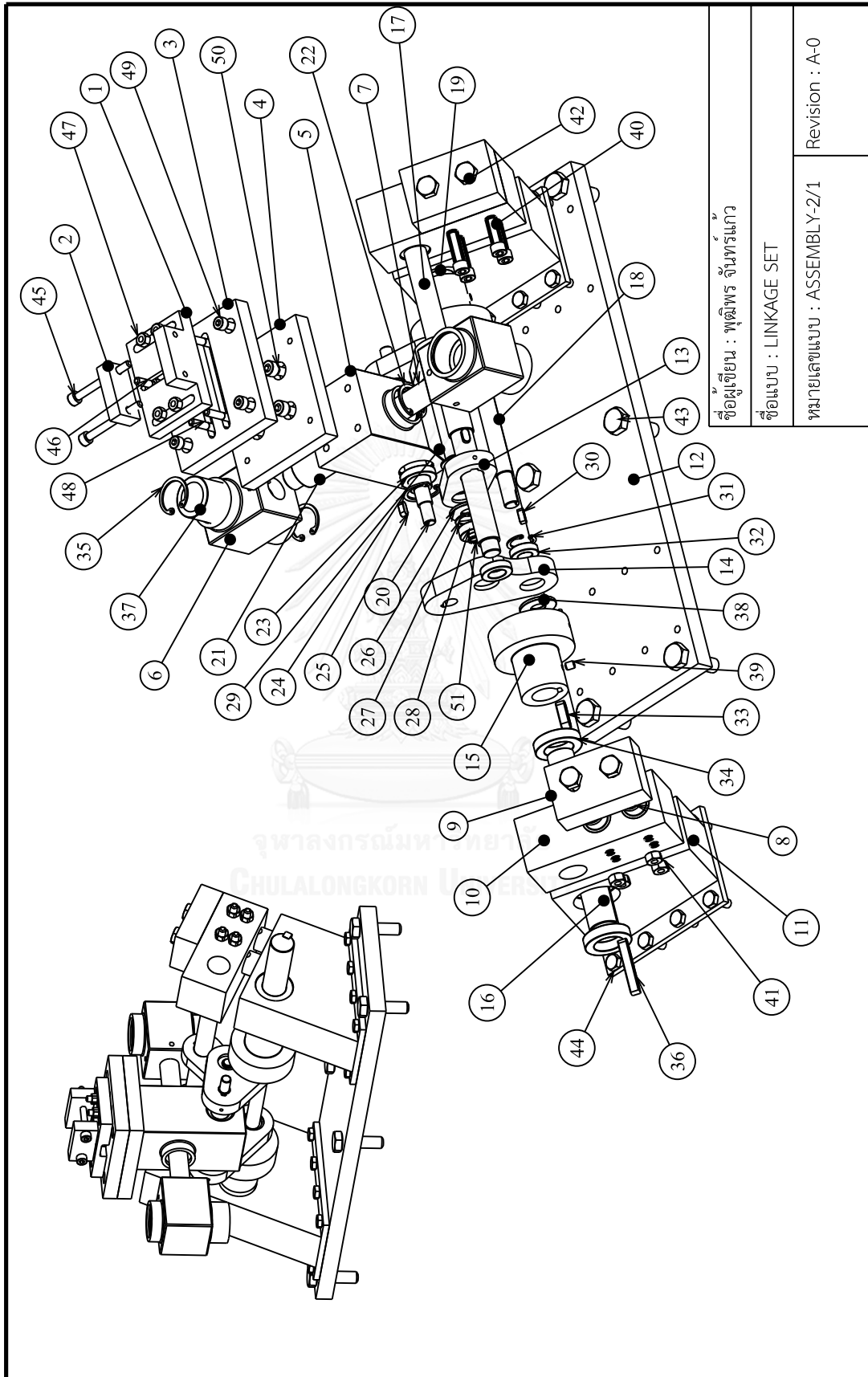
NO.	จำนวน	ชื่อชิ้นส่วน	หมายเลขแบบ
1	1	LOCK SCREW	DWG-001-031
2	1	WEIGHT COVER	DWG-001-030
3	-	WEIGHT	-
4	1	MOVEABLE TOP PLATE	DWG-001-003
5	4	LINEAR BEARING	SKF LBBR 20-2LS/HV6
6	1	LOAD CELL PLATE	DWG-001-026
7	1	LOAD CELL 1 KN	KYOWA
8	1	UPPER FIXTURE	DWG-001-028
9	1	LOAD CELL COVER	DWG-001-027
10	4	GUIDING FOR MOVEABLE TOP PLATE	DWG-001-029
11	1	TOP PLATE	DWG-001-002
12	2	STRUT CLAMP VERTICAL FEMALE THREAD	MISUMI KIMU D50
13	2	CLAMP LEVER MALE THREAD	MISUMI CLDM M10 L63
14	4	SCREW M6x30	-
15	4	SCREW M6x20	-
16	4	SCREW M8x45	-
17	4	BOLT M10x80	-
18	4	NUT M10	-

ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว

ชื่อแบบ : TOP SET

หมายเลขแบบ : ASSEMBLY-1

Revision : A-0



รายการชิ้นส่วน

NO.	จำนวน	ชื่อชิ้นส่วน	หมายเลขแบบ
1	1	BOTTOM FIXTURE	DWG-001-025
2	1	LOCK PLATE	DWG-001-025
3	1	SLOTTED PLATE FOR BOTTOM FIXTURE	DWG-001-024
4	1	BASE PLATE FOR BOTTOM FIXTURE	DWG-001-023
5	1	BOTTOM FIXTURE JOINT	DWG-001-014
6	2	SLIDING JOINT	DWG-001-022
7	1	SLIDING ROD	DWG-001-015
8	4	SUPPORT PIN	DWG-001-016
9	2	MOVEABLE PART COVER	DWG-001-010
10	1,1	MOVEABLE PART	DWG-001-009/A-B
11	2	LINKAGE BASE	DWG-001-008
12	1	BASE PLATE FOR LINKAGE SET	DWG-001-007
13	2	FOLLOWER	DWG-001-013
14	1,1	COUPLER	DWG-001-012/A-B
15	2	CRANK	DWG-001-011
16	1	DRIVING SHAFT	DWG-001-021
17	1	SHAFT BETWEEN MOVEABLE PART AND FOLLOWER	DWG-001-032
18	1	SHAFT BETWEEN COUPLER AND CRANK	DWG-001-019
19	1	SHAFT BETWEEN CRANK AND LINKAGE BASE	DWG-001-020
20	1	SHAFT BETWEEN BOTTOM FIXTURE JOINT AND COUPLER	DWG-001-018
21	2	LINEAR BEARING	SKF LBBR 16
22	1	INTERNAL RETAINING RING ϕ 24	-
23	2	BALL BEARING	SKF 61802 2RS1
24	2	INTERNAL RETAINING RING ϕ 24	-
25	2	PARALLEL KEY TWO END ROUND 4x4x10	DWG-001-018
26	2	SPACER D25,d10x2	-
27	2	INTERNAL RETAINING RING ϕ 19	-
28	2	BALL BEARING	SKF 61800 2RS1
29	1	SHAFT FOR COUPLER AND FOLLOWER	DWG-001-017
30	2	PARALLEL KEY ONE END ROUND 4x4x10	DWG-001-019

NO.	จำนวน	ชื่อชิ้นส่วน	หมายเลขแบบ
31	2	INTERNAL RETAINING RING ϕ 19	-
32	2	BALL BEARING	SKF 61800 2RS1
33	2	PARALLEL KEY TWO END ROUND 6x6x20	DWG-001-020
34	4	BALL BEARING	SKF 61804 2RS1
35	4	INTERNAL RETAINING RING ϕ 28	-
36	1	PARALLEL KEY ONE END ROUND 6x6x40	DWG-001-021
37	4	LINEAR BEARING	SKF LBBR 20- 2LS/HV6
38	2	SPACER D25,d10x2	-
39	2	HEX SOCKET M5x6	-
40	8	SCREW M6x50	-
41	8	NUT M6	-
42	4	SCREW M8x16	-
43	6	SCREW M10x35	-
44	16	SCREW M6x16	-
45	2	SCREW M5x50	-
46	1	SCREW M5x16	-
47	4	NUT M5	-
48	4	SCREW M5x25	-
49	4	SCREW M5x12	-
50	4	SCREW M6x20	-

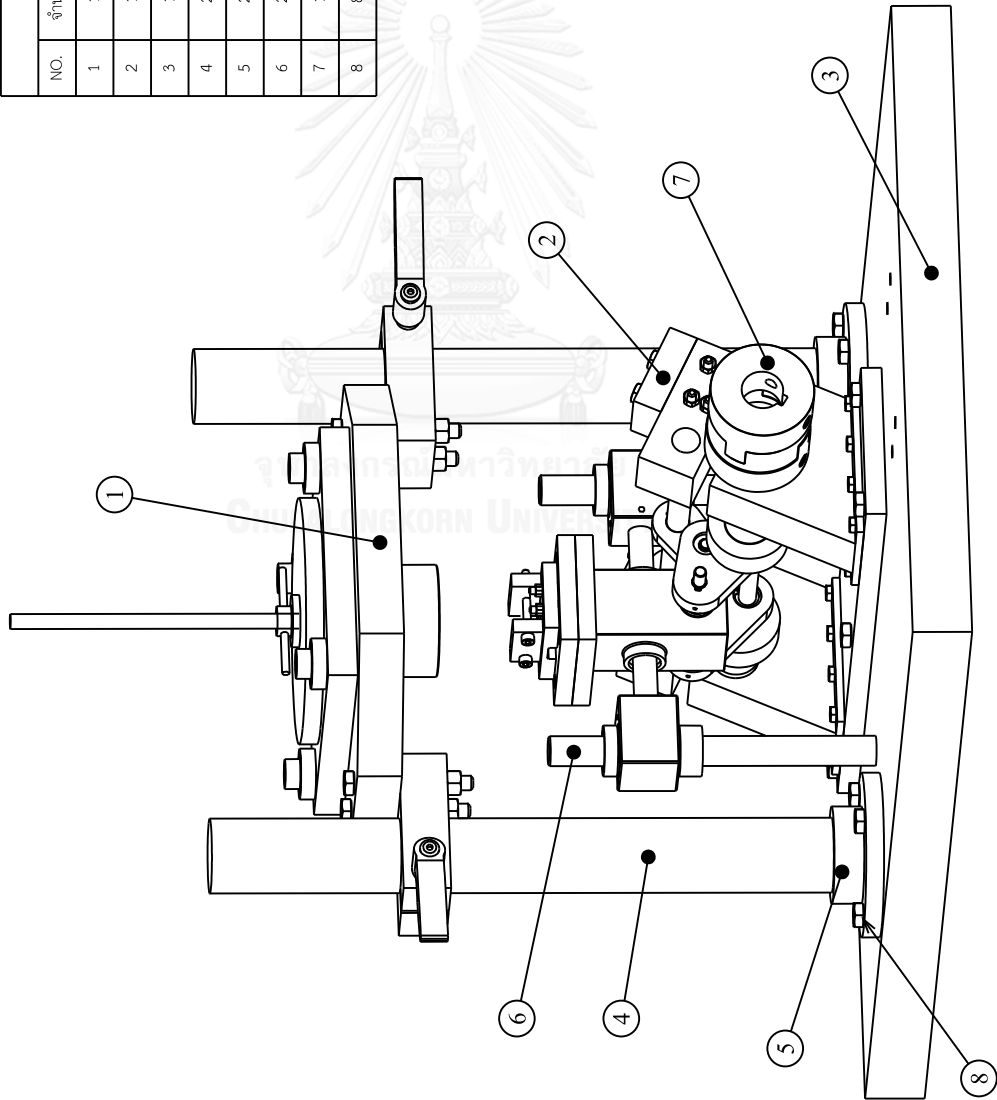
ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว

ชื่อแบบ : LINKAGE SET

หมายเลขแบบ : ASSEMBLY-2/2

Revision : A-0

รายการชิ้นส่วน			
NO.	จำนวน	ชื่อชิ้นส่วน	หมายเลขแบบ
1	1	TOP SET	ASSEMBLY 1
2	1	LINKAGE SET	ASSEMBLY 2
3	1	BASE PLATE	DWG-001-001
4	2	MAIN COLUMN	DWG-001-004
5	2	FLANGE	DWG-001-005
6	2	GUIDED COLUMN	DWG-001-006
7	1	OLDHAM TYPE COUPLING	MISUMI MFJMK44-18-20
8	8	SCREW M10x35	-



ชื่อผู้เขียน : พุฒิพร จันทร์แก้ว

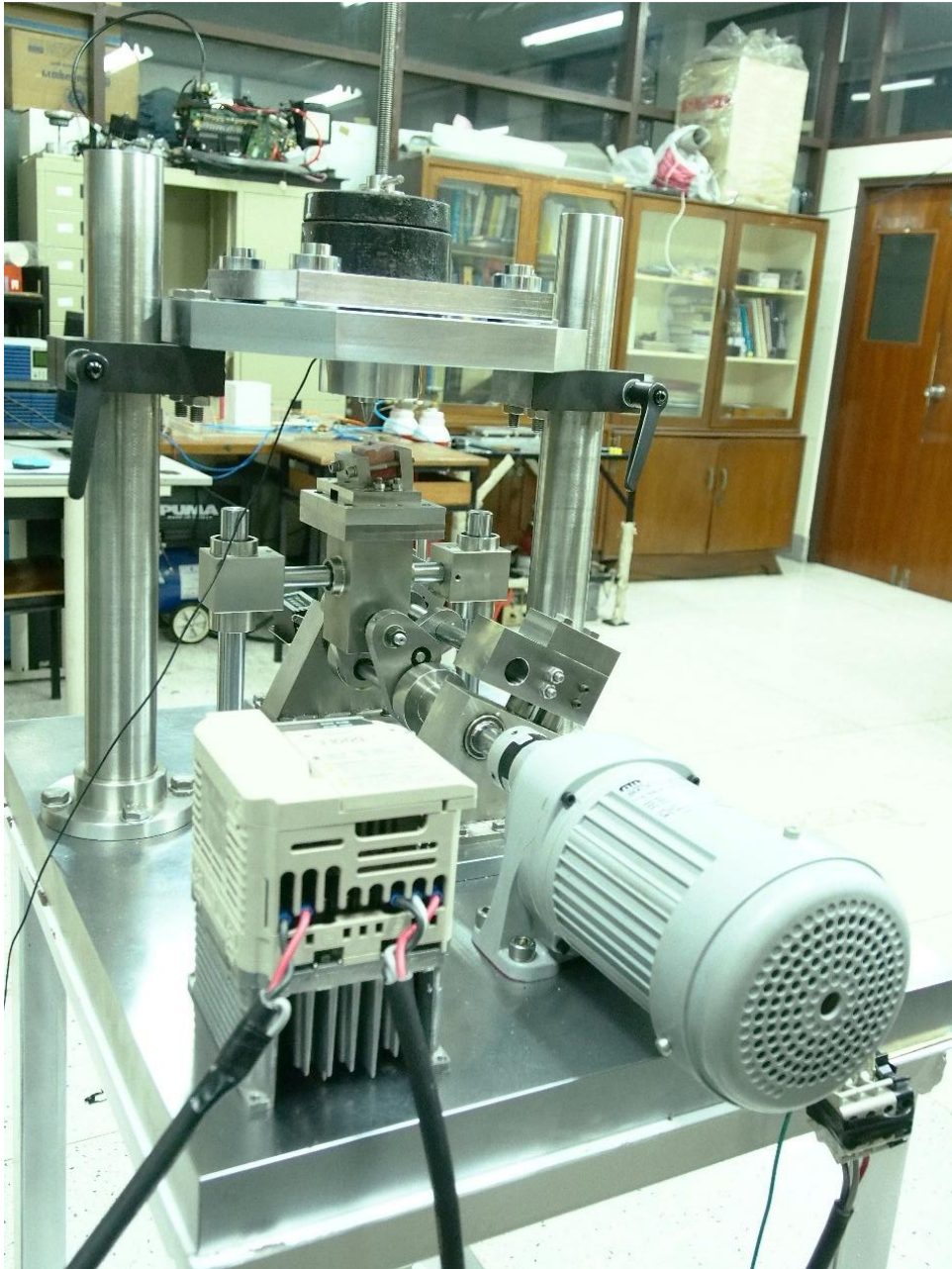
ชื่อแบบ : COMPLETED ASSEMBLY

หมายเลขแบบ : ASSEMBLY-3 Revision : A-0

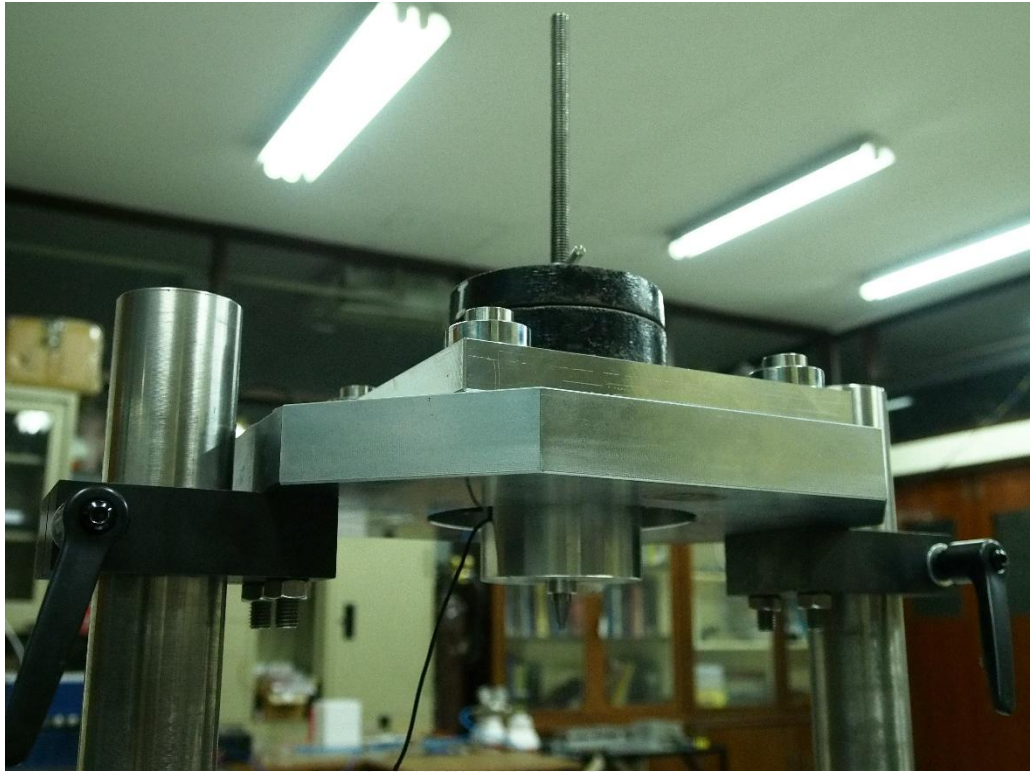


ภาคผนวก ข
รูปเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์

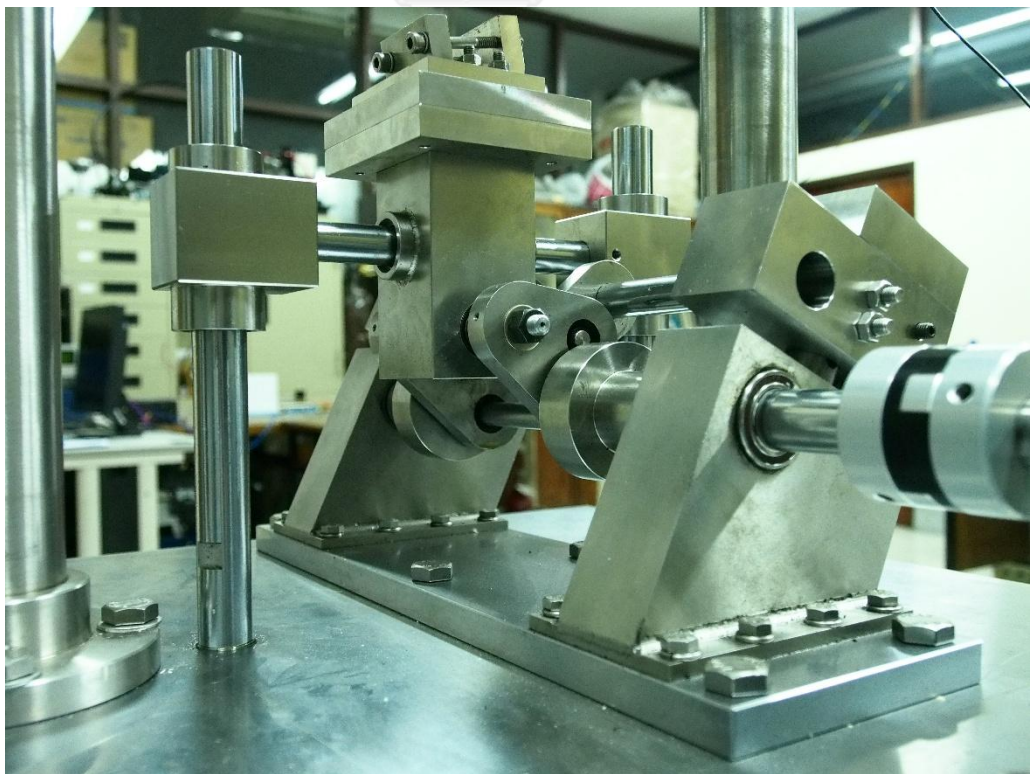
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



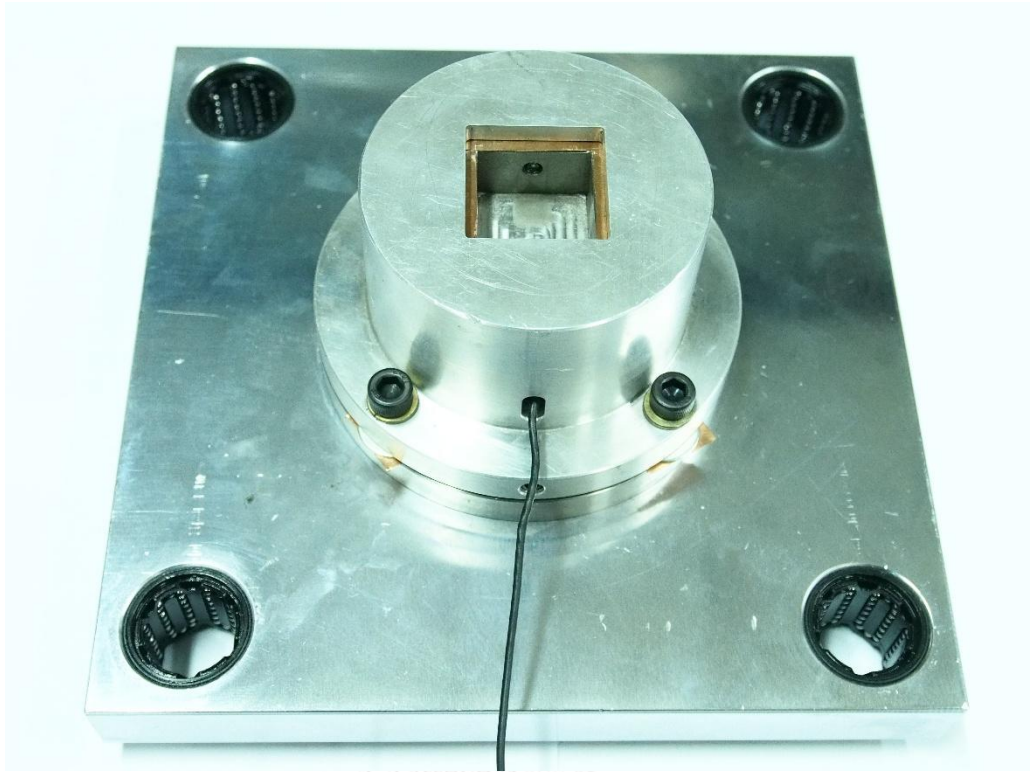
รูปที่ ข.1 เครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์



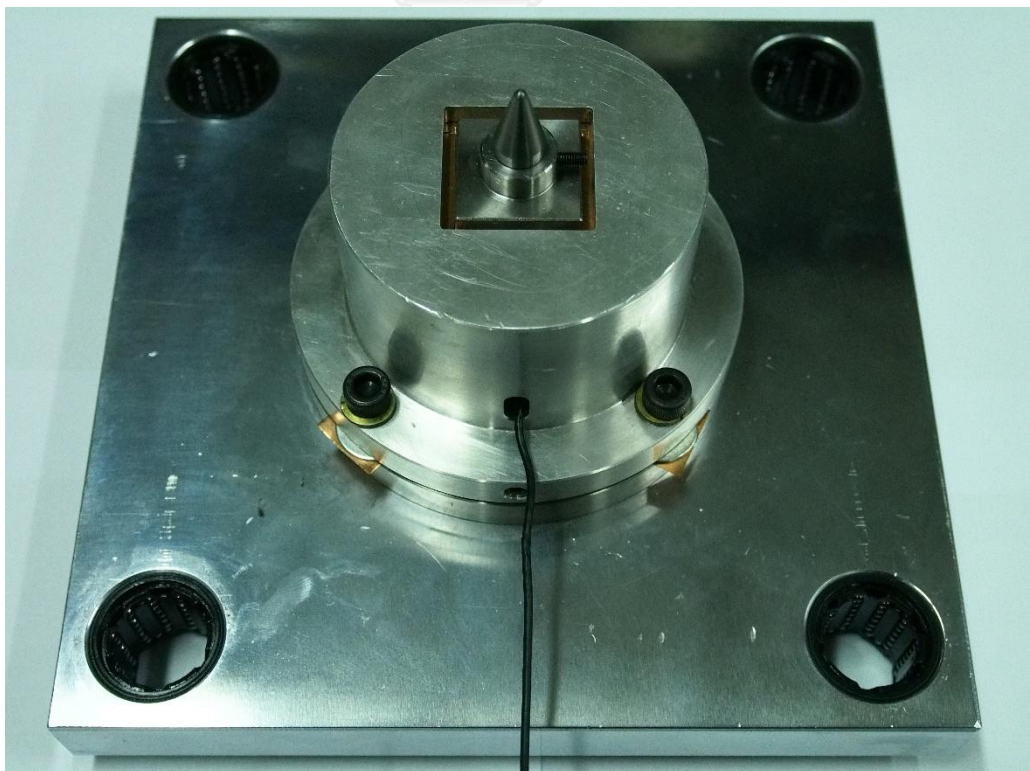
รูปที่ ข.2 Top set



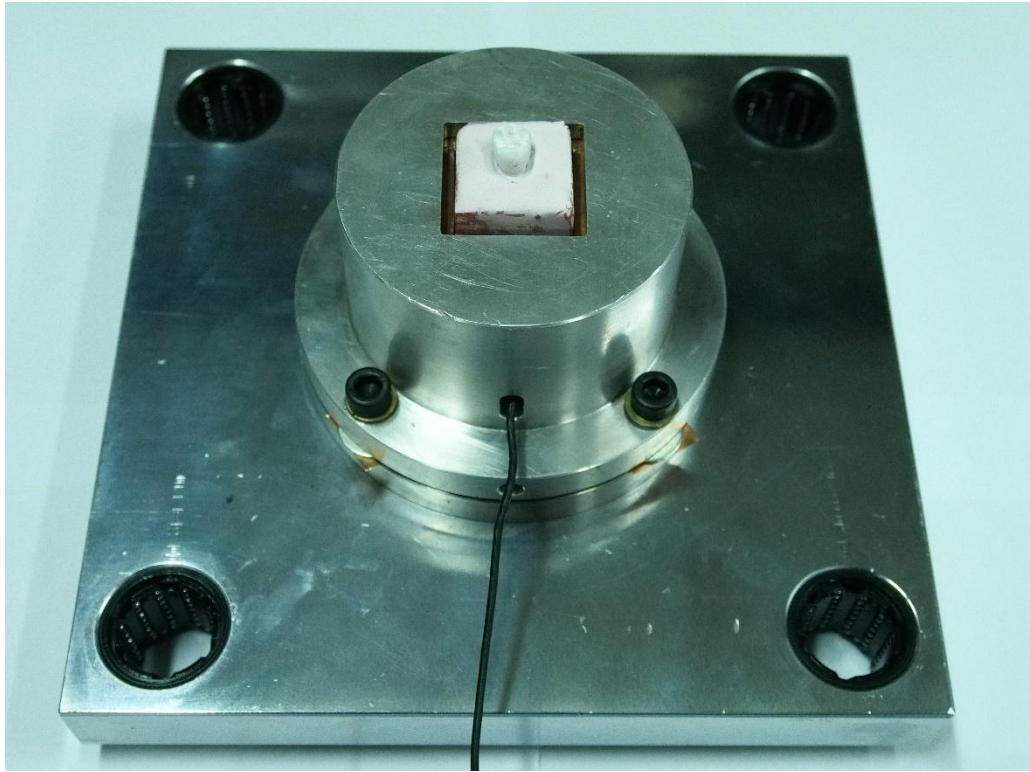
รูปที่ ข.3 Linkage set



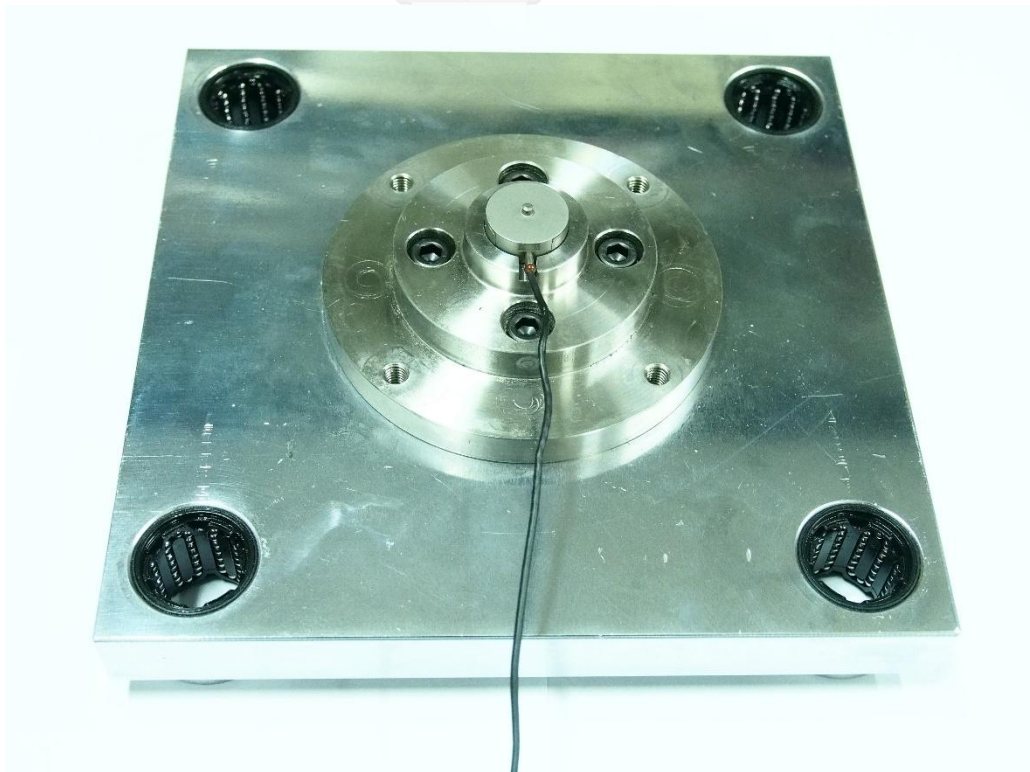
รูปที่ ข.4 ชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน



รูปที่ ข.5 การจับยึดหัวกดชิ้นงานบนชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน



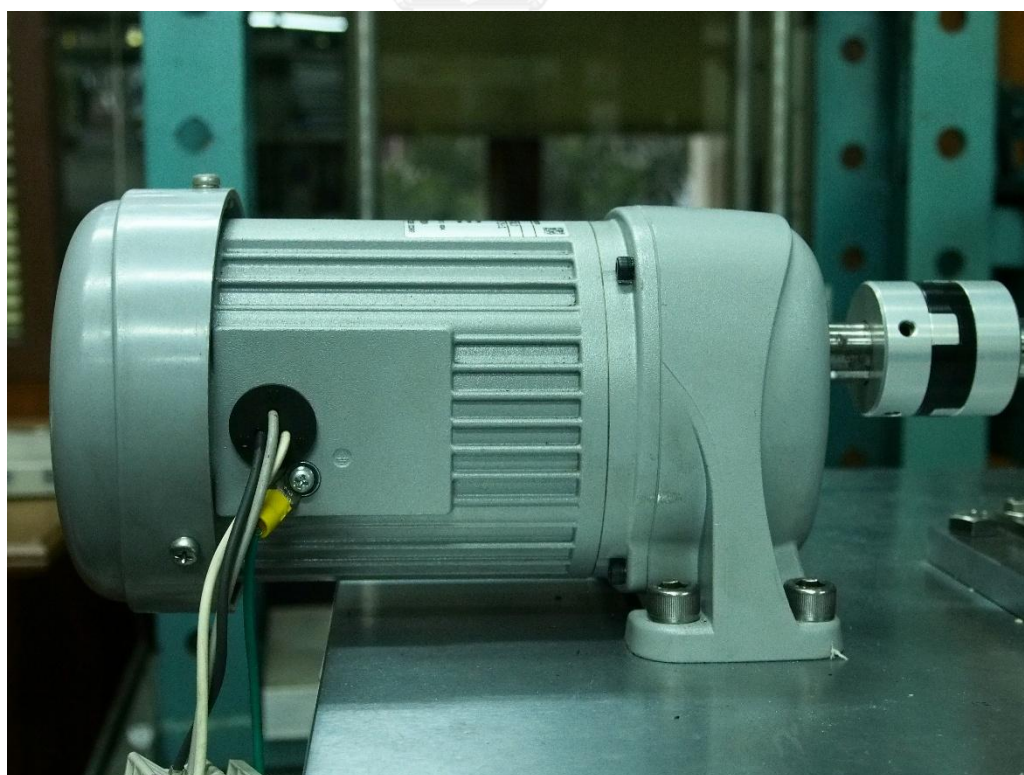
รูปที่ ข.6 การจับยึดชิ้นงานทดสอบบนชุดจับยึดชิ้นงานชุดบน



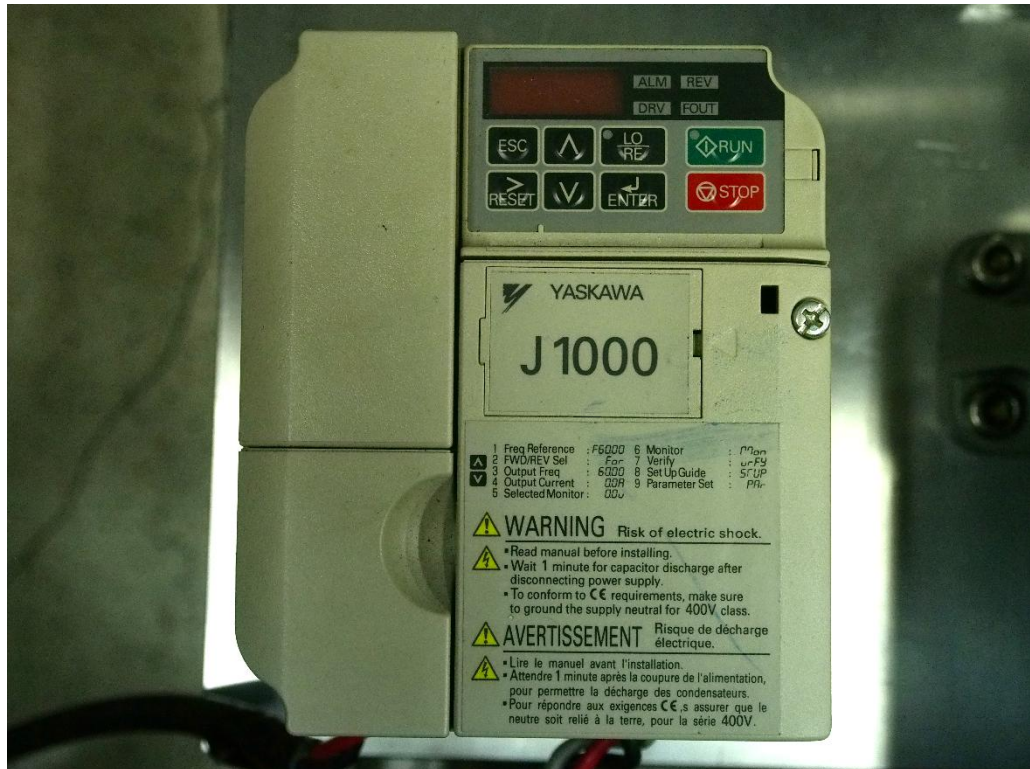
รูปที่ ข.7 Load cell ขนาด 1 กิโลนิวตัน วัดแรงในแกนเดียว ยี่ห้อ Kyowa



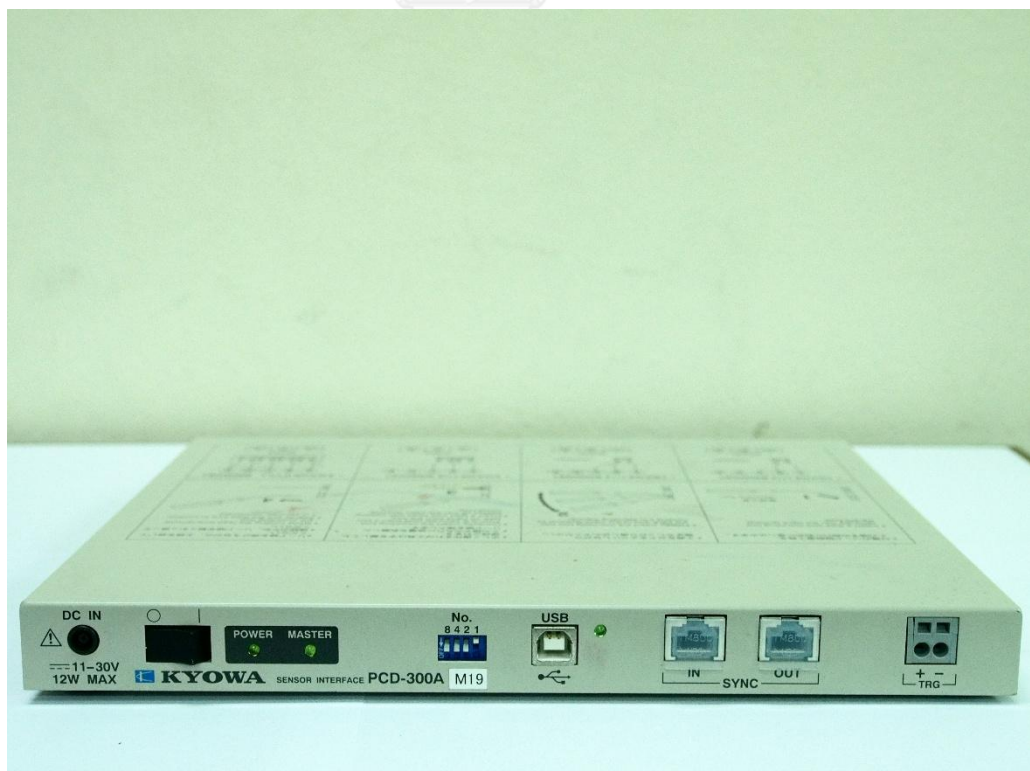
รูปที่ ข.8 ชุดจับยึดชิ้นงานชุดล่าง



รูปที่ ข.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 0.2 กิโลวัตต์



รูปที่ ข.10 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Yaskawa รุ่น J1000



รูปที่ ข.11 Data acquisition สำหรับ Load cell ยี่ห้อ Kyowa รุ่น PCD-300A



รูปที่ ข.12 อุปกรณ์นับจำนวนรอบการเคี้ยว



รูปที่ ข.13 ต้มน้ำหนักขนาดต่าง ๆ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพุมิพร จันท์แก้ว เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2527 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และมีผลงานวิชาการที่ได้เผยแพร่ดังนี้

พุมิพร จันท์แก้ว และ ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, การออกแบบและพัฒนาเครื่องจำลองการเคี้ยวของมนุษย์เพื่อการทดลองทางทันตกรรม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 15 - 17 ตุลาคม 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

