วว.TISTR

โครงการวิจัยที่ ภ. 56-08 / ย. 4 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

พัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงาน สำหรับงานตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูง

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 56–08
การพัฒนาเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์เพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และสถานศึกษา

โครงการย่อยที่ 4
พัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานสำหรับงานตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูง

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)
พัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานสำหรับงานตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูง

โดย

อรุณรัตน์ แสนสิ่ง **ทวี ทองคำ**
นรา สุประพัฒน์โภคา **ทรงเกียรติ รอดแดง**
บุญเชิด ประเสริฐพงศ์ **บุญเตือน มงคลแถลง**
สุพัฒน์ นวลโกฏ **นภัสวรรณ อุทัยธีรนันท์**

บรรณาธิการ วว., ปทุมธานี 2558
นฤมล รื่นไวย์
บุญเรียม น้อยชุมแพ
ศิริสุข ศรีสุข

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

(นายยงวุฒิ เสาวพฤกษ์)
ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานสำหรับการตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูงสำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงบประมาณ ซึ่งคณะผู้ดำเนินงานใคร่ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูง นอกจากนี้ ยังมีพนักงาน วว. อีกหลายท่านที่อำนวยความสะดวกในการประสานงานด้านต่างๆ ทำให้โครงการสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ทั้งด้านธุรการ, เอกสาร และการเงิน ซึ่งไม่สามารถกล่าวได้ทั้งหมดในที่นี้ ทางคณะผู้ดำเนินงานขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เช่นกัน.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	14
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	21
4. สรุปผลการทดลอง	24
5. ข้อเสนอแนะ	25
6. เอกสารอ้างอิง	26
ภาคผนวก ก ข้อมูลทางเทคนิคน้ำมันหล่อเย็น	27
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบผลการทดลอง	30

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.	กลุ่มเป้าหมายการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์และผลลัพธ์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น	25
ตารางที่ 2.	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยการหล่อเย็นด้วยน้ำมันมะพร้าว	30
ตารางที่ 3.	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยการหล่อเย็นด้วยน้ำมัน LB-1	31
ตารางที่ 4.	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยการหล่อเย็นด้วยน้ำมันชนิดผสมน้ำ (Soluble oil)	32

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.	การทำงานด้วยวิธีหล่อเย็นแบบ MQL	3
รูปที่ 2.	ขบวนการทำงาน MQL	4
รูปที่ 3.	การทำงาน MQL 3 หัวฉีด	5
รูปที่ 4.	ขั้นตอนการดำเนินงาน	14
รูปที่ 5.	วงจรการทำงานอุปกรณ์หล่อเย็น 1 หัวฉีด	15
รูปที่ 6.	วงจรการทำงานอุปกรณ์หล่อเย็น 3 หัวฉีด	16
รูปที่ 7.	อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 1 หัวฉีด	16
รูปที่ 8.	อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 3 หัวฉีด	17
รูปที่ 9.	ส่วนประกอบอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ	17
รูปที่ 10.	การทดลองด้วยงานกลึงปอกผิว	19
รูปที่ 11.	การวัดความหยาบผิวชิ้นงาน	20
รูปที่ 12.	ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมัน LB-1	21
รูปที่ 13.	ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมันมะพร้าว	21
รูปที่ 14.	ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมันชนิดผสมน้ำ (soluble oil)	22
รูปที่ 15.	ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเปรียบเทียบน้ำมันหล่อเย็น	22

DEVELOPMENT OF COOLING UNIT FOR HING PRECISION METAL CUTTING

Arunrat Saensing, Thawee Tongkam, Nara Suprapatpoca, Songkiat Roddeang, Booncherd Prasertpong, Boonteun Mongkoltalang, Suphat Noulgod and Napatsawan Authaiteeranan

ABSTRACT

Cooling by soluble oil is preferred to use extensively in production industries. However, using soluble oil has the chemical problems with the operators and other jeopardizes such as air pollution, chemical removal and over using quantity. Therefore, this research was studied for suitable using minimum quantity lubrication (MQL); LB-1 which is environmentally friendly on thoroughly metal cutting.

In this research, a prototype of cooling unit for high precision on metal cutting was developed, consisting of 1 and 3 nozzles that generated feed rate at 50-300 ml/hr. In the experiment, the prototype was tested with LB-1 and coconut oil, and then the results were compared with soluble oil by measuring effectiveness though average surface roughness (Ra) of Lathe Machining (S45C steel).

The results of the experiment showed that average surface roughness of S45C steels tested with three kinds of coolant oil were not significantly different. From the demonstration, coconut oil could be used as coolant oil in replacement of soluble oil. Moreover, it appeared that the natural product was recommended as it had non-pollution to the environmental.

พัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงาน
สำหรับการตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูง

อรุณรัตน์ แสนสิ่ง[1], ทวี ทองคำ[1], นรา สุประพัฒน์โภคา[1], ทรงเกียรติ รอดแดง[1],
บุญเชิด ประเสริฐพงศ์[1], บุญเตือน มงคลแถลง[1], สุพัฒน์ นวลโกฏ[1]
และนภัสวรรณ อุทัยธีรนันท์[1]

บทคัดย่อ

การหล่อเย็นแบบผสมน้ำ (soluble oil) ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต แต่ยังประสบปัญหาจากสารเคมี ทำให้การเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และอันตรายในด้านต่างๆ ได้แก่ มลพิษทางอากาศ, การกำจัดสารเคมี และการใช้ปริมาณมาก นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาการใช้อย่างเหมาะสมของ Minimum Quantity Lubrication (MQL) ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในงานตัดเฉือนโลหะที่มีความละเอียดสูง.

ในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบในงานตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูง ซึ่งประกอบไปด้วย 1 และ 3 หัวฉีด สามารถกำหนดอัตราการฉีดได้ที่ 50-300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง นำไปทดสอบกับน้ำมัน LB-1 และน้ำมันมะพร้าว พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกับ soluble oil โดยหาการวิเคราะห์ค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานกลึงปอกผิวเหล็ก S45C.

จากผลการทดลอง พบว่า สารหล่อเย็นทั้ง 3 ชนิด ให้ผลการทดสอบค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ได้ค่าใกล้เคียงกัน, การหล่อเย็นด้วยน้ำมันมะพร้าววัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุด และการหล่อเย็นแบบผสมน้ำ (soluble oil) ให้ค่าสูงสุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการหล่อเย็นโดยใช้น้ำมันมะพร้าวสามารถนำมาทดแทนสารหล่อเย็นแบบผสมน้ำ (soluble oil) ได้ และเป็นการประยุกต์นำผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติมาใช้ในการหล่อเย็นและไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม.

---

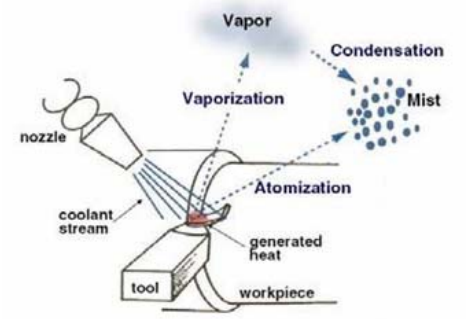
[1]ฝ่ายวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

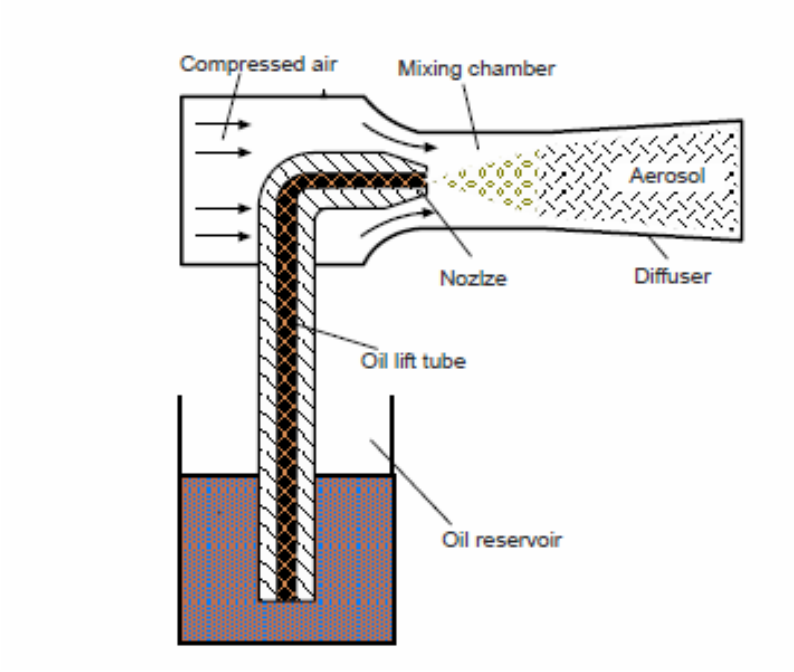
ในอดีตที่ผ่านมาการตัดเฉือนขึ้นรูปโลหะโดยใช้เครื่องจักร นิยมใช้สารหล่อเย็นที่เรียกว่า คูลแลนต์ (Coolant) อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต กรรมวิธีการตัดเฉือนโลหะเป็นการกำจัดเศษเนื้อโลหะออกให้ได้ขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการมีหลายวิธี เช่น งานกลึง, งานกัด, งานไส, งานเจาะ, งานทำเกลียว, งานเลื่อย, งานเจียรนัย, งานตัด และอื่นๆ การหล่อเย็นมีความจำเป็น การลดอุณหภูมิจากการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับมีดตัด ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีดตัดเสียหาย อายุการใช้งานสั้นลง และเพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานให้ดีขึ้น การหล่อเย็นแบบดั้งเดิมหรือเรียกว่าการตัดเฉือนแบบเปียก (Wet Cutting) มีข้อดี คือ ราคาถูก, หาซื้อง่าย แต่มีข้อเสีย คือ เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและต่อคนทำงาน, การกำจัดยาก, มีสารพิษตกค้างและใช้ปริมาณที่มาก เนื่องจากสารหล่อลื่นหลักได้จากกลุ่มน้ำมันปิโตรเลียมและใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มคุณภาพการตัดเฉือนที่อยู่ในรูปน้ำมันที่ละลายได้ (soluble oils). จากนั้น ได้ถูกพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติด้านการหล่อเย็นและความต้านทานความร้อนเป็นการพัฒนาจากน้ำมันหล่อลื่น (straight oils) แต่ก็มีส่วนประกอบทางเคมีต่างๆ ที่เพิ่มเข้าไปทำให้เกิดปัญหา เช่น การเกิดฟอง, แบคทีเรีย และเชื้อรา จึงต้องมีการใส่สารเติมแต่งเข้าไป ปัจจุบันเราเรียกการหล่อเย็นทั้ง 2 ชนิดนี้ว่า Water Emulsifiable Oils และ Straight Cutting Oils และมีการเพิ่มเติมประสิทธิภาพการหล่อเย็นในรูปแบบของสารสังเคราะห์ (synthetic) และสารกึ่งสังเคราะห์ (semi-synthetic) (Astakhov and Davim 2008).

จากปัญหาดังกล่าว การใช้สารหล่อเย็นปริมาณน้อย (Minimum Quantity Lubrication, MQL) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการตัดแบบกึ่งเปียก (Near Dry cutting) จึงถูกพัฒนาจากกระบวนตัดแบบเปียก (Flood cutting) และกระบวนการตัดแห้ง (Dry cutting).

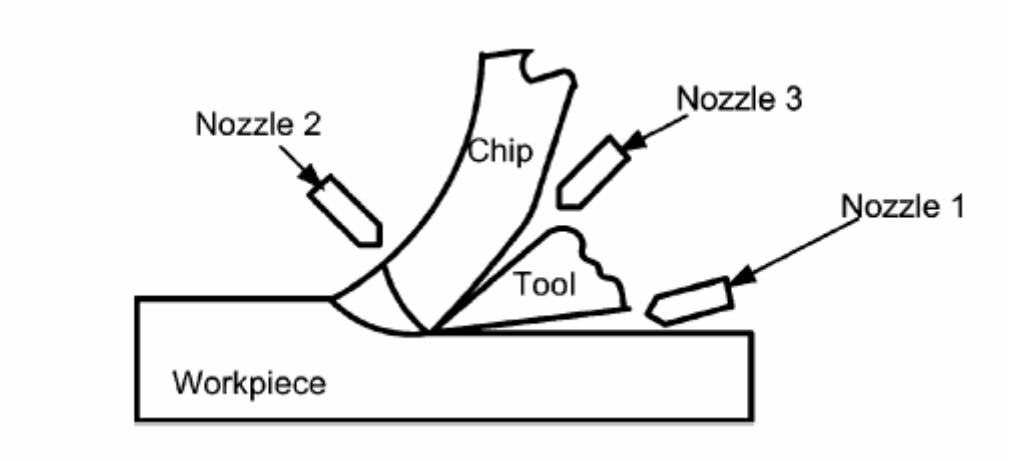


รูปที่ 1. การทำงานด้วยวิธีหล่อเย็นแบบ MQL.

อุปกรณ์หล่อเย็นปริมาณน้อย (Minimum Quantity Lubrication, MQL) เป็นส่วนสำคัญสำหรับการใช้งาน โดยวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำมันหล่อลื่นหรือน้ำมันสังเคราะห์ที่สกัดจากธรรมชาติ (Bio Base Oil) โดยใช้แรงดันลมสูงผสมกับอากาศที่ปลายหัวฉีด ทำให้เกิดละอองที่มีขนาดเล็ก 1-5 ไมโครเมตร ไปที่จุดตำแหน่งพื้นที่การตัดเฉือน (Cutting zone) โดยน้ำมันจะทำหน้าที่เคลือบผิวและหล่อลื่นที่คมตัด ซึ่งหน้าที่หลักของสารหล่อเย็น คือ การลดแรงเสียดทานและลดความร้อนจากมีดตัดกับเศษและมีดตัดกับชิ้นงาน อุณหภูมิของน้ำยาหล่อเย็นจะลดลง เนื่องจากการขยายตัว ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับเอาความร้อนได้มากขึ้น ลดความเครียดเฉือนที่เกิดบนผิวสัมผัส วิธีนี้มีจุดเด่นตรงที่สามารถฉีดน้ำยาหล่อเย็นไปยังบริเวณที่เข้าถึงได้ยากและยังทำให้สามารถเห็นชิ้นงานขณะตัดได้ชัดเจน เพื่อให้ได้ตามความต้องการในการกำจัดเศษโลหะอย่างรวดเร็วขณะที่ทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดการสึกหรอมีดตัดเร็วขึ้นและทำให้คุณภาพชิ้นงานที่ผ่านการตัดได้ตามข้อที่กำหนด หน้าที่รอง คือ ช่วยเป่าเศษชิ้นงานออกจากมีดตัด ปัญหาการสึกหรอมีดตัดนำมาซึ่งคุณภาพผิวชิ้นงาน, ขนาด, ความเที่ยงตรง และยังต้องเปลี่ยนมีดตัดบ่อย ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น (Sutherland, Kukar and King 2004).



รูปที่ 2. ขบวนการทำงาน MQL.



รูปที่ 3. การทำงาน MQL 3 หัวฉีด.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สร้างอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 1 หัวฉีด และ 3 หัวฉีด สำหรับงานความละเอียดสูง.

2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการหล่อเย็น ด้วยน้ำมันมะพร้าว, น้ำมัน LB-1 และการหล่อเย็นแบบเปียก หรือผสมน้ำ (soluble oil) วัดผลความเรียบผิวชิ้นงานเปรียบเทียบ.

3. เพื่อศึกษาเป็นแนวทางการเลือกใช้การหล่อเย็นด้วยวิธีการหล่อเย็นแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 1 หัวฉีด สำหรับเครื่องจักรขนาดเล็ก ปริมาณน้ำมัน 50-300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง.

2. อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 3 หัวฉีด สำหรับเครื่องจักรขนาดใหญ่ปริมาณน้ำมัน 50-300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนา ปรับปรุง วิธีการหล่อเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.

2. เป็นการประยุกต์ในการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติ โดยการเอาน้ำมันมะพร้าวมาใช้ในการหล่อเย็น.

3. สามารถใช้งานกับเครื่องจักรที่ทำงานได้.

4. ลดการนำเข้าอุปกรณ์ เครื่องมือจากต่างประเทศ.

1.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

Filipovic *et al.* 2000 ได้ทำการศึกษาต้นทุนการใช้สารหล่อเย็นแบบเปียก หรือแบบดั้งเดิมในอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่ พบว่า มีต้นทุนสูง เนื่องจากการใช้งานมีปริมาณมาก การดูแลรักษาความสะอาดและการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น, จากปัญหาดังกล่าวจึงกำหนดยุทธศาสตร์โดยการนำเอาวิธีการตัดแห้งและ MQL มาใช้งาน.

Weinert *et al.* 2004 ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ MQL ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ขั้นสูงที่มีประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์ในการลดปริมาณการใช้งานสารหล่อเย็น และถูกพัฒนาขึ้นจากกระบวนการตัดแห้ง.

Mackerer 1989 ได้ทำการศึกษากลุ่มคนทำงานจำนวน 1.2 ล้านคน ในการใช้สารหล่อเย็น พบว่า มีมลพิษทางอากาศที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านสุขภาพและมีสารก่อมะเร็ง ซึ่งเป็นเหตุผลให้มีข้อกำหนดการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเรื่องการกำจัดของเสียสารหล่อเย็นในงานตัดเฉือน, งานขึ้นรูปโลหะ และงานโลหะแผ่นของ The National Institute of Occupational Safety for Health (NIOSH) ได้ถูกกำหนดในคู่มือ (NIOSH 1998) โดยการพิจารณาการป้องกันด้านสุขภาพ มลพิษทางอากาศที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน.

ในการศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะแก้ปัญหาต่างๆ ที่เคยเกิดขึ้นและมุ่งหวังที่จะพัฒนาข้อดีต่างๆ สำหรับการนำไปใช้งาน.

1.6 ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

1.6.1 สารหล่อเย็น

ในปัจจุบันสารเคมีเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะใช้เป็นส่วนประกอบอาหาร, เครื่องสำอาง, การป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ และในกระบวนการผลิตด้านอุตสาหกรรมมีการใช้สารหล่อเย็น ซึ่งมีส่วนผสมของสารเคมีมากมายหลายชนิด สารหล่อเย็นมีความสำคัญมากในกระบวนการตัดเฉือนหรือขึ้นรูปชิ้นงานโลหะเพื่อลดแรงเสียดสีและลดความร้อนระหว่างเครื่องมือตัดกับวัสดุชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น การตัด, เจียร และขึ้นรูปโลหะ ช่วยให้ไม่เกิดความร้อนมากจนทำให้ชิ้นงานเสียหาย เกิดประกายไฟหรือควันขึ้น ช่วยให้ขอบหน้าของโลหะที่ตัดมีความเรียบเนียน และช่วยให้เศษผงโลหะที่เกิดขึ้นจากการตัดหลุดออกไปได้ง่ายขึ้น ปัจจุบันสารหล่อเย็นมีให้เลือกใช้หลากหลายประเภท ได้แก่ กลุ่มน้ำมันปิโตรเลียม, น้ำมันจากสัตว์หรือพืช, น้ำมันปิโตรเลียมที่ผ่านการกลั่นปรับปรุงคุณภาพ (severely solvent refined), กลุ่มน้ำมันผสมน้ำโดยใส่สารอิมัลซิไฟ-เออร์ (emulsifier), กลุ่มสารหล่อเย็นกึ่งสังเคราะห์ (semi-synthetic fluids) และกลุ่มสารหล่อเย็นสังเคราะห์ (synthetic fluids) สารหล่อเย็นเมื่อถูกใช้งานตัดปาดผิวหรือขึ้นรูปชิ้นงานโลหะจะได้รับ

ความร้อนสูงที่ถ่ายเทจากบริเวณจุดที่ถูกเครื่องมือตัด, ปาดผิว หรือขึ้นรูปนั้น ถ้าความร้อนยิ่งสูงมากก็จะทาให้เกิดไอระเหยของสารที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมัน สารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) และสารเคมีที่เป็นสารเติมแต่ง (additives) ไอระเหยของสารเคมีเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานทั้งระบบการหายใจและการสัมผัส และสารหล่อเย็นหลังจากใช้ในกระบวนการผลิตระยะหนึ่งจะเสื่อมคุณภาพลง หมดอายุการใช้งานกลายเป็นของเสียอันตรายชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง เนื่องจากเป็นสารที่มีสารเคมีชนิดต่างๆ ผสมอยู่ ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก สารหล่อเย็นส่วนใหญ่การกำจัดต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ผู้ใช้มักเททิ้งตามพื้นดิน, ลักลอบแอบทิ้งลงท่อระบายน้ำสาธารณะ, ที่ดินว่างเปล่า, แหล่งน้ำสาธารณะหรือไม่ก็ขายให้กับคนรับซื้อในราคาถูก การปฏิบัติดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมาก. ดังนั้น จึงเป็นหน้าที่ของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานที่นาสารเหล่านี้มาใช้ ต้องช่วยกันแก้ไขปัญหาดังกล่าวร่วมกัน โดยเฉพาะผู้ที่มีหน้าที่จัดการด้านสิ่งแวดล้อมให้มีความรู้ และตระหนักถึงผลกระทบพิษภัยจากสารเคมีในสารหล่อเย็น เพื่อหามาตรการหรือวิธีการในการป้องกันแก้ไข ตลอดจนมีการส่งเสริม ควบคุมกำกับดูแล และการกำจัดอย่างถูกวิธี ไม่ให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพหรือเป็นโรคกับตนเองและผู้อื่นได้ ในเบื้องต้นจึงควรมีความรู้เกี่ยวกับประเภทหรือชนิดของสารหล่อเย็น, สารเคมีต่างๆ ที่เป็นส่วนผสม, การดูแลรักษาสภาพสารหล่อเย็น, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและร่างกาย และการป้องกันอันตรายจากการใช้สารหล่อเย็น เป็นต้น.

สารหล่อเย็น (Metalworking Fluid) สารหล่อเย็นที่ดีควรมีคุณลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

- การระบายความร้อน ความร้อนที่เกิดจากการปาดตัดหรือขึ้นรูปชิ้นงานมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดตัดเป็นอย่างมาก การลดอุณหภูมิลงจะทาให้มีดตัดมีการสึกหรอน้อยลง แม้แต่การลดอุณหภูมิลงเพียงเล็กน้อย จะทำให้อายุของมีดตัดยาวขึ้นเป็นอย่างมาก.

- การหล่อลื่นของสารหล่อเย็นมีความสำคัญพอๆ กับการระบายความร้อน จะทำให้อายุการใช้งานของสารหล่อเย็นจะยาวนานขึ้นมาก ในกระบวนการผลิตหากความร้อนและความฝืดจากการปาดตัดผิวหรือขึ้นรูปชิ้นงานลดลง เมื่อใช้น้ำมันหล่อเย็นเข้าช่วย จะทำให้สามารถเพิ่มความเร็วตัดได้มากขึ้น จึงทาให้มีผลผลิตมากขึ้นและเป็นการลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลงได้.

- ป้องกันการเกิดสนิม สารหล่อเย็นควรมีคุณสมบัติป้องกันการเกิดสนิม ไม่เช่นนั้นแล้วชิ้นงานหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรจะเสียหายได้ น้ำมันตัดสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ แต่ไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีเท่ากับน้ำ แต่น้ำเป็นสารหล่อเย็นที่ดีที่สุดและมีราคาถูกที่สุด แต่ก็เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดสนิมได้ ยกเว้นว่าได้เติมสารป้องกันการเกิดสนิมเข้าไป ในปัจจุบันของเหลวที่ใช้หล่อเย็นทุกชนิดมีสารป้องกันการเกิดสนิมเป็นส่วนประกอบทั้งสิ้น.

- ป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็น ในอดีตสารหล่อเย็นหลังจากใช้งานไปหลายวันก็จะเริ่มเสีย มีกลิ่นเหม็น กลิ่นเหม็นนี้เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เติบโตอย่างรวดเร็ว แม้แต่สาร

หล่อเย็นสังเคราะห์ ในปัจจุบันก็ยังคงต้องเจอกับปัญหานี้เหมือนกัน ดังนั้น สารหล่อเย็นส่วนใหญ่จึงต้องผสมสารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งจะควบคุมการขยายพันธุ์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นช้าลง แต่หากมีสารฆ่าเชื้อแบคทีเรียมากเกินไปก็จะเป็นอันตรายต่อผิวหนังได้ ไม่ว่าน้ำมันหล่อเย็นจะมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมดีแค่ไหนก็ตาม หากมันเกิดบูดเน่าและมีกลิ่นเหม็นแล้วจะส่งผลให้เกิดปัญหาการจัดการสารหล่อเย็นที่เสื่อมคุณภาพลงหรือเสียเป็นกากของเสียอันตราย ซึ่งอาจจะต้องเสียค่ากำจัดมากกว่าค่าใช้จ่ายในการซื้อใหม่เสียอีก.

สารหล่อเย็นที่พบได้ทั่วไปพอจะแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

- Straight oil
- Soluble oil
- Synthetics
- Semi synthetics

Straight oil น้ำมันชนิดนี้อาจเป็นน้ามันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี (petroleum oil) น้ำมันจากสัตว์ หรือพืช หรือเป็นน้ำมันสังเคราะห์กลุ่มที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่ปรับปรุงคุณภาพผ่านการกลั่น (Severely Solvent Refined หรือ Severely Hydrotreated) สารหล่อเย็นกลุ่มนี้เป็นน้ามันล้วนๆ ฉะนั้น จะไม่ละลายน้ำ บางครั้งอาจมีการใส่สารเติมแต่ง (additives) ลงไปด้วย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่าง หรือไม่มีก็ได้ ส่วนงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษโดยเฉพาะก็ต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไป เช่น การเติมซัลเฟอร์เข้าไปเพื่อไม่ให้เกิดคราบบนผิวทองแดง คุณลักษณะที่เด่นของน้ำมันชนิดนี้ คือ การหล่อลื่นและการลดแรงกระแทกระหว่างชิ้นงานและมีดตัด แต่ในทางกลับกันน้ำมันชนิดนี้ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีนัก จึงนิยมใช้เฉพาะในงานตัดเฉือนที่มีความเร็วตัดต่างๆ ตัวอย่างเช่น เครื่องตัดทาเกลียว, เครื่องตัดแม่พิมพ์ (Wire Cutting Machine) และเครื่องทำแม่พิมพ์ (EDM).

Soluble oils ประกอบด้วยน้ำมันปิโตรเลียม 30-85% soluble oils เป็นน้ำมันแร่ที่ผสมสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ทำให้มีคุณสมบัติในการรวมตัวกับน้ำได้ดี และเกาะติดชิ้นงานได้ดีระหว่างที่ทำการตัดปาดขึ้นรูปชิ้นงาน soluble oils เหมาะสาหรับงานเบาและหนักปานกลาง แม้ว่าสารหล่อเย็นชนิดนี้จะให้การหล่อลื่นไม่ดีนักเมื่อเทียบกับ straight oils แต่ก็มีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดี เนื่องจากมีน้ำเป็นส่วนผสมนั่นเอง อย่างไรก็ตาม soluble oils มักจะมีส่วนผสมของสารเพิ่มคุณภาพป้องกันการเกิดสนิม ป้องกันการเสื่อมสภาพจากแบคทีเรีย สารหล่อเย็นประเภทนี้จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานประเภทต่างๆ มีคุณสมบัติดี มีราคาปานกลาง.

Semisynthetics มีน้ำมันปิโตรเลียมที่แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ เป็นส่วนผสม ต่างกับ soluble oils ที่มีลักษณะคล้ายน้ำนมและไม่โปร่งแสง semisynthetics จะโปร่งแสง อาจจะขุ่นบ้าง แต่ก็เพียงเล็กน้อย และส่วนมากจะไวในการตอบสนองต่อความร้อน semisynthetics ต่างจากสารละลายแท้ๆ ตรงที่เมื่อน้ำมันหล่อเย็นมีความร้อนสูง โมเลกุลของน้ำมันที่กระจายตัวอยู่มีแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากน้ำมาเกาะกับมีดตัด (cutting tools) จึงทำให้มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี เมื่อส่วนผสมนี้เย็นลงน้ำมันก็จะแตกตัวอีกครั้ง สามารถใช้งานได้หลากหลายกว่าสารหล่อเย็นประเภทน้ำมันแร่ที่ผสมสารอิมัลซิไฟเออร์ (soluble oil).

Synthetic หรือสารหล่อเย็นสังเคราะห์ กลุ่มนี้อาจจะไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันปิโตรเลียมเลย แต่จะเป็นสารเคมีกลุ่มดีเทอร์เจ้นต์ (detergent) และใส่สารเติมแต่งผสมกับน้ำ 30-50%.

ข้อดีของ synthetic ป้องกันการเกิดสนิมได้ดี ต้านทานก่อการเกิดกลิ่นเหม็นได้ดี สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน ระบายความร้อนระหว่างการทำงานตัดเฉือนได้ดี มีคุณสมบัติการระบายความร้อนที่ดีหลังจากการใช้งาน มีอายุใช้งานนานกว่า soluble oils แยกตัวจากชิ้นงานและเศษโลหะได้ง่าย ซึ่งจะทำให้บำรุงรักษาได้ง่ายกว่า เศษโลหะเล็กๆ จะตกตะกอนได้เร็ว synthetic ทำให้เศษโลหะไม่หมุนวนในระบบ ป้องกันการอุดตันในระบบหล่อเย็น.

ข้อเสียของ synthetic

- ราคาจะสูงและอาจเป็นอันตรายต่อผิวหนังได้.

สารเคมีที่ผสมอยู่ในสารหล่อเย็น มีหลายกลุ่มทำหน้าที่เพิ่มคุณสมบัติให้กับสารหล่อเย็น เช่น

- สารเคมีซัลเฟอร์ หรือคลอรีนเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี (sulphurized or chlorinated compounds).
- สารป้องกันการเกิดสนิม (nitrites, calcium sulfonate, fatty acid, amines และ boric acid).
- สารเคมีช่วยเพิ่มการหล่อลื่นดีขึ้น (sulfurized fatty materials, chlorinated paraffins และ phosphorus derivertives).
- สารลดการเกิดละออง (polyisobutylene polymer).
- สารอิมัลซิไฟเออร์ (triethanolamine, sodium petroleum sulphonates, salts of fatty acids and non-lonic surfactants, glycols).
- ยาฆ่าเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อรา (triazine compounds และ oxazolidine compounds).
- สารเพิ่มความคงตัว (stabilizers).
- ลดการเกิดโฟม (defoamers).

- สารแต่งสี (colorants) และสีย้อม (dyes).
- สารแต่งกลิ่น (odourants) และน้ำหอม (fragrances) เป็นต้น.
- นอกจากนี้ บริษัทผู้ผลิตบางรายยังมีการเติมสารเติมแต่งจำพวกโลหะประเภทต่างๆ ด้วย.

การดูแลรักษาสภาพสารหล่อเย็น

เพื่อให้สารหล่อเย็นมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานนานที่สุด จึงต้องมีการบำรุงรักษาควบคุมการปนเปื้อน ส่วนใหญ่อาจปนเปื้อนจารบี, น้ำมันหล่อลื่น, เศษโลห,ะ ฝุ่นผงจากพื้นโรงงาน, สารทำความสะอาดเครื่องจักร และอื่นๆ นอกจากนั้น ยังต้องควบคุมคุณภาพของน้ำที่ใช้ผสม การปรับความเข้มข้นของสารหล่อเย็นให้เหมาะสม ควบคุมการปนเปื้อนสิ่งอื่นๆ เช่น เศษผงโลหะ และแบคทีเรีย จึงจะทำให้สารหล่อเย็นที่ใช้มีอายุการ ใช้งานนานขึ้น.

การแยก Tramp oil ออกจากสารหล่อเย็น

ในการใช้สารหล่อเย็นระบายความร้อนออกจากมีดตัดและชิ้นงาน สารหล่อเย็นจะไหลลงสู่ถังเก็บและถูกปั๊มให้หมุนเวียนไปที่ชิ้นงานอีก ระหว่างการใช้งานสารหล่อเย็นมักชะล้างน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องจักรติดมาด้วย น้ำมันหล่อลื่นที่ติดมานี้ เรียกว่า Tramp oil ซึ่งจะลอยตัวบนผิวสารหล่อเย็น และจะทำให้แบคทีเรียประเภทที่ไม่ต้องการออกซิเจนเจริญเติบโตเร็ว และแบคทีเรียนี้จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีกลิ่นคล้ายไข่เน่าและระคายเคืองผิวหนัง นอกจากแบคทีเรียประเภทนี้แล้วยังมีแบคทีเรียอื่นๆ และเชื้อราเจริญเติบโตอยู่ในสารหล่อเย็นที่ใช้ ทำให้สารหล่อเย็นมีสภาพเป็นกรดจนสามารถละลายเศษโลหะ, ผงโลหะขนาดเล็ก ทำให้สารหล่อเย็นเสื่อมสภาพลง หมดอายุการใช้งาน กลายสภาพเป็นกากของเสียอันตราย และสุดท้ายต้องส่งกำจัดโดยวิธีการที่ถูกต้อง.

สารหล่อเย็นทำให้เกิดผลต่อสุขภาพอย่างไร

สารหล่อเย็นเมื่อใช้ไปนานๆ หรือเอามาใช้ซ้ำๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือเกิดปฏิกิริยาของสารเคมีที่เป็นส่วนผสมมากมายหลายอย่างปะปนกัน การก่อโรคส่วนใหญ่ก็เกิดจากสารองค์ประกอบแต่ละชนิดนั่นเอง. ดังนั้น ผู้ที่ทางานทางด้านอาชีวอนามัย ควรทราบว่าพนักงานของตนสัมผัสกับน้ำหล่อเย็นที่มีองค์ประกอบของสารเคมีกลุ่มใดอยู่บ้าง เพื่อที่จะได้สามารถหามาตรการหรือวิธีป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานของตนได้ วิธีการเบื้องต้นควรต้องศึกษาข้อมูลจาก MSDS ของสารหล่อเย็นที่สถานประกอบการนั้นซื้อมานั่นเอง. นอกจากนั้น ยังต้องศึกษาและวิเคราะห์หาข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากสารที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของสารเคมีที่เป็นส่วนผสม อาจเกิดสารที่มีอันตรายเพิ่มมากขึ้น เช่น สารไนโตรซามีน (nitrosamine) ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง นอกจากนั้น แบคทีเรีย (bacteria) และเชื้อรา (fungi) สามารถ

เจริญเติบโตขึ้นได้ในสารหล่อเย็นได้เป็นอย่างดี ทำให้แบคทีเรีย และเชื้อรา เชื้อโรคที่ทำให้เกิดโรคทางเดินหายใจต่างๆ ร่วมกับผลกระทบโดยตรงจากสารเคมีเพิ่มมากขึ้น.

ผลกระทบต่อร่างกายจากสารเคมีต่างๆ ในสารหล่อเย็น

สารเคมีต่างๆ ในสารหล่อเย็นสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางระบบการหายใจเอาไอระเหยหรือละอองเข้าไป, การดูดซึมเข้าสู่ผิวหนัง และทางการกินโดยบังเอิญ (เปื้อนมือ).

ผลต่อผิวหนัง

คนงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสารหล่อเย็น อาจจะได้รับอันตรายจากการหยิบจับวัสดุ, อุปกรณ์เครื่องจักรที่เปรอะเปื้อนสาร หรือการทำงานที่ทำให้เกิดการกระเด็นของสาร โดยผู้ปฏิบัติงานไม่ได้ใช้เครื่องป้องกัน และหากการรักษาความสะอาดผิวหนัง ทำให้อาการของโรคมักปรากฏที่ใบหน้าและแขน แต่บางรายเป็นที่ต้นขาและขา เนื่องจากกางเกงของคนงานถูกสารเปียกชื้นเป็นประจำตลอดเวลาการทำงาน ในรายที่มีอาการไม่รุนแรง ผิวหนังจะเกิดผื่นแพ้, ระคายเคือง, บวมแดง และในรายที่อาการรุนแรงติดเชื้อ จะทำให้ผิวหนังอักเสบรุนแรง ผิวหนังจะพุพองกลายเป็นตุ่มหนอง, เกิดแผลเน่าเปื่อยเรื้อรัง นอกจากนั้น สารหล่อเย็นยังสามารถละลายสารโลหะประเภทต่างๆ ที่มีพิษต่อสุขภาพ เช่น นิกเกิล (nickel), โครเมียม (chromium), ทองแดง และตะกั่ว เมื่อปนเปื้อนลงมาผสมสามารถก่อให้เกิดพิษ มีอาการแพ้ที่ผิวหนังได้มากขึ้น.

ผลต่อทางเดินหายใจ

เมื่อสูดดมไอระเหยหรือละอองของสารหล่อเย็นเข้าไป หากใช้สารหล่อเย็นกลุ่มน้ำมันปิโตรเลียม (petroleum oil) หรือมีส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมมาก อาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ, ระคายเคืองต่อเยื่อบุ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมนั้นว่ามีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายมากหรือน้อย และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะใช้งาน ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีฤทธิ์ไม่เท่ากันขึ้นกับคุณสมบัติเฉพาะตัว สารกลุ่มนี้มักจะทำให้เกิดอาการวิงเวียน, ซึม, ระบบควบคุมการหายใจมีความผิดปกติ ทำให้อวัยวะต่างๆ เกิดการสูญเสียหน้าที่หรือมีการกด หรือทำลายระบบประสาทส่วนกลาง, ไต, ไขกระดูกถูกทำลาย สารบางชนิดยังมีผลต่อตับ, ไต กรณีเรื้อรังจะมีอาการทางสมอง เช่น สูญเสียความทรงจำ, เดินเซ, เสียการทรงตัว หรือมีอาการอ่อนแรงและชาปลายมือปลายเท้าจากการเสื่อมของเส้นประสาทส่วนปลาย ถ้าหากใช้สารหล่อเย็นกลุ่มที่ใส่สารอิมัลซิไฟเออร์และสารเติมแต่งจะมีสารเคมีจำพวก nitrites, calcium sulfonate, fatty acid, amines, boric acid, chlorine, formaldehyde และ triethanolamine glycols เป็นต้น ด้านผลกระทบต่อสุขภาพขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารที่ใช้ผสม นอกจากนั้น บริษัทผู้ผลิตอาจเติม

สารประกอบของโลหะเพื่อเพิ่มคุณสมบัติจำพวกตะกั่ว, นิเกิล, แคดเมียม, โครเมียม, ปรอท, แมงกานีส และโมลิบดินัม อาจทำให้เกิดพิษจากสารโลหะด้วย.

ผลก่อมะเร็ง

มีแนวคิดว่าการทำงานสัมผัสสารหล่อเย็นอาจทำให้เพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งบางชนิดได้ เช่น มะเร็งลำไส้ส่วนปลาย, ตับอ่อน, กล่องเสียง, ผิวหนัง, หลอดอาหาร และกระเพาะปัสสาวะ สาเหตุที่เชื่อเช่นนี้ เนื่องจากสารหล่อเย็นมีองค์ประกอบของน้ำมันแร่ (mineral oil or petroleum oil), nitrite, nitrate และ amine ซึ่งจะก่อให้เกิดสาร nitrosamine นอกจากนั้น อาจมีไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่คงเหลืออยู่จากกระบวนการกลั่นอีก โดยเฉพาะในงานขึ้นรูปหรือตัดชิ้นงานที่ใช้สารหล่อเย็นกลุ่ม straight oil เช่น เครื่องตัดทำแม่พิมพ์ (Wire Cutting Machine), เครื่องทำแม่พิมพ์ (EDM) ต้องใช้น้ำมันหล่อเย็นจำพวกนี้ปริมาณมาก และต้องท่วมชิ้นงาน และบริเวณจุดที่ขึ้นรูปหรือตัดชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมาก อาจทำให้เกิดไอระเหยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากกระบวนการกลั่น ซึ่งสารบางชนิดก่อให้เกิดมะเร็ง และบางชนิดอาจมีแนวโน้มก่อมะเร็ง ซึ่งการพิสูจน์ว่าการทำงานสัมผัสสารหล่อเย็นเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจริงหรือไม่นั้น ไม่สามารถระบุได้ชัดเจน เนื่องจากมีองค์ประกอบมาก ประกอบกับผลิตภัณฑ์ประเภทของน้ำหล่อเย็นที่สถานประกอบการแต่ละแห่งเลือกใช้นั้นมีมากมาย มีส่วนผสมของสารเคมีหลายประเภทแตกต่างกันตามสูตรของบริษัทผู้ผลิตสารหล่อเย็นชนิดนั้น. อย่างไรก็ตาม บริษัทผู้ผลิตสารหล่อเย็นที่มีคุณภาพก็พยายามไม่เติมสารเคมีที่เป็นอันตรายสูง เช่น สารเคมีที่มีองค์ประกอบของโลหะ, สารก่อมะเร็งออกไปจากส่วนผสม เช่น ทำการกลั่นพัฒนาผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมโดยไม่ผสมสารกลุ่ม nitrite, nitrate และ amine ซึ่งจะก่อให้เกิดสาร Nitrosamine ลงในส่วนของสารเติมแต่ง เป็นต้น.

วิธีการป้องกันอันตรายจากสารหล่อเย็น

- จัดให้มีการระบายให้เพียงพอหรือบำบัดอากาศเสียบริเวณที่มีการใช้เครื่องจักรหรือเครื่องมือที่ต้องใช้สารหล่อเย็น โดยเฉพาะงานขึ้นรูปหรือตัดชิ้นงานที่ใช้สารหล่อเย็นกลุ่ม straight oils เช่น เครื่องตัดทำแม่พิมพ์ (Wire Cutting Machine), เครื่องทำแม่พิมพ์ (EDM) จะต้องใช้สารหล่อเย็นปริมาณมาก และส่วนใหญ่ต้องให้ท่วมชิ้นงาน ทำให้เกิดไอระเหยของสารที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมัน, ไอ และควันสะสมในอากาศบริเวณพื้นที่ทำงานได้.

- ให้เลือกชนิดของสารหล่อเย็นให้เหมาะสมกับประเภทของงาน และเลือกใช้สารหล่อเย็นที่มีส่วนผสมของสารเคมีที่มีพิษน้อยกว่า.

- จัดให้มีห้องอาบน้ำ ทำความสะอาดร่างกายคนงานหลังเลิกงาน เพื่อให้คนงานได้ทำความสะอาด ชำระล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวหนังด้วยสบู่และน้ำอุ่น ห้ามใช้แปรงขนหยาบ หรือสบู่ที่มีสารขัด

ผิว เพราะอาจทำให้ผิวหนังถลอก และห้ามใช้น้ำมันก๊าด, น้ำมันเบนซิน และสารทำละลาย ทำความสะอาดแขนและขา เพราะจะทำให้ผิวหนังแห้งมาก และอาจจะได้รับอันตรายจากพิษของสารที่ซึมเข้าผิวหนัง.

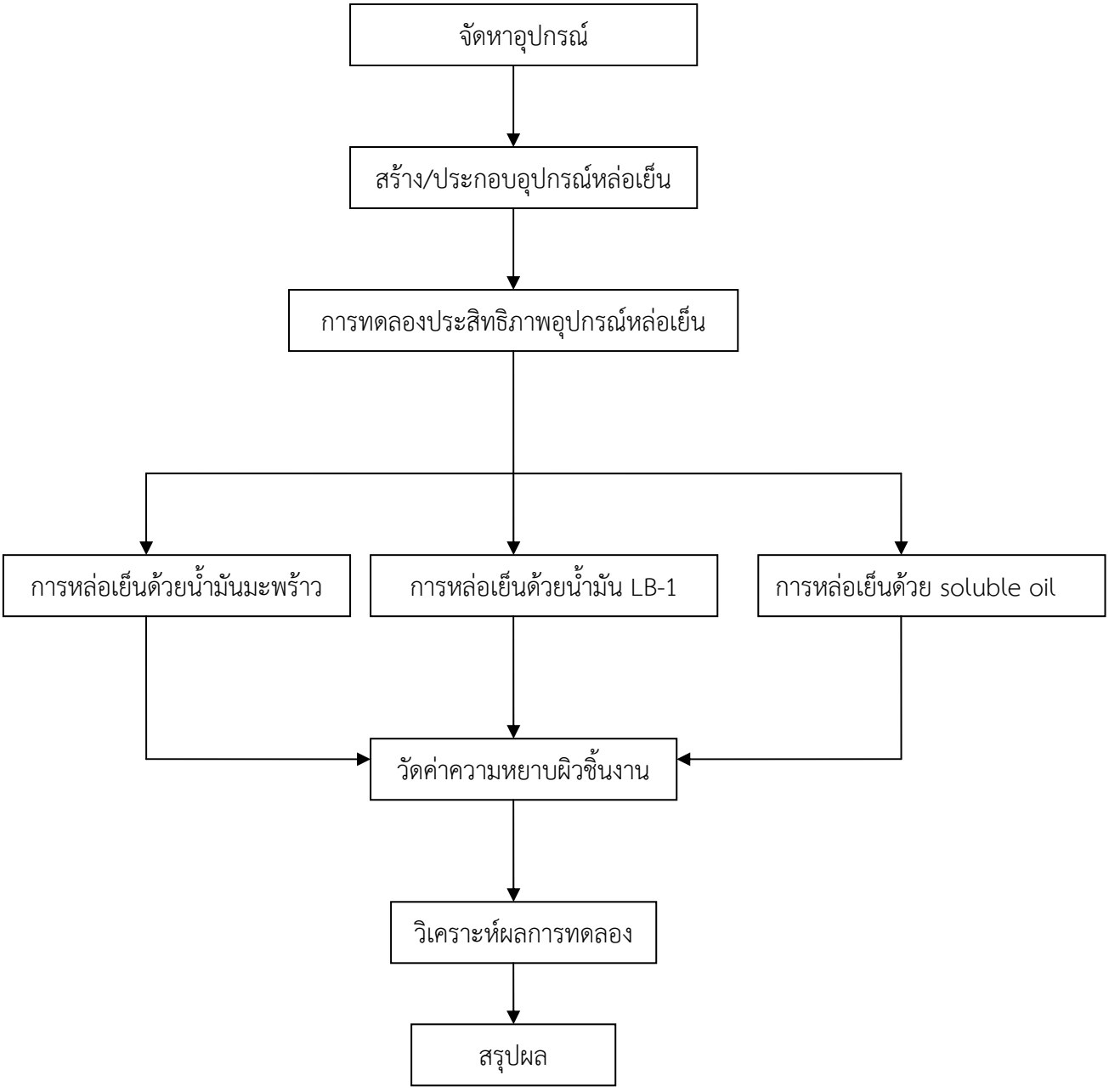
- จัดอุปการณ์ป้องกันให้คนงานได้สวมใส่ เช่น ถุงมือ, ผ้ากันเปื้อน, ครีมทาผิวป้องกันก่อนการทำงาน และให้คนงานผลัดเปลี่ยนเสื้อผ้าทันทีหากมีสารกระเด็นเปียก.

- ติดฝาครอบที่เครื่องจักรเพื่อป้องกันการกระเด็นของสารมายังผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งนอกจากจะสามารถป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับคนงานแล้วยังช่วยให้สิ้นเปลืองน้อยลงด้วย.

- จัดอบรมคนงานให้รู้จักวิธีปฏิบัติงานที่ถูกสุขอนามัย เพื่อป้องกันโรคผิวหนังที่เกิดขึ้นกับการทำงาน และเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับอันตรายของสารเคมีที่ผสมในสารหล่อเย็นและสารหล่อลื่นให้คนงานที่ปฏิบัติงานในรูปโปสเตอร์, แผ่นผับ หรือจัดทำแผงข่าวเพื่อกระตุ้นให้คนงานมีความระมัดระวังและเคยชินกับการปฏิบัติที่ถูกวิธี เป็นต้น.

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ในการจัดเตรียมวัสดุ, อุปกรณ์ และวิธีการ ได้จัดทำตารางขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้



รูปที่ 4. ขั้นตอนการดำเนินงาน.

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ ในการทำงานวิจัยนี้ได้แยกออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

2.1 การสร้างเครื่องต้นแบบอุปกรณ์หล่อเย็น

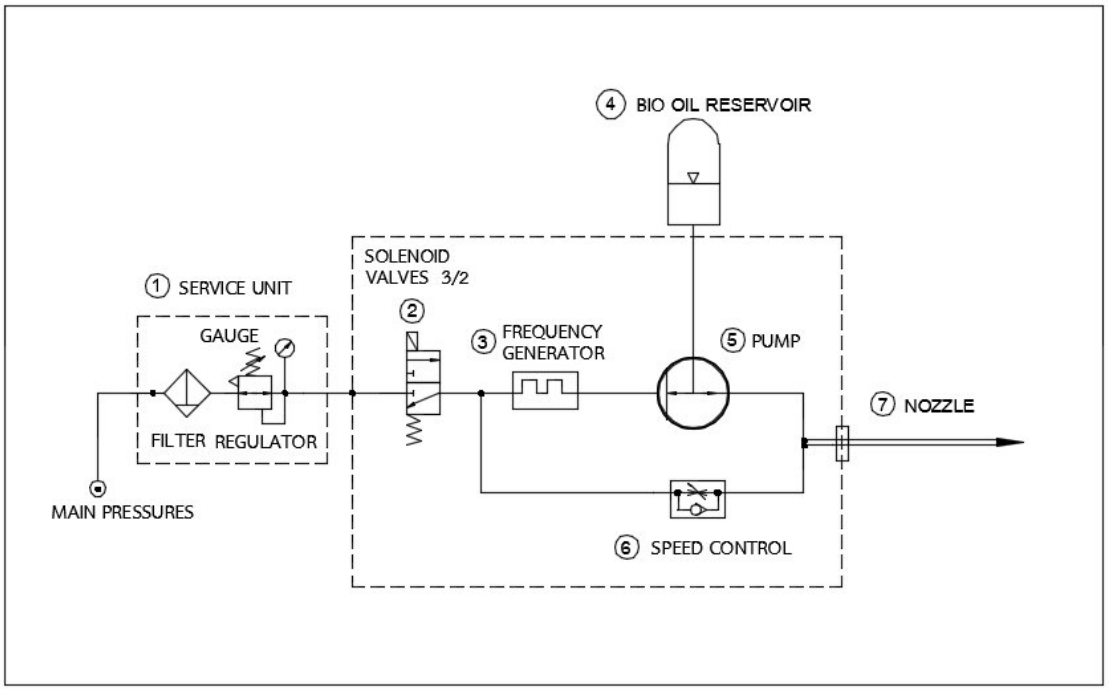
2.1.1 เครื่องจักรในการสร้างเครื่องต้นแบบ

- เครื่องมือช่างพื้นฐาน คือ กลึง/ไส/กัด/เจาะ.
- เครื่องพับโลหะ.
- เครื่องจักรอัตโนมัติ CNC.

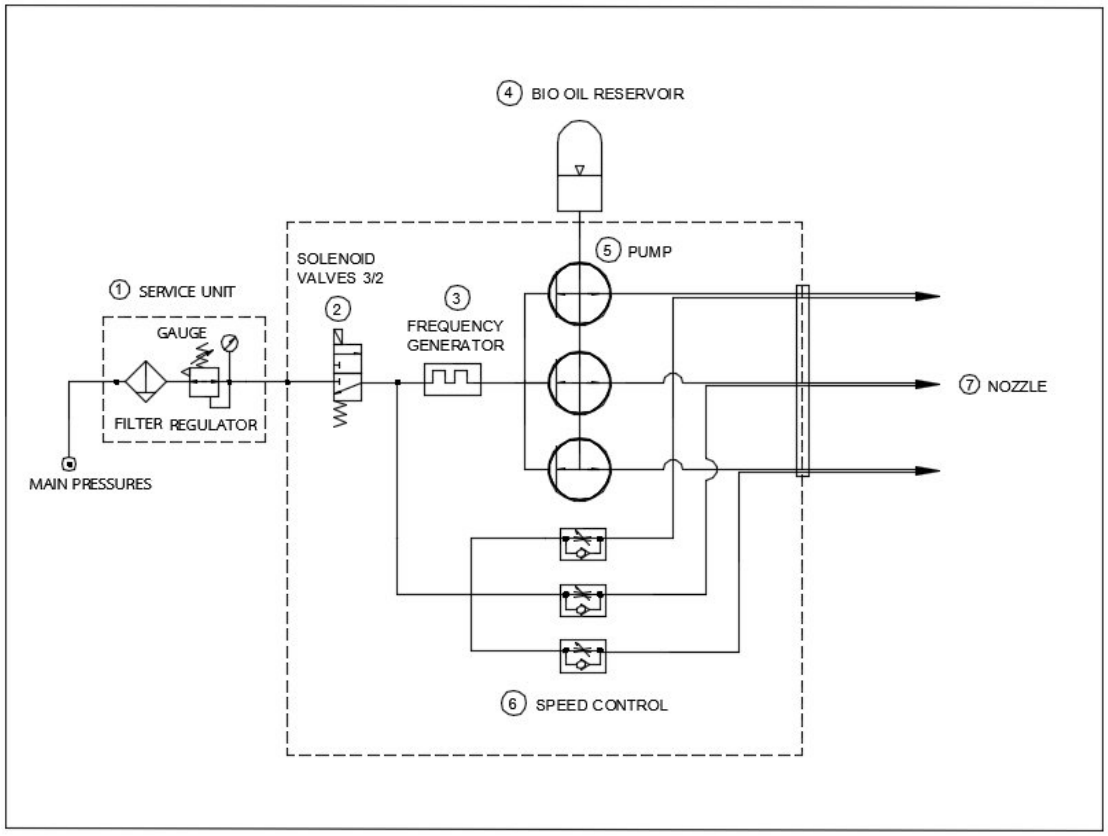
2.1.2 อุปกรณ์ในการประกอบเครื่องต้นแบบ

- ปั๊มน้ำมันแรงดันสูง.
- ระบบแหล่งจ่ายลม ได้แก่ ชุดความคุมแรงดัน, ชุดกรองอากาศ, ท่อลม และวาล์วเปิด-ปิด.
- ชุดหัวฉีดน้ำมัน ได้แก่ ห้องผสมน้ำมันกับลม และหัวฉีด.
- ถังบรรจุแหล่งจ่ายน้ำมัน.
- อุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้า และสวิตช์ปิด-เปิด.

2.2 วงจรการทำงานที่ใช้กับการหล่อเย็น 1 และ 3 หัวฉีด



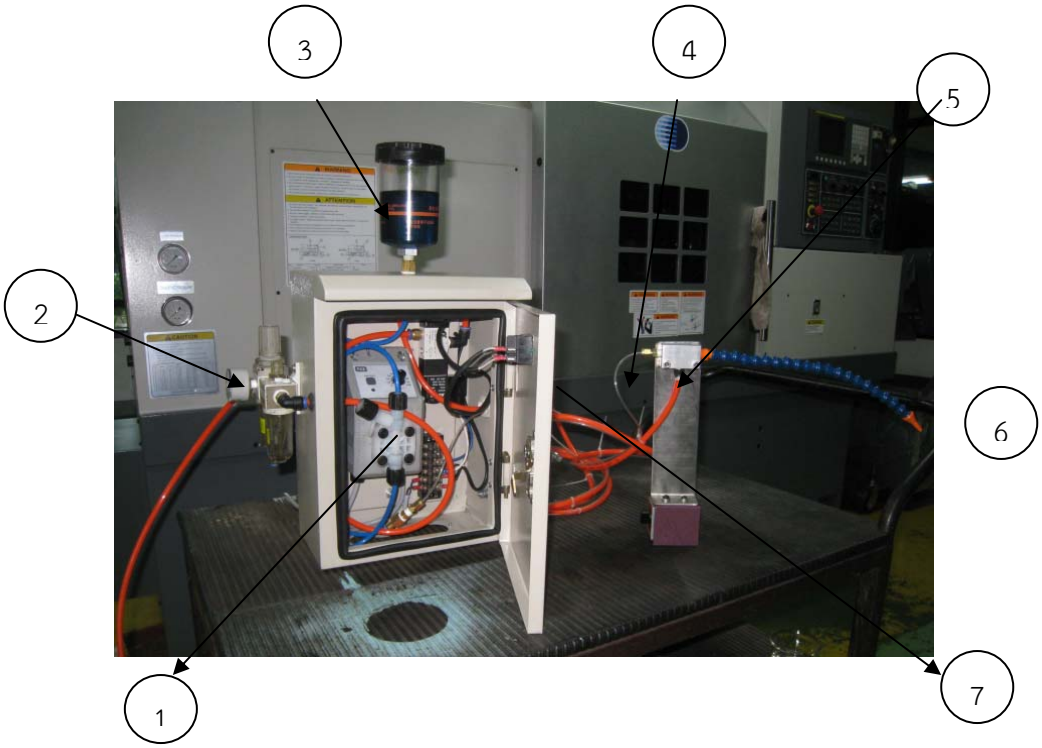
รูปที่ 5. วงจรการทำงานอุปกรณ์หล่อเย็น 1 หัวฉีด.



รูปที่ 6. วงจรการทำงานอุปกรณ์หล่อเย็น 3 หัวฉีด.

รูปที่ 7. อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 1 หัวฉีด.

รูปที่ 8. อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ 3 หัวฉีด.



รูปที่ 9. ส่วนประกอบอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ.

1. ปั๊มแรงดันสูง.

2. อุปกรณ์ควบคุมปรับแรงดันลม (Regulator) สามารถปรับระดับปริมาณลม 4-10 บาร์.

3. ถังเก็บน้ำมัน ขนาดการบรรจุ 250 มิลลิลิตร.

4. ท่อน้ำมัน เป็นท่อสายยางแรงดันสูงขนาดความโตใน 2 มิลลิเมตร.

5. ห้องผสมลมกับน้ำมัน ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม เจาะรูยึดปลั๊กทองเหลืองขนาดเกลียม 1/8 นิ้ว.

6. ปลายพ่นละอองน้ำมัน (Nozzle) ทำจากพลาสติกสามารถปรับทิศทางได้.

7. สวิตช์ ปิด-เปิด ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์.

2.3 วัสดุ อุปกรณ์ในการทดลอง

2.3.1 เครื่องกลึง Harison M450.

2.3.2 มีดตัด ยี่ห้อ Kenamaental SEHW 1204AFN.

2.3.3 วัสดุชิ้นงานเหล็ก S45C ขนาดความโตนอก 30 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร.

2.3.3 อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ อัตราปริมาณน้ำมัน 50-300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง.

2.3.4 แหล่งจ่ายลม 4-10 บาร์.

2.3.5 เครื่องวัดความเรียบผิว ยี่ห้อ Handy surf รุ่น E-35B S173E.

2.3.6 น้ำมันหล่อเย็นมะพร้าว ยี่ห้อ TROPICANA VERGIN OIL.

2.3.7 น้ำมันหล่อเย็น LB-1 ยี่ห้อ BLUBE ACCU-LUBE.

2.3.8 น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ (soluble oil) ยี่ห้อ PTT HIKUT66.

2.4 วิธีการทดลอง

2.4.1 ออกแบบการทดลอง.

2.4.2 จับยึดชิ้นงาน และติดตั้งเครื่องมือตัด.

2.4.3 ติดตั้งอุปกรณ์หล่อเย็นปรับปริมาณน้ำมัน 100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ชนิด 1 หัวฉีด.

2.4.4 ปรับแรงดันลม 4 บาร์.

2.4.5 ทำการตัดปอกผิวดิบที่อยู่บริเวณนอกออก.

2.4.6 กำหนดเงื่อนไขการตัด.

- อัตราป้อน 0.28 มิลลิเมตรต่อรอบ.
- ความเร็วรอบ 1,600 รอบต่อนาที.
- ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร.

2.4.7 ทำการตัดปอกผิวชิ้นงาน ด้วยเงื่อนไขการหล่อเย็นด้วยน้ำมันมะพร้าว วัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) ชิ้นงานทุกระยะทาง 250 มิลลิเมตร บันทึกผล จำนวน 24 ชิ้น ทำการเปลี่ยนมีดตัด ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง.

2.4.8 ทำการตัดปาดผิวชิ้นงาน ด้วยเงื่อนไขการหล่อเย็นด้วยน้ำมัน LB-1 วัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) ชิ้นงานทุกระยะทาง 250 มิลลิเมตร บันทึกผล จำนวน 24 ชิ้น ทำการเปลี่ยนมีดตัด ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง.

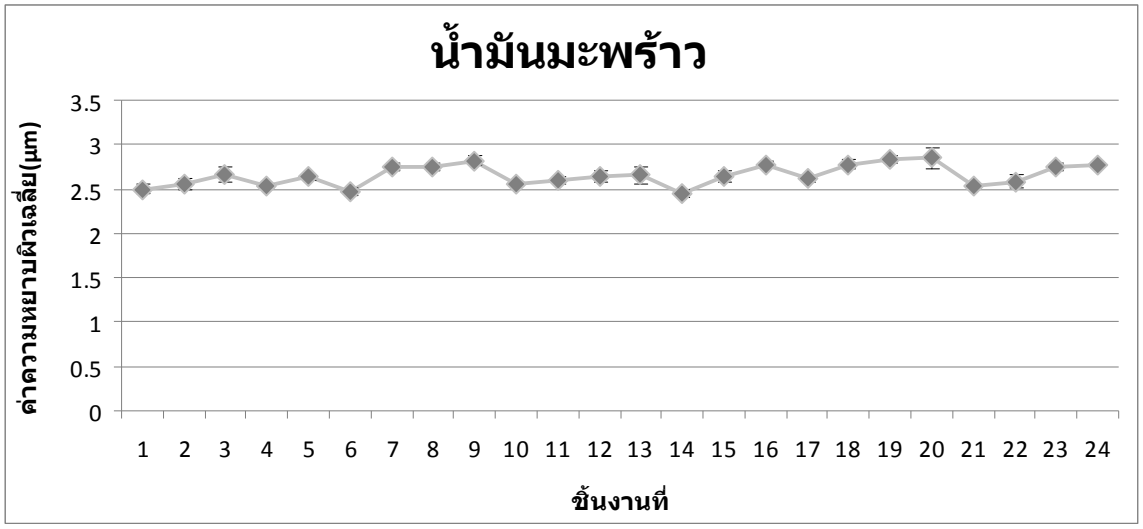
2.4.9 ทำการตัดปาดผิวชิ้นงาน ด้วยเงื่อนไขการหล่อเย็นด้วยน้ำมันชนิดผสมน้ำ (Soluble oil) วัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) ชิ้นงานทุกระยะทาง 250 มิลลิเมตร บันทึกผล จำนวน 24 ชิ้น ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง.

รูปที่ 10. การทดลองด้วยงานกลึงปอกผิว.

รูปที่ 11. การวัดความหยาบผิวชิ้นงาน.

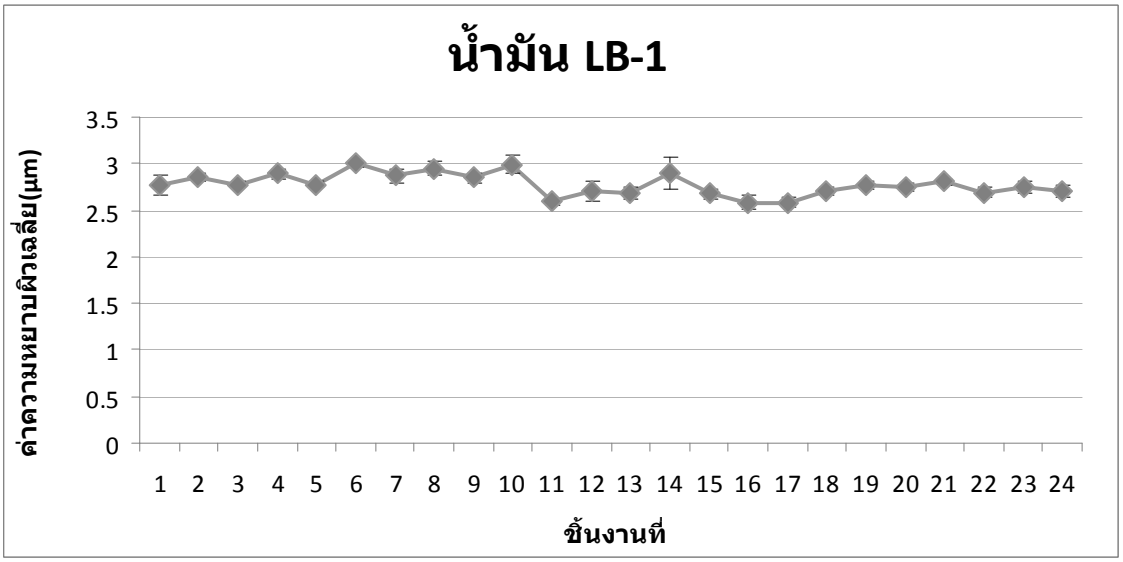
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การทดลองใช้งานประสิทธิภาพอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบโดยใช้กับน้ำมันมะพร้าว ได้ผลการทดลองดังนี้



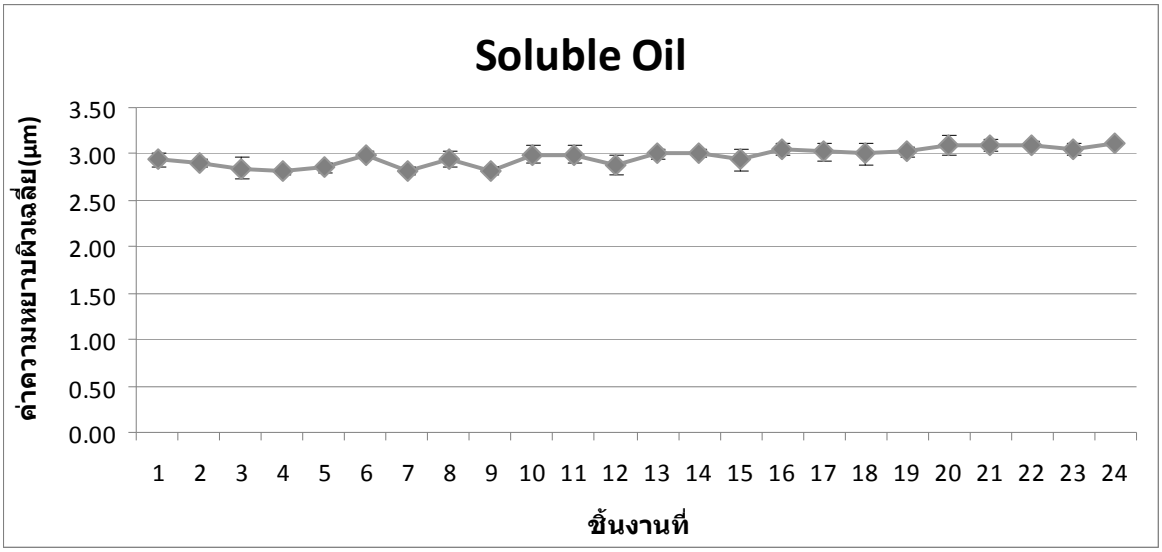
รูปที่ 12. ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมันมะพร้าว.

3.2 การทดลองใช้งานประสิทธิภาพอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบโดยใช้กับน้ำมัน LB-1 ได้ผลการทดลองดังนี้



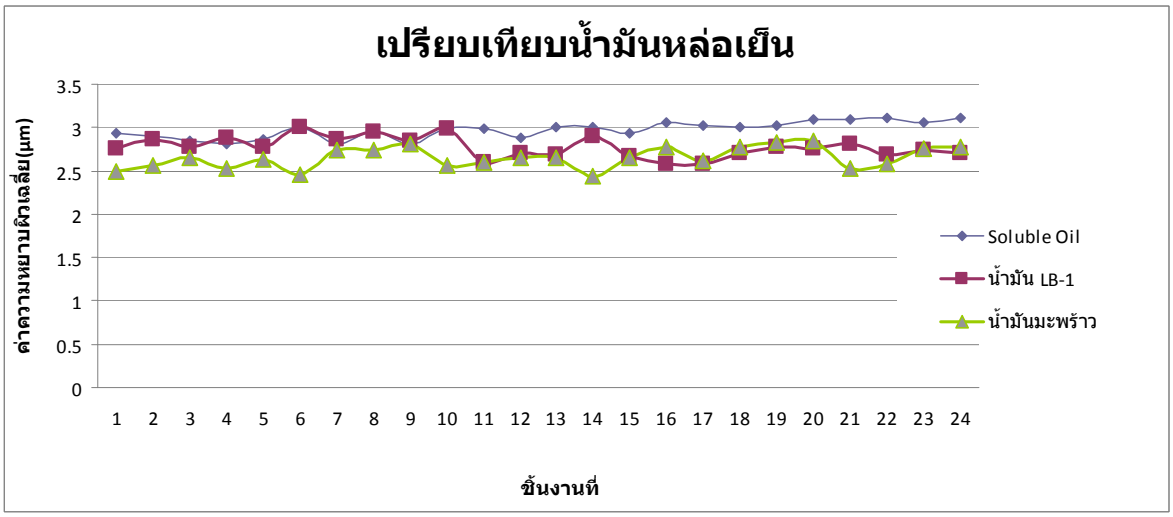
รูปที่ 13. ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมัน LB-1.

3.3 การทดลองใช้งานประสิทธิภาพน้ำมันชนิดผสมน้ำ (soluble oil) ได้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 14. ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำมันชนิดผสมน้ำ (soluble oil).

3.4 การทดลองประสิทธิภาพน้ำมันหล่อเย็น 3 ชนิด



รูปที่ 15. ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเปรียบเทียบน้ำมันหล่อเย็น.

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองประสิทธิภาพน้ำมันหล่อเย็น 3 ชนิด ในการวัดคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จหลังการตัดเฉือนในงานกลึงปอกเหล็ก S45C ตามเงื่อนไขการตัด.

- อัตราป้อน 0.28 มิลลิเมตรต่อรอบ.
- ความเร็วรอบ 1,600 รอบต่อนาที.
- ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร.
- อัตราใช้งานในปริมาณ 100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง.

ทำการวัดคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จหลังการตัดเฉือนในรูปค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) จำนวน 24 ชิ้นงานทดลอง พบว่า

การหล่อเย็นน้ำมันมะพร้าวให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุดที่ 2.44 ไมโครเมตร ค่าสูงสุดที่ 2.85 ไมโครเมตร ประสิทธิภาพการหล่อเย็นมีค่าเฉลี่ยโดยรวมดีที่สุด.

การหล่อเย็นน้ำมัน LB-1 ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุดที่ 2.59 ไมโครเมตร ค่าสูงสุดที่ 3.00 ไมโครเมตร ประสิทธิภาพการหล่อเย็นมีค่าเฉลี่ยโดยรวมดีปานกลาง.

การหล่อเย็นด้วยน้ำมันชนิดผสมน้ำ (soluble oil) ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุดที่ 2.82 ไมโครเมตร ค่าสูงสุดที่ 3.12 ไมโครเมตร ประสิทธิภาพการหล่อเย็นมีค่าเฉลี่ยโดยรวมต่ำสุด.

แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานค่าเฉลี่ยการวัดความหยาบผิวประเภทงานกลึง คือ 0.80-3.2 ไมโครเมตร (From ANSI B46.1-1-1985) (Vorburger and Raja 1990) การหล่อเย็นด้วยน้ำมันทั้ง 3 ชนิด อยู่ในเกณฑ์ค่าเฉลี่ยที่ดี.

4. สรุปผลการทดลอง

โครงการพัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานสำหรับการตัดเฉือนโลหะความละเอียดสูง เพื่อพัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นสำหรับงานตัดเฉือนความละเอียดสูง โดยการนำน้ำมันที่ได้จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติมาใช้ในปริมาณที่น้อย หรือที่เรียกว่า Minimum Quantity Lubrication (MQL) ซึ่งอัตราใช้งานในปริมาณเพียง 100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เปรียบเทียบการหล่อเย็นแบบผสมน้ำ (soluble oil) ซึ่งอัตราใช้งานในปริมาณ 600 ลิตรต่อชั่วโมง.

จากผลการทดลองประสิทธิภาพน้ำมันหล่อเย็น 3 ชนิด ด้วยอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบในการวัดคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จหลังการตัดเฉือนด้วยงานกลึง, วัดค่าคุณภาพผิวชิ้นงานในรูปค่าความผิวเฉลี่ย (Ra) เปรียบเทียบกัน ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานค่าเฉลี่ยการวัดความหยาบผิวประเภทงานกลึง คือ 0.80-3.2 ไมโครเมตร (From ANSI B46.1-1-1985) (Vorburger and Raja 1990).

งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่า การใช้น้ำมันหล่อเย็นจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติโดยการนำน้ำมันมะพร้าวมาใช้งาน ซึ่งใช้งานในปริมาณที่น้อยมากสามารถนำมาทดแทนการหล่อเย็นแบบดั้งเดิม หรือชนิดผสมน้ำ (soluble oil) และไม่เป็นอันตรายจากสารเคมี เป็นการประยุกต์ใช้งานการหล่อเย็นที่ไม่ส่งผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม.

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นทางด้านตลาดและผลกระทบของโครงการ

5.1.1 เกริ่นนำ (สรุปโครงการกับผลผลิตที่ได้)

โครงการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นสำหรับงานตัดเฉือนความละเอียดสูง โดยการนำเอาน้ำมันที่ได้จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติมาใช้ในปริมาณที่น้อย หรือที่เรียกว่า Minimum Quantity Lubrication (MQL); เพื่อทดแทนการหล่อเย็นแบบผสมน้ำ (soluble oil) ซึ่งประสบปัญหาจากสารเคมี ทำให้การเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และอันตรายในด้านต่างๆ ได้แก่ มลพิษทางอากาศ, การกำจัดสารเคมี และการใช้ปริมาณมาก เป็นการนำวิธีการหล่อเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้งาน

โครงการนี้พัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบขนาด 1 และ 3 หัวฉีด ทำการทดลองกับน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันที่ขายตามท้องตลาด LB-1 วัดประสิทธิภาพคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จจากงานกลึงปอกผิวเหล็ก S45C เปรียบเทียบกับการหล่อเย็นแบบผสมน้ำ (soluble oil).

ผลผลิตที่ได้

- อุปกรณ์หล่อเย็นต้นแบบ

5.1.2 กลุ่มเป้าหมายการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ ดังแสดงในตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. กลุ่มเป้าหมายการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์, รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์ และผลลัพธ์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

กลุ่มเป้าหมาย (ภาคอุตสาหกรรม/บริการ/สังคมชุมชน)	หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์/การนำไปต่อยอดให้เกิดมูลค่าเพิ่ม	ผลลัพธ์จากการนำไปใช้ประโยชน์	ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม
- อุตสาหกรรมการผลิตงานตัดเฉือนด้วยเครื่องจักรกล เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ แม่พิมพ์ เป็นต้น	-โรงงานอุตสาหกรรม บริษัท เอกชน	-การทดลองนำไปใช้งานจริง	-คุณภาพชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงหรือดีกว่าการหล่อเย็นแบบเดิม	-ลดการนำเข้า -ลดมลพิษด้านสิ่งแวดล้อม
-มหาวิทยาลัย	-งานวิจัย	-การเผยแพรประชาสัมพันธ์	-ได้งานวิจัยมากขึ้น	-ส่งเสริมการนำวิธีการหล่อเย็นที่ไม่ส่งผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมาใช้งาน

6. เอกสารอ้างอิง

เอกบูรณะวัฒน์, วิวัฒน์. 2555. เอกสารเผยแพร่ประกอบการสมัครเข้ารับการคัดเลือกในตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ ศูนย์อาชีวเวชศาสตร์และเวชศาสตร์สิ่งแวดล้อม. กรุงเทพ : รพ. นพรัตนราชธานี.

Astakhov, V. P., Davim, J. P., 2008. Ecological Machining : near-dry Machining In Machining fundamental and recent advance, London : Springer.

Filipovic, A., Olson, W., Pandit, S., Sutherland, J., 2000. Modeling of Cutting Fluid System Dynamic Symposium on Flexible Automation, Paper# 2000JUSFA-13201.

Kihg, N., Keranen, L., Gunter, K., Sutherland, J., 2001. Wet Versus Dry A Comparison of Machining Cost Product Quality and Aerosol Formation SAE Paper, SP-1579

Mackerer, C., 1989. Health Effect of Oil Mist A Brief Review. Toxicology and Industrial Heath5. pp. 429-440.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1998. Criteria for a recommented standard occupational noise exposure. U.A.S. : Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.

Sutherland, J. W., Kukar, V. N., King, N. C., 2004. An experiment investigation of air quality in wet and dry turning Annals of the CIRP 49/1., pp.511-537.

Vorburger, T.V., Raja, J., 1990. Surface Finish Metrology Tutorial. U.S. Department of Comerce.

Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W. and Wakabayashi., 2004. Dry machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals-Manufacturing Technology, **53**(2): pp. 511-537

ภาคผนวก ก

ข้อมูลทางเทคนิคน้ำมันหล่อเย็น

1. น้ำมันหล่อเย็น BLUEBE ACCU LUBE LB-1

✣ PRODUCT SPECIFICATIONS ✣

BLUEBE LB-1

Superior moderate to heavy-duty metalworking lubricant for general machining and sawing

.Bluebe's #1 selling product.

		LB-1
All Metals, Heavy, Moderate-Heavy,		◎
Aluminum, Moderate-Heavy, light		○
Rinse Water Wash		-
Cleaning Not Required Before Heat Treating		×
Technical data	Specific gravity (20℃.g/cm^3)	0.92
	Flash point (℃)	320
	Viscosity (40℃.m㎡/S { cSt })	37
	Pour point (℃)	-20℃
	Total chlorine (%)	0%
	Active sulfur content (%)	0%
	Silicates (%)	0%
	Mineral oil content (%)	0%

2. น้ำมันหล่อเย็น TROPICANA COCONUT VERGIN OIL

PRODUCT SPECIFICATIONS

1.Specific Gravity @ 60o/60oF	0.81
2. Viscosity Kinematic @ 40oC, cSt.	39
3. Flash Point (COC), oC.	300
4. Poor Point (°C)	-20°C
5. Silicates	0
6. Total Chlorine (%)	0
7. Active Sulfur Content (%)	0

3. น้ำมันหล่อเย็น PTT HIKUT

PTT HIKUT 66 เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันระบายความร้อนและหล่อลื่น สำหรับงานตัดกลึงโลหะทั่วไป ชนิดผสมน้ำ มีสีขาวน้ำนม ผลิตจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิด Paraffinic ที่มีคุณภาพสูง เหมาะสำหรับการระบายความร้อนและหล่อลื่นงานตัดกลึงในงานช่างกลโรงงานทั่วไป.

คุณสมบัติพิเศษ

- ระบายความร้อนได้เร็ว ช่วยป้องกันชิ้นงานและเครื่องมือจากการไหม้ ช่วยยืดอายุการใช้งาน.
- มีคุณสมบัติหล่อลื่นช่วยให้ผิวชิ้นงานเรียบเป็นเงา.
- มีคุณสมบัติช่วยป้องกันการกัดกร่อนและสนิม.
- มีคุณสมบัติต้านทานชีวภาพ จึงใช้งานได้นานโดยไม่บูดเสีย.

ลักษณะการใช้งาน

- เหมาะสมกับงานกลึง, ตัด, งานกัด, งานไส และงานเจียระไนทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนผสม 3-5 % สำหรับงานเจียระไน งานเลื่อยช้า และใช้อัตราส่วนผสม 5-10 % สำหรับงานกลึงตัด งานเจาะรู ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดโลหะและวิธีการ.
- สามารถใช้เป็นน้ำมัน Concrete Form Oil สำหรับทำแม่แบบการผลิตกระเบื้องแผ่น

มาตรฐานอ้างอิง.

- N/A.

✣ PRODUCT SPECIFICATIONS ✣

Appearance	Clear brown color
Viscosity @ 40 oC, cSt	42
Emulsion Stability	PASS
Copper Strip Corrosion	1
pH Value	9.1

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบผลการทดลอง

ตารางที่ 2. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยการหล่อเย็นด้วยน้ำมันมะพร้าว

ชิ้นงานที่	ทดลองครั้งที่ 1 (ไมโครเมตร)	ทดลองครั้งที่ 2 (ไมโครเมตร)	ทดลองครั้งที่ 3 (ไมโครเมตร)
1	2.51	2.45	2.54
2	2.48	2.58	2.61
3	2.71	2.56	2.71
4	2.52	2.55	2.53
5	2.65	2.6	2.65
6	2.43	2.44	2.51
7	2.75	2.7	2.78
8	2.71	2.75	2.78
9	2.81	2.87	2.77
10	2.56	2.58	2.53
11	2.63	2.61	2.55
12	2.66	2.58	2.69
13	2.68	2.55	2.74
14	2.45	2.4	2.48
15	2.71	2.58	2.66
16	2.81	2.77	2.75
17	2.59	2.61	2.65
18	2.74	2.84	2.75
19	2.78	2.85	2.86
20	2.75	2.98	2.83
21	2.56	2.51	2.53
22	2.51	2.58	2.67
23	2.74	2.8	2.71
24	2.8	2.77	2.74

ตารางที่ 3. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยการหล่อเย็นด้วยน้ำมัน LB-1

ชิ้นงานที่	ทดลองครั้งที่ 1 (ไมโครเมตร)	ทดลองครั้งที่ 2 (ไมโครเมตร)	ทดลองครั้งที่ 3 (ไมโครเมตร)
1	2.78	2.86	2.65
2	2.85	2.81	2.91
3	2.81	2.75	2.78
4	2.88	2.84	2.95
5	2.81	2.74	2.78
6	2.96	3	3.03
7	2.79	2.91	2.9
8	3.02	2.97	2.86
9	2.87	2.89	2.78
10	3.07	2.89	3.02
11	2.62	2.56	2.61
12	2.8	2.6	2.71
13	2.61	2.74	2.71
14	3.1	2.83	2.77
15	2.74	2.63	2.66
16	2.6	2.65	2.51
17	2.57	2.64	2.55
18	2.65	2.71	2.75
19	2.81	2.73	2.76
20	2.74	2.71	2.8
21	2.78	2.85	2.78
22	2.65	2.75	2.68
23	2.81	2.69	2.74
24	2.65	2.78	2.7

ตารางที่ 4. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยการหล่อเย็นด้วยน้ำมันชนิดผสมน้ำ (soluble oil)

ชิ้นงานที่	ทดลองครั้งที่ 1 (ไมโครเมตร)	ทดลองครั้งที่ 2 (ไมโครเมตร)	ทดลองครั้งที่ 3 (ไมโครเมตร)
1	2.97	2.86	2.99
2	2.85	2.92	2.94
3	2.97	2.82	2.75
4	2.83	2.84	2.78
5	2.8	2.86	2.91
6	2.96	3	3.03
7	2.77	2.82	2.86
8	3.02	2.97	2.86
9	2.81	2.87	2.77
10	3.07	2.89	3.02
11	2.95	2.93	3.1
12	2.98	2.76	2.89
13	3.07	2.97	2.98
14	2.97	3	3.05
15	2.97	2.81	3.04
16	2.98	3.09	3.1
17	3.08	2.91	3.08
18	2.87	3.09	3.04
19	3.03	2.96	3.07
20	3.15	2.98	3.16
21	3.11	3.16	3.03
22	3.08	3.15	3.08
23	3.12	3.04	2.99
24	3.1	3.11	3.14