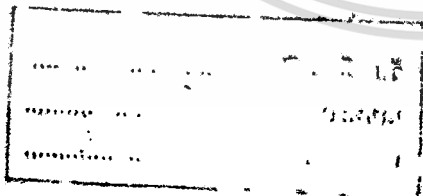


เครื่องเจาะรูขนาดเล็ก
SUPER DRILL EDM.



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537



ปีการศึกษา 2587

เครื่องเจาะรูขนาดเล็ก

SUPER DRILL EDM.



โดย

นาย ประสิทธิ์ เลหาวิรภาพ	84104208
นาย วาณิช วสุวานิช	84106818
นาย สุทธิ ตันศิริมาศ	84108429
นาย อธิพงศ์ อรรถวิวัฒน์	84109477

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ทวี เทศเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเจาะแบบอีดีเอ็ม

ประสิทธิ์ เลหาวิรภาพ

วานิช วสุวานิช

สุทธิ คันศิริมาศ

อธิพงศ์ อรรถวิวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ทวี เทศเจริญ

บทคัดย่อ

หัวข้อ Project ชื่อ Super Drill EDM ที่สำเร็จนี้ มาจากกระบวนการต่างๆมากมาย โดยขั้นแรกคือ การออกแบบ เพื่อที่จะได้เครื่อง Super Drill EDM ที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ได้จริง ในทางปฏิบัติ โดยเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับหน้าที่ และคำนวณขนาดของอุปกรณ์ที่สามารถรับ Load ที่ต้องการได้ หน้าที่ของ Super Drill EDM เครื่องนี้จะนำไปใช้ในการเจาะโลหะชนิดพิเศษ ให้เป็นรู เล็กๆ เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับเครื่อง Wire Cut EDM และขั้นที่สองคือ นำผลของการออกแบบไป สร้างและประกอบชิ้นงานบางส่วนขึ้นมา

Super Drill EDM.

PRASIT	LAOHAWIRAPAP
WANICH	WASUWANICH
SUTTI	TUNSIRIMAS
ATIPONG	ATTAWIPACH
THAVEE	TESCHARON

Abstract

This thesis is Super Drill EDM. Before success, it takes in many processes. First, design for it can work practically. According, choose material appropriately and calculate size of workpieces. For instantly, worm gear, spring. The function of Super Drill EDM is drill a special metal for work later by Wire Cut EDM. The last process is preparation and assembly. Frame and some part is builded.

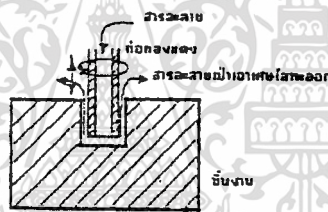
สารบัญ

บทที่ 1. บทนำ	1.
บทที่ 2. ทฤษฎีการขึ้นรูปด้วย EDM.	5.
- วงจรการสปาร์ค	8.
- รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า	16.
- พารามิเตอร์ที่สำคัญ	17.
บทที่ 3. มอเตอร์แบบก้าวหรือขั้น	19.
บทที่ 4. สปริง	24.
- คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง	24.
- ความเค้นในสปริงขรับแรงกด	25.
- การออกแบบสปริงขรับแรงกด	27.
- การคำนวณออกแบบสปริง	29.
บทที่ 5. สกรูส่งกำลัง	31.
- ชนิดของเกลียวสำหรับสกรูส่งกำลัง	36.
- เกลียวในระบบหน่วยอังกฤษ	36.
- เกลียวที่เหลื่อมคางหมุดตามมาตรฐาน ISO.	37.
- การคำนวณออกแบบสกรูส่งกำลัง	39.
บทที่ 6. เกลียวควั่นนอนและเฟืองควั่นนอน	41.
- การคำนวณออกแบบชุดเฟืองนอน	45.
ภาคผนวก ก.	46.
ภาคผนวก ข.	55.

บทที่ 1

บทนำ

เมื่อไม่กี่ปีมานี้เองได้มีการพัฒนาเครื่อง EDM สำหรับเจาะรูขนาดเล็กเรียกว่า Super Drill EDM หลักการทำงาน มีอยู่ว่า เครื่องนี้มีไว้เจาะรูขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 mm. เพื่อที่จะเอาไว้ร้อยลวด Wire Cut และตัดเป็นรูปร่างต่างๆตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วเหล็กทำเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็งแล้วหรือ Tungsten Carbide จะใช้ดอกสว่านเจาะรูไม่ได้(เจาะไม่เข้า) จึงต้องอาศัยหลักการสปาร์คของทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 0.8 mm. ท่อทองแดงจะหมุนและค่อยๆเลื่อนต่ำลงทีละน้อย และที่ท่อทองแดงกระแสไฟฟ้าเป็นขั้วลบ และชิ้นงานเป็นขั้วบวก สารละลายจะถูกฉีดผ่านรูของท่อทองแดง เมื่อท่อทองแดงเกิดการสปาร์คแล้ว สารละลายจะเป่าเอาเศษโลหะที่เกิดจากการสปาร์คออกจากรูที่ทำกรเจาะ ระบบเครื่องทั้งหมดจะถูกควบคุมโดย CNC ที่มีโปรแกรมควบคุมการเจาะ แะนั่นเครื่อง Wire Cut EDM สมัยใหม่ทั่วไปจะมีเครื่อง Super Drill EDM ติดตั้งมาด้วย ดังรูป 1.1



รูปที่ 1.1 เครื่อง Super Drill EDM

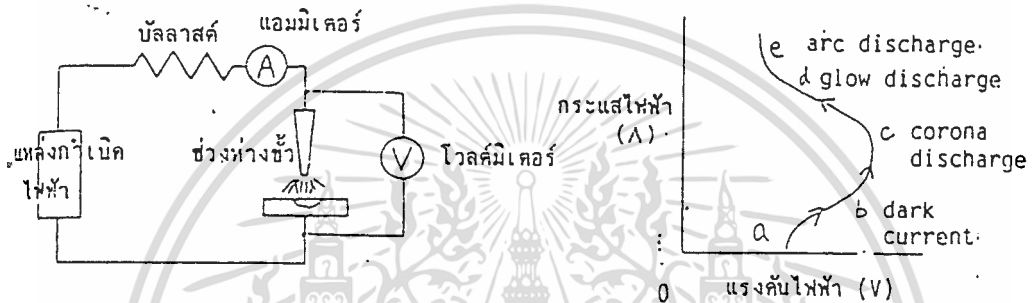
1.1 ปรากฏการณ์การสปาร์ค

ปรากฏการณ์การสปาร์ค เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่างๆซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลวหรือ ก๊าซ กั้นกลางอยู่ จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ จึงหมายถึง การผิบบังคับ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัวกลางโดยที่ปกติแล้ว ไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การผิบบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกระทันหัน

สำหรับปรากฏการณ์การสปาร์คที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีนั้นคือ “ฟ้าผ่า” นอกจากนั้นแล้ว เวลาที่ถอดเสื้อเวดเตอร์ในช่วงฤดูหนาว ซึ่งอากาศแห่งนั้นก็มักจะเกิดการสปาร์คที่มีเสียงดังเกิดขึ้นด้วย

การทำให้เกิดการสปาร์คโดยมนุษย์สร้างขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้งานนั้นได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอดนีออน ซึ่งนับว่าเป็นปรากฏการณ์การสปาร์คในสูญญากาศ และนำหลักการดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมนั้นได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปโดยการสปาร์ค(เครื่องEDM)



รูปที่ 1.2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ของการสปาร์ค

จากรูปที่ 1.2 แสดงถึงคุณสมบัติพิเศษ แรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของการสปาร์คระดับพื้นฐานที่สุดอันหนึ่ง โดยการสร้างวงจรการสปาร์คอย่างง่ายๆ ดังแสดงในรูปและทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นในอากาศ

ก. สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า(E) ดังเช่นในวงจรรูปนี้ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่ง อากาศจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุเล็กน้อย และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในช่วงระยะนี้จะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าไหลขนาดเล็กมากประมาณ 10^{-11} - 10^{-12} A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกกันว่าสภาพที่กระแสเริ่มไหล(dark current)

ข. การสปาร์คแบบโคโรนา(corona discharge)

และถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษ จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุขัดแย้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเนื้อหาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

breakdown) เราเรียกสภาพเช่นนี้ว่า การสปาร์คแบบโคโรนา (สภาพ C) ซึ่งเป็นสภาพการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

ค. การสปาร์คแบบโกลว(glow discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย สภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากเช่นนี้เรียกกันว่า การสปาร์คแบบโกลว หลอดนีออนต่างๆที่ใช้ตกแต่งในยามค่ำคืนก็อาศัยหลักการสปาร์คแบบนี้

ง. การสปาร์คแบบอาร์ค(arc discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบโกลวได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่สภาพขั้นตอนสุดท้าย (๔ ถึง ๕) ซึ่งหมายถึงการสปาร์คแบบอาร์ค สภาพการสปาร์คเช่นนี้ จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมพลังงานก่อนที่จะเข้าสู่สภาพการสปาร์คแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปนั้นเป็นสภาพการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล(dark current) จนถึงสภาพการสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะมีช่วงระยะเวลาที่สั้นมากราว 10^{-7} - 10^{-5} วินาที และยิ่งไปกว่านั้นความหนาแน่นของกระแส (current density) จะมีค่าถึง 10^{-14} - 10^{-10} A/cm² ดังนั้น เราจึงทราบกันว่าการสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะปลดปล่อยพลังงานที่มีระดับสูงมากออกมาภายในช่วงเวลาสั้นมาก

หลักการทํางานของ Super Drill EDM

Super Drill EDM เป็นเครื่องมือที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค ดังนั้นถ้าเป็นชิ้นงานที่เป็นสื่อไฟฟ้า เราสามารถขึ้นรูปได้แม้ว่าชิ้นงานนั้นจะมีความแข็งเท่าใดก็ตาม Super Drill EDM มีหลักการทํางานอยู่ว่า เครื่องนี้มีไว้เจาะรูขนาดเล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 mm เพื่อที่จะเอาไว้อะไรอย่าง Wire Cut และตัดเป็นรูปทรงต่างๆตามต้องการ หรือเพื่อประโยชน์อื่นๆ โดยเราจะอาศัยหลักการสปาร์คของท่อทองแดง

ท่อทองแดงซึ่งใช้เป็นหัวเจาะจะมีรูตรงกลาง สำหรับให้สารละลายไหลผ่าน จะยึดติดกับชุดสร้าง Oscillate ในแกนนำเจาะ โดยทั้งหมดนี้จะเคลื่อนที่ทั้งขึ้นและลงได้โดยสกรูส่งกำลัง ส่วนตัวชิ้นงานสามารถปรับขึ้นลงได้เล็กน้อยในคอนกรีตก่อนที่จะทำการเจาะชิ้นงาน โดยชุดเฟืองปรับตำแหน่งชิ้นงาน ซึ่งเป็นชุดเฟืองตัวหนอนเช่นกันแต่ถูกควบคุมแบบ manual

เมื่อชิ้นงานถูกปรับตั้งได้ตำแหน่งที่แน่นอนแล้ว หัวเจาะทองแดงซึ่งเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ลงไปหาชิ้นงาน จนได้ระยะระหว่างขั้วก็จะเกิดการสปาร์ค ในขณะที่เดียวกันหัวเจาะก็จะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามจังหวะการเคาะของลูกเบี้ยวในชุดสร้าง Oscillate ในแกนนำเจาะ ซึ่งจะคล้องจองกับจังหวะการสปาร์คเช่นกัน (Ton, Toff) เศษโลหะที่ได้จากการขึ้นรูป จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานแวนของระยะระหว่างนั้นต่ำลง ซึ่งจะทำให้การสปาร์คควบคุมไม่ได้ ดังนั้นเศษเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปกับสารละลายที่ถูกฉีดออกมาตามรูในท่อทองแดงในจังหวะที่หัวเจาะเคลื่อนที่ขึ้น (Toff) เมื่อเศษโลหะหลุดออกไปเรื่อยๆ หรือชิ้นงานถูกเจาะลึกลงไปเรื่อยๆ หัวเจาะก็จะเคลื่อนที่ลงตามจังหวะการหมุนของ Stepping Motor

ทั้งหมดนี้คงจะต้องได้รับการควบคุมโดย NC ทั้งในการกำหนดพัลส์การสปาร์ค การเคลื่อนที่ขึ้นลงโดยลูกเบี้ยวของหัวเจาะท่อทองแดง ซึ่งได้รับกำลังขั้วมาจากมอเตอร์ และการเคลื่อนที่ขึ้นลงของหัวเจาะโดย Stepping Motor

บทที่ 2

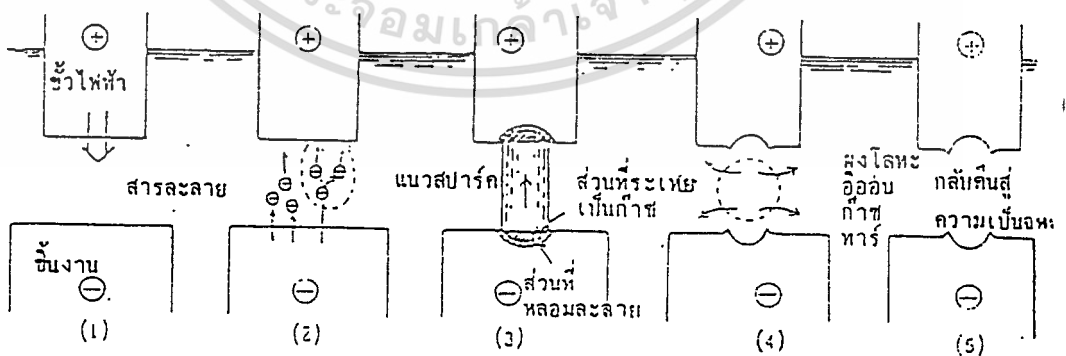
ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วย E.D.M.

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM หมายถึง วิธีการขึ้นรูปที่ใช้กับโลหะเสียเป็นส่วนใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียรภาพอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้วและเราสามารถที่จะเปรียบวิธีการขึ้นรูปนี้ได้เสมือน "การสปาร์คในช่องว่างแคบๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป" สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำขึ้นในสารละลาย โดยใช้ทองแดงกราไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้น จะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกันเหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์คแต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง.

การขึ้นรูปอาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงที่สั้นมากดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจริงนั้นจะใช้ระบบ NC (numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์(pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 สภาพของการสปาร์คแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ไล่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการไล่แรงดันไฟฟ้า(ประมาณ 60-280 V) ที่ระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า (เรียกว่าระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้น โดยปกติจะใช้น้ำมันเพื่อที่จะรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง ก็จะสามารถลดระยะระหว่างขั้ว(ช่องว่างการสปาร์ค)ให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีในการขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูง

ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อผ่านระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้เรื่อยๆจนถึงระยะหนึ่ง สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

ค. สปาร์คหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้นๆ ในการขึ้นรูปงานจริงนั้น กระแสไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 A -100 A พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมา(3000 °C ขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

ง. เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดแย่งความร้อน ไปก็จะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ

จ. กลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งจบลงแล้วจะรอจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการไล่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกัน การเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ หรือ สปาร์คเฉพาะเป็นบางจุด อันเนื่องมาจากการสะสมหรือทับถมรวมตัวกันของอีออนที่ตกค้างอยู่ระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มจาก ก.

ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสปาร์คซ้ำ คือ การสปาร์คที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมของการสปาร์คเลวลง อาจเกิดการสปาร์คขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์คซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ค เนื่องจากว่า การสปาร์คประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์ที่นอกเหนือการควบคุมจนไม่อาจถือว่าเป็นสภาพการสปาร์คที่เหมาะสมได้

ข้อควรคิด :

เวลาที่เกิดการหลอมละลายในช่วง ค. ทั้งๆที่ชิ้นงานหลอมละลายแต่ทำไมขั้วไฟฟ้าจึงไม่หลอมละลาย

ในฐานะของธาตุนี้ เหล็ก(Fe) มีจุดหลอมเหลว $1,539^{\circ}\text{C}$ ทองแดง(Cu)มีจุดหลอมเหลว $1,083^{\circ}\text{C}$ แต่ในความเป็นจริงแล้ววัสดุประเภทเหล็กกล้าจะมีคาร์บอนผสมอยู่ซึ่งทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง ส่วนขั้วไฟฟ้านั้นทำมาจากทองแดงผสมจึงทำให้จุดหลอมเหลวยิ่งต่ำลงไปอีก แต่อย่างไรก็ตามขั้วไฟฟ้าซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือทองแดงจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า ดังนั้นถ้าลองคิดตามธรรมดาแล้ว เมื่อได้รับความร้อนสูงจากการสปาร์คแล้ว ขั้วไฟฟ้าก็ควรหลอมละลายก่อน ซึ่งหมายถึงว่า การสึกหรอจะรุนแรงกว่า

ถ้าลองสังเกตขั้วไฟฟ้าหลังจากที่ใช้ในงานขึ้นรูปเสร็จสิ้นลงแล้ว จะทราบได้ว่า บริเวณที่เกิดการสปาร์คจะมีเขม่าจับเป็นสีดำ เขม่าเหล่านี้เกิดขึ้นโดยคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในสารละลายประเภทน้ำมัน ถูกความร้อนสูงจนสลายแยกตัวออกมาเกาะติดอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า คาร์บอนเป็นธาตุที่มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำมาก คือ $0.057 \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}$ การที่คาร์บอนเกาะติดที่ผิวขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดขวางการนำความร้อนซึ่งเกิดขึ้นจากการสปาร์ค ดังนั้นเราจึงสามารถกล่าวได้ว่า คาร์บอนเหล่านี้จะทำหน้าที่คุ้มครองผิวของขั้วไฟฟ้าจากความร้อนสูง สิ่งทีกล่าวมานี้ก็อาจกล่าวได้ว่าเป็นเรื่องที่แปลกมากเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค

2.1 วงจรสปาร์ค

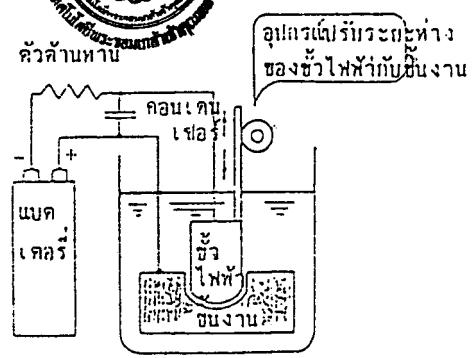
สำหรับงานวิจัยทางกายภาพ เกี่ยวกับปรากฏการณ์การสปาร์คนั้น ได้มีผลงานหลายอย่างถูกประกาศแนะนำออกมา ตั้งแต่สมัยนานมาแล้ว โดยนักวิจัยจำนวนมาก เช่น J.J.Thomson , Townsend , LHPaschen ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีที่แน่ชัดก็ยังไม่ถูกตั้งขึ้นมา แม้แต่จนปัจจุบันนี้ สาเหตุที่การหาทฤษฎีเพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์การสปาร์คให้ถูกต้องแน่ชัด ยังเป็นปัญหาที่ยากอยู่นั้น เนื่องจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ มีองค์ประกอบที่ไม่แน่ชัดมากเกินไปนั่นเอง

อุปกรณ์ที่เป็นต้นแบบของเครื่อง EDM ในปัจจุบันได้มาจากการวิจัยของ Lazarenko ชาวรัสเซียในปี 1943

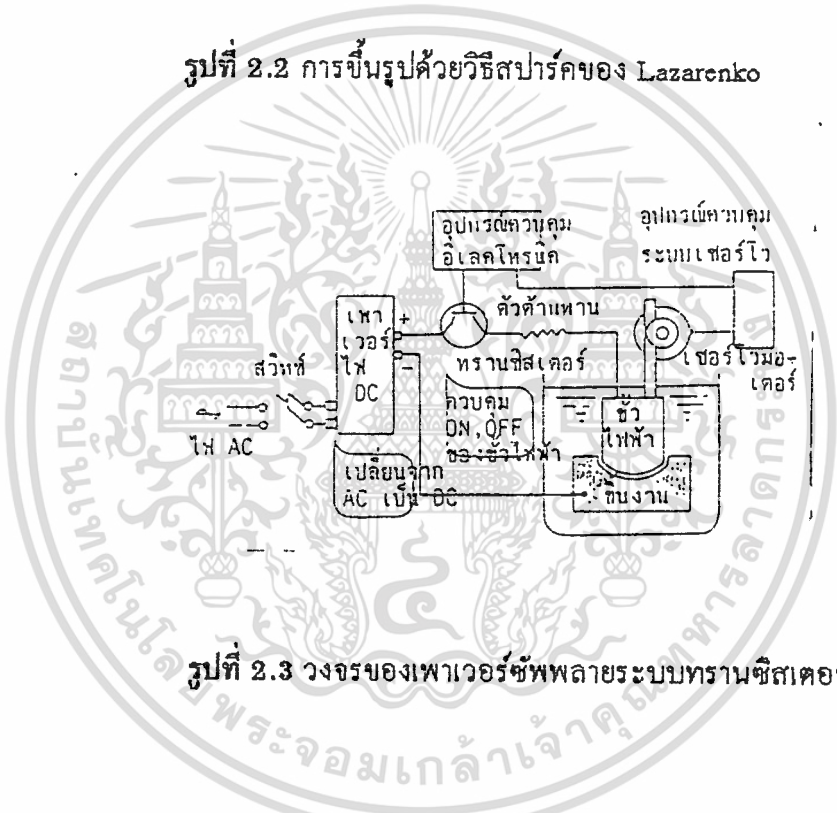
วงจร Lazarenko นั้น ใช้ตัวต้านทาน (R) และคอนเดนเซอร์ (C) มาประกอบรวมกันเพื่อควบคุม ON/OFF ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีชื่อเรียกกันว่า วงจร RC (หรือวงจร Lazarenko) วงจรนี้ใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และใช้ในการขึ้นรูปวัสดุประเภทเหล็กกล้า

ในสมัยนั้นการขึ้นรูปด้วยวงจรนี้ได้ถูกตั้งความหวังไว้ว่าจะเป็นวิธีการที่ดีเลิศในการขึ้นรูปโลหะประเภทแข็ง แต่วิธีนี้ยังมีจุดบกพร่องหลายจุดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแขนงพิเศษบางส่วนเท่านั้น โดยที่ไม่สามารถนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

จุดบกพร่องของวิธีนี้ได้แก่ เราไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขของสปาร์ค (พลังงาน) โดยอิสระได้ และความเร็วในการขึ้นรูปก็ช้ามาก รวมทั้งการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าเป็นไปอย่างรุนแรง ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่สามารถที่จะขึ้นรูปโลหะด้วยความละเอียดที่ดีโดยอิสระได้ในสมัยนั้น



รูปที่ 2.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คของ Lazarenko



รูปที่ 2.3 วงจรของเพาเวอร์ซัพพลายระบบทรานซิสเตอร์

วงจร Lazarenko ประกอบขึ้นด้วยคอนเดนเซอร์และตัวต้านทาน เป็นวงจรที่ทำให้เกิดการสปาร์ค ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในคอนเดนเซอร์เพียงชั่วระยะหนึ่ง เมื่อระหว่างขั้วได้ระยะที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขนาดที่เหมาะสมระดับหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอนเดนเซอร์ด้วยนั้น การสปาร์คก็จะเริ่มขึ้น โดยที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในคอนเดนเซอร์จะถูกปลดปล่อยออกมา แล้วเกิดปรากฏการณ์การสปาร์คขึ้นระหว่างขั้ว เมื่อการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าจบสิ้นลง แบตเตอรี่ก็จะทำหน้าที่ชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปในคอนเดนเซอร์อีกครั้งหนึ่ง

ความเร็วในการชาร์จประจุเข้าสู่คอนเดนเซอร์นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน (R) และค่าความจุของคอนเดนเซอร์ (C) เนื่องจากการเลือกค่าทั้งสองนี้ ซึ่งจะนำมาใช้งานในวงจรนี้

พลังงานการสปาร์ค จะเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป I_p กับเวลาการสปาร์ค τ_{∞} ถ้าทำให้ I_p มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ τ_{∞} ยาวขึ้น พลังงานดังกล่าวนี้ก็จะมียกระดับสูงขึ้น

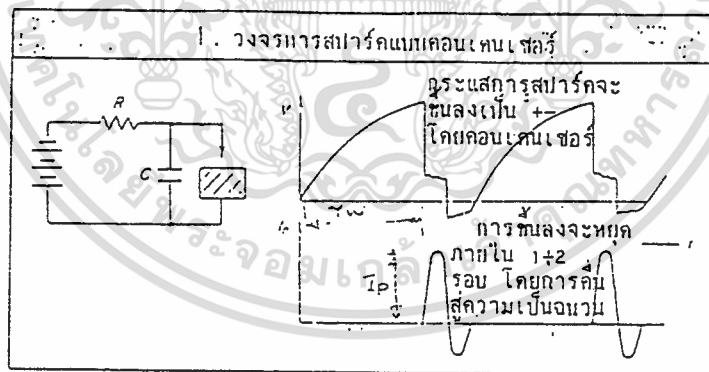
แต่ทว่าในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่า ส่วนที่เริ่มต้นของพัลส์การสปาร์ค (กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล) จะมีผลเกี่ยวข้องกับ การขึ้นรูป เราสามารถอธิบายสิ่งนี้ได้ว่า ถ้ากระแสไฟฟ้าเริ่มไหลอย่างรวดเร็ว แรงกระแทก (แรงดันการสปาร์ค) โดยการสปาร์คก็จะมีมากขึ้น ปริมาณโลหะหลอมละลายก็จะมีมากขึ้น และยังสามารถจัดเศษการขึ้นรูปให้กระจายไปอย่างเพียงพออีกด้วย

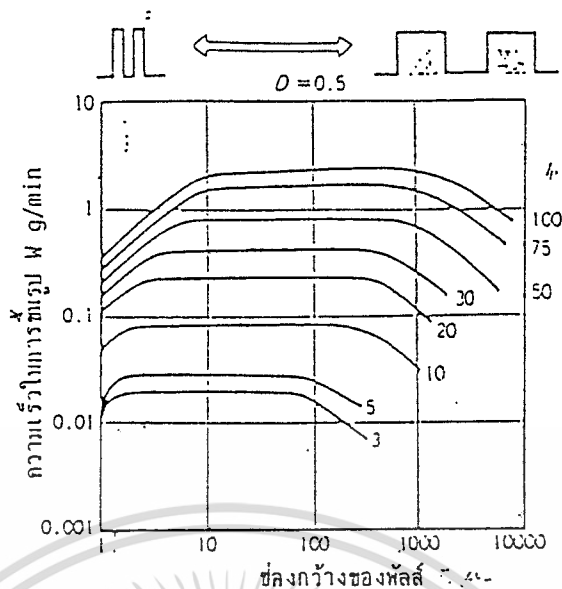
ถึงแม้ว่าการกำหนดตั้งให้เวลาการสปาร์ค τ_{∞} ยาวขึ้นก็ตาม แรงกระแทกโดยการสปาร์คก็จะมีมากขึ้น ปริมาณโลหะที่หลอมละลายในการสปาร์คแต่ละลูกคลื่นก็จะมีมากขึ้น และถ้า τ_{∞} ยาวจนเกินไป อาจจะมีผลในทางตรงกันข้ามคือ ทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปลดต่ำลงด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าต้องการความเร็วในการขึ้นรูปสูงขึ้น เรามีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป I_p ให้ใหญ่ขึ้น และควบคุมบังคับให้เวลาการสปาร์ค τ_{∞} จบลงในช่วงเวลาที่เหมาะสม

แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีปัญหาเหลืออยู่ ดังที่สามารถเข้าใจได้ในรูป 2.15 การทำให้กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป I_p มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะทำให้มีเวลาในการเริ่มไหล (STARTING TIME) ของกระแสไฟฟ้ายาวขึ้นไปด้วย การที่กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปเพียงแต่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ นั้น จะไม่ทำให้แรงกระแทกโดยการสปาร์คใหญ่ขึ้นด้วยเลย

ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมคือ ใช้วงจรการสปาร์คที่สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่อันเริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ถ้าพิจารณาจากคุณสมบัติพิเศษของคอนเดนเซอร์แล้ว เราไม่สามารถหวังได้ว่า วงจร RC จะสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าการสปาร์คเริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้

คราวนี้เราจะลองมาพิจารณาเกี่ยวกับความเร็วในการขึ้นรูป ความเร็วในการขึ้นรูปนี้จะมีอิทธิพลสำคัญมากในการคำนึงถึงประสิทธิภาพการผลิต และการลดต้นทุนการผลิต ความเร็วในการขึ้นรูปหมายถึง ปริมาณที่สามารถขจัดออกไปได้ (ปริมาณการขึ้นรูป) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในกรณีของการขึ้นรูปประเภทตัดได้นั้น ถ้าทำให้ปริมาณการตัดลดลงในชิ้นงาน ปริมาณการป้อนส่งของมีดตัดมากขึ้น ความเร็วในการขึ้นรูปก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนในกรณีของการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คนั้น ถ้าพลังงานการสปาร์คที่ระหว่างขั้วมีระดับสูงขึ้น ปริมาณของโลหะหลอมละลายก็ควรจะมียิ่งมากขึ้น ซึ่งหมายความว่า ความเร็วในการขึ้นรูปก็จะสูงขึ้นไปด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้วจะค่อนข้างซับซ้อนมากกว่านี้เล็กน้อย





รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องกว้างของพัลส์กับความเร็วในการขึ้นรูป

นอกจากนั้นแล้ว ถ้าเป็นวงจร RC คอนเดนเซอร์จะใช้เวลามากในการปล่อยประจุไฟฟ้าที่สะสมไว้ออกมา ถ้าสังเกตด้วยตาของมนุษย์ธรรมดาจะเห็นว่าใช้เวลาสั้น ๆ เพียงชั่วพริบตาเดียว แต่ถ้าจะสังเกตแล้ววัดด้วยหน่วยเวลาระดับไมโคร จะทราบว่า การปล่อยประจุไฟฟ้าออกมาของคอนเดนเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษที่ใช้เวลาช้าในเชิงเปรียบเทียบ ถ้าจะเร่งให้เวลาในการขึ้นรูปเร็วขึ้น โดยการเริ่มชาร์ตประจุไฟฟ้าครั้งถัดไปทันที หลังจากที่มีการสปาร์คครั้งก่อนเพิ่งจบลงจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า การสปาร์คครั้งถัดไปขึ้นระหว่างขั้ว โดยที่การคืนสู่ความเป็นฉนวนยังไม่เพียงพอ ผลที่เกิดขึ้นก็คือ τ_{off} จะหายไป และการสปาร์คจะกลายเป็นแบบอาร์ค ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของระหว่างขั้วสูงขึ้นเกินไป จนผิวการขึ้นรูปหยาบเกินไป

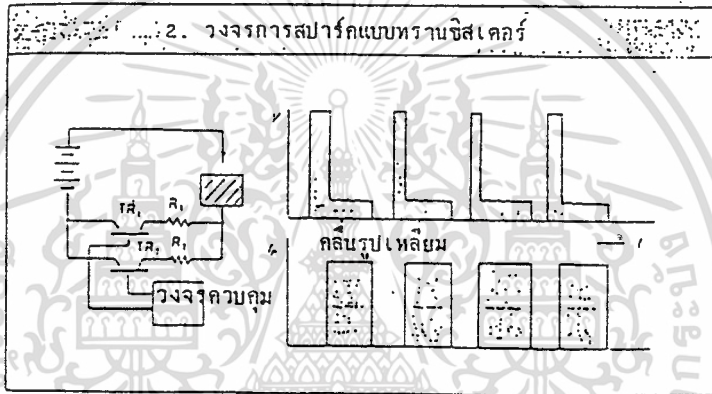
และถ้าพิจารณาถึงวงจรที่มีเฉพาะ RC เท่านั้น จะเห็นว่าวงจรดังกล่าวนี้ ขาดองค์ประกอบซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อคอยตัดกระแสไฟฟ้าการสปาร์ค ในระหว่างส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายไฟของการสปาร์คถึงระหว่างขั้ว ซึ่งหมายถึงว่า เมื่อประจุไฟฟ้าจากคอนเดนเซอร์ เริ่มถูกปลดปล่อยออกมาแล้ว จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอยู่ที่ประจุไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาจนหมด ในกรณีเช่นนี้ ถึงแม้ว่า เราต้องการที่จะหยุดกลางคันระหว่างการสปาร์ค ก็ทำไม่ได้

ดังนั้นเราสามารถที่จะกล่าวได้ว่า คุณสมบัติพิเศษของการสปาร์คของวงจร RC จะถูกกำหนดตายตัวลงไปตามองค์ประกอบต่าง ๆ คือคอนเดนเซอร์, ตัวต้านทาน, คุณสมบัติพิเศษของแวนระหว่างขั้ว ซึ่งหมายถึงว่า เราไม่สามารถที่ควบคุมปรับเวลาของ τ_{on} , τ_{off} ตามต้องการได้

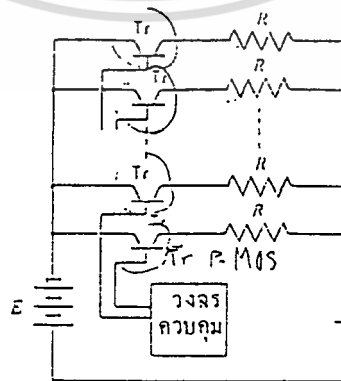
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการยินยอมจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยุคสมัยของทรานซิสเตอร์

พัฒนาการของวงจรการสปาร์คนั้น เป็นประวัติศาสตร์ของการคิดค้นหาวิธีที่จะควบคุมพลังงานของการสปาร์ค ถ้าเป็นวงจร RC เราไม่สามารถที่จะควบคุมกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า จังหวะ (timing) ของพัลส์การสปาร์คตามต้องการ ดังนั้นจึงได้เคยมีการทดลองใช้หลอดสูญญากาศทำหน้าที่เป็นสวิทช์ในวงจรสปาร์คมาแล้ว แต่ไม่สามารถที่จะพัฒนาขึ้นมาจนใช้งานได้ เราสามารถกล่าวได้ว่าวิวัฒนาการของเครื่อง EDM นั้น มีความสัมพันธ์กับการคิดค้นทรานซิสเตอร์ขึ้นมาได้เช่นเดียวกับอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 วงจรการสปาร์คแบบทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.7 วงจรทรานซิสเตอร์แบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรการสปาร์คแบบทรานซิสเตอร์ จะมีโครงสร้างดังรูป 2.6 ถ้าใช้สวิทช์ในการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเพาเวอร์ซัพพลายกระแสตรง (แหล่งจ่ายไฟการสปาร์ค) เกิดการ ON ในช่วงที่สั้น ๆ จะทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นที่ระหว่างขั้ว และใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวเปิดปิด (switching) ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ดังกล่าวนี้ ยิ่งไปกว่านั้นจังหวะในการส่งจ่ายไปยังระหว่างขั้ว จะขึ้นโดยตรงกับคุณสมบัติการเปิดปิด (สวิทช์แบบไร้จุดสัมผัส) ของทรานซิสเตอร์ วงจรนี้จึงสามารถที่จะทำการเปิดปิดสลับกันไปอย่างรวดเร็วมากและถ้าสวิทช์อยู่ในสภาพ OFF จะไม่มีแรงดันการสปาร์คอยู่ที่ระหว่างขั้ว ทำให้วงจรสามารถควบคุมการตัดต่อกระแสไฟฟ้การสปาร์คได้อย่างสมบูรณ์ การต่อทรานซิสเตอร์หลายตัวในแบบขนาน ดังในรูป 2.7 เพื่อที่จะแบ่งกระจายภาระโหลด ตามค่าของกระแสไฟฟ้การขึ้นรูปของแต่ละช่วง เพราะมีฉะนั้น ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะรับโหลดมากเกินไป

ดังนั้น ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเปิดปิดของทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ ก็จะทำให้วงจรการสปาร์คทำงานได้อย่างคล่องตัวและขอบเขตกว้างขวาง โดยเฉพาะการควบคุมเวลานอกจากนี้แล้ว ถ้านำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมแกนพิคคในการขึ้นรูป ซึ่งเป็นองค์ประกอบอีกอย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่อง EDM สมบูรณ์ขึ้น ก็จะทำให้สามารถป้อนแกนพิคคให้เหมาะสมกับสภาวะระหว่างขั้วได้

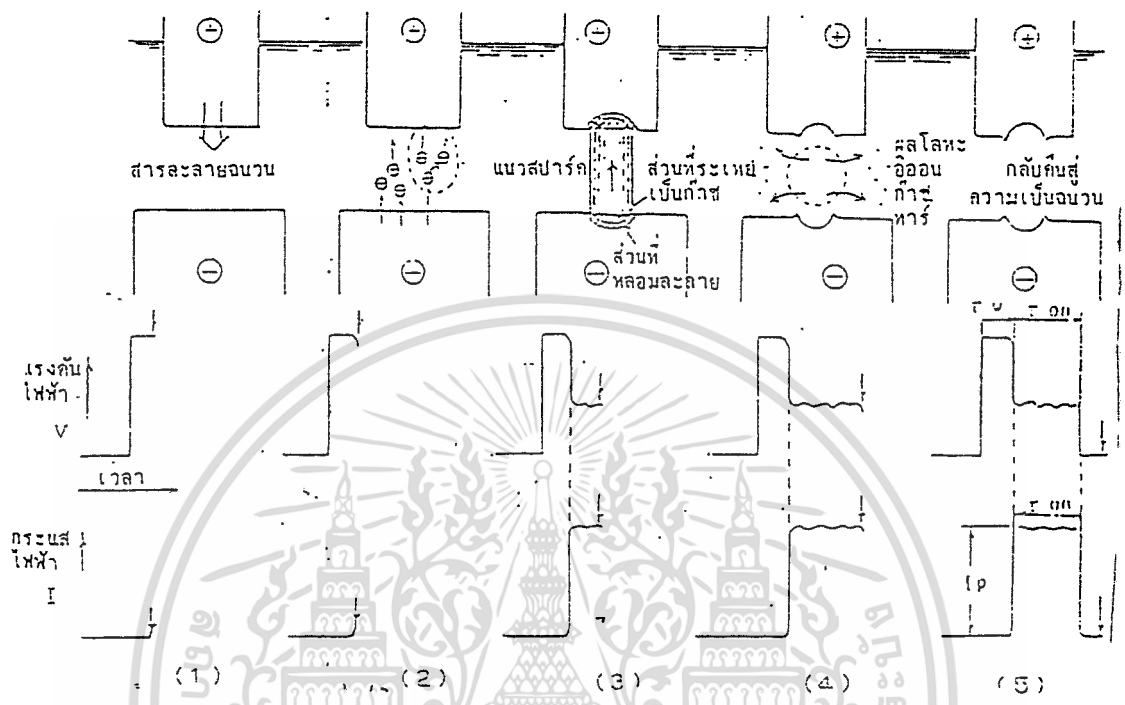
วงจรคอนเดนเซอร์ควบคุมด้วยทรานซิสเตอร์

วงจร RC นั้น มีจุดบกพร่องดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ว่าการสอคโศคอนเดนเซอร์ที่มีขนาดความจุน้อยเข้าที่ระหว่างขั้วของวงจรทรานซิสเตอร์ ก็จะสามารถเพิ่มขนาดของค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า I_p ขึ้นได้ (ในการใช้งานจริงนั้นวงจรสามารถที่จะ ON/OFF เฉพาะส่วนของคอนเดนเซอร์ได้ด้วยสวิทช์หรือคำสั่งจากระบบ NC)

ดังนั้นวงจรดังกล่าวจึงสามารถที่จะสร้างรูปร่างคลื่นของการสปาร์คที่มีค่าสูงสุดของกระแส I_p สูง และ τ_{on} สั้นขึ้นมาได้ ซึ่งลักษณะการสปาร์คเช่นนี้เหมาะสำหรับที่จะใช้ในงานขึ้นรูปละเอียด งานที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก ซึ่งไม่สะดวกในการใช้พลังงานสูง งานขึ้นรูปโลหะผสมคาร์ไบด์

2.2 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ในที่นี้เราจะมาคุยกันถึงว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเช่นไร



รูปที่ 2.9 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วย EDM

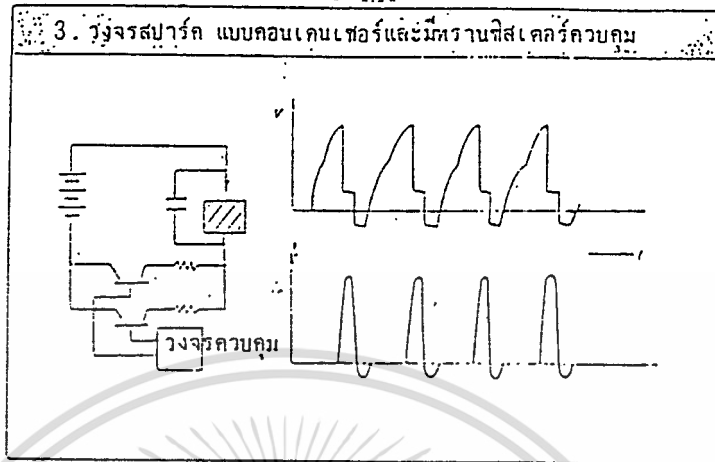
จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. ใส่แรงดันไฟฟ้า

ก่อนอื่นจะมีการใส่แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว ซึ่ง แรงดันไฟฟ้านี้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด (no-load voltage,ประมาณ 60-80 V) ในสภาพเช่นนี้ ขั้วยังคงรักษาความเป็นฉนวนได้ออยู่ จึงไม่มีกระแสไหล

ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงาน (ทำให้ระยะห่างขั้วแคบลง) จนถึงระยะหนึ่งจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้น ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบเริ่มไหล กล่าวคือ เริ่มมีกระแสไหล



รูปที่ 2.8 วงจรสปาร์ก แบบคอนเดนเซอร์และมีทรานซิสเตอร์ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อการสปาร์คเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้ว จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง $E = IR$ ตามกฎของโอห์ม แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกกันว่า แรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (discharge voltage)

ง. เย็นตัว

ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลในระดับค่าๆหนึ่ง แต่ทว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา แรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

จ. กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

เมื่อการสปาร์คเสร็จสิ้นลง ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะกลับกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะวาดรูปร่างของคลื่นในการสปาร์คได้ดังรูปดังกล่าวนี

2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญ

- “ เวลาการสปาร์ค T_{on} ” คือเวลาที่กระแสการสปาร์คไหล
- “ เวลาหยุดการสปาร์ค T_{off} ” คือเวลาตั้งแต่สปาร์คเสร็จจนถึงที่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลครั้งถัดไป
- “ ค่ากระแส peak I_p ” คือค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า
- “ เวลาจนถึงเริ่มเกิดการสปาร์ค T_w ” มีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะระหว่างขั้ว แรงดันไฟฟ้า ค่าความต้านทานของฉนวนสารละลายในตอนนั้น

I_p , T_{on} , T_{off} , แรงดันไฟฟ้าไว้ไหล (V) เป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ปฏิบัติงานจะกำหนดตั้งขึ้นตามแต่ละภาวะในการขึ้นรูป ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมากในการกำหนดระดับของพลังงานการสปาร์คเมื่อเปรียบเทียบกับในหมู่พารามิเตอร์ต่างๆของเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ซึ่งมีจำนวนมาก

ขอบเขตของการกำหนดตั้งค่าต่างๆ เกี่ยวกับเพาเวอร์ซัพพลาย NC สำหรับการขึ้นรูปด้วย EDM. ที่บริษัทโซคิกส์ไอซ์อยู่ (MARK 10) มีดังต่อไปนี้คือ

$$I_p = 0.1-50 \text{ A} , \text{ แรงดันไว้ไหล} = 60-120 \text{ V}$$

$$T_{on} = 1-2500 \mu\text{sec (EDM)} , 0.5-5 \mu\text{sec (wire out)}$$

$$T_{off} = 3-250 \mu\text{sec (EDM)} , 1-25 \mu\text{sec (wire out)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<ข้อมูลประกอบ> $1 \mu\text{sec} = 1/1,000 \text{ msec}$, $1 \text{ msec} = 1/1,000 \text{ sec}$

$1 \mu\text{sec} = 1/1,000,000 \text{ sec}$

ต่อไปจะกล่าวถึงเงื่อนไขการขึ้นรูปที่ใช้ในงานปฏิบัติจริง (โปรตุกรูป 4.2 ประกอบ)

C170 เป็นเงื่อนไขหนึ่งของการขึ้นรูปหยาบ (roughing) C300 เป็นเงื่อนไขหนึ่งในเงื่อนไขของการขึ้นรูปละเอียด (finishing) เงื่อนไขทั้งสองนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าไว้โหลดเท่ากัน แต่การขึ้นรูปหยาบจะใช้ ที่ประมาณ $350 \mu\text{sec}$ ในขณะที่การขึ้นรูปละเอียด ใช้เพียง $12 \mu\text{sec}$ ซึ่งสั้นกว่า ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกระแสในการขึ้นรูปหยาบคือ 14 A และสำหรับการขึ้นรูปละเอียดคือ 1 A

พลังงานการสปาร์กที่ช่วยในการขึ้นรูปนั้น มีค่าเป็นผลคูณระหว่างขนาดกระแส I_p กับเวลาการสปาร์ก T_{on} จากตัวอย่างที่ยกมานี้ พลังงานของการขึ้นรูปละเอียด จะมีค่าเพียง 1/400 ของการขึ้นรูปหยาบ จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสในการขึ้นรูป I_p และเวลาการสปาร์ก T_{on} จะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะกำหนดระดับพลังงานของการสปาร์ก

เวลาหยุดการสปาร์ก T_{off} จะเป็นเวลาสำหรับรอให้สารละลายกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน ซึ่งถ้าเวลานี้สั้นเกินไป จะทำให้แรงดันไฟฟ้าไว้โหลดสำหรับการสปาร์กครั้งถัดไปถูกอัดเข้ามา ในขณะที่ฉนวนยังไม่คืนสู่สภาพเดิม ซึ่ง หมายความว่า ได้เริ่มการสปาร์กต่อเนื่องไป โดยไม่มีเวลาของการสปาร์ก T_w การสปาร์กเช่นนี้เรียกกันว่า การสปาร์กแบบอาร์คซึ่งไม่เหมาะสำหรับการขึ้นรูป

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดตั้ง T_{off} ให้ยาวจนเกินไป จำนวนของพัลส์ การสปาร์กต่อรอบเวลาจะลดลง ซึ่งก็คือ พลังงานการสปาร์กจะน้อยลง ทำให้ปริมาณที่ถูกตัดออกไปในการขึ้นรูป หรือความเร็วการขึ้นรูปลดต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปต่ำลงด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดช่วงเวลาดังกล่าวนี้ให้เหมาะสมพอดี

ค่ากระแสในการขึ้นรูป I_p และเวลาการสปาร์ก T_{on} เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ก ส่วน T_{off} นี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการ “ควบคุม” พลังงานการสปาร์ก

ในบางกรณีถึงแม้ว่าสภาพการสปาร์ก ในการขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขหนึ่งจะดำเนินผ่านมาด้วยดีก็ตาม ถ้าหากว่า การขึ้นรูปได้ถูกดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยที่ไม่สามารถขจัดเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ก หรือสิ่งเจือปนอื่นซึ่งสลายตัวแยกออกมาจากสารละลาย โดยความร้อนออกจากระหว่างขั้วได้หมด ซึ่งทำให้เกิดการสปาร์กซ้ำ อันเป็นการลดประสิทธิภาพ การขึ้นรูปให้ต่ำลง หรืออาจจะเปลี่ยนสภาพการสปาร์กไปเป็นแบบอาร์ค ซึ่งทำให้การขึ้นรูป ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ในกรณีเช่นนี้ จะต้องยืดเวลา T_{off} ให้ยาวขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้มีเวลาพอ ที่ระหว่างขั้วจะกลับคืนสู่สภาพปกติ

การคอยสังเกตรูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว จะทำให้สามารถทราบถึงสภาพดังกล่าวได้ และหัวข้อปัญหาที่สำคัญ สำหรับเครื่อง EDM. ในปัจจุบันนี้คือ การควบคุมการขึ้นรูปให้มีเสถียรภาพโดยการใช้อุปกรณ์ระบบ NC เพื่อควบคุมพัลส์การสปาร์ก ดังนั้น บริษัทที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ จึงกำลังพยายามเต็มที่ในการพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ขึ้นมา

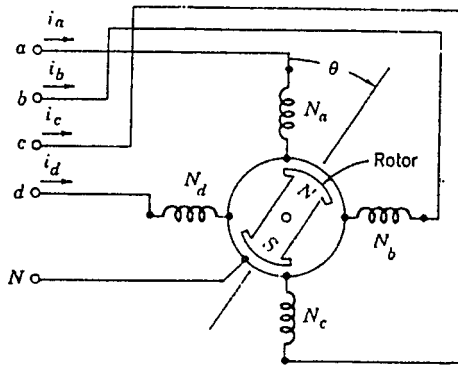
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

มอเตอร์แบบก้าวหรือขั้น (Stepping Motors)

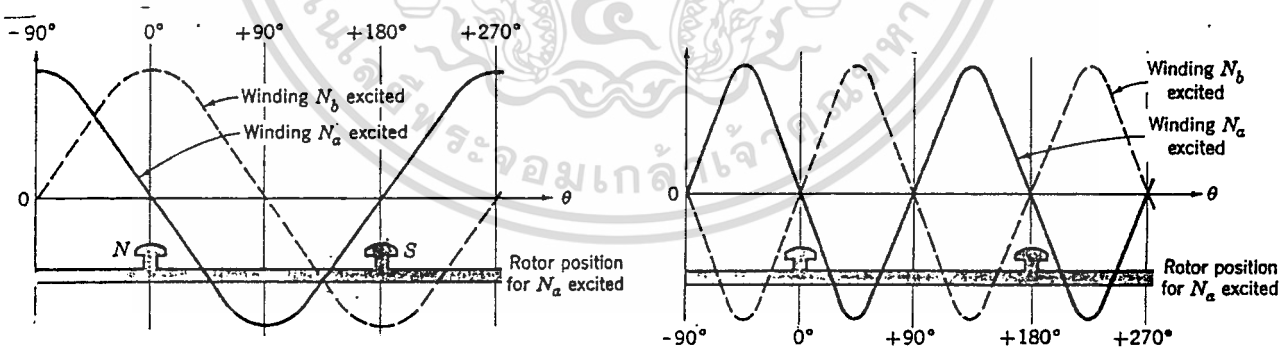
มอเตอร์แบบก้าวนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของซินโครนัสมอเตอร์ ซึ่งออกแบบให้หมุนได้ไปเป็นก้าวหรือขั้นหรือองศาตามที่ต้องการ การหมุนไปตามองศาที่ต้องการของมอเตอร์แบบนี้ขึ้นอยู่กับพัลส์ไฟฟ้า (electrical pulse) ที่ได้รับมาจากหน่วยควบคุม แบบอย่างในการเคลื่อนที่ 2° 2.5° 5° 7.5° และ 15° ต่อพัลส์ มอเตอร์แบบนี้ใช้ในระบบควบคุมต่าง ๆ ที่เป็นดิจิทัลโดยการรับคำสั่งจากวงเปิด (open-loop) เป็นขบวนพัลส์ (pulses train) คำสั่งพัลส์ที่ใส่ไปยังคำสั่งต่าง ๆ ตามที่ต้องการนั้น ทำให้ตัวหมุนเคลื่อนไปตามระยะที่กำหนดไว้ แบบอย่างที่น่ามอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้งานก็คือ การกำหนดตำแหน่งของแท่งเคลื่อนมือสองมิติ เพื่อใช้ในเจาะรูวัตถุให้ได้ตามต้องการตามที่กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ของรูไว้ในเทปกระดาษที่ใช้สั่งงานนั้น โดยปกติแล้ว การใช้มอเตอร์แบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบป้อนกลับ หรือตรวจสอบความถูกต้อง (sensor) ของตำแหน่ง หรือการเคลื่อนที่ของสิ่งที่ต้องการ ทั้งนี้เพราะมอเตอร์แบบนี้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ได้ตามตำแหน่งที่ได้รับมา มอเตอร์ดังกล่าวนี้สามารถรับคำสั่งพัลส์ได้สูงถึง 1200 พัลส์ ต่อ วินาที และยังรับคำสั่งตาม พิกัดได้หลายกิโลวัตต์ด้วย

มอเตอร์แบบก้าวนี้ ปกติแล้วออกแบบมาให้มีขั้วแม่เหล็กเป็นจำนวนมากที่ตัวหมุน และมีชุดขดลวดหลายเฟสที่ตัวอยู่กับที่ ซึ่งจะไม่เหมือนกับมอเตอร์ธรรมดาที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปแบบที่ใช้กันอยู่เป็นแบบที่มีชุดขดลวดเป็น 3 และ 4 เฟส โดยที่จำนวนขั้วแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้ตัวหมุนเคลื่อนที่ไปได้กี่องศาต่อพัลส์ ตัวหมุนอาจเป็นชนิดที่ความต้านทานแม่เหล็กแปรเปลี่ยน (variation-reluctance) หรือชนิดแม่เหล็กถาวร การทำงานนั้นต้องอาศัยการขับพัลส์จากวงจรตรรก (logic circuit) ภายนอก เช่น ใส่ขบวนพัลส์เข้าไปในชุดขดลวด เพื่อให้แกนแม่เหล็กในช่องอากาศเปลี่ยนไปตามตำแหน่งและจำนวนพัลส์ที่ใส่เข้าไปในขดลวดนั้น เมื่อใส่พัลส์ไปในขดลวดที่ตัวอยู่กับที่ ซึ่งอาจใส่ไปที่ชุดใดชุดหนึ่ง หรือหลายชุดก็ทำให้ตัวหมุนเปลี่ยนตำแหน่งไปตามตำแหน่งที่ขดลวดและพัลส์นั้นอยู่ในขณะที่รับไฟเข้าไป การเคลื่อนที่ของตัวหมุนนี้เกิดจากแรงบิดความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance torque) และ หรือแรงบิดแม่เหล็กถาวร โดยที่การเคลื่อนที่ขึ้นกับอัตราของพัลส์ที่ใส่เข้าไป และแรงบิดที่ต้องการให้เกิดขึ้นรวมทั้งค่าความเฉื่อยของตัวหมุนด้วย



รูป 3.1 แผนภาพเบื้องต้นของมอเตอร์แบบก้าวที่มี 4 - เฟส

หลักการทํางานเบื้องต้นของมอเตอร์แบบก้าว ที่มี 2 แม่เหล็กที่ตัวหมุน และมี 4 เฟสที่ตัวอยู่กับที่นั้นได้แสดงไว้ตามรูป 3.1 ในกรณีที่ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร และ มีการเคลื่อนที่ของตัวหมุนเป็น $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ \dots$ เราต้องใส่พัลส์ไปที่ขด N_a, N_b กับ $N_c, N_d \dots$ ตามลำดับ แต่ถ้าต้องการให้เคลื่อนที่จาก 0° ไปยัง 90° นั้น ก็ทำได้สำหรับตัวที่เป็นแม่เหล็กถาวรโดยเปลี่ยนการใส่พัลส์จาก N_a ไปยัง N_b โดยใส่เข้าไปที่ละขดเท่านั้น การเคลื่อนที่ละ 90° นี้ ใช้ได้เฉพาะตัวหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวรเท่านั้น ในกรณีที่ตัวหมุนเป็นสารแม่เหล็ก ก็ยอมได้การเคลื่อนที่ซึ่งแตกต่างไปจากชนิดแม่เหล็กถาวร ดังรูป 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของมุมกับแรงบิดของตัวหมุนทั้ง 2 ชนิด

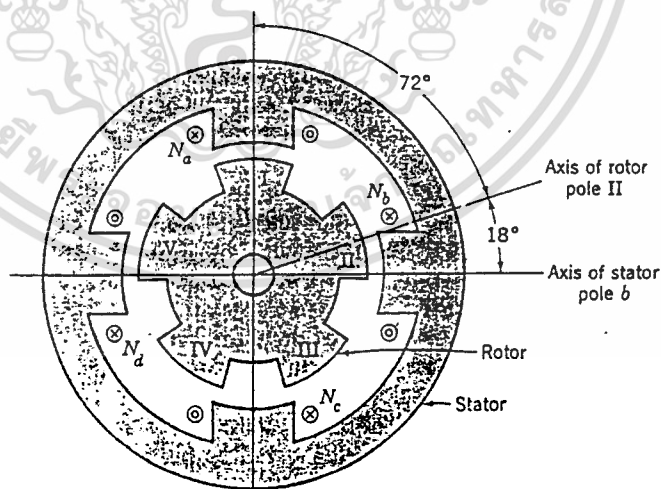


รูป 3.2 ระยะเคลื่อนหรือมุม θ กับแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์แบบก้าว จากรูป 3.2 เมื่อ a) ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร b) ตัวหมุนเป็นสารแม่เหล็ก

จากรูป 3.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกระตุ้นเลื่อนไป 90° นั้น จะทำให้เกิดแรงบิดสูงที่สุดขึ้นที่ตัวหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนด แต่ถ้าตัวหมุนที่เป็นสารแม่เหล็กหรือค่าความต้านทานที่แปรเปลี่ยนได้นั้น จะมีแรงบิดเป็นศูนย์ และยังไม่ทราบว่าจะเคลื่อนที่ไปทาง

ใดดี ตัวอย่างเช่น ที่มุม 0° เกิดแรงกระทำเป็น + สูงสุดบนตัวหมุนในทิศทาง $+\theta$ เมื่อขดลวด N_c ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับการกระตุ้นด้วยพัลส์แต่ชุดขดลวด N_u เกิดแรงกระทำบนตัวหมุนเป็นศูนย์(\therefore ยังไม่ได้ใส่ไฟเข้าไป) แต่เมื่อเปลี่ยนการกระตุ้นไป 90° ไปที่ขดลวด N_v เกิดแรงบิดสูงสุดกระทำที่ตัวหมุนในทิศทาง $+ \theta$ เป็นลบ โดยที่แรงบิดเนื่องจากชุดขดลวด N_u เป็นศูนย์ และเมื่อเลื่อนไปอีก 90° คือ ที่ตำแหน่ง 180° ก็จะทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่กระทำกับตัวหมุนในทิศทาง $+ \theta$ เป็นลบสูงสุดที่ขด N_u แต่แรงกระทำบนตัวหมุนเนื่องจากขดลวด N_u เป็นศูนย์ในทิศทาง $+ \theta$ และถ้าเลื่อนการกระตุ้นไปอีก 90° เป็น 270° ก็จะพบว่าแรงบิดที่กระทำบนตัวหมุนอันเนื่องมาจากการกระตุ้น N_u มีค่าเป็นบวกสูงสุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจะมีแรงบิดสูงสุดกระทำกับตัวหมุนอันเนื่องจากชุดขดลวด N_u และ N_v ได้รับการกระตุ้นสลับกันไป แต่ถ้าเป็นตัวหมุนชนิดสารแม่เหล็ก จะพบว่าการเลื่อนตำแหน่งการกระตุ้นไปทีละ 90° นั้น แรงบิดที่กระทำกับตัวหมุนในทิศทาง $+ \theta$ เป็นศูนย์ตลอดไปที่มีการเลื่อนการกระตุ้นทีละ 90° และยังไม่ทราบว่าจะเคลื่อนไปทางทิศใด จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่า ในขณะที่ตัวหมุนซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรนั้นเกิดแรงบิดสูงสุดขึ้น ตัวหมุนที่เป็นแบบสารแม่เหล็กกลับเกิดแรงบิดเป็นศูนย์ โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่ไม่แน่นอนตามตำแหน่งที่กระแสที่ใส่เข้าไปในขดลวด และแทนที่จะเคลื่อนที่ในทิศ $+ \theta$ ตามตำแหน่งชุดขดลวดที่เปลี่ยนไป 90° กลับกลายเป็นว่า ชุดขดลวดที่ได้รับการกระแสมองเห็นการเคลื่อนที่ไปแค่ 22.50° , 11.25° และน้อยกว่าต่อหนึ่งพัลส์ที่มันได้รับเข้าไป



รูป 3.3 รูปตัดของมอเตอร์แบบก้าวที่มีการทำงานแบบผลต่าง

เพื่อให้ได้ก้าวที่เล็กกว่าของมุมที่ตัวหมุนเคลื่อนที่ไปนั้น สามารถทำให้มอเตอร์มีโครงสร้างแตกต่างไปจากที่กล่าวมาแล้ว โดยทำให้มอเตอร์มีชุดขดลวดพันที่ตัวอยู่กับที่เป็นแบบ 2 เฟส โดยที่ตัวหมุนมีขั้วยื่นออกมา 5 ขั้ว ตามรูป 3.3 จากรูปดังกล่าวเห็นได้ว่า ตัวหมุน (ขั้ว I)

อยู่ในตำแหน่งภายใต้ขั้ว a ในขณะที่ขั้ว N_s ได้รับความเข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้าหรือกระแสที่รับย้ายไปยังขั้ว N_s ตัวหมุนก็หมุนไปเป็นมุม $\theta = 90 - 72^\circ = 18^\circ$

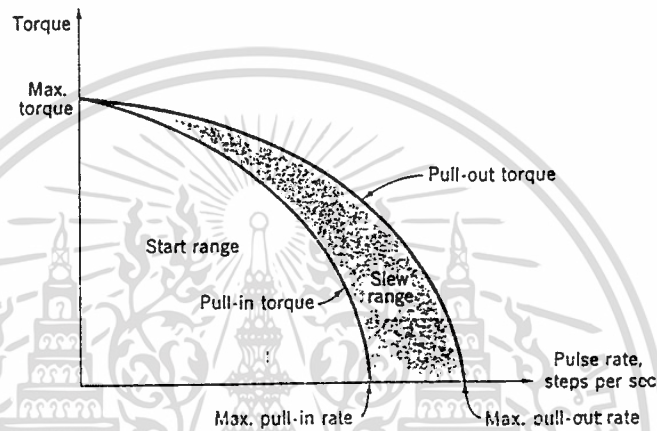
ทั้งนี้เพื่อให้แนวแกนของขั้วแม่เหล็กที่ I I อยู่ในแนวแกนของขั้วแม่เหล็ก b ที่ตัวอยู่กับที่ ตัวหมุนที่ใช้นี้อาจเป็นแบบสารแม่เหล็กหรือใช้แม่เหล็กถาวรก็ได้ โดยปกติแล้ว โครงสร้างของตัวหมุนนั้นจัดวางขั้วแม่เหล็กไปตามแนวแกน ดังรูป 3.4 (ขั้วแม่เหล็ก N - S รูปทรงกระบอก) และมีสารแม่เหล็กที่ไ้ขึ้นรูปเป็นขั้วแม่เหล็กอีก 5 ขั้ว ประกอบหัวท้ายของขั้วแม่เหล็กทั้งสองนี้ จากโครงสร้างดังกล่าวนี้ ช่วยทำให้แรงบิดความต้านทานแม่เหล็กน้อยลง และทำให้มอเตอร์มีการตอบสนองต่อกระแสที่ไหลในขดลวดอย่างรวดเร็ว และยังช่วยให้วัสดุของแม่เหล็กถาวรได้รับการแม่เหล็กที่ไม่เพี้ยนไป (uniform magnetic loading) ด้วย



รูป 3.4 ตัวหมุนของมอเตอร์แบบถาวรที่มีขั้วแม่เหล็กถาวรอยู่ในแนวแกน

คุณลักษณะของมอเตอร์แบบถาวรนี้ มักแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับอัตราการก้าวของพัลส์ที่ใส่เข้าไปยังหน่วยขับ (drive unit) ดังรูป 3.5 ในขณะที่อัตราการก้าวเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะให้แรงบิดลดลง รับประทานทั้งนี้เพราะเวลาที่ตัวหมุนจะขับโหลดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งจะสั้นลง อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห่งหนึ่ง ในขณะที่กระแสที่ไหลในขดลวดที่ควอยู่กับที่เปลี่ยนไปอยู่ขดลวดอื่นนั้นมิตัวเวลาในการขยับน้อยลงไป ช่วงการเริ่มขยับ (start range) ของรูป 3.5 นั้น โหลดจะวิ่งตามพัลส์ต่างๆ โดยไม่มีการหลุดจากก้าวเหล่านั้น ช่วงแกว่ง (slew range) ก็คือ ช่วงที่ความเร็วโหลดสามารถก้าวตามอัตราพัลส์ได้โดยไม่มีการหลุดจากพัลส์ไปจากพัลส์ต่างๆที่ได้รับ แต่ไม่สามารถที่จะหยุด เริ่มต้น หรือกลับคำสั่งที่ได้รับได้ จุดที่มีแรงบิดสูงสุดก็คือจุดที่มีแรงบิดสูงสุดในขณะที่มอเตอร์ได้รับการกระตุ้น เมื่อมอเตอร์มีโหลดที่แน่นอน (steady load) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดที่เบาๆนั้น อัตราการแกว่งสูงสุดสามารถขึ้นสูงได้จนถึง 10 เท่าของอัตราการตอบสนองต่อตำแหน่งการเคลื่อนที่นั้น



รูป 3.5 คุณสมบัติของมอเตอร์แบบก้าวของแรงบิดกับอัตราพัลส์

ข้อดีของมอเตอร์แบบนี้ ก็คือมีขนาดเล็กและราคาหน่วยที่ใช้มอเตอร์ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับส่วนต่าง ๆ ของระบบเซอร์โวที่ใช้ควบคุมความเร็ว หรือตำแหน่งแบบสัดส่วน (proportional position) มอเตอร์แบบก้าวชนิดที่ตัวหมุนมีความต้านทานแม่เหล็กแปรเปลี่ยน (variable-reluctance) นั้นทำงานที่ก้าวเล็ก ๆ เป็น 15° หรือน้อยกว่า หรือที่ตำแหน่งที่สามารถตอบสนองต่ออัตราของพัลส์ที่สูงขึ้นได้สูง 1200 พัลส์ต่อวินาที ส่วนแบบที่ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรทำงานได้ที่ก้าวใหญ่กว่า 90° โดยที่สามารถตอบสนองอัตราของพัลส์สูงสุดได้แค่ 300 พัลส์ต่อวินาทีเท่านั้น กรณำมอเตอร์ไปใช้งานต่าง ๆ นั้น มีทั้งพวกการกำหนดตำแหน่งแทน (table position) ของเครื่องมือกล เครื่องพิมพ์เส้นต่าง ๆ (line printers) ตัวขับเทปต่าง ๆ ตัวขับเข็มเครื่องบันทึกต่าง ๆ และเครื่องวาดรูปในแนวแกน x-y ต่าง ๆ โดยเฉพาะเครื่องป้อนกระดาษสำหรับเครื่องคำนวณประจำมือที่พิมพ์ออกมาเป็นตัวหนังสือนี้จะใช้มอเตอร์แบบก้าวที่มีขนาดเล็กมาก

บทที่ 4

สปริง

4.1 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ค่าความต้านแรงของวัสดุที่ใช้ทำลวดสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของลวดสปริง ดังนั้นจึงอาจเขียนในรูปสมการที่ใช้หาค่าความต้านแรงของวัสดุลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใดๆได้ ดังนี้คือ

$$\sigma_u = A/d^x \quad (4.1)$$

$$\tau_u = B/d^y \quad (4.2)$$

โดยที่ σ_u คือความต้านแรงดึงค่าสุด

τ_u คือความต้านแรงเฉือนทนทาน

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเป็น mm

ค่าคงที่โดยประมาณของสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2) แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ค่าความต้านแรงมีหน่วยเป็น N/mm^2 โดยค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ชนิดของวัสดุ	ขนาดลวด(mm)	x	y	A	B
Hard drawn wire (ASTM A227)	0.50–16.00	0.190	0.340	1780	560
Music wire (ASTM A228)	0.10–6.35	0.154	0.154	2150	565
Oil tempered wire (ASTM A229)	0.50–16.00	0.190	0.340	1855	560
Valve spring steel (ASTM 230)	1.50–6.25	0.100	0.150	1730	515
Cr–V steel (ASTM 231)	0.50–12.50	0.166	0.150	1976	515
Cr–Si steel (ASTM A401)	0.80–12.00	0.107	0.150	1965	515
Stainless steel (ASTM A313)	0.20–12.50	0.140	0.170	1840	360

4.2 ความเค้นในสปริงขดรับแรงกด

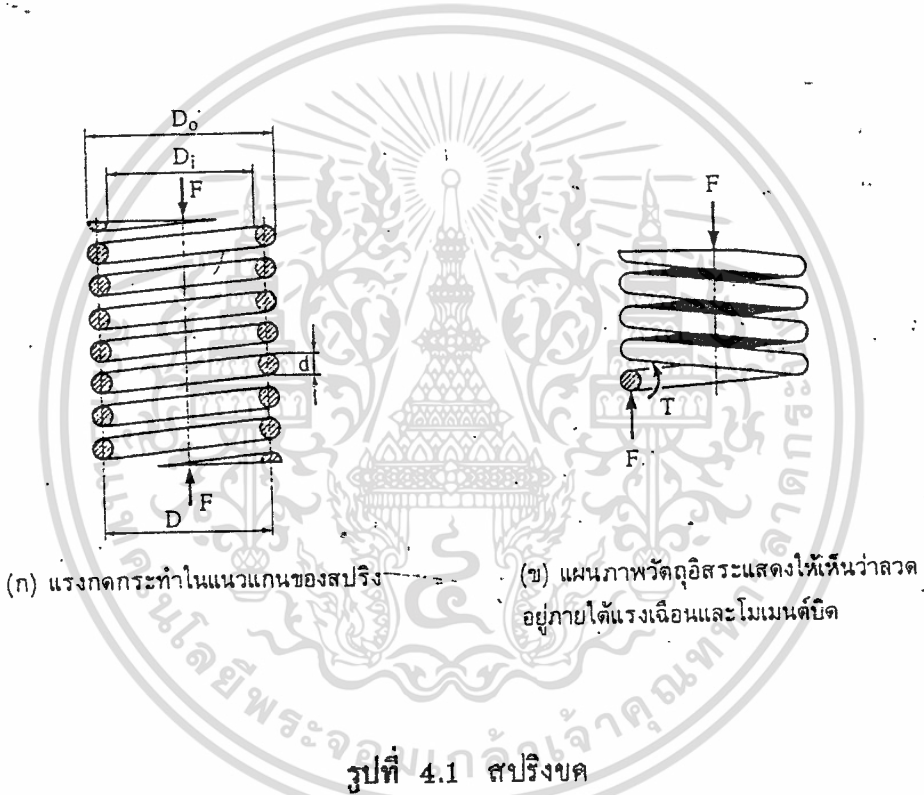
พิจารณาสปริงขดซึ่งรับแรงกด F ในแนวแกนของสปริงดังรูปที่ 4.1(ก) และให้

D_o คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดสปริง

D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดสปริง

$D = (D_o + D_i)/2$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดสปริง

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริง



ให้ตัดส่วนหนึ่งของสปริงออกมาพิจารณาจะเห็นได้ว่า ลวดสปริงอยู่ภายใต้แรงภายใน F และโมเมนต์บิด T ดังรูปที่ 4.1 (ข) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในลวดสปริงคือ

$$\tau = T/r + F/A \tag{4.3 ก}$$

แต่ $T = FD/2$

และ $J/r = (\pi d^4/32)/(d/2)$
 $= \pi d^3/16$

และ $A = \pi d^2/4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (4.3 ก) ใหม่ได้เป็น

$$\tau = 8FD/\sqrt[3]{d^3} + 4F/\sqrt[3]{d^2} \quad (4.3 \text{ ข})$$

ถ้าให้ $C = D/d$ ซึ่งเรียกว่าดัชนีสปริง (spring index) สมการที่ (4.3 ข) สามารถที่จะจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau = K_s(8FD/\sqrt[3]{d^3}) \quad (4.3 \text{ ค})$$

โดยที่ $K_s = 1 + (0.5/C)$

ค่า K_s นี้เรียกว่าตัวประกอบความเค้นเฉือน (shear stress correction factor) ซึ่งเป็นค่าทำให้ความเค้นเฉือนในสปริงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนตรง F/A

ในการคำนวณที่ผ่านมาได้ใช้สูตรความเค้นเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด T/r ซึ่งเป็นสูตรสำหรับการบิดชิ้นส่วนตรง เช่น เพลา แต่ในสปริง เส้นลวดบิดวนไปตามความโค้งของสปริงทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นสูงสุดบริเวณด้านในของสปริงขด วาห์ล(Wahl) ได้เสนอให้มีการแก้ไขความเค้นในสมการที่ (4.3 ค) โดยเพิ่มตัวประกอบความโค้ง (curvature correction factor) K_c เข้าไปในสมการ ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นดังกล่าวคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} K_c &= K_c K_s \\ &= (4C-1)/(4C-4) + (0.615/C) \end{aligned} \quad (4.4)$$

ค่า K นี้เรียกว่าตัวประกอบของวาห์ล(Wahl's factor) ดังนั้นความเค้นเฉือนในสมการที่ (3.3 ค) จึงกลายเป็น

$$\begin{aligned} \tau &= K(8FD/\sqrt[3]{d^3}) \\ &= K(8FC/\sqrt[3]{d^2}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.5) นี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อสปริงมีขดถี่เท่านั้น ถ้าให้ระยะพิชิตซ์ของสปริงยาว P และให้นำสปริงหนึ่งรอบมาคลี่ออก มุมขด α คือ

$$\tan \alpha = P/\sqrt[3]{D}$$

สำหรับสปริงขดรับแรงกด ถ้ามุมของสปริงขดที่ไม่มีแรงภายนอกมากกระทำเล็กกว่า 12° แล้ว ก็ให้ถือว่าสปริงขดนั้นมีขดถี่ได้

4.3 การออกแบบสปริงขดรับแรงกด

การออกแบบสปริงมักจะต้องใช้วิธีทดลองแก้ความคลาดเคลื่อน (trial-and-error) บางครั้งก็มีข้อจำกัดอย่างอื่นซึ่งทำให้การออกแบบยากขึ้นไปอีก เช่น ขนาดจำกัดของช่องใส่ขดสปริง เป็นต้น โดยปกติแล้วสปริงขดจะขยายตัวกว้างออกเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้แรงกด ดังนั้นในกรณีที่มีช่อง

ว่างจำกัดก็อาจจะต้องเหลือช่องไว้โดยรอบสปริงประมาณ $d/4$ การขยายตัวของสปริงอาจจะประมาณค่าได้จากสมการ

$$D'_0 = [D_0^2 + 0.1E^2]^{1/2} \quad (4.6)$$

โดยที่ D'_0 คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสปริงขดหลังขยายตัว
 D_0 คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสปริงขดก่อนขยายตัว
 $E = (Lf - d(n-n))/n$

การคำนวณเกี่ยวกับสปริงขดอาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

1. ให้คิดว่าแรงที่มากระทำต่อตัวสปริงเป็นแบบอยู่หนึ่ง แล้วคิดว่าแรงที่กระทำกับสปริงนั้นจัดอยู่ในงานประเภทใด ซึ่งแบ่งออกเป็น

(ก) งานเบา (light service) หมายถึงแรงที่มากระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงไม่เกิน 10^4 ครั้ง

(ข) งานปานกลาง (average service) หมายถึงแรงที่มากระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงอยู่ระหว่าง 10^4 ถึง 10^6 ครั้ง

(ค) งานหนัก (severe service) หมายถึงแรงที่มากระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงมากกว่า 10^6 ครั้ง

2. ให้พิจารณาว่าแรงเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดไปถึงต่ำสุด แล้วคำนวณออกแบบสปริงโดยใช้สมการลักษณะเดียวกับของไซเคอร์เบอร์ค สำหรับการคำนวณโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้สปริงมีอายุการใช้งานไม่จำกัด (indefinite life)

4.4 การออกแบบสปริงขดโดยคิดให้แรงอยู่หนึ่ง

ในการออกแบบสปริงขดโดยคิดให้แรงอยู่หนึ่ง ให้ใช้ค่าความเค้นเฉือนที่แสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 เป็นค่าความเค้นออกแบบ แต่ถ้าสามารถได้ข้อมูลที่แน่นอนจากผู้ผลิตวัสดุสำหรับลวดสปริง ได้ก็ควรที่จะใช้ค่านั้นแทน

ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นเดือ้นอกแบบสำหรับวัสดุสปริง

วัสดุลวดสปริง	ความเค้นเดือ้นอกแบบ T_d		
	งานเบา	งานปานกลาง	งานหนัก
Hard drawn wire (ASTM A227)	$0.344\sigma_u$	$0.275\sigma_u$	$0.244\sigma_u$
Stainless steel (ASTM A313)	$0.320\sigma_u$	$0.260\sigma_u$	$0.210\sigma_u$
วัสดุอื่นๆในตารางที่ 4.1	$0.405\sigma_u$	$0.324\sigma_u$	$0.263\sigma_u$

ทางด้านการผลิตสปริงพบว่า ถ้าสปริงมีดัชนี C น้อยการม้วนหรือบดสปริงจะประสบปัญหาเรื่องการแตกร้าวของสปริง หรืออีกนัยหนึ่งคือการม้วนสปริงให้มีความโค้งมากจนเกินไปจะทำให้ได้ยาก ดังนั้นในการออกแบบสปริงควรจะให้หาค่าดัชนีสปริงมากพอสมควร โดยปกติแล้วไม่ควรจะให้น้อยกว่า 3 สปริงขดรับแรงกดที่ใช้งานอยู่ส่วนมากจะมีดัชนีสปริงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ทั้งนี้เพราะทำให้ไม่มีปัญหาทางด้านการผลิตและมีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี

ถึงแม้ว่าในการใช้งานสปริงบดจะไม่ถูกกดจนแข็งตัว แต่ในขณะที่ทำการติดตั้งสปริงหรือทำการซ่อมแซมชิ้นส่วนก็อาจจะมีการกดสปริงเข้าออกจนถึงความยาวแข็งตัวได้ เพื่อป้องกันความเสียหายของสปริง ในการออกแบบจึงจะให้ความเค้นเดือ้นในขณะที่สปริงถูกกดจนบดทุกขดคิดกันหมดน้อยกว่าค่า σ_y ของวัสดุเสมอ

3.5 การคำนวณออกแบบสปริง

เราเลือกใช้สปริง Stainless Steel (ASTM A313)

$$\text{จากสูตร} \quad \sigma_u = A/d^x$$

$$\tau_n = B/d^y$$

เปิดตารางคุณสมบัติทางกลของสปริงได้ค่า $A = 1840$, $x = 0.140$

$$\sigma_u = 1840/d^{0.140}$$

และค่าความเค้นเฉือน

$$\tau_n = 0.210\sigma_u = 386.4/d^{0.140} \text{ N/mm}^2$$

จาก

$$\tau = K(8FC/\pi d^2)$$

เราเลือกค่า $C = 10$ ดังนั้น $K = 1.14$

เลือกแรงขนาด 100 N

$$\text{ดังนั้น} \quad 386.4/d^{0.140} = 1.14 \times 8 \times 100 \times 10 / (\pi d^2)$$

$$d = 2.957 \text{ mm.}$$

เลือกใช้สปริงขนาด 3.20 mm.

$$\text{อัตราสปริงที่ต้องการ} \quad k = F/\delta = (100-90)/1 = 10 \text{ N/mm}$$

$$\text{ในที่นี้} \quad G = 80 \text{ kN/mm}^2 = 80,000 \text{ N/mm}^2$$

ฉะนั้นจำนวนขดทำการ

$$n = Gd/8kC^3 = (80000 \times 3.20) / (8 \times 10 \times 1000) = 3.2$$

ใช้สปริงแบบปลายตรงและเจียรระโน

$$n_s = 3.2 + 2 = 5.2 \text{ ขด}$$

ความยาวแข็งตัวของสปริง

$$L_s = d(n+2) = 3.2(5.2) = 16.64 \text{ mm}$$

ในขณะที่ใช้งานสปริงยุบตัวสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta_w = F/k = 100/10 = 10 \text{ mm}$$

ความเผื่อการกดคด

$$r_s = (\delta_s - \delta_w) / \delta_w = (\delta_s - 10) / 10, \quad \delta_s = 12 \text{ mm}$$

ดังนั้นความยาวอิสระ

$$L_f = 16.64 + 12 = 28.64 \text{ mm}$$

ตรวจสอบว่ามุมขดเกิน 12° หรือไม่

จากความยาวอิสระ

$$L_f = Pn + 2d$$

$$28.64 = P(3.2) + (2 \times 3.2)$$

$$P = 6.95 \text{ mm}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของสปริงขด

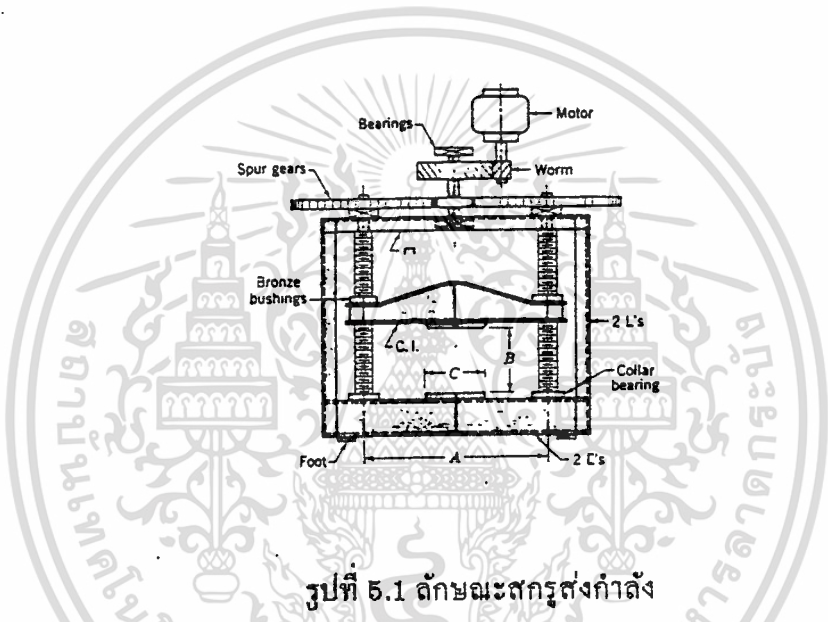
$$D = dC = 3.20 \times 10 = 32 \text{ mm}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(P/\pi D) = \tan^{-1}(6.95/\pi \times 32) = 3.95^\circ < 12^\circ$$

บทที่ 5 สกรูส่งกำลัง

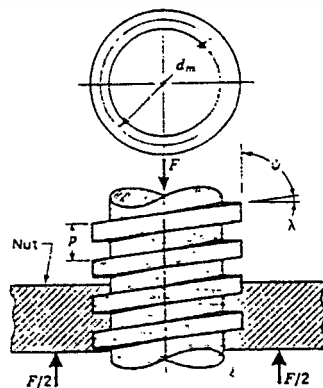
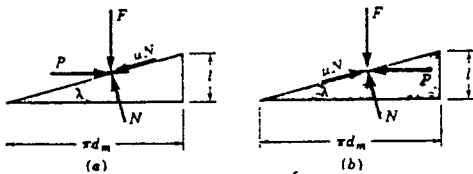
สกรูส่งกำลังเป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งโดยปกติจะใช้ในการส่งถ่ายกำลัง

จากรูปที่ 5.1 ใส่มอเตอร์ (T) ที่ปลายของสกรูผ่านไปยังชุดเกียร์ ซึ่งจะมีผลทำให้ที่กดเลื่อนลงกดขึ้นงาน



รูปที่ 5.1 ลักษณะสกรูส่งกำลัง

จากรูปที่ 5.2 สกรูเกลียวสี่เหลี่ยมหนึ่งปาก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_m ระยะพิทช์ p มุมหีส λ มุมเสถียร ϕ ได้รับแรงกระทำตามแนวแกน F เราจะสามารถหาสมการแรงบิดในการยกน้ำหนักขึ้นและลงตามที่ต้องการได้ดังนี้



รูปที่ 5.3

รูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 ฐานของสามเหลี่ยมคือเส้นรอบวง πd_m และความสูง l_c คือระยะทางที่สกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนของสกรู ในขณะที่สกรูหมุนไป 1 รอบ มุมระหว่างระนาบที่สัมผัสกับความเอียงของเกลียวและระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของสกรู คือมุมหลิศ λ แรง F คือผลรวมของแรงกระทำที่กระทำในแนวแกน ในการยกน้ำหนักขึ้นแรง P กระทำไปทางขวา ส่วนในการยกน้ำหนักลงแรง P กระทำไปทางซ้าย แรงเสียดทาน คือผลคูณของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ กับแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก ซึ่งจะกระทำในทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ สมดุลย์แรงจะได้

$$\Sigma F_H = P - N \sin \lambda - \mu N \cos \lambda = 0$$

$$\Sigma F_V = F + \mu N \sin \lambda - N \cos \lambda = 0$$

สำหรับการยกน้ำหนักขึ้น และ

$$\Sigma F_H = -P - N \sin \lambda + \mu N \cos \lambda = 0$$

$$\Sigma F_V = F - \mu N \sin \lambda - N \cos \lambda = 0$$

สำหรับการยกน้ำหนักลง และจะได้แรง P

$$P = [F (\sin \lambda + \mu \cos \lambda)] / (\cos \lambda - \mu \sin \lambda)$$

สำหรับการยกน้ำหนักขึ้น และ

$$P = [F(\mu \cos \lambda - \sin \lambda)] / (\cos \lambda + \mu \sin \lambda)$$

สำหรับการยกน้ำหนักลง

หารสมการเหล่านี้ด้วย $\cos \lambda$ และใช้ความสัมพันธ์ $\tan \lambda = 1 / (\pi d_m)$ จากรูป 5.3 จะได้

$$P = F[(1 / \pi d_m) + \mu] / (1 + (\mu / \pi d_m))$$

$$P = F[\mu - (1 / \pi d_m)] / (1 + (\mu / \pi d_m))$$

เมื่อแรงบิด (T) คือผลคูณของแรง P และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $d_m / 2$ ในการยกน้ำหนักขึ้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T = Fd_m \{ (1 + \pi \mu d_m) / (\pi d_m - \mu l) \} / 2$$

และในการเคลื่อนที่น้ำหนักลง

$$T = Fd_m \{ (\pi \mu d_m - 1) / (\pi d_m + \mu l) \} / 2$$

ในกรณีที่ระยะหัดมีค่ามาก หรือ แรงเสียดทานมีค่าน้อย จะทำให้น้ำหนักเคลื่อนที่ลงโดยปราศจากผลของแรงกระทำจากนอก ในกรณีนี้แรงบิดจากสมการที่แล้วจะมีค่าลบ ค่าที่เป็นบวกของสมการแรงบิด เรียกว่า เกิดการล็อกด้วยตนเอง (self-locking) ซึ่งมีเงื่อนไขว่า

$$\pi \mu d_m > 1$$

หารสมการด้วย πd_m ทั้งสองข้าง โดยที่ $1 / (\pi d_m) = \tan \lambda$ จะได้

$$\mu > \tan \lambda$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าจะเกิด self-locking เมื่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า $\tan \lambda$ เมื่อให้ $\mu = 0$ ในสมการแรงบิด จะได้

$$T_0 = Fl / (2\pi r)$$

และประสิทธิภาพคือ

$$e = T / T_0 = Fl / (2\pi r T)$$

จากสมการข้างต้นซึ่งใช้กับเกลียวสี่เหลี่ยม ซึ่งแรง F ขนานไปกับแกนองสกรู ในกรณีของ acme หรือ เกลียวอื่น ๆ ซึ่งมีมุมเกลียว มีค่า 2α ผลของมุมเกลียวคือจะไปเพิ่มแรงเสียดทาน ดังนั้นสมการแรงบิดเป็น

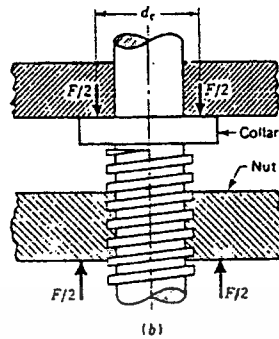
$$T = Fd_m \{ (1 + \pi \mu d_m \sec \alpha) / (\pi d_m - \mu l \sec \alpha) \}$$

นอกจากแรงที่กระทำต่อสกรูส่งกำลังตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว สกรูในรูป 5.4 ยังมีแรงเสียดทานที่บารองรับอีกด้วย ถ้าให้ μ_c แทนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวหน้าของบารองรับ และเส้นเกลียว จะได้แรงบิดที่เอาชนะแรงเสียดทาน

$$T_c = F \mu_c d_c / 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งจะต้องนำไปรวมกับสมการเดิมด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องส่งคืนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แรงที่เกิดขึ้นในสกรูส่งกำลัง

การออกแบบสกรูส่งกำลัง

ในการออกแบบควรจะต้องคิดถึงสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความเค้นวิกฤต (critical or buckling stress) ในการคำนวณหาขนาดของสกรูที่รับแรงกดแต่เพียงอย่างเดียว

ถ้าเป็นสกรูสั้นก็สามารถที่จะใช้สมการของความเค้นกด $L/k < 40$

$$\sigma_c = W/A_c$$

เนื่องจากพื้นที่เกลียวก็จะช่วยรับแรงนี้ด้วย ดังนั้นพื้นที่รับแรง A_c ก็ควรจะมียุขใหญ่กว่าพื้นที่ ซึ่งคิดที่เส้นผ่านศูนย์กลางน้อย d ซึ่งอาจจะประมาณได้ควรจะเป็นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย d_m แต่เพื่อความสะดวกสามารถที่จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยได้

สำหรับสกรูที่มีความยาวปานกลางให้ใช้สูตรของจอร์นสัน $40 < L/k < 110$

$$W = (A_c \sigma_y / N) (1 - \sigma_y (L/k)^2 / (4\pi^2 E))$$

สำหรับสกรูยาวให้ใช้สูตรของออยเลอร์ $L/k > 110$

$$W = \pi^2 EI / (NL_c^2)$$

ถ้าวัสดุที่ใช้ทำสกรูไม่ใช่เหล็กกล้า ค่าของอลความเพียวที่แบ่งระหว่างการใช้สูตรของออยเลอร์และจอร์นสันจะคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $L/k = (2\pi^2 E / \sigma_y)^{1/2}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเค้นผสม ถ้าสกรูยาวไม่มากนักก็จะไม่เกิดการโก่งงอขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้แรงกดหรือในบางกรณีสกรูส่งกำลังอาจจะใช้รับแรงดึงก็ได้ นอกจากนี้แล้วก็ยังมีความเค้นเฉือนอันเนื่องมาจากการบิดของสกรูอีกด้วย การคำนวณในกรณีเช่นนี้ต้องใช้ความเค้นผสม ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งมีสมการเป็น

$$\tau_d = ((\sigma/2)^2 + \tau^2)^{1/2}$$

โดยที่ τ_d เป็นค่าความเค้นเฉือนใช้งาน และ

$$\tau = Tr / J = 16T / (\pi d_s^3)$$

โดยที่ d_s คือเส้นผ่านศูนย์กลางนอຍ

ผู้เขียนขอแนะนำให้ใช้ $\tau_y = 0.6\sigma_y$ แทนที่จะใช้ $\tau_y = 0.5\sigma_y$ ในทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ทั้งนี้เป็นเพราะเกลียวของสกรูก็จะช่วยในการรับแรงด้วย แต่มิได้นำมาคิดในการหาความเค้นในคว้สกรู

3. ความเค้นอัด ความเค้นอัดในที่นี้ หมายถึงความเค้นที่เกิดจากการที่ผิวหน้าของพื้นเกลียวของคว้สกรูอัดกับผิวหน้าของพื้นเกลียวของแป้นเกลียวคว้เมีย

การคำนวณหาความเค้นอัดให้ใช้พื้นที่ภาพฉายของเกลียวส่วนที่อัดกันอยู่ ถ้าจำนวนคั้งกล่าวนี้เท่ากับ n เกลียวพื้นที่นี้คือ

$$A = (\pi/4)(d^2 - d_s^2)n$$

คั้งนั้นความเค้นอัด $\sigma_c = (4W) / (\pi(d^2 - d_s^2))n$

4. ความเค้นเฉือนในพื้นเกลียว นอกจากความเค้นต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ในพื้นเกลียวยังเกิดความเค้นคั้งและความเค้นเฉือนที่โคนพื้นเกลียวอีกด้วยเนื่องจากความสูงของพื้นเกลียวมีค่าน้อยคั้งนั้นโมเมนต์คั้งที่โคนพื้นเกลียวจึงมีค่าน้อยด้วย ฉะนั้นเกลียวส่วนมากจึงทนต่อความเค้นคั้งได้ ส่วนความเค้นเฉือนอาจมีคั้งมาก จากทฤษฎีกลศาสตร์วัสดุ ความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับพื้นที่หน้าคั้งที่รับแรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ

$$\tau = 3W / (2A)$$

$$A = \pi d_p b n$$

เพราะฉะนั้น $\tau_d = 3W / (2\pi d_p b n)$

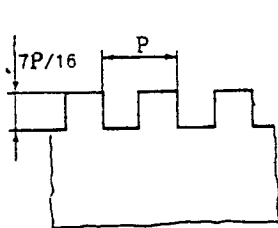
ค่า d_p นี้ต้องเลือกใช้ที่โคนพื้นเกลียวของสกรูหรือเป็นเกลียวแล้วแต่จะตรวจสอบที่
ส่วนไหน

5.1 ชนิดของเกลียวสำหรับสกรูส่งกำลัง

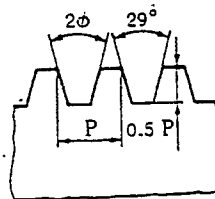
สกรูส่งกำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ส่วนมากจะมีขนาดตามหน่วยระบบอังกฤษ ส่วน
เครื่องจักรที่จะผลิตออกมาในอนาคตจะค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปใช้ในระบบหน่วย SI ซึ่งสำหรับสกรูส่ง
กำลังแล้ว รูปร่างและขนาดของเกลียวจะเป็นไปตามมาตรฐานระหว่างประเทศ ในที่นี้จะกล่าวถึงเกลียว
ที่มีใช้กันมากในระบบหน่วยอังกฤษและเกลียวที่มีอยู่ตามมาตรฐานระหว่างประเทศเท่านั้น

5.2 เกลียวในระบบหน่วยอังกฤษ

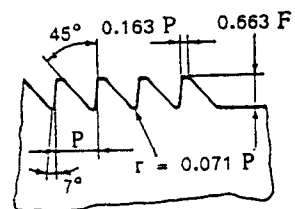
เกลียวสี่เหลี่ยม (square thread) เป็นเกลียวชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในจำพวก
เกลียวของสกรูส่งกำลัง ซึ่งเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่าเกลียวเซลเลอร์ (Sellers' thread) โดยมีลักษณะของ
เกลียวดังรูปที่ 5.5 (ก) แต่เนื่องจากการตัดเกลียวสี่เหลี่ยมนี้ทำได้ยากและค่าใช้จ่ายสูงจึงมีการนำมาใช้
งานน้อยลง ดังนั้นเกลียวชนิดนี้จึงมิได้มีการทำเป็นมาตรฐานทั่วไป ตาราง 1(ในภาคผนวก) แสดงขนาด
ของสกรูส่งกำลังแบบเกลียวสี่เหลี่ยม ซึ่งอาจจะนำมาประกอบกับการเลือกใช้ได้



(ก) เกลียวสี่เหลี่ยม



(ข) เกลียวแอกมี



(ค) เกลียวบัตเตรส

เกลียวแอกมี(acme thread) หรือเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นเกลียวชนิดที่มีการใช้งานมากที่สุด รูปร่างของเกลียวเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีมุมของเกลียว(thread angle) 2ϕ เท่ากับ 29° ค้างในรูปที่ 5.5 (ข) เนื่องจากตัดเกลียวได้ง่ายจึงมีการนำมาใช้งานเรื่อยมา มาตรฐานของเกลียวชนิดนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 (ในภาคผนวก)ประสิทธิภาพของเกลียวชนิดนี้จะน้อยกว่าเกลียวสี่เหลี่ยม ถ้าเกิดการสึกหรอหลังจากใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งก็สามารถที่จะปรับให้เกลียวของสกรูกับเกลียวตัวเมียได้สนิทเหมือนเดิม โดยการขันเกลียวตัวเมียซึ่งเป็นแบบ split nut เข้าไปให้กระชับกับเกลียวของตัวสกรูได้

เกลียวบัตเตรส (bustress thread) เป็นเกลียวที่มีรูปร่างเป็นฟันเลื่อย จุดมุ่งหมายก็เพื่อที่จะใช้รับแรงที่มีทิศทางเดียว เกลียวชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าเกลียวสองชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว เนื่องจากเกลียวชนิดนี้มีใช้ไม่มากนัก ดังนั้นจึงมิได้มีการกำหนดเป็นมาตรฐาน ค่าในตารางที่ 1(ในภาคผนวก) เป็นแต่เพียงค่าที่แนะนำให้ทดลองใช้เท่านั้น

5.8 เกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO

ขนาดเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO นอกมิติต่างๆเป็น mm และมีมุมเกลียว 2ϕ เท่ากับ 30° ขนาดต่างๆของสกรูส่งกำลังชนิดนี้ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จำนวนได้จากสมการต่อไปนี้คือ

$$H_1 = 0.5P$$

$$H_4 = H_1 + a_c = 0.5P + a_c$$

$$h_3 = H_1 + a_c$$

$$z = 0.25P = H_1/2$$

$$D_1 = d - 2H_1 = d - P$$

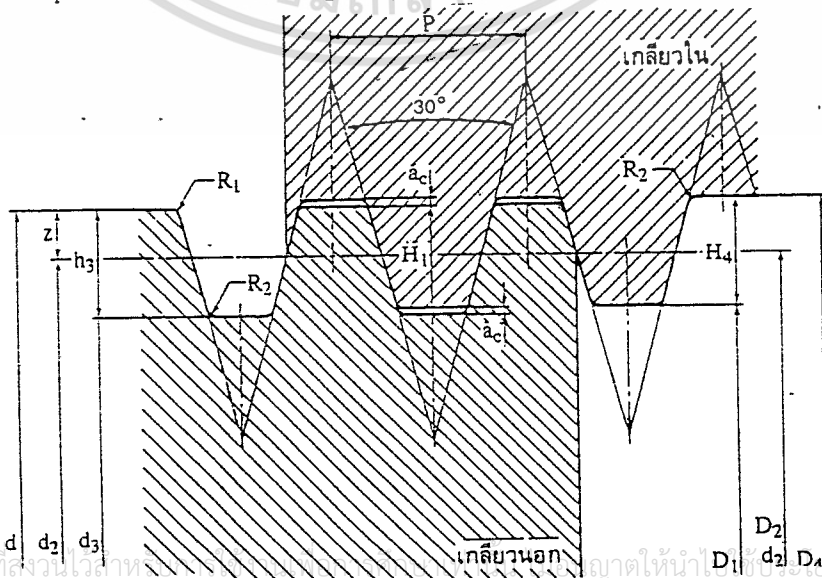
$$D_4 = d + 2a_c$$

$$d_3 = d - 2h_3$$

$$R_{1max} = 0.5a_c$$

$$R_{2max} = a_c$$

$$d_2 = D_2 = d - 2z = d - 0.5P$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า

รูปที่ 5.6 ขนาดต่างๆของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู

- โดยที่ a_c คือช่องว่างบนยอดฟัน
 D_d คือเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ของเกลิวนใน
 D_1 คือเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยของเกลิวนใน
 D_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของเกลิวนใน
 d คือเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ของเกลิวนนอก(เป็นขนาดระบุด้วย)
 d_3 คือเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยของเกลิวนนอก
 d_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของเกลิวนนอก
 H_1 คือความสูงเหลื่อม(over lapping) ของเกลิวน
 H_n คือความสูงของฟันเกลิวนใน
 h_3 คือความสูงของฟันเกลิวนนอก
 P คือระยะพิตช์

ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 (ในภาคผนวก) แสดงมิติมูลฐาน ซึ่งได้มาจากการคำนวณโดยใช้สมการชุดข้างบนนี้

ในการเลือกขนาดของสกรูส่งกำลัง ให้เลือกจากขนาดในช่องแรกของตารางที่ 3 (ในภาคผนวก) ก่อน ถ้ามีความจำเป็นที่จะต้องเลือกขนาดอื่นที่ไม่มีในช่องแรกนี้ก็ให้เลือกขนาดต่อไปในช่องที่สอง เมื่อได้ขนาดของสกรูแล้วก็ให้เลือกพิตช์ในช่องที่สี่ จากตารางที่ 3 (ในภาคผนวก) จะเห็นว่าสำหรับสกรูหนึ่งขนาดอาจเลือกระยะพิตช์ได้หลายค่า แต่ค่าที่แนะนำให้ใช้คือค่าที่มีเครื่องหมาย * อยู่ข้างหน้า

การคำนวณออกแบบสลกรูส่งกำลัง

การออกแบบสลกรูส่งกำลังเพื่อใช้งาน ในการยกแขนเคลื่อนนำเจาะ (30 Kg) ความยาว 35 cm.
วัสดุที่เลือกใช้ stainless steel BS number 403517

yield strength 245 N/mm².

tensile strength 430 N/mm².

ดังนั้น $\sigma_{\text{sd}} = 245/15 = 16.33 \text{ N/mm}^2$

โดย 15 คือค่าความปลอดภัย

ในการหาค่าโดยประมาณของสลกรูชั้นแรกนี้สมมติให้ $L_e/k < 40$

$$W = \sigma_{\text{sd}} A_r (\pi d_r^2 / 4)$$

$$30 = 16.33 (\pi d_r^2 / 4)$$

จะได้ $d_r = 8.49$

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวก ทดลองเลือกสลกรูขนาด 20 mm. (เนื่องจากมีอุปกรณ์อยู่แล้วจากการออกแบบไกด์)

$$P = 4 \text{ mm.} \quad d_m = 18 \text{ mm.}$$

$$d_r = 15.5 \text{ mm.}$$

ปลายสลกรูมีการยึดแน่นทั้งสองข้าง มีลักษณะใกล้เคียงแบบ CC.(elamped)

$$L_e = L/2 = 350/2 = 175 \text{ mm.}$$

$$\text{รัศมีไจเรชั่น } k = d_r/4 = 3.875 \text{ mm.}$$

$$\text{ดังนั้น } L_e/k = 175/3.875 = 45.1612 \text{ mm.}$$

จะเห็นว่า L_e/k อยู่ในช่วงสูตรของ จอห์นสัน ($40 < L_e/k < 110$)

$$W = (A_r \sigma_y / N) [1 - \sigma_y (L_e/k)^2 / (4\pi^2 E)]$$

ในที่นี้ $A_r = \pi (15.5)^2 / 4 = 188.69 \text{ mm}^2$.

สำหรับ stainless steel $E = 190,000 \text{ N/mm}^2$

ได้

$$\begin{aligned} W &= (188.69 \times 245 / 15) [1 - 245 (45.1612)^2 / (4\pi^2 \times 190,000)] \\ &= 2876.6279 \text{ N} \end{aligned}$$

ซึ่งสามารถรับน้ำหนักของแขนเคลื่อนนำเจาะได้

สำหรับการคำนวณหาแรงบิดของสลกรูส่งกำลัง

จากสลกรูที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_m = 18 \text{ mm.}$$

$$d_r = 15.5 \text{ mm.}$$

$$l = 4 \text{ mm. โดยสมมติ } \mu = 0.2$$

จากสมการแรงบิด เพื่อที่จะยกน้ำหนัก.

$$\begin{aligned} T &= (Fdm/2)[(1+\pi \mu dm)/(\pi dm-\mu l)] \\ &= 0.72738 \text{ N.m} \end{aligned}$$

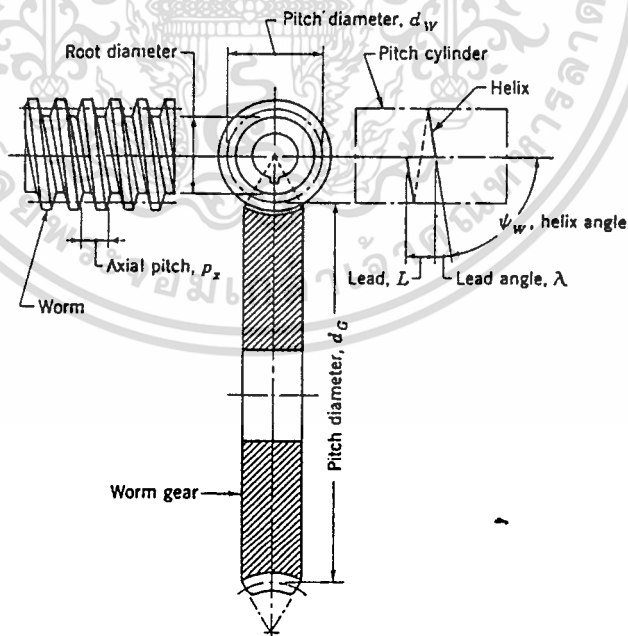
จะได้แรงบิดในการหมุนสกรู 0.72738 N.m



บทที่ 6

เกิลียวตัวหนอนและเฟืองหนอน (Worm and Worm Gear)

ในโครงงานนี้ ได้มีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนที่จะต้องประกอบไปด้วยคู่ของ เกิลียวตัวหนอนและเฟืองหนอน ซึ่งมีอยู่ 2 คู่ มีหน้าที่ถ่ายกำลังจากเกิลียวตัวหนอนไปยังเฟือง หนอนและแกนของเกิลียวตัวหนอนกับเฟืองหนอน จะทำมุมกัน 90 องศา กำลังที่เราใช้ขับ เกิลียวตัวหนอนนั้นเราได้มาจากกำลังขับของ สเต็ปป์มอเตอร์ (STEPPING MOTOR) ในการ ขับของคู่แรกของเฟืองหนอนและเกิลียวตัวหนอน ส่วนคู่ที่สองเราจะใช้มือเป็นตัวหมุน คู่แรกที่เราใช้สเต็ปป์มอเตอร์ ในการขับเกิลียวตัวหนอนนั้น เฟืองหนอนของเราจะทำหน้าที่ขับเกิลียว ซึ่งจะทำหน้าที่ในการบังคับการเคลื่อนที่ขึ้นลงของชั้นที่มีส่วนของหัวเจาะอยู่ ในการออกแบบเรา จำเป็นจะต้องศึกษาทฤษฎีของเกิลียวตัวหนอนและเฟืองหนอน ซึ่งจะแสดงส่วนต่าง ๆ ไว้ในรูป ค้างนี้



รูปที่ 6.1 แสดงส่วนต่าง ๆ ของเกิลียวตัวหนอนและเฟืองหนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถจะหาขนาดของเฟืองหนอนนี้ได้จาก

$$D_G = N_G P_t / \pi$$

D_G : เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟืองหนอน (WORM GEAR DIAMETER)

P_t : ทรานสเวอร์ส เซอร์คิวลาร์ พิตช์ (TRANSVERSE CIRCULAR PITCH)

N_G : จำนวนฟัน (NUMBER OF FEETH)

และขนาดของเกลียวตัวหนอนจะอยู่ระหว่าง

$$0.50C^{0.875} \leq d_w \leq 0.88C^{0.875}$$

หรือค่าที่เหมาะสมที่แนะนำมา คือ

$$d_w = 0.68C^{0.875}$$

ซึ่งค่า d_w : เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวตัวหนอน

C : ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเกลียวตัวหนอนและเฟือง
หนอน

$$C = (d_w + d_g) / 2 \quad \text{หรือ} \quad C = L / 2\pi (\cot \lambda_w + m \omega)$$

ระยะที่แกนเกลียวตัวหนอนสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ต่อระยะการหมุน 1 รอบ

$$L = N_w P_s$$

N_w : จำนวนปากของเกลียวตัวหนอน

P_s : ระยะพิตช์ของเกลียวตัวหนอน

และความสัมพันธ์ของเกลียวตัวหนอนและเฟืองหนอนอื่น ๆ ได้แก่

$$\lambda_w + \psi_w = 90^\circ$$

$$\lambda_G + \psi_G = 90^\circ$$

ถ้าเพลลาของทั้งสองทำมุมกัน 90 แล้ว

$$\lambda_w = \psi_G \quad \text{และ} \quad \lambda_G = \psi_w$$

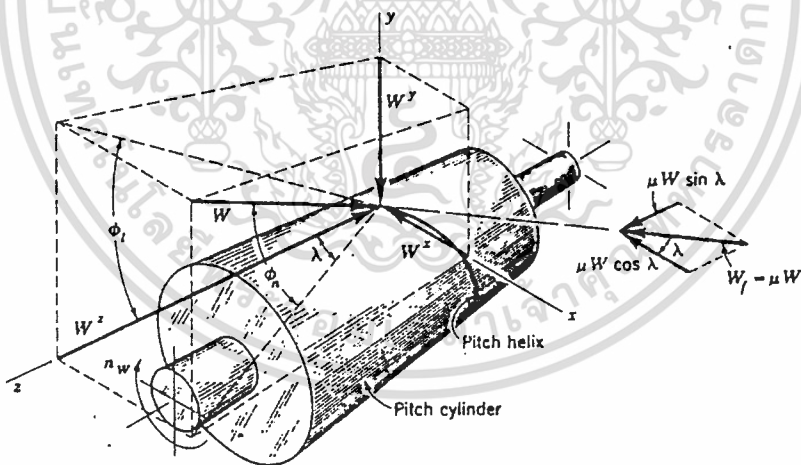
λ_w, λ_G : มุมหลิศของเกลียวตัวหนอน และ เฟืองตัวหนอน

ψ_w, ψ_G : มุมฮิลิกซ์ของเกลียวตัวหนอน และ เฟืองตัวหนอน

เมื่อเราใช้เกลียวตัวหนอนเป็นตัวขับเฟืองหนอนแล้ว อัตราทด คือ

$$m_\omega = \frac{\omega_w}{\omega_G} = \frac{N_G}{N_w}$$

ในการพิจารณาเกี่ยวกับแรงของเกลียวตัวหนอนและเฟืองหนอน



รูปที่ 6.2 แสดงแรงในเกลียวตัวหนอน

จากรูปสามารถทำการแตกแรงออกเป็น 3 แกน

$$W_x = W \cos \phi_n \sin \lambda$$

$$W_y = W \sin \phi_n$$

$$W_z = W \cos \phi_n \cos \lambda$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์แรงระหว่างเกลิยตัวหนอนที่กระทำกับเฟืองหนอน เราจะพบว่าความสัมพันธ์ของแรงทั้งสองเป็นดังนี้

$$W_{wt} = -W_{Ga} = W_x$$

$$W_{wr} = -W_{Gr} = W_y$$

$$W_{wa} = -W_{Gr} = W_z$$

จะสังเกตได้ว่า แกนของเฟืองหนอนจะขนานกับแกน X และแกนของเกลิยตัวหนอนก็ขนานกับแกน Z จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับเฟืองตรง (SPUR GEAR) ในการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันทั้งเฟืองหนอนและเกลิยตัวหนอนจะสัมผัสกันตรงบริเวณวงกลม พิทซ์ (PITCH) ก็จะทำให้เกิดการเลื่อนไถลและแรงเสียดทานที่บริเวณนั้น ฉะนั้นจากรูปข้างบนแรง W จะตั้งฉากพื้นของเกลิยตัวหนอน ความสัมพันธ์เป็นดังนี้ $W_r = \mu W$ พบว่าค่า $\mu W \cos \lambda$ จะอยู่ในแนวแกนลบ X และค่า $\mu W \sin \lambda$ จะอยู่ในแนวแกนบวก Z ทำให้ความสัมพันธ์ของสมการข้างบนเป็นดังนี้

$$W_x = W(\cos \phi_n \sin \lambda + \mu \cos \lambda)$$

$$W_y = W \sin \phi_n$$

$$W_z = W(\cos \phi_n \cos \lambda - \sin \lambda)$$

ซึ่งเราสามารถแทน ค่าของ W_z ลงไปในสสารที่ผ่านมา คือ

$$W_r = \mu W = (\mu W_{Gr}) / (\mu \sin \lambda - \cos \phi_n \cos \lambda)$$

และความสัมพันธ์อีกอันหนึ่ง คือ

$$W_{wt} = W_{Gr} [(\cos \phi_n \sin \lambda + \mu \cos \lambda) / (\mu \sin \lambda - \cos \phi_n \cos \lambda)]$$

การคำนวณออกแบบชุดเฟืองหนอน

ต้องการใช้ชุดเฟืองหนอนส่งกำลัง 400 W จากเพลา 100 rpm ไปยังเพลา 5 rpm

$$\text{อัตราทด } r_w = 100/5 = 20$$

เลือกจำนวนปาก 1 ปาก

$$\text{ดังนั้น } N_g = 1(20) = 20 \text{ ฟัน}$$

$$L = 1 P$$

เส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ของเฟืองหนอน

$$d_g = N_g P / \pi = 6.366/9P \text{ mm}$$

$$\text{แต่ } P = 15 \text{ mm}$$

$$\text{ดังนั้น } d_g = 95.49 \text{ mm}$$

ดังนั้นกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟืองหนอนคือ 95 mm

เลือกเกลียวตัวหนอนที่มี 1 ปาก ให้มุมหลิศจของเกลียวแต่ละปาก = 16

$$\lambda_w = 1 \times 16 = 16$$

จากสมการ

$$e = L / 2\pi(\cot \lambda_w + m_w)$$

โดยเราต้องการให้ระยะระหว่างศูนย์กลางของเฟือง ประมาณ 80 mm

$$80 = L / 2\pi(\cot 16 + 20) , L = 21.4 \text{ mm}$$

$$L = 21.4$$

$$L = N_w P_a , L = (1)P_a , P_a = 21.4$$

เลือกระยะพิตซ์ = 22 mm , ดังนั้นหลิศจ L = 22 mm.

มุมหลิศจของเกลียวตัวหนอน $\tan \lambda_w = L / \pi d_w$

$$\tan 16 = 22 / \pi d_w , d_w = 24.42 \text{ mm.}$$

เพราะฉะนั้นเลือกเกลียวหนอนขนาด 25 mm.

ภาคผนวก ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 สัดส่วนค่าของเกลียวสำหรับสกรูสกรูกำลัง

ขนาด นิ้ว	เกลียวสี่เหลี่ยม		เกลียวแอกมี			เกลียวตัดตรง เกลียว/นิ้ว
	เกลียว/นิ้ว	Minor Dia.	เกลียว/นิ้ว	Reg.Minor Dia.	Stub Minor Dia.	
1/4	10	0.163	16	0.188	0.213	
5/16			14	0.241	0.270	
3/8	8	0.226	12	0.292	0.325	
7/16			12	0.354	0.388	
1/2	6 1/2	0.366	10	0.400	0.440	20
5/8	5 1/2	0.466	8	0.500	0.550	20
3/4	5	0.575	6	0.583	0.650	16
7/8	4 1/2	0.681	6	0.708	0.755	16
1	4	0.781	5	0.800	0.880	12
1 1/2			5	0.925	1.005	12
1 1/4	3 1/2	1.000	5	1.050	1.130	10
1 3/8			4	1.125	1.225	10
1 1/2	3	1.208	4	1.250	1.350	8
1 3/4	2 1/2	1.400	4	1.500	1.600	7
2	2 1/4	1.612	4	1.750	1.850	6
2 1/2	2 1/4	1.962	3	1.917	2.050	6
2 1/2	2	2.063	3	2.167	2.300	5
2 3/4	2	2.313	3	2.417	2.550	5
3	1 3/4	2.500	2	2.500	2.700	5
3 1/2	1 5/8	2.962	2	3.000	3.200	5
4	1 1/2	3.418	2	3.500	3.700	4
4 1/2			2	4.000	4.200	4
5			2	4.500	4.700	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2

มิติมาตรฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO2901-1977(B)

P	α	H ₄ = h ₃	H ₁	R ₁ max	R ₂ max
1.5	0.15	0.9	0.75	0.08	0.15
2	0.25	1.25	1	0.19	0.25
3	0.25	1.75	1.5	0.13	0.25
4	0.25	2.25	2	0.13	0.25
5	0.25	2.75	2.5	0.13	0.25
6	0.5	3.5	3	0.25	0.5
7	0.5	4	3.5	0.25	0.5
8	0.5	4.5	4	0.25	0.5
9	0.5	5	4.5	0.25	0.5
10	0.5	5.5	5	0.25	0.5
12	0.5	6.5	6	0.25	0.5
14	1	8	7	0.5	1
16	1	9	8	0.5	1
18	1	10	9	0.5	1
20	1	11	10	0.5	1
22	1	12	11	0.5	1
24	1	13	12	0.5	1
28	1	15	14	0.5	1
32	1	17	16	0.5	1
36	1	19	18	0.5	1
40	1	21	20	0.5	1
44	1	23	22	0.5	1

ขนาดเป็น mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO 2904-1977(E)

ขนาดระดับ			ระยะ พิตช์ P	d2 = D2	D4	d3	D1
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3					
8			1.5	7.250	8.300	6.200	6.500
	9		1.5	8.250	9.300	7.200	7.500
			*2	8.000	9.500	6.500	7.000
10			1.5	9.250	10.300	8.200	8.500
			*2	9.000	10.500	7.500	8.000
	11		2	10.000	11.500	8.500	9.000
			*3	9.500	11.500	7.500	8.000
12			2	11.000	12.500	9.500	10.000
			*3	10.500	12.500	8.500	9.000
	14		2	13.000	14.500	11.500	12.000
			*3	12.500	14.500	10.500	11.000
16			2	15.000	16.500	13.500	14.000
			*4	14.000	16.500	11.500	12.000
	18		2	17.000	18.500	15.500	16.000
			*4	16.000	18.500	13.500	14.000
20			2	19.000	20.500	17.500	18.000
			*4	18.000	20.500	15.500	16.000
	22		3	20.500	22.500	18.500	19.000
			*5	19.500	22.500	16.500	17.000
			8	18.000	23.000	13.000	14.000
24			3	22.500	24.500	20.500	21.000
			*5	21.500	24.500	18.500	19.000
			8	20.000	25.000	15.000	16.000
	26		3	24.500	26.500	22.500	23.000
			*5	23.500	26.500	20.500	21.000
			8	22.000	27.000	17.000	18.000
28			3	26.500	28.500	24.500	25.000
			*5	25.500	28.500	22.500	23.000
			8	24.000	29.000	19.000	20.000

ขนาดเป็น mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิติมาตรฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO 2904-1977(E)

ขนาดระบุ			ระยะ พิตช์ P	d2 = D2	D4	d3	D1
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3					
	30		3	28.000	30.500	26.500	27.000
			*6	27.000	31.000	23.000	24.000
			10	25.000	31.000	19.000	20.000
32			3	30.500	32.500	28.500	29.000
			*6	29.000	33.000	25.000	26.000
			10	27.000	33.000	21.000	22.000
	34		3	32.500	34.500	30.500	31.000
			*6	31.000	35.000	27.000	28.000
			10	29.000	35.000	23.000	24.000
36			3	34.500	36.500	32.500	33.000
			*6	33.000	37.000	29.000	30.000
			10	31.000	37.000	25.000	26.000
	38		3	36.500	38.500	34.500	35.000
			*7	34.500	39.000	30.000	31.000
			10	33.000	39.000	27.000	28.000
40			3	38.500	40.500	36.500	37.000
			*7	36.500	41.000	32.000	33.000
			10	35.000	41.000	29.000	30.000
	42		3	40.500	42.500	38.500	39.000
			*7	38.500	43.000	34.000	35.000
			10	37.000	43.000	31.000	32.000
44			3	42.500	44.500	40.500	41.000
			*7	40.500	45.000	36.000	37.000
			12	38.000	45.000	31.000	32.000
	46		3	44.500	46.500	42.500	43.000
			*8	42.000	47.000	37.000	38.000
			12	40.000	47.000	33.000	34.000
48			3	46.500	48.500	44.500	45.000
			*8	44.000	49.000	39.000	40.000
			12	42.000	49.000	35.000	36.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ขนาดเป็น mm.
 ไม่ว่าจะพิมพ์ซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีพื้นฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO 2904-1977(E)

ขนาดระบุ			ระยะ พิทช์ P	d2 = D2	D4	d3	D1
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3					
	50		3	48.500	50.500	46.500	47.000
			*8	46.000	51.000	41.000	42.000
			12	44.000	51.000	37.000	38.000
52			3	50.500	52.500	48.500	49.000
			*9	48.000	53.000	43.000	44.000
			14	46.000	53.000	39.000	40.000
	55		3	53.500	55.500	51.500	52.000
			*9	50.500	55.000	45.000	46.000
			14	48.000	57.000	39.000	41.000
60			3	58.500	60.500	56.500	57.000
			*9	55.500	61.000	50.000	51.000
			14	53.000	62.000	44.000	46.000
	65		4	63.000	65.500	60.500	61.000
			*10	66.000	66.000	54.000	55.000
			16	57.000	67.000	47.000	49.000
70			4	68.000	70.500	65.500	66.000
			*10	65.000	71.000	59.000	60.000
			16	62.000	72.000	52.000	54.000
	75		4	68.000	70.500	65.500	66.000
			*10	65.000	71.000	59.000	60.000
			16	62.000	72.000	52.000	54.000
80			4	78.000	80.500	75.500	76.000
			*10	75.000	81.000	69.000	70.000
			16	72.000	82.000	62.000	64.000
	85		4	83.000	85.500	80.500	81.000
			*12	79.000	86.000	72.000	73.000
			18	76.000	87.000	65.000	67.000
90			4	88.000	90.500	85.500	86.000
			*12	84.000	91.000	77.000	78.000
			18	81.000	92.000	70.000	72.000

ขนาดเป็น mm. เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันส่งเสริมการเรียนรู้และพัฒนากำลังคนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3(ต่อ)

มีติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO 2904-1977(E)

ขนาดระบุ			ระยะ พิทช์ P	d2 = D2	D4	d3	D1
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3					
	95		4	93.000	95.500	90.500	91.000
			*2	89.000	96.000	82.000	83.000
			18	86.000	97.000	75.000	77.000
100			4	98.000	100.500	95.500	96.000
			*12	94.000	101.000	87.000	88.000
			20	90.000	102.000	78.000	80.000
		105	4	103.000	105.500	100.500	101.000
			*12	99.000	106.000	92.000	93.000
			20	95.000	107.000	83.000	85.000
	110		4	108.000	110.500	105.500	106.000
			*12	104.000	111.000	97.000	98.000
			20	100.000	112.000	88.000	90.000
		115	6	112.000	116.000	108.000	109.000
			14	108.000	117.000	99.000	101.000
			22	104.000	117.000	91.000	93.000
120			6	117.000	121.000	113.000	114.000
			*14	113.000	122.000	104.000	106.000
			22	109.000	122.000	96.000	98.000
		125	6	122.000	126.000	118.000	119.000
			*14	118.000	127.000	109.000	111.000
			22	114.000	127.000	101.000	103.000
	130		6	127.000	131.000	123.000	124.000
			*14	123.000	132.000	114.000	116.000
			22	119.000	132.000	106.000	108.000
		135	6	132.000	136.000	128.000	129.000
			*14	128.000	137.000	119.000	121.000
			24	123.000	137.000	109.000	111.000
140			6	137.000	141.000	133.000	134.000
			*14	133.000	142.000	124.000	126.000
			24	128.000	142.000	114.000	116.000

ขนาดเป็น mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดระบุ			ระยะ พิทช์ P	d2 = D2	D4	d3	D1
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3					
		145	6 *14 24	142.000 138.000 133.000	146.000 147.000 147.000	138.000 129.000 119.000	139.000 131.00 121.000
	150		6 *16 24	147.000 142.000 138.000	151.000 152.000 152.000	143.000 132.000 124.000	144.000 134.000 126.000
		155	6 *16 24	152.000 147.000 143.000	156.000 157.000 157.000	148.000 137.000 129.000	149.000 139.000 131.000
160			6 *16 28	157.000 152.000 146.000	161.000 162.000 162.000	153.000 142.000 130.000	154.000 144.000 132.000
		165	6 *16 28	162.000 157.000 151.000	166.000 167.000 167.000	158.000 147.000 135.000	159.000 149.000 137.000
	170		6 *16 28	167.000 162.000 156.000	171.000 172.000 172.000	163.000 152.000 140.000	164.000 154.000 142.000
		175	8 *15 28	171.000 167.000 161.000	176.000 177.000 177.000	166.000 157.000 145.000	167.000 159.000 147.000
180			8 *18 28	176.000 171.000 166.000	181.000 182.000 182.000	171.000 160.000 150.000	172.000 162.000 152.000
	185		8 *18 32	181.000 176.000 169.000	186.000 187.000 187.000	176.000 165.000 151.000	177.000 167.000 153.000

ขนาดเป็น มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3(ต่อ)

มิติฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO 2904-1977(E)

ขนาดระบุ			ระยะ พิตช์ P	d2 = D2	D4	d3	D1
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3					
	230		8	226.000	231.000	221.000	222.000
			*20	220.000	232.000	208.000	210.000
			36	212.000	232.000	192.000	194.000
240			8	236.000	241.000	231.000	232.000
			*22	229.000	242.000	216.000	218.000
			36	222.000	242.000	202.000	204.000
	250		12	244.000	251.000	237.000	238.000
			*22	239.000	252.000	226.000	228.000
			40	230.000	252.000	208.000	210.000
260			12	254.000	261.000	247.000	248.000
			*22	249.000	262.000	236.000	238.000
			40	240.000	262.000	218.000	220.000
	270		12	264.000	271.000	257.000	258.000
			*24	258.000	272.000	244.000	246.000
			40	250.000	272.000	228.000	230.000
280			12	274.000	281.000	267.000	268.000
			*24	268.000	282.000	254.000	256.000
			40	260.000	282.000	238.000	240.000
	290		12	284.000	291.000	277.000	278.000
			*24	178.000	292.000	264.000	266.000
			44	268.000	292.000	244.000	246.000
300			12	294.000	301.000	287.000	288.000
			*24	288.000	302.000	274.000	276.000
			44	278.000	302.000	254.000	256.000

ขนาดเป็น mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

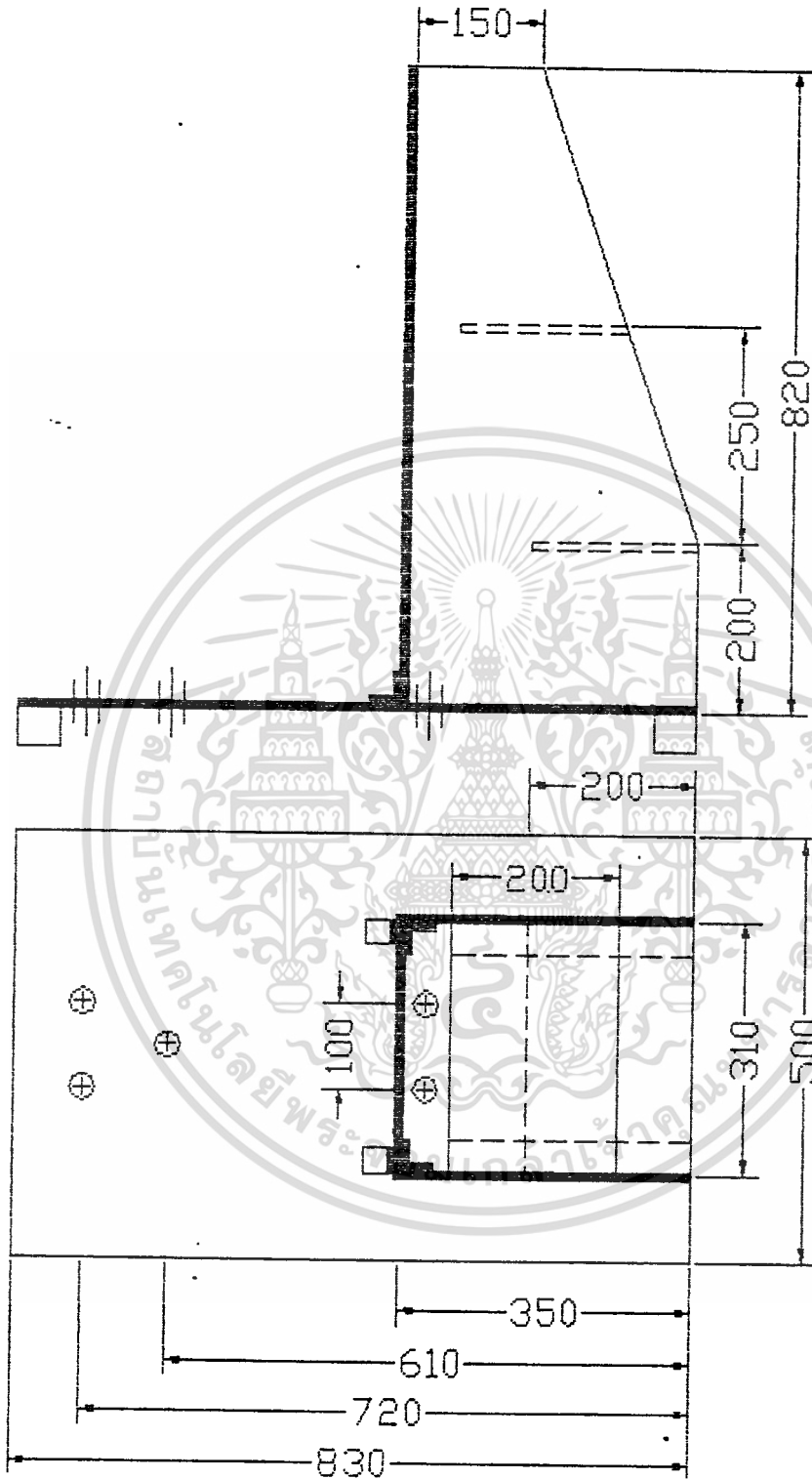


Fig.1 Frame of Super Drill EDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

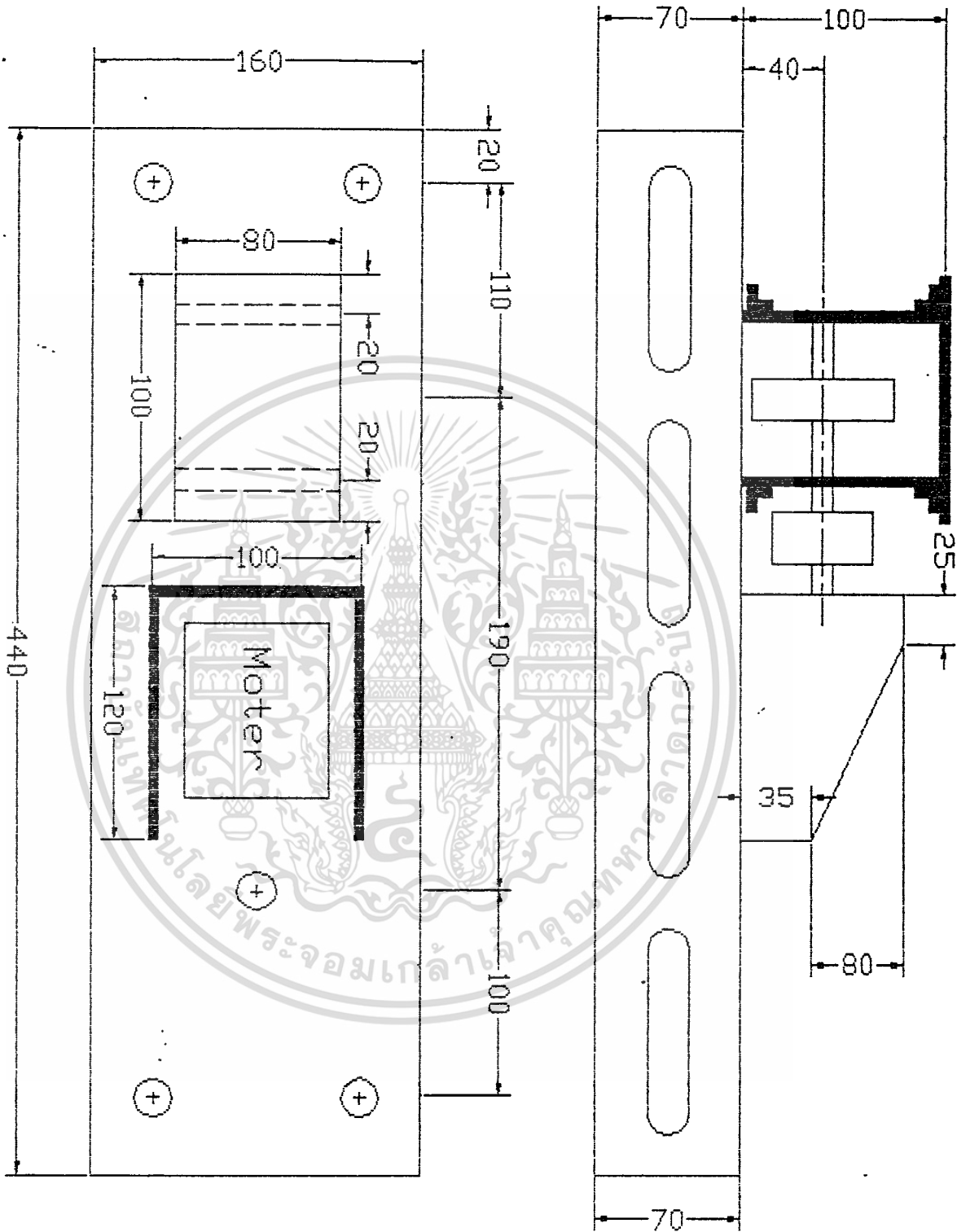


Fig.2 Hand at Drill Guide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

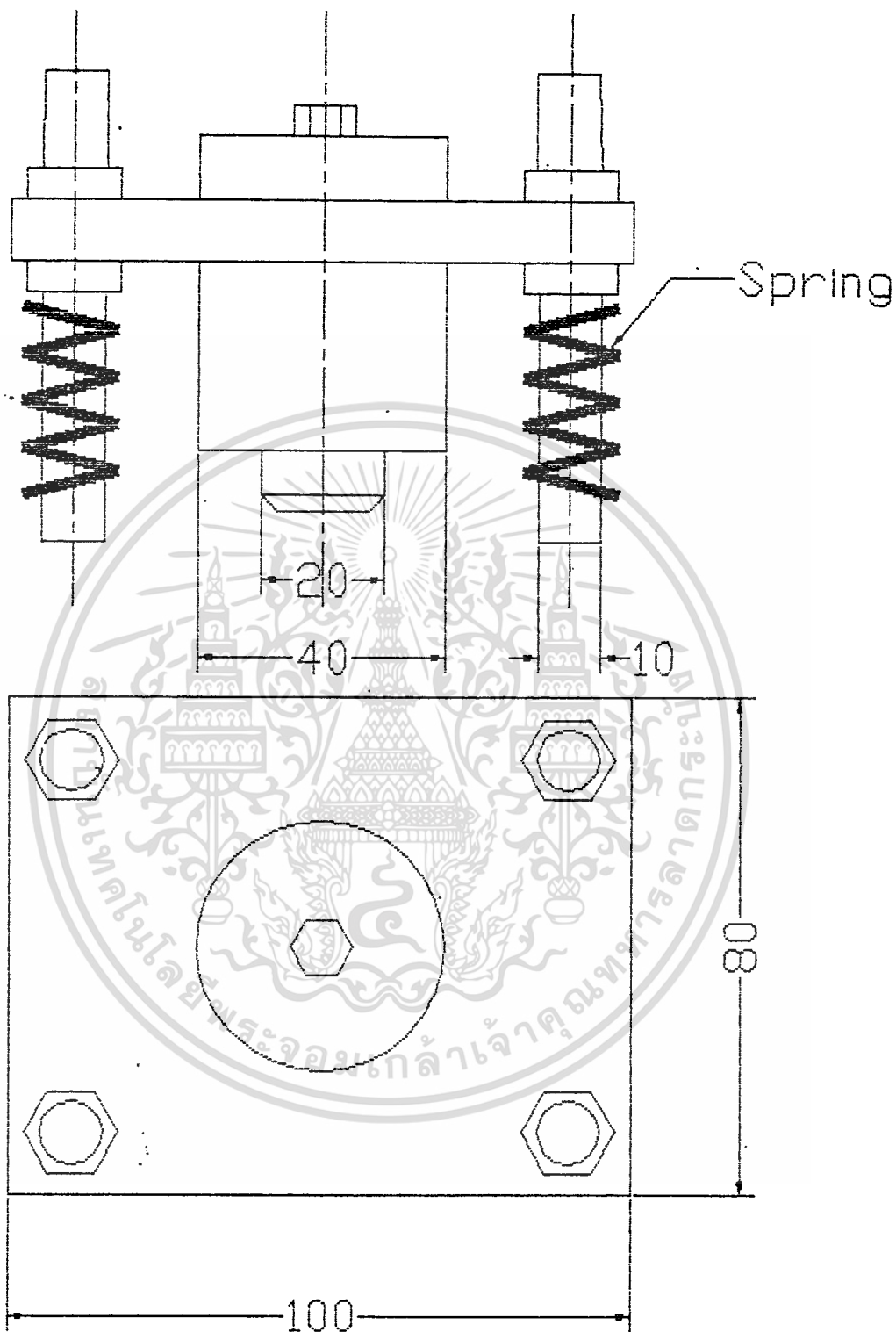


Fig.3 **ลูกขำ Oscillate**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

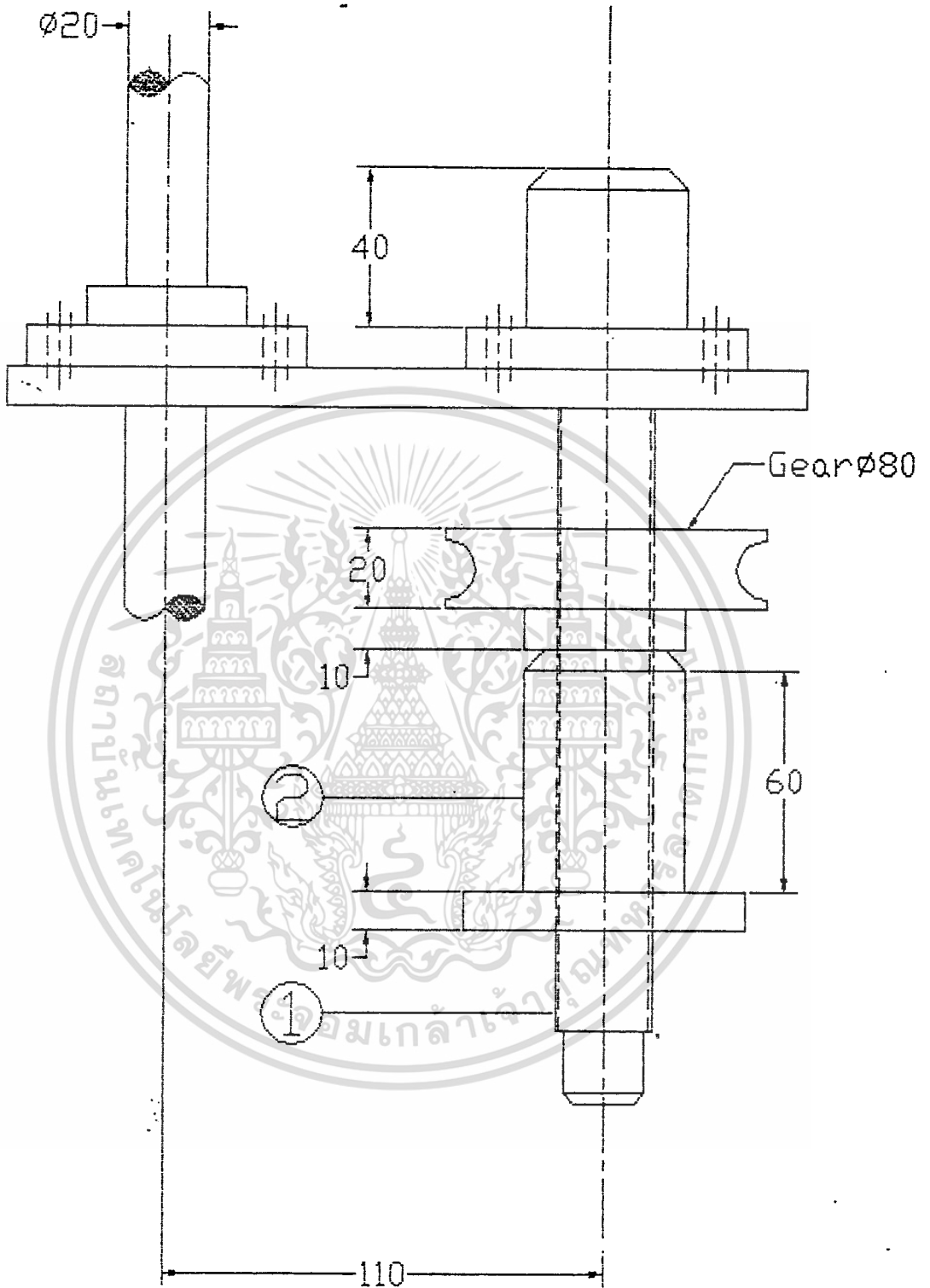


Fig.4 ชุดเฟืองปรับตำแหน่งขึ้นแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

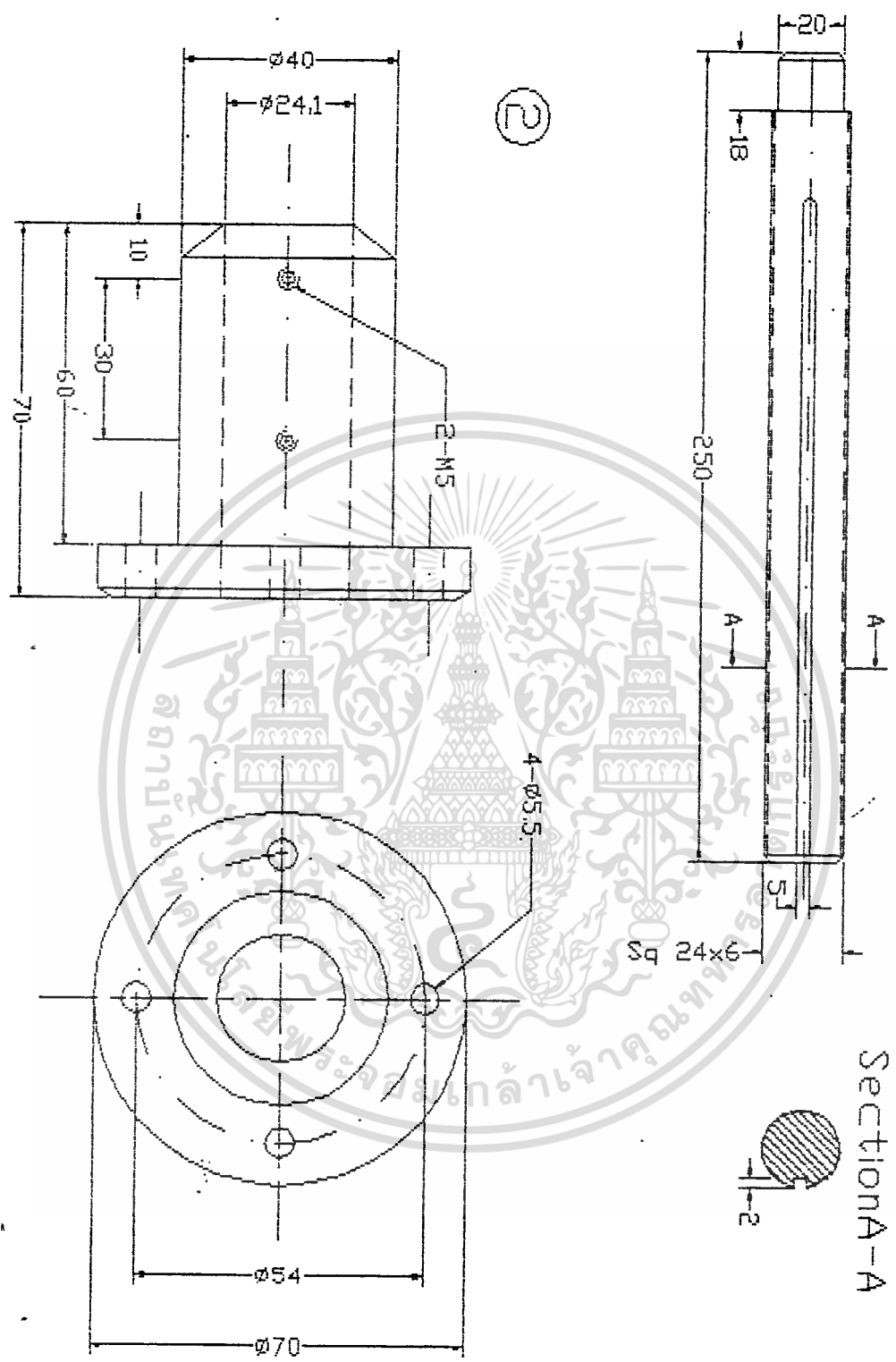


Fig.5 ชุดเฟืองปรับระยะหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

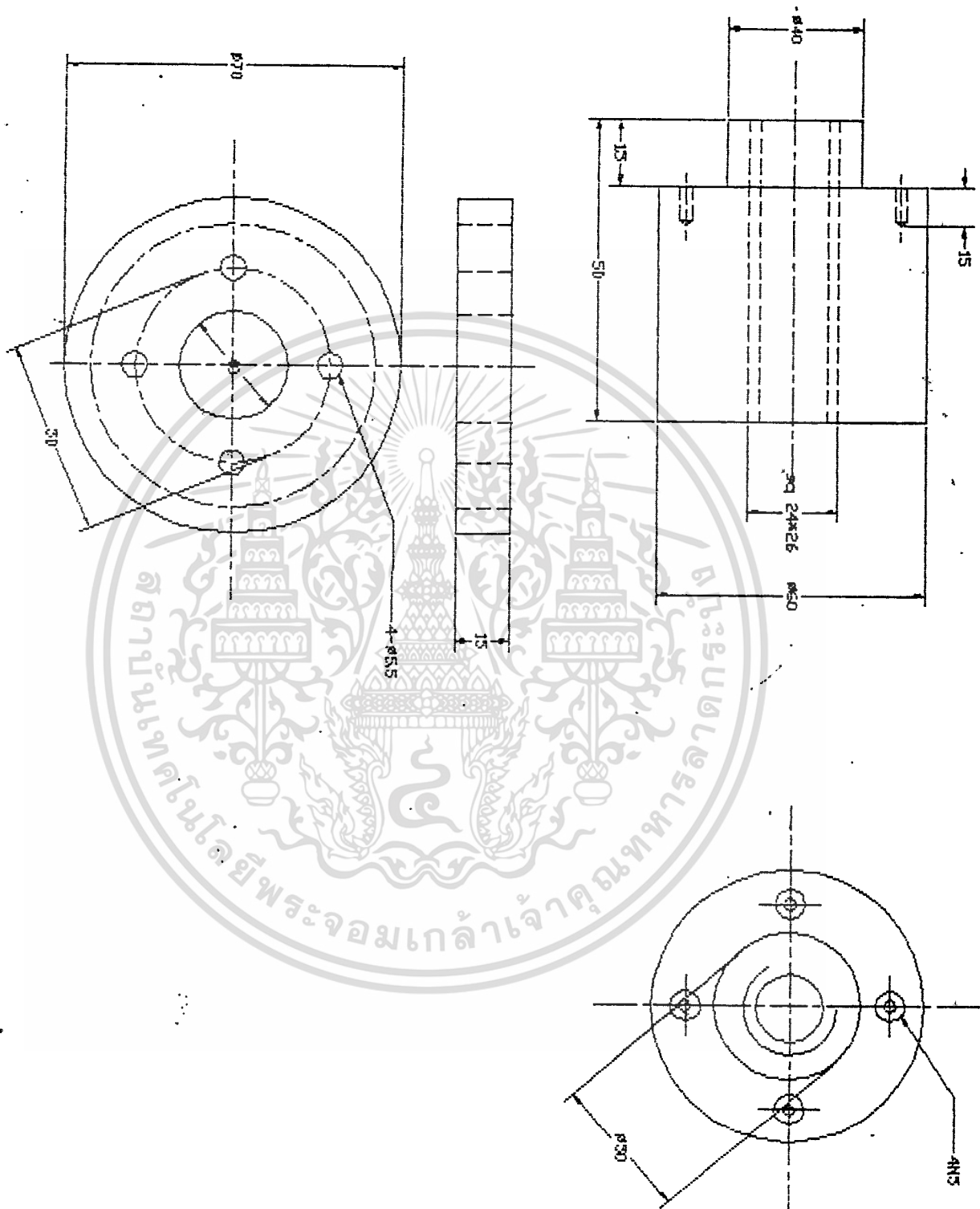


Fig.7 ชุดเฟืองตัวหนอนแป้ระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

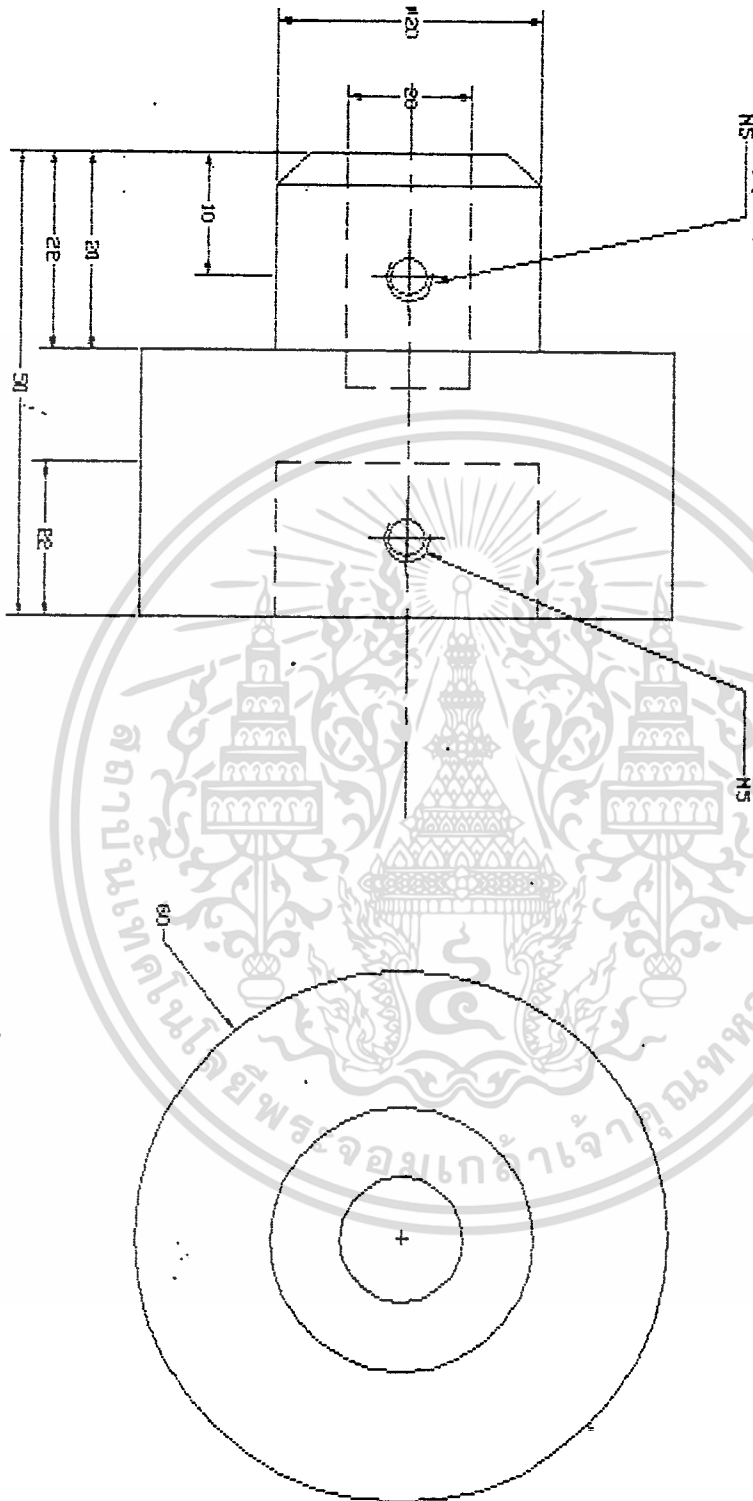


Fig.6 มือหมุนปรับระหะกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

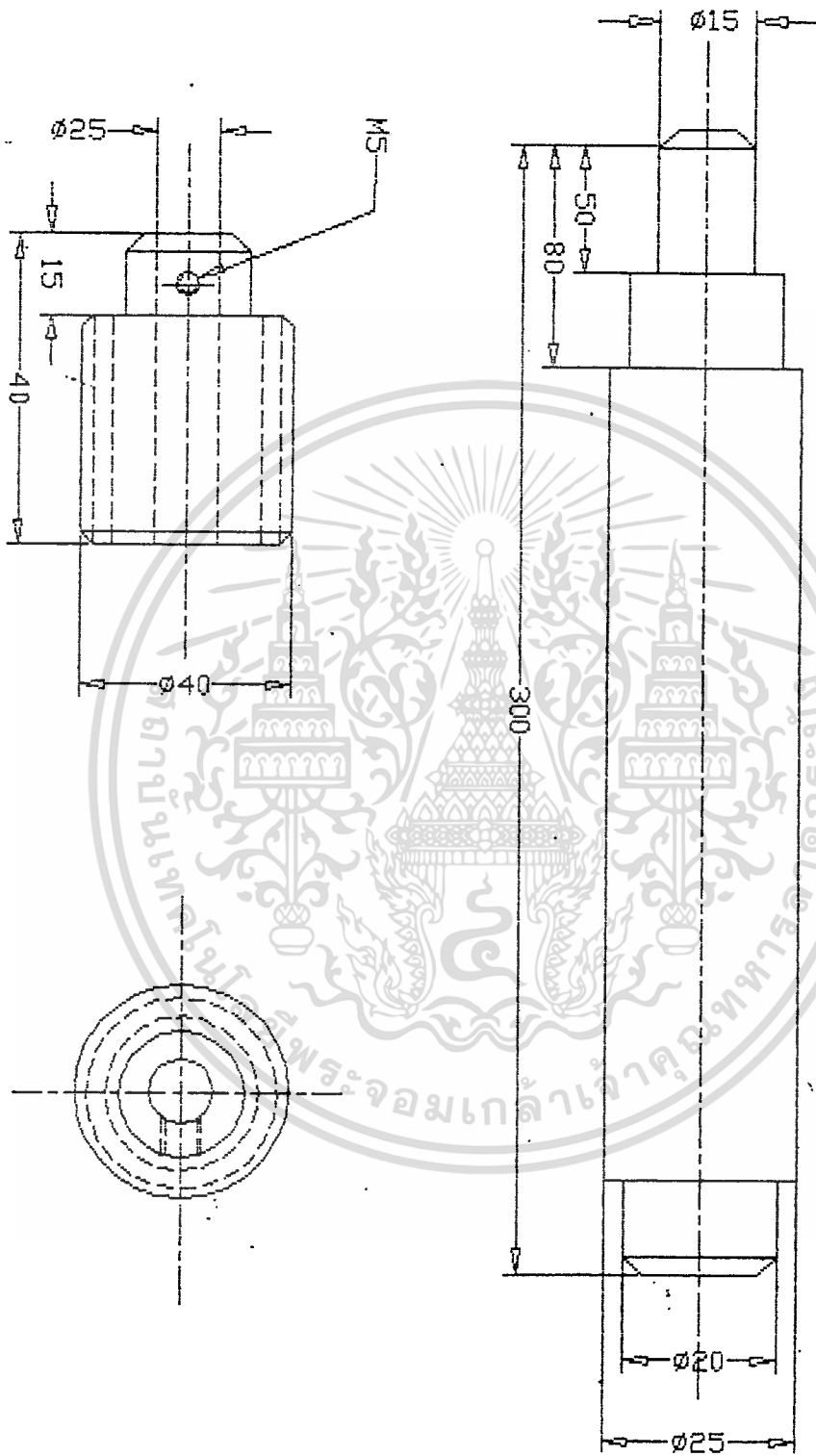


Fig.8 ชุดขับขนานน้ำเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig.9 Hand Hold Guide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

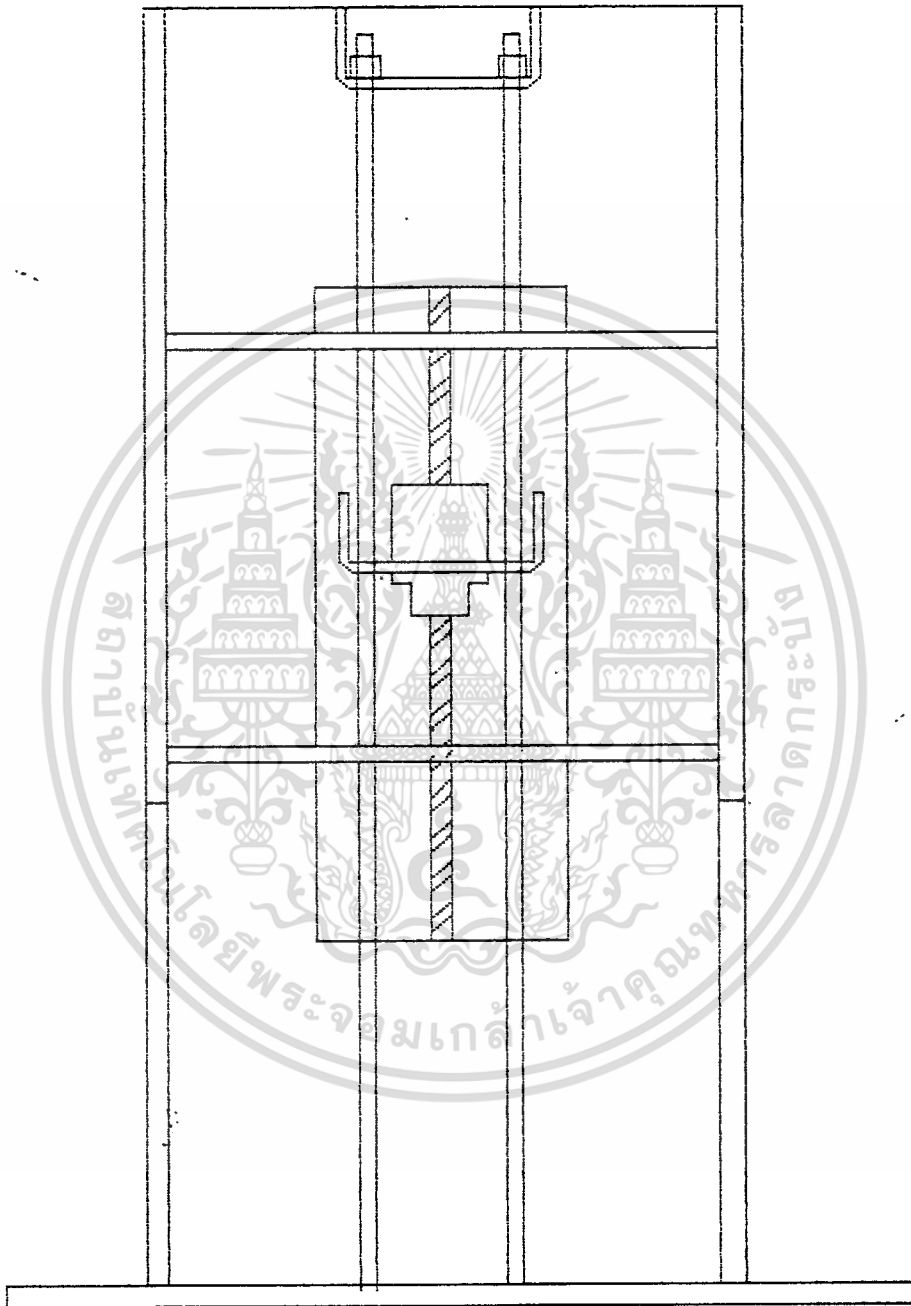


Fig.10 Front View of Super Drill EDM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์

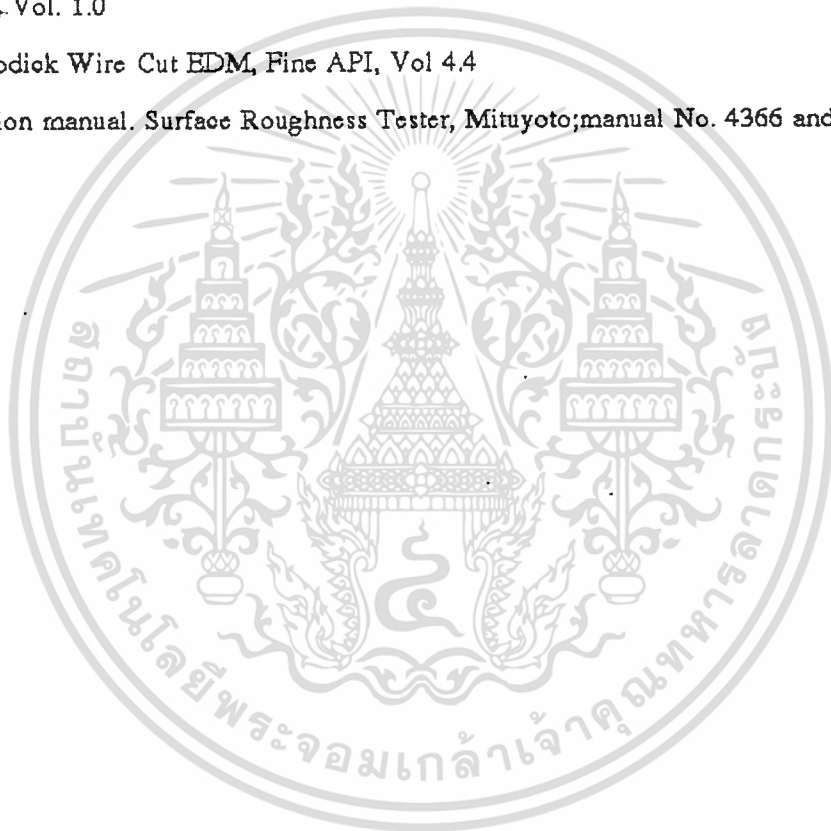
จากการออกแบบโครงการนี้ เราได้ทำการออกแบบทุกชิ้นส่วนยกเว้นระบบควบคุม สำหรับการสร้างชิ้นงานและการประกอบ เราได้ทำการประกอบชิ้นงานบางส่วนที่จำเป็นซึ่งสามารถนำไปพัฒนาในปีการศึกษาต่อไปได้

ปัญหาที่พบในโครงการนี้คือ

- ไม่สามารถหาชิ้นส่วนบางชิ้นได้ตรงตามที่ออกแบบไว้
- ขนาดและความหนาของแผ่นอลูมิเนียมทำให้มีปัญหาในการตัด(ต้องไปหาร้านที่มีเครื่องตัดขนาดใหญ่)
- ความฝืดของชิ้นงานบางส่วน เช่นที่ Guide Line จะมีความฝืดมากในขณะที่เคลื่อนที่ขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. BLACK & ADAM , “ MACHINE DESIGN , ” McGraw - Hill , 1986
2. J.E. SHIGLEY , “ MECHANICAL ENGINEERING DESIGN , ” McGraw - Hill , 1977
3. E.BUCKINGHAM & RYFFEL , “Design of Worm and Spiral Gears , ” The Industrial Press.
4. Wire Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply Unit MARK-EK, Code Instruction, Fine Sodiak, Vol. 1.0
5. Fine Sodiak Wire Cut EDM, Fine API, Vol 4.4
6. Operation manual. Surface Roughness Tester, Mituyoto; manual No. 4366 and manual No. 4339



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

Project นี้ สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย จึงขอขอบคุณผู้มีส่วนร่วม ที่ทำให้ Project นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ดังต่อไปนี้

1. รศ. ทวี เทศเจริญ
2. ดร. มงคล มงคลวงโรจน์
3. พี่เก้ (สุรการภาคเครื่องกล)
4. เพื่อนร่วม Project ของเราทุกคน และ ผู้มีส่วนร่วมอื่นๆอีกมากมาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้