

ผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและการสัมผัสของหน้าพินต่อกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและ  
เฟืองเฉียง



นายเจษฎา แพรกนันทะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

THE EFFECTS OF GEOMETRICAL PARAMETERS AND GEAR TOOTH CONTACT ON  
POWER LOSS IN SPUR AND HELICAL GEARS

Mr. Jetsada Phraeknanthoe



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและการสัมผัสของหน้า  
พินต่อกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง

โดย

นายเจษฎา แพรกนันทะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภดนัย อาชวาคม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ กิตติคุณ ดร. สุรินทร์ พงศ์สุภสมิทธิ์)

เจษฎา แพรกนันทะ : ผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและการสัมผัสของหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง. (THE EFFECTS OF GEOMETRICAL PARAMETERS AND GEAR TOOTH CONTACT ON POWER LOSS IN SPUR AND HELICAL GEARS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, 128 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและการสัมผัสของหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง โดยเน้นการศึกษาไปที่พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่ยังไม่ทราบผลกระทบต่อกำลังสูญเสียที่ชัดเจนอันได้แก่ ผลของมุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟันเฟือง การศึกษาทำโดยการทดลองวัดกำลังสูญเสียด้วยชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back นอกจากนั้นยังศึกษาผลของพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองในระหว่างการขบจริงโดยทาสีที่หน้าสัมผัสก่อนการทดลอง และเก็บข้อมูลลักษณะการสัมผัส โดยตำแหน่งที่สีหลุดออกหลังจากการขบแสดงถึงพื้นที่การขบกันจริงของฟันเฟือง ผลในส่วนนี้สามารถนำมาใช้ประกอบกับผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้อธิบายกลไกการเกิดกำลังสูญเสียในกรณีต่าง ๆ ได้

ผลการทดลองพบว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์มากจะมีกำลังสูญเสียมาก ส่วนเฟืองที่มีมุมกดน้อยและความกว้างหน้าฟันน้อยจะมีกำลังสูญเสียมาก จากผลของพื้นที่สัมผัสของเฟืองพบว่าพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มและฟันเฟืองจะสัมผัสเกือบเต็มฟันที่แรงบิดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองเดิมซึ่งคำนวณโดยใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟันพบว่า ในกรณีของมุมกดและความกว้างหน้าฟันมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนในกรณีของมุมฮิลิกซ์ การประเมินพบว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา จะมีกำลังสูญเสียมากที่สุด ในขณะที่ผลการทดลองพบว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา มีกำลังสูญเสียมากที่สุด แต่เมื่อใช้ผลการสัมผัสที่วัดได้จากการทดลองประกอบในการคำนวณพบว่า ผลที่ได้ในทุกกรณีสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยเฉพาะในกรณีของมุมฮิลิกซ์ซึ่งการใช้ผลการสัมผัสประกอบทำให้ประเมินได้ว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา จะมีกำลังสูญเสียมากที่สุด มากกว่าเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ฟันของเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา จะมีพื้นที่สัมผัสน้อยกว่าและส่วนที่ไม่สัมผัสจะไม่มีกำลังสูญเสียเกิดขึ้น จึงทำให้ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนในกรณีอื่นผลการประเมินก็มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้นเช่นกัน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5470151321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POWER LOSS / GEAR PARAMETER / GEAR TOOTH CONTACT

JETSADA PHRAEKNANTHOE: THE EFFECTS OF GEOMETRICAL PARAMETERS AND GEAR TOOTH CONTACT ON POWER LOSS IN SPUR AND HELICAL GEARS. ADVISOR: ASST. PROF. CHANAT RATANASUMAWONG, D.Eng., 128 pp.

This thesis presents the effects of geometrical parameters and gear tooth contact on power loss in spur and helical gears. Gear parameters that are helix angle, pressure angle and face width that their effects on power loss are still unclear are focused on this research. Experiments were done to measure power losses by using back to back gear test rig. The effects of gear tooth contact were studied by painting gear teeth before experiments. The areas that the paint was peeled off after experiment represent the actual tooth contact areas. These tooth contact patterns were used along with experimental results and gear meshing model to explain the mechanism of gear sliding loss further.

From the experiments, the gears having larger helix angle have higher sliding loss. The gears having smaller pressure angles or narrower face width have higher sliding loss. The areas of tooth contact increase as load increase. The contact areas extend to almost full tooth area at the maximum applied load. By comparing the experimental results with the estimated results calculated using the former full tooth contact model, the estimated results showed the same trend with the experimental results in the case of the effects of pressure angle and face width. For the effect of helix angle, the estimated results show the maximum sliding loss at helix angle 22 degree, but from the experiments the gear having helix angle 33.5 degree has higher sliding loss. However when the data of tooth contact patterns were used in the calculation, all estimated results agree well with the experimental results. The estimated sliding loss of the gear pair having helix angle 33.5 degree is higher than that of gear having helix angle 22 degree. This is because the tooth contact areas of gear having helix angle 22 degree are narrower than the areas of gear having helix angle 33.5 degree, and at the non-contact area there are no sliding loss. These results are agree well with the experimental results. The estimated results in the other cases are also closer to the experimental results than the results estimated from the former gear model.

Department: Mechanical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ และความอนุเคราะห์ด้านอื่น ๆ อีกหลายประการด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภดนัย อาชวาคม และ ศาสตราจารย์ กิตติคุณ ดร. สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ กรรมการที่ให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาทำงานวิจัย ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วน สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ นายชาคริต เย็นที่ และ นายภูวดล อัครพิชญโชติ ในการให้คำปรึกษา แนะนำในด้านการทดลองตลอดมาจนงานวิจัยนี้สมบูรณ์ และ นางสาวณัชชา พรชัย ที่ช่วยในการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และ ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องปริญญาโทมาหาบัณฑิตทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้าน ๆ ตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูต่อบิดามารดา ครูบาอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ปรัชญาบรรณกรรม.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	10
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
1.6 สรุป.....	11
บทที่ 2 การประเมินกำลังสูญเสียจากการไหลสำหรับเฟือง.....	12
2.1 แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการไหลของเฟืองตรง.....	12
2.2 แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง.....	15
2.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง.....	18
2.4 ปัจจัยที่ทำให้การประเมินกำลังสูญเสียต่างจากผลการทดลองจริง.....	18
2.5 สรุป.....	19
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	20
3.1 ชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back.....	20
3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ชุดเฟือง และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 วิธีการทดลองและสถานะที่ทดลอง.....	24
3.4 วิธีการศึกษาพื้นที่หน้าสัมผัสของเฟือง.....	25
3.5 การคำนวณกำลังสูญเสียจากการไหลจากการทดลอง.....	27
3.5.1 การทดลองวัดกำลังสูญเสียในห้องเฟืองขณะไม่มีภาระ.....	28

3.5.2 การทดลองวัดกำลังสูญเสียในห้องเพ็องขณะมีภาระ.....	29
3.6 สรุป.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียและอภิปราย .....	33
4.1 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ .....	33
4.2 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ .....	35
4.3 อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเพ็องต่อกำลังสูญเสียจากการไหล.....	42
4.3.1 อิทธิพลของมุมฮีลิคซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลของเพ็องเฉียง .....	42
4.3.2 อิทธิพลของมุมกุดต่อกำลังสูญเสียจากการไหลของเพ็องเฉียง.....	45
4.3.3 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไหลของเพ็องเฉียง .....	48
4.4 ผลการทดลองซ้ำ .....	51
4.5 สรุป.....	55
บทที่ 5 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง.....	57
5.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของกฎดล .....	57
5.1.1 อิทธิพลของมุมฮีลิคซ์ .....	57
5.1.2 อิทธิพลของมุมกุด.....	65
5.1.3 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟัน .....	71
5.2 การประยุกต์ใช้พื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย .....	77
5.2.1 อิทธิพลของมุมฮีลิคซ์ .....	86
5.2.2 อิทธิพลของมุมกุด.....	88
5.2.3 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟัน .....	90
5.3 สรุป.....	92
บทที่ 6 สรุป.....	93
6.1 สารสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง .....	96
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก ผลการทดลองซ้ำของเพ็องชุด C และเพ็องชุด D .....	100



ณ

หน้า

ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง .....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	128



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	การแทนเครื่องหมายสำหรับสมการ (2.4).....	13
ตารางที่ 2.2	สมการสำเร็จสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน .....	18
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์รูปร่างของเฟืองที่ใช้ในการทดลอง .....	22
ตารางที่ 3.2	น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง .....	23
ตารางที่ 3.3	ลำดับการทดลองเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	24
ตารางที่ 3.4	สภาวะการทำงานและลำดับในการทดลองของแต่ละชุดเฟือง .....	25
ตารางที่ 3.5	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดลอง .....	30
ตารางที่ 4.1	การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีมุมเอียงต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ.....	44
ตารางที่ 4.2	การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีมุมกดต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ.....	47
ตารางที่ 4.3	การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ..	50
ตารางที่ 4.4	การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A...	54
ตารางที่ 5.1	ผลการคำนวณพื้นที่สัมผัสของฟันเฟืองแต่ละชุดที่แรงบิดต่าง ๆ.....	80
ตารางที่ 5.2	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด A .....	81
ตารางที่ 5.3	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด B .....	82
ตารางที่ 5.4	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด C .....	82
ตารางที่ 5.5	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด D.....	83
ตารางที่ 5.6	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด E.....	84
ตารางที่ 5.7	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด F.....	85
ตารางที่ 5.8	พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด G .....	85
ตารางที่ 5.9	สรุปการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินของกฎดล.....	92
ตารางที่ 5.10	สรุปการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินที่ถูกปรับปรุงใหม่ .....	92
ตารางที่ ก.1	การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C .....	102
ตารางที่ ก.2	การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D.....	105
ตารางที่ ข.1	ผลการทดลองวัดแรงบิดในระบบของเฟืองชุด A - G .....	108
ตารางที่ ข.2	ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะไม่มีแรงบิด .....	108



ตารางที่ ข.30 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 170 N·m.....	122
ตารางที่ ข.31 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 228 N·m.....	123
ตารางที่ ข.32 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 43 N·m.....	123
ตารางที่ ข.33 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 130 N·m.....	124
ตารางที่ ข.34 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 176 N·m.....	124
ตารางที่ ข.35 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 218 N·m.....	125
ตารางที่ ข.36 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 42 N·m.....	125
ตารางที่ ข.37 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 68 N·m.....	126
ตารางที่ ข.38 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 133 N·m.....	126
ตารางที่ ข.39 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 220 N·m.....	127

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กลไกการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถล.....	2
รูปที่ 1.2 แรงที่กระทำบนพื้นเฟือง.....	3
รูปที่ 2.1 การขบกันของฟันเฟืองตรง.....	12
รูปที่ 2.2 อัตราส่วนกำลังสูญเสียต่อตำแหน่งการขบของฟันเฟืองตรง 1 คู่.....	14
รูปที่ 2.3 การคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรง.....	15
รูปที่ 2.4 แบบจำลองของเฟืองเฉียง.....	15
รูปที่ 2.5 อัตราส่วนกำลังสูญเสียต่อตำแหน่งขบของฟันเฟืองเฉียง 1 คู่.....	16
รูปที่ 2.6 การคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง.....	17
รูปที่ 2.7 พื้นี่หน้าสัมผัสของฟันเฟือง.....	19
รูปที่ 3.1 แผนผังชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back.....	21
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back.....	21
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาพื้นที่หน้าสัมผัสฟันเฟือง.....	26
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งตั้งกล้องเพื่อถ่ายรูปพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟือง.....	26
รูปที่ 3.5 แผนผังจำแนกประเภทกำลังสูญเสียในระบบชุดทดลอง.....	27
รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบเฟืองในการทดลองขณะไม่มีแรงบิด.....	28
รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบเฟืองในการทดลองขณะมีแรงบิด.....	29
รูปที่ 4.1 กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของเฟืองที่มีมุมฮีลิคซ์ต่างกัน.....	34
รูปที่ 4.2 กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของเฟืองที่มีมุมกดต่างกัน.....	34
รูปที่ 4.3 กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน.....	34
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด A.....	35
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด B.....	36
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด C.....	37
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด D.....	38
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด E.....	39
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด F.....	40
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด G.....	41

รูปที่ 4.11	อิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ.....	43
รูปที่ 4.12	อิทธิพลของมุมกุดต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ .....	46
รูปที่ 4.13	อิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ..	49
รูปที่ 4.14	การเปรียบเทียบแรงบิดของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A .....	52
รูปที่ 4.15	การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A .....	52
รูปที่ 4.16	การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A ....	53
รูปที่ 5.1	การเปรียบเทียบผลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60.....	58
รูปที่ 5.2	การเปรียบเทียบผลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin .....	59
รูปที่ 5.3	การเปรียบเทียบผลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley .....	60
รูปที่ 5.4	การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60 .....	61
รูปที่ 5.5	การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin .....	62
รูปที่ 5.6	การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley.....	62
รูปที่ 5.7	การเปรียบเทียบผลของการคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง	63
รูปที่ 5.8	แนวโน้มของกำลังสูญเสียจากการไหลต่อมุมฮิลิกซ์ .....	64
รูปที่ 5.9	ความยาวเส้นสัมผัสของเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ต่อตำแหน่งการขบ.....	64
รูปที่ 5.10	การเปรียบเทียบผลของมุมกุดต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60.....	66
รูปที่ 5.11	การเปรียบเทียบผลของมุมกุดต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin .....	67
รูปที่ 5.12	การเปรียบเทียบผลของมุมกุดต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley .....	68

รูปที่ 5.13	การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุกกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60.....	69
รูปที่ 5.14	การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุกกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin .....	69
รูปที่ 5.15	การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุกกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley .....	70
รูปที่ 5.16	การเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงที่มีมุกกดต่างกัน 1 คู่ฟัน.....	70
รูปที่ 5.17	การเปรียบเทียบผลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60.....	72
รูปที่ 5.18	การเปรียบเทียบผลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin .....	73
รูปที่ 5.19	การเปรียบเทียบผลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley .....	74
รูปที่ 5.20	การเปรียบเทียบแนวโน้มของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60.....	75
รูปที่ 5.21	การเปรียบเทียบแนวโน้มของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin .....	75
รูปที่ 5.22	การเปรียบเทียบอิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley .....	76
รูปที่ 5.23	ความยาวเส้นสัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน.....	76
รูปที่ 5.24	การต่อความยาวเส้นสัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน.....	77
รูปที่ 5.25	แนวทางการใช้พื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย.....	78
รูปที่ 5.26	ขั้นตอนการคำนวณพื้นที่สัมผัสอย่างง่ายของฟันเฟือง .....	79
รูปที่ 5.27	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีมุกอีลิคซ์ต่างกัน.....	86
รูปที่ 5.28	กำลังสูญเสียจากการไถลจากผลของมุกอีลิคซ์ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัส .....	87
รูปที่ 5.29	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีมุกกดต่างกัน .....	88
รูปที่ 5.30	กำลังสูญเสียจากการไถลจากผลของมุกกดที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัส .....	89
รูปที่ 5.31	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน.....	90

รูปที่ 5.32	กำลังสูญเสียจากการไหลจากผลของความกว้างหน้าพื้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัส .....	91
รูปที่ ก.1	การเปรียบเทียบแรงบิดของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C .....	100
รูปที่ ก.2	การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C .....	100
รูปที่ ก.3	การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C ....	101
รูปที่ ก.4	การเปรียบเทียบแรงบิดของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D .....	103
รูปที่ ก.5	การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D .....	103
รูปที่ ก.6	การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D .....	104



## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	ตำแหน่งเริ่มขบ
$B$	ตำแหน่งสิ้นสุดการขบ
$C_s$	แรงสถิตประเมน
$E$	Young's Modulus ของเฟืองขับ และเฟืองตาม
$F_a$	แรงตามแนวแกนเพลลา
$F_{n-n}$	แรงปฏิกิริยาบนฟันของเฟืองขับและเฟืองตามในทิศทางตามแนวเส้นการกระทำ
$F_r$	แรงตามแนวรัศมีของเฟือง
$F_s$	แรงสมมูลประเมน
$F_{t-t}$	แรงเสียดทานในแนวผิวสัมผัสของฟัน
$F_\beta$	ตัวแปรของแรงที่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของแรงที่รับภาระโดยตลับลูกปืน
$H_1$	กำลังเข้า
$H_2$	กำลังออก
$K$	จุดสัมผัสของฟันของเฟืองขับกับเฟืองตาม
$M_{b,load dep.}$	โมเมนต์แรงเสียดทานจากการกิ้งของตลับลูกปืนที่ขึ้นกับภาระ
$N$	ความเร็วรอบหมุน
$N_{input}$	ความเร็วรอบเพลลาขาเข้าระบบ
$N_1N_2$	เส้นแนวแรงกระทำ
$O_1$	จุดศูนย์กลางของเฟืองขับ
$O_1N_1$	รัศมีวงกลมฐานของเฟืองขับ
$O_2$	จุดศูนย์กลางของเฟืองตาม
$O_2N_2$	รัศมีวงกลมฐานของเฟืองตาม
$P$	จุดพิตช์
$P_{b,load dep.}$	กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระของตลับลูกปืน
$P_{b,load indep.}$	กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของตลับลูกปืน
$P_{input}$	กำลังขาเข้าระบบ
$P_{max}$	ความดันหน้าสัมผัสสูงสุด
$P_{mech}$	กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ หรือ กำลังสูญเสียทางกล
$P_{mesh}$	กำลังสูญเสียที่เกิดจากการขบส่งกำลังของเฟือง
$P_{rolling}$	กำลังสูญเสียจากการกิ้งของเฟือง
$P_{sliding}$	กำลังสูญเสียจากการไถลของเฟือง

$P_{spin}$	กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ หรือ กำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน
$P_{total}$	กำลังสูญเสียรวมในระบบชุดทดลอง
$P_w$	กำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศ
$P'$	กำลังสูญเสียของแต่ละชิ้นส่วนย่อย
$P'_{b,load dep.}$	กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระในตลับลูกปืน 1 ตัว
$P'_{mesh}$	กำลังสูญเสียที่เกิดจากการขบส่งกำลังของเฟือง 1 คู่
$P'_{rolling}$	กำลังสูญเสียจากการกลิ้งของเฟือง 1 คู่
$P'_{sliding}$	กำลังสูญเสียจากการไถลของเฟือง 1 คู่
$R$	ผลรวมรัศมีความโค้ง
$R_{12}$	แรงที่เฟืองขับกระทำกับเฟืองตาม ซึ่งมีทิศเบนออกจากเส้นแนวแรงกระทำ
$S$	ค่าความเรียบผิว
$T$	แรงบิด
$T_c$	แรงบิดในระบบชุดทดลอง
$T_{total}$	แรงบิดสูญเสียทั้งหมดของระบบ
$T_1$	แรงบิดที่เพลลาของเฟืองขับ
$T_2$	แรงบิดที่เพลลาของเฟืองตาม
$V_r$	ผลรวมของความเร็วการกลิ้ง
$V_s$	ความเร็วการไถลสัมพัทธ์
$W$	หน่วยภาระ
$Z$	จำนวนฟันของเฟือง
$b$	ความกว้างหน้าฟันเฟือง
$d_m$	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตลับลูกปืน
$f$	แรงเสียดทานในแนวแกนผิวสัมผัส
$f_1$	ค่าตัวประกอบไรมิตี ซึ่งขึ้นกับการออกแบบและภาระที่กระทำกับตลับลูกปืน
$m$	โมดูลของเฟือง
$m_g$	อัตราส่วนเฟือง
$m_n$	นอมัลโมดูลของเฟือง
$n$	ตำแหน่งการขบ
$nS$	จำนวนของฟันของเฟืองตรงย่อยในขณะที่กำลังขบอยู่ทั้งหมด
$n - n$	แนวแกนส่งกำลังของเฟือง
$p_b$	ระยะพิตช์ฐาน
$t - t$	แนวแกนที่ตั้งฉากกับแนวแกนส่งกำลังของเฟือง

$v$	ความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น
$v_k$	ความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น
$v_1$	ความเร็วที่จุดสัมผัสของเฟืองขับ
$v_2$	ความเร็วที่จุดสัมผัสของเฟืองตาม
$y$	ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดและขนาดของตลับลูกปืน
$z$	ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดและขนาดของตลับลูกปืน
$\alpha$	มุมของแรงกระทำที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นแนวแรงกระทำ
$\epsilon$	Poisson's Ratio ของเฟืองขับ และเฟืองตาม
$\mu$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$\rho$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น
$\Phi$	มุมกด
$\varphi$	อัตราส่วนกำลังสูญเสีย
$\varphi_{S1}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงย้อยคู่ที่ 1
$\varphi_{S2}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงย้อยคู่ที่ 2
$\varphi_{Sn}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงย้อยคู่ที่ n
$\varphi_{total}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวม
$\varphi_{Z1}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงคู่ที่ 1
$\varphi_{Z2}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงคู่ที่ 2
$\bar{\varphi}$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย
$\bar{\varphi}'$	อัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ยที่มีการสัมผัสไม่เต็มพื้นที่
$\Psi$	มุมฮิลิกซ์ของเฟืองเฉียง
$\omega$	ความเร็วเชิงมุมของเฟือง
$\omega_b$	ความเร็วเชิงมุมของตลับลูกปืน
$\omega_{input}$	ความเร็วเชิงมุมขาเข้าระบบ
$\omega_1$	ความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับ
$\omega_2$	ความเร็วเชิงมุมของเฟืองตาม

# บทที่ 1

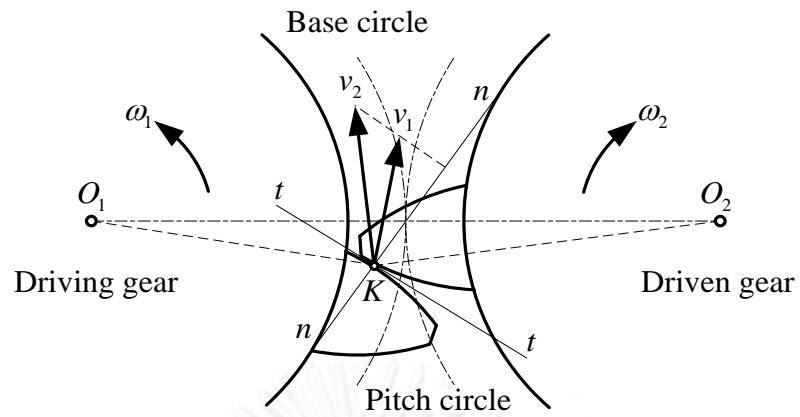
## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

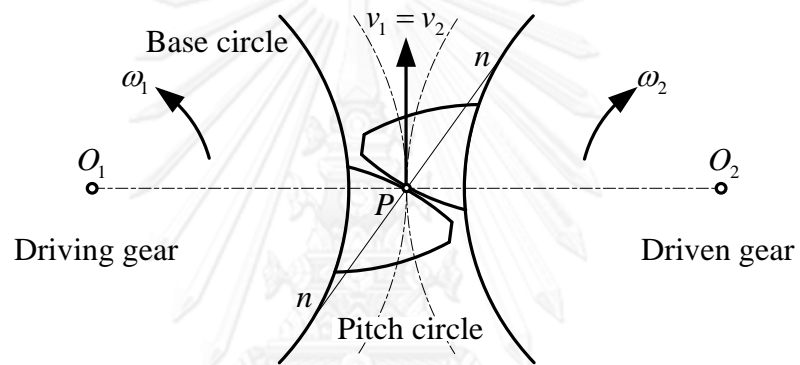
ปัญหาวิกฤตพลังงานและราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นมากในปัจจุบันทำให้การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นชิ้นส่วนกลหนึ่งในระบบส่งกำลังที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในงานต่าง ๆ อาทิ ในระบบส่งกำลังของรถยนต์ หรือเครื่องจักรกลการเกษตร รวมถึงเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าเฟืองแต่ละคู่จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังสูง แต่การใช้งานมักจะใช้เฟืองพร้อม ๆ กันหลาย ๆ ชั้น จึงทำให้กำลังสูญเสียในระบบเฟืองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การลดกำลังสูญเสียในคู่เฟืองส่งกำลังจึงเป็นพื้นฐานสำคัญอย่างหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรและลดการใช้เชื้อเพลิงลง นอกจากนี้เนื่องจากกำลังสูญเสียในระบบเฟืองจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน การลดกำลังสูญเสียในระบบเฟืองจึงช่วยลดความร้อนขณะทำงาน ช่วยยืดอายุการใช้งานของเฟืองส่งกำลัง และช่วยลดปริมาณการหล่อลื่นที่จำเป็นต้องใช้ให้น้อยลงได้

กำลังสูญเสียในท้องเฟืองส่งกำลังประกอบด้วยกำลังสูญเสียจากการไถล (sliding loss) กำลังสูญเสียจากการกลิ้ง (rolling loss) กำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศ (windage loss) กำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่น (churning loss) และกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืน (bearing loss) โดยรายละเอียดของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

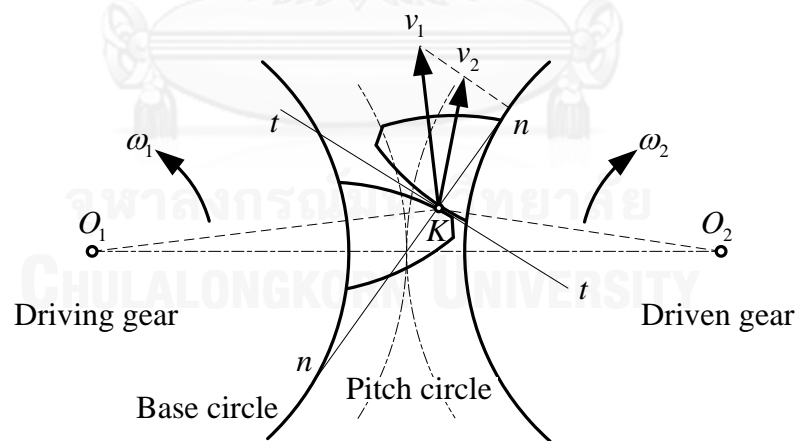
1. กำลังสูญเสียจากการไถล คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากการเสียดสีกันของฟันเฟืองระหว่างการขบ การเสียดสีเป็นผลมาจากความเร็วในแนวสัมผัสของฟันเฟืองที่จุดสัมผัสไม่เท่ากัน กลไกการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถลแสดงดังรูปที่ 1.1 จากรูปเฟือง  $O_1$  เป็นเฟืองขับ (driving gear) ส่งกำลังขับหมุนเฟือง  $O_2$  ซึ่งเป็นเฟืองตาม (driven gear) โดยจุด  $K$  เป็นตำแหน่งที่ฟันเฟืองขบกัน และจุด  $P$  เป็นตำแหน่งพิทช์ (pitch point) ความเร็วที่ตำแหน่งที่ฟันเฟืองขบกันของเฟืองขับคือ  $v_1$  และความเร็วของเฟืองตามคือ  $v_2$  ทิศทางของความเร็วทั้งสองจะตั้งฉากกับเส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลางไปยังตำแหน่งการขบ เมื่อพิจารณาความเร็วในตำแหน่งที่ฟันเฟืองขบกัน จากรูปจะพบว่าเวกเตอร์ความเร็วในแนวแกน  $n-n$  ของเฟืองทั้งสองตัวต้องมีค่าเท่ากันเพื่อให้ฟันเฟืองขับและฟันเฟืองตามสัมผัสกันตลอดช่วงการขบ และสามารถส่งกำลังได้อย่างสม่ำเสมอ หากขนาดของความเร็วไม่เท่ากันแล้ว เฟืองจะไม่สัมผัสกันตลอดช่วงเวลาที่ขบกันและเกิดการกระแทกขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ทิศทางของความเร็วในแนวแกน  $t-t$  จะมีขนาดที่ต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดการไถลและแรงเสียดทานเนื่องจากการไถลขึ้น



(ก) ตำแหน่งการขบก่อนถึงจุดพิตช์



(ข) การขบที่ตำแหน่งพิตช์ของฟันเฟือง

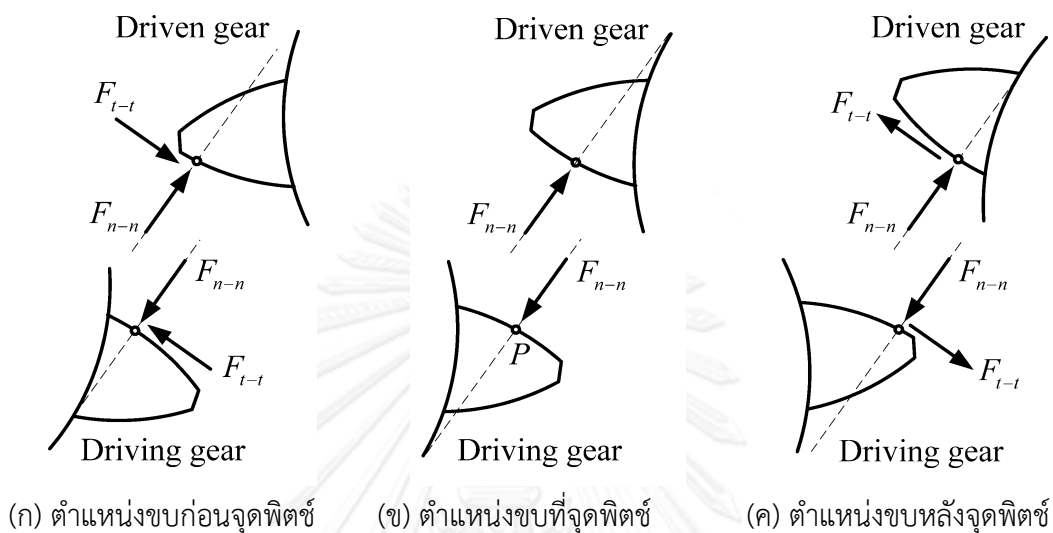


(ค) ตำแหน่งการขบหลังจุดพิตช์

รูปที่ 1.1 กลไกการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถล

รูปที่ 1.1(ก) (ข) และ (ค) แสดงตำแหน่งการขบก่อนถึงจุดพิตช์ ตำแหน่งขบที่จุดพิตช์ และ ตำแหน่งขบหลังจุดพิตช์ ตามลำดับ พบว่าความเร็วการไถลมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตำแหน่งการขบ เปลี่ยนไป ส่งผลให้กำลังสูญเสียในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าไม่คงที่ด้วย โดยอัตราเร็วที่จุดสัมผัสของเฟือง

ตามจะมีค่ามากกว่าค่าเฟืองขับในตอนแรก และเมื่อตำแหน่งขบเลยจุดพิตช์ไปแล้วอัตราเร็วของเฟืองขับจะมากกว่าเฟืองตาม นอกจากนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่งการขบห่างจากจุดพิตช์มากจะยังมีความเร็วการไถลมาก สำหรับที่จุดพิตช์ความเร็วสัมผัสของเฟืองทั้งคู่มีค่าเท่ากัน จึงไม่เกิดการไถลขึ้น



รูปที่ 1.2 แรงที่กระทำบนฟันเฟือง

รูปที่ 1.2(ก) (ข) และ (ค) แสดงลักษณะแรงที่กระทำบนฟันเฟืองที่ตำแหน่งการขบต่างกัน โดยเริ่มแสดงจากตำแหน่งที่ฟันเฟืองขบกันก่อนถึงจุดพิตช์ ตำแหน่งขบที่จุดพิตช์ และตำแหน่งขบหลังจุดพิตช์ ตามลำดับ โดยแรง  $F_{n-n}$  คือ แรงปฏิกิริยาบนฟันของเฟืองขับและเฟืองตามในทิศทางตามแนวเส้นการกระทำ (line of action) ส่วนแรง  $F_{t-t}$  คือ แรงเสียดทานในแนวผิวสัมผัสของฟัน หรือแนวแกนที่ตั้งฉากกับแนวเส้นของการกระทำ จากรูปทิศทางของแรงเสียดทานในช่วงเริ่มขบก่อนถึงจุดพิตช์และตำแหน่งขบที่เลยจุดพิตช์ไปจนถึงสิ้นสุดการขบจะมีทิศทางตรงกันข้ามกัน เนื่องจากทิศทางของความเร็วการไถลตรงข้ามกัน สำหรับที่จุดพิตช์ไม่มีแรงเสียดทานจากการไถลเนื่องจากไม่มีการไถลเกิดขึ้น

2. กำลังสูญเสียจากการกลิ้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่น โดยจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ภายในห้องเฟืองส่งกำลังถูกฟันเฟืองที่กำลังเคลื่อนที่เข้าไปขบกัน บีบอัด และเกิดความดันขึ้นทำให้มีแรงต้านทานจากการกลิ้งระหว่างชิ้นส่วนกลิ้ง (rolling element) พารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังสูญเสียจากการกลิ้ง คือ ความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นฟิล์มน้ำมันที่ถูกบีบอัดโดยเฟืองและการสัมผัสของฟันเฟืองคู่หนึ่ง ๆ จากงานวิจัยของ Michlin กับ Myunster [1] พบว่ากำลังสูญเสียจากการกลิ้งนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียจากการไถล เมื่อพิจารณา กำลังสูญเสียทั้งหมดตลอดช่วงขบของฟันแต่ละคู่

3. กำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศ เกิดจากเฟืองหมุนต้านอากาศภายในห้องส่งกำลัง กำลังสูญเสียชนิดนี้สามารถวัดหรือคำนวณได้ยาก โดยกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟือง ความหนาของเฟือง ความเร็วรอบหมุน ระบบหล่อลื่น อุณหภูมิ

และความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้เสนอสมการประเมินกำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศไว้หลายสมการ อาทิ สมการของ Dudley [2] Anderson กับ Loewenthal [3] และ Townsend [4] เป็นต้น จากงานวิจัยเหล่านี้พบว่าในกรณีที่เฟืองทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ และเฟืองมีขนาดเล็ก เช่น เฟืองในห้องส่งกำลังของรถยนต์ หรือในเครื่องจักรกลการเกษตร กำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศของเฟืองจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียทางกล [2-4]

4. กำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่นเป็นกำลังสูญเสียที่มีสาเหตุมาจากการที่เฟืองจมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น ทำให้เกิดการหมุนปั่น รวมถึงการเสียดทานของน้ำมันเพื่อหล่อลื่นเฟือง และตลับลูกปืนภายในห้องเฟือง กำลังสูญเสียชนิดนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วรอบหมุน ระดับน้ำมันหล่อลื่น ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น รูปร่างของฟันเฟือง และระดับความลึกของเฟืองที่จมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น ในกรณีของเฟืองที่ใช้ระบบการหล่อลื่นแบบฉีด (jet lubrication) ซึ่งไม่มีการจมของเฟืองในน้ำมันหล่อลื่น กำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าน้อยมาก และสามารถละทิ้งไปได้

5. กำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนในห้องเฟืองส่งกำลัง เกิดจากแรงเสียดทานในการกลิ้งของลูกปืนในตลับลูกปืน ซึ่งประกอบด้วยแรงเสียดทานจากการกลิ้งและการไถของลูกกลิ้งระหว่างลูกกลิ้งและรัง (cage) แรงเสียดทานในสารหล่อลื่นและการไถกับแผ่นกั้นฝุ่น โดยแรงเสียดทานในตลับลูกปืนจะส่งผลต่อปริมาณความร้อนหรืออุณหภูมิของตลับลูกปืนด้วย กำลังสูญเสียชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตลับลูกปืน ความเร็วใช้งาน คุณสมบัติและปริมาณของสารหล่อลื่น สมการกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนสามารถหาได้จากสมการที่เสนอโดย Harris [5]

จากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบเฟืองส่งกำลังจะมีกำลังสูญเสียในรูปแบบต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังลดลง กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในห้องเฟืองส่งกำลังที่อธิบายข้างต้นสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท ประเภทที่หนึ่ง คือ กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ หรือที่เรียกว่ากำลังสูญเสียทางกล ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการไถและกำลังสูญเสียจากการกลิ้ง ส่วนกำลังสูญเสียประเภทที่สอง คือ กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ กำลังสูญเสียที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศ และกำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจกำลังสูญเสียจากการไถของเฟืองส่งกำลัง เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสำหรับเฟืองขนาดเล็กทำงานที่ความเร็วไม่สูงมากนัก เช่น เฟืองในระบบส่งกำลังของรถยนต์ หรือเครื่องจักรกลการเกษตร เป็นต้น กำลังสูญเสียจากการไถนั้นมีค่ามากกว่ากำลังสูญเสียจากการกลิ้ง และการหมุนด้านอากาศของเฟืองส่งกำลัง [1-4] และมากกว่ากำลังสูญเสียซึ่งมาจากตลับลูกปืนมาก

## 1.2 ปรัชญารวบรวม

การศึกษากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบเฟืองส่งกำลังเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจมาเป็นเวลานาน มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาถึงกำลังสูญเสียและประสิทธิภาพในการส่งกำลังของเฟือง โดยการศึกษาของงานวิจัยต่าง ๆ นั้นสามารถแบ่งออกเป็น กลุ่มงานวิจัยที่ทำการทดลอง กลุ่มงานวิจัยที่สร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย และกลุ่มงานวิจัยที่ทำทั้งการทดลองและสร้างแบบจำลอง ในกลุ่มของการทดลองจะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อกำลังสูญเสีย ส่วน

ของการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองนั้นจะทำเพื่ออธิบายกลไกการเกิดกำลังสูญเสียเพื่อใช้ในการประเมินหรือออกแบบระบบเฟืองเพื่อประหยัดพลังงาน ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังสูญเสียและประสิทธิภาพในเฟืองส่งกำลังมีดังต่อไปนี้

กลุ่มงานวิจัยที่ทำการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟือง ได้แก่ งานวิจัยของ Haizuka และคณะ [6, 7] Petry-Johnson และคณะ [8] Vaidyanathan [9] และ Magalhaes และคณะ [10] งานวิจัยเหล่านี้ใช้ชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back และทำการทดลองที่สภาวะการทำงาน ได้แก่ แรงบิดและความเร็วรอบต่าง ๆ สำหรับ Haizuka และคณะ [6] ทดลองวัดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในการส่งกำลังของเฟืองตรง โดยได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ โมดูล มุมกด ความสูงของฟัน ความหนืดน้ำมันหล่อลื่น จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนืดน้ำมันที่มีความเหมาะสมเท่านั้นจึงจะทำให้ค่ากำลังสูญเสียมีค่าน้อยที่สุดได้ และพบว่าโมดูลมากกำลังสูญเสียเนื่องจากการไถลจะมากขึ้นตามไปด้วย และพบว่าค่ามุมกด 25 องศา มีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด นอกจากนี้ Haizuka และคณะ [7] ได้ทดลองวัดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในการส่งกำลังของเฟืองเฉียง โดยได้ศึกษาอิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิของฟันเฟือง จากผลการทดลองพบว่ากำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่อมุมฮิลิกซ์และความสูงของฟันเฟืองเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของฟันเฟืองเพิ่มสูงขึ้นตามกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน

Petry-Johnson และคณะ [8] ทดลองวัดกำลังสูญเสียและประสิทธิภาพทางกลในการส่งกำลังของเฟืองตรง และพารามิเตอร์ศึกษา ได้แก่ โมดูล จำนวนฟัน น้ำมันหล่อลื่น ความเรียบของผิวฟัน โดย Petry-Johnson และคณะ ทำการวัดกำลังสูญเสียทั้งในกรณีที่ไม่มีแรงบิด และในกรณีที่มีแรงบิด จากผลการทดลองพบว่าโมดูลและจำนวนฟันมีผลมากต่อกำลังสูญเสียของเฟืองตรง ส่วนความกว้างหน้าฟันไม่มีผลต่อกำลังสูญเสีย

Vaidyanathan [9] ทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง โดยได้ศึกษาถึงผลของโมดูล มุมกด และมุมฮิลิกซ์ ที่ความเร็วรอบ และภาระการทำงานต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า กำลังสูญเสียมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วรอบหมุนและแรงบิด ผลการทดลองพบว่ามุมฮิลิกซ์และโมดูลมากจะมีกำลังสูญเสียมาก แต่เฟืองเฉียงที่มีมุมกดมากจะมีกำลังสูญเสียน้อย นอกจากนี้ Vaidyanathan ได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ Xu และคณะ พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Magalhaes และคณะ [10] ศึกษาการส่งกำลังของเฟืองเฉียง โดยใช้ชุดทดสอบแบบ FZG machine โดยเฟืองเฉียงที่ใช้ทั้งหมดมีความกว้างหน้าฟัน 20 มิลลิเมตร มุมฮิลิกซ์ 15 องศา และระยะห่างระหว่างเพลลา 91.5 มิลลิเมตร โดยได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างฟันเฟือง และความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น รวมถึงสภาวะการทำงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 ชนิด ได้แก่ Mineral oil, PAO oil และ Ester oil พบว่าน้ำมันหล่อลื่น Mineral oil ทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากที่สุด และพบว่าเมื่อมุมกดมากและโมดูลมีค่าน้อยจะมีกำลังสูญเสียน้อย

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินกำลังสูญเสียในการส่งกำลังด้วยเฟือง งานวิจัยเหล่านี้สามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้มาจากวิธีต่าง ๆ ในการประเมินกำลังสูญเสีย ดังนี้ (1) กลุ่มงานวิจัยที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์



แรงเสียดทานคงที่ (2) กลุ่มงานวิจัยที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสูตรสำเร็จ (empirical formula) ซึ่งได้มาจากการทดลอง และ (3) กลุ่มงานวิจัยที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยใช้หลักการ EHL (elastohydrodynamic lubrication)

งานวิจัยที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ ได้แก่ งานวิจัยของ Michlin กับ Myunter [1] และ ชนัตต์ และคณะ [11] โดย Michlin กับ Myunter [1] สร้างแบบจำลองเพื่อประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสียในระหว่างการส่งกำลังของเฟืองตรงที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานจากการไถและการกลิ้งของฟันเฟือง โดยศึกษาจากแรงที่ฟันเฟืองขับเคลื่อนกระทำต่อฟันเฟืองตาม และคำนวณหาอัตราส่วนกำลังสูญเสียจากกำลังสูญเสียต่อกำลังขาเข้าในตำแหน่งการขบต่าง ๆ ของฟันเฟือง 1 คู่ สมการอัตราส่วนกำลังสูญเสียขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ มุมกด อัตราทด ตำแหน่งการขบ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน งานวิจัยนี้ใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ตลอดช่วงการขบและพบว่ากำลังสูญเสียจากการกลิ้งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น

ชนัตต์ และคณะ [11] เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการไถของเฟืองตรง โดยปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Michlin กับ Myunter [1] เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในกรณีที่ฟันเฟืองขบกันมากกว่า 1 คู่ เพื่อให้สอดคล้องกับการขบกันจริงของเฟืองตรง พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ โมดูล ความเร็วรอบ และแรงบิด นอกจากนี้ ชนัตต์และคณะ ได้เปรียบเทียบผลการประเมินกับผลการทดลองของ Petry-Johnson และคณะ พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยพบว่าเฟืองที่มีโมดูลใหญ่จะมีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองที่มีโมดูลเล็ก แต่ผลการประเมินกับผลการทดลองยังมีความแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมากต่อความแม่นยำในที่นี้ คือการเลือกใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ตลอดช่วงการขบตามที่มีงานวิจัยอื่นใช้มาก่อน และอาจยังไม่สอดคล้องกับเฟืองที่ใช้ในการทดลอง

จากงานวิจัยของ Michlin กับ Myunter และ ชนัตต์ และคณะ สามารถสรุปได้ว่าการเลือกใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นมีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง การใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นค่าคงที่ไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องได้ การเพิ่มความถูกต้องของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอาจทำได้โดยใช้สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระหว่างการขบคู่เฟืองที่มีผู้วิจัยอื่นได้เสนอไว้ [12-17] โดยผู้วิจัยเหล่านี้ได้เสนอสมการสำเร็จ (empirical formula) ที่ได้จากการนำผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยใช้ชุดทดลองประเภท twin-disc และนำผลการทดลองมาสร้างสมการ โดยสมการสำเร็จเหล่านี้ครอบคลุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ อาทิ ความเร็วผิวของเฟือง ความหนืดน้ำมันหล่อลื่น แรงบิด และความเร็รรอบ ทำให้มีความแม่นยำกว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่

งานวิจัยอื่นที่นำสมการสำเร็จไปใช้ในการประเมินกำลังสูญเสียจากแบบจำลองของเฟืองส่งกำลัง ได้แก่ งานวิจัยของ Anderson กับ Lowenthal [3], Terauchi และคณะ [18], Heingartner กับ Mba [19] และ Ratanasumawong และคณะ [20] โดย Anderson กับ Lowenthal ได้นำเสนอวิธีการหาค่ากำลังสูญเสียประเภทต่าง ๆ ของเฟืองตรงซึ่ง ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการไถ กำลังสูญเสียจากการกลิ้ง และกำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศของฟันเฟืองในระหว่างการขบ รวมถึงกำลังสูญเสียจากตัลลุปินด้วย กำลังสูญเสียจากการไถที่ตำแหน่งขบใด ๆ โดยคำนวณจากผลคูณของความเร็วจุดและแรงเสียดทาน สามารถหาได้จากผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและภาระแรงที่หน้าฟันเฟือง โดยใช้สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำเร็จของ Benedict กับ Kelly [14] และ

ได้คำนึงถึงการกระจายภาระแรงที่หน้าฟันเฟืองสำหรับกรณีที่ฟันเฟืองขบกัน 2 คู่ และใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีผลต่อกำลังสูญเสียในเฟืองส่งกำลัง ได้แก่ อัตราทด ความกว้างหน้าฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟือง และความหนืดน้ำมันหล่อลื่น รวมถึงความเร็วรอบ และแรงบิด เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองจากชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back พบว่ากำลังสูญเสียนั้นมีแนวโน้มสอดคล้องและใกล้เคียงกัน

Terauchi และคณะ [18] สร้างแบบจำลองกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานเพื่อศึกษาผลของการทำผิวสำเร็จและสภาวะการทำงานของเฟือง การคำนวณกำลังสูญเสียเลือกใช้การสมมุติค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ตลอดช่วงการขบ และใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelly [14] Terauchi พบว่าการสมมุติค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบคงที่ไม่มีประสิทธิภาพและแม่นยำเท่ากับการใช้สมการสำเร็จ เนื่องจากเป็นการสมมุติซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการขบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงและความเร็วการไถลในระหว่างการขบ นอกจากนี้ Terauchi และคณะ ยังได้ทำการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองของเฟืองที่ผ่านการทำผิวสำเร็จ 3 แบบ ได้แก่ Grinding, Hobbing และ Shaving พบว่ากำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานของวิธีการทำผิวสำเร็จแบบ Hobbing มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ Grinding ส่วน Shaving จะมีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด โดยผลการทดลองและผลจากแบบจำลองนั้นมีแนวโน้มสอดคล้องกัน

Heingartner กับ Mba [19] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียในการส่งกำลังของเฟืองเฉียง โดยพัฒนามาจากแบบจำลองกำลังสูญเสียในการส่งกำลังด้วยเฟืองตรงของ Anderson กับ Lowenthal [3] ในการคำนวณได้คำนึงถึงกำลังสูญเสียประเภทต่าง ๆ ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการไถล กำลังสูญเสียจากการกลิ้ง กำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศ และกำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่นด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองวัดหาค่ากำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานที่แรงบิดต่าง ๆ กัน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลการคำนวณกำลังสูญเสียจากแบบจำลองโดยใช้ชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back ผลการประเมินกับผลการทดลองพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์รูปร่างของฟันเฟือง

Ratanasumawong และคณะ [20] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการไถลในการส่งกำลังของเฟืองเฉียงโดยพัฒนามาจากแบบจำลองกำลังสูญเสียของเฟืองตรง โดยพิจารณาให้เฟืองเฉียงประกอบขึ้นจากเฟืองตรงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ระยะห่างระหว่างชั้นเท่า ๆ กัน และเอียงตามมุมฮิลิกซ์ การคำนวณใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำเร็จของนักวิจัยอื่น [12-17] พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ โมดูล มุมฮิลิกซ์ และมุมมกตที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ และเปรียบเทียบผลการประเมินกับผลการทดลองของ Vaidyanathan [9] พบว่าเฟืองที่มีโมดูลและมุมฮิลิกซ์มากมีกำลังสูญเสียมาก แต่เฟืองที่มีมุมมกตมากจะมีกำลังสูญเสียน้อย และกำลังสูญเสียเพิ่มตามแรงบิดและความเร็วที่เพิ่มขึ้น และผลจากการใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelly ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด

ถึงแม้ว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสูตรสำเร็จสามารถคำนวณกำลังสูญเสียได้ง่าย แต่ก็มีข้อจำกัดในการใช้สูตรสำเร็จ เนื่องจากต้องใช้งานในสภาวะการทดลองที่ใช้ในการสร้างสูตรสำเร็จนั้น ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดนี้จึงมีงานวิจัยบางชิ้น เช่น งานวิจัยของ Xu และคณะ [21, 22],

Britton และคณะ [23] และ Diab กับ Vexel [24] ที่ใช้หลักการของ EHL (elastohydrodynamic Lubrication) ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแทน

Xu และคณะ [21, 22] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียและประสิทธิภาพทางกลในการส่งกำลังด้วยเฟืองตรงและเฟืองเฉียง โดยแบบจำลองจะมีการวิเคราะห์หน้าสัมผัสของฟันเฟืองในระหว่างการขบและหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการขบ ในการคำนวณจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ การประยุกต์ใช้สมการสำเร็จที่ผู้วิจัยอื่นได้เสนอไว้ และหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยใช้หลักการ EHL นอกจากนี้ Xu และคณะ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการประเมินกับผลการทดลองของ Petry-Johnson และคณะ พบว่ามีความสอดคล้องกัน และพบว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางกลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ความเรียบของผิวฟัน ความหนืดน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิ มุมอีลิคซ์ มุมกุด โมดูล และอัตราส่วนการขบ เป็นต้น ส่วนความเร็วรอบและการปรับแนวของเพลลา (misalignment) มีผลต่อประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แรงบิดและความกว้างหน้าฟันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ

Britton และคณะ [23] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างผิวของฟันเฟืองโดยใช้หลักการ EHL และทำการทดลองเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานโดยใช้ชุดทดลองแบบ special four gear friction การทดลองทำที่ความเร็วรอบและแรงบิดต่าง ๆ Britton และคณะ ศึกษาผลของความเรียบผิวฟันเฟือง โดยทำการทดลองกับเฟืองที่มีการทำผิวฟันที่ต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ เฟืองที่ผ่านการเจียรไนผิวฟันแบบทั่วไปซึ่งมีความเรียบผิวเฉลี่ย 0.4 ไมโครเมตร และเฟืองที่มีการทำผิวแบบ superfinishing ที่มีความเรียบผิวเฉลี่ย 0.05 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าเฟืองที่มีการทำผิวแบบ superfinishing ซึ่งมีความเรียบผิวมากกว่าจะมีกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่ามีความสอดคล้องกันและสามารถประเมินกำลังสูญเสียได้อย่างแม่นยำ

Diab และคณะ [24] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานโดยใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากหลักการ EHL และเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากชุดทดลองแบบ twin disc พบว่ามีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้ Diab และคณะ ยังได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานจากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งคำนวณจากวิธีการต่าง ๆ กัน ได้แก่ การใช้ค่าคงที่ การใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelly [14] สมการสำเร็จของ Kelley กับ Lemanski [17] และการใช้หลักการ EHL ในการประเมินผลการเปรียบเทียบพบว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ที่เหมาะสม และการใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelly นั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลจากสมการสำเร็จของ Kelley กับ Lemanski นั้นมีความสอดคล้องกันแต่ประเมินแรงเสียดทานได้มากกว่าการทดลอง ส่วนการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการประเมินโดยใช้หลักการ EHL พบว่ามีความแม่นยำมากกว่า

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าหลักการ EHL สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ครอบคลุมสภาวะการทำงานที่หลากหลาย และมีความแม่นยำสูง แต่หลักการนี้ก็มีความยุ่งยากซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นการเลือกวิธีนี้ในการคำนวณจึงยังไม่เหมาะสมจะใช้ใน

การออกแบบเฟืองในทางปฏิบัติ ถึงแม้งานวิจัยของ Diab และคณะ พบว่าหลักการ EHL มีความแม่นยำมากกว่าการใช้สมการสำเร็จหรือการใช้ค่าคงที่ก็ตาม แต่การเลือกใช้สมการสำเร็จหรือค่าคงที่ที่เหมาะสมก็สามารถได้ผลลัพธ์ที่ดีเช่นเดียวกัน อาทิ งานวิจัยของ Anderson กับ Lowenthal [3] และ Terauchi และคณะ [18]

สำหรับห้องปฏิบัติการออกแบบเครื่องจักรกลเพื่อการผลิตได้ศึกษากำลังสูญเสียจากการไถล โดยทำการทดลองและสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย งานวิจัยของชาคริต [25] ได้ศึกษากลไกการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถลในการส่งกำลังด้วยเฟืองตรง โดยได้ศึกษาจากแบบจำลองและทำการทดลอง สำหรับแบบจำลองจะปรับปรุงวิธีการประเมินของ Michlin กับ Myunster [1] และใช้สมการประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ กันในการคำนวณ [12-16] ส่วนของการทดลองนั้นได้จัดสร้างชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back พารามิเตอร์ของคู่เฟืองตรงที่พิจารณา ได้แก่ มุมกด โมดูล อัตราทด ความเร็วรอบหมุน และแรงบิด ผลการประเมินโดยใช้แบบจำลองและผลการทดลองพบว่า เฟืองที่มีโมดูลใหญ่มีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองที่มีโมดูลเล็ก ผลของการศึกษามุมกดหน้าฟันพบว่ากำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น เมื่อมุมกดหน้าฟันลดลง และคู่เฟืองที่มีอัตราทดมากมีกำลังสูญเสียมากกว่าคู่เฟืองที่มีอัตราทدن้อย โดยกำลังสูญเสียมียค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบและแรงบิด เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของกำลังสูญเสียที่ประเมินได้จากแบบจำลองและกำลังสูญเสียจากการทดลองพบว่าแนวโน้มสอดคล้องกัน

ภูวดล [26] ศึกษาการสูญเสียในการส่งกำลังของเฟืองเฉียง โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง ด้วยการปรับปรุงวิธีการประเมินจากแบบจำลองของชนัตต์ [11] และคำนวณโดยใช้สมการประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ [12-16] และทดลองวัดกำลังสูญเสียโดยใช้ชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ มุมกด มุมฮิลิกซ์ โมดูล ความกว้างหน้าฟัน ความเร็วรอบ และแรงบิด ผลการประมาณจากแบบจำลองพบว่าเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์มากมีกำลังสูญเสียมาก เฟืองเฉียงที่มีมุมกดมากมีกำลังสูญเสียน้อย เฟืองเฉียงที่มีความกว้างหน้าฟันมากมีกำลังสูญเสียมากขึ้นเล็กน้อย และเฟืองเฉียงที่มีโมดูลมากมีกำลังสูญเสียมาก การเปรียบเทียบแนวโน้มของกำลังสูญเสียจากการทดลองและกำลังสูญเสียจากแบบจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกันเฉพาะผลของของ มุมกด และโมดูล แต่สำหรับผลของมุมฮิลิกซ์และความกว้างหน้าฟันนั้นยังมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นพบว่าสำหรับผลของมุมกดนั้น งานวิจัยของ Haizuka และคณะ [6] พบว่ามุมกด 25 องศา เป็นมุมกดที่เหมาะสมโดยมีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด แต่งานวิจัยของ Vaidyanathan [9] Magalhaes และคณะ [10] ชาคริต [25] และภูวดล [26] ซึ่งพบว่าค่ามุมกดมากกำลังสูญเสียจะมีค่าน้อย สำหรับผลของมุมฮิลิกซ์ งานวิจัยของ Haizuka และคณะ [7] และ Vaidyanathan [9] พบว่ามุมฮิลิกซ์มากจะส่งผลให้กำลังสูญเสียมาก ส่วนผลการทดลองจากงานวิจัยของภูวดล [26] กลับพบว่ามุมฮิลิกซ์มากมีกำลังสูญเสียน้อย แต่ผลการประเมินจากแบบจำลองของภูวดลนั้นกลับตรงกันข้าม โดยผลจากแบบจำลองของภูวดลมีแนวโน้มสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Haizuka และคณะ และ Vaidyanathan และสำหรับผลการทดลองความกว้างหน้าฟันของเฟืองตรงในงานวิจัย Petry-Johnson และคณะ [8] พบว่าไม่มีผลต่อกำลังสูญเสีย แต่ผลการทดลองเฟืองเฉียง

ในงานวิจัยของภูวดล [26] พบว่าความกว้างหน้าฟันมีผลต่อกำลังสูญเสียซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลจากแบบจำลองพบว่าไม่สอดคล้องกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าความกว้างหน้าฟันมากมีกำลังสูญเสียมาก ส่วนผลจากแบบจำลองนั้นกลับสวนทางกัน อย่างไรก็ตามจำนวนการทดลองความกว้างหน้าฟันของเฟืองเฉียงที่เสนอโดยภูวดลนั้นยังน้อยเกินไปจึงไม่สามารถบอกแนวโน้มที่ชัดเจน

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของฟันเฟืองที่มีต่อกำลังสูญเสียต่อเนื่องจากงานวิจัยของชาคริต [25] และ ภูวดล [26] โดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่ยังไม่ชัดเจน ได้แก่ มุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟันเฟือง โดยทำการทดลองใหม่และเพิ่มพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของฟันเฟืองจากเดิมที่ทำการทดลองแค่ 2 พารามิเตอร์ เพิ่มเป็น 3 พารามิเตอร์

นอกจากนี้ จะทำการศึกษาผลของพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองในระหว่างการขบจริง เนื่องจากพบว่าพื้นที่หน้าสัมผัสนั้นมีส่วนสำคัญต่อการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองของชาคริตและภูวดลนั้นจะตั้งสมมุติฐานให้การสัมผัสของฟันเฟืองเป็นการสัมผัสเต็มฟัน อย่างไรก็ตามฟันอาจจะไม่ได้สัมผัสเต็มฟันก็ได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ภาระที่ฟันเฟืองมีค่าน้อย หากเกิดกรณีที่ฟันไม่สัมผัสเต็มฟันแล้ว จะทำให้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดการขบเปลี่ยนแปลงไป และส่งผลให้ความยาวของเส้นสัมผัสภาระที่ฟันเฟืองรับตลอดแนวเส้นสัมผัสและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นหากไม่ทราบพื้นที่การสัมผัสที่แท้จริงแล้วก็ทำให้ไม่สามารถประเมินกำลังสูญเสียได้อย่างถูกต้อง ผลของพื้นที่สัมผัสของฟันเฟืองในขณะขบจริงจึงมีความสำคัญและอาจสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองให้ใกล้เคียงสภาวะการทำงานจริงได้

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่มีผลต่อกำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟืองตรงและเฟืองเฉียง

1.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์ผลของหน้าสัมผัสที่มีต่อกำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟืองตรงและเฟืองเฉียง

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่ศึกษา ได้แก่ มุมฮิลิกซ์ มุมกด ความกว้างหน้าฟัน ความเร็วรอบ และแรงบิด

1.4.2 ศึกษาผลของหน้าสัมผัสที่เกิดจากการขบกันของฟันเฟืองตรงและเฟืองเฉียงที่แรงบิดต่าง ๆ โดยวิธีการทาสีที่หน้าสัมผัส

1.4.3 เปรียบเทียบผลการวัดกำลังสูญเสียกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยภูวดล รวมถึงพิจารณาถึงผลของการสัมผัสหน้าฟันเฟืองประกอบเพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงแบบจำลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจกลไกการเกิดกำลังสูญเสียในระบบส่งกำลังของเฟือง และพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่มีผลต่อกำลังสูญเสีย

1.5.2 ทราบผลที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองตรงและเฟืองเฉียง

1.5.3 สามารถยืนยันผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตต่าง ๆ ที่มีต่อกำลังสูญเสียจากการไหลได้ถูกต้องยิ่งขึ้น เนื่องจากการทดลองที่เพิ่มพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตเพิ่มมากขึ้น

1.5.4 ทราบผลของการสัมผัสหน้าฟันเฟืองในสภาวะการทำงานจริงซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

## 1.6 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ ประเภทของกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบเฟืองส่งกำลัง และปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้



ของฟัน (face width) ขนานกับแกนเพลลา และจะเห็นแนวสัมผัสเป็นจุดเมื่อพิจารณาจากทิศขนานแกนเพลลา เพราะฉะนั้นแรงที่กระทำจึงสามารถพิจารณาเป็นแรงและปัญหาใน 2 มิติได้ ในรูปที่ 2.1 ฟันเฟืองสัมผัสกันที่จุด  $K$  ส่วนอัตราส่วนกำลังสูญเสีย  $\varphi$  สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างผลต่างของกำลังเข้า  $H_1$  กับกำลังออก  $H_2$  ต่อกำลังเข้า  $H_1$  ดังสมการ

$$\varphi = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (2.1)$$

กำลังเข้าและกำลังออกสามารถหาได้จากผลคูณของแรงบิด  $T$  กับความเร็วรอบหมุน  $\omega$  ของแต่ละเฟือง ดังนั้นจากรูปที่ 2.1 สามารถหาลำดับเข้าและลำดับออกได้ดังนี้ [25]

$$H_1 = T_1 \omega_1 = R_{12} \cdot \overline{O_1 F_1} \cdot \cos(\Phi + \alpha) \cdot \omega_1 \quad (2.2)$$

$$H_2 = T_2 \omega_2 = R_{12} \cdot \overline{O_2 F_1} \cdot \cos(\Phi + \alpha) \cdot \omega_2 \quad (2.3)$$

แทนสมการที่ (2.2) และ (2.3) ลงในสมการที่ (2.1) จะสามารถหาอัตราส่วนกำลังสูญเสียได้ดังสมการ

$$\varphi = \frac{-n \cdot \mu \cdot \tan \Phi \cdot (1 + m_g)}{1 - (n + 1) \cdot \mu \cdot \tan \Phi} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการไถลของฟันเฟือง

$m_g$  คือ อัตราทดเฟืองซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนฟันของเฟืองตามต่อจำนวนฟันของเฟืองขับ

$n$  คือ อัตราส่วน  $\overline{KP}/\overline{N_1P}$  ซึ่งแสดงตำแหน่งการขบเทียบกับระยะ  $\overline{N_1P}$

รายละเอียดการจัดรูปสมการสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิง [25]

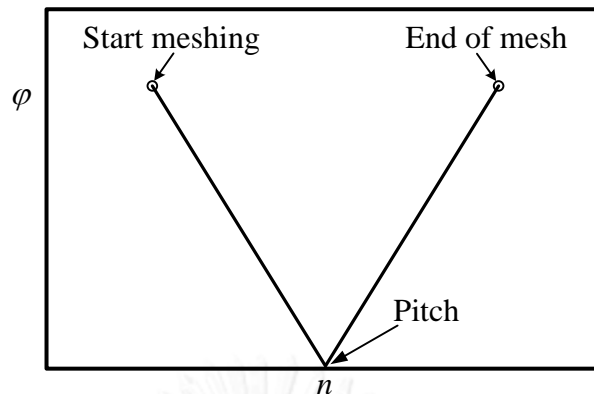
เนื่องจากทิศทางของความเร็วที่ตำแหน่งขบของเฟืองขับและเฟืองตามจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งการขบ [25] และทำให้ทิศของแรงเสียดทานเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งขบไปด้วย ดังนั้นต้องแทนเครื่องหมายของตัวแปรในสมการที่ (2.4) ให้ถูกต้องดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแทนเครื่องหมายสำหรับสมการ (2.4)

Parameter	$N_1P$	$PN_2$
$\Phi$	+	-
$n$	-	+

เมื่อนำอัตราส่วนกำลังสูญเสียจากสมการที่ (2.4) มาเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการขบ โดยสมมุติให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่ จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 2.2 จากรูปพบว่าตำแหน่งที่ห่างจากจุดพิตช์ไป เช่น ตำแหน่งเริ่มขบหรือตำแหน่งสิ้นสุดการขบจะมีอัตราส่วนกำลังสูญเสียมาก แต่ที่ตำแหน่งจุดพิตช์จะมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่าไม่มีการไถลระหว่างฟัน





รูปที่ 2.2 อัตราส่วนกำลังสูญเสียต่อตำแหน่งการขบของฟันเฟืองตรง 1 คู่

อัตราส่วนกำลังสูญเสียที่หาได้จากสมการที่ (2.4) และแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากการไถลกันของฟันเฟืองเพียงคู่เดียว และการส่งกำลังเกิดโดยฟันคู่นี้เพียงคู่เดียวเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วในแต่ละช่วงเวลาเฟืองจะขบกันมากกว่า 1 ฟัน ซึ่งแสดงได้โดยอัตราส่วนการสัมผัส (contact ratio) ที่มีค่ามากกว่า 1 เสมอ ซึ่งในกรณีของเฟืองตรงมักมีค่าอัตราส่วนการขบอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 1.8 อัตราส่วนการขบนี้หมายความว่าในบางขณะเฟืองอาจจะขบกันเพียงแค่ฟันเดียว และในบางเวลาเฟืองจะขบกันสองฟัน ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนกำลังสูญเสียจึงต้องคิดเป็นกำลังสูญเสียรวมเพื่อให้สอดคล้องกับการขบกันจริงของฟันเฟือง รูปที่ 2.3(ก) แสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการขบกันของฟันเฟืองแต่ละคู่ ตามลำดับการขบที่ตำแหน่งการขบต่าง ๆ ช่วงกราฟที่มีเพียงเส้นเดียวหมายถึงในขณะนั้นมีเฟืองขบกันเพียงคู่ฟันเดียว ส่วนช่วงกราฟที่ซ้อนกันหมายถึงในขณะนั้นฟันเฟืองมีการขบกัน 2 คู่ฟัน จากงานวิจัยของชาคริต [25] อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมของเฟืองตรงในขณะที่ยานขบกัน 2 คู่ และสมมุติให้ฟันทั้ง 2 คู่ ส่งกำลังเท่ากัน สามารถหาได้ดังสมการ

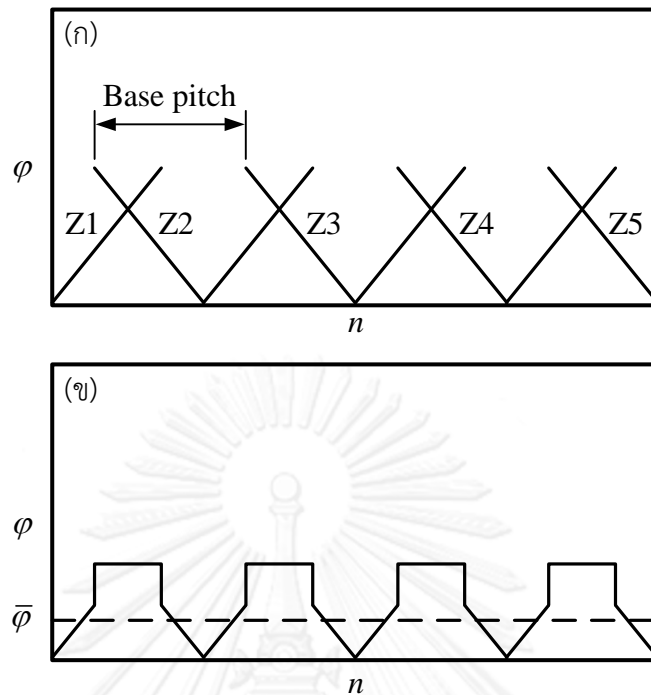
$$\varphi_{total} = \frac{\varphi_{Z1} + \varphi_{Z2}}{2} \quad (2.5)$$

โดย ตัวห้อย  $Z1$  และ  $Z2$  หมายถึงฟันคู่ที่ 1 และฟันคู่ที่ 2 ตามลำดับ

จากสมการที่ (2.5) จะพบว่าเมื่อฟันเฟืองทั้งสองคู่ส่งกำลังเท่ากัน ในขณะที่ฟันขบกัน 2 คู่ ซ้อน อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมคิดเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ยของฟันทั้ง 2 คู่ ดังนั้นอัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันเฟืองแต่ละคู่ในรูปที่ 2.3(ก) จึงสามารถเขียนอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข) จากรูปพบว่าขณะที่ฟันขบกัน 2 คู่ จะเป็นช่วงที่มีกำลังสูญเสียมาก ส่วนที่จุดพีทช์จะไม่มีกำลังสูญเสียเลยเนื่องจากไม่เกิดการไถลของฟันเฟือง สำหรับเส้นประแสดงถึงขนาดของอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย  $\bar{\varphi}$  ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{p_b} \int_0^{p_b} \varphi \, dn \quad (2.6)$$

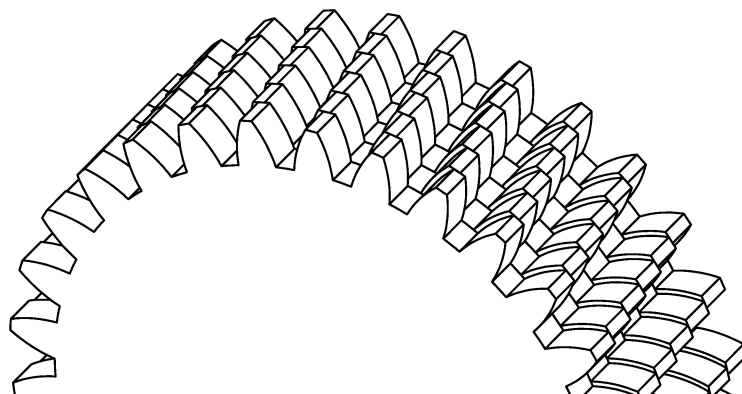
โดย  $p_b$  คือ ระยะพิทช์ฐาน (base pitch)



รูปที่ 2.3 การคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรง

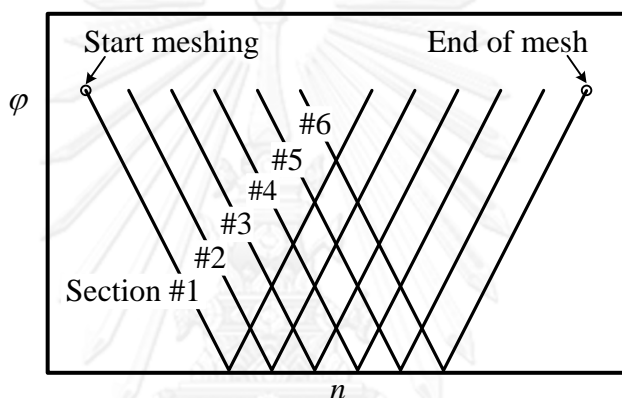
## 2.2 แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง

แรงระหว่างการขบของเฟืองเฉียงสามารถแบ่งเป็นแรงในแนวแกนและแรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกน แรงในแนวแกนไม่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียเพราะในขณะที่เฟืองเฉียงทำงานเฟืองไม่มีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน มีแค่แรงในแนวแกนตั้งฉากเท่านั้นที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสีย ดังนั้นกำลังสูญเสียจึงสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีของเฟืองตรง ด้วยเหตุนี้แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงจึงสามารถพิจารณาให้เฟืองเฉียงประกอบขึ้นจากเฟืองตรงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ แบบขั้นบันได โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่า ๆ กัน และเอียงตามมุมฮีลิคซ์ (helix angle) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อให้เฟืองเฉียงประกอบขึ้นจากเฟืองตรงน้อยมากยิ่งขึ้นก็จะทำให้ชุดเฟืองนี้มีลักษณะคล้ายกับเฟืองเฉียงมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของเฟืองเฉียง

จากแนวคิดข้างต้นจึงสามารถประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงได้โดยพิจารณาเช่นเดียวกับกรณีเฟืองตรงขบกัน สมการที่ (2.4) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองตรงจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงได้ สำหรับเฟืองเฉียงซึ่งถูกจำลองให้ประกอบด้วยเฟืองตรงย่อย 6 เฟือง ประกอบกันดังรูปที่ 2.4 จะสามารถประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง 1 คู่ ดังรูปที่ 2.5 โดยเส้นอัตราส่วนกำลังสูญเสีย 1 เส้นแสดงกำลังสูญเสียของเฟืองตรงย่อย 1 คู่ขบกัน เส้นแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียนี้จะวางเรียงเยื้องกันตามตำแหน่งการขบของเฟืองตรงย่อยที่เอียงตามมุมฮีลิคซ์ หลักการก็คือเมื่อเฟืองตรงย่อยคู่ที่ 1 เริ่มขบ (start meshing) แล้วเฟืองคู่ต่อไปก็จะขบตามเข้ามาตามจังหวะการขบไปเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดการขบที่ตำแหน่งสิ้นสุดการขบ (end of mesh) ของเฟืองตรงย่อยคู่ที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อัตราส่วนกำลังสูญเสียต่อตำแหน่งขบของฟันเฟืองเฉียง 1 คู่

ทำนองเดียวกับกรณีของเฟืองตรง เฟืองเฉียงมักมีค่าอัตราส่วนการขบอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 อัตราส่วนการขบนี้หมายความว่าในบางขณะเฟืองอาจจะขบกันเพียงแค่สองคู่ฟัน และในบางเวลาเฟืองจะขบกันสามคู่ฟัน ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนกำลังสูญเสียของคู่เฟืองจึงต้องคิดค่ารวม

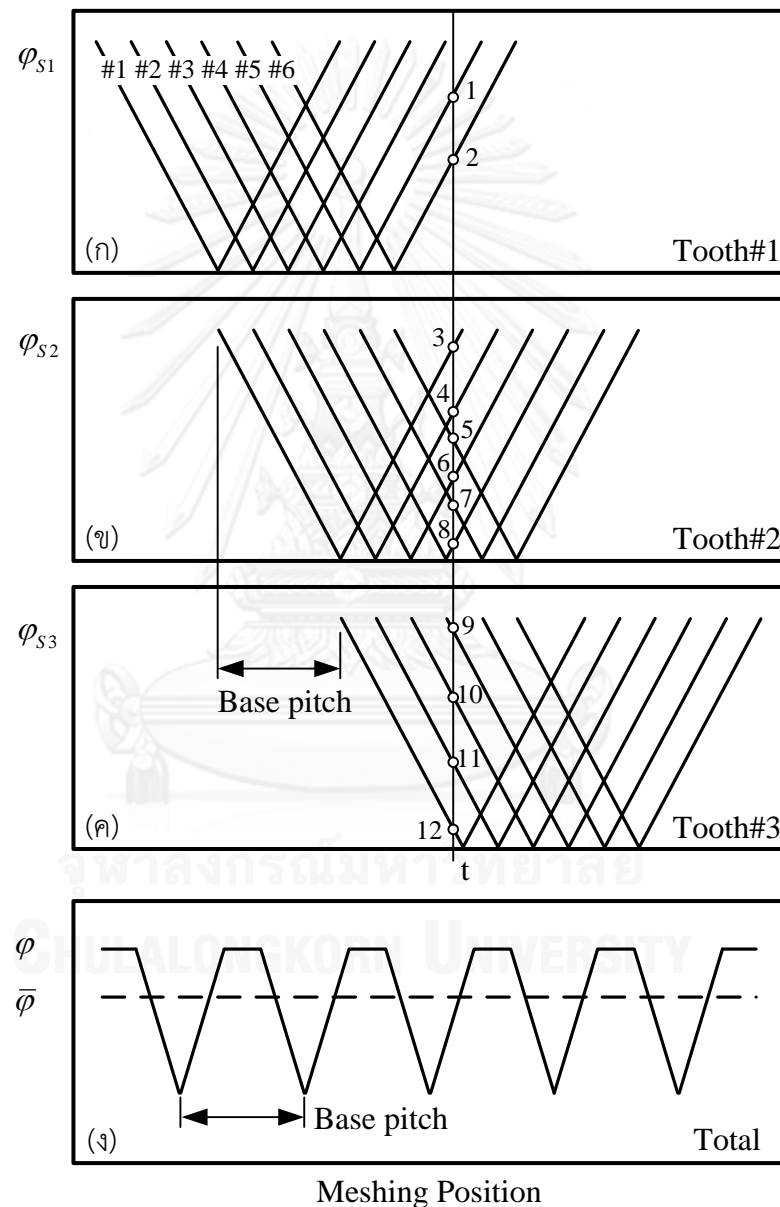
รูปที่ 2.6(ก) (ข) และ (ค) แสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันเฟืองเฉียงคู่ที่ 1 ถึงคู่ที่ 3 ตามลำดับ โดยช่วงเวลาเริ่มขบของฟันแต่ละคู่จะห่างกัน 1 พิตช์ฐาน (base pitch) ช่วงเวลาที่กราฟซ้อนกันหมายถึงในขณะนั้นฟันเฟืองเฉียงมีการขบกันมากกว่า 1 ฟัน จากรูปที่ 2.6(ก) (ข) และ (ค) จะสังเกตเห็นได้ว่าที่เวลา  $t$  ชุดเฟืองคู่ที่ 1 มีการขบ 2 ฟันเฟืองย่อย แต่ชุดเฟืองคู่ที่ 2 มีการขบถึง 6 ฟันเฟืองย่อย และชุดเฟืองคู่ที่ 3 มีการขบกัน 4 ฟันเฟืองย่อย ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองจึงต้องคิดค่ารวมในแต่ละช่วงเวลา เมื่อสมมติให้ภาระที่ฟันเฟืองแต่ละฟันรับกระจายสม่ำเสมอบนเส้นสัมผัส (line of contact) จะสามารถหาอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมของเฟืองเฉียง ซึ่งสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยกำลังสูญเสียของแต่ละเฟืองตรงย่อย ทำนองเดียวกับสมการที่ (2.5) ดังสมการ

$$\varphi_{total} = \frac{(\varphi_{s1} + \varphi_{s2} + \dots + \varphi_{sn})}{nS} \quad (2.7)$$

โดย  $\varphi_{s1}$ ,  $\varphi_{s2}$ , ..., และ  $\varphi_{sn}$  เป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันของเฟืองตรงย่อยคู่ที่ 1, 2, ..., และ  $n$  ที่ขบอยู่ตามลำดับ วิธีการสร้างสมการโดยละเอียดแสดงไว้ในงานวิจัยของภูวดล [26]

รูปที่ 2.6(ง) แสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวม ส่วนเส้นประคืออัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย

นอกจากนี้จากงานวิจัยของภวตลยังพบอีกว่าควรแบ่งเฟืองเฉียงเป็นเฟืองตรงย่อยที่มีจำนวนมากกว่า 36 ชุดเฟืองจึงจะทำให้ผลการคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียจากแบบจำลองมีความแม่นยำไม่ว่าเฟืองที่คำนวณจะมีพารามิเตอร์รูปร่างเป็นแบบใดก็ตาม และสำหรับขนาดของอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย  $\bar{\varphi}$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.6) เช่นเดียวกับในกรณีของเฟืองตรง



รูปที่ 2.6 การคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง

### 2.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง

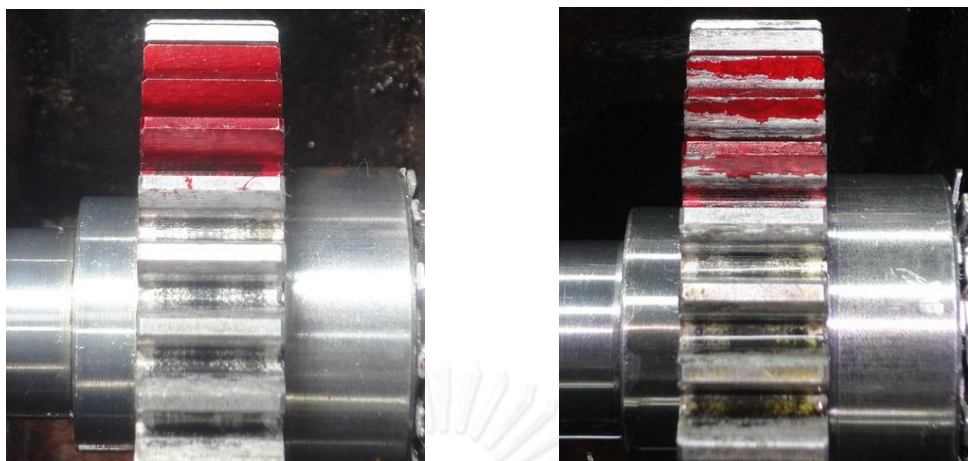
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้คำนวณในแบบจำลองคำนวณได้จากสมการสำเร็จที่ผู้วิจัยอื่นได้เสนอไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยสมการเหล่านี้ได้จากการทดลองโดยใช้ชุดทดลองประเภท twin-disc ด้วยการประยุกต์ใช้พื้นผิวสัมผัสอย่างง่าย เช่น ผิวทรงกระบอกคู่ เพื่อทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ สำหรับข้อมูลที่วัดได้จะถูกจัดให้อยู่ในรูปของสมการสำเร็จ [12-14] สมการเหล่านี้ขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความหนืดเชิงจลศาสตร์และพลศาสตร์ (kinematic and dynamic viscosities) ของน้ำมันหล่อลื่น  $\nu_k$  และ  $\nu$ , ความเร็วการไถลสัมพัทธ์ (relative surface sliding velocity)  $V_s$ , ผลรวมของความเร็วการกลิ้ง (sum of the rolling velocities)  $V_r$ , ผลรวมรัศมีความโค้ง (combined radius of curvature)  $R$ , หน่วยภาระ (unit normal load)  $W$ , ความดันหน้าสัมผัสสูงสุด (maximum contact pressure)  $P_{max}$ , และค่าความเรียบผิว (surface roughness parameter)  $S$

ตารางที่ 2.2 สมการสำเร็จสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

Published author	Empirical formula	Reference
ISO TC60	$\mu = 0.12[WS / (RV_r\nu)]^{0.25}$	[12]
Misharin	$\mu = 0.325[V_s V_r \nu_k]^{-0.25}$	[13]
Benedict and Kelley	$\mu = 0.0127 \left[ \frac{50}{50 - S} \right] \text{Log}_{10} \left[ \frac{3.17(10)^8 W}{\nu V_s V_r^2} \right]$	[14]

### 2.4 ปัจจัยที่ทำให้การประเมินกำลังสูญเสียต่างจากผลการทดลองจริง

จากผลการประเมินจากแบบจำลองของทั้งชาคริตและภูวดลนั้น ถึงแม้ว่าผลการประเมินในหลาย ๆ กรณีจะได้ผลสอดคล้องกัน ในบางกรณีก็ทำนายได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกับผลการทดลอง เช่น ผลของมุมฮีลิกซ์และความกว้างหน้าฟัน ปัจจัยหนึ่งที่น่าจะมีผลสำคัญทำให้การประเมินและการทดลองแตกต่างกันคือพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟือง เนื่องจากแบบจำลองของชาคริตและภูวดลนั้น สมมุติว่าฟันเฟืองสัมผัสกันเต็มหน้าฟันในระหว่างช่วงการขบ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาศึกษาการสัมผัสฟันเฟืองโดยการทาสีที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.7 โดยรูปที่ 2.7(ก) แสดงสีที่ทา ก่อนการทดลอง และ (ข) แสดงสีที่ยังติดอยู่หลังการทดลอง จากรูปพบว่าในการทำงานจริงเฟืองอาจจะไม่ได้สัมผัสกันเต็มหน้าฟัน โดยการสัมผัสอาจขึ้นกับทั้งพารามิเตอร์รูปร่างและภาระที่กระทำต่อหน้าฟันเฟือง การศึกษาศึกษาการสัมผัสฟันเฟืองส่วนนี้สามารถใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้ในประเด็นต่อไปนี้



(ก) ก่อนการทดลอง

(ข) หลังการทดลอง

รูปที่ 2.7 พื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟือง

2.4.1 การประมาณตำแหน่งเริ่มขบและสิ้นสุดการขบ โดยแบบจำลองเดิมใช้ตำแหน่งเริ่มและสิ้นสุดการขบตามทฤษฎีซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริง โดยดูได้จากรูปถ่ายซึ่งอาจจะยังมีสีติดที่บริเวณฐานหรือปลายฟันเฟือง ซึ่งแสดงว่าเฟืองอาจไม่เกิดการขบกันซึ่งหากประเมินกำลังสูญเสียโดยคิดจากตำแหน่งทางทฤษฎีแล้ว แบบจำลองก็จะประเมินกำลังสูญเสียได้มากเกินไป

2.4.2 การประมาณการรับภาระของฟันเฟือง โดยแบบจำลองเดิมได้ประมาณให้ภาระที่เฟืองรับแปรผันโดยตรงกับความยาวสัมผัส ซึ่งจะส่งผลต่อการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในกรณีที่การสัมผัสไม่เป็นการสัมผัสแบบเต็มฟัน ความยาวเส้นสัมผัสและภาระที่เฟืองรับจะเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเปลี่ยนไปด้วย หากไม่ทราบการสัมผัสที่แท้จริงจะไม่สามารถประมาณค่าภาระและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ถูกต้อง

จากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าการศึกษาถึงการสัมผัสของหน้าฟันเฟืองมีความสำคัญมากอย่างมากต่อการศึกษากลไกการขบของเฟืองและการประเมินกำลังสูญเสียของเฟือง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกศึกษาถึงผลของหน้าสัมผัสของฟันเฟือง

## 2.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง โดยอธิบายถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสีย และการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมของเฟือง และการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการสำเร็จ นอกจากนี้ยังได้ชี้ให้เห็นถึงผลของการสัมผัสของหน้าฟันเฟืองที่ทำให้การประเมินกำลังสูญเสียต่างจากผลการทดลองจริง

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back ซึ่งใช้ในการศึกษานี้และหลักการทำงานวิธีการทดลอง ชุดเฟืองที่ใช้ในการทดลอง น้ำมันหล่อลื่น สภาพที่ทดลอง รวมถึงวิธีการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียจากการไหลจากการทดลอง

#### 3.1 ชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back

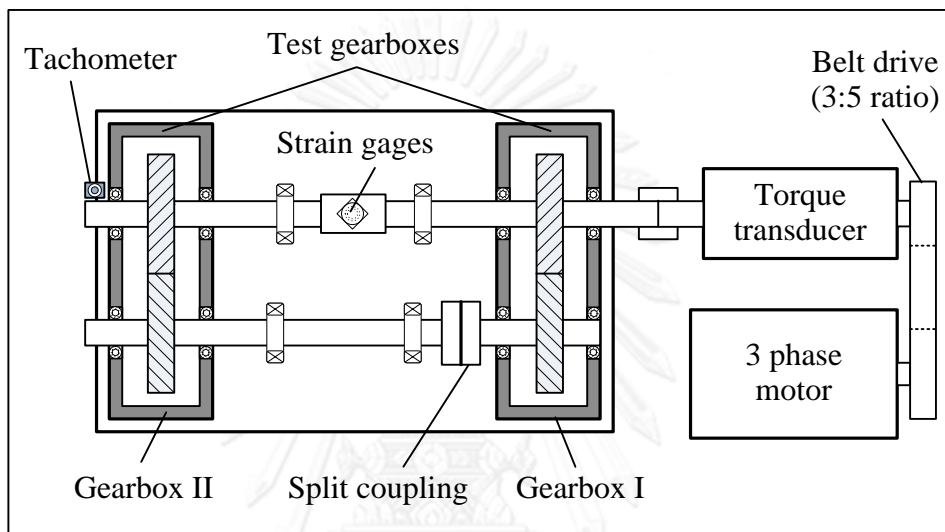
ชุดทดลองที่ใช้ในการวัดกำลังสูญเสียเป็นชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back ซึ่งออกแบบและสร้างโดยชาคริต [25] รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังชุดทดสอบเฟือง ส่วนรูปที่ 3.2 แสดงรูปถ่ายชุดทดสอบเฟือง ชุดทดสอบเฟืองนี้เป็นชุดทดสอบเฟืองแบบไม่มีกำลังออก กำลังที่ใส่เข้าไปจะไหลวนอยู่ในระบบเพื่อชดเชยแรงเสียดทานและกำลังสูญเสียประเภทต่าง ๆ ดังนั้นกำลังขาเข้าที่วัดได้ในชุดทดลองจึงมีค่าเท่ากับกำลังสูญเสียรวมในระบบ

ชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back ประกอบด้วยห้องเฟือง 2 ห้องซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการวางอยู่ตรงข้ามกัน ห้องเฟืองแต่ละห้องจะมีเฟืองขบกันอยู่ 1 คู่ ประกอบอยู่บนเพลลาที่วางอยู่บนตลับลูกปืนซึ่งอยู่ในห้องเฟือง ห้องเฟืองทั้ง 2 ห้องเชื่อมต่อกันด้วยเพลลา 2 เพลลาที่ขนานกันรองรับด้วยตลับลูกปืน 2 คู่ ตลับลูกปืนที่ใช้ในห้องเฟืองเป็นตลับลูกปืนแบบ deep groove ball (FBJ รุ่น 6904 ZZ) ส่วนตลับลูกปืนรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองเป็นตลับลูกปืนแบบ pillow block (Asahi รุ่น P04-5) โดยตลับลูกปืนแบบ deep groove ball จะถูกออกแบบให้สามารถรับแรงในแนวรัศมี ส่วนการรับแรงในแนวแกน จะออกแบบให้ตลับลูกปืนประกอบเข้ากับแบริ่งตลับลูกปืนสามารถรับแรงในแนวแกนได้ ดังนั้นชุดทดสอบเฟืองนี้สามารถใช้ทดสอบได้ทั้งเฟืองตรงและเฟืองเฉียง

ในรูปที่ 3.1 บนเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองข้างหนึ่งออกแบบให้มีคัปปลิงสำหรับให้แรงบิด (split coupling) การให้แรงบิดทำโดยถ่วงน้ำหนักด้วยแขนถ่วงน้ำหนัก [25] เพื่อให้เพลลายึดกันในตำแหน่งที่บิดและเกิดแรงกอดที่หน้าฟันเฟือง เปรียบเสมือนการให้แรงบิดกับชุดเฟืองขณะทำงานจริง ชุดทดสอบเฟืองขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส เชื่อมต่อด้านสายพานในอัตราทด 3:5 เพื่อให้ได้ความเร็วรอบในช่วง 500-2,500 รอบต่อนาที ซึ่งใกล้เคียงกับสถานะความเร็วรอบทำงานของเฟืองที่ใช้ในรถยนต์ วัดแรงบิดสูญเสียทั้งหมดของระบบ  $T_{total}$  (total torque loss) โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงบิด (KYOWA รุ่น TP-5PMCB) ที่เชื่อมต่อกับเพลลาขาเข้าของชุดทดสอบเฟืองด้วยคัปปลิง ค่าที่ได้จากการวัดจะนำไปคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบต่อไป สำหรับแรงบิดภายในระบบของชุดทดสอบ  $T_c$  (constant torque) วัดได้โดยใช้สเตรนเกจ (strain gage) ซึ่งติดไว้บนเพลลาซึ่งเชื่อมต่อระหว่างห้องเฟือง ส่วนความเร็วรอบเพลลากำลังเข้า  $N_{input}$  วัดโดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer)

ระบบหล่อลื่นในห้องเฟืองที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการหล่อลื่นแบบฉีด โดยปั๊มน้ำมันหล่อลื่นจะจ่ายน้ำมันหล่อลื่นไปยังหัวฉีดที่ติดตั้งอยู่เหนือตำแหน่งขบของฟันเฟือง น้ำมันหล่อลื่นถูกส่งไปยัง

ห้องเฟืองแต่ละห้องด้วยอัตราการไหลประมาณ 1 ลิตรต่อนาที ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นในถังเก็บไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าคงที่ โดยใช้ฮีตเตอร์แบบจุ่ม (immersion heater) และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (thermocouple type K) ซึ่งติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งจุดน้ำมันหล่อลื่นบริเวณกันถังกั้นเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น และแสดงผลอุณหภูมิโดยตัวแสดงผลแบบดิจิตอล ซึ่งยังสามารถทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ได้ด้วย โดยรายละเอียดของระบบน้ำมันหล่อลื่นได้อธิบายในงานของชาคริต [25]



รูปที่ 3.1 แผนผังชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back



### 3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ชุดเฟือง และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

ชุดเฟืองที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 7 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เฟืองทั้ง 7 ชุดถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาผลของมุมฮีลิคซ์  $\Psi$  (helix angle), มุมกด  $\Phi$  (pressure angle), และ ความกว้างหน้าฟัน  $b$  (face width) ชุดเฟืองทั้งหมดจะมีค่าโมดูลประมาณ 3 มิลลิเมตร จำนวนฟัน 30 ฟัน และระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟือง 90 มิลลิเมตร เหมือนกันทุกชุดเฟือง และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ น้ำมันเฟือง (gear oil) แบบ SAE 80W-90 โดยตารางที่ 3.2 แสดงค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่น  $\nu$  (lubricant oil viscosity) ที่อุณหภูมิการทำงาน ซึ่งได้จากการทดลอง [25, 26]

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์รูปร่างของเฟืองที่ใช้ในการทดลอง

Gear parameter	Gear Set						
	A	B	C	D	E	F	G
Number of Teeth	30	30	30	30	30	30	30
Module $m$ (mm)	2.998	2.966	3	2.998	2.998	2.998	2.998
Normal module $m_n$ (mm)	2.5	2.75	3	2.5	2.5	2.5	2.5
Pressure angle $\Phi$ (deg)	20	20	20	25	14.5	20	20
Helix angle $\Psi$ (deg)	33.5	22	0	33.5	33.5	33.5	33.5
Facewidth $b$ (mm)	20	20	20	30	40	30	40
Pitch diameter (mm)	90	90	90	90	90	90	90
Gear ratio $m_g$	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
Hub width (mm)	40	40	40	40	40	40	40
Hub diameter (mm)	50	50	50	50	50	50	50
Bore diameter (mm)	30	30	30	30	30	30	30
Key size (mm)	8x7	8x7	8x7	8x7	8x7	8x7	8x7
Pinion and Gear Young's modulus $E$ (GPa)	206	206	206	206	206	206	206
Pinion and Gear Poisson's ratio $\varepsilon$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Quantity	4	4	4	4	4	4	4
Gear material	SCM415						
Hardening	Induction						
Slant type	LH and RH						

ตารางที่ 3.2 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

Properties at 70°C	Properties gear oil
	SAE 80W-90
Dynamic viscosity $\nu$ (cP)	24.8733
Kinematic viscosity $\nu_k$ (cSt)	28.7
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	866.67

การศึกษานี้ได้เลือกศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ มุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟัน ซึ่งจากการศึกษาก่อนหน้านี้ [25, 26] ยังไม่รู้แน่ชัดว่าส่งผลอย่างไรต่อกำลังสูญเสีย เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับผลการประเมินด้วยแบบจำลอง เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้จึงแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงดังตารางที่ 3.3

กลุ่มที่ 1 การศึกษาผลของมุมฮิลิกซ์ การทดลองนี้จะใช้เฟืองชุด A ซึ่งเป็นเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา เป็นชุดอ้างอิง และเปรียบเทียบผลกับเฟืองเฉียงชุด B ที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา และเฟืองตรงชุด C ที่มีมุมฮิลิกซ์ 0 องศา โดยที่พารามิเตอร์รูปร่างอื่น ๆ ของชุดเฟืองทั้งสามชุดนั้นเหมือนกันทุกประการ

กลุ่มที่ 2 การศึกษาผลของมุมกด การทดลองนี้จะใช้เฟืองเฉียงทั้งหมดสามชุดโดยเฟืองชุด A มีมุมกด 20 องศา เป็นชุดอ้างอิง ส่วนเฟืองชุด D และชุด E จะปรับค่ามุมกด โดยเฟืองชุด D เป็นเฟืองที่มีมุมกด 25 องศา ส่วนเฟืองชุด E เป็นเฟืองที่มีมุมกด 14.5 องศา โดยพารามิเตอร์รูปร่างอื่น ๆ ของชุดเฟืองทั้งสามชุดนั้นเหมือนกันทุกประการ

กลุ่มที่ 3 การศึกษาผลของความกว้างหน้าฟัน การทดลองนี้จะใช้เฟืองชุด A ซึ่งเป็นเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟัน 20 มิลลิเมตร เป็นชุดอ้างอิง ส่วนเฟืองชุด F และ G จะปรับค่าความกว้างหน้าฟัน โดยเฟืองชุด F เป็นเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟัน 30 มิลลิเมตร และ เฟืองชุด G เป็นเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟัน 40 มิลลิเมตร โดยที่พารามิเตอร์รูปร่างอื่น ๆ ของชุดเฟืองทั้งสามชุดนั้นเหมือนกันทุกประการ

กลุ่มที่ 4 การทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการทดลอง โดยจะทดลองซ้ำในชุดเฟือง 3 ชุด ได้แก่ เฟืองชุด A เฟืองชุด C และเฟืองชุด D หลังจากทดลองชุดเฟืองอื่น ๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลองเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ

Test No.	Gear Set	Module $m$ (mm)	Pressure angle $\Phi$ (deg)	Helix angle $\Psi$ (deg)	Face width $b$ (mm)	Gear oil
ศึกษาผลของมุมฮีลิคซ์						
1	A	3	20	33.5	20	80W-90
2	B	3	20	22	20	80W-90
3	C	3	20	0	20	80W-90
ศึกษาผลของมุมกด						
	A	3	20	33.5	20	80W-90
4	D	3	25	33.5	20	80W-90
5	E	3	14.5	33.5	20	80W-90
ศึกษาผลของความกว้างหน้าฟัน						
	A	3	20	33.5	20	80W-90
6	F	3	20	33.5	30	80W-90
7	G	3	20	33.5	40	80W-90
ทำการทดลองซ้ำ						
8	A	3	20	33.5	20	80W-90
9	C	3	20	0	20	80W-90
10	D	3	25	33.5	20	80W-90

### 3.3 วิธีการทดลองและสภาวะที่ทดลอง

การทดลองทั้งหมดทำที่ความเร็วรอบหมุนของเพลาขับ 5 ค่า ได้แก่ 500 1,000 1,500 2,000 และ 2,500 รอบต่อนาที และทดลองภายใต้สภาวะการทำงานทั้งแบบไม่มีแรงบิดและมีแรงบิด ในการทดลองแบ่งแรงบิดออกเป็น 6 ช่วง ได้แก่ 0-3 นิวตันเมตร (ไม่มีแรงบิด), 10-50 นิวตันเมตร, 51-100 นิวตันเมตร, 101-150 นิวตันเมตร, 151-200 นิวตันเมตร และ 201-250 นิวตันเมตร สาเหตุในการให้แรงบิดภายในระบบเป็นช่วง เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ให้แรงบิด และระยะคลอน (backlash) ของเฟืองแต่ละคู่ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมแรงบิดในแต่ละกรณีให้เท่ากันพอดีได้ การทดลองทำจากแรงบิดน้อยไปแรงบิดมาก และความเร็วรอบหมุนต่ำไปสูงตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทำงานและลำดับในการทดลองของแต่ละชุดเฟือง

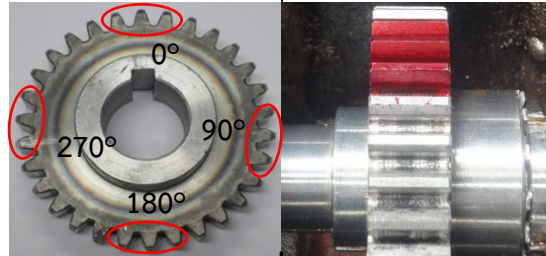
Torque Range $T_c$ (N·m)	Rotational Speed $N$ (rpm)				
	500	1,000	1,500	2,000	2,500
0-3	1	2	3	4	5
10-50	6	7	8	9	10
51-100	11	12	13	14	15
101-150	16	17	18	19	20
151-200	21	22	23	24	25
201-250	26	27	28	29	30

การเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์วัดแรงบิด (torque transducer) จะเก็บเมื่อเฟืองหมุนในสภาวะคงตัวแล้ว หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ค่าที่บันทึกโดยอุปกรณ์วัดแรงบิดนั้นถูกนำไปหาค่ากำลังสูญเสียทางกลหรือกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานได้ ดังจะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 3.5

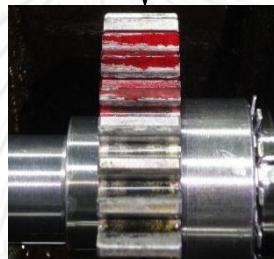
### 3.4 วิธีการศึกษาพื้นที่หน้าสัมผัสของเฟือง

ในส่วนของการศึกษาผลของหน้าสัมผัสฟันเฟืองในระหว่างการขบกันใช้สีร่างแบบ (Dykem steel red layout fluid) ซึ่งเป็นสีสำหรับตรวจสอบหน้าสัมผัสเฟืองแบบทนน้ำมันเพื่อตรวจสอบหน้าสัมผัสจากการทำงานภายใต้การทำงานต่าง ๆ วิธีการศึกษาผลของหน้าสัมผัสของฟันเฟืองแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจะทาสีที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเฟือง 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ฟัน โดยแต่ละตำแหน่งห่างกันประมาณ 90 องศา และทดลองที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที นาน 6 นาที การทดลองเพื่อตรวจสอบพื้นที่หน้าสัมผัสจะทำทุกช่วงแรงบิด หลังจากนั้นจะถ่ายรูปหน้าสัมผัสและทำความสะอาด ในการทดลองจะเลือกทาสีที่เฟืองขับของห้องเฟืองที่ติดอยู่กับอุปกรณ์วัดแรงบิด ตำแหน่งที่ตั้งกล้องเพื่อถ่ายรูปจะเป็นตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ทาสีบนพื้นที่หน้าสัมผัสของเฟือง 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ฟัน

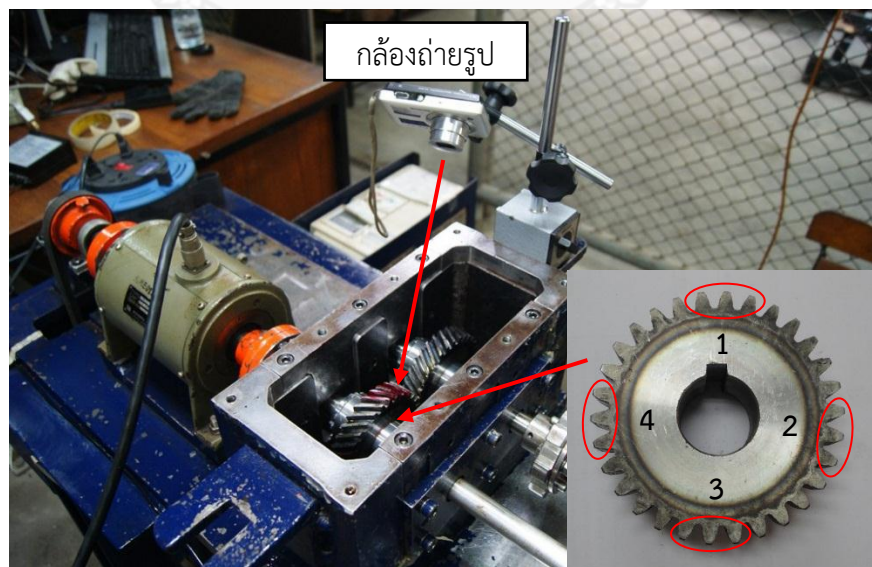


เดินเครื่องที่ความเร็วรอบหมุน 2,000 รอบต่อนาที นาน 6 นาที



เก็บข้อมูล ถ่ายรูปพื้นที่หน้าสัมผัส และทำความสะอาด

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาพื้นที่หน้าสัมผัสฟันเฟือง

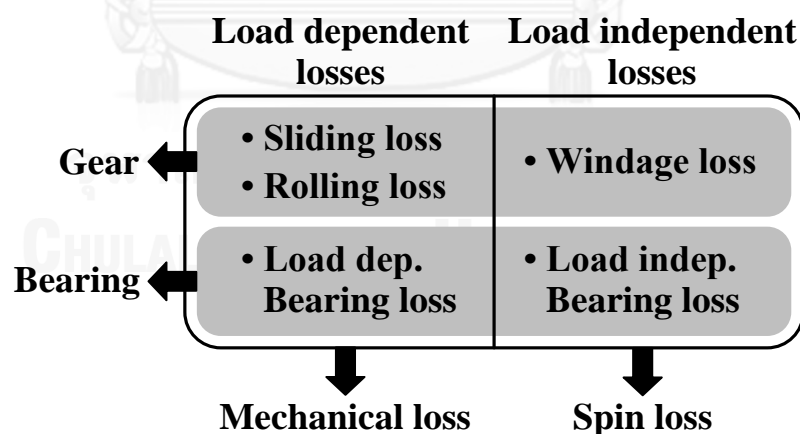


รูปที่ 3.4 ตำแหน่งตั้งกล้องเพื่อถ่ายรูปพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟือง

### 3.5 การคำนวณกำลังสูญเสียจากการไถลจากการทดลอง

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back เกิดจากชิ้นส่วนหลัก 2 ส่วน ได้แก่ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากเฟืองส่งกำลัง (gear) และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตลับลูกปืน (bearing) ดังแผนผังแสดงการจำแนกประเภทกำลังสูญเสียประเภทต่าง ๆ ในจากรูปที่ 3.5 สำหรับกำลังสูญเสียจากการส่งกำลังของเฟืองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับขนาดของภาระ (load dependent loss) ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการขบส่งกำลังของเฟือง  $P_{mesh}$  (gear mesh loss) ซึ่งเป็นผลรวมจากกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานจากการไถล  $P_{sliding}$  (sliding loss) และกำลังสูญเสียจากการกลิ้งของเฟืองระหว่างการขบ  $P_{rolling}$  (rolling loss) กำลังสูญเสียประเภทที่สอง คือ กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับขนาดของภาระ (load independent loss) ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศ  $P_w$  (windage loss) และกำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่น  $P_{churning}$  (churning loss) อย่างไรก็ตามในที่นี่ใช้การหล่อลื่นแบบฉีด (jet lubrication) ทำให้ไม่มีกำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่น กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับขนาดของภาระที่เกิดจากเฟืองส่งกำลังในการศึกษานี้จึงเกิดจากการหมุนต้านอากาศเพียงอย่างเดียว ส่วนกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกันกับเฟือง คือกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับขนาดของภาระ  $P_{b,load dep.}$  และกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับขนาดของภาระ  $P_{b,load indep.}$

จากรูปที่ 3.5 กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระทั้งจากเฟืองและตลับลูกปืนรวมกันเรียกว่ากำลังสูญเสียทางกล  $P_{mech}$  (mechanical loss) ส่วนกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระทั้งจากเฟืองและตลับลูกปืนรวมกันเรียกว่ากำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน  $P_{spin}$  (spin loss)



รูปที่ 3.5 แผนผังจำแนกประเภทกำลังสูญเสียในระบบชุดทดลอง

กำลังสูญเสียรวมในระบบ  $P_{total}$  ของชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back เป็นผลมาจากกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระทั้งจากเฟืองและตลับลูกปืนรวมกันเรียกว่ากำลังสูญเสียทางกล  $P_{mech}$  และ

กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระทั้งจากเฟืองและตลับลูกปืนรวมกันเรียกว่ากำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน  $P_{spin}$  ดังสมการ

$$P_{total} = P_{mech} + P_{spin} \quad (3.1)$$

โดย 
$$P_{mech} = P_{mesh} + P_{b,load dep.} \quad (3.2)$$

สำหรับชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back กำลังสูญเสียรวมจะมีค่าเท่ากับกำลังขาเข้าระบบ และเขียนได้ดังสมการ

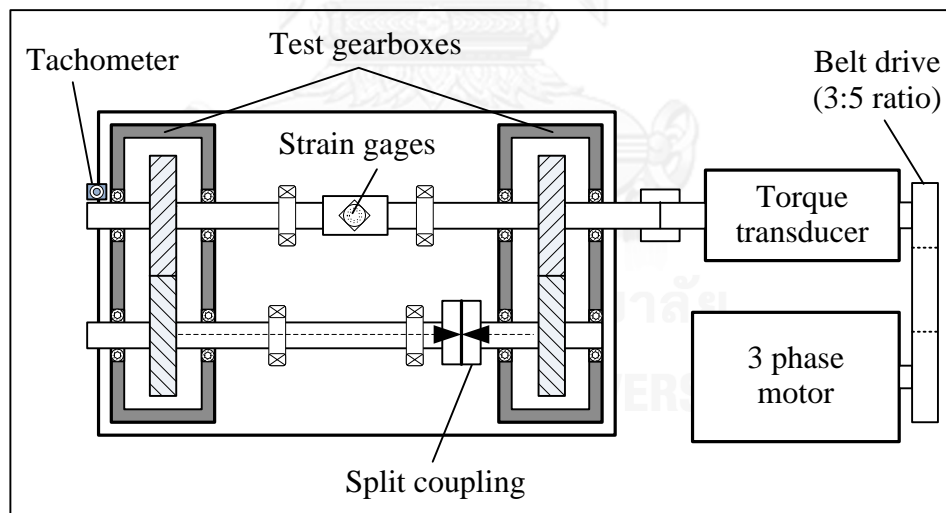
$$P_{total} = P_{input} = T_{total} \times \omega_{input} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\omega_{input}$  คือความเร็วเชิงมุมขาเข้าระบบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\omega_{input} = \frac{2\pi N_{input}}{60} \quad (3.4)$$

โดย  $N_{input}$  คือความเร็วรอบเพลขาเข้าระบบ หน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองวัดกำลังสูญเสียขณะไม่มีภาระ และการทดลองวัดกำลังสูญเสียในขณะมีภาระ การทดลองทั้งสองส่วน ทำให้สามารถหากำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน และกำลังสูญเสียจากการไถลได้ ดังจะอธิบายต่อไป



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบเฟืองในการทดลองขณะไม่มีแรงบิด

### 3.5.1 การทดลองวัดกำลังสูญเสียในห้องเฟืองขณะไม่มีภาระ

การทดลองวัดกำลังสูญเสียขณะไม่มีภาระให้ภาระ สามารถทำได้โดยจัดชุดทดสอบเฟืองดังแสดงในรูปที่ 3.6 เนื่องจากยังไม่มีภาระให้ภาระ ดังนั้นโหลดคัปปลิงที่เชื่อมต่อเพลาระหว่างห้องเฟืองจะไม่ถูกบิดส่งผลให้ไม่มีแรงกดอัดที่หน้าฟันเฟือง เนื่องจากการทดลองนี้ไม่มีแรงบิด กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (3.1) และ (3.3) จะได้

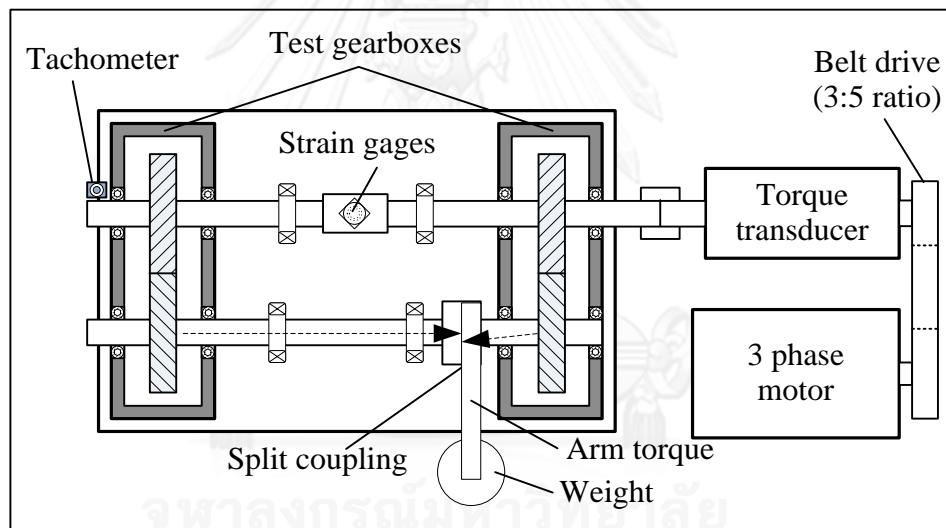
$$P_{input} = P_{total} \Big|_{T_c=0} = 0 + P_{spin}$$

$$P_{input} = P_{total} \Big|_{T_c=0} = P_{spin} \quad (3.5)$$

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียรวมมีผลมาจากกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการทดลองในสภาวะไม่มีแรงบิดจึงทำให้ทราบถึงกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานได้

### 3.5.2 การทดลองวัดกำลังสูญเสียในห้องเฟืองขณะมีภาระ

การทดลองวัดกำลังสูญเสียในห้องเฟืองขณะมีภาระ สามารถทำได้โดยจัดชุดทดสอบเฟืองดังแสดงในรูปที่ 3.7 เนื่องจากการทดลองขณะมีภาระ ดังนั้นโหลดคัปปลิงที่เชื่อมต่อเพลาระหว่างห้องเฟืองด้านขวาจะถูกบิดโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยแขนให้แรงบิด [25] เพื่อให้เพลายึดกันในตำแหน่งที่บิดและเกิดแรงกดอัดที่หน้าฟันเฟือง เปรียบเสมือนการให้แรงบิดกับชุดเฟืองขณะทำงานจริง



รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบเฟืองในการทดลองขณะมีแรงบิด

ในกรณีนี้กำลังสูญเสียที่วัดได้จะเป็นผลรวมของกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ และกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานดังแสดงในสมการที่ (3.1) เมื่อแทนกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระซึ่งเป็นผลมาจากกำลังสูญเสียจากการขบส่งกำลังของฟันเฟือง และกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนดังสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$P_{total} = P_{mech} + P_{spin} = (P_{mesh} + P_{b,load dep.}) + P_{spin} \quad (3.6)$$

โดย  $P_{spin}$  หาได้จากการทดลองขณะไม่มีแรงบิด เมื่อหัก  $P_{spin}$  ออกจาก  $P_{total}$  ที่วัดได้จะสามารถหาค่าในส่วนของ  $P_{mech}$  ออกมาได้



สำหรับกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระของตลับลูกปืน  $P_{b,load\ dep.}$  นั้นสามารถหาได้จากสมการกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนที่เสนอโดย Harris [5] ดังสมการ

$$P_{b,load\ dep.} = M_{b,load\ dep.} \omega_b \quad (3.7)$$

เมื่อ  $M_{b,load\ dep.}$  คือ โมเมนต์แรงเสียดทานจากการกลิ้งของตลับลูกปืน และ  $\omega_b$  คือ ความเร็วเชิงมุมของตลับลูกปืน

สำหรับตลับลูกปืนแบบ deep groove ball bearing สมการโมเมนต์แรงเสียดทานจากการกลิ้งของตลับลูกปืนที่ขึ้นกับภาระ  $M_{b,load\ dep.}$  สามารถเขียนได้ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$M_{b,load\ dep.} = f_1 F_\beta d_m \quad (3.8)$$

เมื่อ  $d_m$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตลับลูกปืน และ  $f_1$  คือ ค่าตัวประกอบไร้มิติซึ่งขึ้นกับการออกแบบและภาระที่กระทำกับตลับลูกปืนสามารถหาได้จากสมการ

$$f_1 = z \left( \frac{F_s}{C_s} \right)^y \quad (3.9)$$

โดย  $C_s$  คือแรงสถิตประเมิน (basic static load rating) ขณะที่  $z$  และ  $y$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับชนิดและขนาดของตลับลูกปืน ซึ่ง  $C_s$ ,  $z$  และ  $y$  สามารถหาค่าได้จากตารางแสดงคุณสมบัติของตลับลูกปืน ส่วน  $F_s$  คือแรงสมมูลสถิต (static equivalent load) สำหรับเพื่องตรงใช้  $F_s = F_r$  ส่วนเพื่องเฉียงใช้  $F_s = 0.6F_r + 0.5F_a$  โดย  $F_r$  และ  $F_a$  คือแรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกนตามลำดับ [5]

สุดท้าย  $F_\beta$  คือตัวแปรของแรงที่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของแรงที่รับภาระโดยตลับลูกปืนสำหรับตลับลูกปืนแบบ deep groove ball ซึ่งมีมุมสัมผัส (nominal contact) เป็น 0 องศา จะมีค่า  $F_\beta = F_r$  [5] ดังนั้นกำลังสูญเสียของตลับลูกปืนที่ขึ้นกับภาระในสมการที่ (3.8) สามารถหาได้จาก

$$M_{b,load\ dep.} = f_1 F_r d_m \quad (3.10)$$

ค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตลับลูกปืนแบบ deep groove ball ที่ใช้ในการทดลองนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตลับลูกปืนที่ใช้ในการทดลอง

Ball Bearing Type	Nominal contact angle (deg)	$z$	$y$	$C_s$ (N)	$d_m$ (mm)
Radial deep groove	0	0.0007	0.55	3700	28.5

ชุดทดลองแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยเฟือง 2 คู่ ตลับลูกปืนภายในห้องเฟือง 8 ตัว และตลับลูกปืนที่ใช้ในการรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟือง 4 ตัว ดังนั้นกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระในสมการที่ (3.2) สามารถเขียนใหม่เพื่อแสดงกำลังสูญเสียจากส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังสมการ

$$P_{mech} = 2P'_{mesh} + [8P'_{b,load dep.}]_{gearbox} + [4P'_{b,load dep.}]_{bearing housing} \quad (3.11)$$

โดยสัญลักษณ์  $P'$  หมายถึงกำลังสูญเสียของแต่ละชิ้นส่วนย่อย เช่น  $P'_{mesh}$  หมายถึงกำลังสูญเสียเนื่องจากการขบของเฟืองแต่ละคู่ และ  $P'_{b,load dep.}$  ก็หมายถึงกำลังสูญเสียของตลับลูกปืนแต่ละตัว โดยกำลังสูญเสียจากการขบ  $P'_{mesh}$  เป็นผลรวมของกำลังสูญเสียจากการไถลและกำลังสูญเสียจากการกลิ้งดังสมการ

$$P'_{mesh} = P'_{sliding} + P'_{rolling} \quad (3.12)$$

นอกจากนี้เนื่องจากตลับลูกปืนที่ใช้ในการรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองนั้น รองรับภาระที่เกิดจากน้ำหนักของเพลลาซึ่งมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับภาระของตลับลูกปืนที่อยู่ภายในเข้าใส่ตลับลูกปืนในห้องเฟืองที่ต้องรองรับน้ำหนักของเฟือง และภาระแรงกดที่หน้าฟันเฟืองในสภาวะที่มีภาระในระบบ จากเหตุผลข้างต้นทำให้สามารถละทิ้งกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระจากตลับลูกปืนที่ใช้ในการรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองทั้ง 4 ตัวไปได้ เมื่อแทนความสัมพันธ์นี้ในสมการที่ (3.12) ลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$P_{mech} = 2[P'_{sliding} + P'_{rolling}] + [8P'_{b,load dep.}]_{gearbox} \quad (3.13)$$

และเนื่องจากกำลังสูญเสียจากการกลิ้งของฟันเฟืองระหว่างการขบมีขนาดน้อยกว่ากำลังสูญเสียจากการไถลมาก [1] กำลังสูญเสียเนื่องจากการกลิ้งจึงสามารถละทิ้งไปได้ ดังนั้นกำลังสูญเสียจากการไถลจึงสามารถคำนวณได้จาก

$$P'_{sliding} = \frac{1}{2} P_{mech} - [4P'_{b,load dep.}]_{gearbox} \quad (3.14)$$

หรือ

$$P'_{sliding} = \frac{1}{2} [P_{total} - P_{spin}] - [4P'_{b,load dep.}]_{gearbox} \quad (3.15)$$

โดย  $P_{total}$  และ  $P_{spin}$  สามารถวัดได้จากการทดลองในขณะมีภาระ และไม่มีภาระ ตามลำดับ ส่วน  $P'_{b,load dep.}$  สามารถหาได้จากการคำนวณ ดังนั้นกำลังสูญเสียจากการไถลจึงสามารถคำนวณได้ กำลังสูญเสียจากการไถลนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับกำลังสูญเสียที่ประเมินจากแบบจำลองของกฎดอล [26] ได้

### 3.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานและหลักการวัดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชุดทดลอง รวมถึงพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ชุดเฟืองและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง และยังกล่าวถึงวิธีการทดลอง สภาพที่ทดลอง และวิธีการศึกษาพื้นที่หน้าสัมผัสของเฟือง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการคำนวณกำลังสูญเสียจากการไหลจากการทดลอง โดยได้อธิบายถึงการทดลองหาล้างสูญเสียในห้องเฟืองขณะไม่มีภาระและขณะมีภาระ และการคำนวณหาล้างสูญเสียจากตลับลูกปืน โดยผลการทดลองจะได้แสดงในบทต่อไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 4

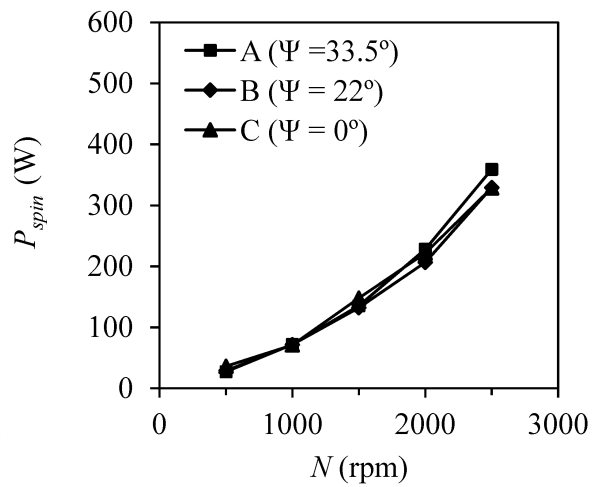
### ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียและอภิปราย

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเฟือง ซึ่งประกอบไปด้วย มุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟัน ที่มีต่อการเกิดกำลังสูญเสีย ภายใต้แรงบิดและความเร็วรอบการหมุนต่าง ๆ กัน ซึ่งการวัดกำลังสูญเสียแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ การวัดขณะมีแรงบิด และไม่มีแรงบิด เพื่อแยกกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระออกจากกำลังสูญเสียรวม ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่ากำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระได้ และเมื่อนำกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนที่คำนวณได้จากสมการที่เสนอไว้มาหักออกจากกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ จะทำให้สามารถหาค่ากำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองได้ การพิจารณากำลังสูญเสียจากการไถลซึ่งได้จากการทดลองร่วมกับผลการประเมินจากแบบจำลองและผลการวัดหน้าสัมผัสจะช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสียได้

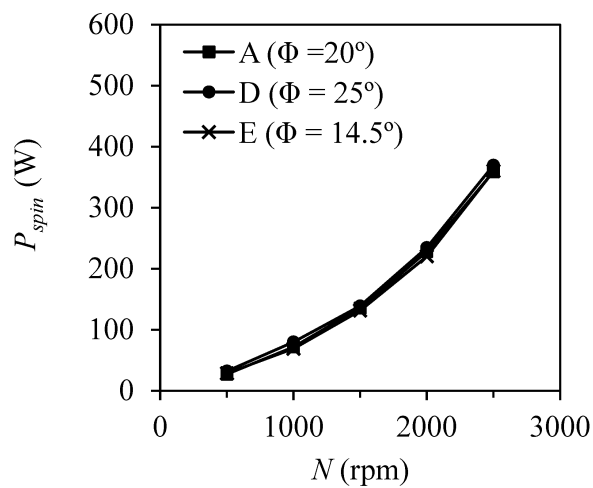
#### 4.1 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ

การทดลองวัดกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ ทำโดยประกอบชุดทดลองให้เพลาสองซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างห้องเฟืองทั้งสองห้องต่อกันโดยไม่บิด ทำให้แรงบิดภายในระบบมีค่าน้อยไม่เกิน 3 นิวตันเมตร ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการทดลองขณะมีภาระ ผลการทดลองในกรณีนี้จึงใช้ประมาณค่ากำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระได้ ถึงแม้กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระที่วัดได้จะเป็นผลรวมของกำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศของเฟือง และกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของตลับลูกปืน แต่เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งใช้ตลับลูกปืนแบบเดียวกัน และใช้การหล่อลื่นเหมือนกัน ดังนั้นความแตกต่างของกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ ในแต่ละกรณีจึงสามารถพิจารณาได้ว่าขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศของเฟือง

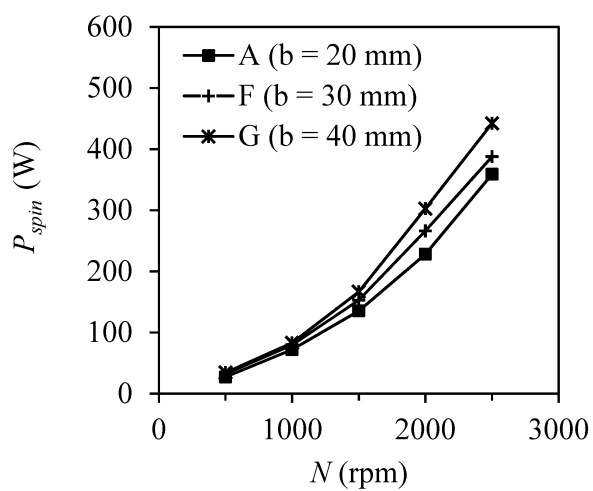
รูปที่ 4.1 - รูปที่ 4.3 แสดงกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ของชุดเฟืองทั้ง 7 ชุด โดยแบ่งตามกลุ่มของพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ผลของมุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟัน ตามลำดับ จากภาพพบว่าค่ากำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น โดยเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ และมุมกดแตกต่างกัน จะมีกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระใกล้เคียงกัน แต่เฟืองที่มีขนาดความกว้างหน้าฟันมากกว่าเฟืองชุดอื่น ได้แก่ เฟืองชุด F และ G จะมีกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระมากกว่า เนื่องจากเฟืองมีพื้นที่ในการหมุนด้านอากาศมากกว่าเฟืองชุดอื่น



รูปที่ 4.1 กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาวะของเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ต่างกัน



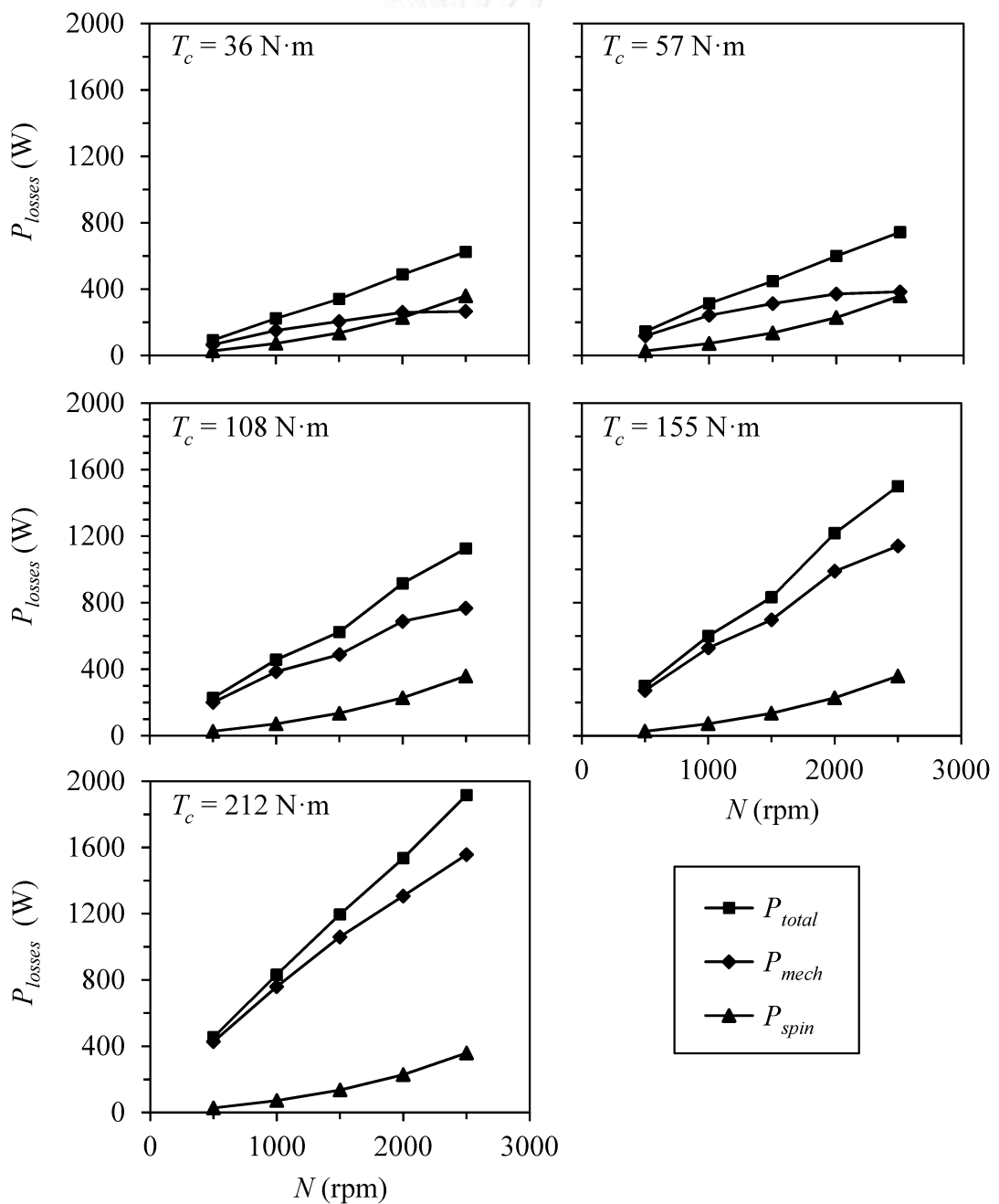
รูปที่ 4.2 กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาวะของเฟืองที่มีมุมกุดต่างกัน



รูปที่ 4.3 กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาวะของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน

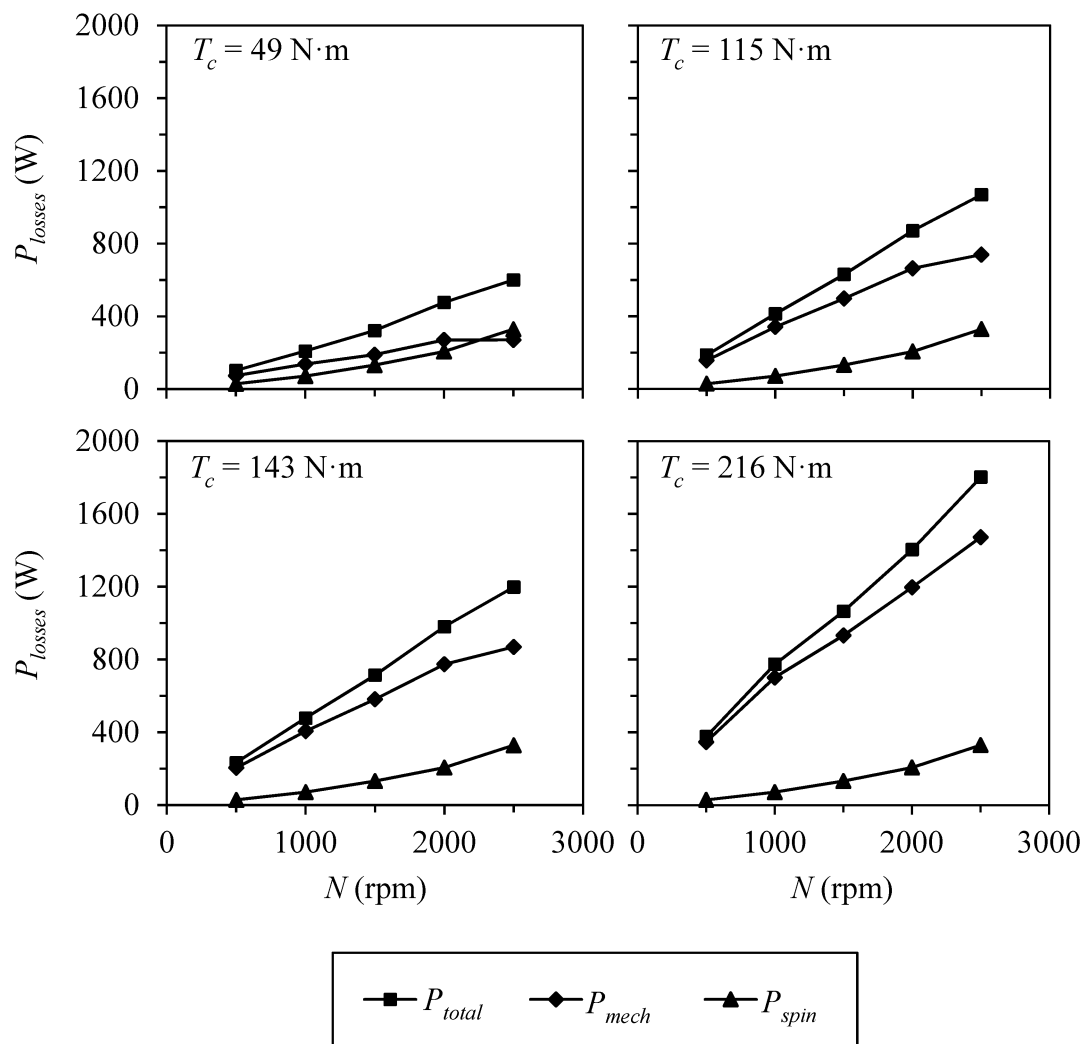
#### 4.2 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ

กำลังสูญเสียที่วัดได้จากการทดลองเป็นกำลังสูญเสียรวมในระบบ  $P_{total}$  กำลังสูญเสียนี้นสามารถแยกได้เป็น กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระ หรือกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศ  $P_{spin}$  ซึ่งหาได้จากการทดลองในขณะที่ไม่มีแรงบิด และกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระ หรือกำลังสูญเสียทางกล  $P_{mech}$  โดยกำลังสูญเสียทางกลสามารถหาได้ โดยนำกำลังสูญเสียนี่ที่ไม่ขึ้นกับภาระมาหักล้างออกจากกำลังสูญเสียรวมของระบบชุดทดลอง

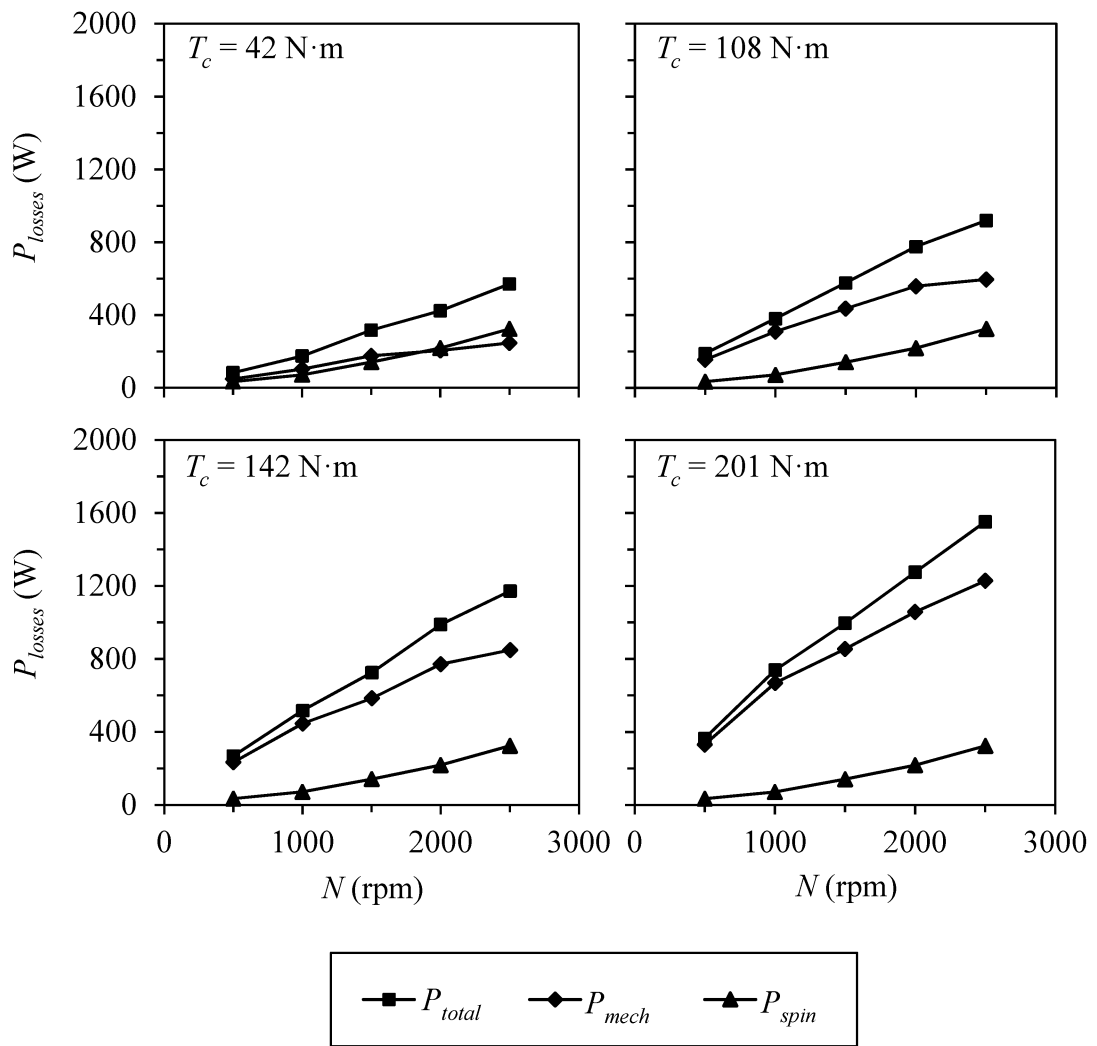


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด A

รูปที่ 4.4 - รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียรวม  $P_{total}$  กำลังสูญเสียทางกล  $P_{mech}$  และกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน  $P_{spin}$  ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองแต่ละชุด จากรูปพบว่ากำลังสูญเสียของเฟืองแต่ละชุดมีแนวโน้มคล้ายกัน โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบหมุนเพิ่ม โดยกำลังสูญเสียรวมจะเพิ่มขึ้นตามแรงบิด เนื่องจากกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานไม่เพิ่มตามแรงบิด ดังนั้นกำลังสูญเสียส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในขณะเฟืองทำงานที่แรงบิดสูง จึงเป็นผลมาจากกำลังสูญเสียทางกลที่เพิ่มขึ้นเมื่อแรงบิดมากขึ้น

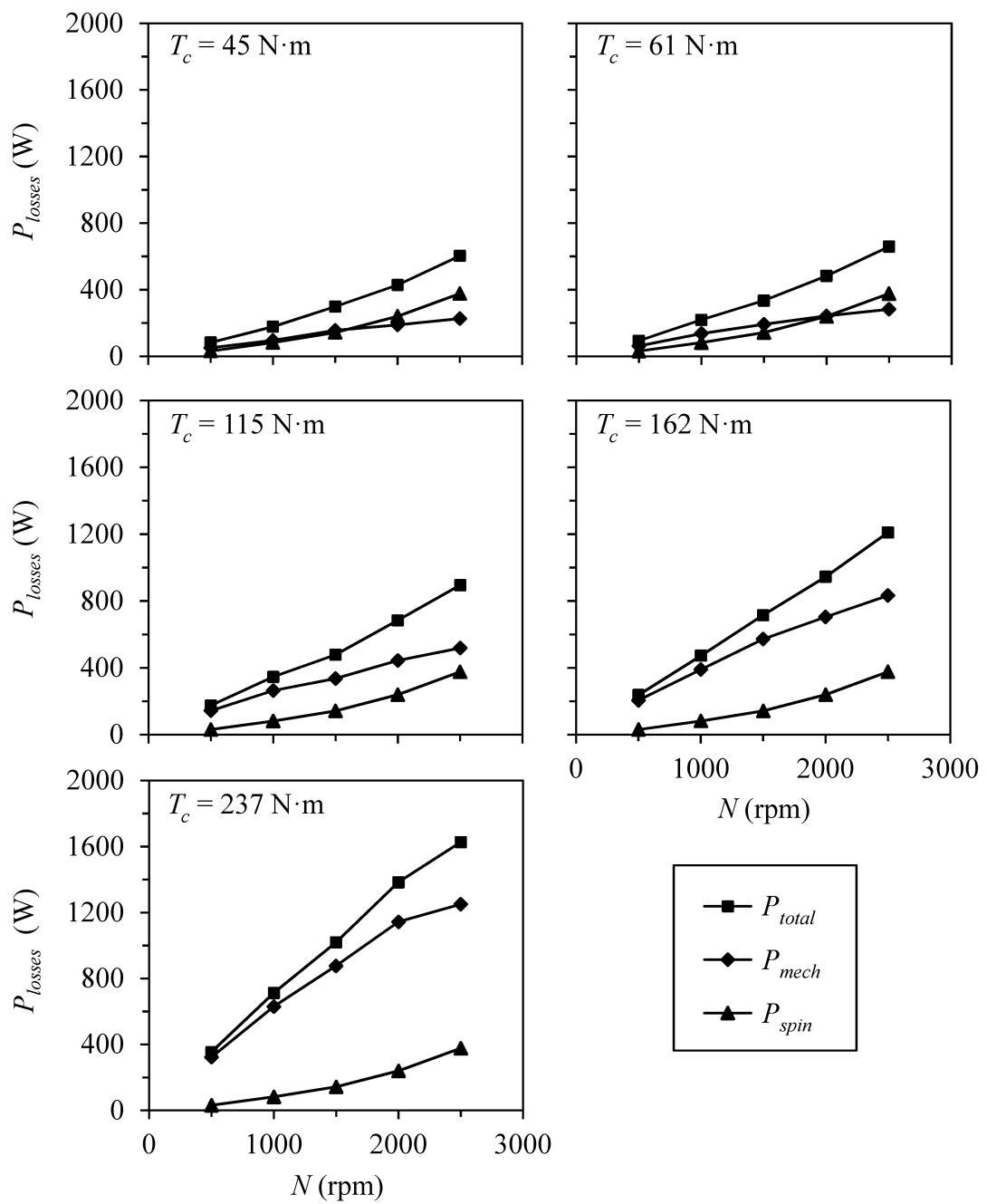


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด B

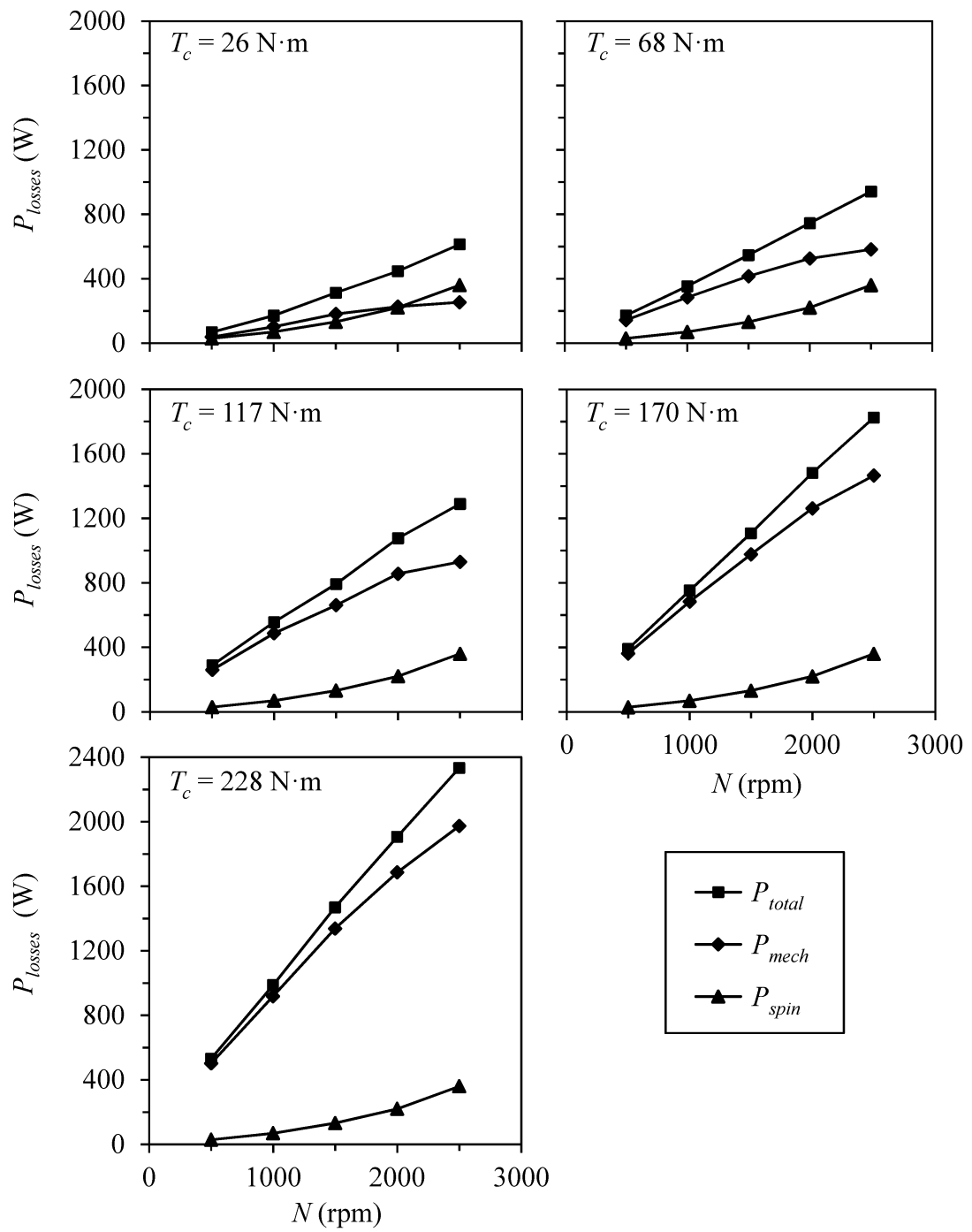


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด C

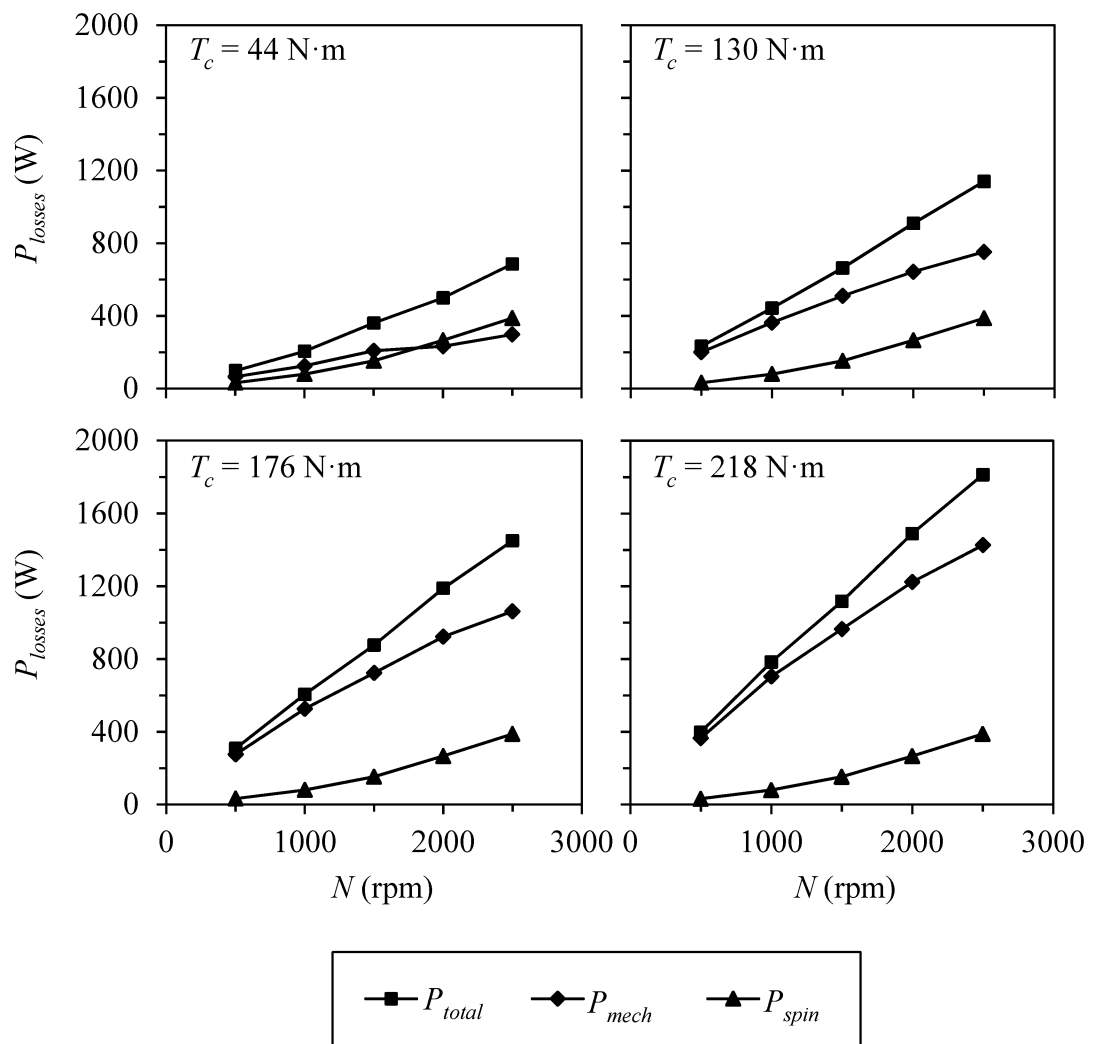




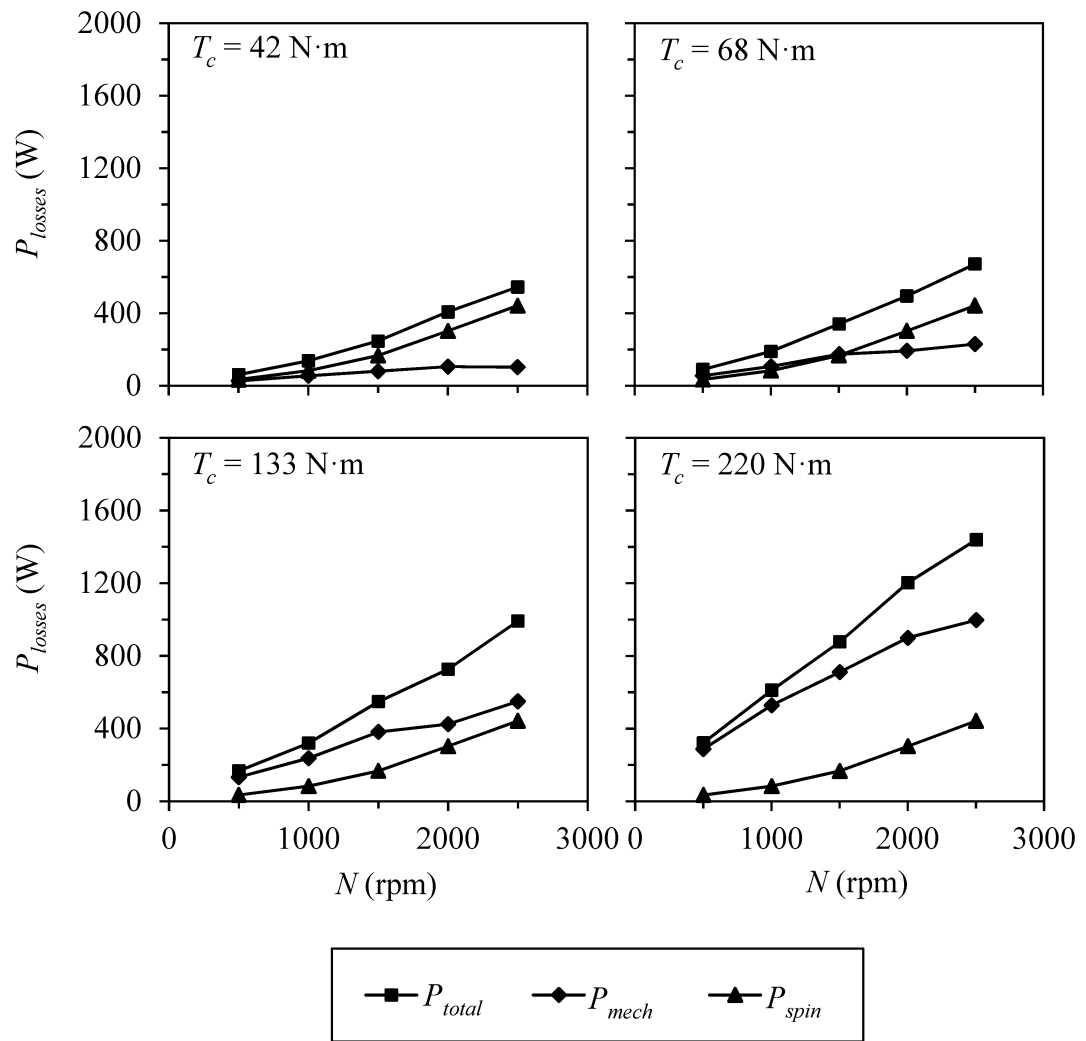
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด D



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด E



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด F



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเฟืองชุด G

#### 4.3 อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเฟืองต่อกำลังสูญเสียจากการไหล

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวัดกำลังสูญเสียจากการไหลของคู่เฟืองที่มีพารามิเตอร์รูปร่างต่างกันในสภาวะการทำงานต่าง ๆ โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ศึกษาในที่นี้ ได้แก่ มุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟัน ผลที่แสดงในหัวข้อนี้เป็นกำลังสูญเสียจากการไหลของคู่เฟืองเพียงคู่เดียว ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลการทดลองดังแสดงในสมการที่ (3.15) และผลพื้นที่สัมผัสของฟันเฟืองที่ได้จากการทดลอง

##### 4.3.1 อิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลของเฟืองเฉียง

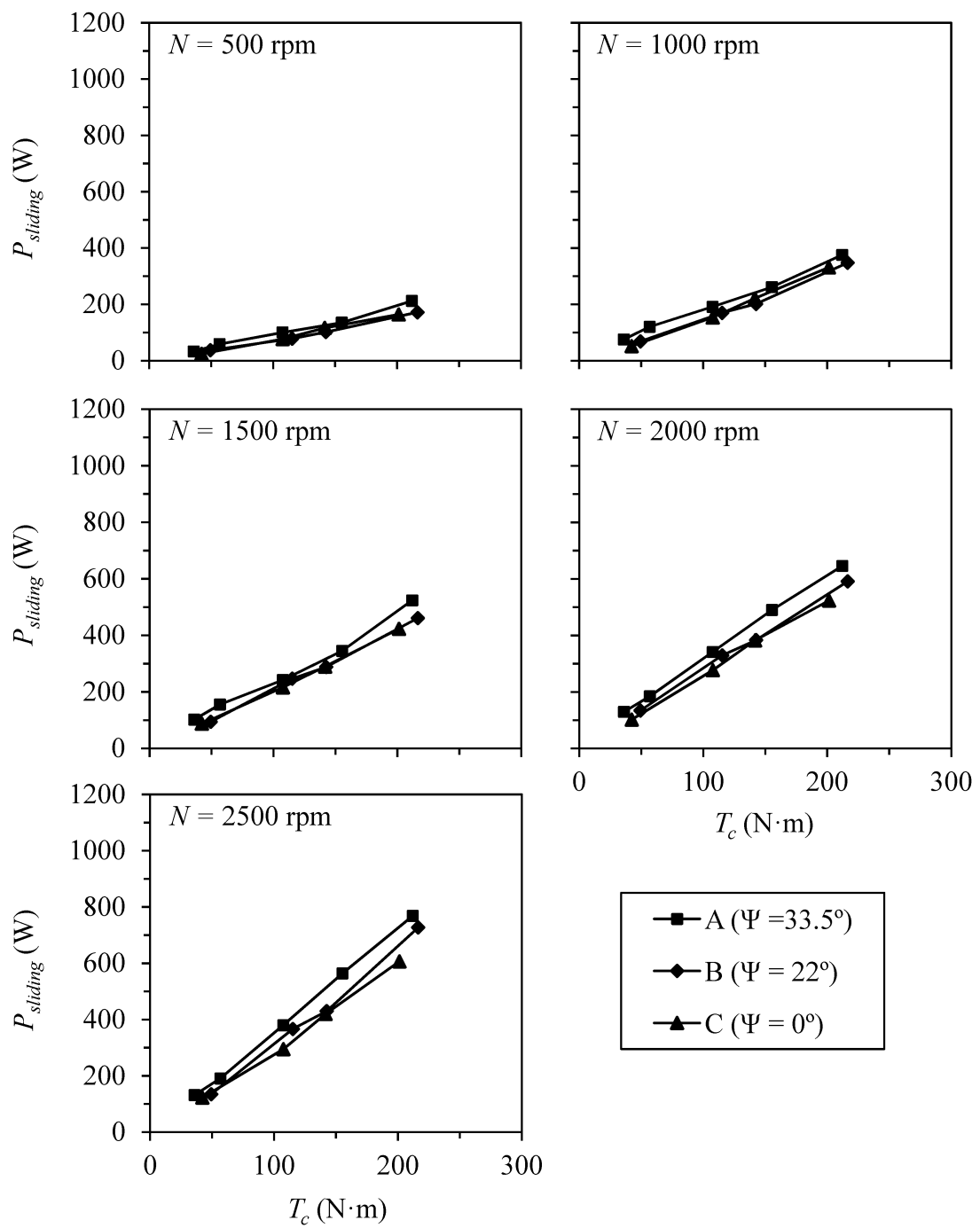
การศึกษาอิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลทำโดยเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลของเฟืองชุด A ซึ่งเป็นเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา กับเฟืองชุด B ที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา และเฟืองตรงชุด C ที่มีมุมฮิลิกซ์ 0 องศา โดยที่พารามิเตอร์รูปร่างอื่นของชุดเฟืองทั้งสามชุดนั้นเหมือนกันทุกประการ

รูปที่ 4.11 แสดงกำลังสูญเสียจากการไหลของเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ต่างกัน เมื่อทำงานที่แรงบิดต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบการหมุนเพลาชับ 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 รอบต่อนาที จากรูปพบว่ากำลังสูญเสียจากการไหล ของคู่เฟืองทั้งสามชุดเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบและแรงบิด และมีลักษณะความสัมพันธ์เกือบเป็นเชิงเส้นกับค่าแรงบิดภายในระบบ

เมื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลของคู่เฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์แตกต่างกัน พบว่ากำลังสูญเสียของคู่เฟืองชุด A ซึ่งมีมุมฮิลิกซ์มากที่สุดมีกำลังสูญเสียมากที่สุด สำหรับที่แรงบิดต่ำ ๆ และความเร็วรอบหมุนต่ำพบว่ากำลังสูญเสียจากการไหลของเฟืองชุด B มีค่าใกล้เคียงกับเฟืองชุด C แต่เมื่อทดลองที่แรงบิดและความเร็วรอบหมุนสูงพบว่ากำลังสูญเสียจากการไหลของเฟืองชุด B จะเพิ่มขึ้นมากกว่าเฟืองชุด C อย่างชัดเจน

ลักษณะการสัมผัสของหน้าฟันที่มีมุมฮิลิกซ์แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงภาพถ่ายการสัมผัสของเฟืองที่ตำแหน่งต่าง ๆ รูปในตารางจะแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ โดยจะจัดรูปถ่ายในกรณีที่เฟืองทำงานที่แรงบิดใกล้เคียงกันอยู่รวมกลุ่มกัน สำหรับช่วงที่ไม่มีแรงบิดพบว่าที่เฟืองชุด B มีการสัมผัสหน้าฟันที่มากกว่าคู่เฟือง A และ C ตามลำดับ สำหรับเฟืองชุด A และ B มีพื้นที่การสัมผัสมากตั้งแต่ช่วงแรงบิดเกิน 100 นิวตันเมตร และมีการสัมผัสค่อนข้างเต็มพื้นที่ตั้งแต่แรงบิดประมาณ 140 นิวตันเมตร สำหรับการสัมผัสหน้าฟันของเฟืองชุด C ถึงแม้ว่าจะให้แรงบิดสูงสุดก็ยังสัมผัสไม่เต็มหน้าฟัน โดยการสัมผัสส่วนใหญ่อยู่ในช่วงดิเดนดัม (dedendum)

สรุปโดยรวมจากตารางที่ 4.1 พบว่าที่แรงบิดสูงพื้นที่การสัมผัสของเฟือง A มากที่สุด รองลงมาคือเฟืองชุด B และเฟืองชุด C ตามลำดับ หรือได้ว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์มากมีการสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์น้อย








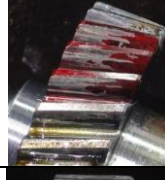
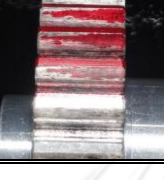
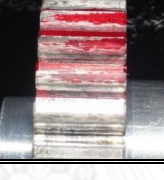
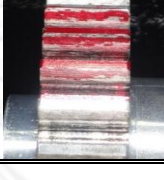
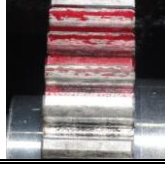


รูปที่ 4.11 อิทธิพลของมุมเอียงต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีมุมฮีลิคซ์ต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
A $\Psi = 33.5^\circ$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
B $\Psi = 22^\circ$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $\Psi = 0^\circ$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $\Psi = 33.5^\circ$ $T_c = 36 \text{ N}\cdot\text{m}$				
B $\Psi = 22^\circ$ $T_c = 49 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $\Psi = 0^\circ$ $T_c = 42 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $\Psi = 33.5^\circ$ $T_c = 155 \text{ N}\cdot\text{m}$				
B $\Psi = 22^\circ$ $T_c = 143 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $\Psi = 0^\circ$ $T_c = 142 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ (ต่อ)

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
A $\Psi = 33.5^\circ$ $T_c = 212 \text{ N}\cdot\text{m}$				
B $\Psi = 22^\circ$ $T_c = 216 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $\Psi = 0^\circ$ $T_c = 201 \text{ N}\cdot\text{m}$				

#### 4.3.2 อิทธิพลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถของเฟืองเฉียง

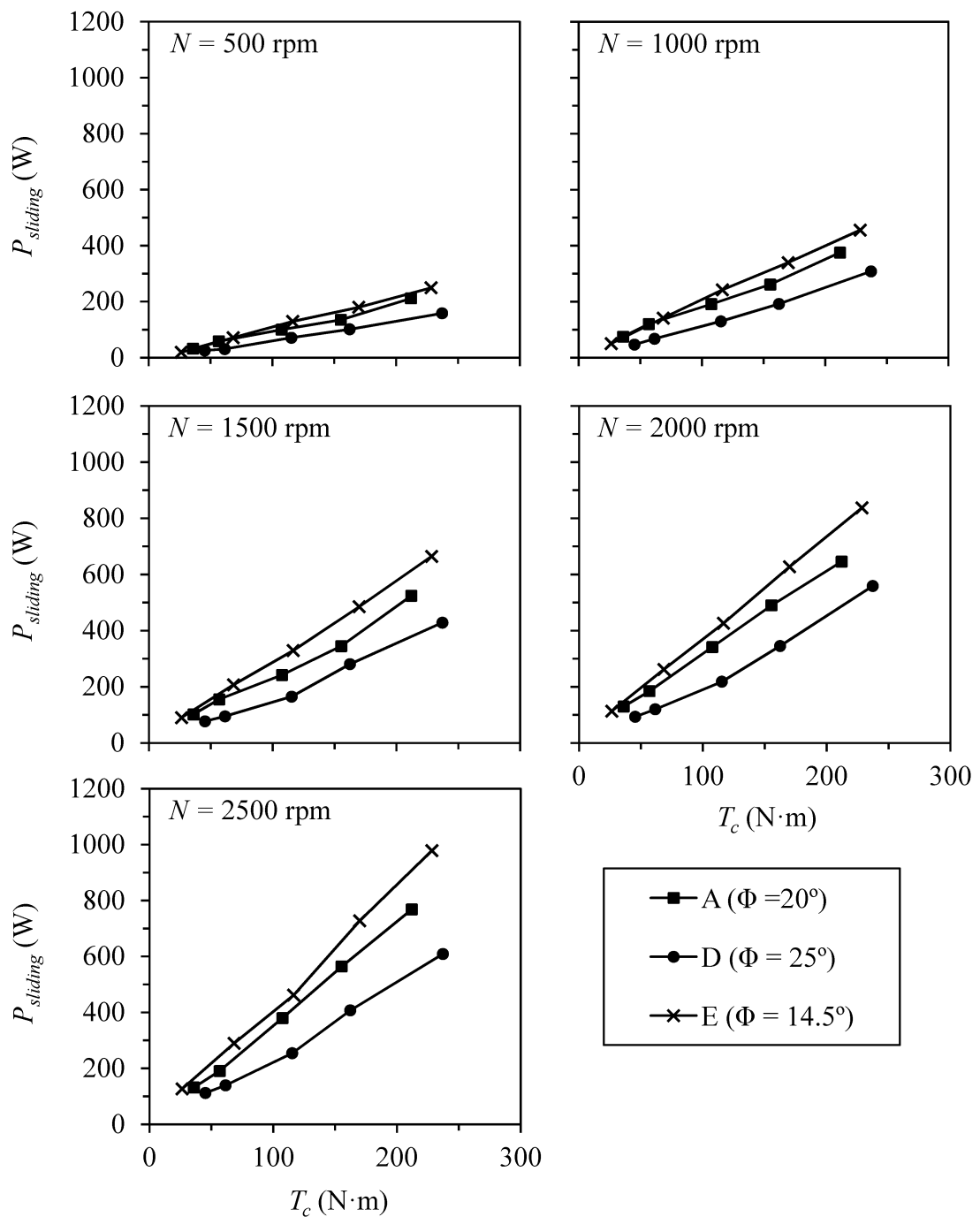
การศึกษาอิทธิพลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถทำโดยการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไถของเฟืองชุดอ้างอิง A ซึ่งมีมุมกด 20 องศา กับเฟืองชุด D และชุด E ซึ่งมีมุมกด 25 องศา และ 14.5 องศา ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์รูปร่างอื่น ๆ ของชุดเฟืองทั้งสามชุดนั้นเหมือนกันทุกประการ

รูปที่ 4.12 แสดงกำลังสูญเสียจากการไถของเฟืองที่มีมุมกดต่างกัน เมื่อทำงานที่แรงบิดต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบการหมุนเพลาชับ 500 - 2500 รอบต่อนาที จากรูปพบว่ากำลังสูญเสียจากการไถของคู่เฟืองที่มีมุมกด 14.5, 20 และ 25 องศา เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบและแรงบิด และมีลักษณะความสัมพันธ์เกือบเป็นเชิงเส้นกับค่าแรงบิดภายในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไถของคู่เฟืองที่มีมุมกดแตกต่างกันพบว่ากำลังสูญเสียจากการไถของคู่เฟืองชุด E ที่มีมุมกดน้อยกว่ามีค่ามากกว่าเฟืองชุด A และเฟืองชุดที่ D ที่มีมุมกดมากกว่าตามลำดับ

เมื่อพิจารณาลักษณะการสัมผัสโดยการเปรียบเทียบการสัมผัสของหน้าฟัน เมื่อเฟืองทำงานที่ช่วงแรงบิดใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อไม่มีการให้แรงบิดเฟืองชุด E มีการสัมผัสหน้าฟันที่มากกว่าคู่เฟือง A และ D เล็กน้อย และพื้นที่การสัมผัสเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้น จากรูปการสัมผัสหน้าฟันเฟืองชุด A และ E มีลักษณะการสัมผัสหน้าฟันที่ค่อนข้างจะเต็มฟัน โดยเฟืองชุด A มีลักษณะการสัมผัสค่อนข้างเต็มฟันเมื่อมีการให้แรงบิดประมาณ 110 นิวตันเมตร ในขณะที่เฟืองชุด E มีลักษณะการสัมผัสค่อนข้างเต็มฟันเมื่อมีการให้แรงบิดประมาณ 117 นิวตันเมตร ส่วนเฟืองชุด D มีลักษณะการสัมผัสบริเวณกลางฟันหรือเส้นพิตช์และขยายออกตามแนวด้านดีเดนตัมของฟันเฟืองเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น แต่ไม่สัมผัสเต็มฟัน



สรุปจากตารางที่ 4.2 พบว่าพื้นที่การสัมผัสของเฟือง E มากที่สุด รองลงมาคือเฟืองชุด A และ D ตามลำดับ หรือจะได้ว่าเฟืองที่มีมุมกดน้อยมีการสัมผัสมาก


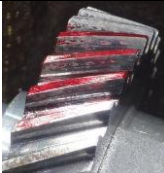






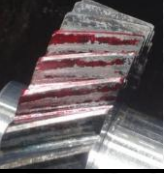
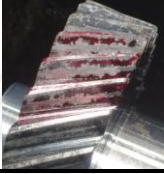

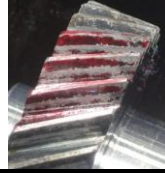


รูปที่ 4.12 อิทธิพลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีมุมกดต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
E $\Phi = 14.5^\circ$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $\Phi = 20^\circ$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $\Phi = 25^\circ$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
E $\Phi = 14.5^\circ$ $T_c = 26 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $\Phi = 20^\circ$ $T_c = 36 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $\Phi = 25^\circ$ $T_c = 45 \text{ N}\cdot\text{m}$				
E $\Phi = 14.5^\circ$ $T_c = 117 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $\Phi = 20^\circ$ $T_c = 108 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $\Phi = 25^\circ$ $T_c = 115 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีมุมกดต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ (ต่อ)

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
E $\Phi = 14.5^\circ$ $T_c = 228 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $\Phi = 20^\circ$ $T_c = 212 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $\Phi = 25^\circ$ $T_c = 237 \text{ N}\cdot\text{m}$				

#### 4.3.3 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองเฉียง

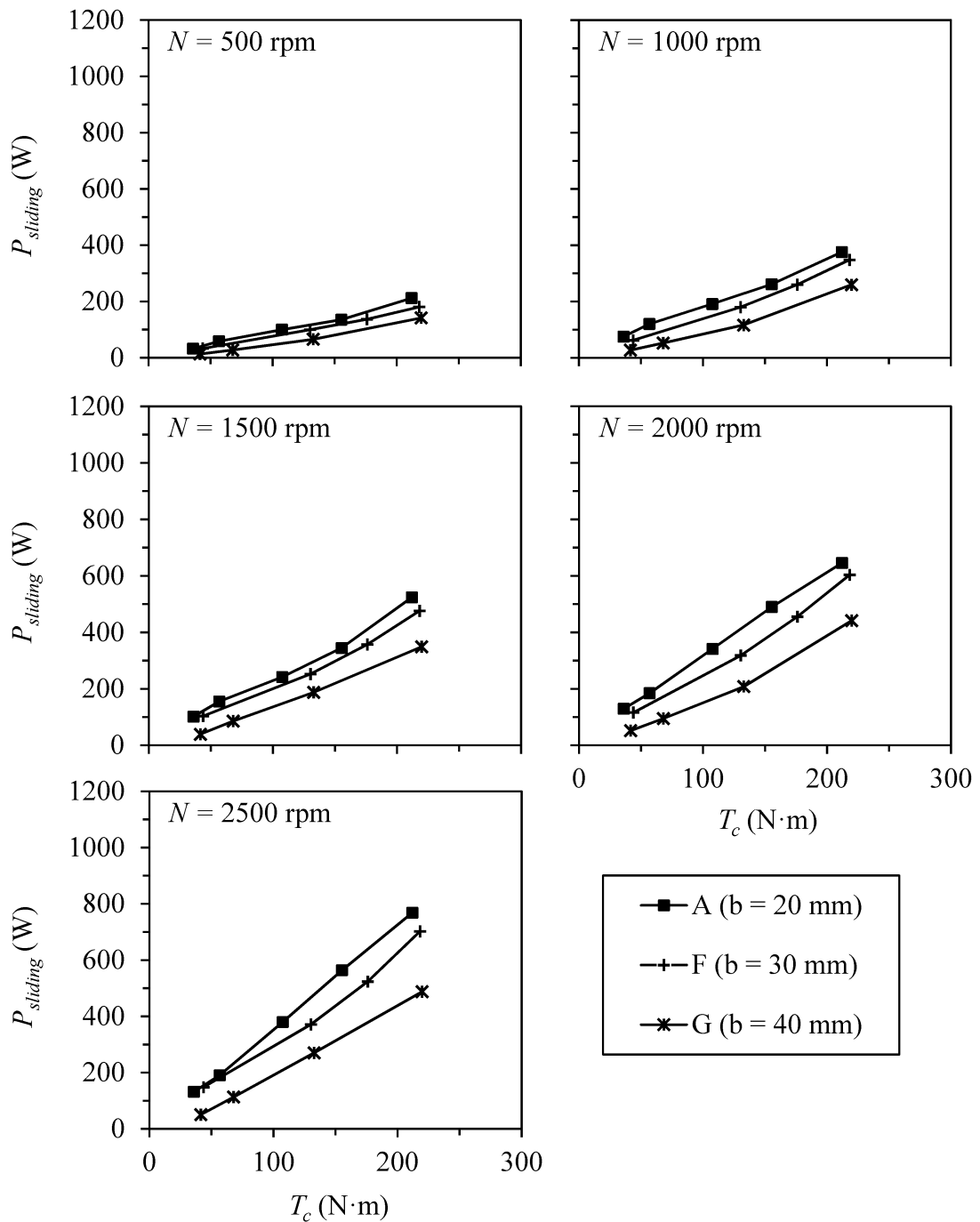
การศึกษาอิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถล ทำโดยเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟืองชุดอ้างอิง A ซึ่งมีความกว้างหน้าฟัน 20 มิลลิเมตร กับเฟืองชุด F ที่มีความกว้างหน้าฟัน 30 มิลลิเมตร และเฟืองชุด G ซึ่งมีความกว้างหน้าฟัน 40 มิลลิเมตร โดยพารามิเตอร์รูปร่างอื่น ๆ เหมือนกันทุกประการ

รูปที่ 4.13 แสดงกำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันแตกต่างกันที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ จากรูปพบว่ากำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟืองทุกชุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบและแรงบิด และมีลักษณะความสัมพันธ์เกือบเป็นเชิงเส้นกับค่าแรงบิดภายในระบบ

เมื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันแตกต่างกัน พบว่ากำลังสูญเสียของคู่เฟืองชุด A ที่มีความกว้างหน้าฟันน้อยกว่ามีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองชุด F และ G ที่มีความกว้างหน้าฟันมากกว่า ตามลำดับ จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าคู่เฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันมากมีกำลังสูญเสียจากการไถลน้อย


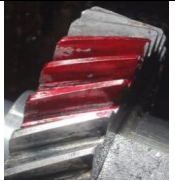

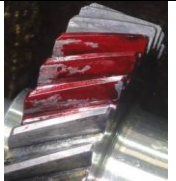









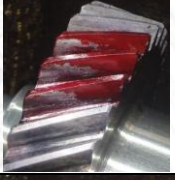
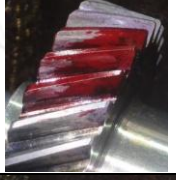


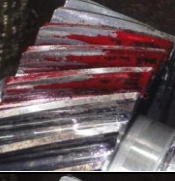
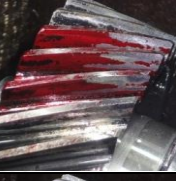





เมื่อพิจารณาลักษณะการสัมผัสของเฟืองทั้ง 3 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าพื้นที่การสัมผัสเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการสัมผัสที่ของหน้าฟันที่มีช่วงแรงบิดใกล้เคียงกันของคู่เฟืองทั้ง 3 ชุด พบว่าในกรณีที่ไม่ให้แรงบิด เฟืองชุด G มีการสัมผัสหน้าฟันที่น้อยกว่าคู่เฟืองชุด A และ F ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบช่วงแรงบิดอื่น ๆ พบว่าการสัมผัสหน้าฟันของเฟืองชุด A ค่อนข้างเต็มหน้าฟัน เมื่อมีการให้แรงบิดประมาณ 155 นิวตันเมตร ในขณะที่เฟืองชุด F และ เฟืองชุด G ค่อนข้างเต็มหน้าฟัน เมื่อมีการให้แรงบิดประมาณ 218 นิวตันเมตร และ 220 นิวตันเมตร ตามลำดับ สำหรับเฟืองชุด F เฟืองชุด G พบว่าเริ่มสัมผัสบริเวณเส้นพิตช์และขยายออกสู่ด้านแอดเดนดัมและดีเดนดัมเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น

สรุปจากตารางที่ 4.3 พบว่าพื้นที่การสัมผัสของเฟืองชุด G มากที่สุด รองลงมาคือเฟืองชุด F และเฟืองชุด A ตามลำดับ หรือจะได้ว่าเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันมากมีการสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันน้อย แต่ถ้าเปรียบเทียบพื้นที่การสัมผัสเป็นร้อยละของพื้นที่หน้าสัมผัสทั้งหมดจะได้ว่าเฟืองชุด A มากที่สุด รองลงมาคือเฟืองชุด F และเฟืองชุด G ตามลำดับ

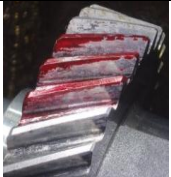




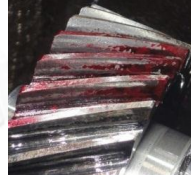
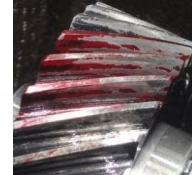



















รูปที่ 4.13 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
A $b = 20 \text{ mm}$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
F $b = 30 \text{ mm}$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
G $b = 40 \text{ mm}$ $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $b = 20 \text{ mm}$ $T_c = 36 \text{ N}\cdot\text{m}$				
F $b = 30 \text{ mm}$ $T_c = 43 \text{ N}\cdot\text{m}$				
G $b = 40 \text{ mm}$ $T_c = 42 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกันที่แรงบิดต่าง ๆ (ต่อ)

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
A $b = 20 \text{ mm}$ $T_c = 155 \text{ N}\cdot\text{m}$				
F $b = 30 \text{ mm}$ $T_c = 130 \text{ N}\cdot\text{m}$				
G $b = 40 \text{ mm}$ $T_c = 133 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $b = 20 \text{ mm}$ $T_c = 212 \text{ N}\cdot\text{m}$				
F $b = 30 \text{ mm}$ $T_c = 218 \text{ N}\cdot\text{m}$				
G $b = 40 \text{ mm}$ $T_c = 220 \text{ N}\cdot\text{m}$				

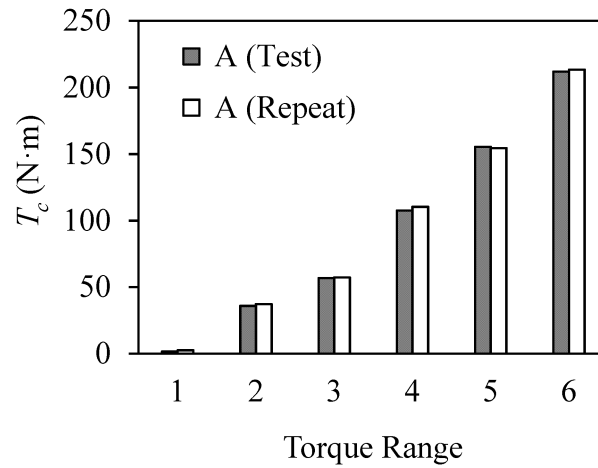
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.4 ผลการทดลองซ้ำ

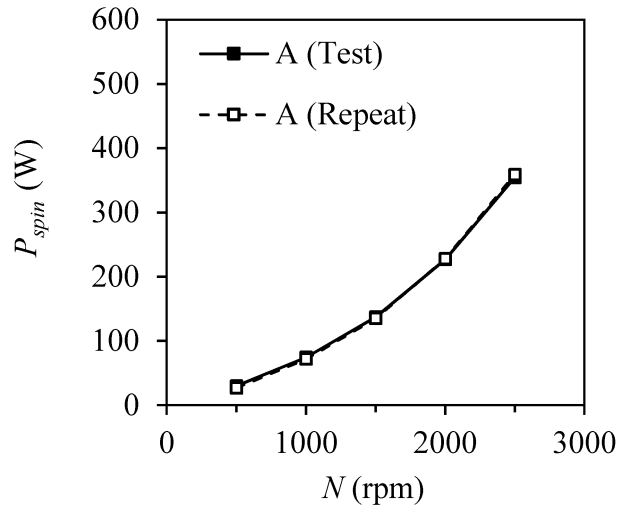
การทดลองซ้ำทำเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ในที่นี้ได้เลือกทำการทดลองซ้ำในชุดเฟืองทั้งหมด 3 ชุด ได้แก่ เฟืองชุด A เฟืองชุด C และเฟืองชุด D หลังจากทำการทดลองในเฟืองชุดต่าง ๆ ครบถ้วนทั้งหมดแล้ว

ผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด A แสดงในรูปที่ 4.14 - รูปที่ 4.16 และ ตารางที่ 4.4 โดยรูปที่ 4.14 แสดงแรงบิดระหว่างการทดลองครั้งแรกและการทดลองซ้ำโดยพบว่าแรงบิดมีค่าแทบจะเท่ากัน โดยมีค่าความแตกต่างในช่วงแรงบิดสูงสุดไม่เกิน 3 นิวตันเมตร ส่วนผลการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่ามีค่าความแตกต่างสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 5 วัตต์ และกำลัง

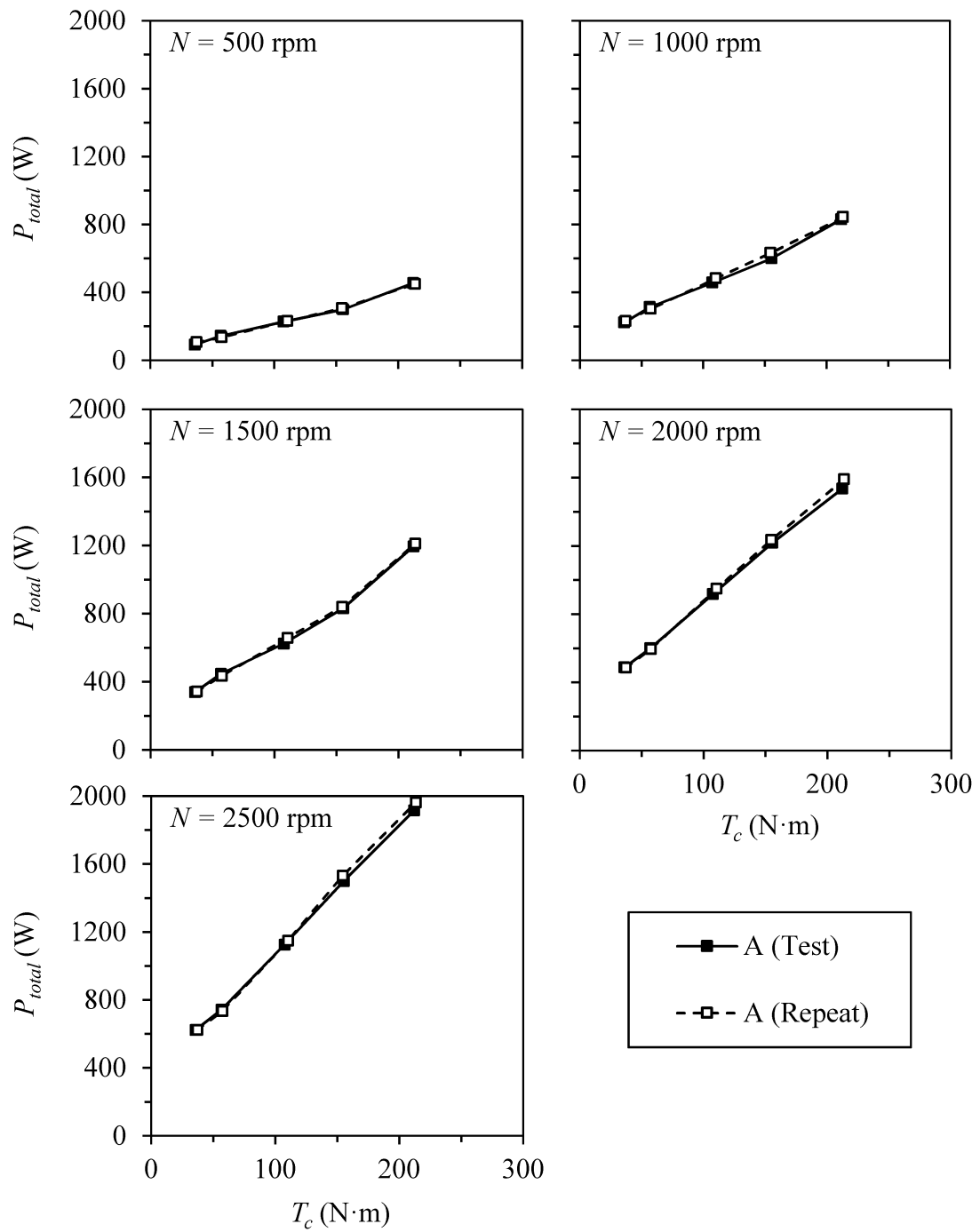
สูญเสียรวมของระบบแสดงรูปที่ 4.16 พบว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดประมาณ 55 วัตต์ และผลการเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสจากการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ามีลักษณะการสัมผัสใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบแรงบิดของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A





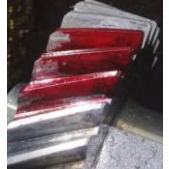
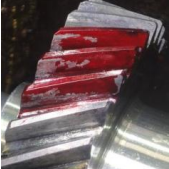





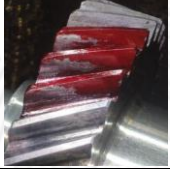



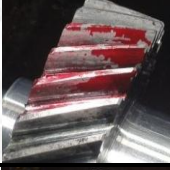



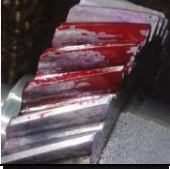
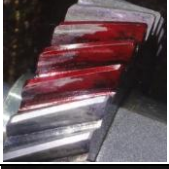



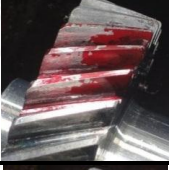









รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A








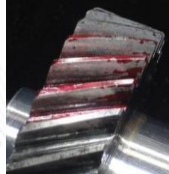






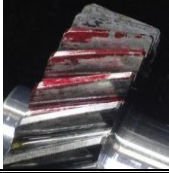



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A



ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A

ชุดเฟือง	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
A $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A_Re $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $T_c = 36 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A_Re $T_c = 37 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $T_c = 57 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A_Re $T_c = 57 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $T_c = 108 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A_Re $T_c = 110 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด A (ต่อ)

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
A $T_c = 155 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A_Re $T_c = 154 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A $T_c = 212 \text{ N}\cdot\text{m}$				
A_Re $T_c = 213 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ส่วนผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด C และเฟืองชุด D จะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด C แสดงในรูปที่ ก.1 - รูปที่ ก.3 และตารางที่ ก.1 ส่วนผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด D แสดงในรูปที่ ก.4 - รูปที่ ก.6 และตารางที่ ก.2 ผลที่ได้ในทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกันมากเช่นเดียวกับกรณีการทำซ้ำของเฟืองชุด A จากผลการทดลองซ้ำทั้งหมดทำให้สามารถยืนยันได้ว่าผลการทดลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

#### 4.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียในขณะไม่มีภาระและขณะมีภาระ การทดลองทำกับเฟือง 7 ชุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟันที่มีต่อกำลังสูญเสียจากการไถล รวมถึงภาพถ่ายแสดงพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองที่แรงบิดและความเร็วรอบต่าง ๆ นอกจากนี้ยังทำการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการทดลองซึ่งในที่นี้ได้เลือกทำการทดลองซ้ำในเฟืองชุด A เฟืองชุด C และ เฟืองชุด D

ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียจากการไถลและผลทดลองวัดพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองสามารถสรุปได้ดังนี้

- เฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์มากจะมีกำลังสูญเสียมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Haizuka และคณะ [7] และ Vaidyanathan [9] แต่ตรงกันข้ามกับผลการทดลองจากงานวิจัยของภูวดล [26]

- เพลงที่มีมุกตบ่น้อยจะมีกำลังสูญเสียมาก ซึ่งตรงกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Vaidyanathan [9] Magalhaes และคณะ [10] ชาคริต [25] และภูวดล [26] และสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Haizuka และคณะ [6] ที่พบว่า เพลงที่มีมุกตบ 25 องศา จะมีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด
- เพลงที่มีความกว้างหน้าพินน้อยมีกำลังสูญเสียมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับผลการทดลองในงานวิจัยของภูวดล [26] แต่ตรงกับผลจากแบบจำลองของภูวดล และไม่ตรงกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Petry-Johnson และคณะ [8] ที่พบว่าความกว้างหน้าพินไม่มีผลต่อกำลังสูญเสีย
- ผลพินที่สัมผัสของเฟืองพบว่าพินที่สัมผัสเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มและสัมผัสเกือบเต็มพินที่แรงบิดสูงสุดในการทดลอง
- เฟืองที่มีมุกฮิลิกซ์มากจะมีการสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีมุกฮิลิกซ์น้อย
- เฟืองที่มีมุกตบ่น้อยจะมีการสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีมุกตบมาก
- เฟืองที่มีความกว้างหน้าพินมากจะมีพื้นที่การสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีความกว้างหน้าพินน้อย
- ผลการทดลองซ้ำมีผลใกล้เคียงกับการทดลองครั้งแรก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของการทดลอง

## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

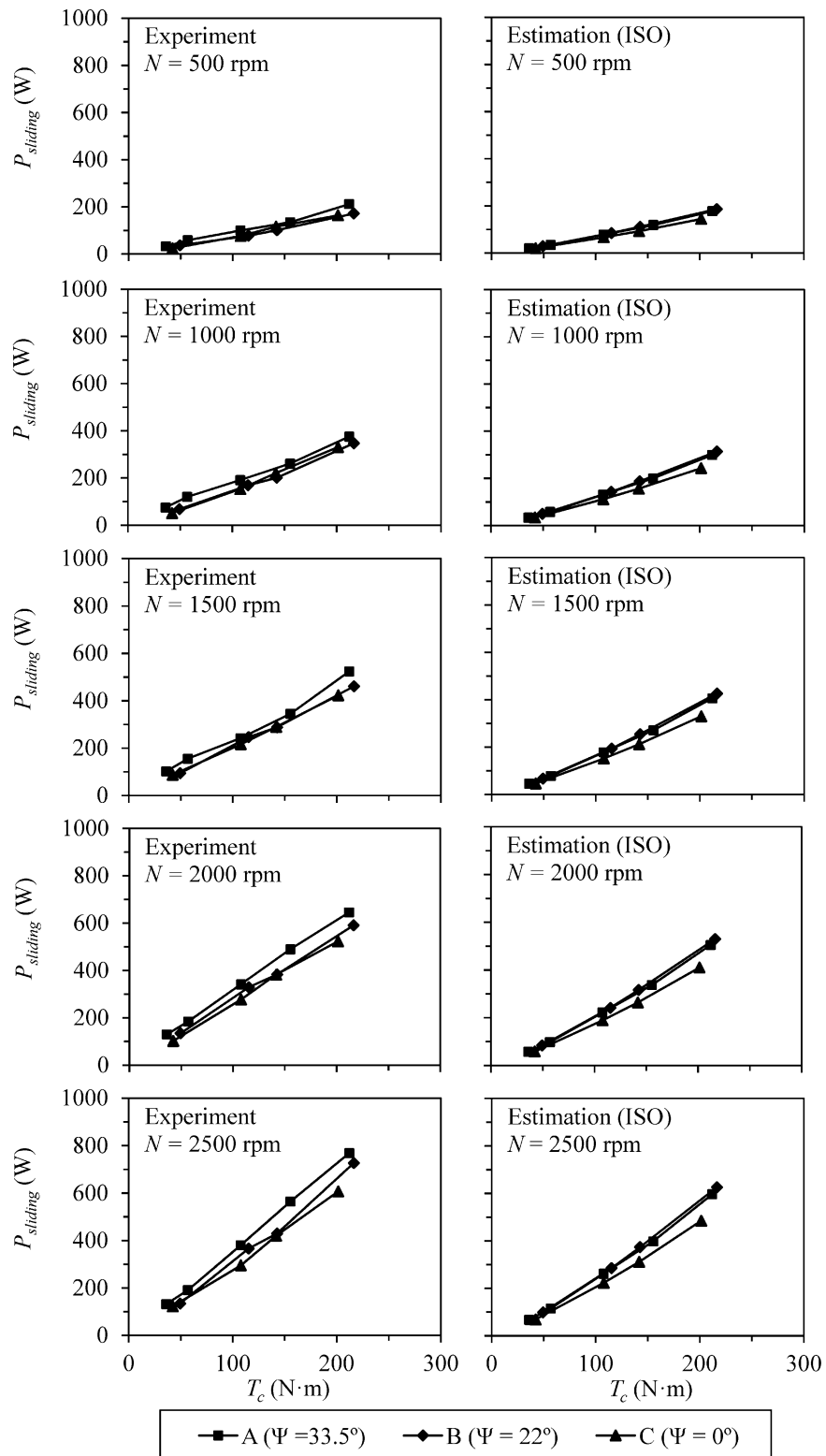
ในบทนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหล ที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลที่วัดได้จากการทดลอง โดยการประเมินกำลังสูญเสียจากการไหลจากแบบจำลองในที่นี่ จะใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งคำนวณจากสูตรสำเร็จซึ่งเสนอโดย ISOTC 60 [12] และ Misharin [13] และ Benedict กับ Kelley [14] ทั้งนี้เนื่องมาจากในการศึกษาที่ผ่านมาของชาคริตและภูวดล [25, 26] พบว่าสมการคำนวณแรงเสียดทานซึ่งเสนอโดย ISOTC 60 และ Misharin ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ส่วนสมการซึ่งเสนอโดย Benedict กับ Kelley ก็ได้ใช้ในการคำนวณในที่นี่เช่นกัน เนื่องจากเป็นสมการที่นิยมใช้กันมากในงานวิจัยอื่น ๆ [3, 18, 20, 24-26] โดยในครั้งแรกของบทจะนำเสนอผลการเปรียบเทียบกับผลการที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองของภูวดล ส่วนในครั้งหลังจะเสนอการคำนวณซึ่งประยุกต์ใช้ผลการสัมผัสมประกอบในแบบจำลองด้วย

#### 5.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของภูวดล

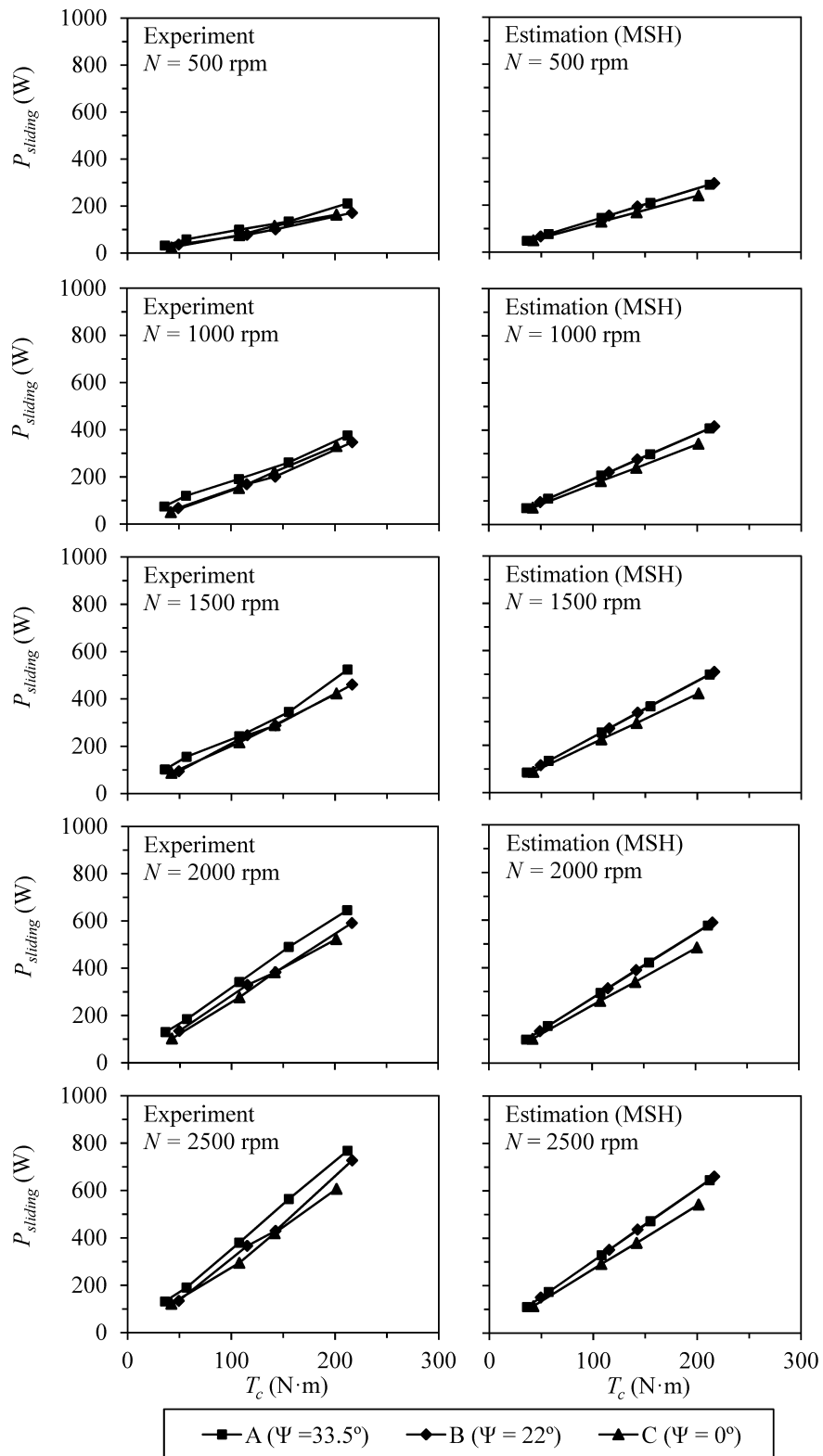
อิทธิพลของพารามิเตอร์เฟืองต่อกำลังสูญเสียทำโดยการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง โดยพารามิเตอร์ที่พิจารณา ได้แก่ ผลของมุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟัน การศึกษานี้ทำให้เห็นแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อกำลังสูญเสีย และตรวจสอบให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการใช้เพื่ออธิบายแนวโน้มและกลไกการเกิดกำลังสูญเสียจากการไหล

##### 5.1.1 อิทธิพลของมุมฮิลิกซ์

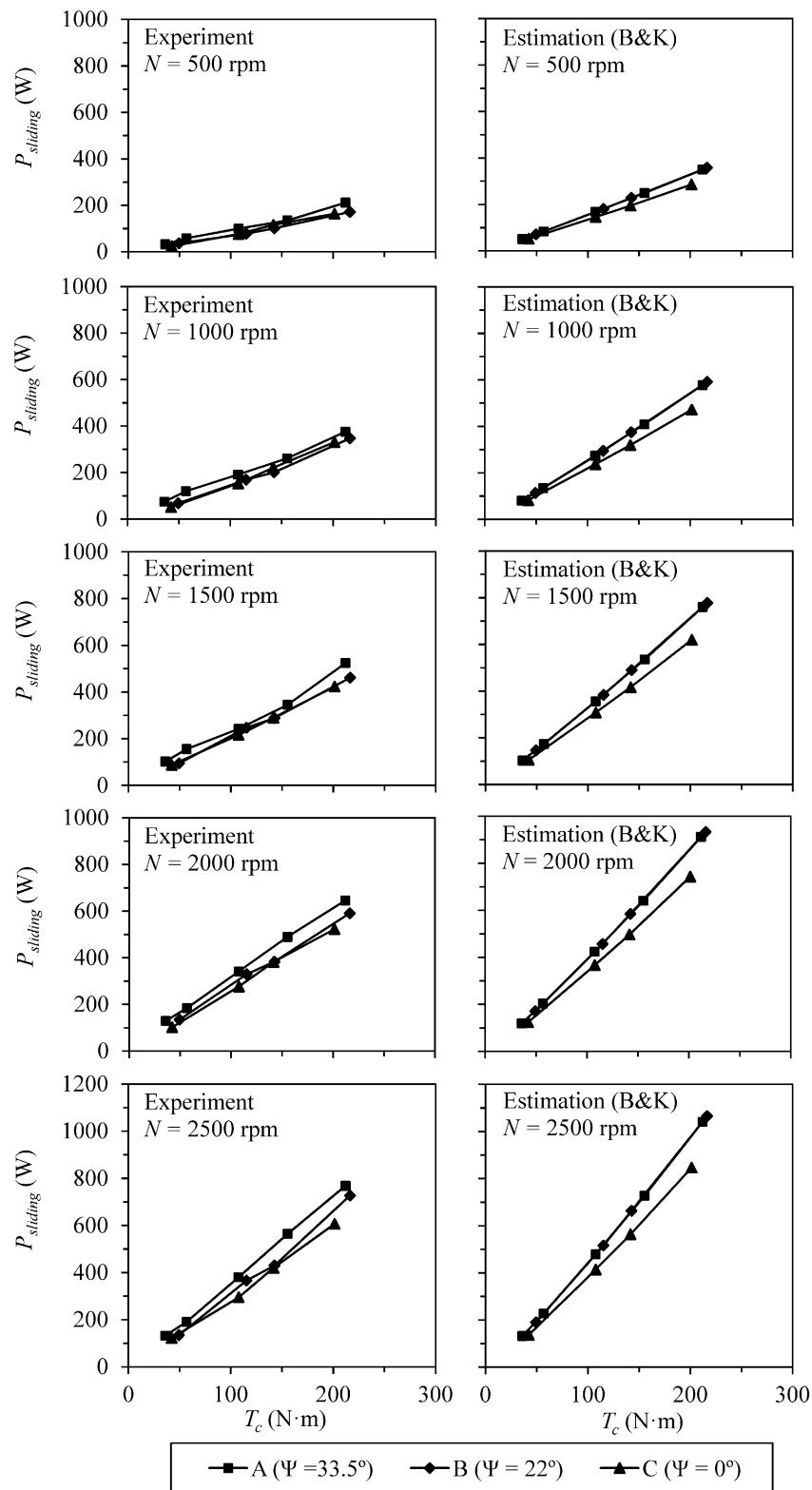
รูปที่ 5.1 - รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและการประเมินจากแบบจำลอง ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ ISOTC 60 [12] และ Misharin [13] และ Benedict กับ Kelley [14] ตามลำดับ โดยรูปทางด้านซ้ายมือของแต่ละรูปแสดงถึงผลการทดลอง ส่วนทางด้านขวามือแสดงถึงผลการประเมินจากแบบจำลอง ผลที่ได้พบว่ามีแนวโน้มไม่สอดคล้องกัน สำหรับการทดลองพบว่าเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์มากมีกำลังสูญเสียจากการไหลมาก ส่วนผลการประเมินจากการใช้สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ ISO TC60 พบว่าเฟืองชุด A ที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา ซึ่งมากกว่าเฟืองชุด B ที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา กลับมีกำลังสูญเสียใกล้เคียงกันและเมื่อความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ขึ้นไปพบว่ากำลังสูญเสียของเฟืองชุด B มีแนวโน้มมากกว่ากำลังสูญเสียของเฟืองชุด A เล็กน้อย สำหรับเฟืองตรงชุด C มีกำลังสูญเสียจากการไหลน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนผลการคำนวณจากสมการของ Misharin และสมการของ Benedict กับ Kelley ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แตกต่างกันตรงที่ขนาดของกำลังสูญเสียที่ประเมินได้เท่านั้น



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลของมุมอีลิคซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60

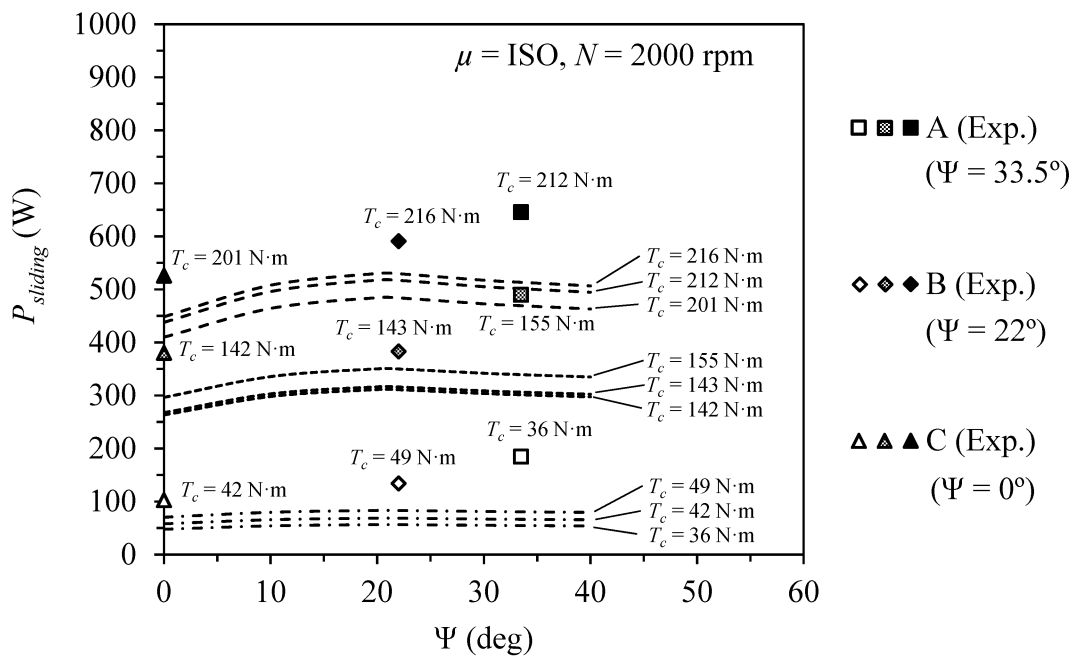


รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin



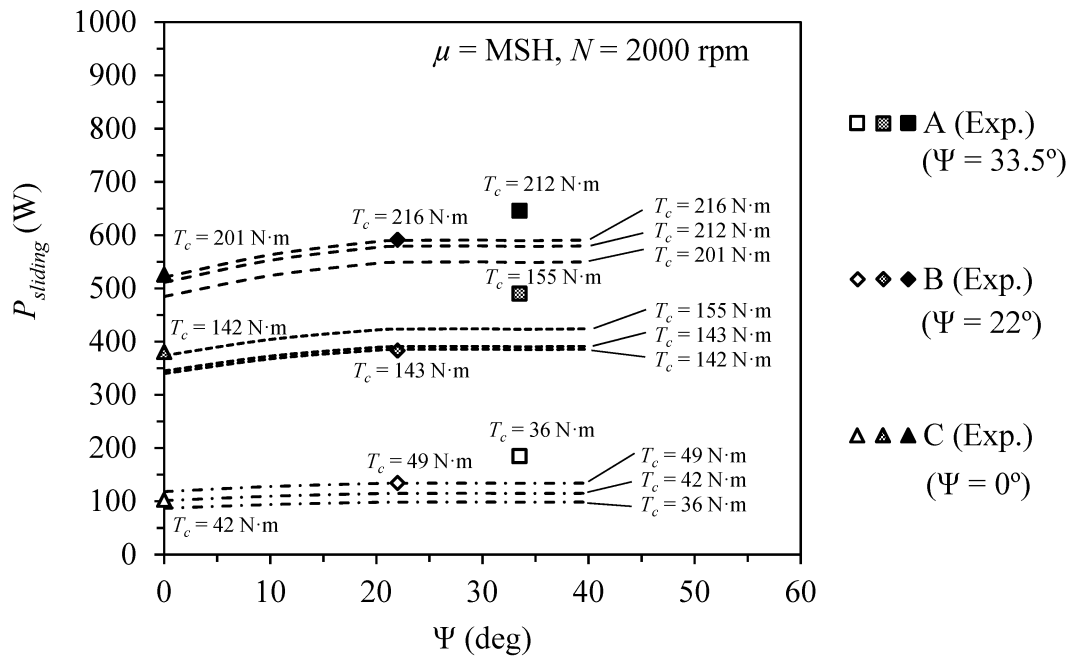
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลของมุมฮีลิคซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley

รูปที่ 5.4 - รูปที่ 5.6 แสดงแนวโน้มกำลังสูญเสียของเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ต่าง ๆ จากผลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ใช้สมการที่เสนอโดย ISO TC60, Misharin และ Benedict กับ Kelley ตามลำดับ โดยแสดงผลที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เครื่องหมายสี่เหลี่ยมมุมฉาก สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน และสามเหลี่ยม คือ กำลังสูญเสียจากการทดลองที่แรงบิดต่าง ๆ ส่วนเส้นประ คือ ผลจากการคำนวณเมื่อกำหนดแรงบิดให้มีค่าเท่ากับแรงบิดที่ทำการทดลอง ผลจากการทดลองพบว่ากำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นตามมุมฮิลิกซ์ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลจากการคำนวณ โดยผลจากแบบจำลองจากสมการของ ISO TC60 และ Benedict กับ Kelley พบว่ากำลังสูญเสียค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและสูงสุดที่มุมฮิลิกซ์ 22 องศา และค่อยลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อมุมฮิลิกซ์เพิ่มขึ้น ส่วนผลจากแบบจำลองจากสมการของ Misharin พบว่ากำลังสูญเสียค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และสูงสุดที่มุมฮิลิกซ์ 22 องศา และคงที่เมื่อมุมฮิลิกซ์เพิ่มขึ้น

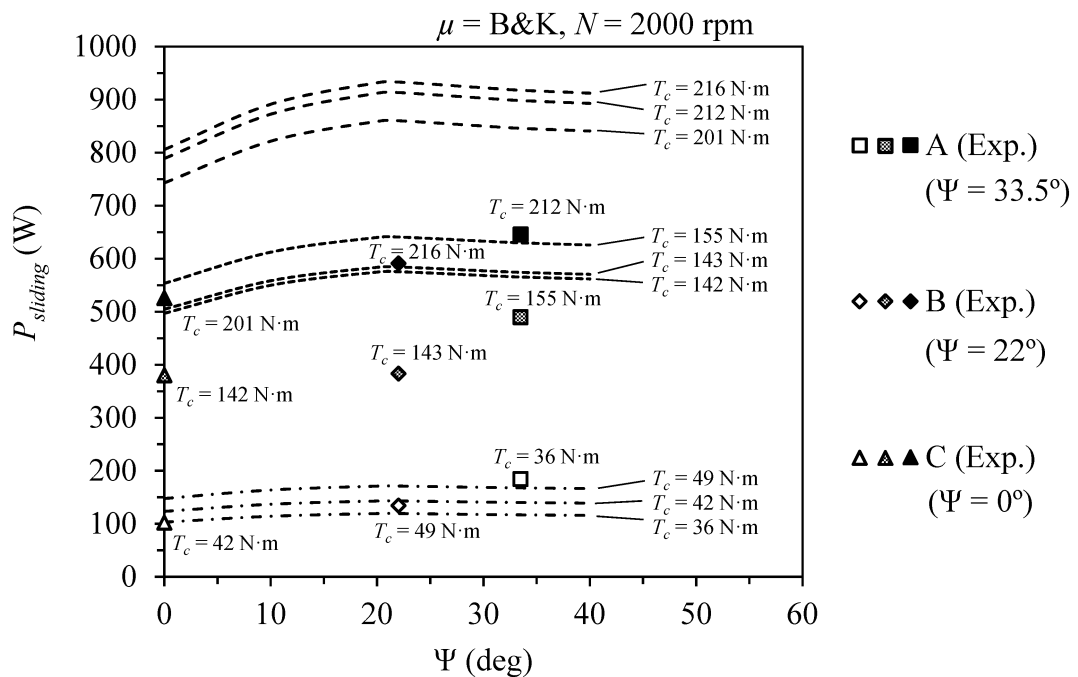


รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60





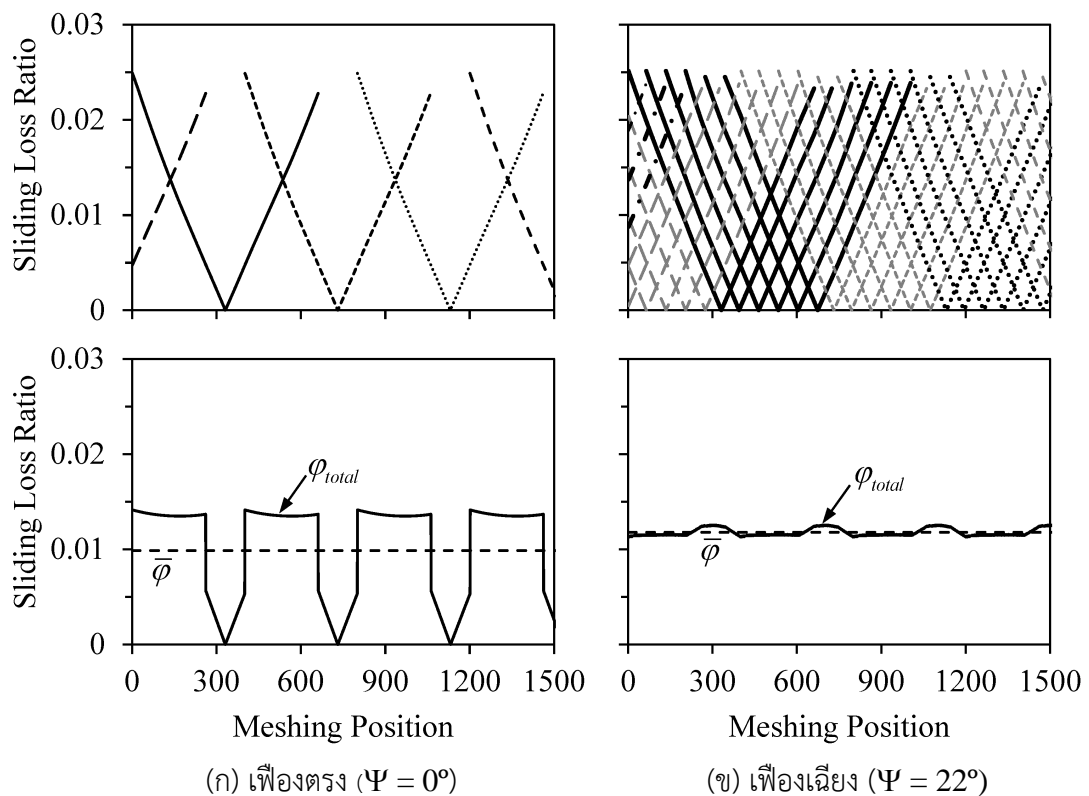
รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมฮิลิกซ์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley

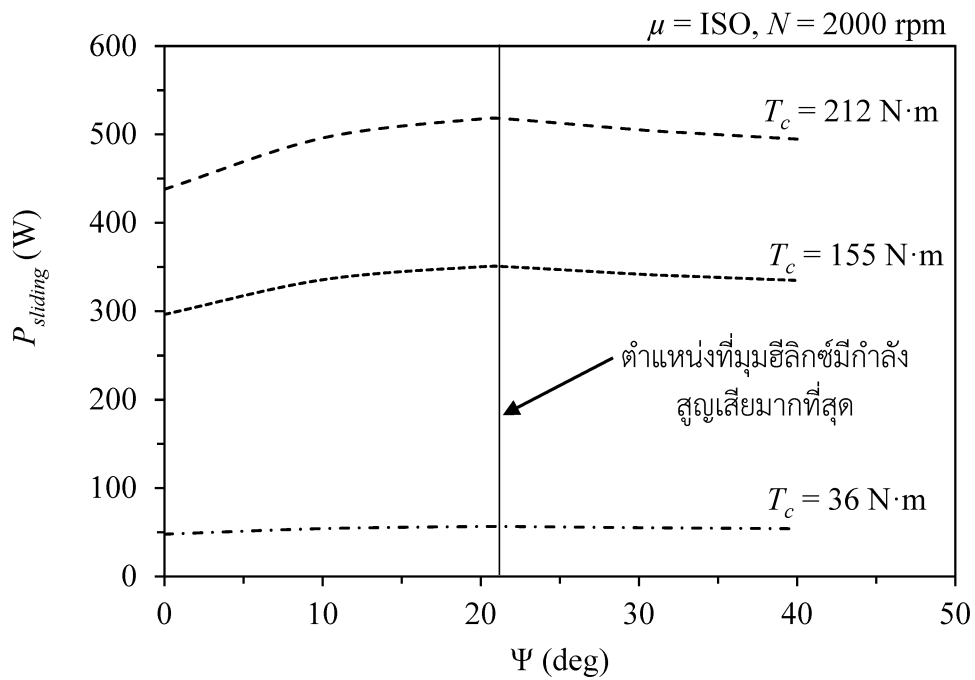
สำหรับสาเหตุที่ทำให้เฟืองตรงมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าเฟืองเฉียง สามารถอธิบายโดยใช้วิธีการประเมินที่แสดงไว้ในบทที่ 3 โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียงแสดงในรูปที่ 5.7

รูปที่ 5.7(ก) และ (ข) แสดงการเปรียบเทียบผลของการคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ตำแหน่งการขบต่าง ๆ ของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง ตามลำดับ โดยด้านบนจะแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองแต่ละคู่ตามลำดับการขบ ส่วนด้านล่างแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมและกำลังสูญเสียเฉลี่ย ในรูปที่ 5.7(ก) ด้านบน กราฟรูปตัววี 1 เส้น คือ อัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันเฟืองตรง 1 คู่ ซึ่งในขณะที่เฟืองตรงขบกันจะมีบางขณะขบ 1 คู่ฟัน และในบางขณะขบ 2 คู่ฟัน ตามลำดับการขบ ซึ่งทำให้บางขณะมีกราฟเพียงเส้นเดียวและบางขณะมีกราฟ 2 เส้นซ้อนกัน ส่วนเฟืองเฉียงจะมีบางขณะขบ 2 คู่ฟัน และในบางขณะขบ 3 คู่ฟัน ตามลำดับการขบ ในที่นี้อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียง 1 คู่ฟันจะสามารถคำนวณมาจากอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงย่อยซ้อนกันเป็นชั้นตามมุมฮิลิกซ์ โดยกลุ่มเส้นแต่ละชนิดแสดงถึงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันเฟืองเฉียง 1 คู่ ดังแสดงดังรูปที่ 5.7(ข) ด้านบน จากรูปจะเห็นได้ว่าเฟืองเฉียงจะมีปริมาณการซ้อนกันของเส้นอัตราส่วนกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองตรง เมื่อนำอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียงมาหาอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวม จะพบว่าเฟืองตรงมีอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ยน้อยกว่าเฟืองเฉียงดังแสดงในรูปที่ 5.7(ก) และ (ข) ล่าง ซึ่งเส้นทึบคืออัตราส่วนกำลังสูญเสียรวม ส่วนเส้นประคืออัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย



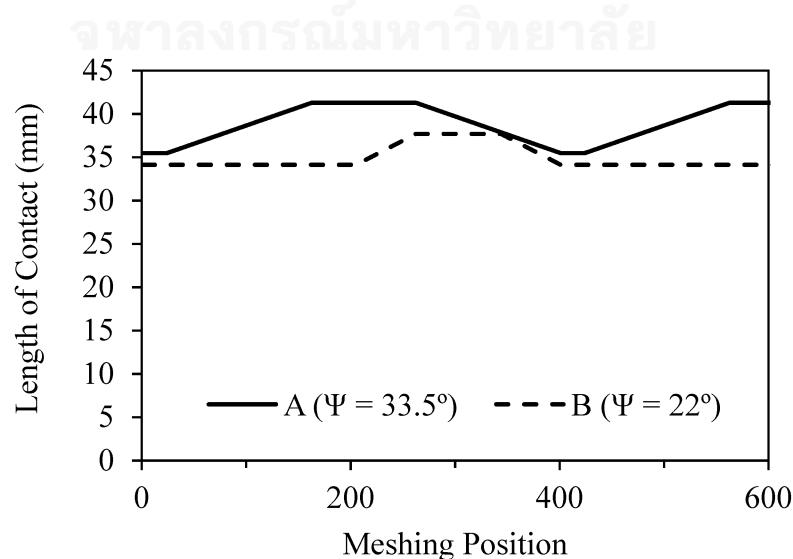
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบผลของการคำนวณอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง

ในกรณีของเฟืองเฉียง จากการประเมินด้วยแบบจำลองพบว่า กำลังสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามมุมฮิลิกซ์ที่เพิ่มขึ้น และจะสูงสุดที่มุมฮิลิกซ์ประมาณ 22 องศา ต่อจากนั้นกำลังสูญเสียก็จะค่อย ๆ ลดลงเล็กน้อยและคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณการซ้อนของอัตราส่วนกำลังสูญเสียจะไม่ต่างกัน ดังจะเห็นได้จากแนวโน้มของกำลังสูญเสียจากการไหลที่ลดลงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แนวโน้มของกำลังสูญเสียจากการไหลต่อมุมฮิลิกซ์

ส่วนสาเหตุที่ทำให้เฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา มีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา ได้แก่ ผลรวมจากความยาวเส้นสัมผัสที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5.9



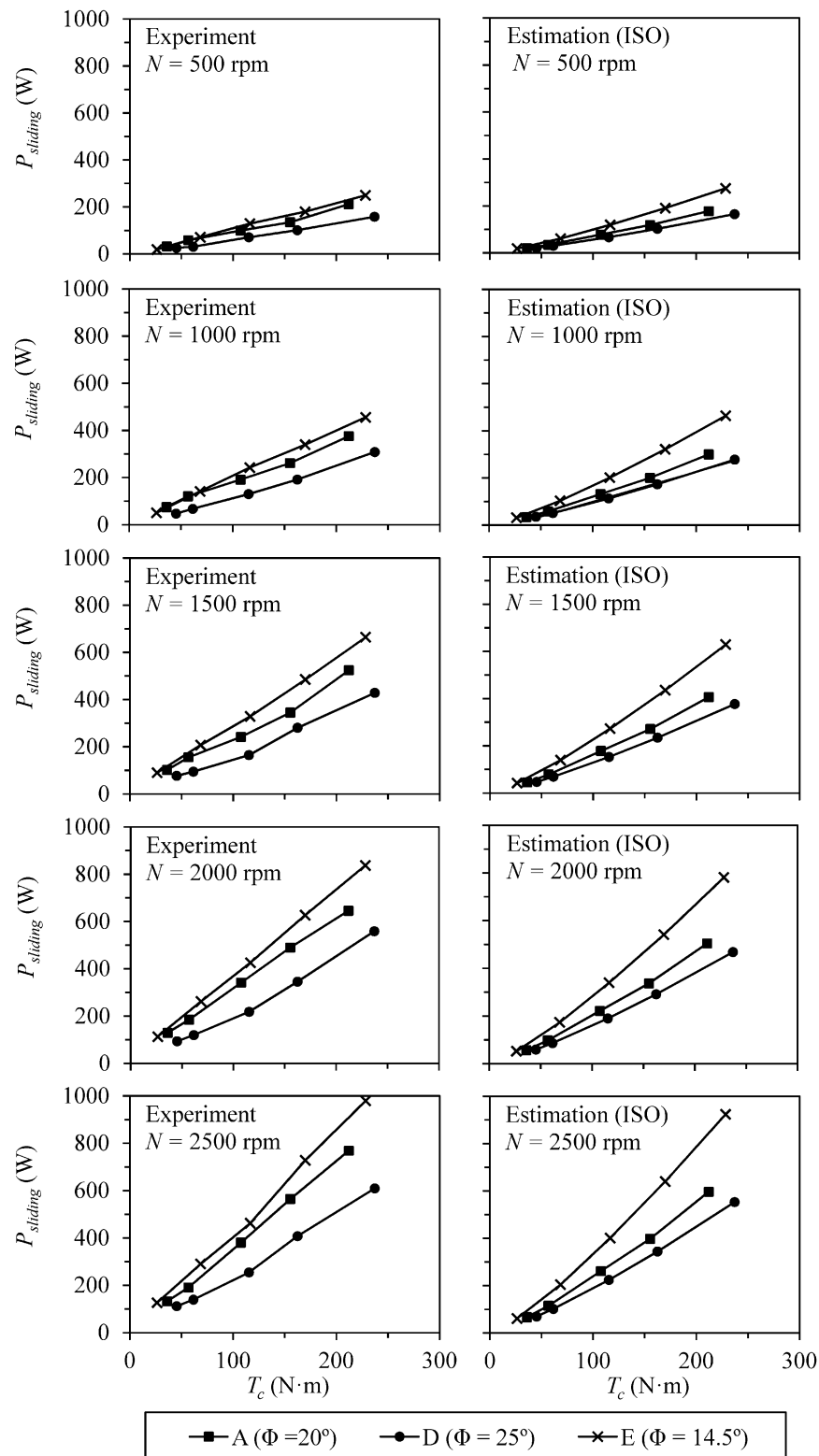
รูปที่ 5.9 ความยาวเส้นสัมผัสของเฟืองที่มีมุมฮิลิกซ์ต่อตำแหน่งการขบ

รูปที่ 5.9 แสดงความยาวเส้นสัมผัสที่ตำแหน่งการขบต่าง ๆ โดยเส้นทึบแสดงเส้นสัมผัสของเฟืองชุด A ที่มีมอดูลีลิกซ์ 33.5 องศา และเส้นประแสดงเส้นสัมผัสของเฟืองชุด B ที่มีมอดูลีลิกซ์ 22 องศา โดยพบว่าเฟืองชุด B มีความยาวเส้นสัมผัสสั้นกว่าเฟืองที่ชุด A ซึ่งจะส่งผลให้เฟืองชุด B มีภาระต่อความยาวเส้นสัมผัสและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่า ทำให้กำลังสูญเสียที่คำนวณได้ของเฟืองชุดที่มีมอดูลีลิกซ์ 22 องศา จะมีค่ามากกว่าเฟืองชุดที่มีมอดูลีลิกซ์ 33.5 องศา สำหรับเฟืองที่มีมอดูลีลิกซ์ค่าอื่น ๆ ก็สามารถพิจารณาได้ทำนองเดียวกัน

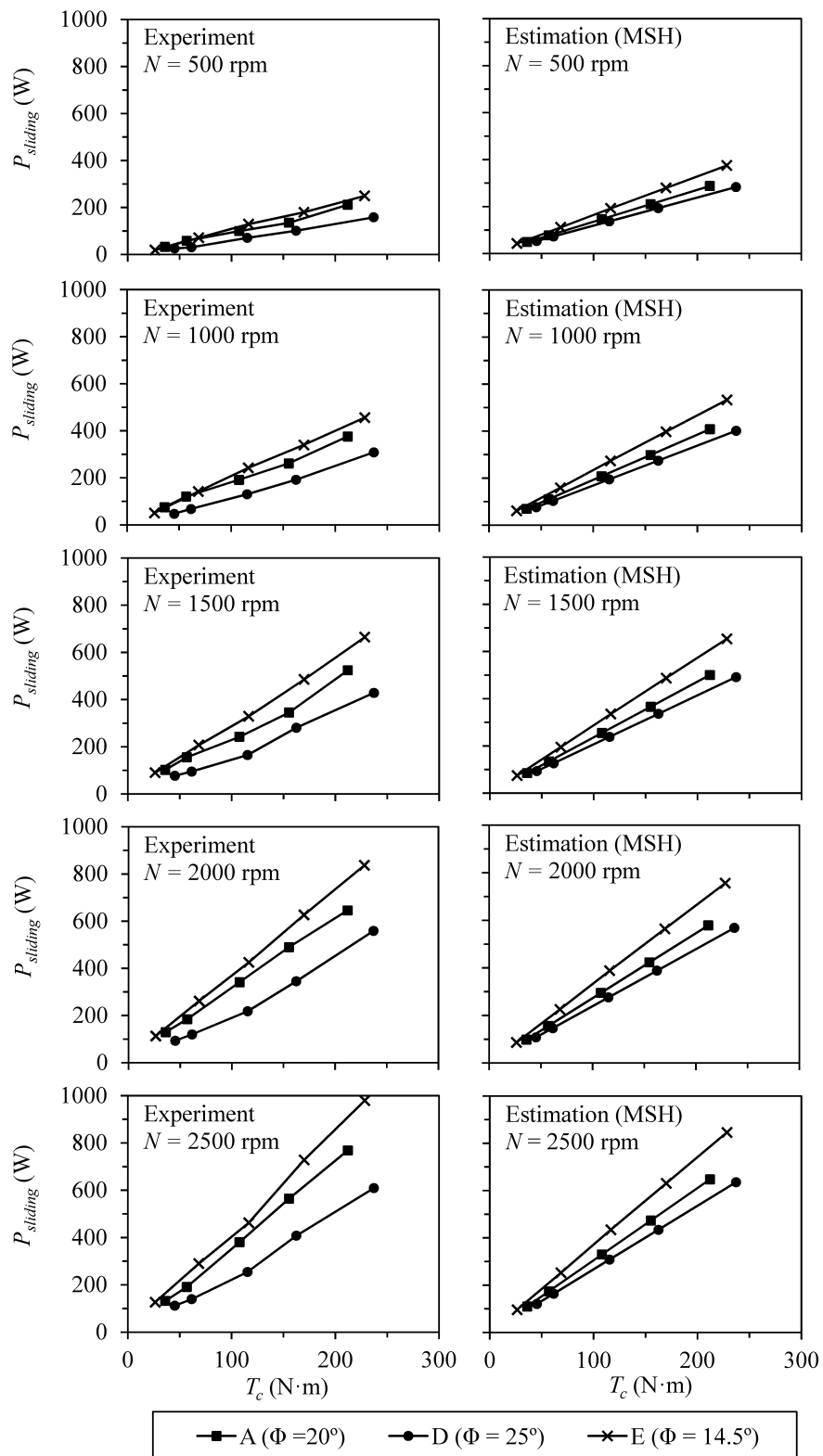
### 5.1.2 อิทธิพลของมุมกด

รูปที่ 5.10 - รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและได้จากแบบจำลอง ซึ่งคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการสำเร็จต่าง ๆ ผลที่ได้พบว่าผลการทดลองและผลจากแบบจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยเฟืองที่มีมุมกดน้อยจะมีกำลังสูญเสียจากการไถลมาก โดยเฟืองชุด E ที่มีมุมกด 14.5 องศา มีกำลังสูญเสียมากที่สุด รองลงมาคือเฟืองชุด A ที่มีมุมกด 20 องศา และเฟืองชุด D ที่มีมุมกด 25 องศา มีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด

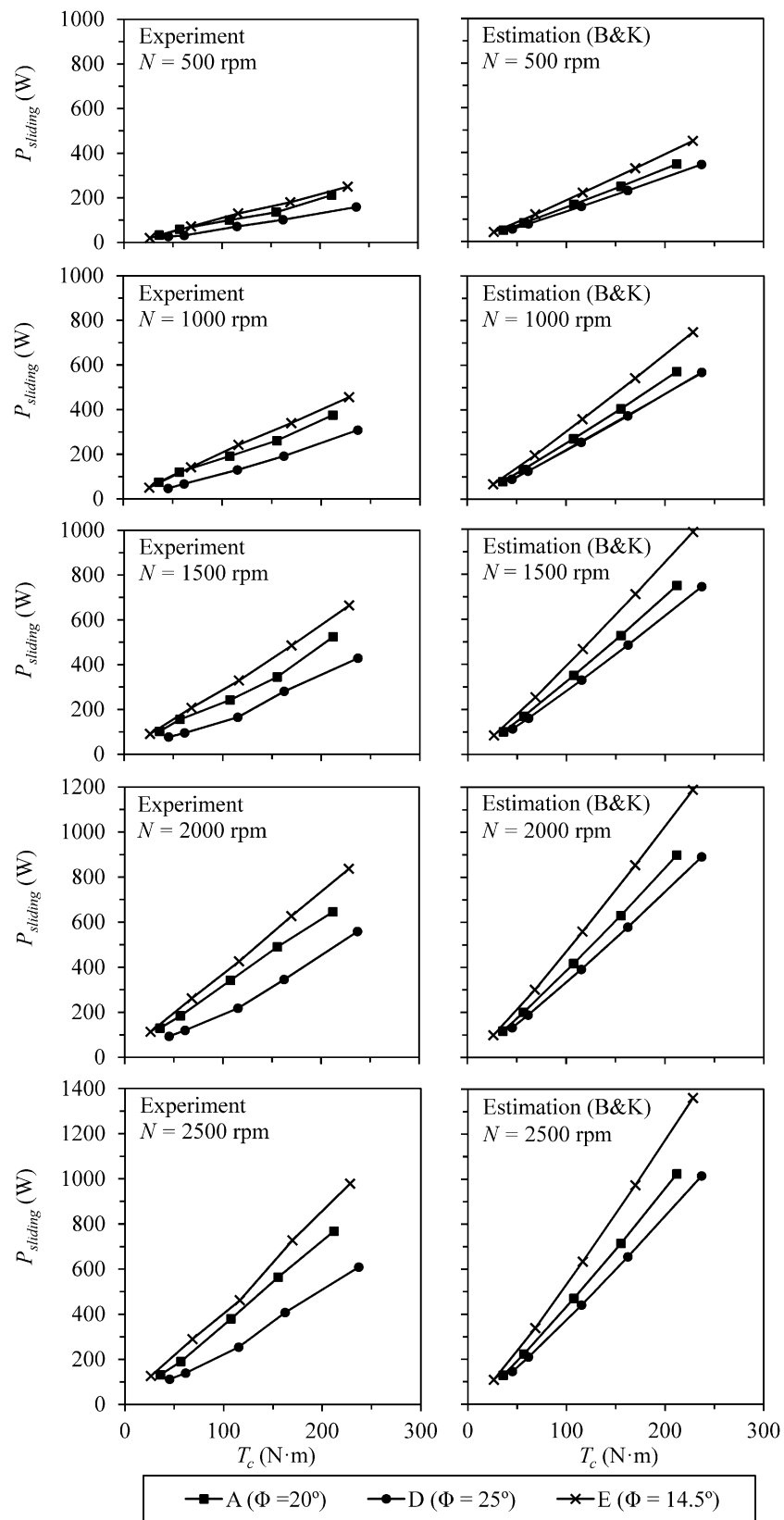
รูปที่ 5.13 - รูปที่ 5.15 แสดงแนวโน้มกำลังสูญเสียของเฟืองที่มีมุมกดต่าง ๆ จากผลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ใช้สมการ ISO TC60, Misharin และ Benedict กับ Kelley ตามลำดับ ทดลองที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที โดยผลจากการทดลองพบว่ากำลังสูญเสียลดลงตามมุมกดที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลจากการคำนวณ



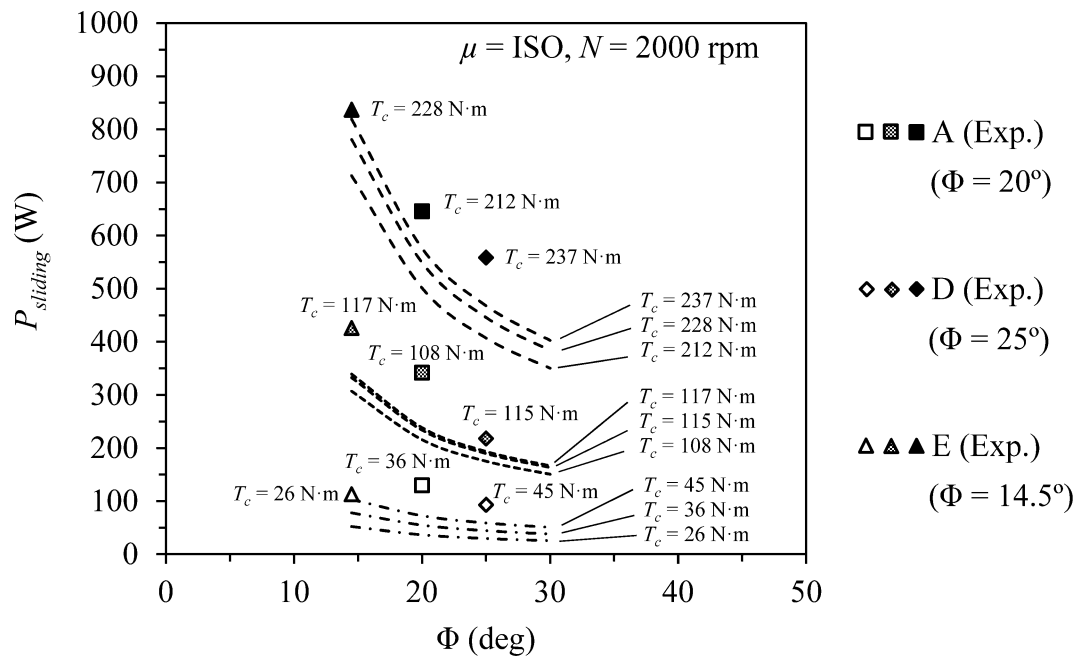
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60



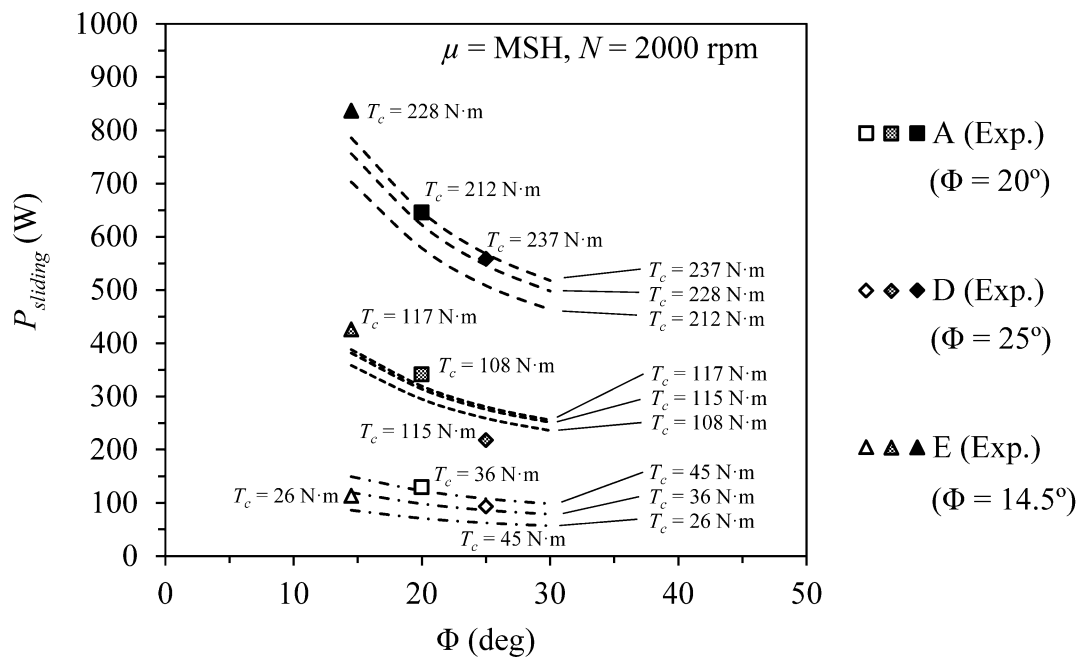
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley

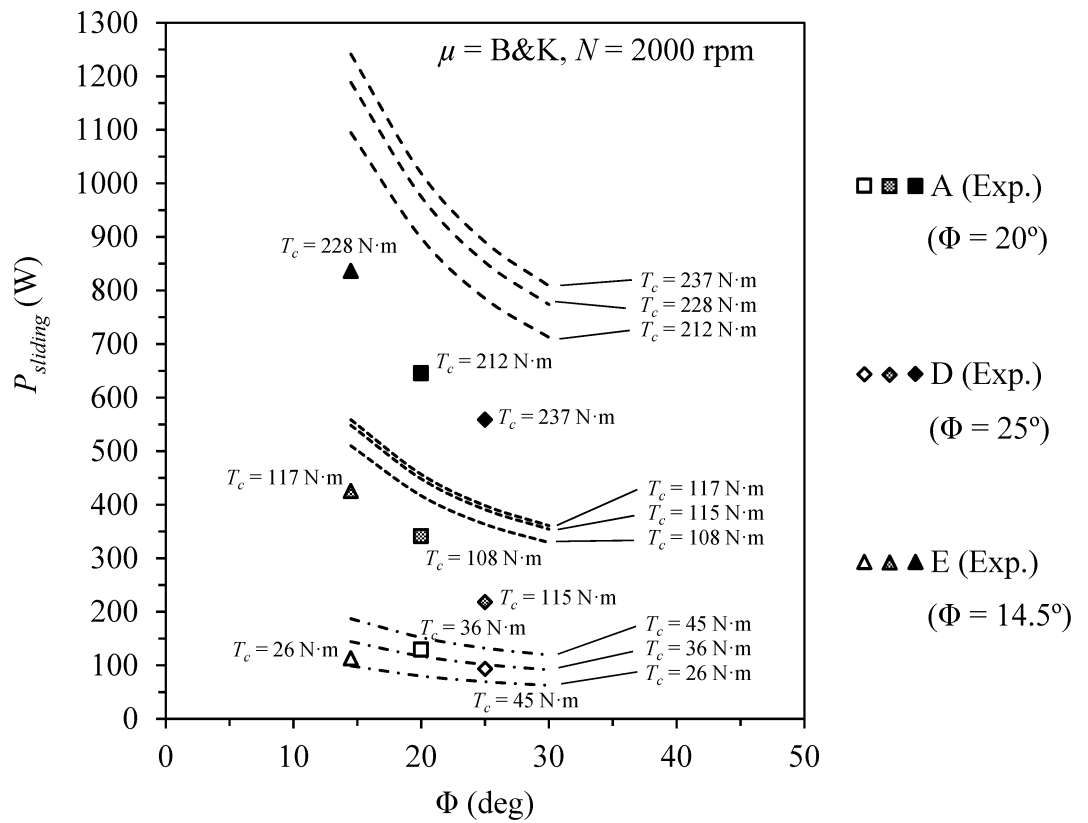


รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60

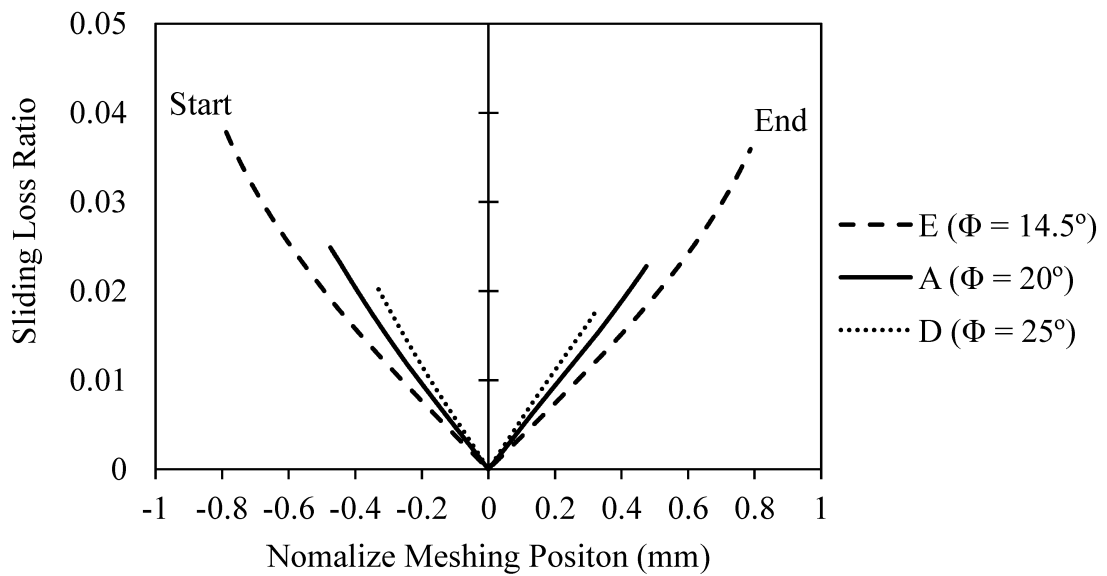


รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบแนวโน้มของมุมกดต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin





รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบแนวโน้มของมูเมนต์ต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงที่มีมูเมนต์ต่างกัน 1 คู่ฟัน

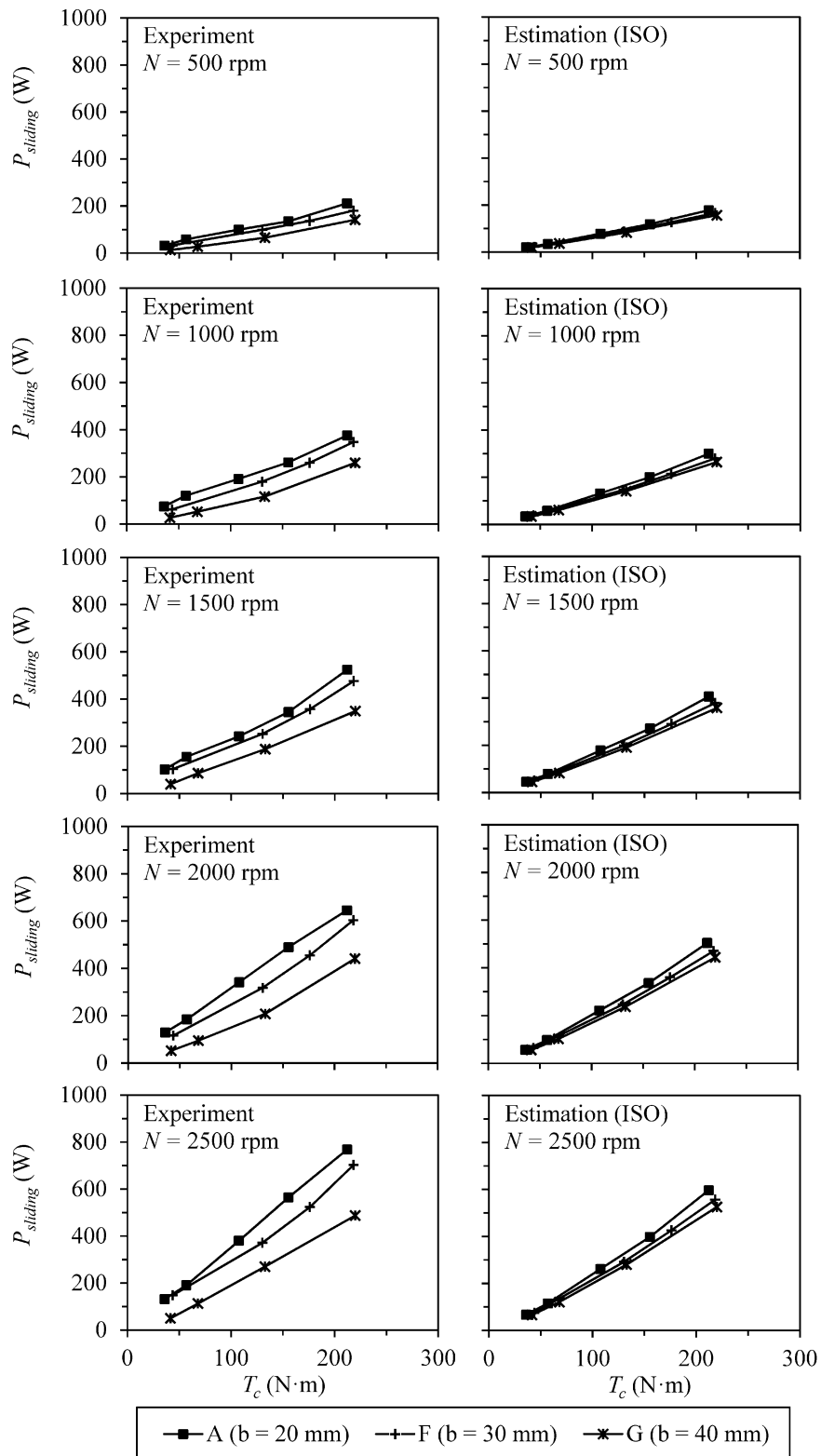
อิทธิพลของมุมมกตที่มีต่อกำลังสูญเสียในกรณีของเฟืองเฉียงสามารถอธิบายโดยใช้หลักการเดียวเฟืองตรง เพียงแต่แบบจำลองของเฟืองเฉียงนั้นจะต้องคำนวณเฟืองตรงย่อยก่อน โดยรูปที่ 5.16 แสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันเฟือง 1 คู่ โดยเส้นประแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ที่มีมุมมกต 14.5 องศา ส่วนเส้นทึบแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ที่มีมุมมกต 20 องศา และเส้นจุดอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ที่มีมุมมกต 25 องศา จากรูปพบว่าระยะการขบจากตำแหน่งขบก่อนจุดพิตช์และตำแหน่งขบหลังจุดพิตช์ของเฟืองชุด E มีความชันของเส้นกราฟน้อยที่สุด แต่มีระยะการขบยาวที่สุด รองลงมาคือเฟืองชุด A และเฟืองชุด D ซึ่งมีความชันของเส้นกราฟมากที่สุด แต่มีระยะการขบสั้นที่สุด

เหตุผลที่ระยะการขบยาวขึ้นจะทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น เพราะวาระยะการขบที่ยาวจะทำให้มีช่วงที่กำลังสูญเสียไปกับแรงเสียดทานมากขึ้น และระยะการขบที่ยาวขึ้นจะทำให้ตำแหน่งการขบก่อนจุดพิตช์และตำแหน่งขบหลังจุดพิตช์นั้นยาวขึ้น ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้สาเหตุที่เส้นอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองที่มีมุมมกตต่างกันจะมีความชันที่แตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากความเร็วในการไหลของฟันเฟืองไม่เท่ากัน ซึ่งมุมมกตมากจะมีความเร็วการไหลมากกว่าเฟืองที่มีมุมมกตน้อย แต่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียรวมน้อยเมื่อเทียบกับผลจากระยะการขบที่เพิ่มขึ้น

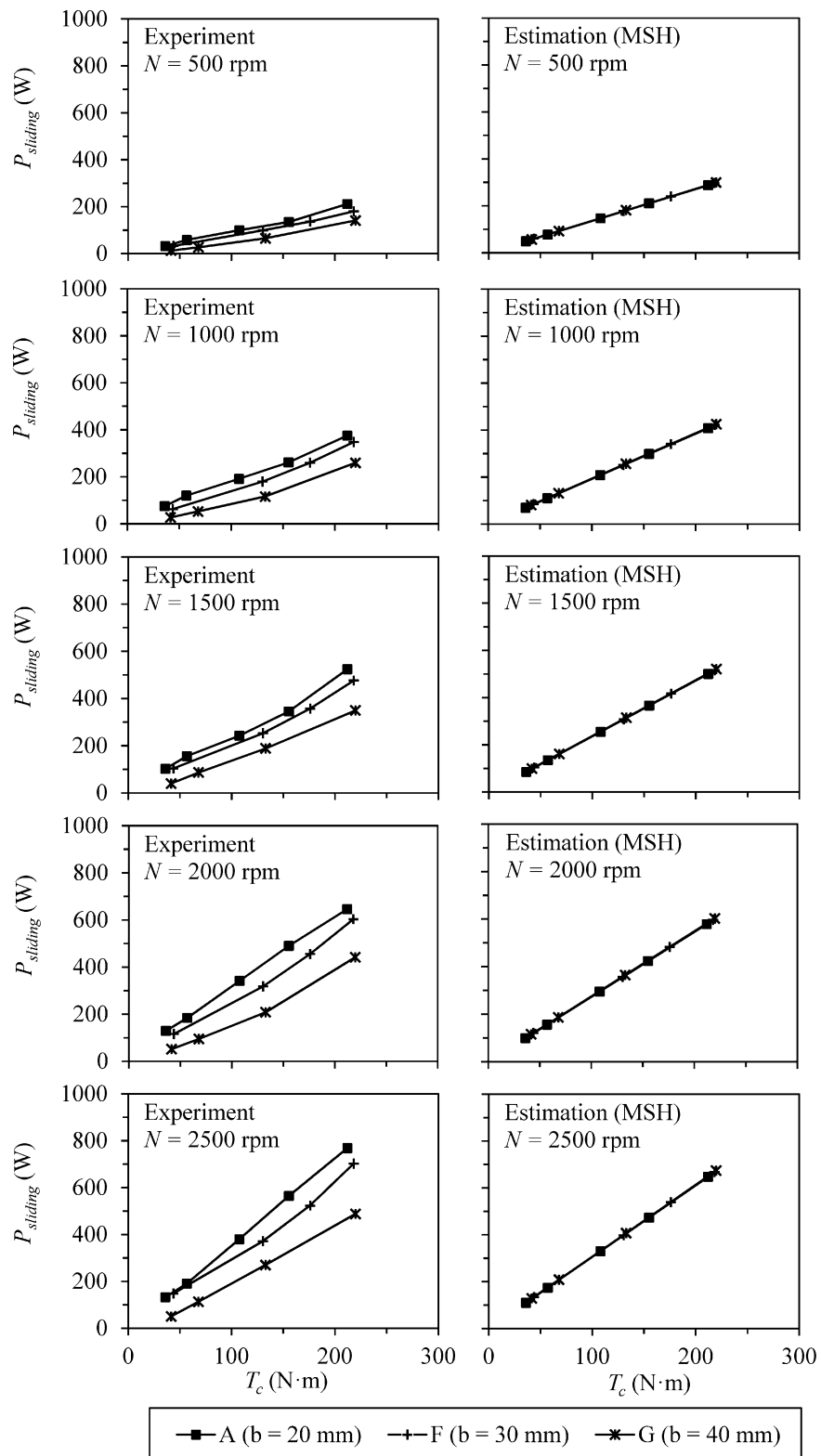
### 5.1.3 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟัน

รูปที่ 5.17 - รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไหลที่ได้จากการทดลองและได้จากแบบจำลอง สำหรับการทดลองพบว่าเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันน้อยมีกำลังสูญเสียมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลจากแบบจำลองที่ใช้สมการของ ISO TC60 และ Benedict กับ Kelley ส่วนผลจากสมการของ Misharin พบว่าไม่สอดคล้องโดยกำลังสูญเสียที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากันทุกความกว้างหน้าฟัน

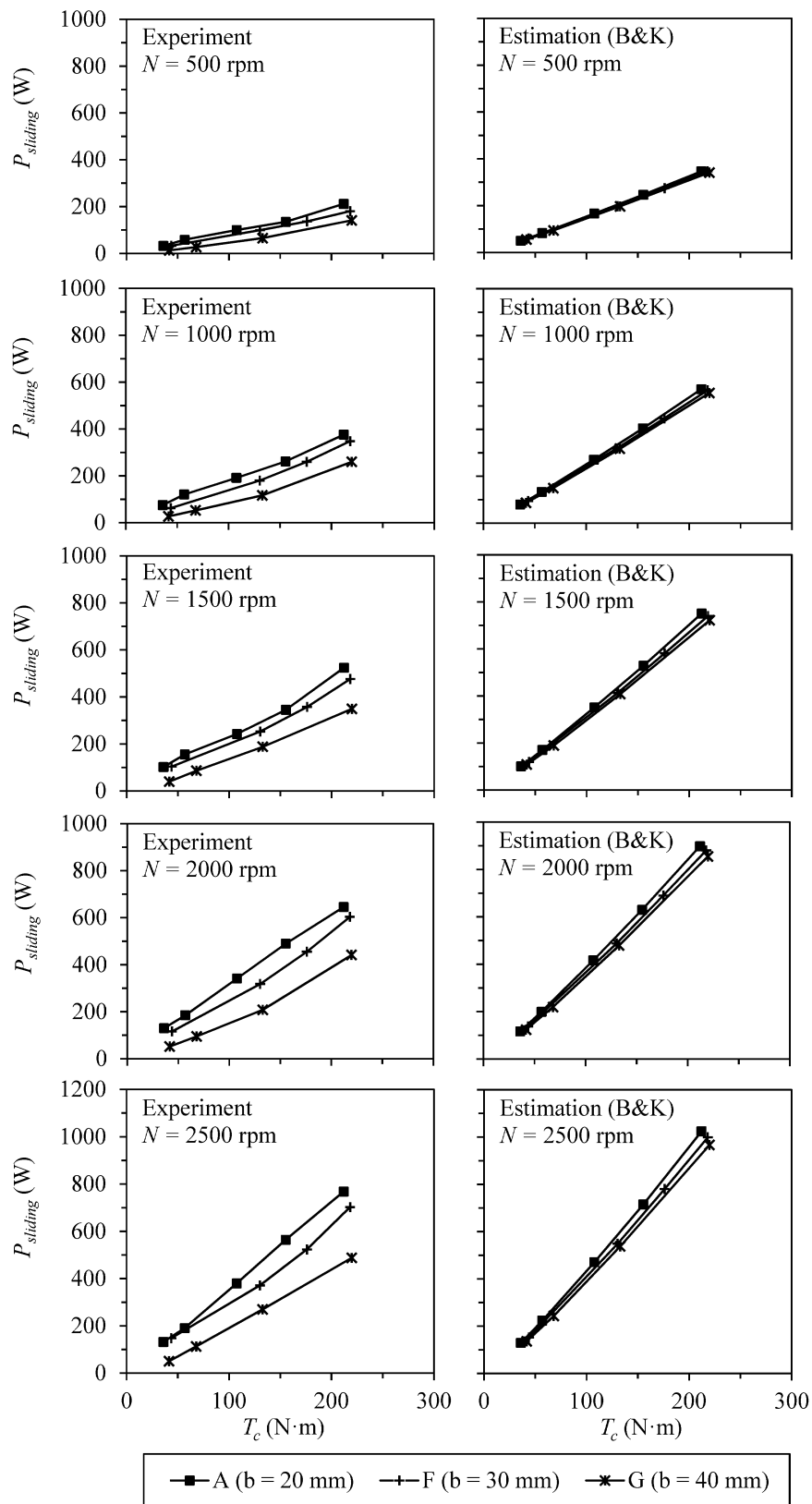
รูปที่ 5.20 - รูปที่ 5.22 แสดงแนวโน้มกำลังสูญเสียของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่าง ๆ ผลจากการทดลองพบว่ากำลังสูญเสียลดลงตามความกว้างหน้าฟันที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลจากการคำนวณจากแบบจำลองที่ใช้สมการของ ISO TC60 และ Benedict กับ Kelley ส่วนผลจากแบบจำลองที่ใช้สมการของ Misharin พบว่ากำลังสูญเสียไม่เปลี่ยนแปลงตามความกว้างหน้าฟัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสมการของ Misharin ไม่ได้คำนึงถึงภาระต่อความยาวเส้นสัมผัสเหมือนกับสมการของ ISO TC60 และ Benedict กับ Kelley ซึ่งเมื่อความกว้างหน้าฟันมากความยาวเส้นสัมผัสในตำแหน่งการขบต่าง ๆ ก็จะมากดังแสดงในรูปที่ 5.23 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ภาระต่อความยาวเส้นสัมผัสน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 5.24 และทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและกำลังสูญเสียที่คำนวณได้จากแบบจำลองน้อยลงตามไปด้วย



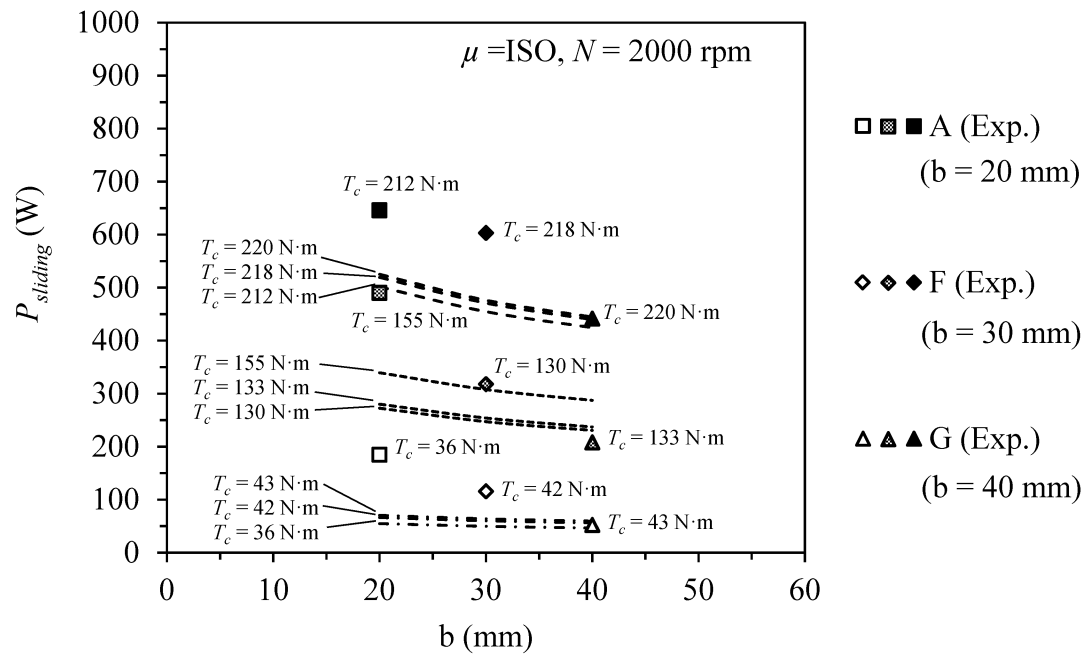
รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบผลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60



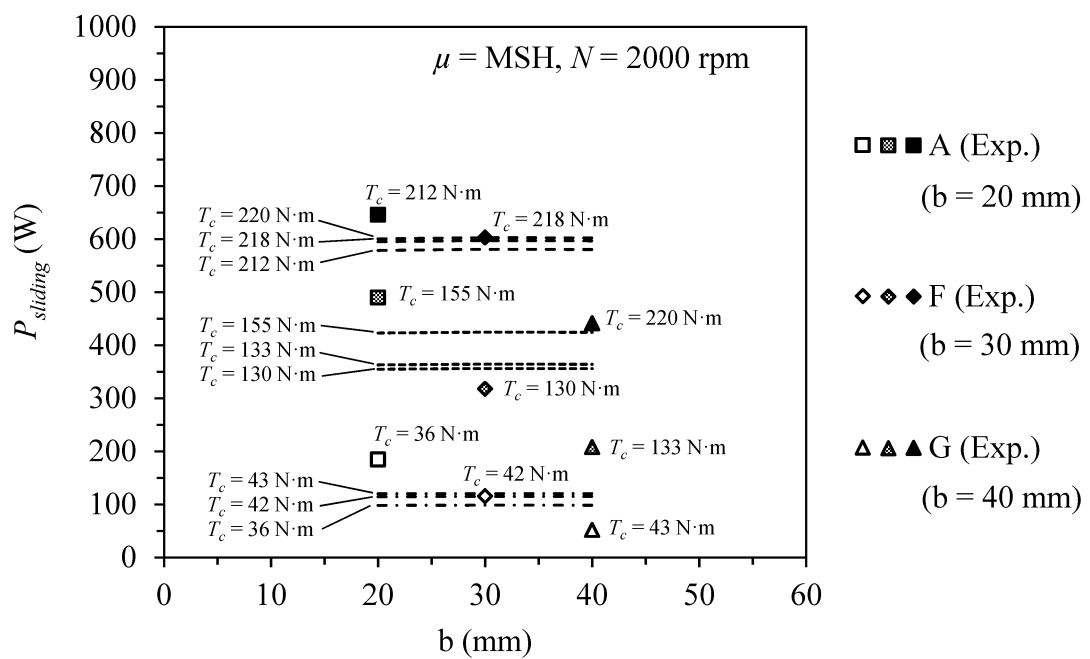
รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบผลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin



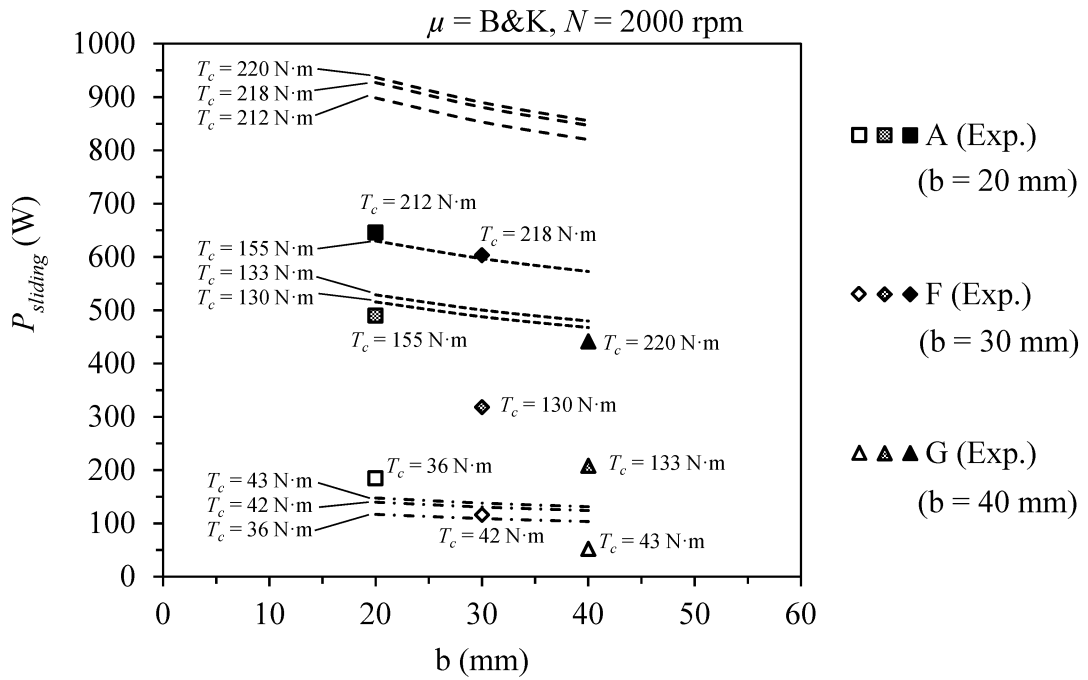
รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบผลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley



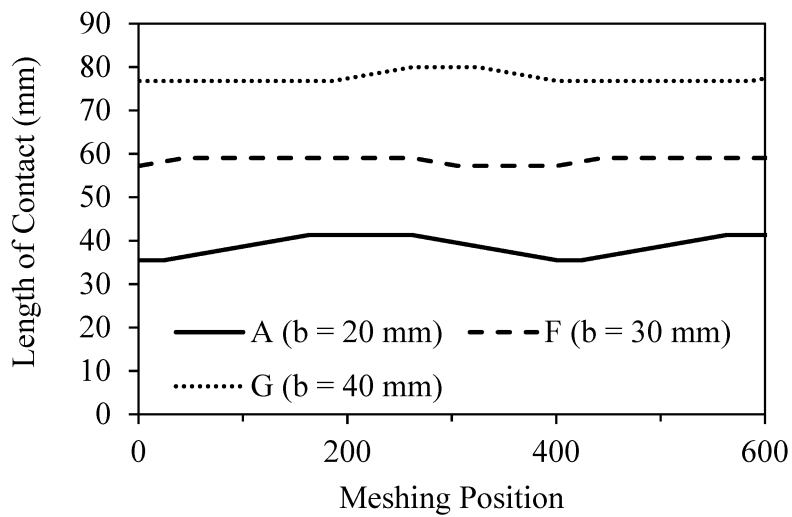
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบแนวโน้มของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60



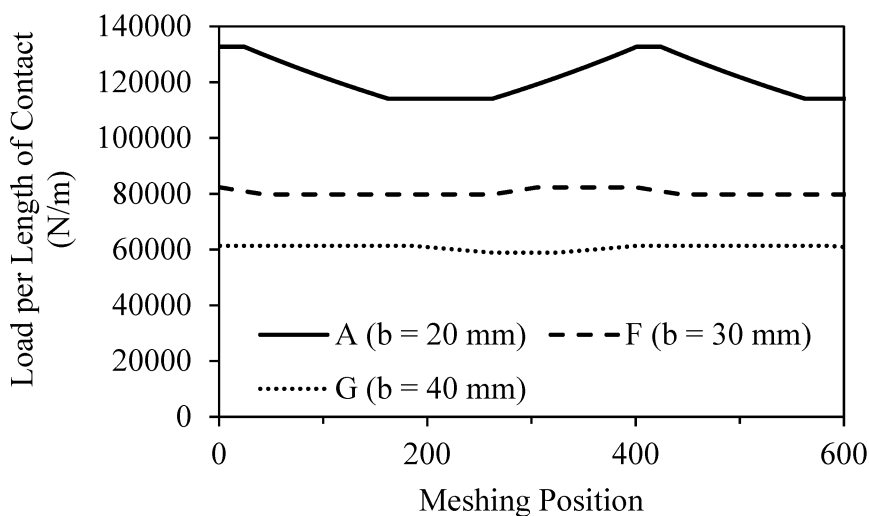
รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบแนวโน้มของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Misharin



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบอิทธิพลของความกว้างหน้าฟันต่อกำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้สมการสำเร็จของ Benedict กับ Kelley



รูปที่ 5.23 ความยาวเส้นสัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน



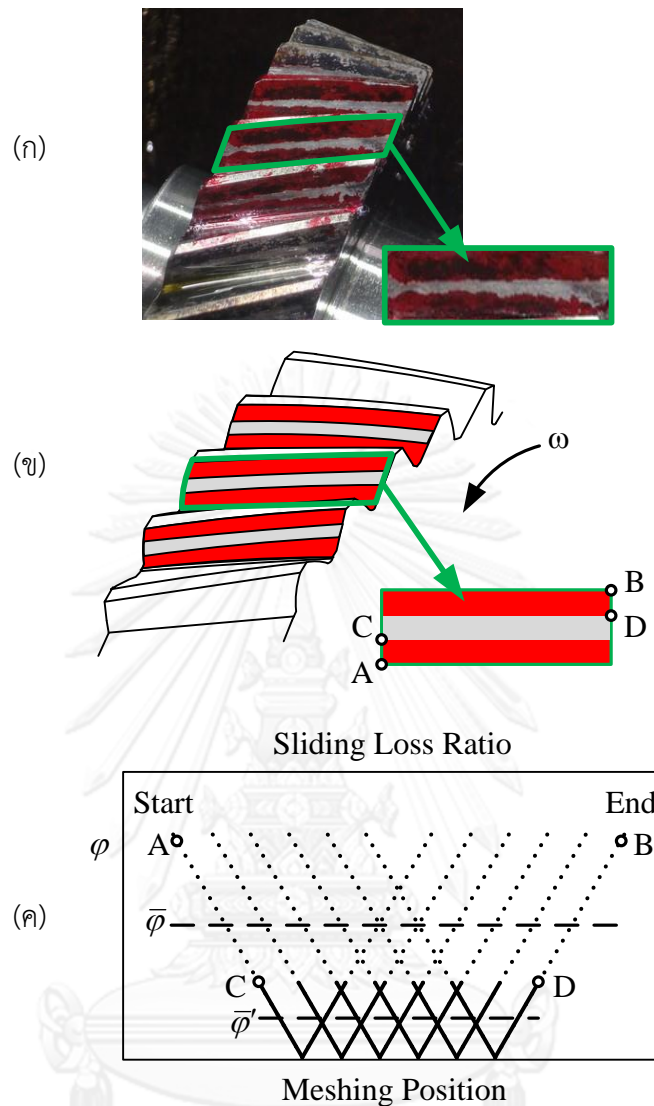
รูปที่ 5.24 ภาระต่อความยาวเส้นสัมผัสของเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน

## 5.2 การประยุกต์ใช้พื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย

ในหัวข้อนี้จะเสนอแนวทางในการใช้พื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อปรับปรุงแบบจำลอง เนื่องจากการประเมินกำลังสูญเสียในหัวข้อ 5.1 ซึ่งเป็นการประเมินโดยใช้แบบจำลองของกฎดล มีสมมุติฐานว่าการสัมผัสของฟันเฟืองระหว่างขบเป็นการสัมผัสแบบเต็มฟัน แต่จากผลการวัดหน้าสัมผัสไม่ได้เป็นไปเช่นนั้น โดยเฉพาะคู่เฟืองที่ทำงานที่แรงบิดไม่สูงมากนัก

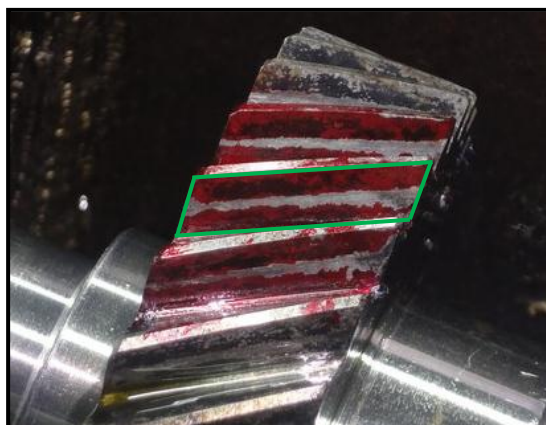
รูปที่ 5.25 แสดงแนวทางการใช้พื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อปรับปรุงแบบจำลอง เพื่อประเมินกำลังสูญเสีย โดยรูปที่ 5.25(ก) แสดงภาพถ่ายพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันของเฟืองขับจากการทดลอง ภาพถ่ายนี้จะใช้เพื่อประมาณพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 5.25(ข) จากรูปที่ 5.25(ข) จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับกรณีการขบเต็มหน้าฟันที่การเริ่มต้นขบเริ่มที่จุด A และสิ้นสุดที่จุด B แล้วการสัมผัสไม่เต็มหน้าฟันระยะที่สัมผัสจะสั้นกว่าโดยจะเริ่มขบจากจุด C และสิ้นสุดที่จุด D หน้าสัมผัสใหม่นี้จะใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 5.25(ค) โดยเส้นทึบคืออัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงจากการสัมผัสจริง  $\varphi'$  ส่วนเส้นจุดคืออัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีการสัมผัสเต็มฟัน  $\varphi$  จากรูปจะพบว่าเมื่อตำแหน่งเริ่มขบและสิ้นสุดการขบเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนกำลังสูญเสียอาจก็เพิ่มขึ้นได้ เพราะเมื่อพื้นที่สัมผัสลดลงจะทำให้การกระจายภาระต่อความยาวเส้นสัมผัสเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงเสียดเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นนี้การประเมินกำลังสูญเสียโดยใช้พื้นที่หน้าสัมผัสจริงจากการทดลองนั้น น่าจะทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าการประเมินโดยใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟัน





รูปที่ 5.25 แนวทางการใช้พื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย

การประมาณพื้นที่หน้าสัมผัสจากผลการทดลองจริงเพื่อใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทำได้โดยการคำนวณหาพื้นที่สัมผัสโดยตัดพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองตำแหน่งละ 1 ฟัน และวัดพื้นที่ที่สีลอกและพื้นที่หน้าฟันทั้งหมด เพื่อนำมาคำนวณหาสัดส่วนของพื้นที่สัมผัสต่อพื้นที่หน้าฟันทั้งหมดขั้นตอนแสดงดังในรูปที่ 5.26 ในการคำนวณพื้นที่สัมผัสจะใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS5 โดยใช้คำสั่ง Perspective Crop Tool เลือกกรอบตัดรูปตามขนาดและรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งคำสั่งนี้จะปรับให้พื้นที่เปลี่ยนเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ต่อจากนั้นใช้คำสั่ง Ruler Tool วัดพื้นที่ที่สีลอกและพื้นที่หน้าฟันทั้งหมด เพื่อนำมาคำนวณพื้นที่สัมผัสเป็นร้อยละ (%) ของพื้นที่หน้าฟัน



เลือกพื้นที่สัมผัสและปรับให้พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



วัดพื้นที่ที่สกัดออกและพื้นที่หน้าผืนทั้งหมด

$$\text{คำนวณพื้นที่สัมผัส (\%)} = (\text{พื้นที่ที่สกัดออก} / \text{พื้นที่หน้าผืนทั้งหมด}) \times 100$$

รูปที่ 5.26 ขั้นตอนการคำนวณพื้นที่สัมผัสอย่างง่ายของฟืนเฟือง

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณหาพื้นที่หน้าสัมผัสตำแหน่งต่าง ๆ และพื้นที่เฉลี่ยในแต่ละช่วงแรงบิดของเฟืองชุด A - G

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณพื้นที่สัมผัสของพื้นเพื่องแต่ละชุดที่แรงบิดต่าง ๆ










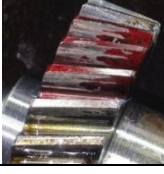
เพื่องชุด	แรงบิด	พื้นที่สัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ (%)				พื้นที่สัมผัสเฉลี่ย (%)
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	
A	36	60	43	22	61	47
	67	79	72	31	68	62
	108	83	76	58	83	75
	155	85	85	64	94	82
	212	88	89	65	93	84
B	49	59	72	55	41	57
	115	84	76	67	43	68
	143	78	80	70	62	73
	216	82	84	78	62	77
C	42	46	54	44	55	50
	108	55	54	53	61	56
	142	56	60	56	54	57
	201	57	63	58	69	62
D	45	27	18	17	24	22
	61	31	21	21	27	25
	115	53	31	35	29	37
	162	54	42	43	50	47
	237	79	76	52	66	68
E	26	74	73	64	77	72
	68	80	86	67	78	78
	117	99	100	97	94	98
	170	100	99	98	95	98
	228	100	100	100	96	99
F	44	37	41	30	49	40
	130	60	64	58	63	61
	176	66	66	65	70	67
	218	61	79	80	93	78
G	42	32	14	30	40	29
	68	44	25	37	42	37
	133	72	53	65	64	63
	220	83	65	83	75	77

ส่วนในตารางที่ 5.2 - ตารางที่ 5.8 จะแสดงภาพถ่ายหน้าสัมผัสของฟันเฟือง และหน้าสัมผัสอย่างง่ายที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสีย โดยพื้นที่โปร่งจะแสดงถึงตำแหน่งที่สัมผัส ส่วนพื้นที่ทึบจะแสดงพื้นที่ที่ไม่มีการสัมผัส พื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายที่วาดขึ้นจะต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะการสัมผัสจริง พื้นที่สัมผัสที่วาดขึ้นจะประมาณเป็นการสัมผัสแบบกลางฟันทั้งหมด ถึงแม้พื้นที่สัมผัสในบางตำแหน่งจะเป็นการสัมผัสที่ขอบด้านซ้ายหรือด้านขวาของหน้าฟันเฟือง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการปรับแนวแกน (alignment error) ความผิดพลาดในการประกอบ หรือเป็นความผิดพลาดในการผลิตเฟือง การประมาณเช่นนี้สอดคล้องกับภาพถ่ายในเกือบทุกกรณี มีเพียงกรณีของเฟืองเฉียงชุด A ชุด B และชุด F ซึ่งจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าเฟืองนั้นไม่ได้สัมผัสตรงกลาง แต่สัมผัสที่ขอบด้านซ้ายหรือด้านขวาของหน้าฟัน ตัวเลขที่แสดงในหน้าสัมผัสอย่างง่ายจะแสดงพื้นที่สัมผัสโดยประมาณที่ใช้ในการคำนวณซึ่งเกือบทั้งหมดจะสอดคล้องกับตารางที่ 5.1 อย่างไรก็ตามในกรณีที่หน้าสัมผัสฟันน้อยกว่า 50% จะทำให้เกิดการขบกันแบบไม่ต่อเนื่องและเกิดการกระแทกขึ้นซึ่งไม่อยู่ในสมมติฐานการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย ในกรณีเหล่านี้จะปรับให้พื้นที่หน้าสัมผัสเพิ่มขึ้นมากกว่า 50% เพื่อให้สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้โดยร้อยละของพื้นที่สัมผัสจริงจะแสดงโดยตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บ

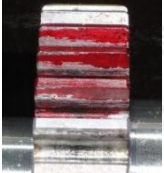
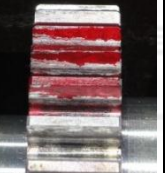
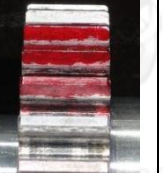
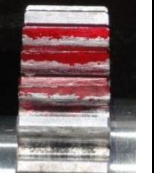

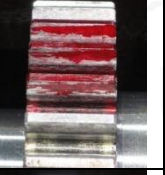

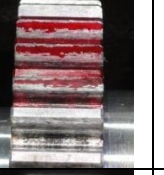
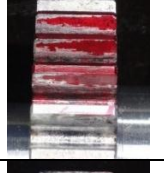


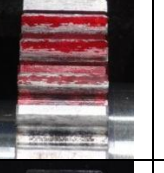


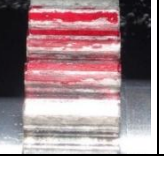
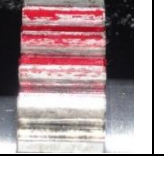
ตารางที่ 5.2 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด A

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
A $T_c = 36 \text{ N} \cdot \text{m}$					
A $T_c = 57 \text{ N} \cdot \text{m}$					
A $T_c = 108 \text{ N} \cdot \text{m}$					
A $T_c = 155 \text{ N} \cdot \text{m}$					
A $T_c = 212 \text{ N} \cdot \text{m}$					

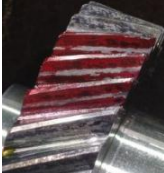
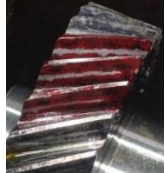


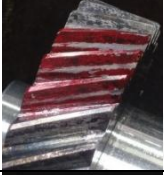
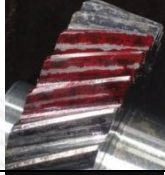
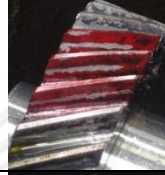
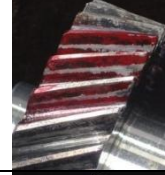
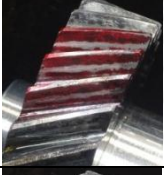
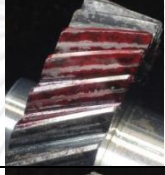
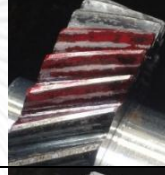



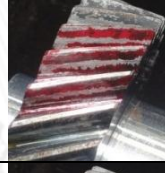
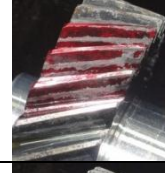



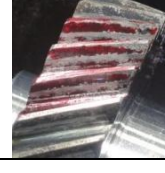
ตารางที่ 5.3 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด B

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
B $T_c = 49 \text{ N}\cdot\text{m}$					57%
B $T_c = 115 \text{ N}\cdot\text{m}$					68%
B $T_c = 143 \text{ N}\cdot\text{m}$					73%
B $T_c = 216 \text{ N}\cdot\text{m}$					77%

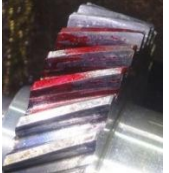
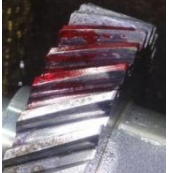
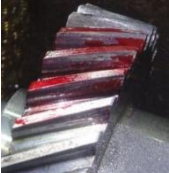
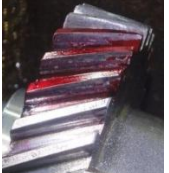
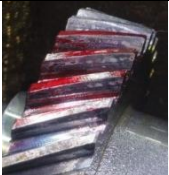
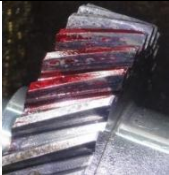
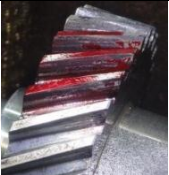
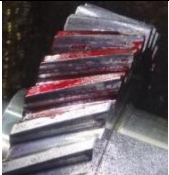
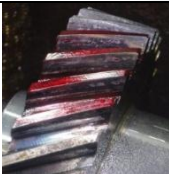

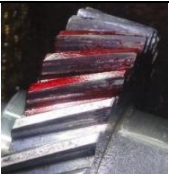
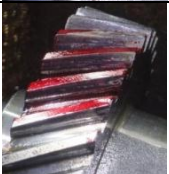


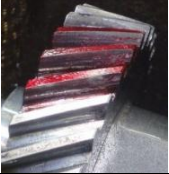
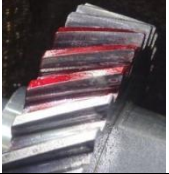


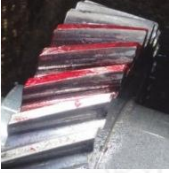

ตารางที่ 5.4 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด C

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
C $T_c = 42 \text{ N}\cdot\text{m}$					30% 50%
C $T_c = 108 \text{ N}\cdot\text{m}$					25% 56%
C $T_c = 142 \text{ N}\cdot\text{m}$					23% 57%
C $T_c = 201 \text{ N}\cdot\text{m}$					21% 62%





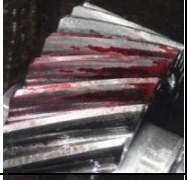






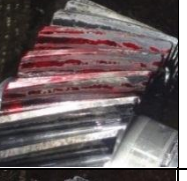
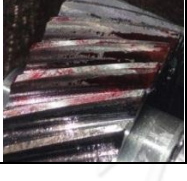


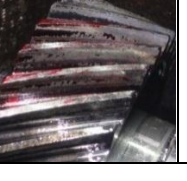
ตารางที่ 5.5 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด D

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
D $T_c = 45 \text{ N}\cdot\text{m}$					50% (22%)
D $T_c = 61 \text{ N}\cdot\text{m}$					53% (25%)
D $T_c = 115 \text{ N}\cdot\text{m}$					55% (37%)
D $T_c = 162 \text{ N}\cdot\text{m}$					57% (47%)
D $T_c = 237 \text{ N}\cdot\text{m}$					68%

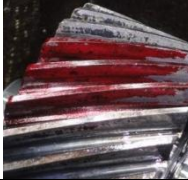






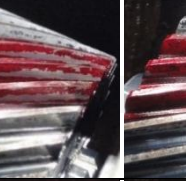






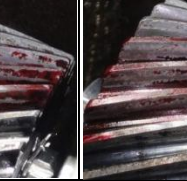

ตารางที่ 5.6 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด E

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
E $T_c = 26 \text{ N}\cdot\text{m}$					72%
E $T_c = 68 \text{ N}\cdot\text{m}$					78%
E $T_c = 117 \text{ N}\cdot\text{m}$					98%
E $T_c = 170 \text{ N}\cdot\text{m}$					98%
E $T_c = 228 \text{ N}\cdot\text{m}$					99%

ตารางที่ 5.7 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด F

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
F $T_c = 44 \text{ N}\cdot\text{m}$					50%
F $T_c = 130 \text{ N}\cdot\text{m}$					61%
F $T_c = 176 \text{ N}\cdot\text{m}$					67%
F $T_c = 218 \text{ N}\cdot\text{m}$					78%

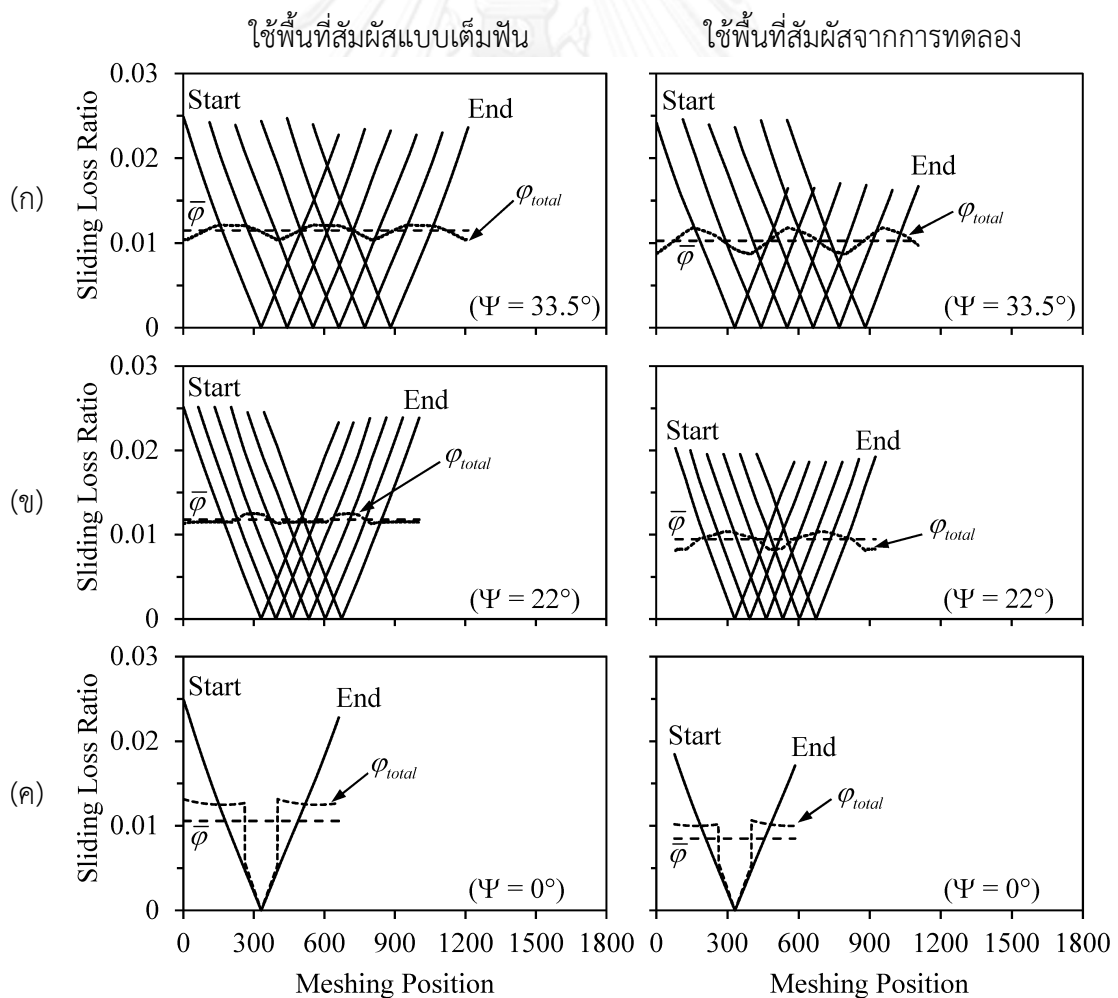
ตารางที่ 5.8 พื้นที่หน้าสัมผัสจากการทดลองและพื้นที่หน้าสัมผัสอย่างง่ายของเฟืองชุด G

เฟืองชุด	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	พื้นที่อย่างง่าย
G $T_c = 42 \text{ N}\cdot\text{m}$					50% (29%)
G $T_c = 68 \text{ N}\cdot\text{m}$					55% (37%)
G $T_c = 133 \text{ N}\cdot\text{m}$					63%
G $T_c = 220 \text{ N}\cdot\text{m}$					72%



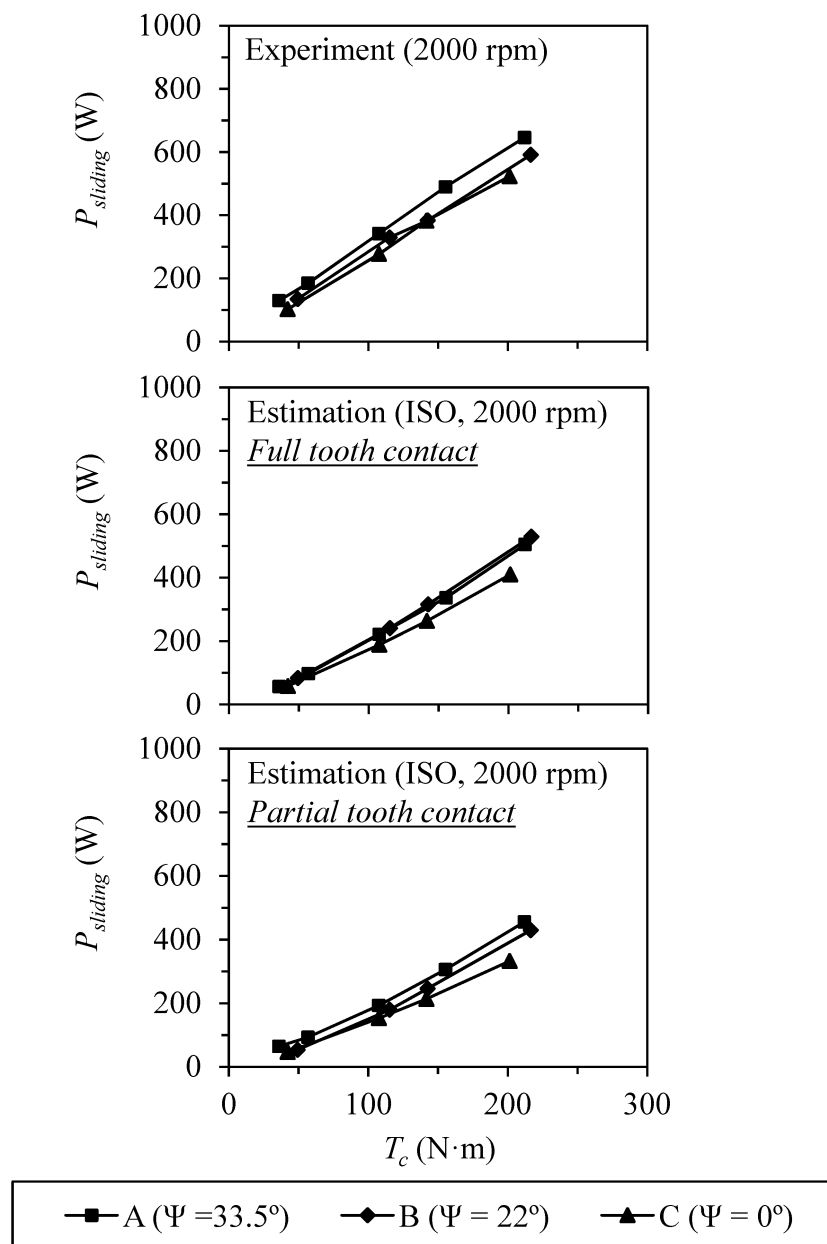
### 5.2.1 อิทธิพลของมุมฮิลิกซ์

การนำพื้นที่หน้าสัมผัสของเฟืองชุด A ที่มีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา เฟืองชุด B ที่มีมุมฮิลิกซ์ 22 องศา และเฟืองตรงชุด C ที่มีมุมฮิลิกซ์ 0 องศา จากการทดลองมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองจะทำให้อัตราส่วนกำลังสูญเสีย (กราฟรูปตัว V) ของเฟืองทั้งสามชุดเปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 5.27(ก) (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงผลประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสียของชุดเฟืองทั้งสามชุดอย่างคร่าว ๆ จากรูปแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียสำหรับการขบกันของเฟืองเฉียง 1 คู่ฟัน โดยด้านซ้ายมือเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟัน และด้านขวามือเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้พื้นที่สัมผัสจากการทดลอง โดยอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองตรงย่อยแต่ละคู่ที่ประกอบกันเป็นเฟืองเฉียง 1 คู่ จะแสดงโดยเส้นทึบ ส่วนอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมของเฟืองเฉียงจะแสดงเป็นเส้นจุด และกำลังสูญเสียเฉลี่ยของทั้งระบบแสดงโดยเส้นประ จากรูปที่ 5.27 เมื่อเฟืองขบกันมีการสัมผัสไม่เต็มฟันจะทำให้ตำแหน่งเริ่มขบและสิ้นสุดการขบเปลี่ยนไปดังรูปด้านขวา ซึ่งทำให้เส้นอัตราส่วนกำลังสูญเสียบางตำแหน่งหายไป และทำให้อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมเปลี่ยนไปด้วย จึงทำให้อัตราส่วนกำลังสูญเสียในเฟืองชุด B ลดลงน้อยกว่าเฟืองชุด A และส่งผลให้ผลการประเมินนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.27 อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีมุมฮิลิกซ์ต่างกัน

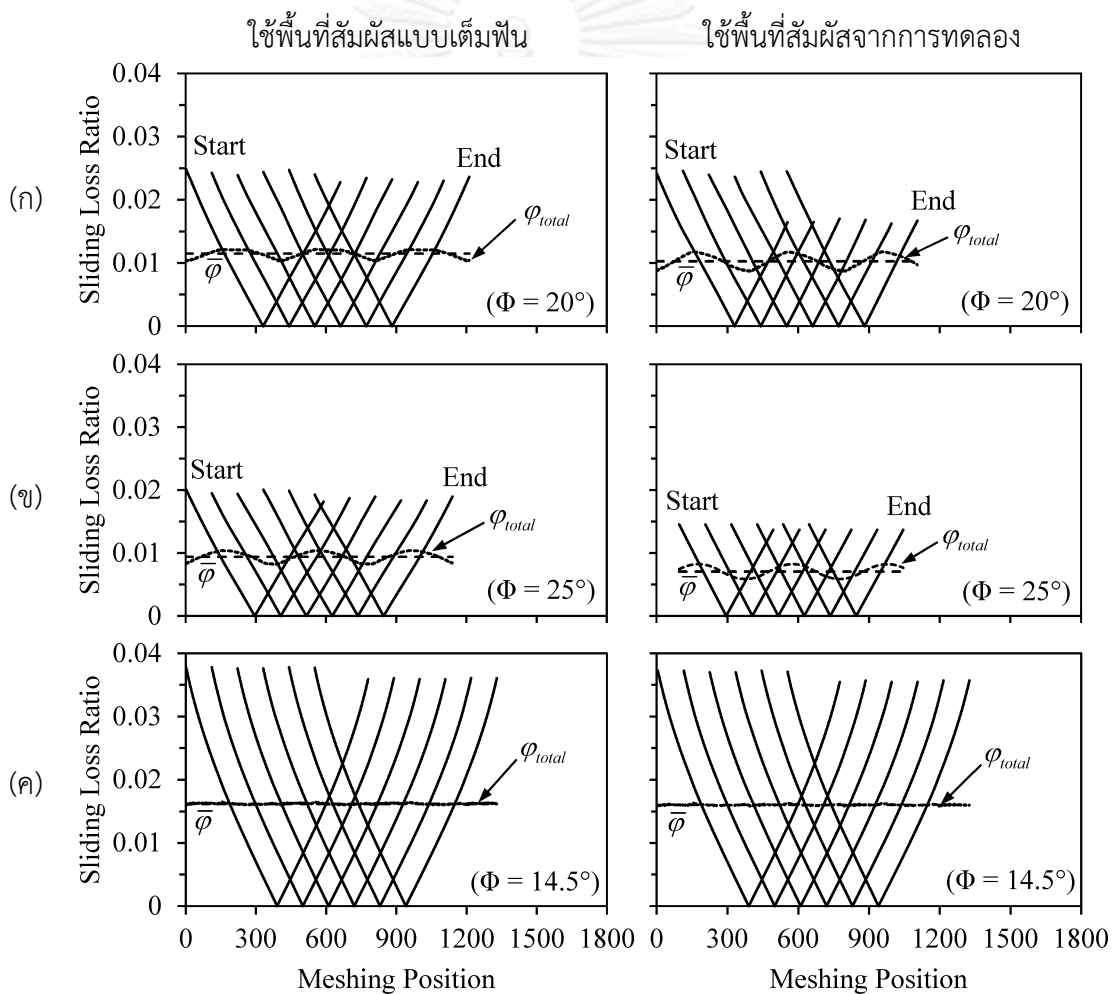
รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถลจากอิทธิพลของมุมฮีลิคซ์ที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองเดิมที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟัน และแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัสจากการทดลอง โดยกำลังสูญเสียจากแบบจำลองที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟันพบว่าเฟืองชุด B มีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองชุด A และเฟืองชุด C ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ข้อมูลการสัมผัสมาคำนวณแล้วจะพบว่า ค่ากำลังสูญเสียโดยรวมจะมีค่าลดลง โดยกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A มากกว่าเฟืองชุด B และเฟืองชุด C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 5.28 กำลังสูญเสียจากการไถลจากผลของมุมฮีลิคซ์ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองเดิม และแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัส

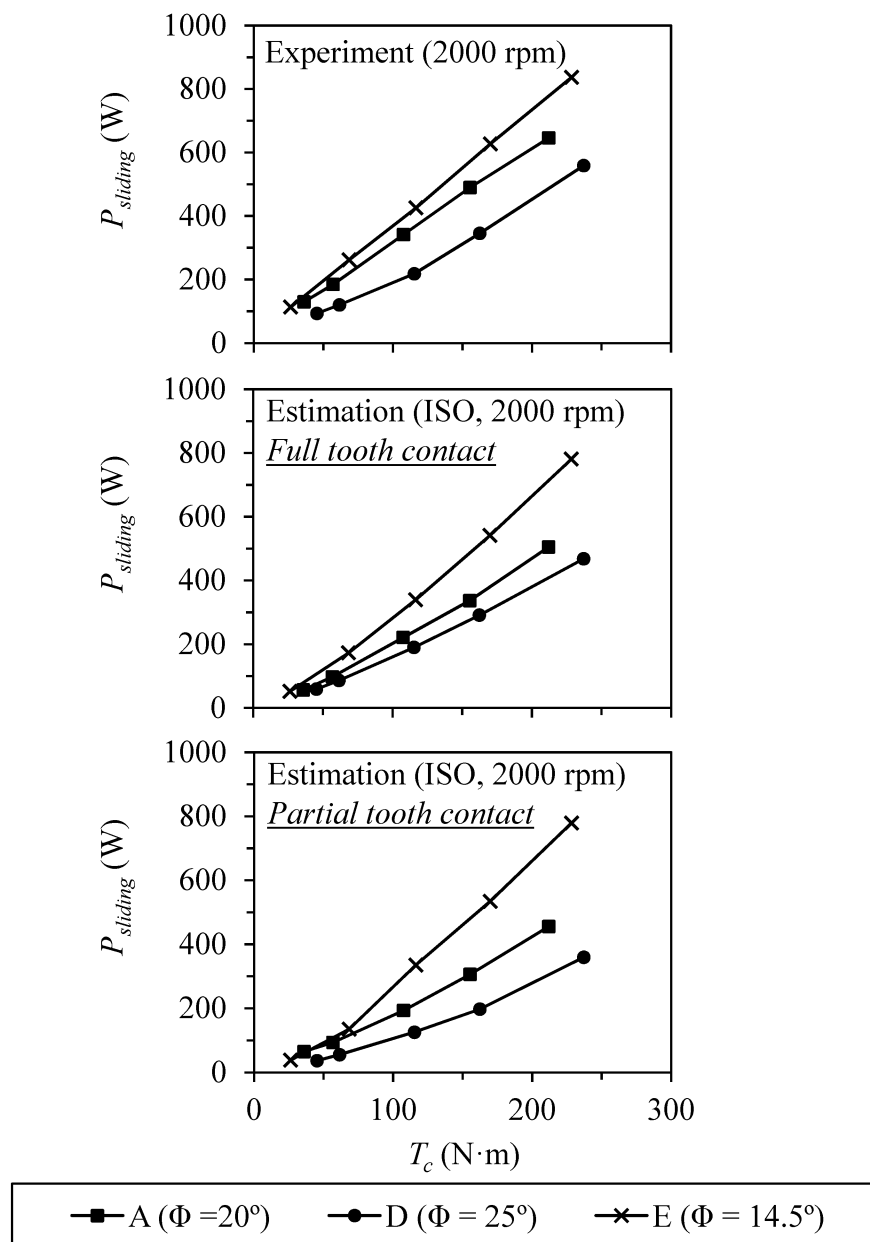
### 5.2.2 อิทธิพลของมุมกด

การนำผลการสัมผัสมาประยุกต์ใช้ในการประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสียในกรณีของมุมกด แสดงดังรูปที่ 5.29(ก) (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ที่มีมุมกด 20 องศา เฟืองชุด D ที่มีมุมกด 25 องศา และเฟืองชุด E ที่มีมุมกด 14.5 องศา ตามลำดับ โดยด้านซ้ายมือเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟัน และด้านขวามือเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้พื้นที่สัมผัสจากการทดลอง จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ข้อมูลการสัมผัสจะทำให้อัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มดังรูปด้านซ้ายบางตำแหน่งหายไป และจะได้เป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียใหม่ ดังรูปทางด้านขวา



รูปที่ 5.29 อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีมุมกดต่างกัน

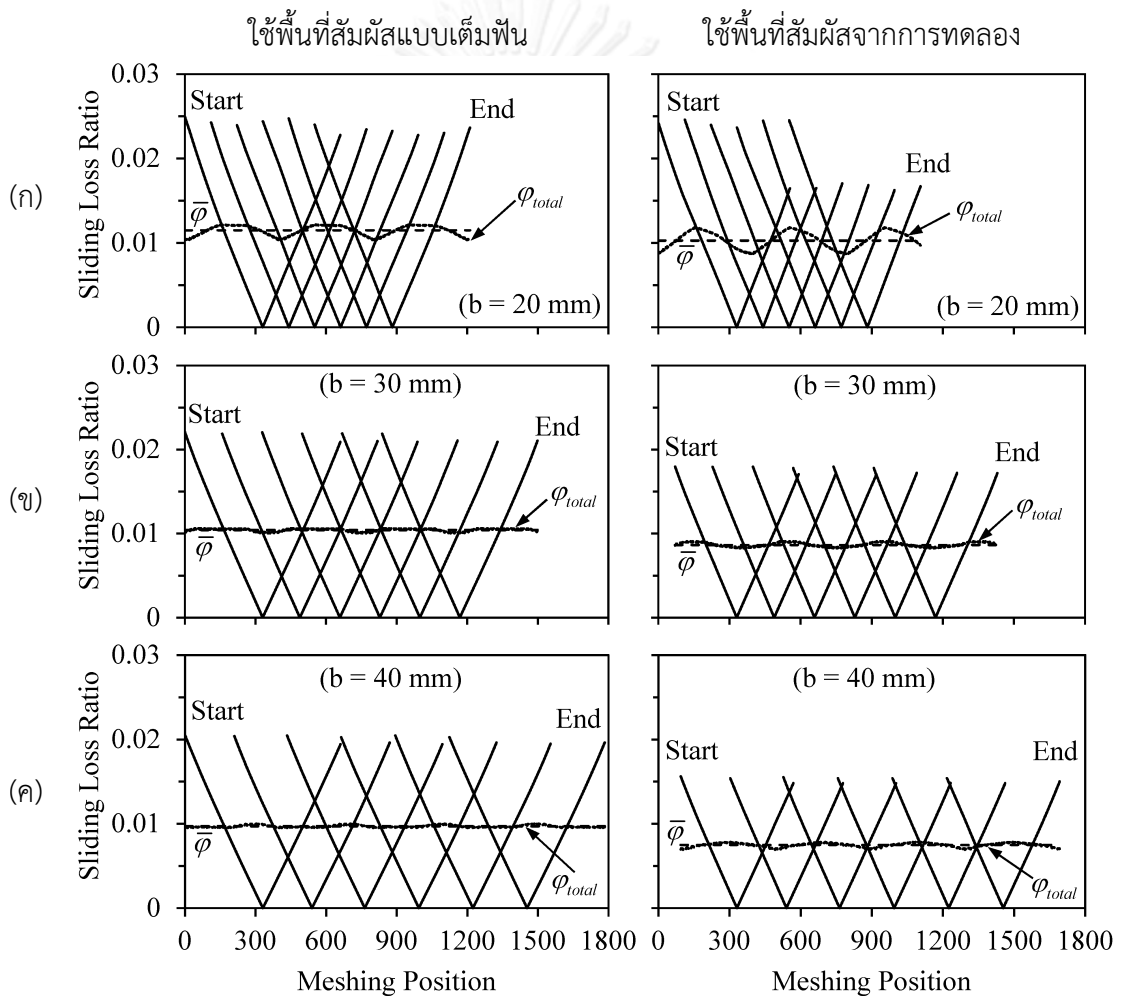
รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถลจากอิทธิพลของมุมกดที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟันและแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลพื้นที่สัมผัส โดยกำลังสูญเสียจากแบบจำลองแบบสัมผัสเต็มฟันพบว่าเฟืองชุด E มีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองชุด A และเฟืองชุด C ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ข้อมูลการสัมผัสมาคำนวณแล้วจะพบว่าทำให้เฟืองชุด D มีกำลังสูญเสียแตกต่างจากเฟืองชุด A มากขึ้น ผลการประเมินที่ได้จึงใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าผลการประเมินจากแบบจำลองเดิม



รูปที่ 5.30 กำลังสูญเสียจากการไถลจากผลของมุมกดที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองเดิม และแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัส

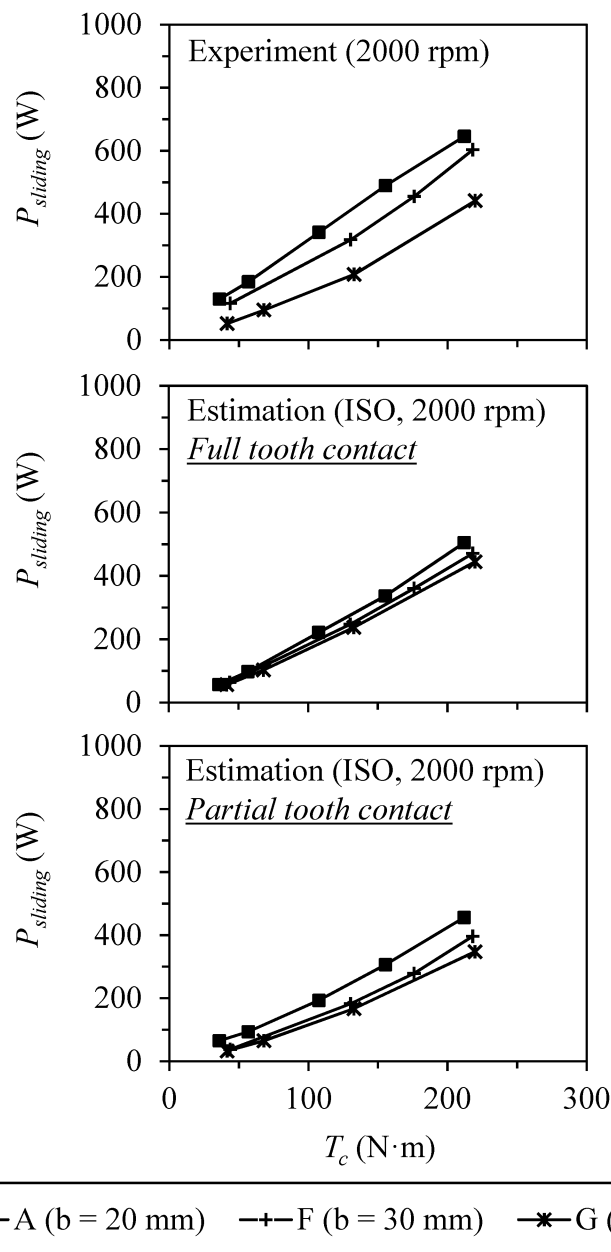
### 5.2.3 อิทธิพลของความกว้างหน้าฟัน

การนำผลการสัมผัสจากการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสียในกรณีของความกว้างหน้าฟันแสดงได้โดยรูปที่ 5.31(ก) (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ที่มีความกว้างหน้าฟัน 20 มิลลิเมตร เฟืองชุด F ที่มีความกว้างหน้าฟัน 30 มิลลิเมตร และเฟืองชุด G ที่มีความกว้างหน้าฟัน 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยด้านซ้ายมือเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มฟัน และด้านขวามือเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ใช้ข้อมูลพื้นที่สัมผัส



รูปที่ 5.31 อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองเฉียงที่มีความกว้างหน้าฟันต่างกัน

รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดกำลังสูญเสียจากการไถลจากอิทธิพลของความกว้างหน้าฟันที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองโดยใช้พื้นที่สัมผัสแบบเต็มเต็มฟัน และใช้พื้นที่สัมผัสจากการทดลอง ตามลำดับ โดยกำลังสูญเสียจากแบบจำลองแบบสัมผัสเต็มฟันพบว่าเฟืองชุด A มีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองชุด F และเฟืองชุด G ตามลำดับ เมื่อใช้ข้อมูลการสัมผัสมาใช้ในการคำนวณ แล้วพบว่าผลการประเมินมีขนาดใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าผลการประเมินจากแบบจำลองเดิม โดยกำลังสูญเสียของชุดเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันแตกต่างกันมีความแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.32 กำลังสูญเสียจากการไถลจากผลของความกว้างหน้าฟันที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองที่ประเมินโดยใช้ผลการสัมผัส

### 5.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอผลการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลจากการทดลองกับแบบจำลองของกฎดล ซึ่งใช้พื้นที่สัมผัสเต็มพื้นที่และแบบจำลองซึ่งใช้ข้อมูลการสัมผัสในการคำนวณ โดยใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60 [12] Misharin [13] และ Benedict กับ Kelley [14] ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ผลจากแบบจำลองที่ใช้พื้นที่สัมผัสเต็มพื้นที่ในกรณีของมุมฮีลิกซ์พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนในกรณีของมุมกดพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และในกรณีของความกว้างหน้าฟันพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลองเมื่อคำนวณโดยใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60 และ Benedict กับ Kelley แต่ผลที่ได้ไม่สอดคล้องหากใช้สมการสำเร็จของ Misharin เนื่องจากสมการสำเร็จที่เสนอโดย Misharin ไม่ได้คำนึงถึงการกระจายของภาระจึงแสดงให้เห็นว่าสมการของ Misharin ไม่เหมาะในการใช้ประเมินกำลังสูญเสีย โดยผลการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 สรุปการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินของกฎดล

พารามิเตอร์	การเปลี่ยนแปลง	กำลังสูญเสีย			
		Exp.	ISO	MSH	B&K
มุมฮีลิกซ์	↑	↑	$0^\circ < 33.5^\circ < 22^\circ$	$0^\circ < 33.5^\circ = 22^\circ$	$0^\circ < 33.5^\circ < 22^\circ$
มุมกด	↑	↓	↓	↓	↓
ความกว้างหน้าฟัน	↑	↓	↓	คงที่	↓

เมื่อปรับปรุงการคำนวณโดยใช้พื้นที่สัมผัสจากการทดลองพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากขึ้นในทุกกรณี โดยจะเห็นได้ชัดจากกรณีของมุมฮีลิกซ์ซึ่งประเมินแนวโน้มกำลังสูญเสียที่มุมฮีลิกซ์ต่าง ๆ ได้ตรงกับผลการทดลอง ผลการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการทดลองทั้งหมดกับผลจากแบบจำลองที่ถูกปรับปรุงใหม่ สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 สรุปการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินที่ถูกปรับปรุงใหม่

พารามิเตอร์	การเปลี่ยนแปลง	กำลังสูญเสีย		ความสอดคล้อง
		ISO	Exp.	
มุมฮีลิกซ์	↑	↑	↑	สอดคล้อง
มุมกด	↑	↓	↓	สอดคล้อง
ความกว้างหน้าฟัน	↑	↓	↓	สอดคล้อง

## บทที่ 6

### สรุป

ในบทนี้เป็นการสรุปสาระสำคัญทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะแยกการสรุปออกเป็นบท นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาในด้านของกำลังสูญเสียจากการส่งกำลังด้วยเฟืองต่อไป

#### 6.1 สาระสำคัญของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นในการศึกษาผลกระทบการเกิดกำลังสูญเสียของคู่เฟืองตรงและเฟืองเฉียง รวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังสูญเสีย ได้แก่ มุมฮิลิกซ์ มุมกด ความกว้างหน้าฟัน การสัมผัสของหน้าฟันเฟือง ความเร็วรอบ และแรงบิด ซึ่งเป็นการศึกษาต่อเนื่องจากวิทยานิพนธ์ของชาคริต เย็นที่ [25] และวิทยานิพนธ์ของภูวดล อัครพิชญโชติ [26] การศึกษาทำโดยการทดลองวัดกำลังสูญเสียเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่มีผลต่อกำลังสูญเสียจากการไถลและศึกษาวิเคราะห์ผลของหน้าสัมผัสที่มีต่อกำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟืองตรงและเฟืองเฉียง

วิทยานิพนธ์ในบทที่ 1 เริ่มจากการกล่าวถึงที่มาของการศึกษากำลังสูญเสียในการส่งกำลังของเฟือง กำลังสูญเสียชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังของเฟือง และงานวิจัยในอดีตซึ่งเกี่ยวข้องกับกำลังสูญเสียในการส่งกำลังของเฟือง งานวิจัยในอดีตสามารถแบ่งออกเป็นการศึกษาโดยการทดลองวัดกำลังสูญเสีย และการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียในการส่งกำลัง ในการสร้างแบบจำลองประเมินกำลังสูญเสียในการส่งกำลังของเฟือง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสีย เนื่องจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของฟันเฟืองในขณะขบ ดังนั้นการประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แม่นยำและสอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริงจะเป็นรากฐานที่ทำให้แบบจำลองประเมินกำลังสูญเสียที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำ

นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของฟันเฟืองที่มีต่อกำลังสูญเสียต่อเนื่องจากวิทยานิพนธ์ของชาคริต และภูวดล โดยเพิ่มจำนวนการทดลองและจำนวนพารามิเตอร์ที่ศึกษา โดยเฉพาะพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่ยังไม่ทราบผลกระทบต่อกำลังสูญเสียที่ชัดเจน ได้แก่ ผลของมุมฮิลิกซ์ มุมกด และความกว้างหน้าฟันเฟือง ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ศึกษาผลของพื้นที่หน้าสัมผัสของฟันเฟืองในระหว่างการขบจริงเพื่อใช้ในการอธิบายการเกิดกำลังสูญเสียด้วย

ในบทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองตรงและเฟืองเฉียงซึ่งเสนอโดยชาคริตและภูวดลซึ่งจะเป็นพื้นฐานของการศึกษาต่อไป โดยอธิบายถึงกลไกการเกิดและการคำนวณหากำลังสูญเสียของเฟืองตรงและเฟืองเฉียง รวมถึงอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมของเฟือง และการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการสำเร็จ ในส่วนท้ายของบทยังได้กล่าวถึงปัจจัยที่ทำให้การประเมินกำลังสูญเสียโดยวิธีของภูวดลได้ผลต่างจากผลการทดลองจริง โดยในการ



ประเมินของกฎวัดจะตั้งสมมุติฐานให้การขบกันของฟันเป็นการสัมผัสแบบเต็มฟัน แต่ในความเป็นจริงแล้วการสัมผัสอาจจะไม่เต็มฟันก็ได้โดยเฉพาะในช่วงภาระน้อย ๆ

ในบทที่ 3 กล่าวถึงชุดทดสอบเฟืองแบบ back to back โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานและหลักการวัดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชุดทดลอง และกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ชุดเฟืองและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการทดลอง สภาพที่ทดลอง และวิธีการศึกษาพื้นที่หน้าสัมผัสของเฟือง และได้กล่าวถึงการคำนวณเพื่อหาล้างสูญเสียจากการไหลจากการทดลอง ซึ่งทำได้โดยทดลองหาล้างสูญเสียในห้องเฟืองขณะไม่มีภาระและขณะมีภาระ นอกจากนี้ยังได้อธิบายการคำนวณหาล้างสูญเสียจากตลับลูกปืนด้วย

ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียจากการทดลองในขณะไม่มีแรงบิดและขณะมีแรงบิด นอกจากนี้ยังแสดงผลการทดลองซ้ำทำเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการทดลองซึ่งในที่นี้ได้เลือกทำการทดลองซ้ำในเฟืองชุด A เฟืองชุด C และเฟืองชุด D โดยผลการทดลองพบว่าเฟืองที่มีมุมอีลิคซิมมากมีกำลังสูญเสียมาก ส่วนเฟืองที่มีมุมคดน้อยและความกว้างหน้าฟันน้อยจะมีกำลังสูญเสียมาก นอกจากนี้ยังได้แสดงผลของพื้นที่สัมผัสของเฟือง ผลที่วัดได้พบว่าพื้นที่สัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มและเฟืองจะสัมผัสเกือบเต็มฟันที่แรงบิดสูงสุดในการทดลอง โดยเฟืองที่มีมุมอีลิคซิมมากมีการสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีมุมอีลิคซิมน้อย ในขณะที่เฟืองที่มีมุมคดน้อยมีการสัมผัสมากและเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันมากจะมีพื้นที่การสัมผัสมาก สำหรับผลการทดลองซ้ำก็ให้ผลใกล้เคียงกัน

ในบทที่ 5 นำเสนอผลการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียจากการไหลจากการทดลองกับแบบจำลองโดยใช้พื้นที่สัมผัสเต็มฟัน โดยใช้สมการสำเร็จของ ISO TC60 [12], Misharin [13] และ Benedict กับ Kelley [14] โดยผลจากแบบจำลองที่ใช้พื้นที่สัมผัสเต็มฟันพบว่าในกรณีของมุมอีลิคซิมการประเมินมีแนวโน้มไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนในกรณีของมุมคดพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง และกรณีของความกว้างหน้าฟันพบว่าการคำนวณโดยใช้สมการของ ISO TC60 และ Benedict กับ Kelley มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนการคำนวณโดยใช้สมการสำเร็จของ Misharin ให้ผลที่ไม่ตรงกับผลการทดลอง

เมื่อได้พิจารณาผลของการสัมผัสในการคำนวณในกรณีของมุมอีลิคซิมพบว่าผลการคำนวณมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสไม่เต็มฟันในบางกรณี ทำให้กำลังสูญเสียลดลง ในกรณีของมุมคดพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองโดยเฟืองที่มีมุมคดน้อยมีระยะการขบมาก ทำให้กำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองที่มีมุมคดมาก และกรณีของความกว้างหน้าฟันพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันน้อยมีความยาวเส้นสัมผัสน้อย ซึ่งทำให้การกระจายภาระต่อความยาวเส้นสัมผัสมากกว่าเฟืองที่มีความกว้างหน้าฟันมาก ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและกำลังสูญเสียมาก ทั้งนี้ผลการคำนวณโดยพิจารณาผลของการสัมผัสจะสามารถทำให้ประเมินแนวโน้มกำลังสูญเสียได้แม่นยำและสอดคล้องกับการทดลองมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับการประเมินโดยใช้การสัมผัสเต็มฟัน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

- การคำนวณพื้นที่หน้าสัมผัสเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณกำลังสูญเสียจากแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ คำนวณมาจากการประมาณกำหนดให้เฟืองสัมผัสกันตรงกลางฟัน โดยไม่ได้คำนึงถึงผลจากความผิดพลาดในการปรับแนวแกนของเฟือง ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการผิดพลาดในการประกอบ ดังนั้นจึงควรมีการตรวจสอบการปรับแนวแกนของเฟืองซึ่งน่าจะส่งผลให้การทดลองการสัมผัสของฟันเฟืองได้ผลที่ชัดเจนมากขึ้น

- ควรตรวจสอบความเรียบผิวจริงของเฟืองแต่ละชุดที่ใช้ในการทดลอง เพื่อที่จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น จากเดิมใช้ค่าความเรียบผิวฟันที่เป็นค่าโดยประมาณ

- วิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่าผลของการสัมผัสมีผลอย่างมากต่อความแม่นยำในการประเมินกำลังสูญเสีย อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างภาวะกับการสัมผัสของฟันเฟืองไม่ได้อยู่ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อที่จะสามารถประเมินพื้นที่หน้าสัมผัสและกำลังสูญเสียได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงควรศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะกับการสัมผัสของฟันเฟืองเพิ่มเติม

## รายการอ้างอิง

1. Michlin, Y. and V. Myunster, Determination of power losses in gear transmissions with rolling and sliding friction incorporated. *Mechanism and Machine Theory*, 2002. 37(2): p. 167-174.
2. Dudley, D.W., *Gear Handbook the design, manufacture and application of gears*. 1st ed. 1962: McGraw-Hill.
3. Anderson, N.E. and S.H. Lowenthal, *Effect of geometry and operating conditions on spur gear system power loss*. *Journal of Mechanical Design, the Century 2 International Power Transmission & Gearing Conference*, 1980.
4. Townsend, D., *Dudley's Gear Handbook the design, manufacture gears*. 2nd ed. 1992, New York: McGraw-Hill.
5. Harris, T.A., *Rolling Bearing Analysis*. 3rd ed. 1991, New York: John Wiley & Sons, Inc.
6. Haizuka, S., T. Kikusaki, and C. Naruse, *Studies on friction loss of spur gears - (Effect of viscosity of lubricating oils and tooth forms)*. *Jsme International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing*, 1999. 42(4): p. 1041-1049.
7. Haizuka, S., C. Naruse, and T. Yamanaka, *Study of influence of helix angle on friction characteristics of helical gears*. *Tribology Transactions*, 1999. 42(3): p. 570-580.
8. Petry-Johnson, T.T., A. Kahraman, N.E. Anderson, and D.R. Chase, *An experimental investigation of spur gear efficiency*. *Journal of Mechanical Design*, 2008. 130(6).
9. Vaidyanathan, A., *An Experimental Investigation of Helical Gear Efficiency*, in *Mechanical Engineering*. 2009, The Ohio State University: Columbus, Ohio.
10. Magalhaes, L., R. Martins, C. Locateli, and J. Seabra, *Influence of tooth profile and oil formulation on gear power loss*. *Tribology International*, 2010. 43(10): p. 1861-1871.
11. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, ศิริพงษ์ ลิ้มปรีชัญญา, พงศ์ธร จุณณะภาต, และ ภัทรพงษ์ โรจนพรณทิพย์, *แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตรง*. การประชุมวิชาการเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 2008 (AMM029).
12. ISO TC 60, DTR 13989.
13. Misharin, Y.A., *Influence of the Friction Condition on the Magnitude of the Friction Coefficient in the Case of Rollers with Sliding*, in *Proceedings International*

- Conference on Gearing, Institution of Mechanical Engineers. 1958: London. p. 159-164.
14. Benedict, G.H. and B.W. Kelly, *Instantaneous Coefficients of Gear Tooth Friction*. ASLE Transactions, 1961. 4: p. 59-70.
  15. Drozdov, Y.N. and Y.A. Gavrikov, Friction and Scoring Under the Conditions of Simultaneous Rolling and Sliding of Bodies. *Wear*, 1968. 11: p. 291-302.
  16. O'Donoghue, J.P. and A. Cameron, *Friction and Temperature in Rolling Sliding Contacts*. ASLE Transactions, 1968. 11: p. 186-194.
  17. Kelley, B.W. and A.J. Lemanski, *Lubrication of Involute Gearing*. *Lubrication of Involute Gearing*, 1967. 182(3A): p. 173-184.
  18. Teraucha, Y., K. Nagamura, and K. Ikejo, Study on Friction Loss of Internal Gear Drives (Influence of Pinion Surface Finishing, Gear Speed and Torque). *JSME International Journal Series II*, 1991. 34(1).
  19. Heingartner, P. and D. Mba, Determining Power Losses in the Helical Gear Mesh; Case Study, in Proceedings of DETC'03 ASEM 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2003: Chicago, USA.
  20. Ratanasumawong, C., P. Asawapichayachot, S. Phongsupasamit, H. Houjoh, and S. Matsumura, *Estimation of Sliding Loss in a Parallel-Axis Gear Pair*. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2012. 6(1): p. 88-103.
  21. Xu, H., Development of a Generalized Mechanical Efficiency Prediction Methodology for Gear pairs, in Mechanical Engineering. 2005, The Ohio State University.
  22. Xu, H., A. Kahraman, N.E. Anderson, and D.G. Maddock, *Prediction of mechanical efficiency of parallel-axis gear pairs*. *Journal of Mechanical Design*, 2007. 129(1): p. 58-68.
  23. Britton, R.D., C.D. Elcoate, M.P. Alanou, H.P. Evans, and R.W. Snidle, *Effect of Surface Finish on Gear Tooth Friction*, in *The STLE/ASME Tribology Conference*. 1999: Orlando, Florida, USA.
  24. Diab, Y., F. Ville, and P. Velex, *Prediction of power losses due to tooth friction in gears*. *Tribology Transactions*, 2006. 49(2): p. 260-270.

25. ชาคริต เย็นที, การวัดและการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์หาค่าลิ่งสูญเสี่ยของเฟืองตรง, วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. ภูวดล อัครพิชญโชติ, การปรับปรุงแบบจำลองคณิตศาสตร์และการทดลองเพื่อประมาณค่าลิ่งสูญเสี่ยจากการไถลในการส่งกำลังด้วยเฟืองเฉียง, วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

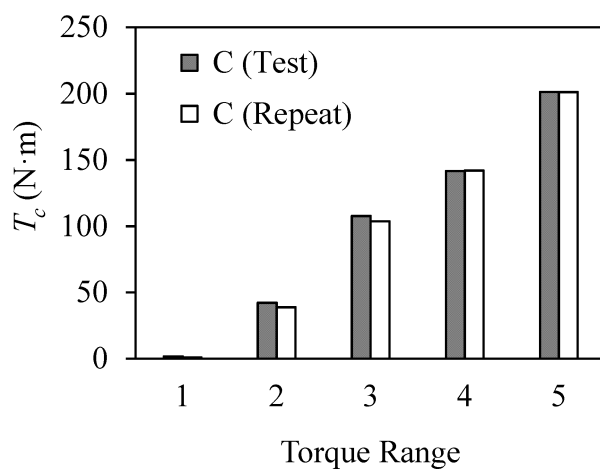


ภาคผนวก

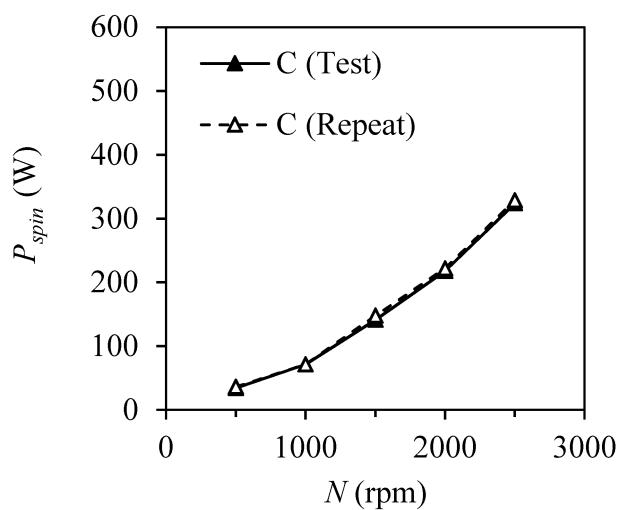
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก  
ผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด C และเฟืองชุด D

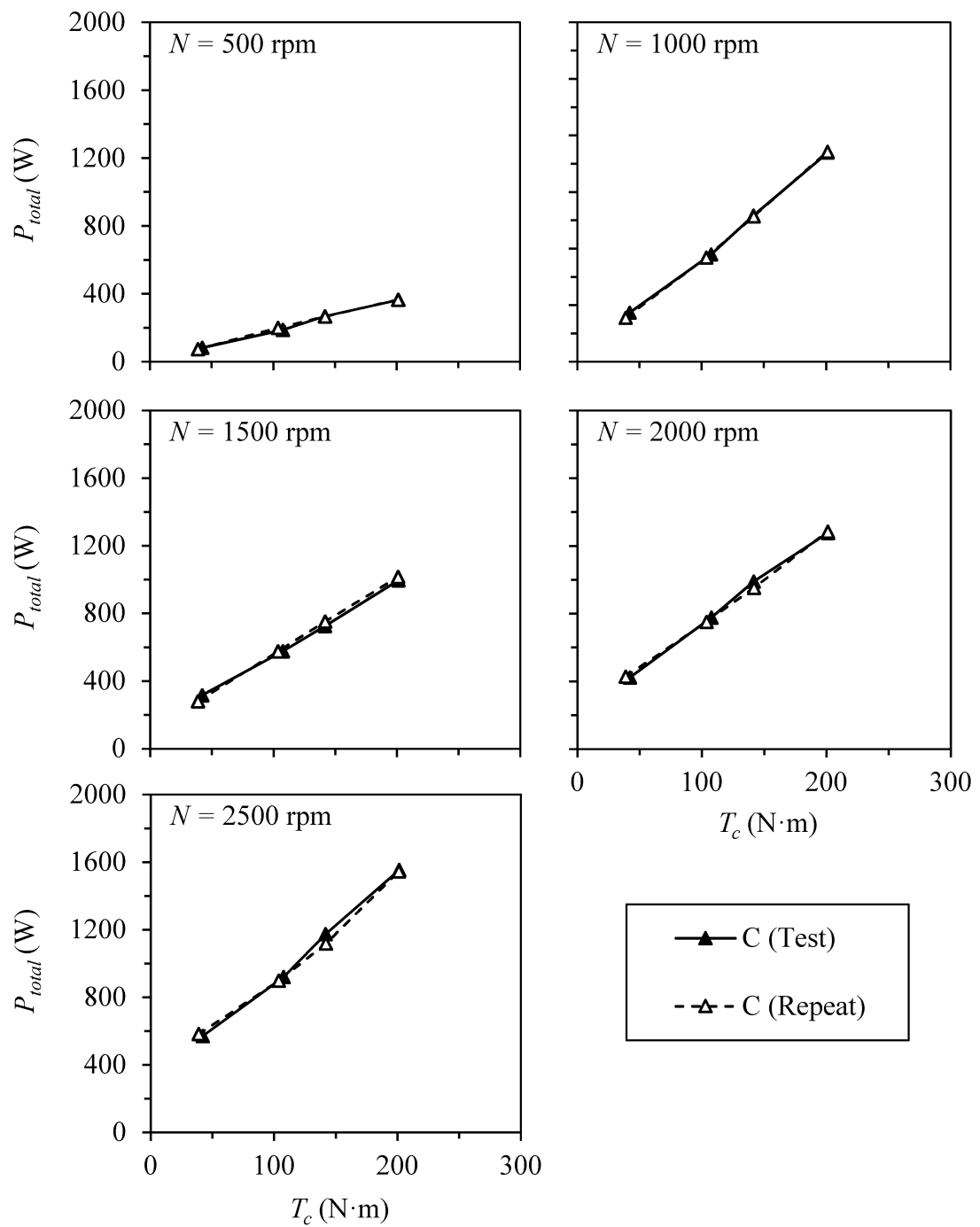
ก.1 ผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด C



รูปที่ ก.1 การเปรียบเทียบแรงบิดของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C



รูปที่ ก.2 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C



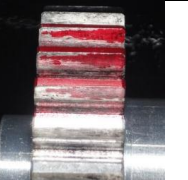
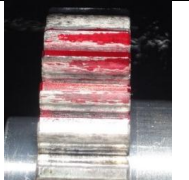
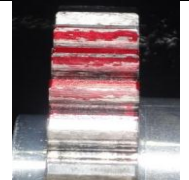
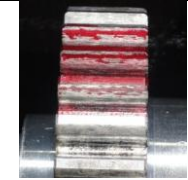
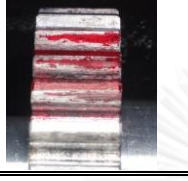


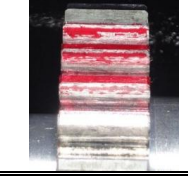
รูปที่ ก.3 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C



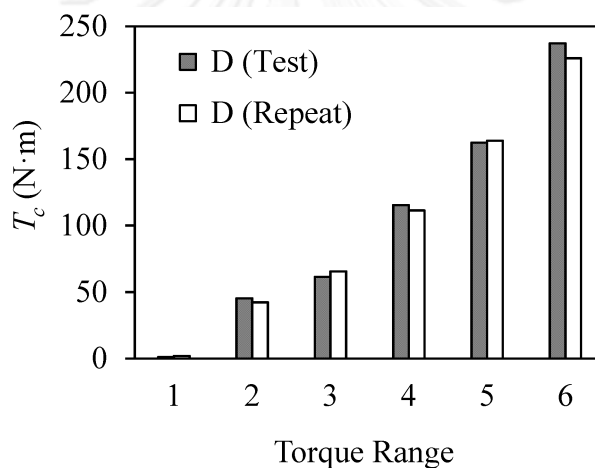
ตารางที่ ก.1 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C

ชุดเฟือง	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
C $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C_Re $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $T_c = 42 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C_Re $T_c = 39 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $T_c = 108 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C_Re $T_c = 104 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C $T_c = 142 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C_Re $T_c = 142 \text{ N}\cdot\text{m}$				

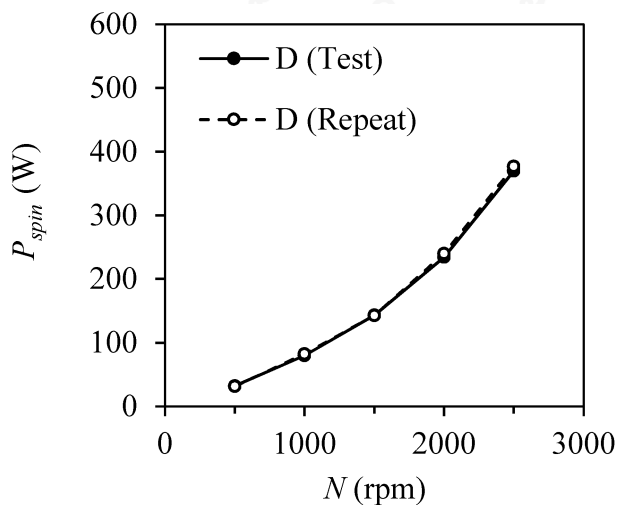
ตารางที่ ก.1 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด C (ต่อ)

ชุดเฟือง	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
C $T_c = 201 \text{ N}\cdot\text{m}$				
C_Re $T_c = 201 \text{ N}\cdot\text{m}$				

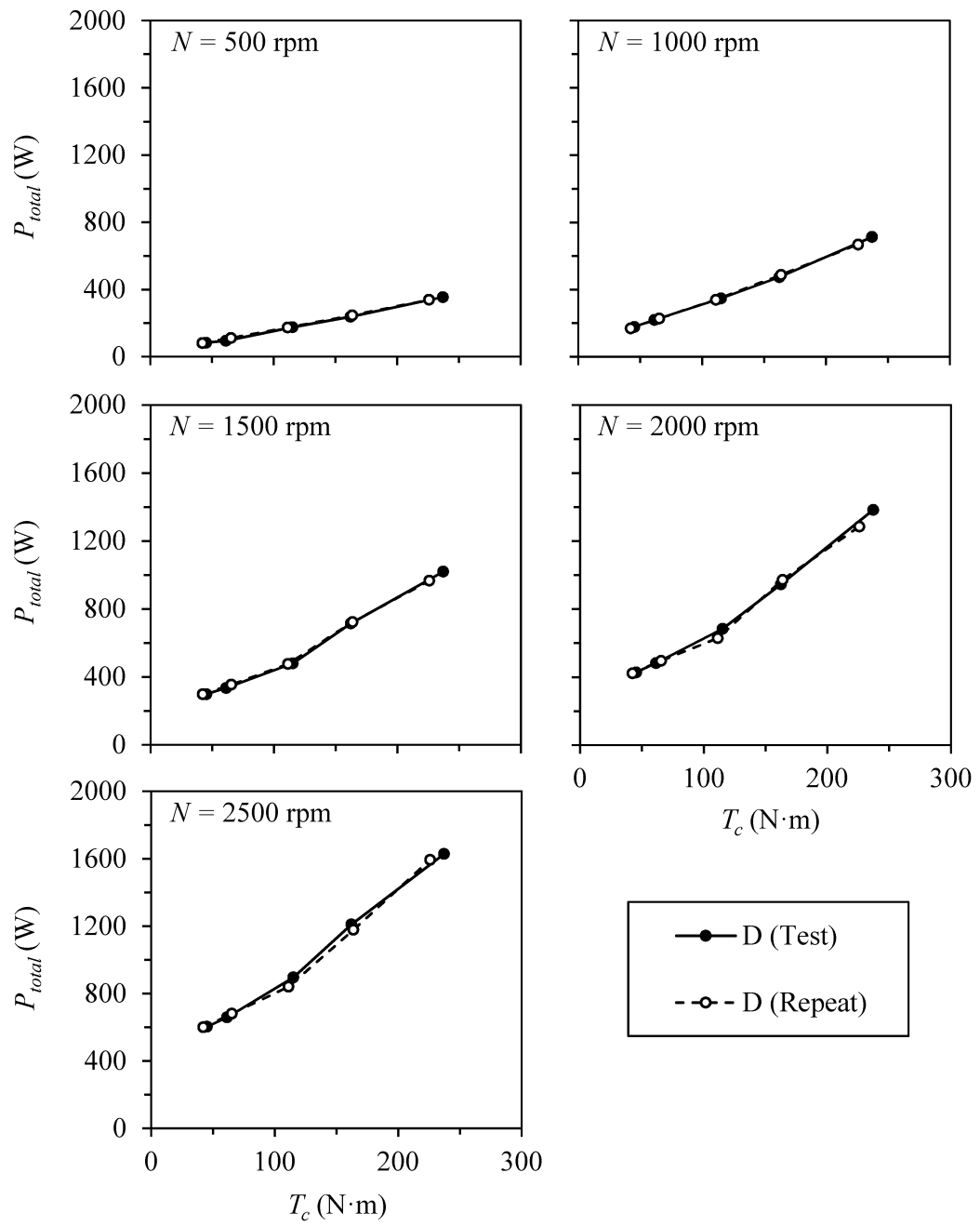
ก.2 ผลการทดลองซ้ำของเฟืองชุด D



รูปที่ ก.4 การเปรียบเทียบแรงบิดของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D

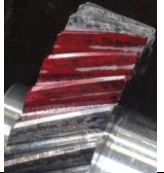
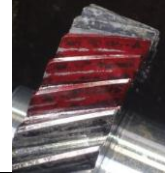
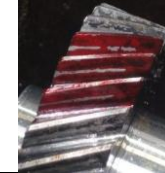





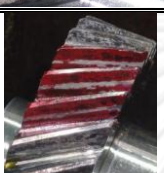



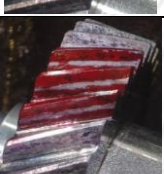





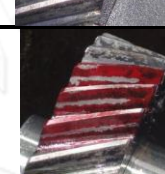
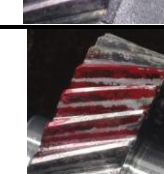
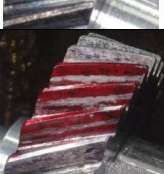
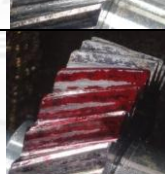

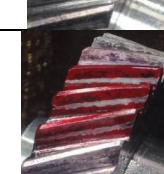
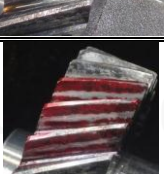

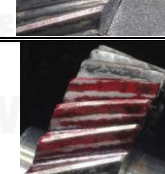

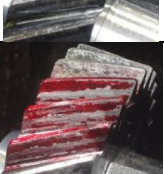
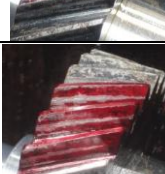
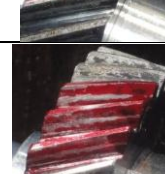
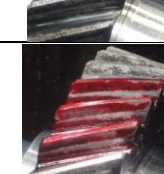


รูปที่ ก.5 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D

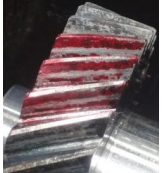
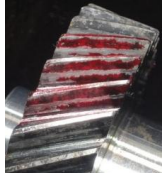

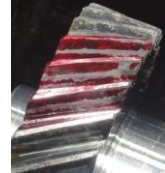


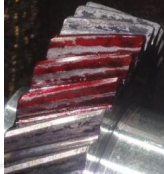

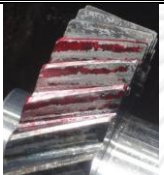





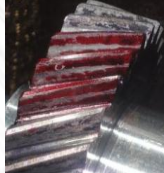
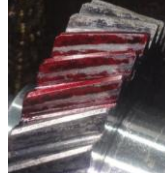


รูปที่ ก.6 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียรวมของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D

ตารางที่ ก.2 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D

ชุดเฟือง	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
D $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D_Re $T_c = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $T_c = 45 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D_Re $T_c = 42 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $T_c = 61 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D_Re $T_c = 66 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $T_c = 115 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D_Re $T_c = 111 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ตารางที่ ก.2 การเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของการทดลองครั้งแรกและทดลองซ้ำของเฟืองชุด D (ต่อ)

ชุดเฟือง	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
D $T_c = 162 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D_Re $T_c = 164 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D $T_c = 237 \text{ N}\cdot\text{m}$				
D_Re $T_c = 226 \text{ N}\cdot\text{m}$				

ภาคผนวก ข  
ตารางผลการทดลอง

ตารางผลการทดลองในภาคผนวกนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ตารางผลการทดลองวัดแรงบิดในระบบของเฟืองชุด A - G ตารางผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียในขณะไม่มีแรงบิด และ ตารางผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียในขณะมีแรงบิด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองวัดแรงบิดในระบบของเฟืองชุด A - G

ลำดับการให้แรงบิด	แรงบิดในระบบ $T_c$ (N·m)						
	A	B	C	D	E	F	G
No load	0.20	0.12	1.26	1.07	2.21	0.20	0.12
1	35.96	49.34	42.23	45.27	26.36	43.71	41.57
2	56.80	115.23	107.67	61.49	68.43	130.30	67.97
3	107.55	142.57	141.15	115.32	116.52	176.03	132.79
4	155.37	216.42	201.35	162.36	169.91	218.18	219.81
5	211.99	-	-	237.13	228.35	-	-

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0273	0.52	27.15
1000	104.72	-0.0401	0.69	71.99
1500	157.08	-0.0533	0.86	135.39
2000	209.44	-0.0706	1.09	228.18
2500	261.80	-0.0920	1.37	358.94

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด B ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุมขา เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0300	0.55	29.03
1000	104.72	-0.0399	0.68	71.66
1500	157.08	-0.0519	0.84	132.32
2000	209.44	-0.0628	0.99	206.64
2500	261.80	-0.0833	1.26	329.18

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด C ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุมขา เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0375	0.65	34.15
1000	104.72	-0.0396	0.68	71.21
1500	157.08	-0.0561	0.90	141.21
2000	209.44	-0.0669	1.04	217.96
2500	261.80	-0.0818	1.24	323.88



ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุมขา เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0335	0.60	31.44
1000	104.72	-0.0477	0.79	82.44
1500	157.08	-0.0570	0.91	142.87
2000	209.44	-0.0748	1.14	239.89
2500	261.80	-0.0971	1.44	376.79

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุมขา เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0295	0.55	28.65
1000	104.72	-0.0380	0.66	69.07
1500	157.08	-0.0515	0.84	131.55
2000	209.44	-0.0677	1.05	220.17
2500	261.80	-0.0922	1.37	359.78

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุมขา เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0349	0.62	32.40
1000	104.72	-0.0457	0.76	79.76
1500	157.08	-0.0618	0.97	152.86
2000	209.44	-0.0844	1.27	266.24
2500	261.80	-0.1003	1.48	387.69

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะไม่มีแรงบิด

ความเร็วรอบเพลา เข้าห้องเฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุมขา เข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก อุปกรณ์วัดแรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)
500	52.36	-0.0377	0.66	34.34
1000	104.72	-0.0481	0.79	83.07
1500	157.08	-0.0684	1.06	166.67
2000	209.44	-0.0975	1.44	302.56
2500	261.80	-0.1160	1.69	442.09

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะมีแรงบิด 36 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.12090	1.75	27.15	91.94	64.78	0.26	64.53
1000	104.72	-0.14930	2.13	71.99	222.73	150.74	0.51	150.23
1500	157.08	-0.15210	2.16	135.39	340.04	204.65	0.77	203.88
2000	209.44	-0.16460	2.33	228.18	488.06	259.89	1.03	258.86
2500	261.80	-0.16870	2.38	358.94	623.90	264.96	1.29	263.67

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะมีแรงบิด 57 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.19711	2.76	27.15	144.40	117.25	0.52	116.73
1000	104.72	-0.21509	3.00	71.99	313.64	241.64	1.04	240.60
1500	157.08	-0.2041	2.85	135.39	447.70	312.31	1.57	310.75
2000	209.44	-0.20486	2.86	228.18	599.03	370.85	2.09	368.76
2500	261.80	-0.20311	2.84	358.94	742.75	383.81	2.61	381.20

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะมีแรงบิด 108 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.31728	4.34	27.15	228.30	201.14	1.40	199.74
1000	104.72	-0.31923	4.37	71.99	457.46	385.47	2.81	382.66
1500	157.08	-0.28887	3.97	135.39	623.72	488.32	4.21	484.11
2000	209.44	-0.31976	4.38	228.18	916.41	688.23	5.62	682.62
2500	261.80	-0.31407	4.30	358.94	1125.84	766.90	7.02	759.88

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะมีแรงบิด 155 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.42174	5.72	27.15	299.52	272.36	2.48	269.88
1000	104.72	-0.42182	5.72	71.99	599.76	527.76	4.97	522.80
1500	157.08	-0.38963	5.30	135.39	832.60	697.21	7.45	689.76
2000	209.44	-0.42876	5.81	228.18	1217.47	989.29	9.93	979.36
2500	261.80	-0.42240	5.73	358.94	1499.87	1140.93	12.42	1128.52

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด A ขณะมีแรงบิด 212 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.64636	8.68	27.15	454.63	427.48	4.02	423.46
1000	104.72	-0.59052	7.95	71.99	831.31	759.32	8.04	751.28
1500	157.08	-0.56533	7.61	135.39	1195.23	1059.84	12.06	1047.78
2000	209.44	-0.54382	7.33	228.18	1535.30	1307.12	16.08	1291.04
2500	261.80	-0.54283	7.32	358.94	1915.68	1556.74	20.10	1536.64

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด B ขณะมีแรงบิด 49 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.13711	1.97	29.03	102.97	73.94	0.36	73.58
1000	104.72	-0.13938	2.00	71.66	209.08	137.42	0.72	136.70
1500	157.08	-0.14333	2.05	132.32	321.81	189.49	1.09	188.41
2000	209.44	-0.16059	2.28	206.64	476.74	270.10	1.45	268.65
2500	261.80	-0.16177	2.29	329.18	599.99	270.81	1.81	269.00

ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด B ขณะมีแรงบิด 115 N·m

ความเร็วรอบ เฟืองเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.25764	3.56	29.03	186.20	157.18	1.35	155.83
1000	104.72	-0.28719	3.95	71.66	413.22	341.56	2.70	338.86
1500	157.08	-0.29205	4.01	132.32	629.88	497.57	4.05	493.52
2000	209.44	-0.30310	4.16	206.64	870.39	663.75	5.40	658.35
2500	261.80	-0.29750	4.08	329.18	1068.62	739.44	6.74	732.70

ตารางที่ ข.16 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด B ขณะมีแรงบิด 143 N·m

ความเร็วรอบ เฟืองเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.32621	4.46	29.03	233.55	204.53	1.88	202.65
1000	104.72	-0.33429	4.57	71.66	478.27	406.61	3.75	402.86
1500	157.08	-0.33272	4.55	132.32	714.15	581.83	5.63	576.20
2000	209.44	-0.34300	4.68	206.64	980.58	773.93	7.50	766.43
2500	261.80	-0.33498	4.58	329.18	1198.06	868.88	9.38	859.50

ตารางที่ ข.17 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด B ขณะมีแรงบิด 216 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.53211	7.18	29.03	375.73	346.71	3.58	343.13
1000	104.72	-0.54788	7.38	71.66	773.25	701.60	7.17	694.43
1500	157.08	-0.50156	6.77	132.32	1064.62	932.31	10.75	921.56
2000	209.44	-0.49578	6.70	206.64	1403.29	1196.65	14.33	1182.31
2500	261.80	-0.50950	6.88	329.18	1801.34	1472.16	17.91	1454.24

ตารางที่ ข.18 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด C ขณะมีแรงบิด 42 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.10766	1.58	34.15	82.63	48.48	0.26	48.22
1000	104.72	-0.11432	1.67	71.21	174.47	103.26	0.53	102.73
1500	157.08	-0.14090	2.02	141.21	316.77	175.56	0.79	174.77
2000	209.44	-0.14121	2.02	217.96	423.21	205.25	1.05	204.20
2500	261.80	-0.15316	2.18	323.88	570.26	246.38	1.31	245.06

ตารางที่ ข.19 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด C ขณะมีแรงบิด 108 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.26072	3.60	34.15	188.33	154.18	1.12	153.06
1000	104.72	-0.26330	3.63	71.21	380.23	309.02	2.24	306.77
1500	157.08	-0.26642	3.67	141.21	576.79	435.59	3.37	432.22
2000	209.44	-0.26903	3.71	217.96	776.27	558.31	4.49	553.82
2500	261.80	-0.25427	3.51	323.88	919.39	595.51	5.61	589.90

ตารางที่ ข.20 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด C ขณะมีแรงบิด 142 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.37597	5.12	34.15	267.92	233.76	1.71	232.06
1000	104.72	-0.36154	4.93	71.21	516.93	445.72	3.41	442.31
1500	157.08	-0.33753	4.61	141.21	725.55	584.34	5.12	579.22
2000	209.44	-0.34606	4.72	217.96	989.04	771.08	6.83	764.26
2500	261.80	-0.32722	4.47	323.88	1172.18	848.30	8.53	839.77



ตารางที่ ข.21 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด C ขณะมีแรงบิด 201 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.51671	6.97	34.15	365.10	330.95	2.96	327.99
1000	104.72	-0.52249	7.05	71.21	739.66	668.45	5.92	662.53
1500	157.08	-0.46880	6.34	141.21	996.05	854.85	8.88	845.97
2000	209.44	-0.44988	6.09	217.96	1275.82	1057.86	11.84	1046.02
2500	261.80	-0.43757	5.93	323.88	1552.26	1228.38	14.80	1213.58

ตารางที่ ข.22 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ขณะมีแรงบิด 45 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.10775	1.58	31.44	82.86	51.42	0.50	50.92
1000	104.72	-0.11651	1.69	82.44	177.49	95.06	1.00	94.06
1500	157.08	-0.13203	1.90	142.87	298.38	155.52	1.50	154.02
2000	209.44	-0.14293	2.04	239.89	428.18	188.29	1.99	186.30
2500	261.80	-0.16267	2.30	376.79	603.11	226.31	2.49	223.82

ตารางที่ ข.23 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ขณะมีแรงบิด 61 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตั้บลูปีน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.12380	1.79	31.44	93.78	62.34	0.80	61.54
1000	104.72	-0.14658	2.09	82.44	219.02	136.59	1.60	134.98
1500	157.08	-0.14981	2.13	142.87	335.23	192.37	2.40	189.96
2000	209.44	-0.16277	2.31	239.89	482.77	242.88	3.21	239.67
2500	261.80	-0.17889	2.52	376.79	659.13	282.34	4.01	278.33

ตารางที่ ข.24 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ขณะมีแรงบิด 115 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตั้บลูปีน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.24232	3.35	31.44	175.63	144.19	2.12	142.06
1000	104.72	-0.23892	3.31	82.44	346.55	264.12	4.25	259.87
1500	157.08	-0.21922	3.05	142.87	479.01	336.14	6.37	329.77
2000	209.44	-0.23576	3.27	239.89	684.37	444.48	8.50	435.98
2500	261.80	-0.24732	3.42	376.79	895.74	518.95	10.62	508.32

ตารางที่ ข.25 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ขณะมีแรงบิด 162 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.33208	4.54	31.44	237.61	206.17	3.61	202.56
1000	104.72	-0.33030	4.51	82.44	473.23	390.80	7.22	383.57
1500	157.08	-0.33327	4.55	142.87	714.81	571.95	10.83	561.12
2000	209.44	-0.33002	4.51	239.89	944.75	704.85	14.44	690.41
2500	261.80	-0.33840	4.62	376.79	1209.85	833.06	18.05	815.01

ตารางที่ ข.26 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด D ขณะมีแรงบิด 237 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.50134	6.77	31.44	354.49	323.05	6.49	316.56
1000	104.72	-0.50384	6.80	82.44	712.43	629.99	12.99	617.00
1500	157.08	-0.48031	6.49	142.87	1019.21	876.34	19.48	856.86
2000	209.44	-0.48873	6.60	239.89	1383.12	1143.23	25.98	1117.25
2500	261.80	-0.45925	6.22	376.79	1627.10	1250.31	32.47	1217.84

ตารางที่ ข.27 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 26 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.08488	1.28	28.65	66.90	38.25	0.11	38.15
1000	104.72	-0.11150	1.63	69.07	170.57	101.51	0.21	101.30
1500	157.08	-0.13867	1.99	131.55	312.35	180.80	0.32	180.49
2000	209.44	-0.14958	2.13	220.17	446.55	226.37	0.42	225.95
2500	261.80	-0.16563	2.34	359.78	613.32	253.54	0.53	253.01

ตารางที่ ข.28 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 68 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.23624	3.27	28.65	171.43	142.78	0.46	142.31
1000	104.72	-0.24358	3.37	69.07	352.99	283.92	0.93	283.00
1500	157.08	-0.25211	3.48	131.55	547.15	415.60	1.39	414.22
2000	209.44	-0.25786	3.56	220.17	745.43	525.25	1.85	523.40
2500	261.80	-0.26072	3.60	359.78	941.65	581.87	2.31	579.55

ตารางที่ ข.29 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 117 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.23624	3.27	28.65	171.43	142.78	0.46	142.31
1000	104.72	-0.24358	3.37	69.07	352.99	283.92	0.93	283.00
1500	157.08	-0.25211	3.48	131.55	547.15	415.60	1.39	414.22
2000	209.44	-0.25786	3.56	220.17	745.43	525.25	1.85	523.40
2500	261.80	-0.26072	3.60	359.78	941.65	581.87	2.31	579.55

ตารางที่ ข.30 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 170 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.55336	7.46	28.65	390.41	361.76	1.90	359.86
1000	104.72	-0.53240	7.18	69.07	752.63	683.56	3.79	679.77
1500	157.08	-0.52301	7.06	131.55	1107.61	976.06	5.69	970.37
2000	209.44	-0.52434	7.07	220.17	1481.48	1261.31	7.58	1253.73
2500	261.80	-0.51655	6.97	359.78	1824.97	1465.18	9.48	1455.71

ตารางที่ ข.31 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด E ขณะมีแรงบิด 228 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.75681	10.14	28.65	530.90	502.25	3.00	499.25
1000	104.72	-0.70329	9.43	69.07	986.90	917.84	5.99	911.84
1500	157.08	-0.70628	9.47	131.55	1469.04	1337.49	8.99	1328.50
2000	209.44	-0.67793	9.10	220.17	1905.72	1685.55	11.99	1673.56
2500	261.80	-0.66371	8.91	359.78	2333.04	1973.26	14.98	1958.28

ตารางที่ ข.32 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 43 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.13004	1.87	32.40	98.28	65.88	0.35	65.53
1000	104.72	-0.13660	1.96	79.76	205.24	125.48	0.70	124.78
1500	157.08	-0.16227	2.30	152.86	361.03	208.17	1.04	207.12
2000	209.44	-0.16867	2.38	266.24	499.30	233.06	1.39	231.67
2500	261.80	-0.18658	2.62	387.69	685.65	297.96	1.74	296.22

ตารางที่ ข.33 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 130 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.32581	4.46	32.40	233.27	200.87	1.89	198.98
1000	104.72	-0.30894	4.23	79.76	443.26	363.49	3.78	359.71
1500	157.08	-0.30833	4.22	152.86	663.62	510.76	5.67	505.09
2000	209.44	-0.31730	4.34	266.24	909.61	643.37	7.56	635.81
2500	261.80	-0.31825	4.36	387.69	1140.28	752.60	9.45	743.14

ตารางที่ ข.34 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 176 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.43402	5.88	32.40	308.62	276.21	3.01	273.20
1000	104.72	-0.42650	5.78	79.76	605.62	525.85	6.03	519.83
1500	157.08	-0.41070	5.57	152.86	876.28	723.42	9.04	714.38
2000	209.44	-0.41838	5.68	266.24	1188.79	922.55	12.05	910.50
2500	261.80	-0.40793	5.54	387.69	1449.93	1062.24	15.07	1047.17

ตารางที่ ข.35 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด F ขณะมีแรงบิด 218 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.56380	7.59	32.40	397.62	365.22	4.20	361.02
1000	104.72	-0.55514	7.48	79.76	784.07	704.30	8.41	695.90
1500	157.08	-0.52710	7.11	152.86	1117.57	964.71	12.61	952.10
2000	209.44	-0.52727	7.11	266.24	1489.57	1223.33	16.81	1206.52
2500	261.80	-0.51288	6.92	387.69	1813.74	1426.05	21.02	1405.03

ตารางที่ ข.36 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 42 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.07596	1.16	34.34	60.87	26.53	0.32	26.21
1000	104.72	-0.08779	1.32	83.07	137.82	54.75	0.64	54.11
1500	157.08	-0.10707	1.57	166.67	246.68	80.01	0.97	79.05
2000	209.44	-0.13551	1.95	302.56	407.66	105.10	1.29	103.81
2500	261.80	-0.14570	2.08	442.09	544.53	102.44	1.61	100.83



ตารางที่ ข.37 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 68 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.11767	1.71	34.34	89.54	55.20	0.69	54.52
1000	104.72	-0.12505	1.81	83.07	189.47	106.40	1.38	105.02
1500	157.08	-0.15221	2.17	166.67	340.65	173.98	2.07	171.91
2000	209.44	-0.16725	2.36	302.56	495.13	192.57	2.76	189.81
2500	261.80	-0.18251	2.57	442.09	671.61	229.52	3.45	226.07

ตารางที่ ข.38 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 133 N·m

ความเร็วรอบ เพลาเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาเข้า ห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสียที่ไม่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตลับลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขบส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.22958	3.19	34.34	167.16	132.82	1.95	130.87
1000	104.72	-0.21969	3.06	83.07	319.99	236.92	3.89	233.03
1500	157.08	-0.25242	3.49	166.67	548.17	381.50	5.84	375.65
2000	209.44	-0.25096	3.47	302.56	726.37	423.81	7.79	416.02
2500	261.80	-0.27522	3.79	442.09	991.71	549.63	9.73	539.89

ตารางที่ ข.39 ผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองชุด G ขณะมีแรงบิด 220 N·m

ความเร็วรอบ เฟืองเข้าห้อง เฟือง (rpm)	ความเร็วเชิงมุม ขาเข้าห้องเฟือง (rad/s)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า จากอุปกรณ์วัด แรงบิด (mV)	แรงบิดเพลาลูก เข้าห้องเฟือง (N·m)	กำลังสูญเสีย ที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสีย รวม (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระ (W)	กำลังสูญเสียที่ ขึ้นกับภาระของ ตั้บลูกปืน 8 ตัว (W)	กำลังสูญเสียจาก การขนส่งกำลัง ของเฟือง 2 คู่ (W)
500	52.36	-0.45366	6.14	34.34	321.56	287.22	4.25	282.97
1000	104.72	-0.42988	5.83	83.07	610.90	527.83	8.50	519.32
1500	157.08	-0.41120	5.58	166.67	877.31	710.63	12.76	697.88
2000	209.44	-0.42321	5.74	302.56	1202.14	899.58	17.01	882.57
2500	261.80	-0.40433	5.49	442.09	1438.63	996.54	21.26	975.28

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเจษฎา แพรกนันทโฮ เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

#### ผลงานทางวิชาการ

เจษฎา แพรกนันทโฮ, ชาคริต เย็นที, ภูวดล อัสวพิชญโชติ, สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ และ ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังสูญเสียจากการไถในการส่งกำลังด้วยเฟือง ตรงและเฟืองเฉียง: การประเมินกำลังสูญเสียจากแบบจำลองและผลการทดลอง, การประชุมวิชาการ เครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, 24-26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

Jetsada Phraeknanthoe, Surin Phongsupasamit and Chanat Ratanasumawong, Preliminary Investigation of the Effects of Geometrical Parameters and Gear Tooth Contact on Power Loss in Spur and Helical Gears, Proceedings of The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.

Jetsada Phraeknanthoe, Natcha Ponchai and Chanat Ratanasumawong, Utilization of Tooth Contact Pattern in a Gear Meshing Model for Estimation of Sliding Loss in a Parallel-Axis Gear Pair, Proceedings of The 6th International Conference on Mechanical and Electrical Technology, 17-18 July 2014, Bangkok, Thailand. (Accepted)