

## การศึกษาอิทธิพลของความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่น

### ของกระบวนการดึงท่อทองแดง

## Study on Influences of Viscosity and Chlorine additive in Tube Drawing Process

ณัฐนันท์ มุลสระดู<sup>1\*</sup> พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์<sup>2</sup> และ วารุณี เปรมานนท์<sup>3</sup>

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9209 โทรสาร 0-2470-9210 \*อีเมล nutthanun.moo@kmutt.ac.th

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9209 โทรสาร 0-2470-9210 อีเมล pongpan.kae@kmutt.ac.th

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9209 โทรสาร 0-2470-9210 อีเมล varunee.pre@kmutt.ac.th

Nutthanun Moolsradoo<sup>1\*</sup>, Pongpan Kaewtatip<sup>2</sup> and Varunee Premanond<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tongkru, Bangkok 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210, \*E-mail: nutthanun.moo@kmutt.ac.th

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Bangmod, Tongkru, Bangkok 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210, E-mail: pongpan.kae@kmutt.ac.th

<sup>3</sup> Department of Tool and Material Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Bangmod, Tongkru, Bangkok 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210, E-mail: varunee.pre@kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม ในการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง วิธีการที่ใช้ในกระบวนการดึงท่อ คือวิธีการดึงท่อแบบโพล์ดิงปลั๊ก วัสดุทำตายและปลั๊ก คือทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยใช้ครึ่งมุมตายเท่ากับ 13 องศา และครึ่งมุมปลั๊กเท่ากับ 11 องศา ท่อทองแดงใช้ตามมาตรฐาน (JIS) H3300 C1220 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกท่อก่อนดึงเท่ากับ 22.24 มิลลิเมตร ผนังท่อหนา 1.14 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกท่อหลังดึงเท่ากับ 19.96 มิลลิเมตร ผนังท่อหนา 0.77 มิลลิเมตร อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ 38 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลคือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีความหนืดต่างกัน 4 ระดับ และศึกษาเพิ่มเติมอิทธิพลของปริมาณคลอรีนซึ่งเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยรับแรงกด (EP Additives) การทดสอบเพื่อตรวจสอบสมมติฐานที่ตั้งไว้จะพิจารณาจากแรงที่ใช้ในการดึงท่อที่ลดลงและความเรียบผิวท่อสำเร็จที่ขึ้น ซึ่งจากการ

ทดลองพบว่าความเรียบผิวของท่อและแรงที่ใช้ในการดึงท่อ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือความหนืด ส่วนปัจจัยรองคือสารรับแรงกดคลอรีน โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยจะทำให้ผิวท่อมีความเรียบมาก แต่ต้องไม่น้อยเกินไปจนอาจทำให้ท่อขึ้นรูปไม่สำเร็จได้ และน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดมากจะทำให้แรงเสียดทานมาก นอกจากนั้นน้ำมันหล่อลื่นที่มีส่วนผสมของสารรับแรงกดคลอรีนจะช่วยลดแรงเสียดทานได้

### Abstract

The aim of this research is to develop suitable lubricants for copper tube drawing process. Tube drawing operations are carried out using the floating-plug method. Both die and plug materials are tungsten carbide. The half die angle and half plug angle are 13° and 11°, respectively. The tube material for this

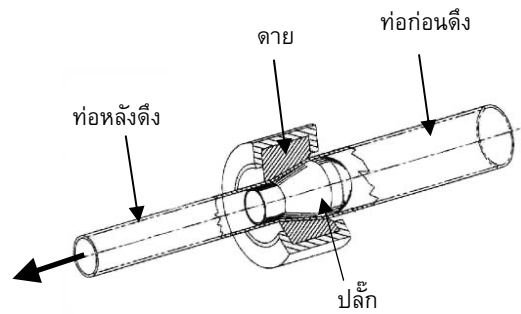
experiment is copper tube (JIS) H3300 C1220. The outer diameter of the tube before drawing is 22.24 millimeters having 1.14 millimeters thickness. The reduction ratio of the cross sectional area is set to be constant at 38 percent. Four types of base oil having different viscosity are experimented. Additionally, the experiments were carried out using extreme pressure additive (EP) which is Chlorine. The performance of each lubricant is evaluated by the ability to decrease maximum drawing load and to provide better quality of tube wall surface. The results show that tube surface roughness depended on lubricant viscosity. The lower the viscosity of lubricant, the better is the surface quality. Chlorine additive in the lubricant has less effect on decreasing the coefficient of friction and maximum drawing load.

### 1. บทนำ

กระบวนการดึงท่อ (Tube Drawing) เป็นกระบวนการขึ้นรูปท่อ กระบวนการหนึ่งของการผลิตท่อ โดยนำท่อที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปอื่นมาลดขนาดลง เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ เพื่อผลทางความแข็งแรงของท่อ ความเรียบของผิวท่อ และขนาดถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้เพื่อที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นต่อไป เช่น ท่อทองแดงในอุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ซึ่งถือว่าการดึงโดยวิธีรวดเร็วและต่อเนื่อง ในการผลิตจึงจำเป็นต้องพยายามลดต้นทุนให้มีความต่ำและเกิดความเสียหายน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามในกระบวนการดึงท่อยังคงมีปัญหา เช่นท่อที่ผ่านการดึงมีคุณภาพของผิวท่อที่ไม่ดี และก่อให้เกิดการขาดขณะทำการดึง ดังนั้นการศึกษานี้จึงจัดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็น ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ คือน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นการศึกษานี้เกี่ยวกับอิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่น เช่นในส่วนของการความหนืดและสารเพิ่มคุณภาพ ซึ่งเป็นส่วนผสมในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีความสำคัญ และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดึงท่อที่ผ่านมา [1, 2, 3] ยังไม่มีงานวิจัยเรื่องใดที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้โดยตรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความหนืด และอิทธิพลของปริมาณคลอรีน (Chlorine) ซึ่งเป็นสารเพิ่มคุณภาพ มีคุณสมบัติช่วยรับแรงกด (EP; Extreme Pressure) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการดึงท่อต่อไป

### 2. การดึงท่อด้วยวิธีโฟลตติ้งปลั๊ก (Floating Plug Drawing)

กระบวนการดึงท่อด้วยวิธีโฟลตติ้งปลั๊ก ดังที่แสดงในรูปที่ 1 เป็นกระบวนการขึ้นรูปท่อที่สามารถผลิตท่อที่มีความยาวต่อเนื่องได้ ภายในของท่อจะถูกควบคุมขนาดและผิวโดยดาย (Die) ส่วนปลั๊ก (Plug) ซึ่งทำงานในลักษณะลอยตัวโดยอาศัยความสมดุลของแรง ระหว่างแรงเสียดทานและแรงดันจากดายจะควบคุมขนาดและผิวภายในท่อ [4] ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และเป็นวิธีที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1 การดึงท่อด้วยวิธีโฟลตติ้งปลั๊ก [5]

### 3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองดึงท่อทองแดง เกรด (JIS) H3300 C1220 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกท่อก่อนดึงเท่ากับ 22.24 มิลลิเมตร ความหนาผนังท่อก่อนดึง 1.14 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกท่อหลังดึงเท่ากับ 19.96 มิลลิเมตร ความหนาผนังท่อหลังดึง 0.77 มิลลิเมตร อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ 38 รูปร่างดายและปลั๊กที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ เกรด K30 โดยใช้เครื่องมือดายและเครื่องมือปลั๊กเท่ากับ 13 และ 11 องศาตามลำดับ เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง คือเครื่องดึงท่อดรอปเบนซ์ (Draw bench) ดังแสดงในรูปที่ 3 ความเร็วที่ใช้ในการทดลองดึงท่อเท่ากับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) ที่มีค่าความหนืดต่างกัน จำนวน 4 ชนิด (A-D) ดังตารางที่ 1 และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแต่ละความหนืดจะผสมสารรับแรงกดคลอรีนและกรดไขมัน (Fatty acid) โดยมีรายละเอียดส่วนผสมดังนี้

1. Base oil (A-D) 95% (%wt.) + 5% Fatty acid (%wt.)
2. Base oil (A-D) 90% (%wt.) + 5%Cl (%wt.)+ 5% Fatty acid (%wt.)
3. Base oil (A-D) 85% (%wt.) + 10%Cl (%wt.)+ 5% Fatty acid (%wt.)
4. Base oil (A-D) 80% (%wt.) + 15%Cl (%wt.)+ 5% Fatty acid (%wt.)

หมายเหตุ : กรดไขมันช่วยในการเพิ่มความลื่นและเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน [6]



รูปที่ 2 ดายและปลั๊กที่ใช้ในงานวิจัย

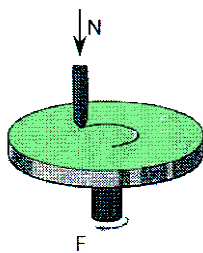


รูปที่ 3 เครื่องดัดท่อแบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

| ชนิดของ<br>น้ำมันหล่อลื่น | คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น         |                                     |                  |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
|                           | ความหนืดที่อุณหภูมิ<br>40°C (cSt.) | ความหนืดที่อุณหภูมิ<br>100°C (cSt.) | จุดวาบไฟ<br>(°C) |
| A                         | 10.50                              | 2.74                                | 170              |
| B                         | 29.89                              | 5.20                                | 204              |
| C                         | 99.08                              | 11.07                               | 267              |
| D                         | 497.60                             | 32.40                               | 305              |

งานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดสอบความเสียดทานของน้ำมันหล่อลื่นด้วยวิธีบอลบนแผ่นจานหมุน (Ball-on-disk) ดังรูปที่ 4 โดยใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) ซึ่งทดลองตามมาตรฐาน ASTM G99-95a [7] กำหนดให้บอลแทนแม่พิมพ์ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และแผ่นจานหมุนทำจากวัสดุทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร ระยะทางในแนวเส้นตรงที่ทำการทดสอบที่กำหนดคือ 300 เมตร การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานจริงกับการทดสอบแบบบอลบนจานหมุนแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 4 หลักการทำงานของ Ball-on-disk [8]

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานจริงกับการทดสอบแบบบอลบนจานหมุน

| สภาวะเงื่อนไข              | สภาวะการทำงานจริง                                               | การทดสอบบอลบนแผ่นจานหมุน |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| ความเร็วในการทำงาน         | 160 มิลลิเมตรต่อวินาที                                          |                          |
| อุณหภูมิการทำงาน           | อุณหภูมิห้อง                                                    |                          |
| น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ทดสอบ  | น้ำมันพื้นฐาน 4 ชนิด และผสมสารรับแรงกดคลอรีนที่ 5%, 10% และ 15% |                          |
| น้ำหนักกด                  | -                                                               | 10 N                     |
| อัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัด | 38%                                                             | -                        |
| ความดันที่ตำแหน่งสัมผัส    | 1421 MPa*                                                       | 1177 MPa**               |

\* ผลได้จากการทดสอบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM2D V7.1 ซึ่งเงื่อนไขต่างๆเหมือนกับการทดลองจริง คุณสมบัติของวัสดุท่อได้จากการทดสอบจริงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้สมการ  $\sigma_t = K\epsilon^n$  ค่าที่ได้คือค่า  $K=523.59$  MPa และค่า  $n=0.0295$

\*\*จากการคำนวณของเครื่องไตรโบมิเตอร์ (Hertzian Equation [9])

#### 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

##### 4.1 การทดสอบหาค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

จากการหาค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40°C พบว่าน้ำมันหล่อลื่น A, B และ C เมื่อทำการผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ความหนืดของน้ำมันที่ได้นั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารรับแรงกดคลอรีนมีค่าความหนืดเท่ากับ 246 cSt. ซึ่งมากกว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน A, B และ C ดังตารางที่ 3 ดังนั้นเมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้นั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนน้ำมันหล่อลื่น D เมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณที่มากขึ้นกลับทำให้ความหนืดของน้ำมันที่ได้นั้นลดลง เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่น D มีค่าความหนืดเท่ากับ 497.6 cSt. ซึ่งมากกว่าสารรับแรงกดคลอรีน เมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนืดลดลง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

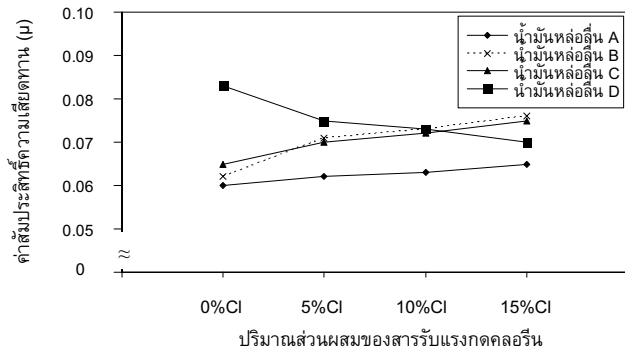
| ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น<br>และปริมาณคลอรีนที่ผสม | ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C (cSt.) |         |
|------------------------------------------------|---------------------------------|---------|
|                                                | 0%Cl                            | *10.50  |
| A                                              | 5%Cl                            | 13.60   |
|                                                | 10%Cl                           | 16.10   |
|                                                | 15%Cl                           | 21.40   |
| B                                              | 0%Cl                            | *29.89  |
|                                                | 5%Cl                            | 39      |
|                                                | 10%Cl                           | 48      |
|                                                | 15%Cl                           | 55      |
| C                                              | 0%Cl                            | *99.08  |
|                                                | 5%Cl                            | 105     |
|                                                | 10%Cl                           | 121     |
|                                                | 15%Cl                           | 126     |
| D                                              | 0%Cl                            | *497.60 |
|                                                | 5%Cl                            | 440     |
|                                                | 10%Cl                           | 400     |
|                                                | 15%Cl                           | 380     |
| Chlorine (Cl)                                  | 100%Cl                          | *246    |

\*ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ที่ไม่ได้ผสมสารรับแรงกดคลอรีนได้จากบริษัทผู้ผลิต หลังจากผสมแล้วค่าความหนืดหาจากกราฟการผสมน้ำมันที่มีความข้นใสต่างกัน (viscosity of blends) [6]

##### 4.2 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

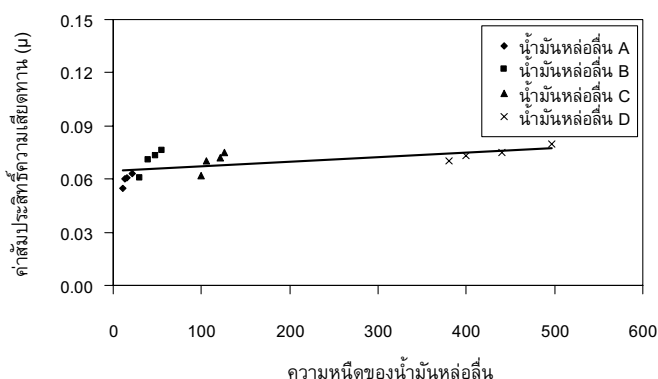
จากผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดแตกต่างกันด้วยวิธี Ball-on-disk ดังรูปที่ 5 พิจารณาเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ที่ไม่ได้ผสมสารรับแรงกดคลอรีน

(0%Chlorine) พบว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีค่าความหนืดมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง เนื่องจากโอกาสในการแทรกตัวเข้าไปที่หน้าสัมผัสระหว่างบอลและจานหมุนเกิดได้ยาก ส่งผลให้โอกาสในการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างบอลและจานหมุนเกิดง่ายขึ้น



รูปที่ 5 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

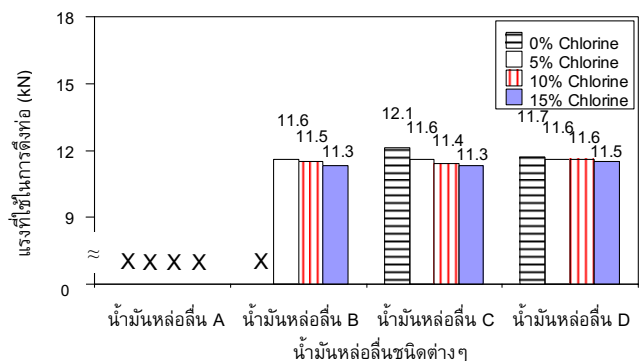
พิจารณาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน A-D เมื่อเติมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณ 5%, 10% และ 15% พบว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน A, B และ C เมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับคุณสมบัติของสารรับแรงกดคลอรีน ที่ช่วยลดแรงเสียดทานภายใต้สภาวะความดันสูง และเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดสูง [10] ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่ามากขึ้นด้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ ที่ 4.1 ส่งผลให้โอกาสในการแทรกตัวเข้าไปที่หน้าสัมผัสระหว่างบอลและจานหมุนเกิดง่ายขึ้น ส่วนน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน D ซึ่งได้ผลในทางตรงกันข้ามกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน A, B และ C เนื่องจากเมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณมากขึ้น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ได้มีค่าความหนืดน้อยลง จึงน่าจะส่งผลให้โอกาสในการแทรกตัวเข้าไปที่หน้าสัมผัส ระหว่างบอลและจานหมุนเกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อนำผลดังกล่าวมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กับค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นได้ดังรูปที่ 6 ดังนั้นจากการทดลองนี้จะพบว่าสารรับแรงกดคลอรีนจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 6 อิทธิพลของความหนืดน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

#### 4.3 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึงท่อ

จากผลการทดลองวัดแรงที่ใช้ในการดึงท่อดังรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาแรงที่ใช้ในการดึงท่อโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ที่ยังไม่ได้ผสมสารรับแรงกดคลอรีน (0%Chlorine) พบว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน A และ B ขึ้นรูปไม่สำเร็จ เนื่องจากมีค่าความหนืดน้อยคือ 10.50 cSt. และ 29.89 cSt. ตามลำดับ และขณะที่การดึงท่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวท่อวัดได้ประมาณ 85°C แต่ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น A และ B ที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าเพียง 2.74 cSt. และ 5.20 cSt. ตามลำดับ จึงน่าจะทำให้ความหนืดไม่เพียงพอ โอกาสที่ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นจะยึดเกาะกันน้อย ทำให้โอกาสในการแตกของฟิล์มมีมาก ส่งผลให้ความเสียดทานสูงมากขึ้นจนทำให้เกิดการขาด และพบว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน D ทำให้แรงที่ใช้ในการดึงท่อต่ำกว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน C เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน D มีความหนืดมากกว่า จึงน่าจะทำให้เกิดการยึดเกาะกับผิวท่อและถูกนำพาเข้าไปข้างในแม่พิมพ์ และการคงอยู่ของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวท่อกับผิวแม่พิมพ์ได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อย ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ทดสอบด้วยวิธี Ball-on-disk ที่พบว่าเมื่อความหนืดมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธี Ball-on-disk พื้นที่สัมผัสจริงระหว่างบอลและแผ่นจานน้อยมากจึงทำให้การแทรกตัวของน้ำมันหล่อลื่นเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นเมื่อน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดมากการแทรกตัวเข้าไปจึงยากขึ้น แต่กรณีการดึงท่อจริงเป็นการนำพาน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปบริเวณพื้นที่สัมผัส ระหว่างท่อและแม่พิมพ์ซึ่งมีมาก ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดมาก จึงสามารถเข้าไปประหว่งพื้นที่สัมผัสและคงอยู่ได้ดี



\*อุณหภูมิทำงาน (°C) -

รูปที่ 7 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึงท่อ

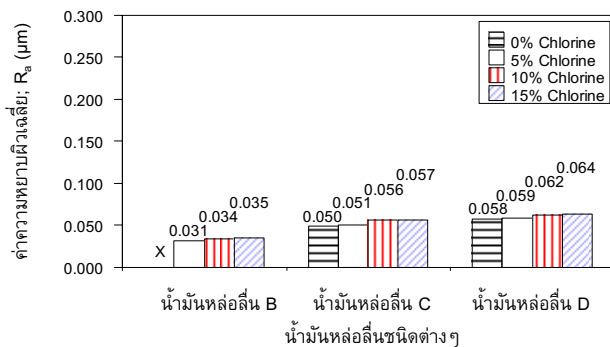
หมายเหตุ \* อุณหภูมิทำงานหมายถึง อุณหภูมิที่วัดได้บนผิวท่อขณะทดลองดึงท่อด้วยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ที่ยังไม่เติมสารรับแรงกดคลอรีนโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแบบสัมผัส X หมายถึง ขึ้นรูปไม่สำเร็จ

เมื่อพิจารณาแรงที่ใช้ในการดึงท่อของสารหล่อลื่นพื้นฐาน A-D ที่มีการเติมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณ 5%, 10% และ 15% ดังรูปที่ 7 พบว่าสารหล่อลื่น A แม้จะมีการเติมสารรับแรงกดคลอรีนและมีค่าความหนืดมากขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 10.5 - 21.4 cSt. ยังไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้

สำเร็จ เนื่องจากค่าความหนืดยังคงไม่มากพอ ส่วนสารหล่อลื่น B และ C พบว่ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อปริมาณของสารรับแรงกดคลอรีนที่ผสมในสารหล่อลื่นมากขึ้น ซึ่งทำให้ความหนืดมากขึ้น จะทำให้แรงที่ใช้ในการดึงต่อน้อยลง ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ยังไม่ได้ผสมสารรับแรงกดคลอรีน และขณะทดลองดึงท่อจริงเกิดความดันที่ผิวท่อสูงกว่าการทดลองแบบ Ball-on-disk ดังตารางที่ 2 จึงน่าจะทำให้สารรับแรงกดคลอรีนซึ่งทำงานได้ดีในสภาวะที่เกิดแรงอัดสูงสามารถทำงานได้ และช่วยให้ น้ำมันหล่อลื่น D ซึ่งมีผลในทิศทางตรงกันข้าม คือผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณมากขึ้นแล้วทำให้ความหนืดน้อยลง แต่กลับทำให้แรงน้อยลงด้วย และจะพบว่าแรงที่ใช้ในการดึงตัวของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิด มีค่าแตกต่างกันน้อย เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืด และสารรับแรงกดแตกต่างกัน จะส่งผลต่อความเสียหายระหว่างผิวท่อและแม่พิมพ์เท่านั้น ขณะที่แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ แรงที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป แรงที่ใช้ในการเอาชนะการเฉือน และแรงที่ใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทาน [11] การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นซึ่งส่งผลต่อแรงเสียดทาน ถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสองส่วนแรก จึงทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปรวมที่วัดได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

#### 4.4 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวท่อ

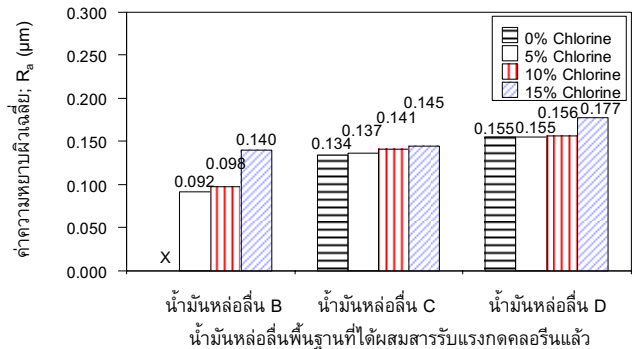
จากผลการทดลองการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวในท่อ ซึ่งทำการวัดในแนวขวางการไหลตัวของเนื้อวัสดุท่อ แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า น้ำมันหล่อลื่น B, C และ D มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณมากขึ้น จะทำให้ผิวในท่อหยาบมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณมากขึ้น ทำให้ น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดมากขึ้นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำให้ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นมีความหนาแน่นมากขึ้น [12] สามารถรับแรงกดบนผิวท่อได้ดีขึ้น การเกิดกลไกการถ่ายผิวจากแม่พิมพ์มาสู่ชิ้นงานผ่านน้ำมันหล่อลื่นจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า แต่จะพบว่า น้ำมันหล่อลื่น D ซึ่งเมื่อผสมสารรับแรงกดในปริมาณที่มากขึ้นแล้วทำให้ความหนืดน้อยลง แต่ผิวท่อยังคงหยาบมากขึ้น ทั้งนี้เพราะการคงอยู่ของน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดมาก ทำให้การยึดเกาะและการคงอยู่ของน้ำมันหล่อลื่นดีขึ้น ซึ่งสามารถดูได้จากแรงที่ใช้ในการดึงท่อที่ลดลง



รูปที่ 8 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวในท่อ

หมายเหตุ X; หมายถึงขึ้นรูปไม่สำเร็จ

ผลการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยของผิวนอกท่อแสดงดังรูปที่ 9 พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันกับผิวในท่อ นั่นคือเมื่อผสมสารรับแรงกดคลอรีนในปริมาณมากขึ้น จะทำให้ผิวเฉลี่ยด้านนอกของท่อมีแนวโน้มหยาบมากขึ้น



รูปที่ 9 อิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวนอกท่อ

หมายเหตุ X; หมายถึงขึ้นรูปไม่สำเร็จ

นอกจากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบความเรียบผิวระหว่างผิวในท่อและผิวนอกท่อ พบว่าผิวในท่อมีความเรียบมากกว่าผิวนอกท่อ ทั้งนี้เพราะกลไกการถ่ายผิวด้านในของท่อจะเกิดขึ้นได้มากกว่าด้านนอก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshida K. และคณะ [13] ซึ่งได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การวิบัติขึ้นรูปท่อ และพบว่าค่าความเครียดประสิทธิผล (Effective strain) ของผิวด้านในมีค่ามากกว่าผิวด้านนอกทำให้ผิวด้านในมีความเรียบมากกว่าด้านนอก

#### 5. สรุปผลการวิจัย

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ไม่ได้เติมสารรับแรงกดคลอรีน ที่มีความหนืดมาก จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูง
2. น้ำมันหล่อลื่นที่มีส่วนผสมของสารรับแรงกดคลอรีนจะช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ แต่มีอิทธิพลน้อยกว่าค่าความหนืด
3. น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดน้อยจะทำให้ท่อที่ได้มีผิวเรียบ แต่ต้องไม่น้อยเกินไปจนอาจทำให้ท่อขึ้นรูปไม่สำเร็จได้ ซึ่งจากการทดลองในที่นี้หมายถึงความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100°C ต้องไม่น้อยกว่า 5.2 cSt.

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณหลักในการทำวิจัย จากทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และยังได้รับการสนับสนุนวัสดุทดลองจากบริษัท Furukawa (Thailand) Public Co., Ltd. และขอขอบคุณ นาย กำพล อังสุเกษตร นักเรียนโครงการ 2B KMUTT ที่ช่วยดำเนินการทดลองและเก็บผลการทดลองคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Sadok, L., Kusiak, J., Packo, M. and Ruminski, M., 1996, "State of Strain in the Tube Sinking Process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, pp. 161-166.
- [2] Fisher, W.P. and Day, A.J., 1997, "A Study of Factors Controlling the Tube-Sinking Process for Polymer Materials", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, pp. 156-162.
- [3] Hillery, T. and McCabe, J., 1995, "Wire Drawing at Elevated Temperatures using Different Die Materials and Lubricants", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 55, pp. 53-57.
- [4] Betzalel, A., 1983, Handbook of metal-forming processes, John Wiley, New York, pp. 479- 525.
- [5] Kampson, K., 2001, Design for Manufacture in Cost-effective and Recyclable Brass. <http://www.brass.org/Training/Lecture/sld043.htm/> (accessed on September 2003)
- [6] ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร, 2547, เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น, บริษัท ซีอีดียูเคชั่น จำกัด (มหาชน), หน้า 239-271.
- [7] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus<sup>1</sup>, ASTM G99-95, 1997.
- [8] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์, ผกามาต แซ่ห่อ้ง, วารุณี เปรมานนท์ และ สุรพล ราษฎร์นุ้ย, 2545, การสึกหรอ : ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, หน้า 50-66.
- [9] Bhushun, B., 2001, Modern Tribology Handbook, CA:CRC Press, London, pp. 122-123.
- [10] วีระศักดิ์ กรัยวิเชียร, 2544, น้ำมันหล่อลื่น, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7.
- [11] Lange, K., 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, New York, pp. 13.1-14.23.
- [12] Dieter, G.E., 1988, Mechanical Metallurgy, Mc-Graw Hill, Singapore, pp. 544-549.
- [13] Yoshida, K., Watanabe, M. and Ishikawa, H., 2001, "Drawing of Ni-Ti Shape-Memory-Alloy Fine Tubes used in Medical Tests", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 218, pp. 251-255.