ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249379

การประเมินสารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการหุบขึ้นรูปโค้งฝาปิดช่องเติมน้ำมันเครื่อง

นายพงศ์ศิริ นิยมวุฒิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

b0025386b 249379

การประเมินสารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นชิ้นส่วนอลูมิเนียม

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249379

นายพงศ์พันธุ์ นิยมฤทธิ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.วารุณี เปรมานนท์)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.สุรพล ราษฎร์นุ้ย)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินสารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นชิ้นส่วนอลูมิเนียม
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายพงศ์พันธุ์ นิยมฤทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วารุณี เปรมานนท์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

249379

บทคัดย่อ

กระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นชิ้นส่วนอลูมิเนียมเป็นการขึ้นรูปที่เกิดแรงกระทำกับแม่พิมพ์สูง เกิดการเกาะติดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวของแม่พิมพ์ได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องนำวัสดุไปเคลือบด้วยสารหล่อลื่นเพื่อป้องกันการเกาะติดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวของแม่พิมพ์และช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลตัวของวัสดุ การเคลือบผิวด้วยฟอสเฟส+สบู่และอลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่เป็นสารหล่อลื่นที่นิยมใช้ในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นชิ้นส่วนอลูมิเนียม โดยฟอสเฟส+สบู่นั้นมีงานวิจัยตีพิมพ์ค่อนข้างแพร่หลายแต่อลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่นั้นยังไม่มีผลงานวิจัยตีพิมพ์เลย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของอลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่โดยเปรียบเทียบกับการใช้ฟอสเฟส+สบู่เป็นสารหล่อลื่น ซึ่งทำการทดสอบบนวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6063 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบ Double cup extrusion test, Ring compression test และ Ball on disc รวมไปถึงการวิเคราะห์การบางลงของสารหล่อลื่นหลังการขึ้นรูปซึ่งเชื่อมโยงไปถึงการเกาะยึดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวของแม่พิมพ์ พบว่าปริมาณของชั้น Metal soap ของอลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการเกาะยึดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวแม่พิมพ์ โดยปริมาณน้ำหนักของชั้น Metal soap ของอลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่ที่พอเหมาะสำหรับการทดสอบในครั้งนี้คือ 2 g/m^2 เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้อลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่ที่น้ำหนักของชั้น Metal soap 2 g/m^2 กับการใช้ฟอสเฟส+สบู่เป็นสารหล่อลื่น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการทดสอบโดยใช้ฟอสเฟส+สบู่เป็นสารหล่อลื่นนั้นต่ำกว่าการใช้อลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่เป็นสารหล่อลื่น 16.26% แต่การบางลงของอลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่นั้นมีน้อยกว่าฟอสเฟส+สบู่ 34.23% ส่วนในของเรื่องการเกาะติดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวแม่พิมพ์นั้นมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : กระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น / อลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่ / ฟอสเฟส+สบู่ / สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน / การเกาะยึด

Thesis Title	Lubricant Evaluation for Cold Forging of Aluminum Components
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Pongpan Niyomrit
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Varunee Premanond
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metal Forming Technology
Department	Tool and Materials Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

249379

During the process of cold forging of aluminum, the high pressure which is introduced on the die can result in high adhesion between the aluminum and the die surface. Therefore, it is necessary for the aluminum billet to be coated with a lubricant prior to forging, to reduce adhesion and to ease the flow of material in the die. There are several popular types of lubricant systems used in cold forging of aluminum. For severe deformation, conversion coating in conjunction with soap lubricant are commonly used. The conversion coatings include soap phosphates (PO_4-soap), as well as soap aluminum fluoride (AlF-soap). The effectiveness of the PO_4-soap lubricant system has been proven by many researchers. However, there are a limited number of publications examining the AlF-soap lubricant system. Therefore, this research studied the performance of the AlF-soap system and compared it to the conventional PO_4-soap system as tested on AA6063 aluminum. Double cup extrusion, ring compression, and ball-on-disc testing were conducted to explore friction conditions and the thinning of the lubricant under several forming conditions. It was found that the quantity of metal soap layer of AlF-soap used affected the friction coefficient and the adhesion of the aluminum test piece on the surface of the die. The suitable coating weight of metal soap layer of AlF-soap for this experiment was found to be 2 g/m^2. The friction coefficient of the PO_4-soap system was 16.26% lower than the AlF-soap system. However, the amount of thinning of the AlF-soap film after cold forming was 34.23% lower than the PO_4-soap film. Finally, the amounts of adhesion between the aluminum test piece and the die surface were similar between the two lubricant system examined.

Keywords: Cold forging / Lubricant / Soap aluminum fluoride / Soap phosphate / Friction coefficient / Adhesion

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลต่างๆในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อมูล ตลอดจนการชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์คือ รศ.ดร.วารุณี เปรมานนท์ และขอขอบพระคุณ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และ รศ.ดร.สุรพล ราษฎร์นุ้ย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ กองทุนสนับสนุนการวิจัยโครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม (MRG-WI525E079) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณ บริษัทไทยปาร์คเกอร์ไรซิ่ง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านเงินทุนสนับสนุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยอย่างดีเยี่ยม ตลอดจนผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์อีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ซึ่งทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

กิตติกรรมประกาศ ง

สารบัญ จ

รายการตาราง ซ

รายการรูปประกอบ ฎ

รายการสัญลักษณ์ น

ประมวลศัพท์และคำย่อ บ

บทที่

1. บทนำ **1**

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย **4**

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทุบขึ้นรูปเย็น 4

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับไทรโบโลยี 9

2.3 สารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น 16

2.4 วิธีการประเมินสารหล่อลื่น 19

2.5 ความหยาบผิวและวิธีการวัดความหยาบผิว 25

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 30

3. วิธีดำเนินงานวิจัย **33**

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 34

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 35

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล **39**

4.1 การตรวจสอบจำนวนชั้นของสารหล่อลื่น 39

4.2 วิเคราะห์ชั้นของสารหล่อลื่นที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 45

4.3 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการทดสอบ 46

4.4 วิเคราะห์การบางลงของสารหล่อลื่นหลังการขึ้นรูป 52

4.5 วิเคราะห์การเกาะยึดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวแม่พิมพ์ 68

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **71**

5.1 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดลอง 71

5.2 สรุปการบางลงของสารหล่อลื่นหลังการขึ้นรูป 71

5.3 สรุปการเกาะยึดของเนื้ออลูมิเนียมบนผิวแม่พิมพ์ 72

5.4 ข้อเสนอแนะ 72

เอกสารอ้างอิง **73**

ภาคผนวก **76**

ก การคำนวณค่าแรงดันสัมผัส (Contact Pressure) สำหรับการทดสอบ Ball on disc 76

ข การเตรียมสารละลาย Poulton's reagent สำหรับกัดดูการไหลตัวหลังการขึ้นรูปของอลูมิเนียมเกรด AA6063 81

ค ข้อมูลสำหรับการจัดทำ Calibration curve ของการทดสอบ Ring compression test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation (DEFORM-3D) 84

ง ข้อมูลสำหรับการจัดทำ Calibration curve ของการทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation (DEFORM-3D) 102

จ ค่าที่วัดจากชิ้นงานทดสอบและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบ Ring compression test และ Double cup extrusion test 118

ฉ ภาพความหนาของสารหล่อลื่นหลังการทดสอบ Ring compression test และ Double cup extrusion test จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 122

ช Normal pressure ที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปของการทดสอบ Ring compression test และ Double cup extrusion test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 139

ซ ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์การบางลงของสารหล่อลื่นหลังการขึ้นรูป 143

ฌ กราฟแสดงค่า Material ratio curve of the profile; Rmr(c) ที่วัดบนผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว 147

ญ ตารางแสดงค่า Meterial ratio curve of the profile; Rmr(c) ที่วัดบนผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว 167

ฎ แบบแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ Double cup extrusion test 169

ประวัติผู้วิจัย **173**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	แสดงปริมาณของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ	3
4.1	Condition ของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ Ball on disc	39
4.2	แสดงระยะทางในการหมุนทดสอบ Ball on disc ที่ได้จากสารหล่อลื่น	45
4.3	Condition ของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ Double cup extrusion test และ Ring compressing test	47
4.4	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการทดสอบด้วยวิธี Double cup extrusion test ที่ได้จาก Calibration curve	49
4.5	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการทดสอบด้วยวิธี Ring compression test ที่ได้จาก Calibration curve	51
4.6	แสดงค่า Surface displacement, Normal pressure ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation และเปอร์เซ็นต์ความหนาที่เปลี่ยนแปลงหลังการขึ้นรูปของการทดสอบ Ring compression test ที่ Condition ต่างๆ	62
4.7	แสดงค่า Surface displacement, Normal pressure ที่ได้จากการจำลอง Finite Elemet Simulation และเปอร์เซ็นต์ความหนาที่เปลี่ยนแปลงหลังการขึ้นรูปของการทดสอบ Double cup extrusion test ที่ Condition ต่างๆ	63
ข.1	ส่วนผสมของกรดที่ใช้ในการทดสอบ	82
ค.1	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.00 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	85
ค.2	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.02 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	86
ค.3	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.03 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	87
ค.4	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.04 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	88
ค.5	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.05 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	89
ค.6	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.055 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	90

ค.7 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.06 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 91
ค.8 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.07 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 92
ค.9 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.08 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 93
ค.10 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.09 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 94
ค.11 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.10 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 95
ค.12 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.12 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 96
ค.13 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.15 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 97
ค.14 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.17 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 98
ค.15 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.20 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 99
ค.16 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.30 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 100
ค.17 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Ring compression test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.57 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 101
ง.1 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.00 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 103
ง.2 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.01 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 104
ง.3 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.02 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 105
ง.4 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.03 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 106
ง.5 แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.04 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation 107

ง.6	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.05 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	108
ง.7	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.06 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	109
ง.8	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.07 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	110
ง.9	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.08 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	111
ง.10	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.09 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	112
ง.11	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.10 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	113
ง.12	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.12 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	114
ง.13	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.15 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	115
ง.14	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.20 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	116
ง.15	แสดงข้อมูลสำหรับจัดทำ Calibration curve of Double cup extrusion test ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.57 ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation	117
จ.1	แสดงค่าต่างๆ ที่วัดจากชิ้นงานหลังการทดสอบ Ring compression test	119
จ.2	แสดงค่าต่างๆ ที่วัดจากชิ้นงานหลังการทดสอบ Double cup extrusion test	120
จ.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบ Ring compression test	121
จ.4	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบ Double cup extrusion test	121
ซ.1	แสดงความหนาของ Soap aluminum fluoride หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM)	144
ซ.2	แสดงความหนาของ Soap aluminum fluoride หลังการทดสอบ Ring compression test ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM)	146
ญ.1	แสดงค่า Material ratio curve of the profile; Rmr(c) ที่วัดบนผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device)	168

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แสดงชิ้นงานอลูมิเนียมที่ผลิตจากกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น	4
2.2	แสดงประเภทของการทุบขึ้นรูปเย็น	5
2.3	แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่ผลิตจากการทุบขึ้นรูปเย็น	5
2.4	แสดงกระบวนการผลิตกล่องคลัตช์ด้วยการทุบขึ้นรูปเย็น	6
2.5	การทุบอัดแบบไหลตาม (Forward extrusion)	7
2.6	การทุบอัดแบบไหลทวน (Backward extrusion)	7
2.7	การทุบอัดไหลแบบผสม (Forward & Backward extrusion)	8
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ของตัวกด	8
2.9	พื้นที่ผิวสัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป	10
2.10	การเสียดทานแบบลื่นไถลและแบบกลิ้งตัว	10
2.11	แสดงการเกิดกลไกการสึกหรอแบบยึดติด	11
2.12	ลักษณะการสึกหรอแบบการขัดถูหรือขีดข่วน	12
2.13	แสดงการเกิดกลไกการสึกหรอการล้าตัว	13
2.14	ลักษณะการสึกหรอที่เกิดจากการกัดกร่อน	13
2.15	ชนิดของแนวโน้มทางการสึกหรอ	14
2.16	ภาวะไร้สารหล่อลื่น	14
2.17	การหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่	15
2.18	การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์	15
2.19	การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์	16
2.20	แสดงการเลือกสารหล่อลื่นตามรุนแรงในการขึ้นรูป	17
2.21	แสดงขั้นตอนทำ Soap phosphate coating	18
2.22	แสดงชั้นต่างๆของ Soap phosphate coating	18
2.23	แสดงขั้นตอนทำ Soap aluminum fluoride coating	18
2.24	แสดงชั้นต่างๆของ Soap aluminum fluoride coating	19
2.25	แสดงลักษณะการเปลี่ยนรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลังการทดสอบ	21
2.26	กราฟ Calibration curve ของการทดสอบ Ring compression test สำหรับวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6063	22
2.27	แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Double cup extrusion test	23

2.28 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ Double cup extrusion test 23

2.29 กราฟ Calibration curve ของการทดสอบ Double cup extrusion test สำหรับวัสดุอลูมิเนียม เกรด AA6063 24

2.30 กลไกการทำงานของเครื่องทดสอบ Ball on disc 25

2.31 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus measurement head with loading system) 26

2.32 สภาพผิวหน้าที่มองเห็นคล้าย ๆ กันแต่ความหยาบผิวต่างกัน 27

2.33 ลักษณะการวิเคราะห์ของค่า Arithmetical Mean Roughness (Ra) 28

2.34 ลักษณะการวิเคราะห์ของค่า Material ratio of the profile; Rmr(c) 29

3.1 แสดง Flow chart ของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 33

3.2 แสดงชิ้นงานทดสอบ Ball on disc test 34

3.3 แสดงชิ้นงานทดสอบ Ring compression test 34

3.4 แสดงชิ้นงานทดสอบ Double cup extrusion test 34

3.5 แสดงชุดแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test 35

3.6 แสดงชุดแม่พิมพ์ทดสอบ Ring compression test 35

3.7 แสดงเครื่อง Mechanical Press รุ่น SHF-400 ขนาด 400 ตัน 36

3.8 แสดงลูกบอล SKH 51 ชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm 36

3.9 เครื่อง Tribometer ที่ใช้ในการทดสอบ Ball on disc test 37

3.10 แสดงเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6490LA 37

3.11 แสดงเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) 38

4.1 กราฟแสดงผลการทดสอบชั้น Metal soap ของ AlF-soap จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 40

4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบชั้น Cryolite (ALBOND-A) ของ AlF-soap จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 40

4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบสารหล่อลื่น AlF-soap; A_1 จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 41

4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบสารหล่อลื่น AlF-soap; A_2 จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 41

4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบสารหล่อลื่น AlF-soap; A_3 จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 42

4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบสารหล่อลื่น AlF-soap; A_4 จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 42

4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบสารหล่อลื่น AlF-soap; A_5 จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 43

4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบสารหล่อลื่น PO_4-soap จากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ Normal Load 10 N และ Linear speed 10 cm/s 44

4.9 แสดงระยะทางในการหมุน Ball on disc ของชั้น Soap และ Metal soap 46

4.10 แสดงการเปรียบเทียบการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ได้จากการจำลอง FEM กับการไหลตัวของวัสดุหลังการขึ้นรูปของการทดสอบ Double cup extrusion test 47

4.11 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบมาพล็อตลงบนกราฟ Calibration curve ของ Double cup extrusion test สำหรับวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6063 48

4.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จาก Calibration curve ของการทดสอบ Double cup extrusion test 49

4.13 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบมาพล็อตลงบนกราฟ Calibration curve ของ Ring compression test สำหรับวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6063 51

4.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จาก Calibration curve ของการทดสอบ Ring compression test 52

4.15 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ PO_4-soap (Coating weight of metal soap =0.73 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 53

4.16 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =0.88 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 53

4.17 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 54

4.18 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.92 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 54

4.19 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ PO_4-soap (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 56

4.20 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 57

4.21 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap = 2.55 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 58

4.22 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap = 5.30 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 59

4.23 แสดงชั้น Cryolite (ALBOND-A) ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2, Coating weight of cryolite = 3.15 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 60

4.24 แสดงชั้น Cryolite (phosphate) ของ PO_4-soap (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2, Coating weight of cryolite = 1.49 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 60

4.25 แสดงการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ Finite Element Simulation ของการทดสอบ Ring compression test 61

4.26 แสดงการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ Finite Element Simulation ของการทดสอบ Double cup extrusion test 61

4.27 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความหนาของสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับ Surface displacement และ Normal pressure ของการทดสอบ Ring compression test 64

4.28 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความหนาของสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับ Surface displacement และ Normal pressure ของการทดสอบ Double cup extrusion test 65

4.29 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความหนาที่เปลี่ยนแปลงต่อปริมาณ Coating weight of metal soap ของ Aluminum fluoride ของการทดสอบ Double cup extrusion test และ Ring compression test 66

4.30 แสดงเปอร์เซ็นต์ความหนาที่เปลี่ยนแปลงกับ Normal pressure ของ Soap aluminum fluoride หลังการทดสอบ Double cup extrusion test และ Ring compression test 67

4.31 แสดงเปอร์เซ็นต์ความหนาที่เปลี่ยนแปลงกับ Surface displacement ของ Soap aluminum fluoride หลังการทดสอบ Double cup extrusion test และ Ring compression test 67

4.32 แสดงบริเวณที่ทำการวัดค่า Material ratio curve of the profile 68

4.33 กราฟแสดงค่า Material ratio curve of the profile; Rmr(c) บนผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test 69

ก.1 การสัมผัสกันระหว่างลูกบอลและแผ่นจานในการทดสอบ Ball on disc 78

ก.2 แสดง Normal pressure ที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปด้วย Finite Element Simulation การทดสอบ Double cup extrusion test และ Ring compression test 80

ฉ.1 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ PO_4-soap (Coating weight of metal soap =0.73 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 123

ฉ.2 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ PO_4-soap (Coating weight of metal soap =0.73 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 123

ฉ.3 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =0.88 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 124

ฉ.4 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =0.88 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 124

ฉ.5 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =0.88 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 3 125

ฉ.6 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 125

ฉ.7 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 126

ฉ.8 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 3 126

ฉ.9 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.92 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 127

ฉ.10 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.92 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 127

ฉ.11 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Ring compression test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.92 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 3 128

ฉ.12 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =1.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 129

ฉ.13 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =1.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 130

ฉ.14 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =1.07 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 3 131

ฉ.15 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.55 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 132

ฉ.16 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.55 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 133

ฉ.17 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =2.55 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 3 134

ฉ.18 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.30 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 1 135

ฉ.19 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.30 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 2 136

ฉ.20 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ AlF-soap (Coating weight of metal soap =5.30 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ครั้งที่ 3 137

ฉ.21 แสดงความหนาของสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ หลังการทดสอบ Double cup extrusion test ของ PO_4-soap (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) ที่ได้จากเครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) 138

ช.1 แสดง Normal pressure ขณะทำการขึ้นรูปของการ Double cup extrusion test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0555 140

ช.2 แสดง Normal pressure ขณะทำการขึ้นรูปของการ Double cup extrusion test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0642 140

ช.3 แสดง Normal pressure ขณะทำการขึ้นรูปของการ Double cup extrusion test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0799 141

ช.4 แสดง Normal pressure ขณะทำการขึ้นรูปของการ Ring compression test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0752 141

ช.5 แสดง Normal pressure ขณะทำการขึ้นรูปของการ Ring compression test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0770 142

ช.6 แสดง Normal pressure ขณะทำการขึ้นรูปของการ Ring compression test ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0913 142

ฌ.1 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ก่อนการทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ครั้งที่ 1 148

ฌ.2 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ก่อนการทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ครั้งที่ 2 148

ฌ.3 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 1 149

ฌ.4 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 1 149

ฌ.5 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 1 150

ฌ.6 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 2 150

ฌ.7 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 2 151

ฌ.8 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 2 151

ฌ.9 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 3 152

ฌ.10 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 3 152

ฌ.11 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 1.07 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 3 153

ฌ.12 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 1 153

ฌ.13 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 1 154

ฌ.14 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 1 154

ฌ.15 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 2 155

ฌ.16 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 2 155

ฌ.17 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 2 156

ฌ.18 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 3 156

ฌ.19 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 3 157

ฌ.20 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap aluminum fluoride (Coating weight of metal soap = 5.50 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 3 157

ฌ.21 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 1 158

ฌ.22 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 1 158

ฌ.23 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 1 159

ฌ.24 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 2 159

ฌ.25 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 2 160

ฌ.26 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 2 160

ฌ.27 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 3 161

ฌ.28 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 3 161

ฌ.29 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) ของ Soap phosphate (Coating weight of metal soap = 0.80 g/m^2) บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 3 162

ฌ.30 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 1 162

ฌ.31 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 1 163

ฌ.32 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 1 163

ฌ.33 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 2 164

ฌ.34 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 2 164

ฌ.35 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 2 165

ฌ.36 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 1 ครั้งที่ 3 165

ฌ.37 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 2 ครั้งที่ 3 166

ฌ.38 แสดงกราฟที่ได้จากวัดผิวของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test ที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Measuring Device) กรณีไม่ใช้สารหล่อลื่น บริเวณที่ 3 ครั้งที่ 3 166

ฎ.1 แสดงแบบของ Upper punch ของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test 170

ฎ.2 แสดงแบบของ Lower punch ของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test 171

ฎ.2 แสดงแบบของ Die insert ของแม่พิมพ์ทดสอบ Double cup extrusion test 172

รายการสัญลักษณ์

a	=	รัศมีของพื้นที่ที่สัมผัส
d_0	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในวงแหวนก่อนการทดสอบ
d_1	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในวงแหวนหลังการทดสอบ
D_i	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในวงแหวน
D_o	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกวงแหวน
E^*	=	ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นประสิทธิผล
E_{ball}	=	ค่า Young's modulus ของวัสดุบอล
E_{disc}	=	ค่า Young's modulus ของแผ่นจาน
F	=	แรงกดที่กระทำที่บอล
h_0	=	ความสูงของชิ้นงานก่อนการทดสอบวงแหวน
h_1	=	ความสูงของชิ้นงานหลังการทดสอบวงแหวน
H	=	ความสูงของชิ้นงานหลังการทดสอบ Double cup extrusion test
H_1	=	ความสูงของถ้วยด้านบนของชิ้นงานหลังการทดสอบ Double cup extrusion test
H_2	=	ความสูงของถ้วยด้านล่างของชิ้นงานหลังการทดสอบ Double cup extrusion test
P_0	=	ความเค้นสูงสุดที่วัดได้ ที่เกิดในวัสดุ
R	=	Cup height ratio
R^*	=	ค่ารัศมีความโค้งประสิทธิผล
Ra	=	ค่า Arithmetical Mean Roughness
$Rmr(c)$	=	ค่า Material ratio of the profile
S_r	=	Real stroke
t	=	ความหนา
μ	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
σ_f	=	ความเค้นในการไหลตัว
υ_{ball}	=	ค่า Poisson ratio ของวัสดุบอล
υ_{disc}	=	ค่า Poisson ratio ของจานหมุน

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Adhesion	=	การยึดติดกัน
AlF-soap	=	Soap aluminum fluoride
Breakdown	=	การหยุดชะงักลง
Calibration curve	=	กราฟสำหรับใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
Coating weight	=	น้ำหนักของสารหล่อลื่น
Cold forging	=	กระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น
Contact pressure	=	แรงดันสัมผัส
Cryolite layer	=	ผิวชั้นแรกในการเคลือบสารหล่อลื่น
Double cup extrusion test	=	การทดสอบชิ้นงานแบบผสม (Forward and backward extrusion)
Friction coefficient	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
HRC	=	การวัดความแข็งแบบร็อคเวล สเกลซี
Material flow	=	การไหลตัวของเนื้อวัสดุ
Metal soap	=	ชั้นกลางของสารหล่อลื่นที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างชั้นของ Soap และชั้นของ Cryolite
Normal load	=	น้ำหนักกด
Normal pressure	=	ความดันในขณะทดสอบ
PO_4-soap	=	Soap phosphate
Ring compression test	=	การทดสอบแรงอัดชิ้นงานทดสอบรูปวงแหวน
SEM	=	Scaning Electron Microscope
Soap aluminum fluoride coating	=	กระบวนการเคลือบสารหล่อลื่นด้วยอลูมิเนียมฟลูออไรด์+สบู่
Soap phosphate coating	=	กระบวนการเคลือบผิวโลหะด้วยฟอสเฟต+สบู่
Surface displacement	=	ระยะทางในการเคลื่อนที่ของพื้นผิว
Surface expansion	=	การขยายตัวของเนื้อวัสดุ
Surface roughness	=	ความหยาบผิว
Surface sliding	=	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์