การพัฒนาเครื่องทดสอบความสึกหรอ

Wear Tester Development

โดย

นาย ชุมพล ตันติสิริสมบูรณ์

นาย วิชาติ ชนินทราเวศย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2537

โครงงาน การพัฒนาเครื่องทดสอบความสึกหรอ

(Wear Tester Development)

โดย

นาย ชุมพล ตันติสิริสมบูรณ์ 34102100

นาย วิชาติ ชนินทราเวศย์ 34106322

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2537

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงงาน การพัฒนาเครื่องทดสอบความสึกหรอ
(Wear Tester Development)

ผู้จัดทำ

นาย ชุมพล ตันติสิริสมบูรณ์ 34102100
นาย วิชาติ ชนินทราเวศย์ 34106322

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเครื่องทดสอบความสึกหรอ

นาย ชุมพล ตันติสิริสมบูรณ์
นาย วิชาติ ชนินทราเวศย์
อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของความสึกหรอของแผ่นอยู่กับที่ชนิด คาร์บอน เฟสลอน และเหล็ก ขนาด 70 มม * 35 มม * 8 มม. กับลูกกลิ้งที่ภาระ 5,10,15 กิโลกรัม และความเร็ว 750 และ1000 รอบต่อนาที โดยใช้เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งจะพบว่าการสึกหรอของแผ่นที่อยู่กับที่ชนิดต่างๆไม่เท่ากัน และเมื่อภาระและความเร็วมากขึ้นจะทำให้การสึกหรอมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

WEAR TESTER DEVELOPMENT

CHUMPOL TUNTISIRISOMBOON

VICHART CHANINTRAWET

DR. MONGKOL MONGKOLVONGROTH

ADVISOR

1994

ABSTRACT

An analysis for finding relation between wear of fixed plates,carbon taplon and iron type 75 mm * 35 mm * 8 mm. size at load 5 10 and 15 kilograms speed 750 and 1000 rpm,and roller is presented. The test use the wear tester which developed Different wear of various fixed plate materials are found Test results show that the increasing load and speed cause increasing wear of fixed plates.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. ไตรโบโลยี	23
บทที่ 3. เครื่องทดสอบความสึกหรอ	43
บทที่ 4. สรุปผลการทดลอง	71
บทที่ 5. ข้อเสนอแนะในการทดสอบ	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1. บทนำ
กรรมวิธีพิเศษในการทำให้ผิวเหล็กกล้าแข็งขึ้น

ชิ้นส่วนเครื่องกลส่วนใหญ่ต้องการวัสดุที่ทนการสึกหรอได้ดี โดยมีความแข็งสูงตรงบริเวณที่สัมผัสกัน มีความเหนียวสูงตรงแกนเหล็ก(ปลอดภัยต่อการแตกหัก)ชิ้นส่วนที่ต้องการคุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาลูกเบี้ยว เพลาสไปล์น สลัก ชิ้นส่วนของคลัตช์ และอื่นๆ

จึงมีการพัฒนาการทำให้ผิวแข็ง โดยมีองค์ประกอบของรูปร่าง ขนาด จำนวน และวัสดุของชิ้นส่วนที่จะต้องเลือกใช้กรรมวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

บางกรรมวิธีจะให้ผิวเหล็กผ่านการแพร่(Diffusion)ด้วยธาตุชนิดใหม่ ทำให้เกิดการเปลี่ยน แปลงส่วนเจือทางเคมี ในบางวิธีการจะควบคุมการชุบแข็งให้เกิดมาร์เตนไซด์แข็งขึ้นในบริเวณชั้นผิว บางๆได้

ข้อดี การทำให้ผิวเหล็กแข็งในกรรมวิธีต่างๆ คือ จะให้ความเค้นล้าตัว(fatique Strength) ของชิ้นส่วนสูงขึ้น ปริมาตรผิวที่มีความแข็งของเหล็กกล้าจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำให้แข็งหรือการอาบไนโตรเจน(Nitriding)ด้วยเหตุนี้จึงทำให้บริเวณผิวขอบๆสามารถรับความเค้นอัดได้

การชุบผิวแข็ง(Case Hardening)คือ

การนำชิ้นส่วนเหล็กกล้าไม่เจือ(สำเร็จรูป)ที่มีความเหนียวมีคาร์บอนระหว่าง 0.1...0.25% รวมทั้งเหล็กกล้าเจือต่ำที่เจือ Mn,Cr,Ni หรือ Mo เหล็กกล้าเจือที่มี C=0.2 มีโครงสร้างเม็ดเกร็น เป็นเฟอร์ไรต์+เพอร์ไลต์มาชุบผิวให้แข็งโดยให้คาร์บอนแพร่(Diffusion)เข้าไปในผิวของเหล็กกล้าให้เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 0.9%C และมีผิวแข็งลึก ระหว่าง 0.5...2 mm (สำหรับในอ่างผงถ่าน พิเศษจะทำให้ผิวแข็งลึกได้ถึง 5 mm)แต่แกนยังเหนียวและอ่อน

เหล็กกล้านี้จะมีปริมาณธาตุเจือ เช่น Cr,Mn,Ni,Mo ต่ำ ซึ่งเป็นธาตุที่จะทำให้เกิดคาร์ไบด์ แข็งขึ้น เช่น Cr,Mo มีผลให้ทนการสึกหรอได้ดี

การชุบแข็งผิวโลหะกระทำได้หลายวิธี คือ

1. การอาบคาร์บอน(Carburization) เหล็กกล้าจะถูกทำให้ร้อนถึงราว 880c ถึง 930c จนโครงสร้างกลายเป็นออสเตไนต์ ที่อุณหภูมินี้ออสเตไนต์สามารถละลายคาร์บอนได้มากกว่า 1% ตราบเท่าที่ยังมีคาร์บอนอยู่ อะตอมคาร์บอนจะแพร่(Diffusion)ไปยังขอบเม็ดเกร็นและแพร่ต่อไป ยังผิวนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ยิ่งสูงขึ้นก็ยิ่งทำให้กระบวนการแพร่(Diffusion)เร็วขึ้น

อุณหภูมิและเวลาจะมีผลต่อปริมาณคาร์บอน(ความแข็งที่ผิว)มาก รวมทั้งสารคาร์บอน (Carburizer) และความลึกของการอาบคาร์บอน(Carburization)

การหลอมละลายและส่วนเจือของเหล็กกล้าจะมีผลต่อการแพร่ของคาร์บอน (Diffusion) โดยถ้ามีส่วนเจือ(Alloy)ของอะตอมอยู่ในออสเตไนต์ก็จะทำให้การแพร่ของอะตอมคาร์บอนเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้เหล็กกล้าชนิดเดียวกันจะเกิดผลของการอาบคาร์บอน(Carburization) ต่างกัน

2.การอาบคาร์บอนผง(Powder Carburization) ชิ้นงานเหล็กกล้าสำเร็จรูป(ที่ไม่มีน้ำมันหรือจารบีติดอยู่)จะถูกนำมาคลุกกับผงคาร์บอนในหีบ(เหล็กแผ่น)แล้วปิดให้แน่นไม่ให้อากาศเข้าด้วยวัสดุทนไฟแล้วให้ความร้อนที่ประมาณราว 930°c

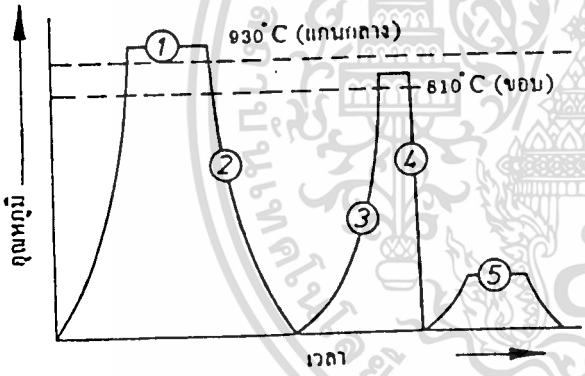
รูปที่ 1. การอาบคาร์บอนเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนระหว่าง 0.1...0.2%

โดยผงคาร์บอนจะได้จากถ่านไม้ ถ่านโค้ก หรือถ่านจากกระดูกโซเดียมคาร์บอเนต(Na_2CO_3)และแคลเซียมคาร์บอเนต($CaCO_3$) ที่มีการรวมตัว(Combination)ของด่างหรือเป็นเม็ดที่มีขนาด 2 ถึง 10 mm

ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดก๊าซ CO และ CO_2 การรวมตัวของด่างจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้เวลาการอาบคาร์บอนบนผิวเหล็กสั้นลง ซึ่งได้แก่ แบเรียมออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$)ที่เจือรวมกับผงคาร์บอน ผงอาบคาร์บอนนี้จะต้องหุ้มชิ้นงานอย่างน้อยให้หนาที่สุด 3 mm ที่บริเวณผิวชิ้นงานจะเกิดการแยกตัวของคาร์บอนออกไซด์ เป็น $C+CO_2(2CO->C+CO_2)$ ชิ้นงานที่ อยู่ในอุณหภูมินี้จะเป็นออสเตไนต์ที่สามารถจะรับคาร์บอนเข้าไป ก๊าซ(CO_2)จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนแดงอีกเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$CO_2+C->2CO$ ปริมาณที่บริเวณผิวจะเพิ่มขึ้นเร็วในระยะแรกต่อจากนั้น จะช้าลงทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซ CO และ CO_2 ทั้งสอง ซึ่งก็แล้วแต่ความ ต้องการที่จะเพิ่มคาร์บอนให้ลึกเข้าไปในผิวชิ้นงาน ในเตาที่ให้ความร้อนแก่หีบถ่านจะใช้เวลา ประมาณ 5 ถึง 15 ชั่วโมง ทำให้คาร์บอนซึมลึกเข้าไปในชิ้นงานระหว่าง 0.5 ถึง 2 mm จึงมีวิธีการคิดหาการซึมลึกของคาร์บอนอย่างคร่าวๆคือ คาร์บอนซึมลึกประมาณ 0.1 mm ต่อเวลา ให้ความร้อนในเตา 1 ชั่วโมง เมื่อคาร์บอนซึมลึกได้ตามต้องการแล้วจะนำหีบออกจากเตาและรื้อ หีบเอาชิ้นงานออกมาจนชิ้นงานเย็นลงถึงอุณหภูมิ 780...840°c(เป็นอุณหภูมิชุบแข็งของชิ้นงานที่เพิ่มคาร์บอนที่ผิวถึง =1%c)แล้วนำไปชุบแข็งในน้ำหรือน้ำมัน ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นมาร์เตนไซด์ละเอียดที่บริเวณผิวงาน(มีความแข็งสูง)และอบคืนตัว ระหว่าง 150c ถึง 200c ทำให้มีความ เหนียวสูงขึ้น กรรมวิธีที่กล่าวมานี้ เรียกว่า การชุบแข็งเดี่ยว (Single Hardening) ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นชิ้นงานที่ไม่มีการดึงหรือบิดเกิดขึ้นเมื่อผ่านกรรมวิธีนี้ เช่น เฟือง สลักเกลียวยึดขนาดใหญ่



รูปที่ 2. แผนภาพเวลา-อุณหภูมิในระหว่างการอบคาร์บอน(Carburization)และการชุบแข็งเดี่ยว
1.การอบคาร์บอน(Carburization)
2.เย็นตัวในอากาศหรือในผงถ่าน
3.ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง
4.ชุบแข็ง
5.อบคืนตัว

ข้อดีของวิธีนี้คือ เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดโต ทำให้ประหยัดเพราะค่าใช้จ่ายการบรรจุหีบและการให้ความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการอบคาร์บอนวิธีอื่น

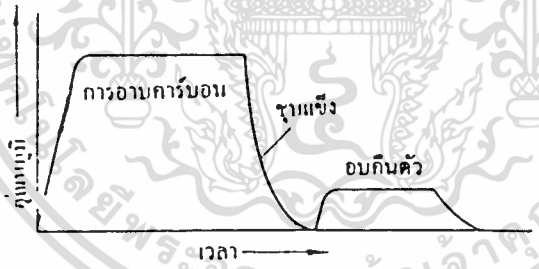
ข้อเสีย การทำการบรรจุและรื้อหีบต้องใช้เวลามาก ผงคาร์บอนเป็นตัวนำความร้อนที่เลวจึงต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนนาน กว่าชิ้นส่วนจะทำปฏิกริยากับคาร์บอน หีบบรรจุจะต้องทำจากเหล็กกล้าเจือชนิดทนต่อการเกิดผิวสะเก็ดได้เหล็กธรรมดาจะเกิดผิวสะเก็ดเมื่อมีการเพิ่มและลดความร้อนขึ้บ่อยครั้งชิ้นส่วนจะไม่สามารถทำให้เย็นตัวโดยเร็วจากอุณหภูมิที่กำลังอบคาร์บอนซึ่งจะต้องปล่อยให้เย็นตัวลงธรรมดาและให้ความร้อนอีกครั้ง ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การอาบคาร์บอนในเตาเกลือ(Salt Bath Carburization) ชิ้นส่วนจะถูกแขวนให้ความร้อนในเตาเกลือที่ไม่มีน้ำที่อุณหภูมิ ระหว่าง 850...950c เกลือในเตาที่ใช้เป็นแบบผสมที่มีโซเดียมไซยาไนด์(NaCN),แบเรียมคาร์บอเนต($BaCO_3$)ที่มีคาร์บอนเจืออยู่มากกว่าและมีคลอไรด์ที่ช่วยให้หยุดการแยกตัว รวมทั้งแบเรียมหรือการรวมตัวของสตรอนเทียม(Strontium)ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งคาร์บอนให้แพร่เข้าไปในผิวชิ้นงานได้เร็วขึ้น

ไซยาไนด์ จะแยกตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้กลายเป็นคาร์บอนและบางส่วนกลายเป็นไนโตรเจนที่ช่วยในการอาบคาร์บอน การอาบคาร์บอนให้ผิวงานในอ่างเกลือ จะซึมลึกได้ถึง 0.5 mm โดยแช่ที่อุณหภูมิประมาณ 920c ในอ่างเกลือประมาณ 20 นาที จะทำให้ได้รับความลึกของผิวคาร์บอนประมาณ 0.1 mm

หลังจากได้รับความลึกผิวจากการอาบคาร์บอนตามต้องการแล้ว จะนำชิ้นงานจากอุณหภูมิ 920c มาทำการชุบแข็งในน้ำมันหรือในน้ำทันที กรรมวิธีนี้ เรียกว่า การชุบแข็งโดยตรง(Direct Hardening)วิธีนี้จะใช้อุณหภูมิที่ทำการชุบแข็งสูงกว่าอุณหภูมิชุบแข็งปกติ ซึ่งอาจมีผลทำให้ภายหลังชุบแข็งมีเม็ดเกรนหยาบและเปราะและเกิดการดึงและบิดในชิ้นงานได้ง่าย สำหรับเหล็กกล้าเจือบางชนิดที่มีเม็ดเกรนละเอียดจะไม่เกิดลักษณะที่กล่าวมานี้ขึ้นได้ เช่น เหล็กกล้าเจือ MoCr มี Cr<1.0% (ที่เกิดเศษออสไนต์น้อย)



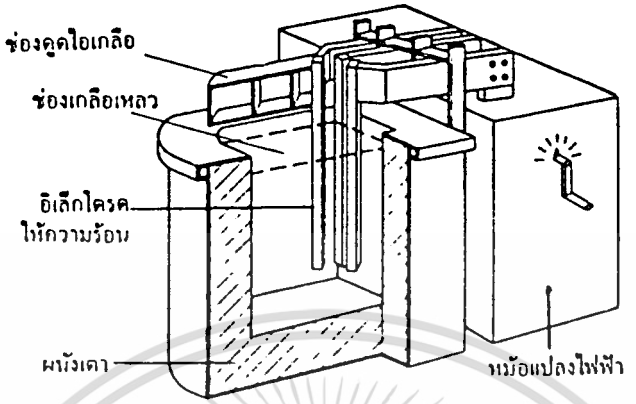
รูปที่ 3. แผนภาพ เวลา อุณหภูมิในการอาบคาร์บอนด้วยอ่างเกลือหรือก๊าซแล้วทำการชุบแข็งโดยตรง

ข้อดีของวิธีนี้เกลือที่ละลายนี้เป็นตัวนำความร้อนที่ดีให้แก่ชิ้นงานทำให้เวลาที่ให้ความร้อนสั้นลง หลังจากการอาบคาร์บอนสามารถนำชิ้นงานมาทำการชุบแข็งได้โดยตรงอีกด้วย ทำให้ประหยัดพลังงานความร้อนได้ ชิ้นงานที่ยาวสามารถนำมาแขวนในเตาได้และเหมาะสำหรับทำเป็นกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสถานประกอบการขนาดเล็กได้

ข้อเสีย เกลือไซยาไนด์ เป็นพิษต่อกระเพาะอาหารมาก เกลือที่ใช้มีราคาแพง



รูปที่ 4. แสดงภาคตัดบางส่วนของเตาเกลืออิเล็คโตรด

ปฏิกริยาของคาร์บอนจะต้องมีการตรวจสอบค่า ด้วยการกำหนดให้เติมปริมาณเกลือใหม่ที่จะใส่ในเตาโดยให้มีปริมาณคงที่เสมอ เกลือที่ละลายจะกัดผนังเตารุนแรง โดยทุก 1,000 ชั่วโมงทำงานจะกัดผนังเตาหนา 1 mm ให้หายไปเสมอ จึงต้องมีการใช้ทองแดงฉาบผิวแบบกัลวาไนซิ่ง

4.การอาบคาร์บอนด้วยก๊าซ(Gas Carburization) เป็นวิธีการอีกวิธีหนึ่งที่จะอาบคาร์บอนให้ผิวชิ้นงานที่ทันสมัยและนิยมใช้โดยการใช้ก๊าซเฉื่อยที่มีคาร์บอนเจืออยู่(สารมลทินSO_2,CO_2 และ H_2O จะต้องทำการขจัดออกไปก่อน)เพื่อให้เกิดการเร่งในการทำปฏิกริยาเพิ่มคาร์บอนให้ชิ้นงานจะใช้โพรเพน(C_3H_8)เหลวปนกับก๊าซเฉื่อยแล้วฉีดด้วยปั๊มให้ก๊าซเข้าไปในเตาที่กั้นไม่ให้อากาศเข้าได้ที่อุณหภูมิประมาณ 920c ธาตุคาร์บอนจะซึมเข้าไปในผิวชิ้นงานที่แขวนหรือวางอยู่ในเตา ก๊าซที่ใช้จะต้องมีการวัด ปรับ ตรวจสอบปริมาณของส่วนประสมของก๊าซอยู่เสมอ

ก๊าซที่ใช้เป่าเข้าไปในเตายังสามารถผสมกับแอลกอฮอล์แล้วปรับขนาด ปล่อยให้หยดลงในเตาที่ร้อนมันจะระเหยเป็นก๊าซ ธาตุคาร์บอนจะซึมเข้าไปในชิ้นงานประมาณ 0.2 mm ต่อ 1 ชั่วโมงด้วยกรรมวิธีนี้สามารถเพิ่มคาร์บอนได้ลึกถึงระหว่าง 0.5 ถึง 2 mm ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีนี้จึงสะอาด (เพราะได้ขจัดสารมลทินออกจากก๊าซไปแล้ว)

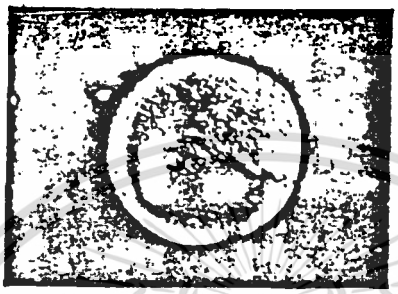
เมื่อใช้ก๊าซเพิ่มคาร์บอนชิ้นงานได้ความลึกตามที่ต้องการแล้ว จะนำชิ้นงานออกจากเตามาทำการชุบแข็งโดยตรง(Direct Hardening)ในน้ำหรือน้ำมันแล้วนำมาอบคืนตัว เหมือน 2 วิธีการก่อนหน้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของวิธีนี้ใช้เวลาน้อย เหมาะกับชิ้นงานเล็กและโต ชิ้นงานสะอาด เหมาะกับการผลิตอย่างต่อเนื่อง

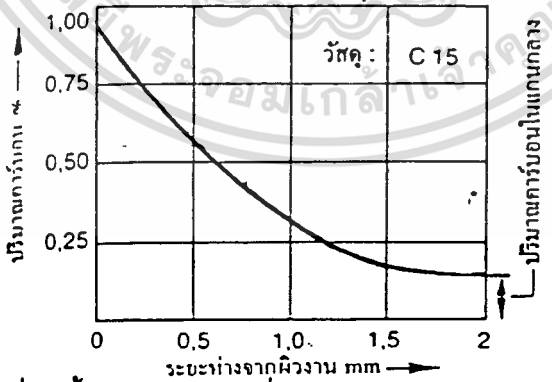
ข้อเสีย อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับก๊าซและผลิตก๊าซมีราคาแพง

ชิ้นส่วนที่ผ่านการอาบคาร์บอนสามารถทำการชุบแข็ง อบคืนตัว และเจียระไนให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดสำเร็จรูปได้อย่างแท้จริงได้



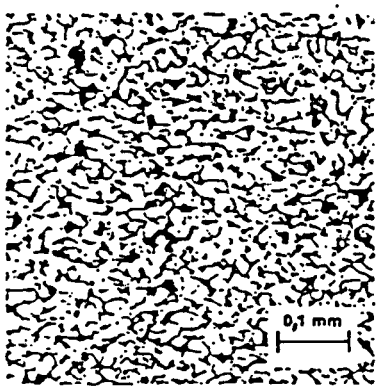
รูปที่ 5. รอยขาดของชิ้นงานกลมที่ผ่านการอาบคาร์บอนที่ผิว

รูปที่ 6. ภาพโครงสร้างมหภาคกัดกรดแล้วของชิ้นงานกลมที่ผ่านการอาบคาร์บอนที่ผิว

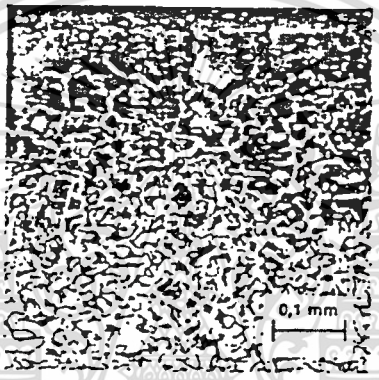


รูปที่ 7. ชิ้นงานเหล็กกล้าที่อาบคาร์บอนแสดงให้เห็นว่าระยะยิ่งลึกเข้าไปในผิวงานปริมาณคาร์บอนจะลดลง

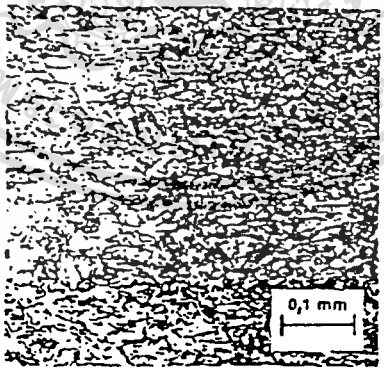
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8. โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไม่เจือ C15 ขณะยังไม่ได้อาบคาร์บอน

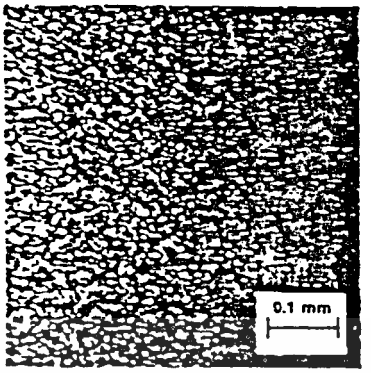


รูปที่ 9. โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไม่เจือ C15 ที่ผ่านการอาบคาร์บอน และชุบแข็งโดยตรงแกนกลางและโซนขอบมีเม็ดเกร็นหยาบ



รูปที่ 10. โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไม่เจือ C15 ที่ผ่านการอาบคาร์บอนอย่างถูกต้องแสดงให้เห็นว่าบริเวณโซนขอบมีโครงสร้างเป็นเพอร์ไลต์

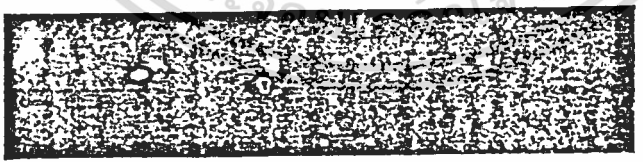
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไม่เจือ C15 ที่ผ่านการอาบคาร์บอนและชุบแข็ง 2 ครั้ง(Double Hardening)แสดงให้เห็นบริเวณแกนกลางและโซนขอบมีเม็ดเกร็นละเอียด

การใช้สารปิดตำแหน่งที่ไม่ต้องการอาบคาร์บอนบนผิวชิ้นงาน

ในการอาบคาร์บอนบนผิวชิ้นงาน แบบใช้ผง หรือ แบบใช้ก๊าซ จะมีตำแหน่งบนชิ้นงานที่ไม่ต้องการอาบคาร์บอนให้ผิวชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องใช้สารประเภท ปาสเตอร์เหลวเจือทองแดงทาผิวหรือทำการกัลวาไนซ์ด้วยทองแดงบนตำแหน่งที่ไม่ต้องการอาบคาร์บอนก่อน การอาบคาร์บอนบนผิวชิ้นงาน สารดังกล่าวจะช่วยไม่ให้คาร์บอนซึมเข้าไปในผิวชิ้นงานได้ ตำแหน่งผิวงานดังกล่าวจะอ่อนเหมือนเดิมหลังจากการชุบแข็ง



รูปที่ 12. ภาพโครงสร้างมหภาคของสลักที่ผ่านการเพิ่มคาร์บอน(ภาคตัด) ครึ่งซ้างซ้ายผ่านการอาบคาร์บอนบนผิวครึ่งซ้างขวาใช้สามารถปิดกั้นไม่เกิดการอาบคาร์บอนบนผิวชิ้นงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ผ่านการอาบคาร์บอนบนผิวและชุบแข็งเท่าที่จำเป็นจะต้องทำการปาดผิวอื่นๆ เช่น กลึงละเอียด กลึงเกลียว กัด ไส หรือเจียระไน เช่น ตัวอย่างสลักเกลียวขันยึดตามรูปที่ 13 จะมีขั้นตอนคือ กลึงให้ได้ขนาดใกล้เคียง(เผื่อ)อาบคาร์บอน จากนั้นกลึงปาดออกให้ได้ขนาด ตำแหน่งผิวอาบคาร์บอนถูกปาดออกจะเป็นตำแหน่งที่ต้องการให้ผิวอ่อน หลังจากชุบแข็ง ด้วยการปิดกั้นทาด้วยสารป้องกันผิว จะนำมาเจียระไนและตัดเกลียวตรงตำแหน่งที่กลึงปอกออก

รูปที่ 13. ขั้นตอนการผลิต สลักเกลียวขันยึดที่ต้องผ่านกรรมวิธีอาบคาร์บอนและชุบแข็ง

การชุบแข็งในอ่างไซยาไนด์(Cyanide Bath Hardening)

เป็นหลักการเหมือนการชุบแข็งโดยตรง(Direct Hardening)การที่จะใช้อ่างไซยาไนด์นั้น ก็ต่อเมื่อเป็นชิ้นงานที่ต้องการอาบคาร์บอนให้ซึมลึกเพียงเล็กน้อย ในอ่างไซยาไนด์จะมีอุณหภูมิระหว่าง 840c ถึง 930c ใช้เวลาสั้นและมีการเกิดเม็ดเกร็นหยาบน้อยมาก วิธีนี้ยังใช้กับเหล็กกล้าอบชุบบางชนิดได้อีกด้วย

การชุบในอ่างร้อน(Warm Bath Hardening)

เหมาะสำหรับเหล็กกล้าไม่เจือเหล็กกล้าชุบผิวแข็งเจือต่ำ ส่วนมากจะชุบแข็งในน้ำที่มีสภาพเป็นกรดหรือน้ำมันและสำหรับเหล็กกล้าเจือสูงจะชุบแข็งในน้ำหรืออ่างร้อน

ในอ่างชิ้นงานที่จะชุบแข็งในอ่างร้อนจะต้องมีรูปร่างที่สลับซับซ้อน เมื่อชุบแข็งแล้วจะเกิดการดึงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ 034922

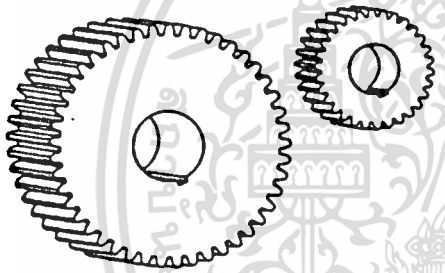
ชิ้นงานน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีความเหนียวสูง และมีเศษออสเตไนต์ที่ขอบเม็ดเกรนน้อยมากอีกด้วย

อุณหภูมิที่ชุบแข็งในอ่างร้อนจะอยู่ระหว่าง 180c ถึง 320c ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างมาร์เตนไซต์ที่โซนขอบชิ้นงาน(มีประมาณ.C ระหว่าง 0.8 ถึง 1.0%)

การอบคลายความเครียด(อบคืนตัว)

ชิ้นงานที่ผ่านการอาบคาร์บอนบนผิวและชุบแข็ง จะมีการอบคืนตัว(คลายความเครียด)ที่อุณหภูมิระหว่าง 160c ถึง 180c ซึ่งจะทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลงไปเล็กน้อย

ในขบวนการผลิตแบบเอนกประสงค์ในสถานประกอบการใหญ่ๆจะมีการอาบคาร์บอน(Carburization)ทุกวิธี



รูปที่ 14. ข้อดีของการเพิ่มคาร์บอนและชุบแข็งเฟืองเมื่อเปรียบเทียบเฟืองเล็กที่ผ่านการชุบแข็งหนัก 1.5 kgส่วนเฟืองใหญ่ไม่ผ่านการชุบผิวแข็ง (Case Hardening) หนัก 15 kg แต่มีอายุการใช้งานและรับภาระได้เท่ากัน

ข้อผิดพลาดที่สามารถเกิดจากการชุบผิวแข็ง(Case Hardening)

-การเกิดรอยเป็นจุดบนผิว เกิดเนื่องจากการอาบคาร์บอนไม่สม่ำเสมอบนชิ้นงานที่ไม่สะอาดหรือเกิดจากการแยกตัวของแกรไฟต์บนผิวชิ้นงานได้ ทำให้เกิดการลดคาร์บอน(Decarburization)ในขณะให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งหรือที่อุณหภูมิชุบแข็งต่ำเกินไป ก็ทำให้เกิดรอยเป็นจุดบนผิวได้

-เกิดการอาบคาร์บอนมากเกินไปเกิดขึ้นเมื่อขอบชิ้นงานดูดซึมคาร์บอนไว้มากเกินไปทำให้กลายเป็นเซกกันดารีซีเมนไตต์(Secondary Cementite)รูปร่างตาข่ายขึ้น แต่สามารถขจัดให้หายไปด้วยการอบให้เป็นเอกพันธุ์(Homogenizing)

-การเกิดรอยร้าวหลังจากการชุบแข็ง เมื่อบริเวณขอบผิวชิ้นงานที่มีคาร์บอนสูงและข้างในชิ้นงานมีคาร์บอนต่ำ จะทำให้เกิดการยืดหดตัวไม่เท่ากันขึ้นได้ ทำให้ผิวขอบชิ้นงานเกิดรอยร้าวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 15. ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าที่ถูกดูดคาร์บอนออก (Decarburizing) เนื่องจากไม่มีการใช้ก๊าซเฉื่อยป้องกันผิวในขณะให้ความร้อน ภาคขยาย 700:1

การอาบไนโตรเจน(Nitriding)

เป็นขบวนการคล้ายกับการอาบคาร์บอนบนผิวชิ้นงานเหล็ก แต่ไม่มีการชุบแข็ง จึงไม่เกิดโครงสร้างมาร์เตนไซต์บนผิวงาน เนื่องจากการแพร่(Diffusion)ของไนโตรเจนเข้าไปในผิวชิ้นงานสำเร็จรูป (ที่ผ่านการกลึง กัด ไส เจียระไน ทำให้ผิวมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าชุบผิวแข็ง มีการดึงในชิ้นงานน้อยมากชิ้นงานที่ผ่านการอาบไนโตรเจนจะทนต่อสารเคมี สามารถดัดได้เพียงเล็กน้อยในกรณีที่เกิดการบิดตัว

เหล็กกล้าที่ผ่านกรรมวิธีนี้เรียกว่า'เหล็กกล้าอาบไนโตรเจน'(NitridingStreel)ยิ่งถ้าเป็นเหล็กเจือ Nb,Ta,Zr ไดตาเนียม วานาเดียมเจืออะลูมิเนียม โมลิบดินัม หรือโครเมียมหรือนิเกิล และมี C ระหว่าง 0.26-0.34% แล้วทำการอาบไนโตรเจนก็จะทำให้ได้ค่าความแข็งสูงที่สุดกว่าทุกวิธีโดยจะได้ความแข็งถึง 1500 HV มีผิวลื่นจึงสามารถหมุนได้โดยไม่ต้องหล่อลื่นได้ระยะหนึ่ง แต่มีความเปราะ เหล็กกล้าอาบไนโตรเจนจะมีผิวแข็งทนการสึกหรอได้ดี มีความล้าตัวและทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อนได้สูงขึ้น ผิวที่อาบไนโตรเจนเป็นผิวไนไตรด์(Nitride) มีโครงสร้างแบบซับซ้อน(Complicate)ลักษณะ Intermediate Phase

1.ขบวนการภายใน ผิวเหล็กกล้าสภาพโครงสร้างเฟอร์ไรต์จะถูกนำมาเข้ากรรมวิธีที่อุณหภูมิ 350...580c ไนโตรเจนจะซึมเข้าไปในผิวงานได้ถึง 0.1% และเกิดความหนาของชั้นผิวเหล็กไนไตรด์ระหว่าง 10...30 m ใต้ผิวเหล็กไนไตรด์ยังเกิดโซนการแพร่(Diffusion Zone)ของไนไตรด์โดยไนโตรเจนจะ

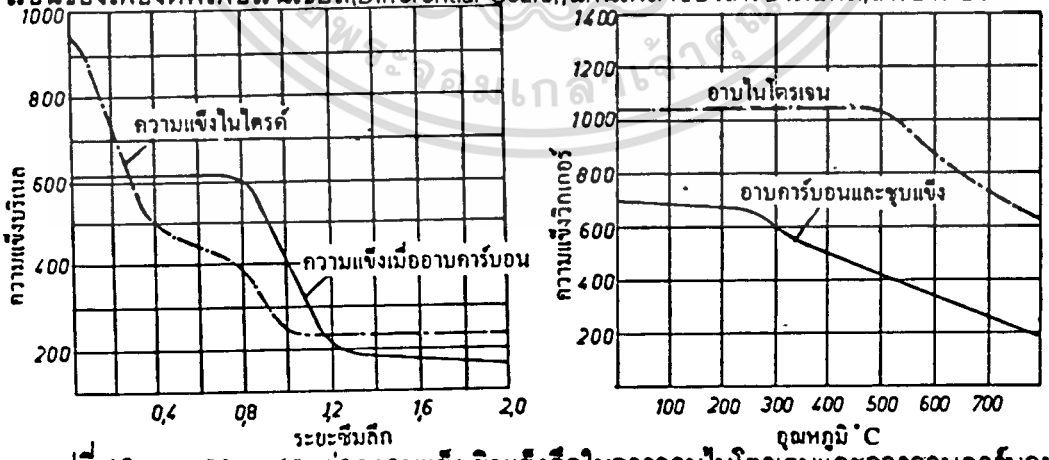
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึมเข้าไปได้ลึกสูงสุด 100 เท่าของผิวที่มีไนโตรเจน 0.1% (แพร่กระจายละเอียดหลังจากเย็นตัว)

คุณสมบัติอื่นๆของชั้นผิวไนโตรด์ที่ทำให้เหล็กอาบไนโตรเจนมีค่าแรงกดตามพื้นที่สูงขึ้นก็คือการที่มีชั้นผิวไนโตรด์หนาระหว่าง 0.1...0.3% โดยที่เนื้อข้างในของเหล็กยังมีความเค้นครากสูงอยู่เหล็กกล้าอบชุบก็นำมาอาบไนโตรเจนได้เช่นกัน โดยหลังจากอาบไนโตรเจนแล้วจะต้องทำการอบคืนตัวอีกครั้งหนึ่งแต่จะต้องต่ำกว่าในขบวนการอบชุบเสมอ

การอบไนโตรเจนมีอยู่หลายวิธีแต่ก่อนจะทำการอบไนโตรเจน จะต้องล้างชิ้นงานให้ปราศจากน้ำมันหรือจารบีเสมอ

2.การอบก๊าซไนโตรเจน(Gas Nitriding) จะนิยมกระทำกับเหล็กกล้าเจือ ซึ่งเหมือนกับการอาบคาร์บอนด้วยก๊าซ(GasCarburization) ส่วนมากจะนำชิ้นงานมาทำการอบชุบก่อนเพื่อให้แกนในมีคุณสมบัติดีขึ้นและยังช่วยให้การซึมของไนโตรเจนได้ง่ายขึ้น จากนั้นจึงจะนำไปอาบด้วยก๊าซไนโตรเจนในเตาไฟฟ้าโดยการแขวนชิ้นงานในเตาแล้วใช้แอมโมเนียความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อย (สภาพก๊าซ) ให้เข้าไปในเตาที่มีอุณหภูมิ 480...520c ความเร็วในการให้ความร้อนจะประมาณ 50c ต่อชั่วโมง โดยที่ 400c ก๊าซแอมโมเนียจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและไนโตรด์ ดังสมการ $2NH_3 \rightarrow 3H_2+2N$ และเกิดปฏิกริยากับธาตุที่เจือกลายเป็นอะลูมิเนียมไนโตรด์(AlN) โครเมียมไนโตรด์(CrN และ CrN_2) และวานาเดียมไนโตรด์(VN) ที่มีขนาดเล็ก(มองด้วยกล้องจุลทรรศน์ไม่เห็น) ใช้เวลา 20 ชั่วโมงสำหรับความลึกชั้นผิวไนโตรด์ 0.3 mm หลังจากได้ระยะลึกของผิวแข็งไนโตรด์ที่ต้องการแล้วจะมีการปิดสวิทช์ไฟขดลวดไหลเข้าไปในเตาแล้วปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ เพื่อไม่ให้ชิ้นงานบิดตัวได้ ชิ้นงานยาวและบางจะใช้แขวนไว้ในเตาที่แขวนได้ ตัวอย่าง เช่น เกลียวหนอนสำหรับเครื่องอัดพลาสติก ตัวอัดรีด(Extruder) เรือนของเฟืองดิฟเฟอเรนเชียล(Differential Gears), แกนเพลาของเครื่องมือกล,เครื่องมือวัด



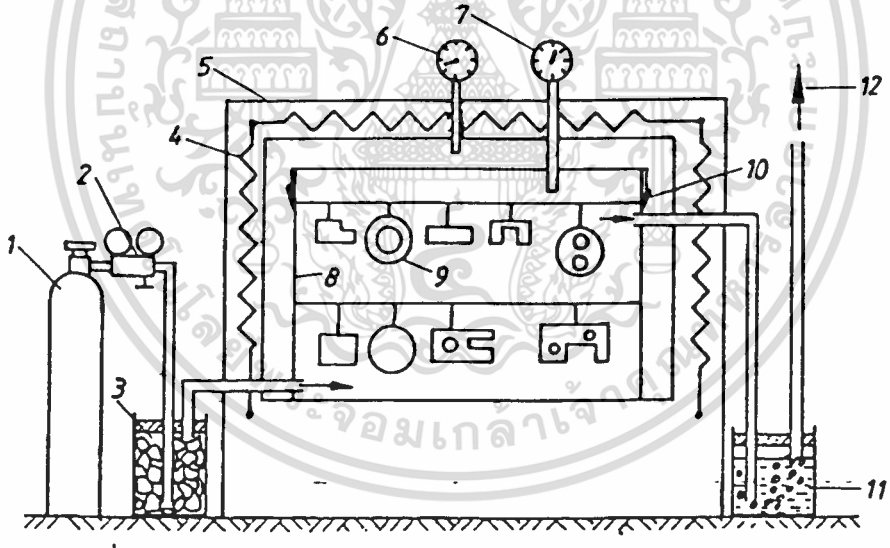
รูปที่ 16. แผนภาพแสดงค่าความแข็ง-ผิวแข็งลึกในการอาบไนโตรเจนและการอาบคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการอาบไนโตรเจน 90 ถึง 100 ชั่วโมงสามารถจะทำให้ได้ผิวไนไตรด์ลึกถึง 0.9-1.0 mm ผิวแข็งที่ได้จากการอาบคาร์บอนจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เตนไซต์ โดยความแข็งจะหายไปที่อุณหภูมิ 150c ในขณะใช้งาน

ส่วนผิวแข็งที่ได้จากการอาบไนโตรเจนจะสามารถรักษาความแข็งได้ถึง 500c ในขณะใช้งานได้

รูปที่ 17. การอาบไนโตรเจนด้วยก๊าซให้กับเหล็กกล้าอบชุบ 41 Cr 4 ที่อุณหภูมิ 570c เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 18. แสดงชุดอุปกรณ์การอาบไนโตรเจนด้วยก๊าซ

1.ขวดก๊าซแอมโมเนีย
2.ลิ้นควบคุมความดัน ด้านซ้ายเป็นมาโนมิเตอร์สำหรับวัดความดันของขวด ด้านขวาควบคุมความดันในการทำงาน
6.เทอร์โมมิเตอร์สำหรับเตา
7.เทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิในกล่องใส่ชิ้นงาน
8.กล่องใส่ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ถังไล่ความชื้นออกจากก๊าซโดยหินปูนเป็นตัวดูดก๊าซที่ผ่านเข้ามา บางทีดูดน้ำออกจากก๊าซ

4.รดลวดให้ความร้อน

5.ลำตัวเตาให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า

9.ชิ้นงานแขวน

10.ปาสเตอร์กันรั่ว

11.ก๊าซไหลออกใช้ตรวจสอบโดยดูจากฟองก๊าซที่ผุดขึ้นบนผิวน้ำ

12.ก๊าซออกไปทางปล่องอิฐ

ตารางที่ 1. เหล็กกล้าอาบไนโตรเจนด้วยก๊าซ

สัญลักษณ์ย่อ	ความต้านแรงดึง (อบชุบ kp/mm² แล้ว)	ผิวแข็งอาบไนโตรเจน HV [kp/mm²]	การใช้งาน
27 CrAl 6	60 - 80	900	กระบอกสูบเครื่องยนต์, เฟืองหนอน, เพลาข้อเหวี่ยง, สลักสูบ, เฟืองที่รับภาระสูง, เพลาลูกเบี้ยว
34 CrAl 6	80 - 100	900	
32 AlCr Mo6	80 - 95	900	
31 CrMo V 9	90 - 115	750	
33 CrAl Ni 7	80 - 100	900	

เหล็กกล้าอาบไนโตรเจนจะมีราคาแพงกว่าเหล็กกล้าชุบผิวแข็ง

3.การอาบไนโตรเจนในอ่าง(Bath Nitriding) จะสามารถกระทำได้เร็วกว่าการอาบด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยจะกระทำกับเหล็กกล้าอาบไนโตรเจนที่เป็นเหล็กกล้าไม่เจือมีคาร์บอนถึง 0.5% โดยใช้อ่างไซยาไนด์ที่ประกอบด้วยโปแตสเซียมไซยาเนต(KCNO) 32-38%และโปรแตสเซียมไซยาไนด์(KCN) 55-60% มีจุดหลอมเหลวประมาณ 350c ชิ้นงานจะถูกแขวนไว้ในเตาที่เหมือนกับอ่างเกลืออาบคาร์บอน (Salt Bath Carburization)ที่ประมาณ 560...580c เป็นเวลาประมาณ 1-3 ชั่วโมง เตาจะให้ไนโตรเจนแก่ผิวชิ้นงาน สำหรับเหล็กกล้าอาบไนโตรเจนจะเกิดปฏิกริยากับธาตุเจือเป็นไนไตรด์ ส่วนคาร์บอนจะทำปฏิกริยากับเหล็กกลายเป็น Fe_3C ในขอบเขตจำกัดผิวของเหล็กชนิดนี้หลังจากอาบไนโตรเจนจะได้ความแข็งถึง 1200 HV ตัวอย่างเช่น ฟันเฟือง เพลาข้อเหวี่ยงและเหล็กกล้ารอบสูงด้วย

สำหรับเหล็กกล้าไม่เจือที่อาบไนโตรเจนจะเกิดการรวมตัวระหว่างไนโตรเจนและธาตุเจือในที่นี้จะเกิดเหล็กไนไตรด์ต่างๆ(Fe_2N และ Fe_4N)หรือ Fe_3N โดยที่กล่าวมานี้จะทำให้เกิดค่าความแข็งไม่เท่ากับการอาบด้วยก๊าซไนโตรเจน แต่ก็มีค่าประมาณ 550 HV มีชั้นผิวแข็งลึก 0.4 mm เป็นผิวแข็งที่ทนต่อการสึกหรอได้ดีมากถ้าต้องการให้มีความเค้นล้าตัว (FatiqueStrength) มากขึ้นจะต้องนำชิ้นงานที่อาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนแล้วไปชุบแข็งในน้ำ

ในกรณีที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือเจือสูงจะนำชิ้นงานที่ผ่านการเจียระไนแล้ว ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวแล้วมาให้ความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิอบคืนตัวประมาณ 30...50c ทำให้เม็ดเกร็นแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่จะให้ผลดีดังต่อไปนี้

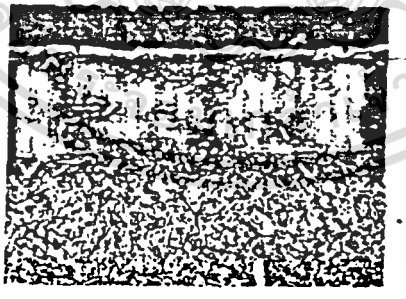
-จะได้ผิวแข็งจากประมาณ 64 HRC=868 HV เพิ่มขึ้นเป็น 1400 HV 0.05

-ทำให้ความฝืดของอุปกรณ์เครื่องขึ้นรูปโดยไม่ปาดผิวและเครื่องมือทำงานขณะร้อนน้อยลงและมีอายุการใช้งานนานขึ้น

-อายุการใช้งานของเครื่องมือที่อาบไนโตรเจนจะนานกว่าเครื่องมือที่ไม่ได้อาบไนโตรเจนถึง3...4 เท่าด้วยวิธีการเทนิเฟอร์(Tenifer)ของDEGUSSA จะกระทำโดยการใช้ลมที่มีออกซิเจนเป่าอัดเข้าไปในเกลือเหลวเป็นการเร่งให้ไนโตรเจนซึมเข้าผิวเหล็กได้เร็วขึ้นและทำให้ใช้เวลาน้อยลง กรรมวิธีนี้จะไม่บุผนังเตาเป็นเหล็กแต่จะบุผนังเตาด้วยไตตาเนียมเพราะผลที่ได้เป็นผิวไนไตรด์ที่สะอาดกว่า

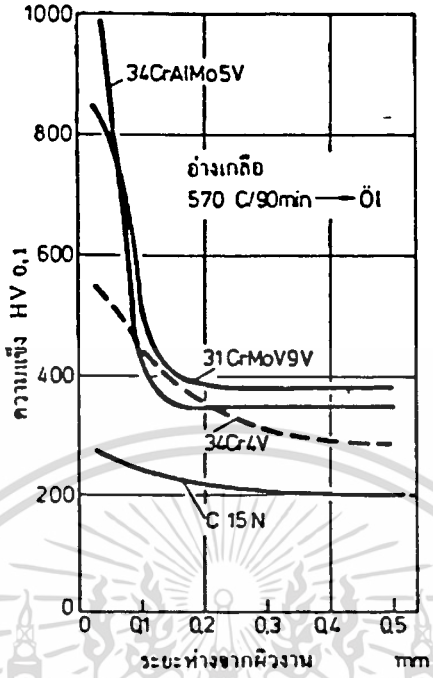
การอาบในอ่างวิธีนี้ เหมาะกับเหล็กกล้าไม่เจือ เหล็กกล้าเจือหรือเหล็กหล่อชนิดต่างๆ

4.วิธีการอาบไนโตรเจนในอ่างเกลือ ก่อนการอาบชิ้นงานด้วยไนโตรเจนจะต้องทำความสะอาดให้ปราศจาก น้ำมัน จารบี สนิม ชิ้นงานที่ต้องการปกปิด เช่น เกลียวจะไม่สามารถกระทำได้ แล้วนำไปอุ่นให้ร้อนถึงประมาณ 500c ในเตาหมุนเวียน ชิ้นงานที่แขวนด้วยลวด จะถูกจุ่มในอ่างเกลือตามเวลาที่ต้องการ กรณีที่ชิ้นงานเกิดการดึงได้ง่ายจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศที่สำคัญก็คือ จะต้องฉีดชิ้นงานด้วยน้ำร้อนเพื่อให้เศษเกลือที่ค้างอยู่(ในบางครั้ง)ให้หลุดออกไป

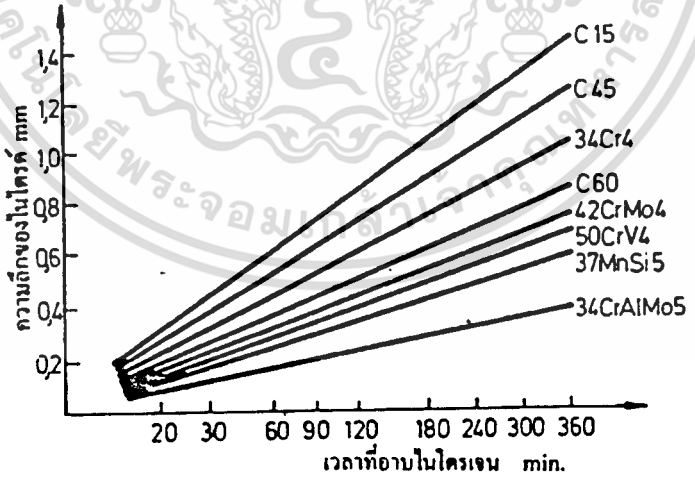


รูปที่ 19. โครงสร้างจุลภาค(ภาคขยาย 500:1)ของผิวไนไตรด์ที่ผ่านอ่างอาบไนโตรเจนตามวิธีเทนิเฟอร์กับเหล็กกล้า X40 Cr13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

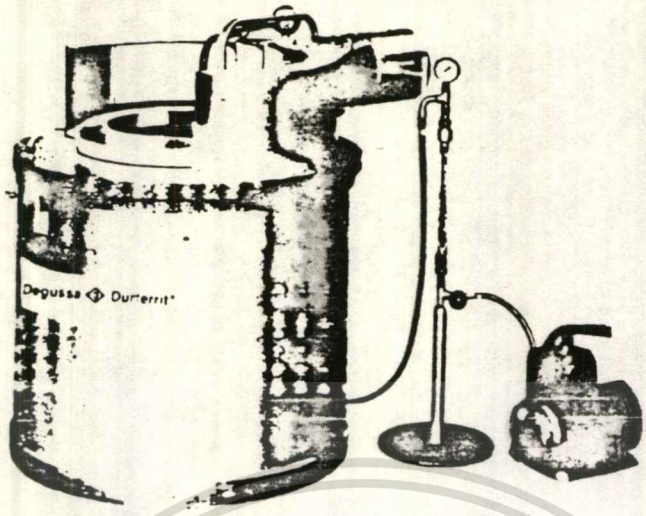


รูปที่20.ระยะลึกของความแข็งของเหล็กกล้าอบชุบด้วยการอาบไนโตรเจนในอ่างเกลือที่อุณหภูมิ570cเป็นเวลา90นาทีหลังจากนั้น จุ่มลงในน้ำมันให้เย็นตัวลง (ค่านี้ได้จากการทดสอบ)



รูปที่ 21. ค่าความลึกของไนไตรด์ที่ได้จากการทดสอบกับเหล็กกล้าชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22. เตาไฟฟ้าใช้อาบไนโตรเจนสำหรับกรรมวิธีเทนิเฟอร์(Tenifer) การเป่าลมเข้าไปในอ่างเกลือจะกระทำโดยเครื่องอัดลมแบบเมมเบรน (รูปขวามือ)ผนังเตาบุด้วยไตตาเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง1m ลึก 2 mการดูดไอจากอ่างเกลือจะผ่าน 2 ท่อและมีชุดควบคุมที่ใช้ปรับให้ได้ความสูงตามต้องการพร้อมทั้งอุณหภูมิในเตาจะวัดด้วยเทอร์โมอิลิเมนต์ มีตู้ควบคุมต่างหาก

ข้อควรระวัง : เกลือที่ใช้ในการอาบไนโตรเจน จะมีพิษ เหมือนเกลือที่ใช้ในการอาบคาร์บอน ด้วยก๊าซ(Gas Carburizing)และในกรณีเกิดหลงไปปนกับเกลือซาลปีเตอร์ (Salpeter Salt) จะทำให้เกิดการระเบิดขึ้น

ชิ้นงานที่นิยมนำมาอาบไนโตรเจนในอ่างเกลือ(Salt Bath Nitriding)ได้แก่ ชิ้นส่วนรถยนต์,เครื่องยนต์ที่ได้รับภาระสลับ หรือภาระเปลี่ยนไปมา(Varying Load)ต่อการดัดที่มีแรงอัดตามพื้นที่ไม่มากนักได้แก่ เพลาลูกเบี้ยว,ฟันเฟืองสำหรับกระปุกเกียร์,ปั๊มน้ำมัน,คันโยก,สลักสูบ,ชิ้นส่วนควบคุมไฮโดรลิกชิ้นส่วนที่กล่าวมานี้จะราคาถูกกว่าการอาบคาร์บอนเพราะไม่มีการดึงในชิ้นงาน จึงไม่ต้องเจียระไนอีกครั้งและยังใช้เหล็กกล้าไม่เจือแทนเหล็กกล้าเจือได้อีกด้วย

ข้อดีของการอาบไนโตรเจน(Nitriding)

1.ชิ้นงานไม่ต้องนำไปชุบแข็งอีก

2.ผิวชิ้นงานไม่เกิดผิวสะเก็ด

3.มีผิวลื่น ทำให้ลื่นหรือหมุนได้คล่องตัวดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย

หลังการอาบไนโตรเจน(Ntriding)ชิ้นงานจะมีขนาดปริมาตรเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่ต้องสวมตามขนาดเที่ยงตรง จะต้องนำมาเจียระไนอีก แต่จะเจียระไนผิวออกมากเกินกว่า0.02 ถึง 0.04 mm ไม่ได้เพราะเป็นชั้นผิวที่มีความแข็งที่สุด

พลาสมาไนไตรดิง(Plasmanitriding)

จะกระทำด้วยการแขวนชิ้นงานในเตาสูญญากาศโดยให้ชิ้นงานเป็นขั้วแคโทด(Cathode)แล้วใช้กระแสไฟฟ้าตรง 300 โวลต์ เป็นตัวเร่งยิงอิออนไนโตรเจน ให้กระทบอาบชิ้นงานเหล็กด้วยความเร็วสูง (ตามหลักการของ KLOCKNER ในเยอรมันนี) การเกิดไอออนจะมีอยู่ที่ความดัน 10^{-1}...10 Torr ที่อุณหภูมิระหว่าง 450...600c โดยไม่ต้องใช้ความร้อนจากภายนอกมาช่วย กรรมวิธีนี้เป็นที่รู้จักอีกชื่อหนึ่งว่า ไอออนไนไตรดิง(Ionnitriding)

วิธีนี้ใช้ได้กับเหล็กต่างๆหลายชนิด ผิวลึกไนไตรด์จะซึมลึกสูงสุดไม่เกิน 1 mm ค่าความแข็งของผิวชิ้นงานจะอยู่ระหว่าง 800 HV และ 1200 HV ผิวที่ไม่ต้องการให้แข็งสามารถปกปิดได้

คาร์บอนไนไตรดิง(Carbonitiding)

ใช้สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำเป็นวิธีการรวมคาร์บอนและไนโตรเจนให้อยู่ในรูปเกลือเหลว โดยมีส่วนคล้ายกับส่วนประสมของการอาบคาร์บอนในอ่างเกลือ(Salt Bath Carburi zation) หรือ อาบคาร์บอนด้วยก๊าซ โดยการเพิ่มแอมโมเนีย(NH_3)ที่อุณหภูมิต่ำเข้าไป 30% จะทำให้ไนโตรเจนซึมเข้าไปได้มาก แต่คาร์บอนจะซึมเข้าไปยังบริเวณขอบผิวได้น้อยกว่า การอาบคาร์บอนกรรมวิธีนี้จะสิ้นใช้เวลาไม่เกิน 90 นาทีจากนั้นทำการชุบแข็งในน้ำมันแล้วอบคืนตัวที่ 180c

ไนโตรเจนจะทำให้ความเร็วเย็นตัววิกฤติ(Critical Cooling Speed)ลดต่ำลง

ไนโตรเจนจะทำให้อุณหภูมิการเกิดออสเตไนต์ต่ำลง(จุดA_3)

ไนโตรเจนทำให้มาร์เตนไซต์คงทนต่อการขัดผิว

ไนโตรเจนทำให้คาร์บอนละลายง่ายยิ่งขึ้น

ข้อดี เกิดการดึงในชิ้นงานน้อยกว่าการอาบคาร์บอนแต่จะมากกว่าการอาบไนโตรเจนเล็กน้อยโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี คือ มีการบิดตัวของชิ้นงานน้อย อุปกรณ์มีราคาถูกและทำได้ง่ายเหมาะกับชิ้นงานโตซึ่งวิธีอื่นไม่สามารถกระทำได้ ให้ผิวแข็งหนาอย่างน้อย 1.6 mm

ข้อเสีย คือ มีก๊าซเสียจากการทำงาน,ผิวงานเกิดสะเก็ด

การชุบผิวแข็งด้วยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า(Induction Hardening)

เหมาะสำหรับเหล็กกล้า C>0.3% ขึ้นไป แต่ไม่เกิน 0.7% เช่นกัน

วิธีการจะกระทำด้วยกระแสไฟฟ้าสลับเข้าท่อทองแดง ชักนำให้เกิดกระแสไหลวน(Eddy Current) ด้วยคลื่นความถี่ดังนี้

คลื่นความถี่ปานกลาง(HF) 0.5...10 kHz จะได้ผิวแข็งลึก 1.5...6 mm

คลื่นความถี่สูง 0.1...30 kHz จะได้ผิวแข็งลึก 0.01...3 mm

ความร้อนจะทำให้ผิวชิ้นงานร้อนแดงเกินกว่าจุด Ac_3 อย่างรวดเร็ว(แต่จะไม่เกิดเม็ดเกร็นหยาบ) และมีฝักบัวฉีดน้ำหรือน้ำมันตาม(แล้วแต่ชนิดเหล็ก)จะทำให้ผิวเหล็กแข็งแต่แกนในยังเหนียวอยู่จะเห็นว่าค่าความแข็งนั้นขึ้นอยู่กับคลื่นความถี่ ค่าความหนาของชั้นผิวความแข็งที่เกิดจากความร้อนที่ได้จากการเหนี่ยวนำจะประมาณ 85% ซึ่งจะคำนวณได้จากสูตร

$$\delta = (\varsigma / f \cdot \mu)^{1/2}$$

เมื่อ ς = ความต้านทานจำเพาะไฟฟ้า

f = คลื่นความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ

μ = แมกเนติก เพอร์มีอะบิลิตี ($\mu_o . \mu_r$) (Magnetic Permeability)

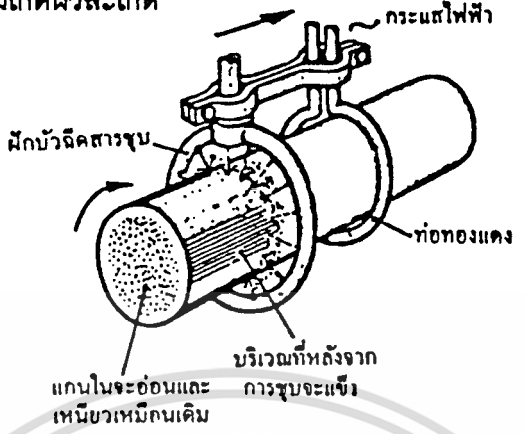
หลังจากการชุบแข็ง ชิ้นงานจะต้องนำไปทำการอบคืนตัวอีกทีที่อุณหภูมิ = 150...200c

ข้อดี คือ ใช้เวลาให้ความร้อนแก่ผิวงานสั้นจึงเกิดการดึงบิดน้อยมากและผิวไม่ร้าว

- การเกิดเม็ดเกร็นหยาบน้อยมาก
- วิธีนี้สามารถทำงานแบบอัตโนมัติและติดตั้งเป็นระบบการผลิตได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การปรับเวลาในระหว่างชุบแข็งกระทำได้ง่ายและแม่นยำ
- ไม่มีก๊าซเสีย ผิวงานไม่เกิดผิวสะเก็ด



รูปที่ 24. การชุบแข็งเหนี่ยวนำ

ข้อเสีย คือ

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ปรับค่าต่างๆราคาแพงจึงต้องใช้ทำการชุบผิวแข็งชิ้นส่วนที่อยู่ในระบบการผลิตจำนวนมาก เหล็กที่เหมาะแก่การชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟหรือเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าได้แก่

เหล็กกล้าไม่เจือ : Cf35;Cf45;Cf53;Cf70 สามารถชุบให้ผิวแข็งได้ระหว่าง 51...60HRC

เหล็กกล้าเจือต่ำ : 45Cr2;38Cr4;41CrMo4 สามารถชุบให้ผิวแข็งได้ระหว่าง 51...60HRC

เหล็กกล้าหล่อที่ชุบแข็งด้วยเปลวไฟได้แก่ GS-Ck45;GS-36Mn5;GS-42CrMo4

เหล็กหล่อ : GG-40,GGG-60,GGG-70

เหล็กหล่ออบเหนียว : GTS-45,GTS-55,GTW-55,GTW-65

วิธีการอื่นที่ใช้ทำให้ผิวเหล็กแข็งก็คือ

กรรมวิธีโบรอน(Boron Treatment) คล้ายกับกรรมวิธีไนไตรดิง ด้วยการทำให้เกิดชั้นผิวในโลหะไม่ใช่เหล็กด้วยโบไรด์(Boride)และโบรอนคาร์ไบด์(BC) จะได้ค่าความแข็งจุลภาคระหว่าง 1800...2000 HV ทำให้มีความต้านทานการการสึกหรอสูง,ทนการกัดกร่อนและคงความแข็งขณะร้อน เนื่องจากมีความแข็งมากการจะปาดผิวอีกจึงกระทำไม่ได้ เหล็กกล้าไม่เจือจะมีความเหนียวดีที่สุดเมื่อมีชั้นผิวความแข็งบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.การเคลือบด้วยไตตาเนียมคาร์ไบด์ กระทำที่อุณหภูมิราว 1000c ชั้นผิวที่เคลือบจะหนาระหว่าง 5...8 m บนผิวเหล็กกล้าเลเดอบูไรด์-โครเมียมและวัสดุซินเตอร์แข็ง จะได้ค่าความแข็งจุลภาค (Microhardness)ถึง 5000 HV 0.05 เมื่อใช้ทำเป็นเครื่องมือทำงานในสภาพเย็นจะมีอายุนานกว่าที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีถึง 3 เท่า

2.การเคลือบไตตาเนียมไนไตรด์ จะกระทำที่อุณหภูมิประมาณ 1000c ชั้นผิวที่เคลือบจะหนา 5...8 m ซึ่งจะให้ค่าความแข็งน้อยกว่าแต่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่าเนื่องจากมีความเสียดทานน้อยจึงใช้ทำเป็นผิวคายเศษงานของแผ่นคมตัด(มีดเล็ก)ที่มีการสึกหรอน้อยมากซึ่งทำให้อายุคมมีดสูงขึ้น

3.การอาบด้วยโครเมียมแข็ง(Hard Chrome Plating) จะกระทำด้วยการกัลวาไนซิ่งที่ให้ชั้นผิวที่แข็ง,เปราะและหนาถึง 2 mm ในการแยกตัวจะทำให้โครงสร้างอะตอมรับไฮโดรเจนเอาไว้เป็นสาเหตุให้เกิดความแข็งถึงราว 700 HV เมื่อเกิดความร้อนมากจะทำให้บางส่วนเกิดการแพร่(Diffusion)ออกไปทำให้ความแข็งลดลง การใช้งานจะใช้ในการซ่อมชิ้นส่วนของเพลาที่สึกหรอ,การซ่อมผิวแข็งของชิ้นงานที่มีราคาแพง ป้องกันการสึกหรอของเกจสวม(Plug Gage),แม่พิมพ์อัด(Press Mould), แม่พิมพ์ฉีด(Injection Mould) , แหวนลูกสูบ , ตัวอัด , ดายดึง , เพลาปั๊ช , กระบอกสูบรถยนต์และโลหะต่างๆ

4.การเชื่อมพอกผิว ด้วยไฟฟ้าหรือก๊าซด้วยส่วนประสมต่างๆที่มีความแข็งแล้วแต่ประเภทของภาระกระแทก จะให้ความแข็ง,เหนียว และความแข็งในขณะร้อน

ตัวอย่างวัสดุที่ใช้เชื่อมพอกผิว :

3.75C ; 10Mo ; 86Fe ความแข็ง 62 HRC

2.5 ; 45Co ; 30Cr ; 14W ; Fe ความแข็ง 55 HRC

การเชื่อมพอกผิวจะใช้กับงานซ่อมผิวล้อเลื่อนของรถที่วิ่งบนรางเหล็ก,เครื่องย่อยหิน,เครื่องย่อยสินแร่,แม่พิมพ์

5.การทำผิวแข็งด้วย Thermomechanical ออสฟอร์มิง(Ausforming)เหล็กกล้าเจือโครงสร้างออสเตไนต์ที่ผ่านการซุปเปอร์คูลด์(Supercooled) จะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเมื่อโครงสร้างถูกทำให้เย็นตัวโดยเร็วที่อุณหภูมิระหว่างช่วงมาร์เตนไซน์และช่วงตกผนึกใหม่(Recrystallization)แล้วนำมาทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิช่วงนี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเม็ดเกร็นละเอียด ที่มีความเค้นครากสูงขึ้นและเหนียวขึ้นกว่าความแข็งปกติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

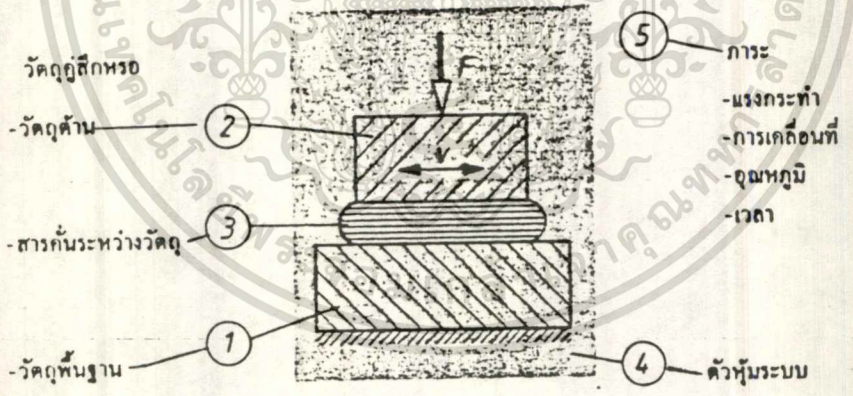
บทที่ 2.
ไตรโบโลยี(Tribology)
น้ำหล่อลื่น,วัสดุเชื้อเพลิง,วัสดุกำลังงาน,และ
วัสดุหล่อลื่น

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีการเลื่อนไปมาเสียดสีกัน จะมีการศึกษาถึงวิธีการที่จะลดการสึกหรอให้น้อยลงด้วยการใช้สารหล่อลื่น โดยพิจารณาถึงภาระหรือแรงกระทำและความเร็วรวมทั้งอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่มากระทบ

ปัญหาจากคำจำกัดความ:ความเสียดทาน,การสึกหรอ และการหล่อลื่นนี้เป็นสาขาวิชาไตรโบโลยี ซึ่งเป็นสาขาวิชาหนึ่งในวิทยาศาสตร์

ไตรโบโลยีเป็นวิธีการหาข้อมูล,ค่าต่างๆที่จะนำมาช่วยในการลดการสึกหรอเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานด้วยการลดแรงเสียดทานให้น้อยลง

ความสัมพันธ์ของระบบความเสียดทาน,การหล่อลื่นและองค์ประกอบสภาวะมีชื่อย่อเรียกว่า"ระบบไตรโบโลยี"(Tribo-System)



รูปที่ 1. ระบบความเสียดทานและองค์ประกอบสภาวะ

วัตถุพื้นฐาน (1).....รองเพลา,ร่องนำ,สายพานลำเลียง,มีดกลึง
(เป็นวัตถุที่มีความสำคัญต่อการสึกหรอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุด้าน (2).....แกนเพลา,ตัวเลื่อนในร่อง,หิน

สารคั่นระหว่างวัตถุ (3).....ลดการสึกหรอ : วัสดุหล่อลื่น

เพิ่มการสึกหรอ : การสึกกร่อน

องค์ประกอบทั้งสามนี้มีสาร
หุ้มอยู่ล้อมรอบ ที่สามารถทำ
ปฏิกริยากับองค์ประกอบนี้ได้โดย.....ตามปกติอากาศจะมีธาตุและสารประกอบ
จะเรียกว่าเป็น O_2,CO_2,SO_2หรือH_2O(ความชื้น)
ตัวหุ้มระบบ (4) รวมทั้งฝุ่นละอองรวมอยู่ด้วย
แต่ทว่าระบบและองค์ประกอบที่กล่าว
มานี้ จะต้องรับภาระในลักษณะแตก
ต่างกันที่เรียกว่า

ภาระหรือแรงกระทำ (5).....มีขนาด,ทิศทางและมีช่วงเวลากระทำแตกต่างกัน
เกิดจากแรงปกติ F_N
ความเร็วเฉลี่ย v.....การเคลื่อนที่สามารถที่จะเลื่อน กลิ้ง กระแทกหรือ
ลักษณะการไหล(เฉพาะสารของไหล สารประเภทก๊าซ)
อุณหภูมิ.....จะให้ผลต่อความเหนียวหนืดของสารหล่อลื่นและเอื้อ
อำนวยให้เกิดปฏิกริยาระหว่างคู่วัตถุสึกหรอและตัว
กลางที่หุ้มระบบ

จุดประสงค์ของไตรโบโลยี(Tribology)ก็คือการนำระบบไตรโบโลยีที่มีอยู่และระบบไตรโบโลยีใหม่มา ประยุกต์ในความหมายดังต่อไปนี้

-ลดความเสียดทาน

-การลดการสึกหรอ

-การลดความสิ้นเปลืองของสารหล่อลื่น

-นำชิ้นส่วนที่สึกหรอมาออกแบบสร้างใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

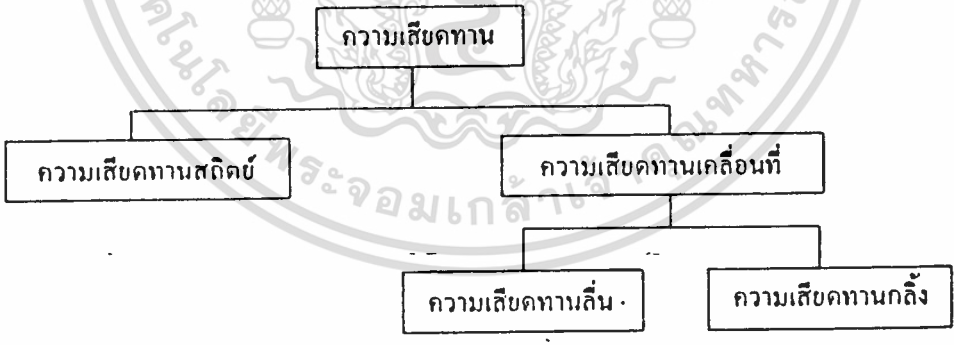
ต่อไปนี้จะเป็นตารางแสดงกระบวนการสึกหรอทางเทคนิคหลาย ๆด้านให้ทราบพอสังเขป

ตารางที่ 1. ตัวอย่างระบบไตรโบโลยีทางเทคนิค

ฟังก์ชั่น	ตัวอย่าง	องค์ประกอบระบบไตรโบโลยี			
		วัตถุพื้นฐาน 1	วัตถุต้าน 2	สารคั่นระหว่างวัตถุ 3	ตัวหุ้มระบบ 4
การเคลื่อนที่	ระบบรองเพลา	รองเพลา	แกนเพลา	สารหล่อลื่น	ลม
การถ่ายเทกำลังงาน	ระบบเกียร์	เฟืองขับ	เฟืองตาม	น้ำมันเกียร์	อากาศ
การขึ้นรูปโลหะ	แม่พิมพ์ทุบกระแทก	แม่พิมพ์	ชิ้นงาน	ผิวออกไซด์	อากาศ
การควบคุมการไหลของก๊าซ	ลิ้นไอเสียเครื่องยนต์	ส่วนเรียวโค้ง-ของลิ้น	บ่าลิ้น	ผิวออกไซด์	ก๊าซไอเสีย

ความเสียดทานและการสึกหรอ

การเสียดทานที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลเป็นความต้านทานทางกลอย่างหนึ่งแรงเสียดทานสามารถแบ่งประเภทเป็นความเสียดทานเคลื่อนที่และความเสียดทานสถิตย์ดังแผนภูมิรูปที่ 2.



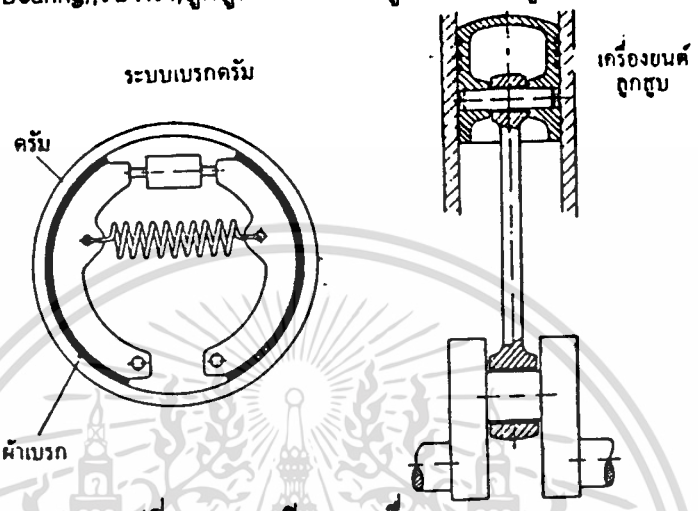
รูปที่ 2. แผนภูมิประเภทของความเสียดทาน

ก.ความเสียดทานเคลื่อนที่(Dynamic Friction) เป็นความเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งบนผิววัตถุอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

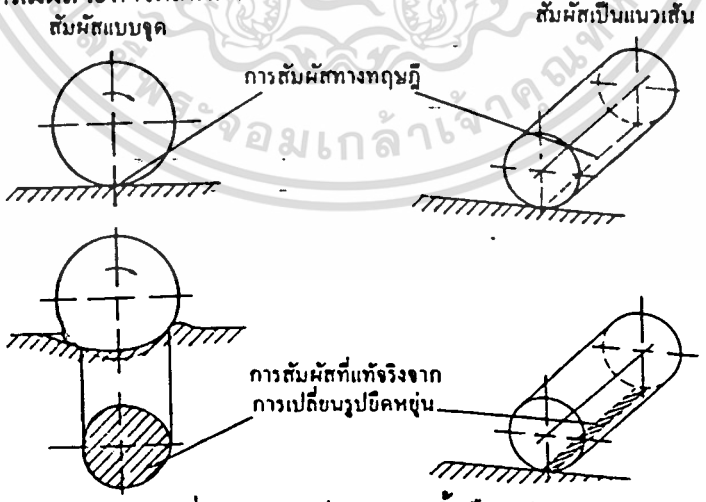
ข.ความเสียดทานสถิตย์(Static Friction) เป็นความเสียดทานที่เกิดจากการเลื่อนวัตถุจากสภาวะนิ่งให้เคลื่อนที่ต้านทานผิวรองรับ

ค.ความเสียดทานลื่น(Sliding Friclion) เป็นความเสียดทานเคลื่อนที่ระหว่างวัตถุที่ลื่น เช่น รองเพลาแบบธรรมดา(Plain Bearing),ร่องนำ,ลูกสูบในกระบอกสูบ,เบรก ดังรูปที่ 3.



รูปที่ 3. ความเสียดทานลื่น

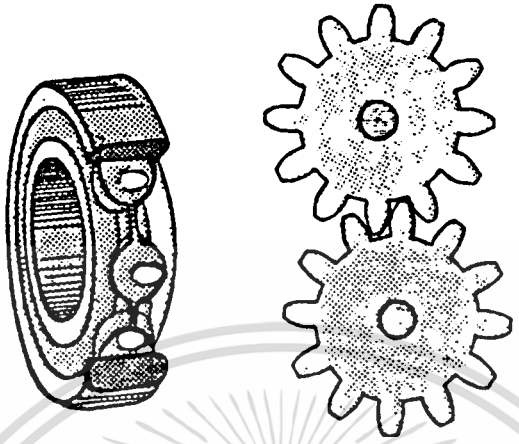
ง.ความเสียดทานกลิ้งยืดหยุ่น(Elastic Rolling Friction) เป็นความเสียดทานเคลื่อนที่ชนิดหนึ่งที่วัตถุกลิ้งเข้าด้วยกัน โดยการสัมผัสกันนั้นเป็นลักษณะรูปร่างจุดหรือเป็นแนว(แบบจุดสัมผัส คือ ลูกทรงกลม แบบเป็นเส้นสัมผัสคือ ลูกกลิ้งทรงกระบอก) ในการรับภาระจนลูกกลิ้งทรงกระบอกเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น ณ จุดสัมผัสจะทำให้เกิดผิวเป็นแนวพื้นที่ ที่มีผลทำให้เกิดความเสียดทานขึ้น (ดูรูปที่ 4.)



รูปที่ 4. ความเสียดทานกลิ้งยืดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.ความเสียดทานกลิ้งลื่น(Rolling friction with Kinematic Sliding) เป็นกรณีพิเศษของความเสียดทานกลิ้งยืดหยุ่น โดยเกิดความเสียดทานลื่นขึ้นด้วยในเวลาเดียวกันเช่น แบริ่งลูกปืน,การขับหมุนของเฟืองต่อเฟือง



รูปที่ 5. ความเสียดทานกลิ้งลื่น

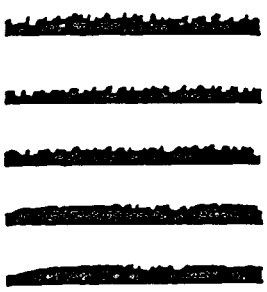
ความเสียดทานการสึกหรอ

ในโซนความเสียดทานที่ไม่มีวัสดุหล่อลื่นจะเกิดการขบกันของร่องผิวความหยาบทั้งสองไม่มากก็น้อย(ขึ้นอยู่กับว่าผิวสัมผัสทั้งสองหยาบหรือละเอียดเพียงใด)

ในการให้ผิวสัมผัสสวนทางกัน จะทำให้เกิดความเสียดทานที่เกิดจาสาเหตุต่อไปนี้

- การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น
- การเปลี่ยนรูปครากตัว
- การเฉือนของปลายผิวความหยาบ
- ทำให้เกิดการละลายติดกันลักษณะจุลภาค

1.การสึกหรอ เป็นการหลุดร่อน(ทำลาย)ของวัสดุที่ไม่พึงปราถนาตรงบริเวณที่เสียดทานกัน

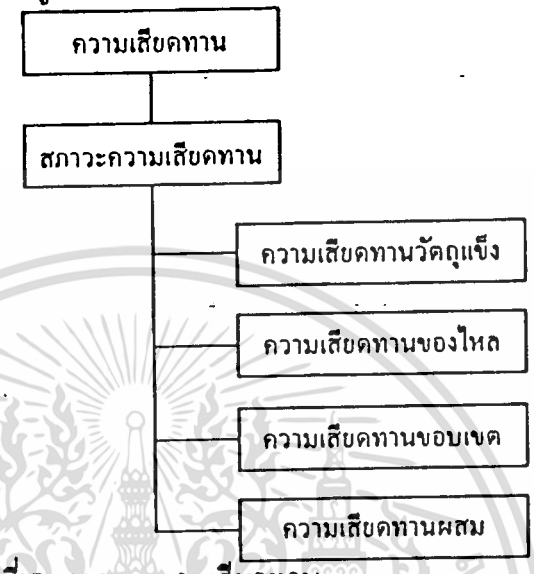


รูปที่ 6. การสึกหรอในขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสึกหรอจากการทำงาน เป็นการหลุดร่อนของผิววัสดุที่ไม่พึงปรารถนาตรงบริเวณที่เสียดสีกัน เช่น ลูกสูบในกระบอกสูบ,ระบบเพลาและรองเพลา(ดังรูปที่ 3)

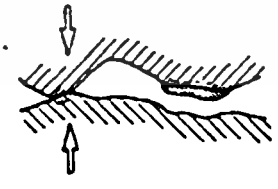
2.สภาวะความเสียดทาน ในปัจุบันนี้มีวัสดุหล่อลื่นที่สามารถสร้างสภาวะความเสียดทานต่าง ๆ ในบริเวณที่มีการเสียดทานได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7. สภาวะความเสียดทาน

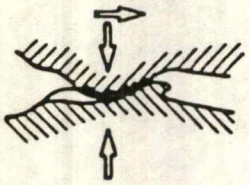
(ก) ความเสียดทานวัตถุแข็ง(Solid Friction) หรือความเสียดทานแห้ง เป็นความเสียดทานระหว่างวัตถุแข็งทั้งสอง โดยที่ไม่มีวัสดุหล่อลื่นระหว่างผิวทั้งสอง เช่น เบรก,คลัตช์ วัตถุทั้งสองจะสัมผัสกัน ซึ่งหากเป็นโลหะชนิดเดียวกันแล้วก็สามารถทำให้ปลายผิวความหยาบละลายติดกันลักษณะจุลภาคได้ ดังรูปที่ 8 (โดยก่อนการละลายติดกันนั้นจะเกิดแรงแอดฮีชันขึ้นก่อน)และเมื่อเคลื่อนที่ต่อไปก็จะเกิดการเฉือนหลุดออกไปดังรูปที่ 8 (ก) ซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาไตรโบทางเคมีประเภทหนึ่ง

รูปที่ 8. ความเสียดทานวัตถุแข็ง

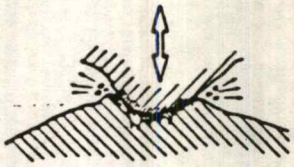


รูปที่ 8. (ก) การเสียดทานจนเกิดแรงแอดฮีชันแล้วละลายติดหักออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8. (ข) การเสียดทานแอบราชั่นเกิดการปาดผิวจุลภาค

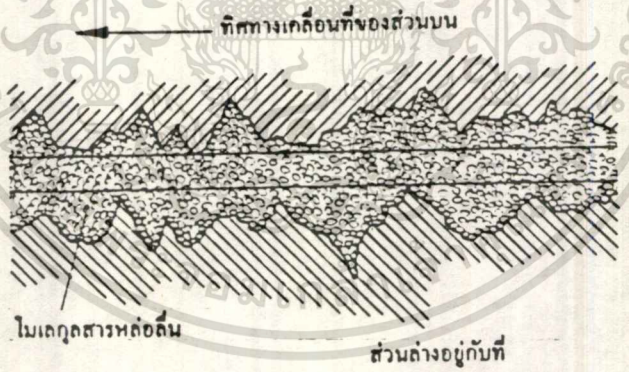


รูปที่ 8. (ค) การเสียดทานล้าตัว (รอยร้าว,เวลาและล้าตัวจนหัก)

(ข) การเสียดทานแบบแอบราชั่น(Abarsion) เป็นการเสียดทานแห้ง จนเกิดการปาดผิวจุลภาค ดังรูปที่ 8 (ข) จัดเป็นปฏิกิริยาไตรโบทางเคมีเช่นกัน

(ค) การเสียดทานแบบล้าตัว(Fatique) เป็นการเสียดทางแห้ง โดยอาศัยการสะสมของพลังงานจากการเสียดทานระหว่างชั้นผิวจุลภาคพร้อมกับอาศัยเวลาและความล้าจนแตกหักบนผิวจุลภาคดังรูปที่(ค)จัดเป็นปฏิกิริยาไตรโบทางเคมีเช่นกัน

(ง) ความเสียดทานของไหล(Fluid Friction) เป็นความเสียดทานที่ผิวสองของวัตถุแข็งมีชั้นฟิล์มสารหล่อลื่นเหลวเคลือบปกปิดไว้อยู่มากซึ่งจะทำให้วัตถุทั้งสองไม่มีโอกาสสัมผัสกัน ดูรูปที่ 9

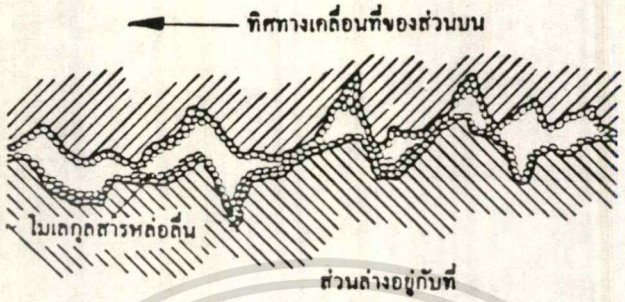


รูปที่ 9. ความเสียดทานของไหล

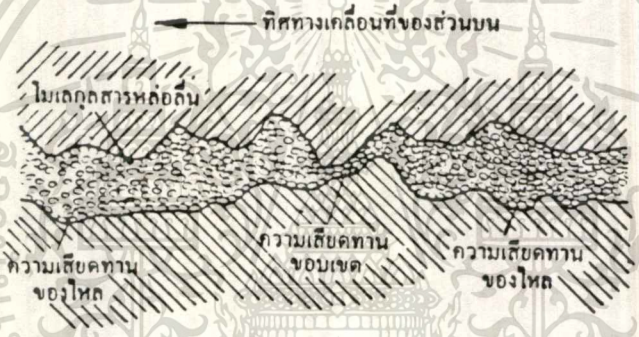
(จ) ความเสียดทานขอบเขต(Boundary Friction) เป็นความเสียดทานของผิวทั้งสองของวัตถุ มีสารหล่อลื่นเหลงเคลือบติดเพียงเบาบาง ในขณะทำงานปลายผิวหยาบจะไม่ละลายติดกันดังรูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

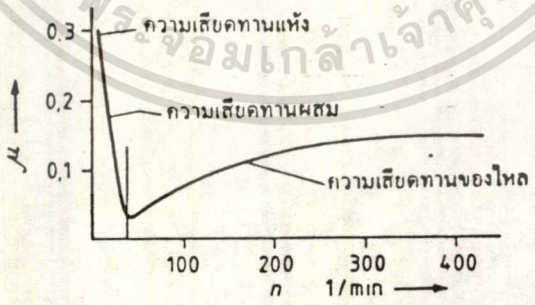
(ฉ) ความเสียดทานผสม(Mixed Friction) เป็นสภาวะความเสียดทานที่มีความเสียดทานขอบเขตและความเสียดทานของไหลเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งผิวบางส่วนขาดฟิล์มหล่อลื่น ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10. ความเสียดทานขอบเขต



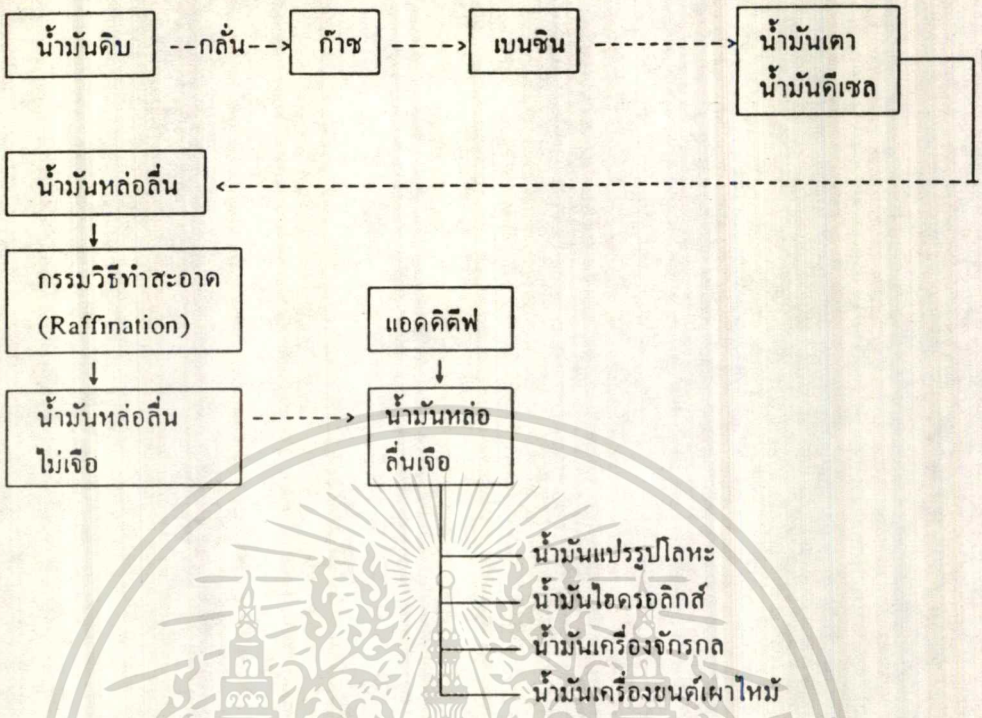
รูปที่ 11. ความเสียดทานผสม



รูปที่ 12. ความสัมพันธ์ของส.ป.ส.ความเสียดทานแบบต่างๆต่อความเร็วรอบ(หมุน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น(Oil Lubricants)



รูปที่ 13 แผนภูมิที่มาของน้ำมันหล่อลื่น

เพื่อให้น้ำมันมีความเหมาะสมในการใช้งานได้ดี จะมีการเจือสารแอดดิดีฟประมาณ 10 ถึง 40% ของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน(น้ำมันหล่อลื่นไม่เจือ)

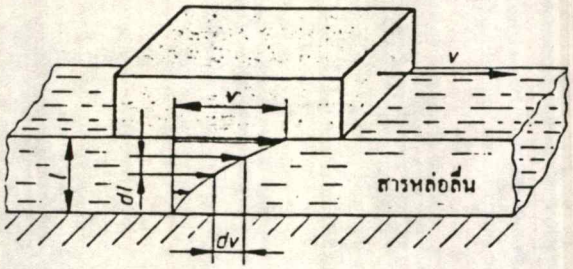
คุณสมบัติของแอดดิดีฟที่สำคัญก็คือ :

- แอดดิดีฟชนิดต้านการเกิดออกซิเดชันที่เพิ่มเข้ามาเพื่อมิให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพ
- แอดดิดีฟชนิดป้องกันการกัดกร่อน
- แอดดิดีฟความดันสูงจะป้องกันการสึกหรอจากความเสียดทานผสมและการกัดโลหะ
- แอดดิดีฟชนิดป้องกันการเกิดฟอง
- แอดดิดีฟชนิดช่วยให้น้ำมันจับเกาะผิวโลหะให้ดีขึ้น เช่น ผิวร่องเลื่อน
- แอดดิดีฟชนิดที่รักษาความหนืดที่อุณหภูมิทำงานไว้ได้

1.ความหนืด(viscosity)

คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นก็คือ ความหนืด ที่เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการรับภาระของน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14. ความเร็วที่กระจายในวัสดุหล่อลื่น

ในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานบนผิวงานอื่นที่มีน้ำมันหล่อลื่นกั้นไว้อยู่จะต้องใช้แรงให้ต้านอนูน้ำมันหล่อลื่น (ภายใน) ดังรูปที่ 14 แรงต้านที่เกิดขึ้นภายในน้ำมันเหลวนี้เป็นแรงเสียดทานอันหนึ่งเรียกว่า " ความเสียดทานภายใน" แรงเสียดทานภายในจะสัมพันธ์กันกับความเร็วที่ชันโค้ง dv / dl และขนาดพื้นที่ผิวที่สัมผัส

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะสัมพันธ์กันกับอุณหภูมิเช่นกัน เป็นขนาดวัดความเสียดทานภายในของของไหลโดยแยกการวัดความหนืดออกดังนี้คือ

(ก) ความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity) n หน่วยวัด cP

1 cP (centi Pascal) = 0.001 Pa.s

(ข) ความหนืดคีเนมาติก (Kinematic Viscosity) หน่วยวัด cSt

1 cSt = 1 mm^2/s และ 1 St = 100 cSt

หมายเหตุ : ความหนืดคีเนมาติกของน้ำ = 1.0038 mm^2/s

ความหนืดพลวัตของน้ำ = 1.002 mPa.s วัดที่อุณหภูมิ 20 C

น้ำมันหล่อลื่นในงานอุตสาหกรรม จะแบ่งเป็น 18 เกรด ตามมาตราฐาน ISO ที่แบ่งเกรด ความหนืด (Viscosity Grade) เขียนเป็นสัญลักษณ์ย่อว่า "ISO-VG" โดยจะมีตัวเลขความหนืดต่อท้าย (ค่าตัวเลขนี้คือค่าความหนืดคีเนมาติก วัดที่ 40C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาระบี(Grease)

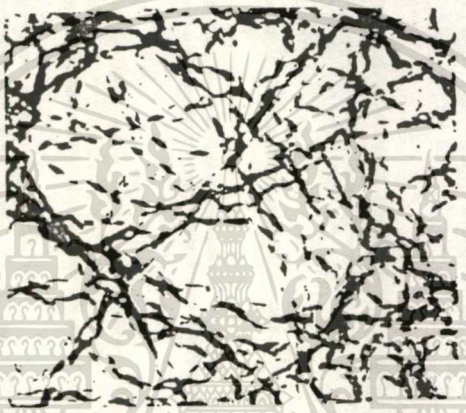
โครงสร้างและชนิดของจาระบีหล่อลื่นมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นดังนี้

ก. จาระบีไม่ไหลไม่หยดจึงมีปัญหาเกี่ยวกับการรั่วน้อย (เช่น สปินเดิลแนวดิ่ง)

ข.จาระบีจะป้องกันสิ่งสกปรกมิให้เข้าไปในตำแหน่งรองเพลาจาระบีหล่อลื่นจะประกอบไปด้วย

- น้ำมันแร่หรือน้ำมันสังเคราะห์

- สารทำให้ข้น(Thickener)ส่วนมากได้จากสบู่ต่างๆประมาณ 70 ถึง 95% ที่กระจายกันอย่างละเอียดที่สุดเป็นรูปโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 15 ประเภทของสบู่ที่แบ่งเป็นจาระบีที่สำคัญๆ3 ชนิดคือ



รูปที่ 15 สบู่ที่รวมตัวกันเป็นโครงสร้าง

จาระบีที่มีสบู่ผสมเป็นพื้นฐานจะอนุญาตให้จาระบีสบู่แคลเซียมคาร์บอเนตและจาระบีสบู่ ลิเทียมผสมเข้าด้วยกันได้แต่ห้ามนำจาระบีสบู่โซเดียมผสมเข้ากับจาระบีอื่นเป็นอันขาด

ด้วยเหตุผลนี้จึงควรใช้จาระบีตามที่ผู้ผลิตเครื่องจักรกลกำหนดให้ใช้เท่านั้น ส่วนสารแอดดิตีฟที่ใช้ผสมในจาระบีได้แก่

จาระบีสบู่อะลูมิเนียมจะใช้สำหรับผสมใส่จาระบีโซเดียมเพื่อให้ทนต่อน้ำได้

จาระบีสบู่ตะกั่วใช้ผสมเพื่อให้เพิ่มความเค้นอัดของฟิล์มจาระบีและเป็นแอดดิตีพเหมือนกับน้ำมันหล่อลื่น

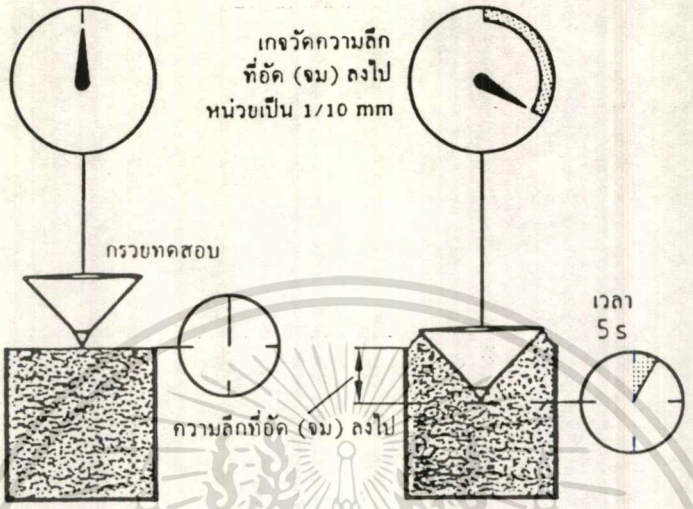
1.ความข้นและเกรดและเกรดความข้นของจาระบี(Penetration,NLGI-Grade)

สัญลักษณะย่อ NLGI ย่อมาจากชื่อ สถานบันจาระบีหล่อลื่นแห่งชาติสหรัฐอเมริการตามชื่อภาษาอังกฤษ : National Lubricating Grease Institute (USA) การกำหนดความข้นที่หมายถึงความเค้น, การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

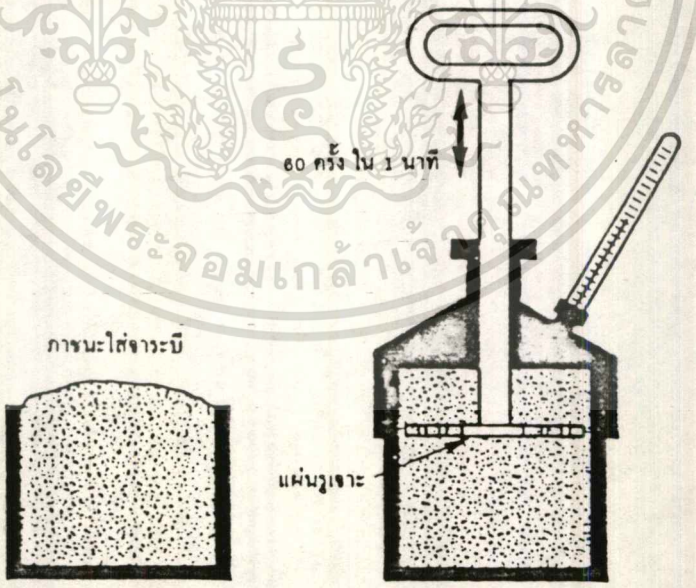
แปรรูปของจาระบีจะถูกกำหนดขึ้น

ความข้น(Penetration) หมายถึง การวัดด้วยการใช้กรวยมาตราฐานปล่อยให้อัดเข้าไปในจาระบี ดังรูปที่ 16 โดยกำหนดให้ค่าความลึกที่อัดเข้าไปมีหน่วยแบ่งเป็น 1/10 mm



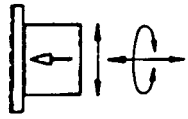
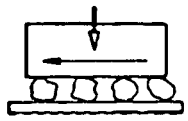
รูปที่ 16. การทดสอบหาความข้นด้วยพินีโตรมิเตอร์(Penetrometer)

เมื่อนำจาระบีไปทดสอบดังรูปที่ 17 จะได้ค่าวอล์กพินีเตรชันที่นำมากำหนดเป็นเกรดความข้น ของจาระบี (NLGI-Grade) ดังตารางที่ 2



รูปที่ 17. การทดสอบหาวอล์กพินีเตรชัน(Walk Penetration Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุคู่สึกหรอ	ประเภทการสึกหรอ	ภาระ	ตัวอย่าง	ผลที่ปรากฏจากความเสียหายของการสึกหรอ
	สึกหรอสั่นสะเทือน		บ่ารับการยึดแบบขันยึดหรือแบบยึดด้วยหลักการหด-ตัวเกิดหลวมคลอน	เกิดสนิมงานสวม,ผิวหยาบ, เกิดรอยกัด, เกิดรอยออกไซด์นูน
มีผลึกขนาดเล็กคั่นอยู่ระหว่างวัตถุแข็ง(การขัดสี)	การสึกหรอผลึกลื่น		ฝุ่นในรองเพลาแบบธรรมดา : โซ่ลำเลียง	รอยขีดข่วน,ผิวหยาบ, เกิดการฝังแน่นของอนุภาคแข็ง
	การสึกหรอผลึก-กลิ้ง		ยานยนต์วิ่งบนราง : ผิวสัมผัส	รอยกลิ้ง,เกิดการฝังแน่นของอนุภาคแข็ง
วัตถุแข็งกับวัสดุ	การสึกหรอลื่น	วัตถุด้าน------> ตัวตักดินของเกิดเป็นร่อง รถตักดิน การเกิดร่อง-----> การอัดรีด จากอนุภาคเล็ก วัสดุเซรามิก		ผิวหยาบราบ,คาวิเตชั่น (Cavitation)

สำหรับชนิดของการสึกหรออื่น ๆ จะใช้คำจำกัดความอื่น ๆ ต่อไปอีก

ก.อีโรชัน(Erosion) ดูในเรื่องการกัดกร่อนหัวข้อ

ข.คาวิเตชัน(Cavitation) ดูในเรื่องการกัดกร่อนหัวข้อ

ค.เทอร์มอลอีโรชัน(Thermal Erosion) คือการสึกหรอที่เกิดจากก๊าซร้อนหรือก๊าซที่ไหลด้วยความเร็วสูงมาก ๆ จนทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน

1.การสึกหรอจากอนุภาค เป็นการสึกหรอจากอนุภาคของแข็งในก๊าซเฉื่อย โดยเกิดเป็นลักษณะที่กระทบกับผิวงานดังนี้คือ

- การสึกหรอจากอนุภาคแข็งกระทำเป็นมุม 0
- การสึกหรอจากอนุภาคแข็งกระทำเป็นมุม 90
- การสึกหรอจากอนุภาคแข็งกระทำเป็นมุมเอียง

การสึกหรอแบบไฮโดรแอบราซีพ(Hydroabrasive Wearing) เกิดจากการที่ของไหลและอนุภาคของแข็งขะล้างผิวงาน ซึ่งมีผลให้เกิดการสึดหรอในลักษณะอื่น ๆ อีกในเวลาเดียวกันและในบางครั้งก็เกิดการกัดกร่อนเข้าสมทบอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. การแบ่งการเกรดความข้นของจารบีตาม DIN ISO 2137 (12.81)

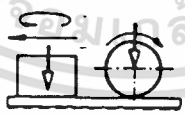
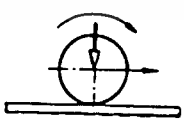
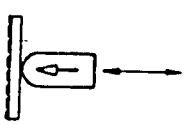
เกรด NLGI	วอล์กพีนีเตรชันเป็น 1/10 mm	
000	445 ถึง 475	จาระบีไหล
00	400 ถึง 430	
0	355 ถึง 385	
1	310 ถึง 340	จาระบีอ่อน
2	265 ถึง 295	
3	220 ถึง 250	
4	175 ถึง 205	จาระบีแข็งกว่า
5	130 ถึง 160	
6	85 ถึง 115	

ความสึกหรอ (Wearing)

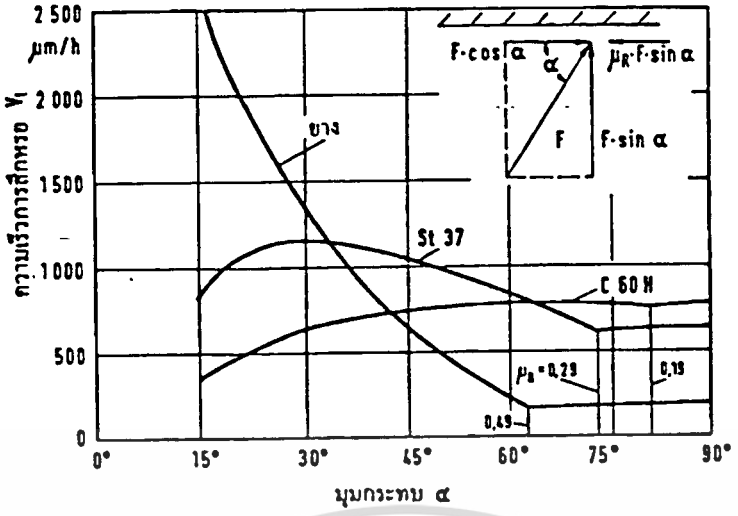
ประเภทของการสึกหรอ

สำหรับขบวนการสึกหรอและปรากฏการณ์ที่มองไม่เห็นได้จากความเสียหายก็คือพลังงานที่นำเข้าสู่ระบบ หมายความว่า ช่วงเวลาของแรงและการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดเป็นเกณฑ์ ตาม DIN 5032 จะมีประเภทสึกหรอดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3. ประเภทของการสึกหรอ

วัตถุคู่สึกหรอ	ประเภทการสึกหรอ	ภาระ	ตัวอย่าง	ผลที่ปรากฏจากความเสียหายของการสึกหรอ
วัตถุแข็งที่มีและไม่มีการหล่อลื่น	สึกหรอแบบลื่น (Sliding)		รองเพลาแบบ - ธรรมดา ร่องรางเลื่อน	เป็นรอยกัด ,ผิวหยาบ,รอย-ผิวมัน เป็นรอยคลื่น, ผิวหยาบ
	สึกหรอกลิ้งหยาบ		แบริ่งลูกปืน , ผิวด้านข้างของฟันเฟือง	เกิดรอยกัดเป็นหลุมเล็กๆ (Pittings)
	สึกหรอกระแทก		ก้านกระทุ้งลิ้นและบ่ารับก้านกระทุ้ง,เครื่องมือปั๊ม	เกิดรอยกัดเป็นหลุมเล็กๆ , การหักกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่18. แผนภาพแสดงผลจากการทดสอบการสึกหรอของวัสดุให้รับภาระด้วยทราย ควอตซ์ขนาดเม็ดโต 0.2 ถึง 1.5 mm ใช้ความร้อนดันเป่า 1 bar

ตัวอย่างเช่น ใบพัดของเทอร์ไบน์แบบอิสระ, อุปกรณ์ในโรงโม่หินและกรวด

2.การวัดความสึกหรอ

จากพฤติกรรมการสึกหรอของระบบไตรโบยีสามารถที่จะทำการวัดค่าออกมาในลักษณะ :

- รูปร่างที่ปรากฏ
- ปริมาณการสึกหรอที่วัดได้

ขนาดการวัดความสึกหรอใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ "W" ย่อมาจาก Wear

ตารางที่ 4. ขนาดของการวัดความสึกหรอ(ตาม DIN 5321)

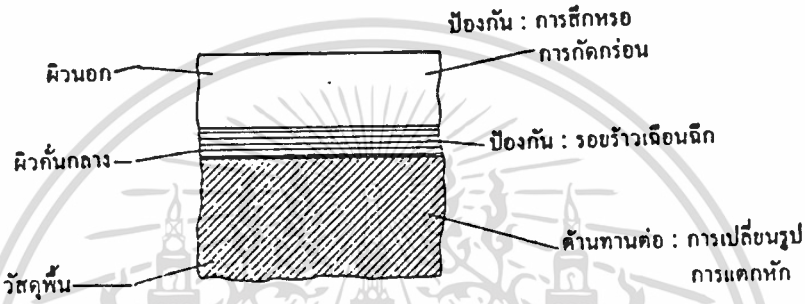
	ขนาดความสึกหรอ W, การสึกหรอมีผลให้เปลี่ยนแปลงดังนี้			
ขนาดวัดความสึกหรอ---------->	ความยาว	พื้นที่	ปริมาตร	มวล
ขนาดสัญลักษณ์อ้างอิง---------->	W_l	W_q	W_v	W_m
หน่วย---------->	m,mm	m^2,mm^2	m^3,mm^3	kg,g
ความเร็วการสึกหรอ เวลา t ในชั่วโมง (h)	$W_{l/t}$	$W_{q/t}$	$W_{v/t}$	$W_{m/t}$
พฤติกรรมการสึกหรอ ระยะทาง s เป็น m , km	$W_{l/s}$	$W_{q/s}$	$W_{v/s}$	$W_{m/s}$
ปริมาณที่ไหลผ่าน (ปริมาณภาระ) จำนวน z ใน m^3 , kg ชิ้น	$W_{l/z}$	$W_{q/z}$	$W_{v/z}$	$W_{m/z}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4. จะพบว่าสามารถวัดความสึกหรอได้ถึง 12 วิธีการ ซึ่งสามารถทำการวัดจากขณะทำงานหรือวัดด้วยการจำลอง(Models)ก็ได้เช่นกัน

3. การป้องกันการสึกหรอ(Wearing Protection)

เนื่องจากมีภาระไตรโบโลยีกระทำต่อผิวงาน จึงควรมีการเคลือบผิวบางที่สมารถทนต่อการสึกหรอได้ดีด้วยชั้นผิววัสดุของโลหะ,โลหะเจือ,วัสดุแข็ง บางทีจะใช้วัสดุหล่อลื่นแข็งเคลือบบนผิวงาน เช่น การควบอัดรีด,การหล่อแบบร่วม (COmposite Casting),การชุบโครเมียมแข็ง,การอะโนไดซิ่งแข็ง,การเชื่อมพอกผิว ส่วนการทำให้ผิวแข็งทนการสึกหรอได้ดีก็ได้แก่



รูปที่ 19. การเคลือบผิวป้องกันการสึกหรอ

กรรมวิธีการทำให้แข็งด้วยวิธีต่าง ๆ , โดยยึดหลักเกณฑ์ดังนี้คือ

> ชั้นผิววัสดุที่ยิ่งมีความแข็งมากก็ต้องมีชั้นผิวที่บางมากขึ้นบริเวณที่ต้องรับภาระแรงอัดตามผิวก็จะต้องมีวัสดุพื้นที่ทนแรงอัดได้ดีขึ้น

ตารางที่ 5. สรุปคุณสมบัติของผิวงานที่เคลือบด้วยความร้อนเคมีป้องกันการกัดกร่อน

กรรมวิธีทางความร้อนเคมี	ธาตุที่แทรกซึม	มัชฌิมที่ใช้	อุณหภูมิที่ใช้ °C	ภาค (phase) ของผิวเคลือบ	ความแข็งชั้นผิวเคลือบ HV 0,2	ความหนาของ µm
อาบคาร์บอนและชุบแข็ง	C	ก๊าซ,พลาสเตอร์ (Plaste),ผงอ่างเกลือ	600...1050	มาร์เดนไซต์	700...1000	-
คาร์บอนไนไตรดิ่งและชุบแข็ง	C,N	ก๊าซ,พลาสมา, ผง,อ่างเกลือ	600...930	Fe_4 (C,N) มาร์เดนไซต์	700...1000	≤ 15
ไนไตรดิ่ง	N(C,O)	ก๊าซ,พลาสมา, ผง,อ่างเกลือ	400...600	Fe-ไนไตรด์	450...1200	≤ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรรมวิธีทางความร้อนเคมี	ธาตุที่แทรกซึม	มัชฌิมที่ใช้	อุณหภูมิที่ใช้ °C	ภาก (phase) ของผิวเคลือบ	ความแข็งชั้นผิวเคลือบ HV 0,2	ความหนาของ µm
ซัลไฟนิกไนไตรดิ่ง (Sulphonic nitriding)	N ,S (C,O)	อ่างเกลือ	≤ 600	Fe S	350....400	≤ 20
บอไรดิ่ง Boriding)	B	ก๊าซ,พลาสมา ผง,อ่างเกลือ	800...1000	Fe_2B FeB	1400...2200	10....800
วานาเดียม ทรีตเมนต์ (Vanadium Treatment)	V	ผง,อ่างเกลือ	1000...1100	VC VC_2	2500 1800	≤ 20
โครไมซิง อ่างเกลือ	Cr	ก๊าซ,ผง, คาร์ไบด์ผสม	900....1200	Cr-Fe	1400...2000	≤ 50
อะลูมิไนซิ่ง อ่างเกลือ Phase	Al	ก๊าซ,ผง,	≤ 1200	Intermetal-lic Fe-Al Phase	200...1200	≤ 1000
ซิลิคอนไนซิ่ง	Si	ผง	930...1200	Intermetal-lic Fe-Si Phase		≤ 250

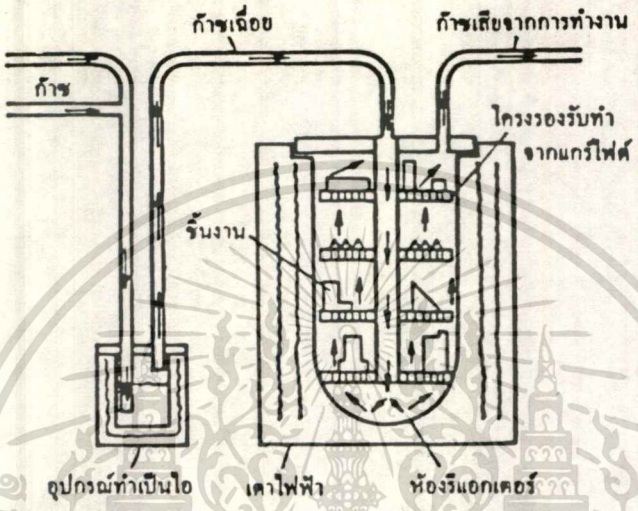
วิธีการเคลือบผิวทางเคมีให้แข็งในสมัยใหม่คือ

กรรมวิธีซีวีดี(CVD)และกรรมวิธี(PVD)เป็นวิธีการที่ทำให้เฟสของก๊าสหรือเฟสของไอมาทำปฏิกิริยาบนผิวโลหะที่เป็นที่รู้จักในงานอิเล็กทรอนิกส์และงานเกี่ยวกับแสงมาเป็นเวลานานแล้วจึงได้นำมาใช้ในการเคลือบผิวป้องกันการสึกหรอ โดยจะนิยมเคลือบผิวทางเคมีเป็นไตตาเนียมไนไตรด์หรือไตตาเนียมคาร์ไบร์บนเครื่องมือตัดปาดผิวของโลหะแข็ง

(ก)กรรมวิธีดี(CVD = Chemical Vapor Deposition) จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแยกตัวเป็นก๊าสด้วยวิธีการควบคุมอุณหภูมิ/ความดัน เพื่อให้ก่สที่เกิดขึ้นมาทำปฏิกิริยาแยกตัวอีกครั้งหนึ่งในห้องรีแอกเตอร์(Reactor Chamber)แล้วทำปฏิกิริยาเคลือบซึมบนผิวชิ้นงาน เช่น Tic แยกตัวออกจาก $TiCl_4$ และ CH_4 $TiCl_4 + CH_4$ ---> Tic + HCl ที่ 900 C ถึง 1000 C และที่ 10 ทอร์(Torr)โดยมีไฮโดรเจนเหลืออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกรรมวิธีซีวีดีนี้สามารทำให้คาร์ไบด์,ไนไตรด์,บอไรด์ และออกไซด์แยกตัวมาเคลือบผิวชิ้นงานได้เช่นกัน ในทางเทคนิคจะมีการนำไตตาเนียมไนไตรด์,ไตตาเนียมคาร์ไบด์และอลูมิเนียมออกไซด์เคลือบผิวงานหนาไม่เกิน 10 m ได้และบ่อยครั้งที่เคลือบเป็นหลายชั้นสลับกันดังรูปที่ 24 นอกจากการเคลือบด้วยวิธีซีวีดีบนผิวมีดตัดแล้ว ยังนิยมให้เคลือบบนผิวเครื่องมือขึ้นรูป,อุปกรณ์วัดต่างๆ และ แบริ่งลูกปืนให้ทนการสึกหรอได้มากยิ่งขึ้น

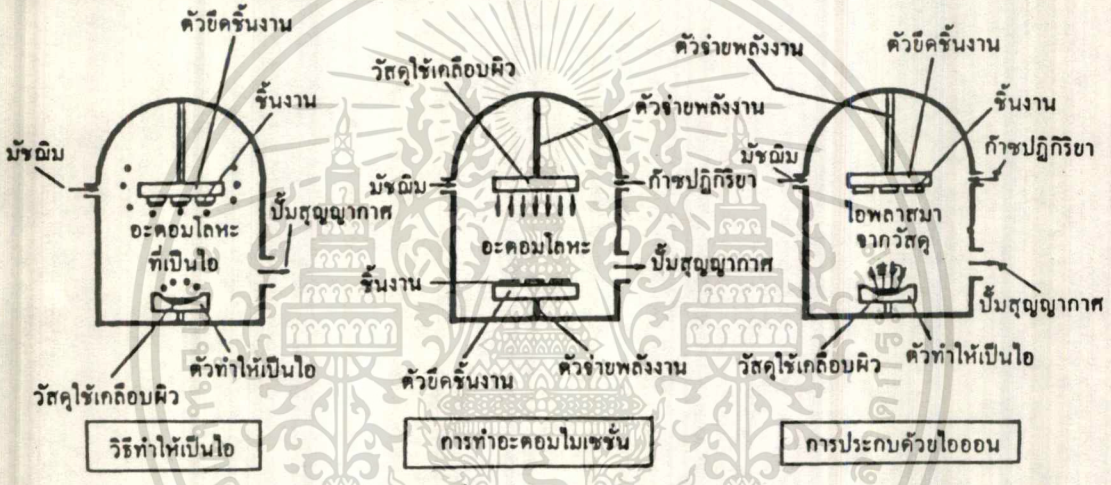


รูปที่ 20. แสดงระบบการทำงานของชุดอุปกรณ์เคลือบผิวแบบวิธีซีวีดี(CVD)

รูปที่ 21. ไตตาเนียมคาร์ไบด์เคลือบด้วยวิธีซีวีดีบนโลหะแข็ง

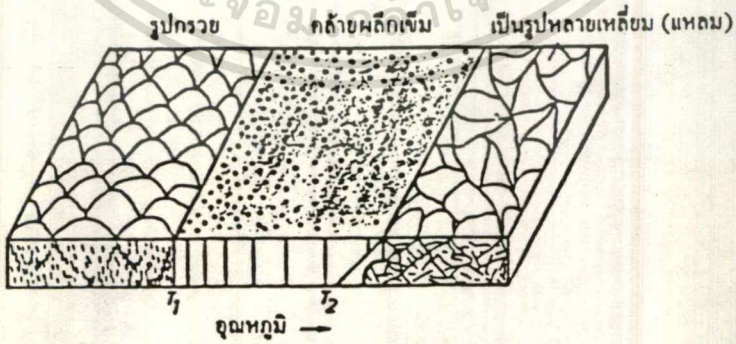
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)กรรมวิธีพีวีดี(PVD = Physical Vapor Deposition) เป็นวิธีการแยกตัวทางฟิสิกส์จากเฟสของไอ(ดังรูปที่ 22) โดยกระทำด้วยวิธีการทำเป็นไอในสุญญากาศ,วิธีการอะตอมไมเซชั่น(Atomization),และการประกบด้วยไอออน(Ion Clading) จะมีการนำโลหะที่จะให้ทำปฏิกริยาแยกตัว(สภาพแข็ง)และชิ้นงานเข้าไปอยู่ในเตาพร้อมกัน เมื่อมีการทำให้โลหะกลายเป็นไอหรือการทำอะตอมไมเซชั่นแล้วอะตอมโลหะที่อยู่ในนสุญญากาศจะแจกตัวมาเคลือบบนผิวชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550c ส่วนการประกบด้วยไอออนนั้นจะทำให้ชิ้นงานงานเป็นแคโทด(Cathode)และวัสดุที่เคลือบเป็นอะโนด(Anode)นอกจากนี้ยังจะให้ก๊าซปฏิกิริยา(Reaction Gas)เหมือนกับกรรมวิธีซีวีดีเข้าไปแยกตัวในเตา เพื่อมาเคลือบผิวชิ้นงานได้เพิ่มเติม วัสดุที่ใช้เคลือบจะใช้ไตตาเนียมไนไตรด์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะทำให้ชั้นผิวเคลือบมีโครงสร้างเข้าใกล้โครงสร้างผลึกเข็ม(Columnar)ดังรูปที่ 23 และ 24



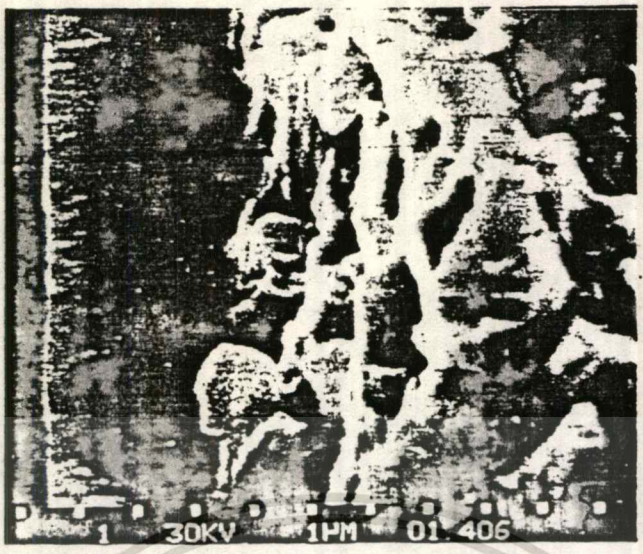
รูปที่ 22. กรรมวิธีพีวีดี(PVC)

โครงสร้าง



รูปที่ 23. โครงสร้างชั้นผิวพีวีดี(PVD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24. โครงสร้างจุลภาคของไตตาเนียมไนไตรด์ที่เคลือบ
บนเหล็กกล้าอบสูงด้วยกรรมวิธีพีวีดี(PVD)

ตัวอย่างเช่น ดอกสว่าน HSS จะพอกด้วยผิว TIN 2...10 m มีความแข็ง > 2000 HV ที่ทำให้ดอกสว่านนี้มีอายุการใช้งานมากกว่า 3...4 เท่าของดอกสว่านที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีนี้

กรรมวิธีซีวีดีและพีวีดี มีข้อดีตรงที่ว่า ในการเคลือบผิวนั้นไม่ต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทั้งหมดชิ้นงานบางจะไม่เกิดการบิดตัว และทำให้ประหยัดพลังงาน กรรมวิธีทั้งสองนี้นำมาใช้ในขบวนการผลิตและการซ่อมบำรุงการเชื่อมพอกผิว(Build Up Welding) กระทำโดยการนำโลหะเจือชนิดแข็งมาเชื่อมพอกด้วยก๊าซหรือไฟฟ้า ในการเชื่อมพอกหนาหลายๆชั้นจะให้ชั้นที่เชื่อมพอกตรง กลางเป็นโลหะชนิดเหนียว

ตารางที่ 6. ตัวอย่างงานเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน

กลุ่มวัสดุ	ชนิดของงานที่เชื่อมพอก
เชื่อมพอกชั้นกลาง(พอกหลายชั้น)ใช้โลหะเจือต่ำ	เชื่อมพอกชั้นกลาง,ล้อ
แมงกานีส-โครเมียม เจือในเหล็กออสเตไนต์	บูชบัฟเฟอร์ (Bush Buffer), ฟันสับ (Crusher Jaw)
วัสดุโลหะเจือปานกลางที่แข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อน	สไปค์โรลล์ (Spiked Roll)
โลหะเจือโครเมียม คาร์ไบด์	ฟันของรถขุดดิน,สกรูคอนเวเยอร์
โลหะนิกเกิล โครเมียม วุลแฟรม	กระสวนของแก้ว
โลหะโคบอลต์ โครเมียม วุลแฟรม	ตัวเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3.
เครื่องทดสอบความสึกหรอ

วัตถุประสงค์

1.เพื่อทดสอบความสึกหรอของ roller ในลักษณะของการใช้งานต่างๆ ซึ่งในขณะการใช้งานที่มีload กระทำด้วยค่าต่างๆกัน

2.เพื่อทดสอบแรงเสียดทานของ roller ในขณะที่การใช้งานมี load กระทำด้วยค่าต่างๆกัน

หลักการทำงานของเครื่องทดสอบความสึกหรอ

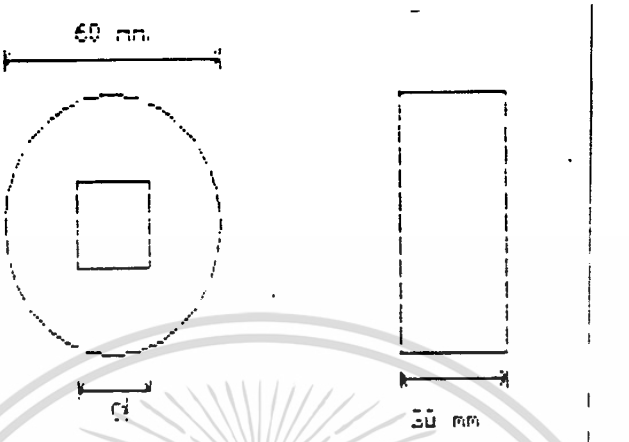
เครื่องทดสอบความสึกหรอ จะประกอบด้วย roller 2 ตัว ซึ่ง roller จะถูกขับที่ความเร็วสัมพัทธ์ต่างกัน โดยอัตราส่วนเฟือง (gear ratio) ที่กำหนดเพลาของ roller ตัวล่างจะเป็นแกนหมุนอยู่กับที่ (fixed axis) โดยจะถูกสวมใน (single-row bearing)ที่ อยู่ในตัวโครงของเครื่อง และถูกต่อเข้ากับ motor ซึ่งความเร็วจะถูกควบคุม โดย variable frequency inverter ทำให้สามารถควบคุมการหมุนด้วยความเร็วคงที่ได้ใน ทุกความเร็ว

เพลาตัวบนถูกสวมใน single-row bearing ซึ่งจะสามารถใช้ได้ การที่เพลาวางไม่ตรงแนว หรือมี deflection เล็กน้อย หรือใช้ self-aliguing bearing ในกรณีที่เกิด deflection มาก ปลายรองเพลาด้านที่มีเฟืองจะถูกหมุนอยู่กับที่ โดยจะถูกสวมใน bearing ที่อยู่ในตัวโครงของเครื่อง ส่วนปลายเพลาด้านที่มี roller จะถูกสวมใน bearing ที่อยู่ในแผ่นเหล็กซึ่งสามารถเลื่อนขึ้นและลงในแนวดิ่งตามตัวโครงได้อย่างอิสระ และที่ปลายนี้เองจะเจาะรูตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเพลาเพื่อใช้หาแรงเสียดทาน ...ทำการทดสอบโดยใส่ load ที่คงที่บนเพลาตัวบน โดยการวางน้ำหนักบนที่แขวนน้ำหนักโดยอัตราส่วนคานเป็น 5:1 (อัตราส่วนระหว่างความยาวจากจุดหมุนถึงจุดที่แขวนน้ำหนัก ต่อ ความยาวจากจุดหมุนถึงจุดส่งแรงให้เพลาตัวบน) หมุน roller แล้วทำการวัดความสึกหรอของ roller จะทำการวัดปริมาตรหรือน้ำหนักที่ลดลงของ roller เมื่อ หมุน roller ที่มี load กระทำด้วยค่าต่างๆกัน ด้วยเวลาการหมุนต่างๆกัน ในแบบของการใช้งานต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

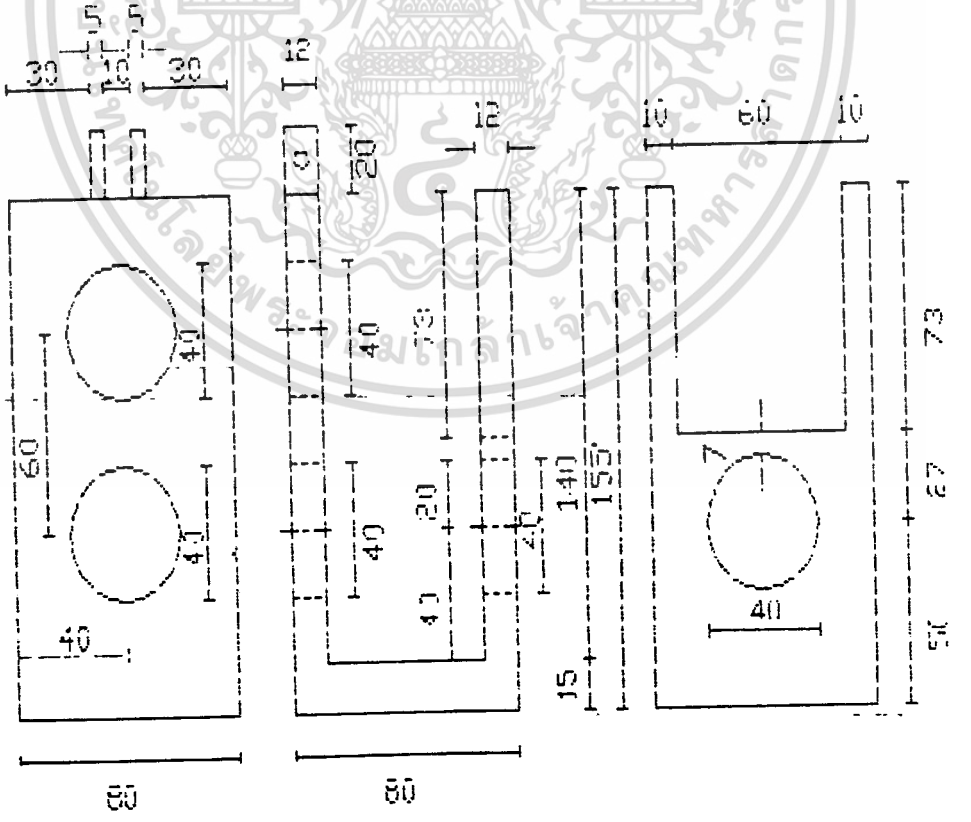
ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบความสึกหรอ

1. roller



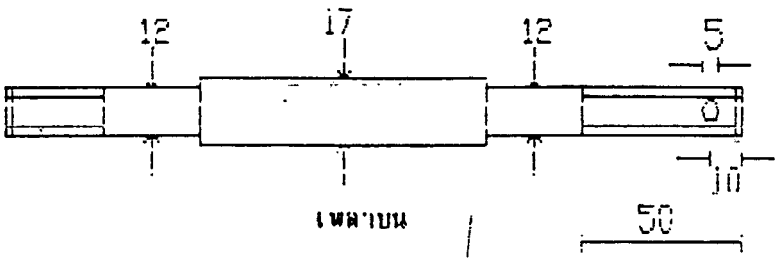
2. bearing ชนิด single row 4 ตัว (bore=17 mm.,o.d.=40 mm.,width=12 mm.)

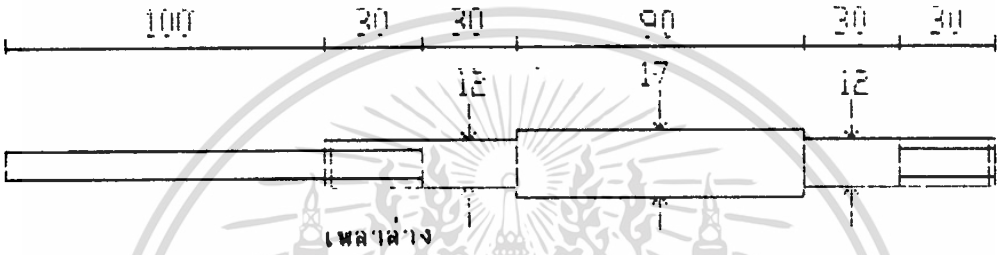
3.ตัวโครง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

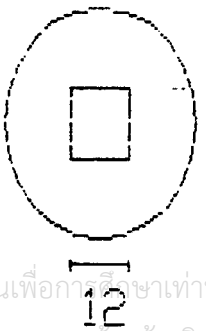
4. เพลา





5. คานส่งแรง

6. เฟือง

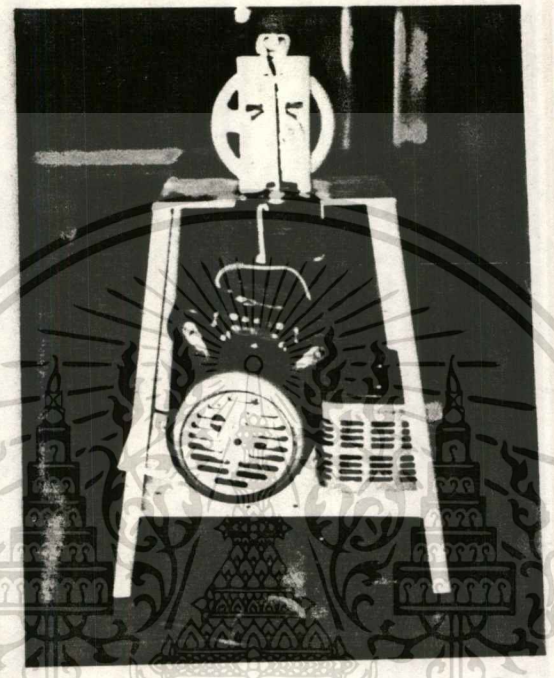


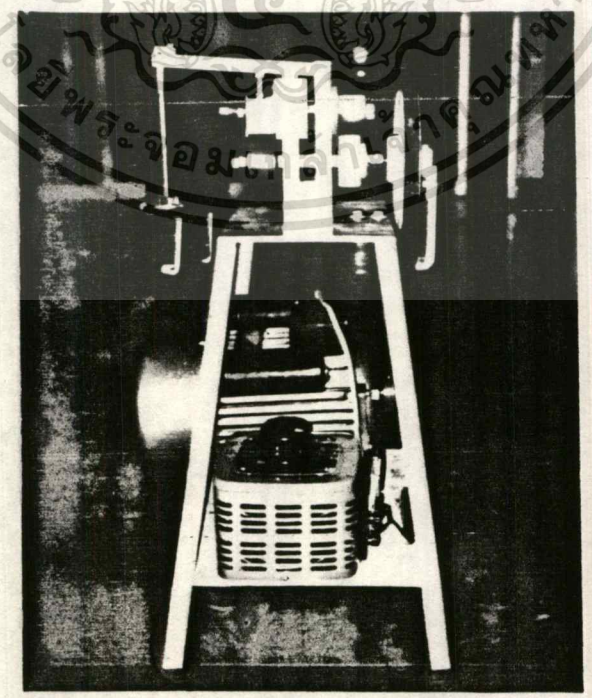
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. แผ่นเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพแสดงเครื่องทดสอบความสึกหรอ





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความสึกหรอ

อุปกรณ์การทดสอบ

1. มอเตอร์ที่ควบคุมความเร็วรอบได้
2. ตัวโครงเครื่องทดสอบ
3. เพลา บนและล่าง
4. แผ่นเลื่อน
5. คานส่งแรง
6. ที่แขวนน้ำหนัก
7. roller ที่ทำจากเหล็ก
8. แผ่นที่อยู่กับที่ ซึ่งทำจาก คาร์บอน แทปลอน เหล็ก
9. เครื่องชั่งวัดละเอียด

วิธีการทดสอบ

1. สวมแผ่นที่อยู่กับที่(ทำจาก คาร์บอน แทปลอน และเหล็ก) และroller เข้ากับตัวเครื่องทดสอบ แล้วล็อคให้แน่น
2. แขวนน้ำหนักที่ค่าๆหนึ่ง(และค่อยๆเพิ่มขึ้นในแต่ละการทดสอบของการขบ roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ชนิดนั้นๆ) บนคานน้ำหนัก ซึ่งตอนเริ่มต้นให้ใช้น้ำหนักน้อยๆก่อน
3. ตั้งความเร็วที่มอเตอร์ที่ค่าๆหนึ่ง(และค่อยๆเพิ่มขึ้นในแต่ละการทดสอบของการขบ roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ชนิดนั้นๆ)
4. วัดน้ำหนักของ roller และแผ่นที่อยู่กับที่ที่หายไป แล้วจดบันทึกทุกๆช่วงเวลาการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบความสึกหรอ โดยใช้เครื่องทดสอบความสึกหรอและ roller กับชนิดของแผ่นคงที่ต่าง ๆ ได้ผลการทดลองที่แสดงในตารางข้างหลัง

จากการสังเกตุพบว่า

-ในระหว่างการทดสอบแผ่นเทปลอนกับ roller เหล็ก

1.จะมีการหลุดของเศษเทปลอนออกมามีลักษณะเป็นแผ่นๆออกมาตลอด และที่ roller เหล็กจะมีเศษเทปลอนติดอยู่ด้วย

2.มีเสียงที่เกิดจากการทดสอบแต่ไม่ดังมากเท่าในกรณีของแผ่นเหล็กกับrollerเหล็ก

3.เกิดความร้อนขึ้นแต่ไม่ร้อนเท่ากรณีของแผ่นเหล็กกับ roller เหล็ก

-ในระหว่างการทดสอบแผ่นคาร์บอนกับ roller เหล็ก

1.มีผงคาร์บอนหลุดออกมา และติดที่ roller ด้วย

2.มีเสียงเบาที่สุดใน 3 ชนิด ของแผ่นที่อยู่กับที่

3.เกิดความร้อนขึ้นมากกว่าที่แผ่นเทปลอนแต่น้อยกว่าแผ่นเหล็ก

-ในระหว่างการทดสอบแผ่นเหล็กกับ roller เหล็ก

1.มีขี้เหล็กเกิดขึ้นที่ผิว roller เหล็ก และหลุดไปเป็นระยะๆ ทำให้ระหว่าการทดสอบคานส่งแรงจะสั่น

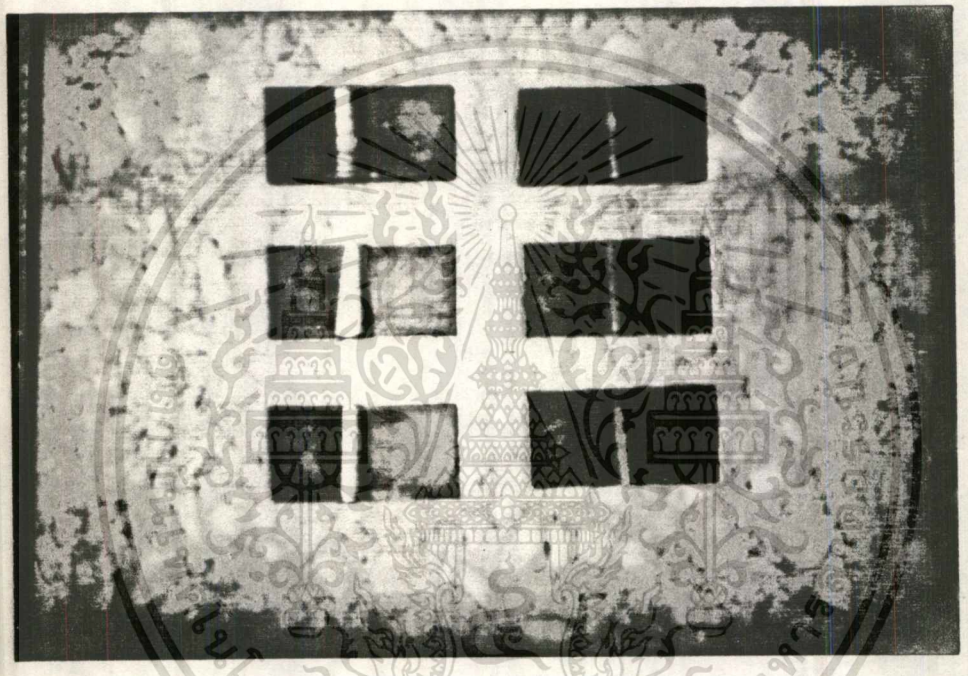
2.เกิดเสียงดังที่สุดใน 3 ชนิด

3.เกิดความร้อนมากที่สุดใน 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพแสดงแผ่นที่อยู่กับที่ชนิดต่างๆ หลังการทดสอบ

- คาร์บอน



1. load 15 kg. speed 1000 rpm.
2. load 15 kg. speed 750 rpm.
3. load 10 kg. speed 1000 rpm.
4. load 10 kg. speed 750 rpm.
5. load 5 kg. speed 1000 rpm.
6. load 5 kg. speed 750 rpm.

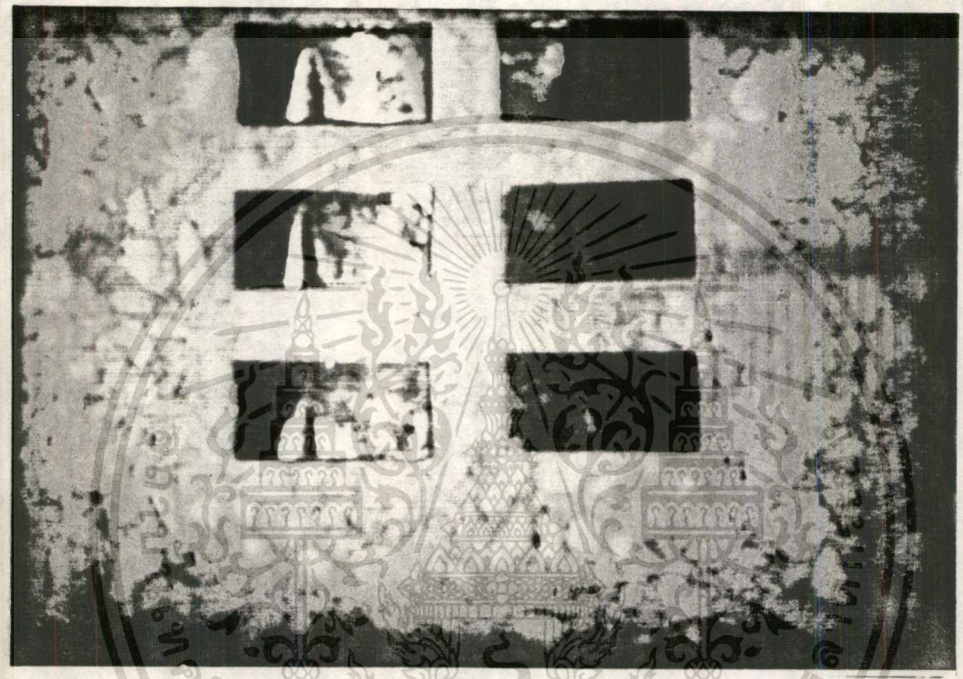
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทปล่อน

1. load 15 kg. speed 1000 rpm.
2. load 15 kg. speed 750 rpm.
3. load 10 kg. speed 1000 rpm.
4. load 10 kg. speed 750 rpm.
5. load 5 kg. speed 1000 rpm.
6. load 5 kg. speed 750 rpm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เหล็ก



1. load 15 kg. speed 1000 rpm.
2. load 15 kg. speed 750 rpm.
3. load 10 kg. speed 1000 rpm.
4. load 10 kg. speed 750 rpm.
5. load 5 kg. speed 1000 rpm.
6. load 5 kg. speed 750 rpm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเทปลอน

load 5 kg.

speed . 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	42.8847
10	42.4634
20	42.0927
30	41 7855
40	41 5010
50	41.2232
60	40.9622
70	40.7089
80	40.4600
90	40.2129

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเทปลอน

load 5 kg.

speed : 1000 rpm

เวลา (min)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	43.4173
10	42.9169
20	42.4952
30	42.1507
40	41.8320
50	41.5387
60	41.2479
70	40.9637
80	40.6874
90	40.4224

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเทปลอน

load 10 kg.

speed 750 rpm.

เวลา (min)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	43.2330
10	42.5847
20	42.1515
30	41.7858
40	41.4717
50	41.1645
60	40.8754
70	40.5970
80	40.3207
90	40.0603

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเทปลอน

load : 10 kg.

speed : 1000 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g)
0	43.8131
10	43.0399
20	42.4797
30	42.0609
40	41.7390
50	41.4282
60	41.1205
70	40.8271
80	40.5387
90	40.2568

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเทปลอน

load : 15 kg.

speed : 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	43.5274
10	42.7287
20	42.0844
30	41.6807
40	41.3519
50	41.0338
60	40.7216
70	40.4212
80	40.1309
90	39.8441

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเทปลอน

load : 15 kg.

speed : 1000 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	43.2183
10	42.3280
20	41.5883
30	41.1070
40	40.7691
50	40.4419
60	40.1209
70	39.8020
80	39.4876
90	39.1847

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ซนิดคาร์บอน

load 5 kg.

speed 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	34.9981
10	34.9563
20	34.9236
30	34.8985
40	34.8781
50	34.8620
60	34.8488
70	34.8380
80	34.8287
90	34.8206

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ซนิดคาร์บอน

load 5 kg

speed 1000 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g)
0	34.7112
10	34.6635
20	34.6246
30	34.5927
40	34.5681
50	34.5490
60	34.5346
70	34.5227
80	34.5131
90	34.5040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดคาร์บอน

load . 10 kg

speed 750 rpm

เวลา (min)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	34.3871
10	34.3379
20	34.2995
30	34.2682
40	34.2427
50	34.2229
60	34.2082
70	34.1959
80	34.1857
90	34.1768

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดคาร์บอน

load 10 kg.

speed 1000 rpm

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	34.7364
10	34.6821
20	34.6370
30	34.5992
40	34.5689
50	34.5458
60	34.5284
70	34.5136
80	34.5014
90	34.4917

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดคาร์บอน

load 15 kg.

speed 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	34.8877
10	34.8289
20	34.7816
30	34.7428
40	34.7120
50	34.6878
60	34.6686
70	34.6529
80	34.6406
90	34.6305

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดคาร์บอน

load : 15 kg.

speed 1000 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	34.6637
10	34.5986
20	34.5449
30	34.5018
40	34.4643
50	34.4356
60	34.4113
70	34.3911
80	34.3743
90	34.3599

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเหล็ก

load . 5 kg

speed 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	152.5454
10	152.4978
20	152.4535
30	152.4104
40	152.3677
50	152.3247
60	152 2826
70	152.2413
80	152.2009
90	152.1614

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเหล็ก

load : 5 kg.

speed : 1000 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	153.6773
10	153.6207
20	153.5673
30	153.5165
40	153.4671
50	153.4190
60	153.3723
70	153.3270
80	153.2826
90	153.2396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเหล็ก

load : 10 kg

speed : 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	150.7992
10	150.7403
20	150.6836
30	150.6288
40	150.5754
50	150.5236
60	150.4742
70	150.4262
80	150.3796
90	150.3345

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเหล็ก

load : 10 kg

speed : 1000 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	152.8847
10	152.8117
20	152.7403
30	152.6696
40	152.6004
50	152.5333
60	152.4681
70	152.4043
80	152.3432
90	152.2835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเหล็ก

load 15 kg

speed 750 rpm.

เวลา (min.)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	151 1843
10	151 1119
20	151.0411
30	150.9695
40	150.9001
50	150.8319
60	150.7651
70	150.6998
80	150.6394
90	150.5782

ผลการทดสอบความสึกหรอระหว่าง roller กับแผ่นที่อยู่กับที่ ชนิดเหล็ก

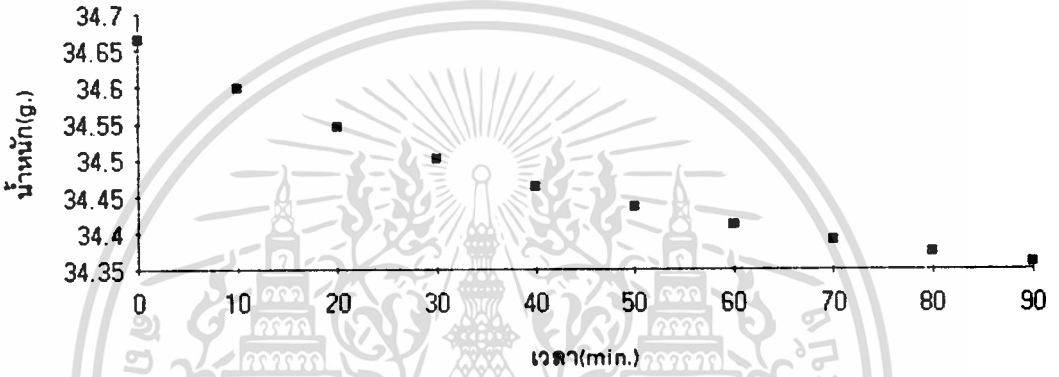
load 15 kg

speed : 1000 rpm.

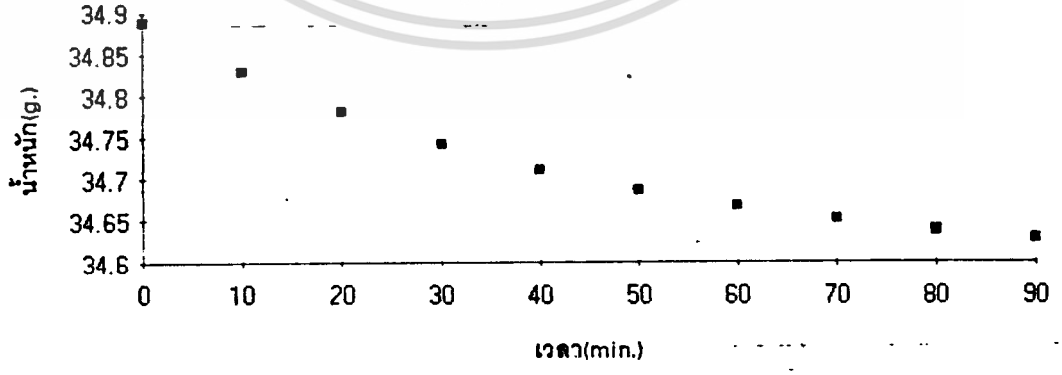
เวลา (min)	น้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ (g.)
0	152.3481
10	152.2502
20	152.1601
30	152.0727
40	151.9880
50	151.9048
60	151.8245
70	151.7457
80	151.6662
90	151.5912

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นคาร์บอน load 15 kg. speed 1000 rpm.

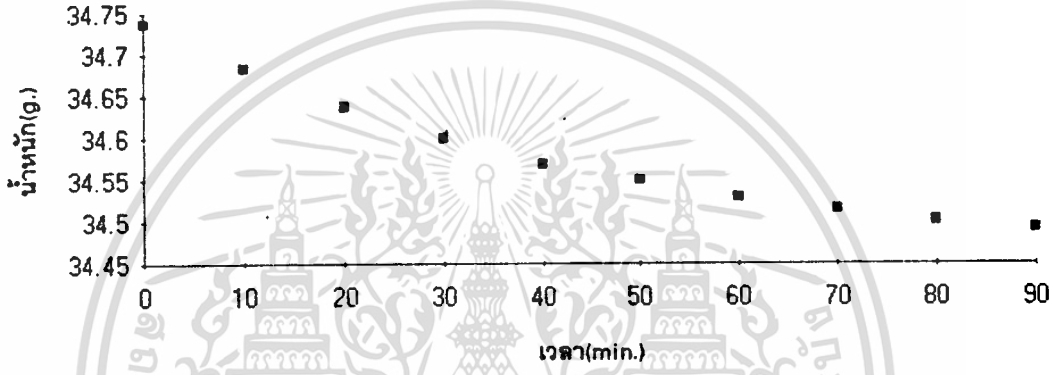


แผ่นคาร์บอน load 15 kg. speed 750 rpm.

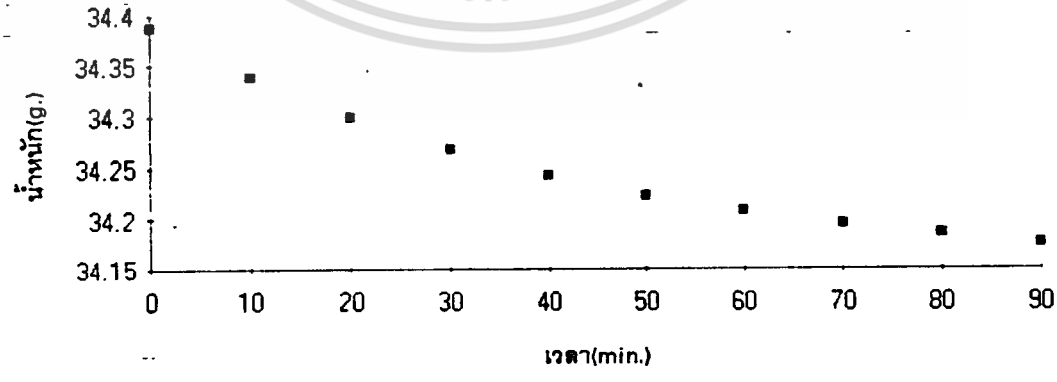


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นคาร์บอน load 10 kg. speed 1000 rpm.

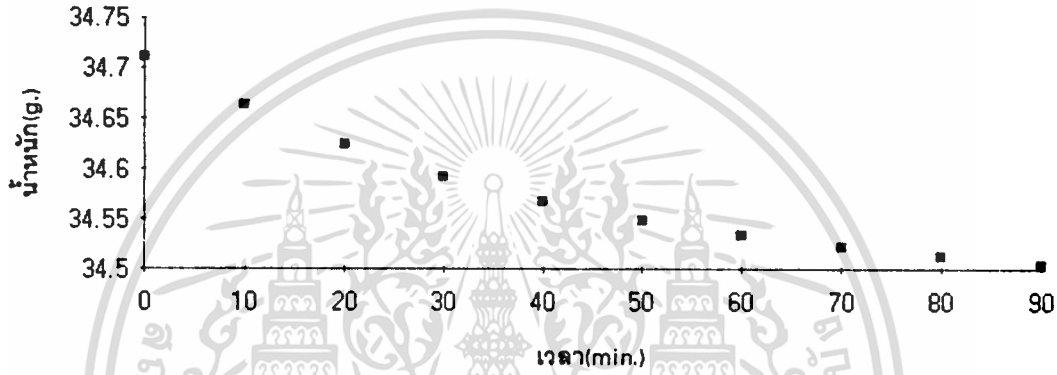


แผ่นคาร์บอน load 10 kg. speed 750 rpm.

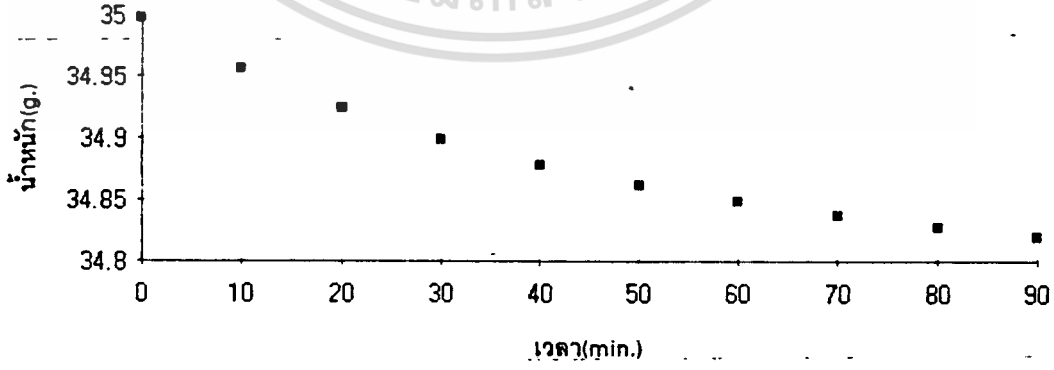


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นคาร์บอน load 5 kg. speed 1000 rpm.

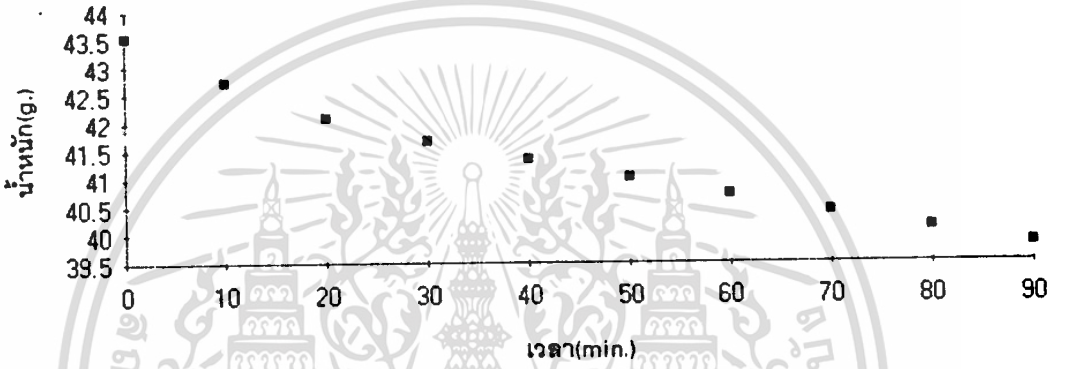


แผ่นคาร์บอน load 5 kg. speed 750 rpm.

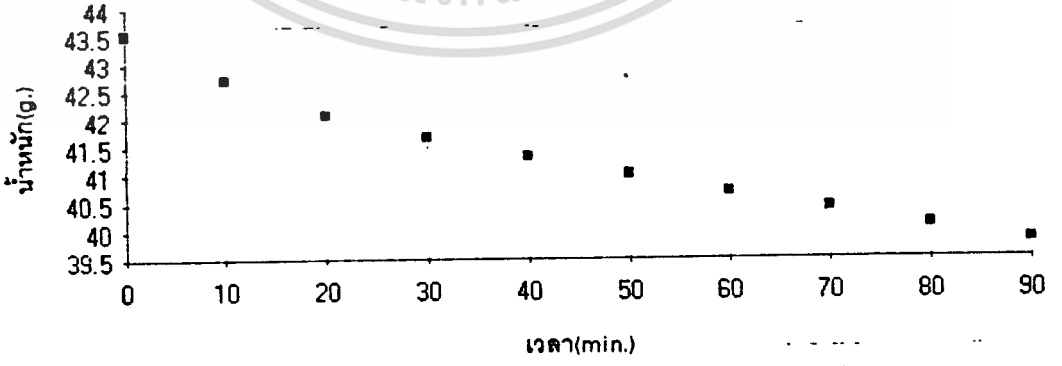


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเทปลอน load 15 kg. speed 1000 rpm.

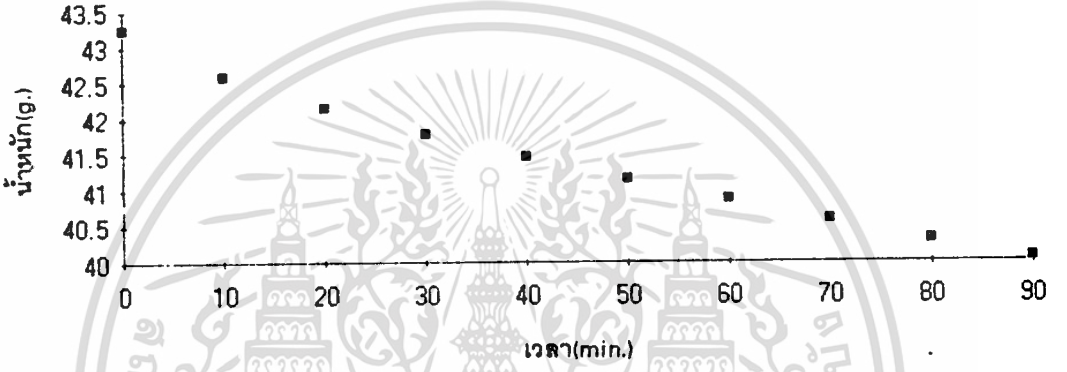


แผ่นเทปลอน load 15 kg. speed 750 rpm.

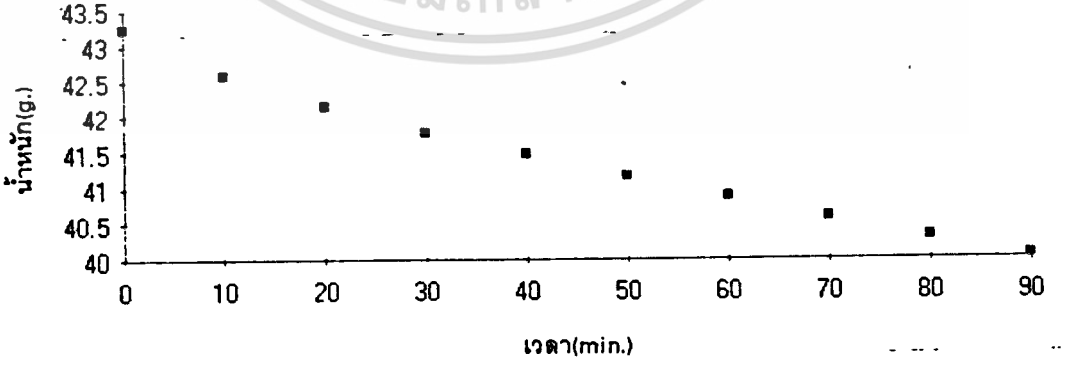


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเทปลอน load 10 kg. speed 1000 rpm.

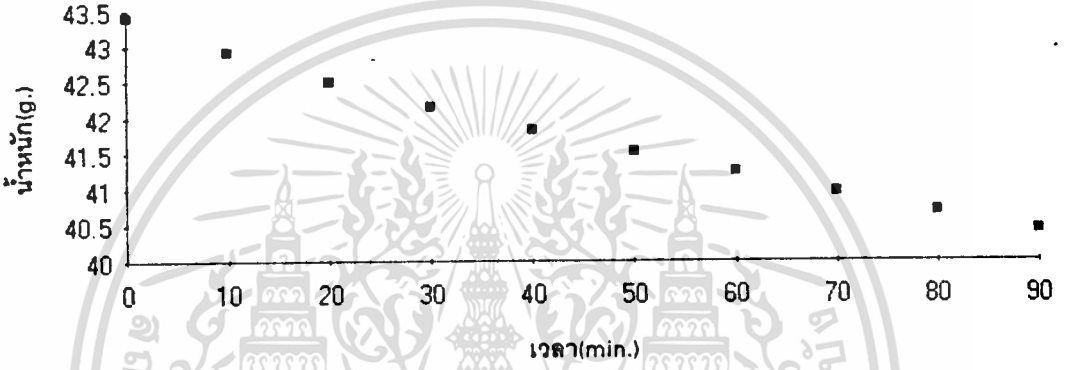


แผ่นเทปลอน load 10 kg. speed 750 rpm.

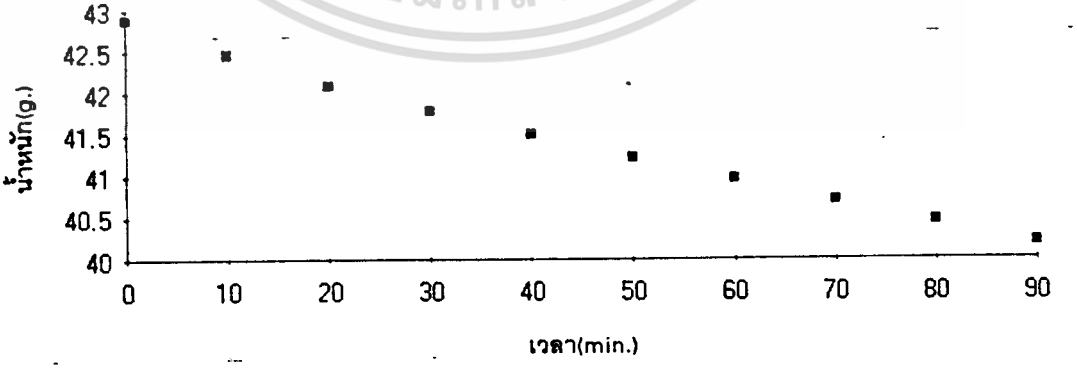


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเทปลอน load 5 kg. speed 1000 rpm.

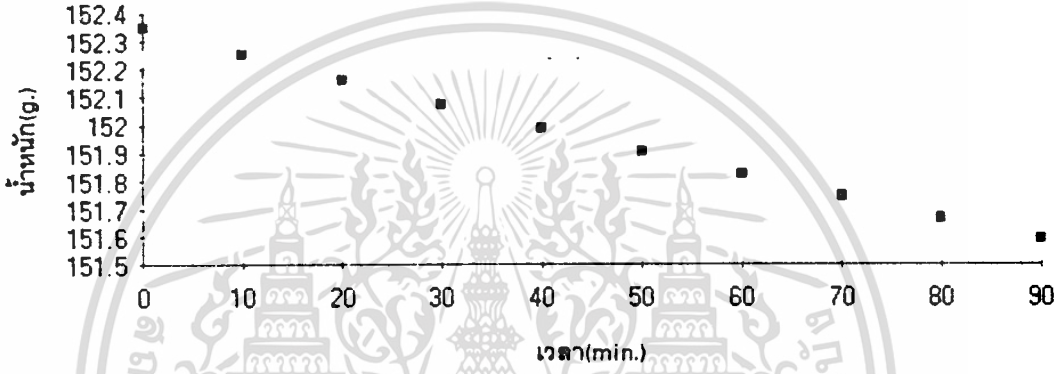


แผ่นเทปลอน load 5 kg. speed 750 rpm.

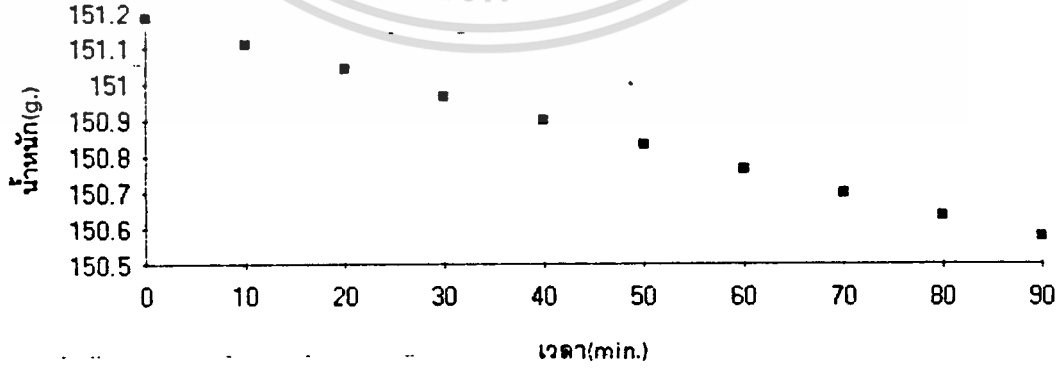


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเหล็ก load 15 kg. speed 1000 rpm.

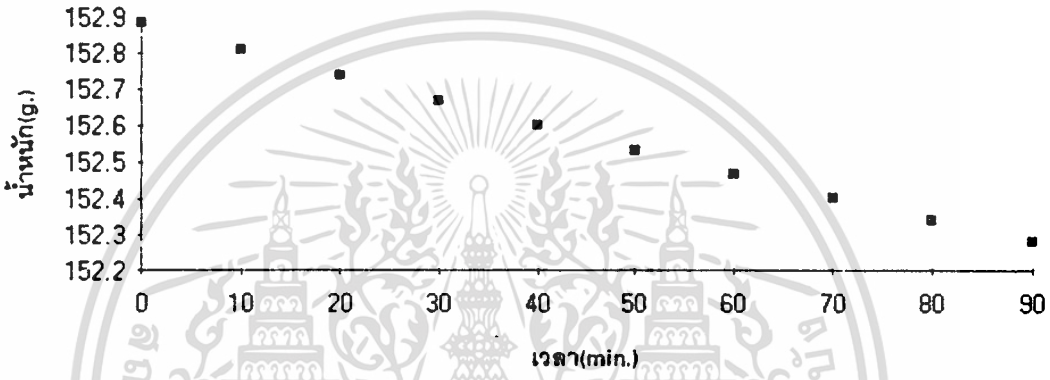


แผ่นเหล็ก load 15 kg. speed 750 rpm.

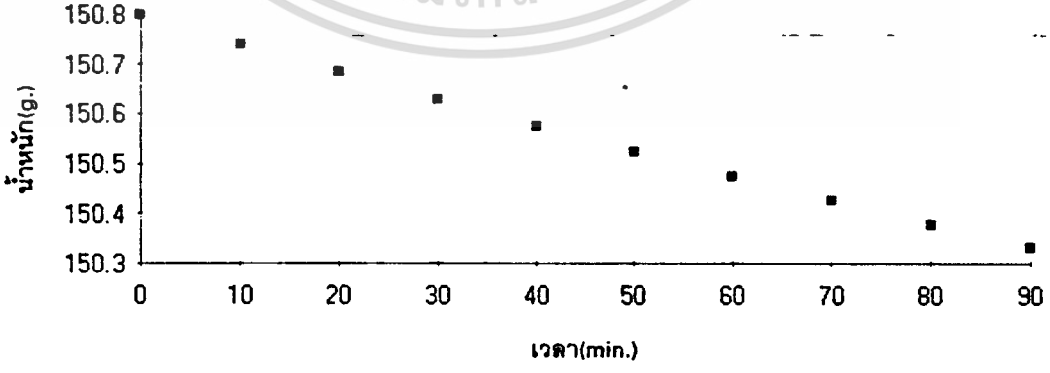


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเหล็ก load 10 kg. speed 1000 rpm.

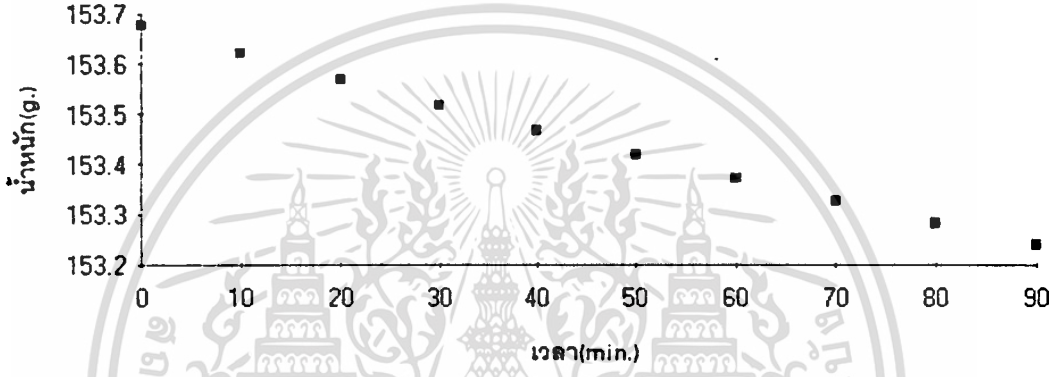


แผ่นเหล็ก load 10 kg. speed 750 rpm.

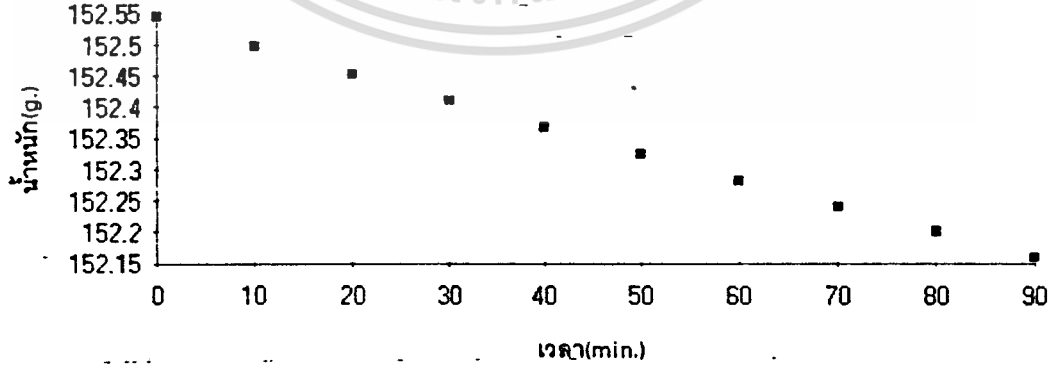


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเหล็ก load 5 kg. speed 1000 rpm.



แผ่นเหล็ก load 5 kg. speed 750 rpm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4.
สรุปผลการทดสอบ

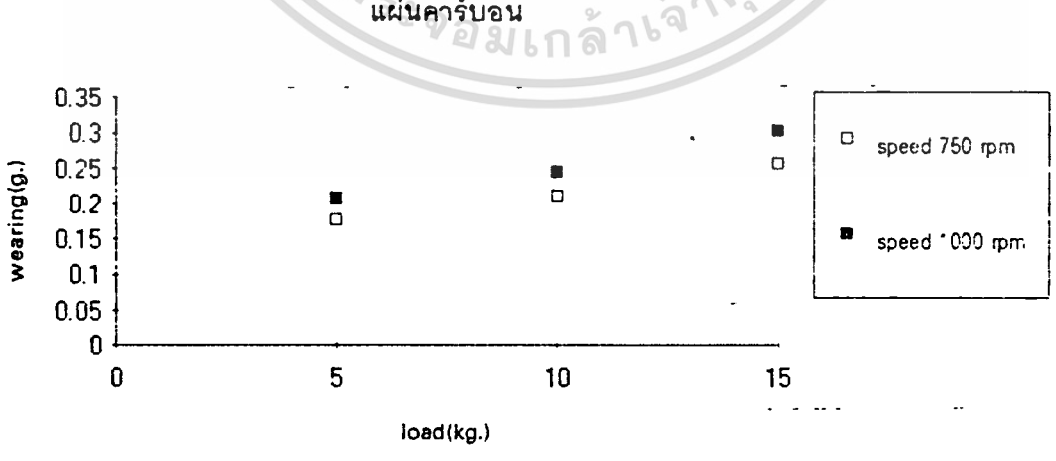
จากการสังเกตุผลที่ได้จากตาราง จะพบว่า น้ำหนักแผ่นที่อยู่กับที่ทั้ง 3 ชนิด พบว่า ในช่วงแรกของการทดสอบน้ำหนักของแผ่นที่อยู่กับที่ จะหายไปมากกว่าในช่วงหลัง มีข้อมูลสมมุติฐาน ซึ่งทำให้เกิดผลเช่นนั้นดังนี้คือ

1 ในช่วงแรก ๆ ของการทดสอบ พื้นที่ ๆ สัมผัสของ roller กับแผ่นที่อยู่กับที่นั้นน้อยกว่าในช่วงหลัง ๆจึงทำให้พื้นที่ที่ได้รับ load น้อยกว่า

2 ในช่วงแรก ๆ ของการทดสอบผิว roller จะมีความหยาบมากกว่าในช่วงหลัง ๆ เพราะในช่วงหลัง ๆ มีเศษของแผ่นอยู่กับที่ไปติดที่ผิว roller จึงทำให้ผิว roller มีความหยาบลดลงซึ่งส่งผลให้การสึกหรอลดลง

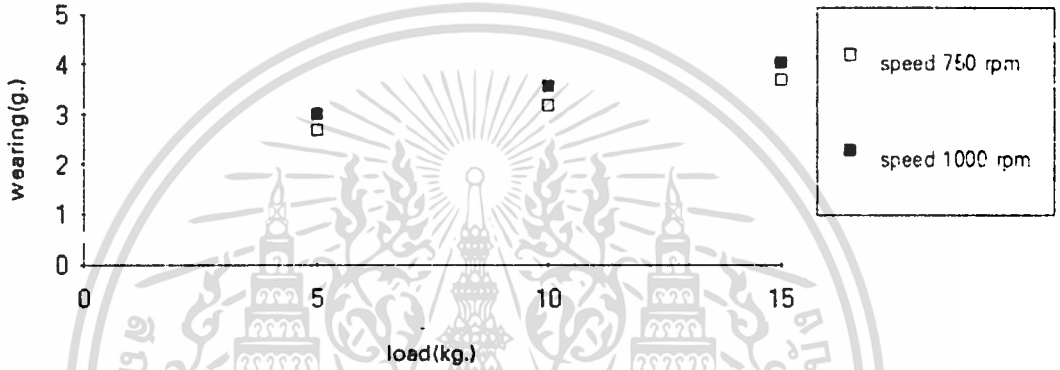
จากวัสดุที่ใช้ทำแผ่นที่อยู่กับที่ ทั้ง 3 ชนิด จะเห็นว่าแผ่นเทบลอนสึกหรอได้มากกว่าชนิดอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด

กราฟข้างล่างแสดงการสึกหรอที่ speed,load ต่าง ๆ กัน

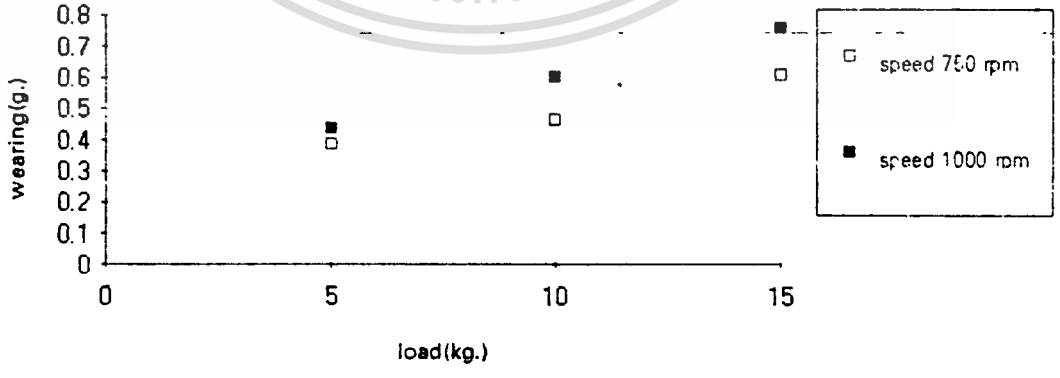


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเทปลอน



แผ่นเหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5.
ข้อเสนอแนะ ในการทดสอบ

1 การวัด speed ที่จะใช้ในการทดสอบนั้นควรจะวัดเมื่อ speed คงที่แล้ว

2 ในการทดสอบความสึกหรอของแผ่นที่อยู่กับที่นั้น ต้องคำนึงว่า load ที่ให้นั้นจะไม่ทำให้แผ่นที่อยู่กับที่แตกหักก่อนเริ่มการทดสอบ

3 ความถูกต้องของค่าความสึกหรอที่ต้องการวัดขึ้นอยู่กับความละเอียดของวิธีการวัด ถ้าต้องการความถูกต้องมากให้ใช้เครื่องชั่งที่ละเอียดสูง

4 ความสึกหรอต่อเวลาของวัสดุแต่ละชนิด จะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงควรกำหนดเวลาที่จะทดสอบให้เหมาะสมกับวัสดุชนิดนั้นๆ

5. แผ่นที่อยู่กับที่ที่จะใช้ทดสอบ ไม่ควรจะมีความแข็งมากกว่า roller มากนัก เพราะจะแทบไม่เกิดการสึกหรอของแผ่นที่อยู่กับที่

6 พื้นที่ใช้วางเครื่องทดสอบระหว่างทำการทดสอบควรอยู่ในแนวระดับ

7 ในระหว่างการชั่งน้ำหนักไม่ควรให้แผ่นที่อยู่กับที่หล่นหรือถูกกระทบกระแทกอย่างแรง เพราะจะทำให้บิ่นหรือหักได้

8 ก่อนนำแผ่นที่อยู่กับที่ไปชั่ง ควรทำให้เศษวัสดุที่ติดอยู่หลุดออกก่อน เพื่อให้ได้น้ำหนักที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. นาย มานพ ตัณตระบัณฑิต " วัสดุวิศวกรรม " ซีเอ็ด พ.ศ. 2532

2. ผศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ , ศ.ดร. ฮิโรมู่ ฮาชิโมโตะ " ทฤษฎีการหล่อลื่น " ส.จ.ล. พ.ศ.2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ถ้าหากปราศจากความช่วยเหลือและกำลังใจ จากบุคคลหลายๆท่าน ผู้จัดทำขอขอบคุณ

ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาแก่ผู้เขียน และช่วยแก้ปัญหาต่างๆมาโดยตลอด

อ. พรศักดิ์ อรรถวานิช ที่ให้ได้ยืมเครื่องมือต่างๆ

คุณ มณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความช่วยเหลือและช่วยอำนวยความสะดวก มาโดยตลอด

และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาต่างๆแก่ผู้จัดทำในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้