ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที โดยประยุกต์ใช้การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

Wear Resistance of T-slot End Mill by Applied the Designment and Analysis of Experiment

ชนะพล วงศ์ดาราวรรณ์[1] นันทวรรณ อ่ำเอี่ยม[1] นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์[2] และ ปริญญา ศรีสัตยกุล[3]
[1]สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
[2]ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
[3]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
E-mail: 6414940018@rumail.ru.ac.th*

Chanapol Wongdarawan[1] Nanthawan Ameam[1] Nitidetch Koohathongsumrit[2] and Parinya Srisattayakul[3]
[1]Major in Engineering Management and Technology, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University
[2]Department of Statistics Faculty of Science Ramkhamhaeng University
[3]Department of Mechanical and Industrial Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Krungthep
E-mail: 6414940018@rumail.ru.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีที่ผ่านการเคลือบผิวโดยวิธีคาโทดิกอาร์ค ในกระบวนการตัดเฉือนขึ้นงานทดสอบเหล็กหล่อมาตรฐาน JIS เกรด FC25 โดยมีวัสดุผิวของดอกกัดร่องตัวทีที่ทำการศึกษาอยู่ 3 ชนิด คือไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว, ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ (TiAlN) และไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ (TiCN) ภายใต้การใช้น้ำมันตัดชนิดผสมน้ำเป็นสารหล่อเย็น โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการวิเคราะห์ 3 ส่วนเกี่ยวกับผลตอบสนอง ได้แก่ ความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ น้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที และระดับการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีโดยการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างของวัสดุ จากการวิเคราะห์การสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างดอกกัดที่เคลือบผิวและดอกกัดที่ไม่เคลือบผิวสามารถบ่งชี้ว่า ปัจจัยที่เหมาะสมการสึกหรอของดอกกัดที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการกัดงานคือดอกกัดที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์(TiCN) ส่วนการสึกหรอของดอกกัดที่ไม่เคลือบผิวมีผลลัพธ์ปัจจัยที่เหมาะสมดี เป็นอันดับสองและดอกกัดที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ (TiAlN) มีการสึกหรอมากที่สุด

คำหลัก การเคลือบผิว ,ความหยาบผิว และระดับการสึกหรอ

Abstract

This research studies the wear behavior of coated T-slot end mills using the cathodic arc method. In the machining process of cast iron test specimens of JIS standard FC25 grade, 3 types of T-slot end mill surface materials are studied: uncoated, titanium aluminum nitride. and titanium carbonitrides Under the use of water-based cutting fluid as a coolant the factorial design method was used to analyze 3 parts of the response, namely, the average surface roughness of the test piece: Lost

weight of T-slot milling cutter and the degree of wear of T-slot end mills by material structure analysis. From the wear analysis of T-slot end mills, it was found that when comparing coated and uncoated end mills, it could indicate that the least wear end mills when milling is titanium carbonitride coated end mills. Wear was second best in uncoated end mills and titanium aluminum nitride coated end mills had the most wear.

Keywords: coating, surface roughness and the degree of wear

1. บทนำ

กระบวนการตัดเฉือนโลหะในกระบวนการขึ้นรูป เช่น งานกลึง งานไส งานเจียระไน และงานกัด เป็นต้น โดยเครื่องจักรสำหรับกระบวนการดังกล่าวที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างมากเป็นอันดับต้นๆ ในยุคปัจจุบันนี้ คือ เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC-milling Machine) ซึ่งให้ค่าความละเอียดผิวงานและขนาดที่มีความเที่ยงตรงสูง เนื่องจากเครื่องกัดซีเอ็นซีสามารถกำหนดค่าสภาวะที่เหมาะสมในการตัดเฉือนแม่นยำสูงมากถึงระดับไมครอน โดยกระบวนการตัดเฉือนโลหะในกระบวนการขึ้นรูปอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนี้ คือ การนำดอกกัดร่องตัวที (T-slot milling cutter) มาใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงาน ซึ่งประสิทธิภาพของดอกกัด T-slot ในการต้านการสึกหรอ (Wear Resistance) มีความสำคัญมาก ซึ่งเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งแล้ว คมตัดของดอกกัด T-slot จะเกิดการสึกหรอทำให้คุณภาพภายหลังการตัดเฉือนลดลง การสึกหรอที่คมตัดเหล่านี้ สามารถปรับปรุงให้ลดลงได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีวิศวกรรมพื้นผิว (Surface Engineering Technology) มาช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้แก่ดอกกัด T-slot ให้สูงมากขึ้นได้ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้อีกด้วย

ความสำคัญของปัญหาของการสึกหรอของคมตัดดอกกัดร่องตัวที อันเนื่องมาจากสาเหตุการรับภาระทางกลจากกระบวนการตัดเฉือน เช่น การเสียดสี (Abrasion) และแรงกระแทก (Impact Force) เป็นต้น ส่งผลทำให้ได้คุณภาพผิวชิ้นงานมีคุณภาพไม่ดีตามที่ต้องการ รวมไปถึงความคุ้มค่าของอายุการใช้งานของดอกกัดร่องตัวที (Life value of T-slot milling cutter) อย่างเต็มประสิทธิภาพด้วย เพราะดอกกัดร่องตัวที (T-slot milling cutter) มีราคาค่อนข้างสูง ถ้าหากใช้งานไปอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพแล้วต้องเปลี่ยนดอกกัดร่องตัวที ใหม่ก่อนเวลาอันควร อาจไม่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพและความคุ้มค่าสูงสุด

จุดสำคัญที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งานตัวอย่างการลดต้นทุนของดอกกัดร่องตัวที ผลลัพธ์ของการสึกหรอของดอกกัดดีขึ้น และในสองขั้นตอนและการเคลือบผิวดอกกัดที่เหมาะสมทำให้ใช้งานได้นานขึ้นรอบการปรับสภาพ ดังตัวอย่างการเปรียบเทียบข้อเท็จจริงของราคาดอกกัดร่องตัวที และเงื่อนไงราคาดอกกัดเมื่อผ่านการเคลือบผิว ดังนี้

- ดอกกัดที่ไม่มีการเคลือบผิว ราคาเฉลี่ยดอกละ 1500 บาท
- ค่าเคลือบผิวดอกกัด ราคาเฉลี่ยดอกละ 300 บาท
- ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิว ราคาเฉลี่ยดอกละ 1800 บาท

ราคาของกระบวนการเคลือบผิวจะอยู่ที่ 300 บาท ต่อหนึ่งดอกกัด จากการประมาณการณ์ ดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิว จะมีอายุการใช้งานมากขึ้นโดยประมาณ ถึง90% ทำให้ประหยัดลดต้นทุนโดยประมาณ 1200 บาท ต่อหนึ่งดอกกัด ความสามารถในการคาดการณ์อายุการใช้งานของดอกกัดร่องตัวที และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของดอกกัดร่องตัวทีมากขึ้น

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้จะทำการศึกษาเรื่องวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการสึกหรอโดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางด้านพื้นผิวเชิงวิศวกรรมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับดอกกัดร่องตัวทีด้วยวิธีการเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค (Cathodic Arc) โดยการใช้สารเคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ (Titanium Aluminum Nitride : TiAlN) และไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Titanium Carbon Nitride : TiCN) ซึ่งฟิล์มเคลือบทั้ง 2 มีสมบัติทางด้านความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดี จาก

การศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจนเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายสำหรับวงการอุตสาหกรรมเครื่องมือตัดในปัจจุบัน จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

ผู้วิจัยได้จัดทำการค้นคว้าอิสระจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีจากการใช้งาน อันจะนำไปสู่การทราบถึงสมบัติความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีการวิจัย

2.1 ศึกษาสมบัติความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที (T-slot milling cutter) ที่ผลิตจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์(WC) ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค 2 ชนิด คือ ผิวเคลือบ TiAlN และผิวเคลือบ TiCN สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้กับดอกกัดได้

2.2 ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที การสึกหรอของดอกกัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยธีคาโทดิกอาร์ค 2 ชนิด คือ ผิวเคลือบ TiAlN และผิวเคลือบ TiCN อาจมีพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที หลังจากการทดลองและเพื่อศึกษาการสึกหรอเชิงเปรียบเทียบเพื่อหาจุดอ่อนที่มี เป็นจุดที่ทำการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

2.3 ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการดำเนินงาน

2.3.1 เครื่องมือตัดที่ใช้ในการศึกษา คือ ดอกกัดร่องตัวที (T-slot milling cutter) ที่ผลิตจากวัสดุ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm มีจำนวนคมตัด 6 คมตัด

2.3.2 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ (Specimen) คือ เหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 มีขนาด 50 x 50 x 200 mm.

2.3.3 เครื่องกัดซีเอ็นซี ที่ใช้ในการศึกษาทดลองผลิตโดยบริษัท HASS รุ่น VERTICAL CENTER UMC 750

2.3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปัจจัย (Factor) 2 ปัจจัย คือ สารเคลือบ และ ระยะทางในการกัด

- ปัจจัยที่ 1 สารเคลือบที่ มี 3 ระดับ ได้แก่

1.) ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว (WC)

2.) ดอกกัดร่องตัวทีที่ผ่านการผิวเคลือบผิว TiAlN

3.) ดอกกัดร่องตัวทีที่ผ่านการผิวเคลือบผิว TiCN

- ปัจจัยที่ 2 ระยะทางในการกัด ของดอกกัดร่องตัวที ที่มี 4 ระดับได้แก่ ระยะทาง 4,8,12 และ 16 เมตร

2.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองของการควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Machining)

ก่อนอื่นของทั้งหมดที่จะมีเริ่มการทดลองในกระบวนการกัดที่จะต้องให้ความสำคัญกับคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการกัด (Milling process) จะมีผลกระทบมาจากการกำหนดค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) และอัตราป้อน (Feed Rate) ของเครื่องมือตัด (Cutting tool) ที่เหมาะสม และในการวิจัยของการค้นคว้าอิสระนี้เลือกใช้เครื่องกัด CNC ในกระบวนการทดสอบจำเป็นจะต้องมีการกำหนดความเร็วรอบ (speed) และอัตราป้อน (table feed) ให้เหมาะสม ความเร็วรอบ (speed, n) คือ จำนวนรอบของเครื่องมือตัด (cutting tool) ที่หมุนได้ในขณะที่เครื่องมือกำลังตัดเฉือนชิ้นงานในระยะเวลา 1 นาที ซึ่งความเร็วรอบมีหน่วยเป็นรอบ/นาที (rev./min., rpm) อัตราป้อน (Table feed, Ft) คือ ระยะทางที่เครื่องมือตัด (Cutting tool) เคลื่อนที่ตัดเฉือนชิ้นงานในระยะเวลา 1 นาที ซึ่งอัตราป้อนมีหน่วยเป็นเมตร/นาที (m/min.)

2.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองของการควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Machining)

- ความเร็วรอบในสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบงานกัด (speed, n) คำนวณได้จาก $n = Vc \times 1000 / \pi \times D$

• Vc คือ ความเร็วตัด (Cutting velocity) หน่วยเป็นเมตรต่อนาที (m/min.) หาได้จากตารางข้อมูลทางเทคนิคของงานกัด (Cutting data) ตามมาตราฐานในหนังสือตารางโลหะ ในการทดลองครั้งนี้

- ดอกกัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวนฟันตัด 6 ฟัน

- การกัดงานแบบกัดด้านข้าง (Side cutting) ซึ่งตารางข้อมูลทางเทคนิคของงานกัด (Cutting data) ตามมาตราฐานในหนังสือตารางโลหะ และการทดลองนี้ กำหนดวัสดุชิ้นงาน: เหล็กหล่อสีเทา (JIS-FC25) : ซึ่งตามตารางแสดงในช่องเหล็กหล่อ ซึ่งมีค่าความแข็งมากกว่า 150 HB และดอกกัดที่เคลือบผิว ในตารางได้กำหนดให้ใช้ค่า Vc = 27 m/min.

ในการทดลองครั้งนี้มีดอกกัดไม่เคลือบผิวและเคลือบผิว ส่วนดอกกัดที่ไม่ได้เคลือบผิวจะค่า
Vc = 17 m/min. การทดสอบดอกกัดในการค้นคว้าอิสระนี้จะใช้ค่า Vc = 27 m/min เพียงค่าเดียว เพื่อพิสูจน์ที่ค่าสูงกว่า ซึ่งครอบคลุมในการทดสอบด้านทานการสึกหรอที่สูงกว่าอยู่แล้ว

- π คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3.1416
- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของระยะคมตัดมากสุดของเครื่องมือตัด (Effective cutting diameter) ที่เลือกใช้ในการกัดงาน หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

ซึ่งได้นำมาแทนค่าสูตร เพื่อหาคำนวณความเร็วรอบ และอัตราป้อน เพื่อใช้ในงานกัดทดสอบดังต่อไปนี้

.....คำนวณความเร็วรอบ

n = (Vc x 1000) / (π x D)

n = (27 x 1000) / (3.1416 x 16)

n = 537.14 รอบ/นาที (rev. /min.)

ค่าใช้งานมักจะถูกปัดเศษจากค่าที่คำนวณได้ให้เป็นจำนวนเต็มร้อยหรือเต็มสิบ ดังนั้นจะใช้ความเร็วรอบในงานกัด = 537 รอบต่อนาที (rev. /min.)

-อัตราป้อนในในสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบงานกัด (Table feed, Ft) คำนวณได้จาก

- n คือ ความเร็วรอบในงานกัด (Speed)
- Fz คือ อัตราป้อนต่อ 1 คมตัด (ฟัน) หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อฟัน (mm. /tooth) หาได้จากตารางข้อมูลทางเทคนิคของงานกัด (Cutting data) ตามมาตราฐานในหนังสือตารางโลหะ คือ เส้นผ่าศูนย์ของดอกกัดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 มิลลิเมตร. แต่ห้ามน้อยกว่า 12 มิลลิเมตร. จะใช้ค่า Fz ที่ 0.025 และในการทดลองนี้ใช้ดอกกัดเส้นผ่าศูนย์ = 16 มิลลิเมตร. ก็มีความเหมาะสมจะใช้ค่า Fz ที่ 0.025
- z คือ จำนวนคมตัดในระนาบการตัดเฉือน (Effective cutting teeth) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องมือตัดที่เลือกใช้ในการกัดงาน = 6 ฟัน (Cutting teeth)

.....คำนวณอัตราป้อนที่ได้

Ft = n x Fz x z

Ft = 537 x 0.025 x 6

Ft = 80.55 เมตรต่อนาที (m. /min.)

ค่าใช้งานมักจะถูกปัดเศษจากค่าที่คำนวณได้ให้เป็นจำนวนเต็มร้อยหรือเต็มสิบ ดังนั้นใช้
อัตราป้อนในงานกัด = 80 เมตรต่อนาที

ตารางที่ 1 .ค่าความเร็วตัดและอัตราป้อน

ความเร็วตัด (Cutting velocity) หน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/min.)	อัตราป้อนต่อ 1 คมตัด (ฟัน) หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อฟัน (mm./tooth)
Vc = 27 m/min.	Fz = 0.025 mm./Tooth

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองของการควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Machining)

สภาวะในการทดลอง (Experimental conditions)	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (The Parameter condition in Experimental)
ความเร็วรอบ (Spindle Speed)	537 รอบ/นาที
อัตราป้อน (Feed Rate)	80 เมตร/นาที
ความลึกในการตัดเฉือน (Depth of Cut)	0.5 มิลลิเมตร

2.6 ทำการออกแบบการทดลองก่อนที่จะทำการเก็บข้อมูลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล จากนั้นดำเนินการตามแผนการทดลองที่ได้วางไว้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองค่าสึกหรอบริเวณด้านหน้าของคมตัด (Flank Wear: VB) และค่าน้ำหนักที่หายไป โดยนำมาเปรียบเทียบระยะทางของดอกกัดร่องตัวทีที่ระยะทาง 4,8,12 และ 16 เมตร เพื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงสถิติ

2.6.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอรียล และข้อมูลผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของดอกกัดร่องตัวที และค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแต่ละช่วงของระยะทางการตัดเฉือนชิ้นงาน (หลังจากการบันทึกข้อมูล)

2.6.2 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที (Weight Loss) (หลังจากการบันทึกข้อมูล)

2.6.3 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ของค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบ (หลังจากการบันทึกข้อมูล)

2.6.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการ

ตอบสนองระดับความเหมาะสมของปัจจัย (Response Optimization: Weight Loss, Ra) (หลังจากการบันทึกข้อมูล)

งานวิจัยนี้มีการออกแบบการทดลองก่อนที่จะทำการเก็บข้อมูลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แฟกทอเรียลจะประกอบไปด้วยปัจจัย(Factor) 2 ปัจจัย คือสารเคลือบ และ ระยะทางการกัดตัดเฉือนชิ้นงานของดอกกัดร่องตัวที

ปัจจัยที่ 1 คือกระบวนทางด้านสารเคลือบดอกกัดร่องตัวที คือ 3 ระดับตัวแปร

1. ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว (WC) (Uncoating)
2. ผ่านการเคลือบผิว ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN)
3. ผ่านการเคลือบผิว ไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (TiCN)

ปัจจัยที่ 2 คือระยะทางในการกัดตัดเฉือนชิ้นงานของดอกกัดร่องตัวที

ระยะทางในการกัด ที่มี 4 ระดับตัวแปร ได้แก่ ระยะทาง 4,8,12 และ 16 เมตร

จะมีการทดลองพื้นฐาน 12 การทดลอง โดยมีการเก็บซ้ำรูปแบบการทดลอง 5 ครั้ง ดังนั้นจะมีการทดลองทั้งหมด 60 การทดลอง

- ข้อมูลผลค่าน้ำหนักของดอกกัดร่องตัวทีและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบแต่ละช่วงของระยะทางการตัดเฉือนชิ้นงาน
- การออกแบบตารางเก็บข้อมูลใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของดอกกัดแต่ละช่วงของระยะทางการตัดเฉือนชิ้นงาน
- ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละช่วงของระยะทางการตัดเฉือน

3. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที (T-Slot End Mill) ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค (Cathodic Arc) ในกระบวนการงานกัดผิววัสดุเหล็กหล่อเกรด FC25 โดยมีวัสดุผิวของดอกกัดร่องตัวทีที่ทำการศึกษาอยู่ 3 ชนิด คือ ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว (Uncoated) ,ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ (TiAlN) และไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ (TiCN) การประเมินผลลัพธ์เกี่ยวกับการสึกหรอนั้นเป็นการพิจารณาจากการสึกหรอบริเวณด้านหน้าของคมตัด (Flank Wear) รวมไปถึงค่าน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) และข้อมูลการวิเคราะห์เชิงสถิติ (Statistical Analysis) เพื่อให้ทราบถึงอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่นำมาใช้เป็นวัสดุในการทดสอบ ส่งผลให้สามารถวางแผนการใช้งานและการเปลี่ยนทดแทนใหม่เมื่อหมดอายุการใช้งาน ดังนั้นฐานข้อมูลเกี่ยวกับกลไกของการสึกหรอและอายุของเครื่องมือตัดเหล่านี้ จะช่วยให้เกิดการวางแผนกระบวนการผลิตที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการทำงานให้ดียิ่งขึ้นและช่วยให้การวางแผนการผลิตมีความสอดคล้องเหมาะสมกับความเป็นจริง

ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัที (Weight Loss)

General Factorial Regression: Weight Loss (g) versus Type of Coating, Cutting Length (m)

Factor Information

Factor	Levels	Values
Type of Coating	3	TiAlN, TiCN, Uncoated
Cutting Length (m)	4	4, 8, 12, 16

Analysis of Variance

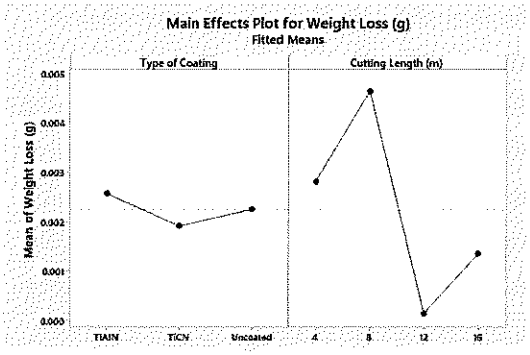
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	0.000269	0.000019	158.88	0.000
Linear	5	0.000173	0.000035	289.89	0.000
Type of Coating	2	0.000004	0.000002	17.71	0.000
Cutting Length (m)	3	0.000169	0.000056	471.34	0.000
2-Way Interactions	6	0.000035	0.000006	49.71	0.000
Type of Coating*Cutting Length (m)	6	0.000035	0.000006	49.71	0.000
Error	48	0.000006	0.000000		
Total	59	0.000214			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0003454	97.33%	96.71%	95.82%

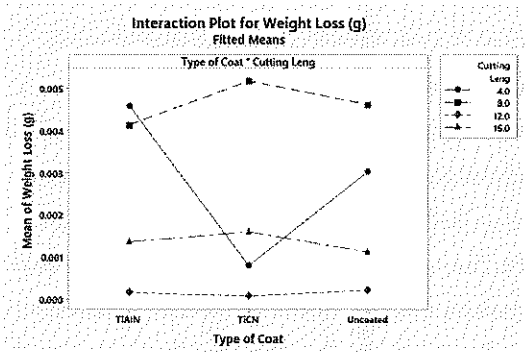
จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงแฟกทอเรียลของค่าน้ำหนักที่หายไปดอกกัดร่องตัวที พบว่าเมื่อเปรียบเทียบลักษณะระหว่าง ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวและดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-Value ในเชิงสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือมากถึง 97.33% จากผลของกราฟผลกระทบของปัจจัยหลัก ดังภาพและกราฟผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย ดังภาพซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถบ่งชี้ว่าค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที ลดลงน้อยที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการ งานกัด CNC ด้วยดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ ในการใช้ส่วนผลลัพธ์

ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับ



กราฟผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect Plot) และค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที (Weight Loss) ของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร

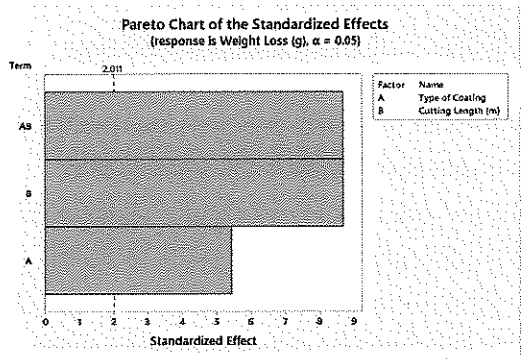
แสดงกราฟผลกระทบของปัจจัยหลัก ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที ของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร สามารถบ่งบอกได้ว่าจากการทดสอบเมื่อผ่านกระบวนการกัด ด้วย CNC ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ นั้นจะทำให้ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุดที่ระยะทางการตัดเฉือนชิ้นงานช่วง 12 เมตรส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิว มีค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีมีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับ



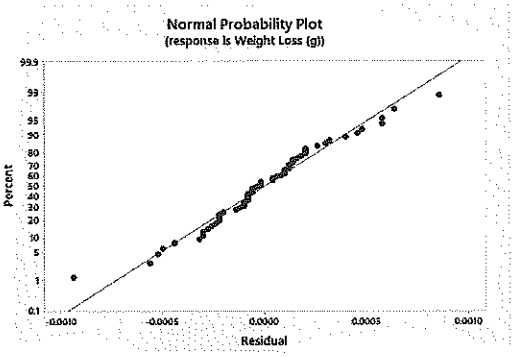
กราฟผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที (Weight Loss) ของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร

แสดงกราฟผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัยค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที ของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร สามารถบ่งบอกได้ว่าจากการทดสอบเมื่อผ่านกระบวนการกัด CNC ในระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานที่ 4 เมตรดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์มีค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุด ส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ มีผลลัพธ์เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับดังกราฟ ในระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานที่ 8 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์มีค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุด ส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์มีผลลัพธ์เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับ ในระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานที่ 12 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์มีค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุด ส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิว และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ มีค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที ลดลงเท่า ๆ กัน ส่วนในระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานที่ 16 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุด ส่วนดอกกัดร่องตัวทีเคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์มีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ มีผลลัพธ์เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับดังกราฟ ที่ระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานช่วง 12 เมตร ถึง 16 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิว มีค่าน้ำหนักที่เพิ่ม อาจเป็นเพราะเกิดจากการสึกหรอเนื่องจากการเกาะติด เป็นการสึกหรอจากการใช้งานของวัสดุสองชนิดคือดอกกัดร่องตัวทีกับชิ้นงานเหล็กหล่อ FC25 สัมผัสกันควบคู่ไปกับการเคลื่อนที่ แล้วทำให้เกิดความร้อนในบริเวณผิวสัมผัสทำให้เกิดการหลอมติดติดกัน จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าน้ำหนักของดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานช่วง 8 เมตร ถึง 16 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีเคลือบผิวไทเทเนียม

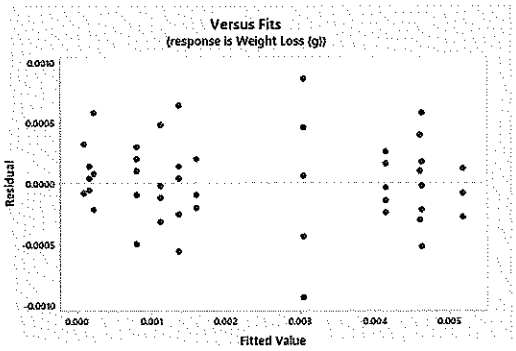
อลูมิเนียมไนตรายด์มีค่าน้ำหนักที่เพิ่ม อาจเป็นเพราะเกิดจากการสึกหรอเนื่องจากการเกาะติด เป็นการสึกหรอจากการใช้งานของวัสดุสองชนิด คือดอกกัดร่องตัวทีกับชิ้นงานเหล็กหล่อ FC25 สัมผัสกันควบคู่ไปกับการเคลื่อนที่ แล้วทำให้เกิดความร้อนในบริเวณผิวสัมผัสทำให้เกิดการหลอมติดติดกัน จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าน้ำหนักของดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์มีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นในช่วง 8 เมตร ถึง 16 เมตร ส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์มีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นที่ระยะทางในการตัดเฉือน 12 เมตร ดังกราฟ



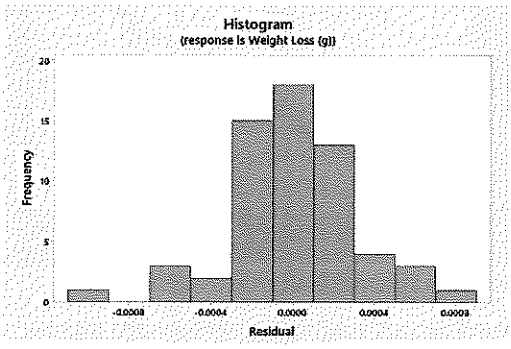
แผนภูมิพาเรโต (Pareto) แสดงผลกระทบที่มีต่อค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที(Weight Loss) แสดงแผนภูมิพาเรโตแสดงถึงผลกระทบที่มีต่อค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที สามารถบ่งบอกได้ว่า เรื่องชนิดของสารเคลือบ และความยาวตัดนั้นแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีนัยยะสำคัญโดยเส้นนัยสำคัญ (Significant Line) จะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีจะอยู่เกินเส้นสีแดงนั้นคือ ชนิดของสารเคลือบ และความยาวตัด ปัจจัยทั้งสองทำให้มีผลกระทบ ต่อค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที



ภาพ กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนค้าง
แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนค้าง (Normal Probability Plot of Residuals) สามารถบ่งบอกได้ว่า ข้อมูลส่วนตกค้างของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที (Weight Loss) มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสามารถดูได้จากลักษณะของกราฟ บ่งบอกว่าจุดส่วนตกค้างบนกราฟนั้นเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (Linear) และมีความห่างแต่ละจุดนั้นใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

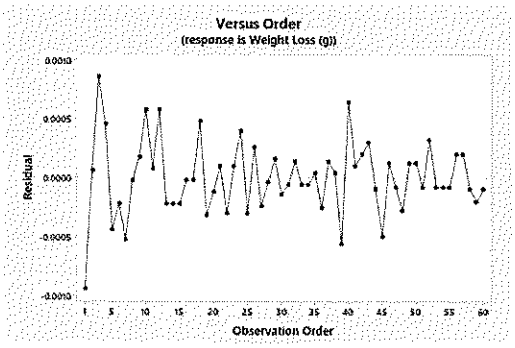


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plot of Residuals Versus Fitted Values) แสดงกราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย จากกราฟสามารถบ่งบอกได้ว่า การกระจายตัวของข้อมูลส่วนตกค้างมีลักษณะที่กระจายตัวต่างกันและส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระ (Independence) และเพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนนั้น บ่งบอกได้ว่า ค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ที่น่าพอใจ เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆกัน จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพ กราฟการแจกแจงของข้อมูล

แสดงกราฟการแจกแจงของข้อมูลสามารถบ่งบอกได้ว่าข้อมูลของการทดลองนั้นมีการกระจายตัวของข้อมูลที่มีความสม่ำเสมอและมีลักษณะที่สมมาตร (Symmetry) การกระจายตัวของข้อมูลนั้นมีความสม่ำเสมอกัน จึงทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายรูประฆังคว่ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากข้อมูลนั้นเป็นการแจกแจงแบบปกติ



ภาพกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง

จากภาพที่แสดงกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus the Observation Order of the Data) สามารถบ่งบอกได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระ (Independence) ซึ่งสังเกตจากกราฟได้ว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างนั้น ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตาราง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Response Optimization :Weight Loss)

Response Optimization: Weight Loss (g)

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Weight Loss (g)	Minimum		0	0.0053	1	1

Solution

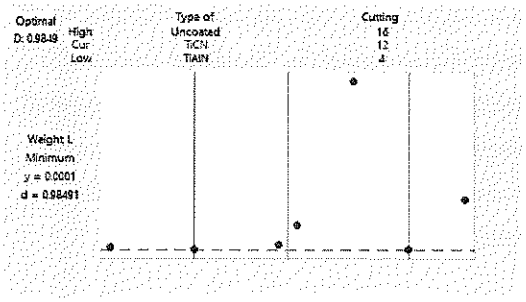
Solution	Type of Coating	Cutting of Length (m)	Weight Loss (g) Fit	(g) Composite Desirability
1	TiCN	12	0.00008	0.984906

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
Type of Coating	TiCN
Cutting Length (m)	12

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Weight Loss (g)	0.00008	0.000154	(-0.000231, 0.000391)	(-0.000681, 0.000841)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที (Weight Loss) โดยจากการวิเคราะห์พบว่าดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ (TiCN) เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ที่ระยะการตัดเฉือน 12 เมตร เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที (Weight Loss) ลดลงน้อยที่สุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถไปอ้างอิงกับผลลัพธ์ของกราฟดังภาพ กราฟผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม



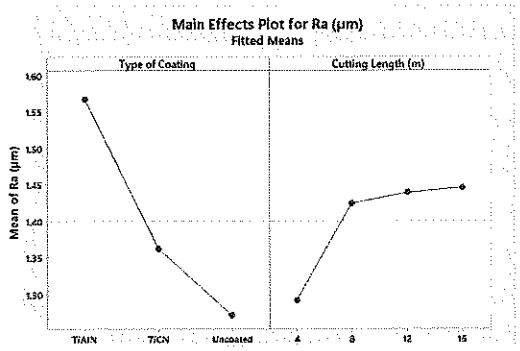
กราฟผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากภาพ แสดงกราฟผลกระทบตอบสนองระหว่างปัจจัยที่เหมาะสมนั้น แสดงให้เห็นการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที สรุปได้ว่าจากการวิเคราะห์พบว่าดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ (TiCN)

เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ในระยะในการตัดเฉือนที่ 12 เมตร เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมความพึงพอใจเชิงสถิติ (desirability) สูงสุดถึง 98.49% และจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักที่หายไปลดลงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.0001 กรัม ดังนั้นควรใช้ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ในระยะการตัดเฉือนที่ 12 เมตร นั้นจะได้ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุด

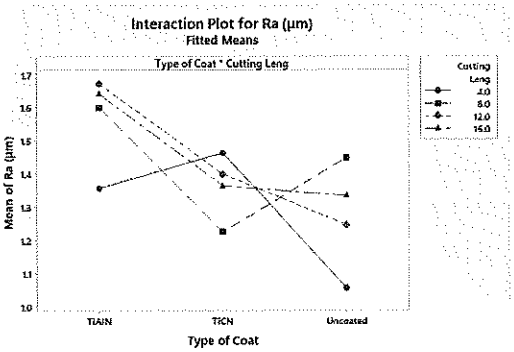
จากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์พบว่า ลักษณะการศึกษาของดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบด้วยสารแต่ละชนิดมีการสึกหรอที่เป็นไปตามแนวทางเดียวกัน คือมีร่องรอยการไถลจากการขัดถูกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิดคือดอกกัดร่องตัวทีกับชิ้นงานเหล็กหล่อเกรด FC25 ทำให้เกิดการสึกหรอเนื่องจากการขีดข่วน นั่นคือการที่ชิ้นส่วน 2 ชนิดที่มีความแข็งต่างกันมาก เมื่อมีการสัมผัสและเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วกับภาระทางกล ชิ้นส่วนที่มีความแข็งมากขีดข่วนชิ้นส่วนที่มีความแข็งน้อยกว่า ผลที่เกิดจากการสึกหรอแบบนี้ทำให้อนุภาคสึกหรอเป็นเส้นเล็กๆ และในช่วงระยะทางระยะการตัดเฉือนที่ 8 เมตรถึง 16 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวมีร่องรอยการสึกหรอ และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ พบว่าเกิดการสึกหรออย่างเห็นได้ชัด เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ซึ่งสาเหตุหนึ่งอาจมาจากกระบวนการทดสอบเนื่องจากสารเคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์เหมาะสำหรับกระบวนการกัดแห้ง แต่เมื่อทำการทดสอบได้ทำการใช้สารหล่อเย็นซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์มีการสึกหรอเร็วขึ้น ขณะที่ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบสารไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์นั้นสามารถต้านทานการสึกหรอได้ไปจนถึงระยะทางในการตัดเฉือนที่ 12 เมตร ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลที่ ได้ว่าดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบสารไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์นั้นมีอายุการใช้งานมากกว่าดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์

ภาพ กราฟผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect Plot) และค่าความหยาบผิวของดอกกัดร่องตัวที ของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร



จากภาพที่แสดงกราฟผลกระทบของปัจจัยหลัก ค่าความหยาบผิวของดอกกัดร่องตัวที ของระยะทาง 4, 8, 12 และ 16 เมตร สามารถบ่งบอกได้ว่าจากการทดสอบเมื่อผ่านกระบวนการกัด ด้วย CNC ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านเคลือบผิวนั้นจะทำให้ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุดที่ระยะทางการตัดเฉือนชิ้นงานช่วง 4 เมตรส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ มีค่าความหยาบผิวของดอกกัดร่องตัวทีมีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับ

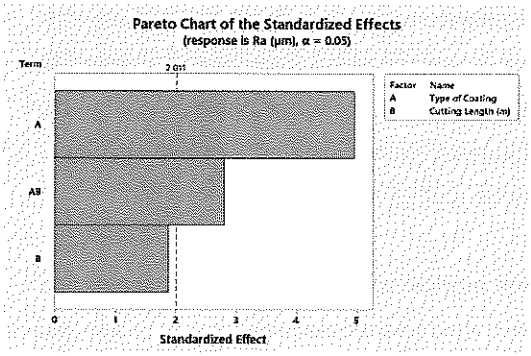
ภาพ กราฟผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) ค่าความหยาบผิวของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร



จากภาพแสดงกราฟผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย ค่าความหยาบผิวของดอกกัดร่องตัวที ของระยะทาง 4, 8, 12 และ16 เมตร สามารถบ่งบอกได้ว่าจากการทดสอบเมื่อผ่านกระบวนการกัด CNC ในระยะทางในการตัดเฉือนชิ้นงานที่ 4 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่ให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุด คือ ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว รองลงมาคือดอกกัดร่อง

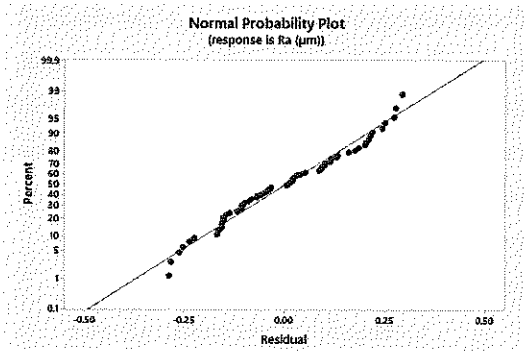
ตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ ตามลำดับ ส่วนที่ระยะการตัดเฉือน 8 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีที่ให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุด คือดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ รองลงมาคือดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ ตามลำดับ และในระยะการตัดเฉือนที่ 12-16 เมตร ดอกกัดร่องตัวทีทีที่ให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุด คือ ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว รองลงมาคือดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ ตามลำดับ

ภาพแผนภูมิพาเรโต (Pareto) แสดงผลกระทบที่มีต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ



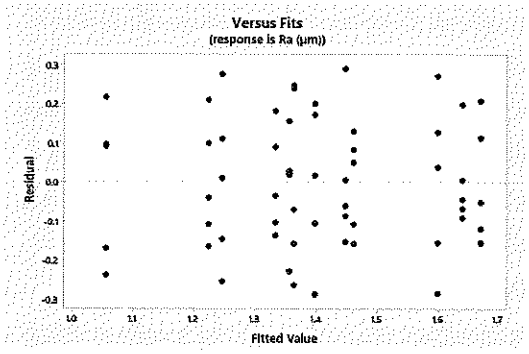
จากภาพค่า F-value มีค่าเท่ากับ 2.011 จะเห็นว่า ค่า A มีค่ามากกว่า 2.011 และ ค่า B มีค่าน้อยกว่า 2.011 ซึ่งสรุปได้ว่า ระยะการตัดเฉือนไม่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ ส่วนชนิดของสารเคลือบมีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ

กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนค้าง (Normal Probability Plot of Residuals)



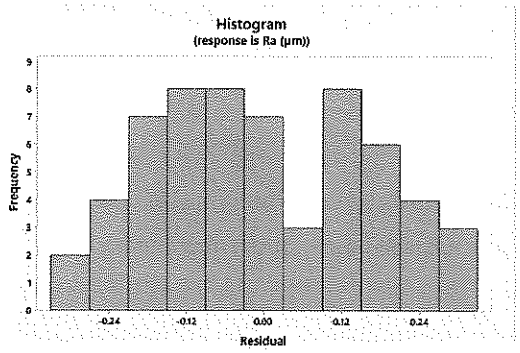
จากภาพที่แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนค้าง สามารถบ่งบอกได้ว่าข้อมูลส่วนตกค้างของค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสามารถดูได้จากลักษณะของกราฟ บ่งบอกว่าจุดส่วนตกค้างบนกราฟนั้นเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (Linear) และมีความห่างแต่ละจุดนั้นใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

ภาพกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plot of Residuals Versus Fitted Values)



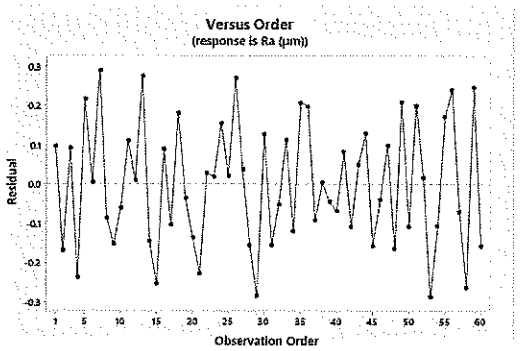
จากภาพ กราฟสามารถบ่งบอกได้ว่า การกระจายตัวของข้อมูลส่วนตกค้างมีลักษณะที่กระจายตัวต่างกันและส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระ (Independence) และเพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนนั้น บ่งบอกได้ว่า ค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ที่น่าพอใจ เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆกัน จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ภาพ กราฟการแจกแจงของข้อมูล



แสดงกราฟการแจกแจงของข้อมูลสามารถบ่งบอกได้ว่าข้อมูลของการทดลองนั้นมีการกระจายตัวของข้อมูลที่มีความสม่ำเสมอและมีลักษณะที่สมมาตร (Symmetry) การกระจายตัวของข้อมูลนั้นมีความสม่ำเสมอกัน จึงทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายรูประฆังคว่ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากข้อมูลนั้นเป็นการแจกแจงแบบปกติ

กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus the Observation Order of the Data)



แสดงกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง สามารถบ่งบอกได้ว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระ (Independence) ซึ่งสังเกตจากกราฟได้ว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างนั้น ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตาราง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Response Optimization :Weight Loss)

Response Optimization: Ra (µm)

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra (µm)	Minimum		0.817	1.88	1	1

Solution

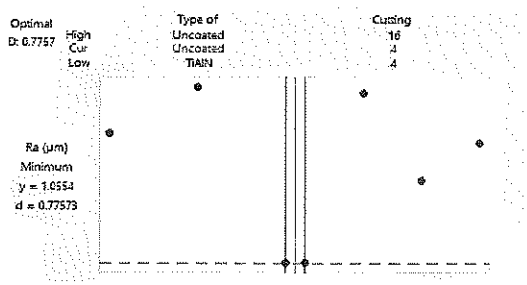
Solution	Type of Coating	Cutting Length (m)	Ra (µm) Fit	Composite Desirability
1	Uncoated	4	1.0554	0.775729

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
Type of Coating	Uncoated
Cutting Length (m)	4

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Ra (µm)	1.0554	0.0787	(0.8972, 1.2136)	(0.6679, 1.4429)

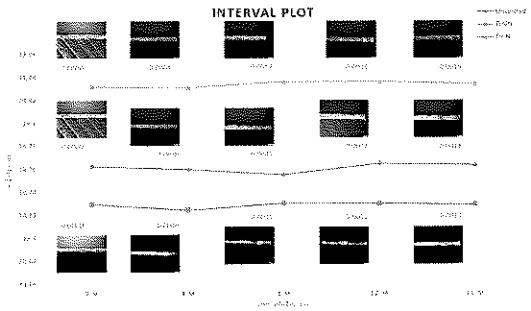
จากการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ โดยจากการวิเคราะห์พบว่าดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ที่ระยะการตัดเฉือน 4 เมตร เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถไปอ้างอิงกับผลลัพธ์ของกราฟ ผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม



ภาพ กราฟผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม

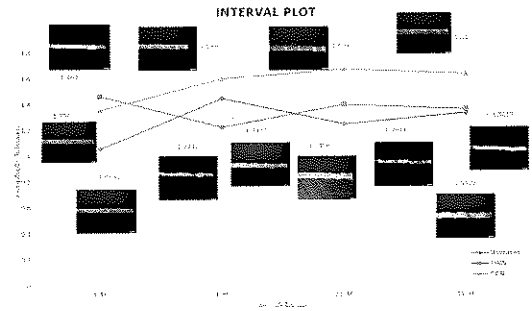
แสดงให้เห็นการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ สรุปได้ว่าจากการวิเคราะห์พบว่าดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ในระยะในการตัดเฉือนที่ 4 เมตร เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมความพึงพอใจเชิงสถิติ 77.57% และจะทำให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบน้อยที่สุดเท่ากับ 1.0554 ไมโครเมตร

ภาพ ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีเปรียบเทียบกับความยาวในการตัดเฉือน



เป็นกราฟแสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที เปรียบเทียบกับความยาวในการตัดเฉือน จะเห็นว่าดอกกัดร่องตัวทีทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้ำหนักที่หายไปลดลงน้อยที่สุดที่ระยะการตัดเฉือนเท่ากับ 12 เมตร โดยดอกกัดร่องตัวทีที่มีค่าน้ำหนักที่หายไปลดลงน้อยที่สุด ได้แก่ ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ ซึ่งมีค่าน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.0001 กรัม ส่วนดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ และดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ได้เคลือบผิว ที่ระยะการตัดเฉือน 12 เมตร มีค่าน้ำหนักที่หายไปลดลงเท่ากับ 0.0002 กรัม

ภาพ ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของดอกกัดร่องตัวที เปรียบเทียบกับความยาวในการตัดเฉือน



จากภาพ เป็นกราฟแสดงค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของดอกกัดร่องตัวทีเปรียบเทียบกับความยาวในการตัดเฉือน จะเห็นว่าดอกกัดร่องตัวทีที่มีค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบน้อยที่สุด ได้แก่ ดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว มีค่าความหยาบผิวชิ้นทดสอบเท่ากับ 1.0554 ไมโครเมตร ที่ระยะการตัดเฉือน 4 เมตร ถัดมาคือดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ มีค่าความหยาบผิวชิ้นทดสอบเท่ากับ 1.2242 ไมโครเมตร ที่ระยะการตัดเฉือน 8 เมตร และดอกกัดร่องตัวทีที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ มีค่าความหยาบผิวชิ้นทดสอบเท่ากับ 1.356 ไมโครเมตร ระยะการตัดเฉือน 4 เมตร

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีที่ผ่านการเคลือบผิวโดยวิธีคาโทดิกอาร์ค ในกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงานทดสอบเหล็กหล่อมาตรฐาน JIS เกรด FC25 โดยมีวัสดุผิวของดอกกัดร่องตัวทีที่ทำการศึกษาอยู่ 3 ชนิด คือไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว, ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ และไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ ภายใต้การใช้น้ำมันตัดชนิดผสมน้ำเป็นสารหล่อเย็น โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการวิเคราะห์ 3 ส่วนเกี่ยวกับผลตอบนอง ได้แก่ ความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ น้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที และระดับการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีโดยการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างของวัสดุ และอายุการใช้งานของดอกกัด ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดดังกล่าวสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

4.1 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงแฟกทอเรียลของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที พบว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะระหว่างดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวและดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-Value ในเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น95% โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือมากถึง 97.33% ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถบ่งชี้ว่าค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ด้วยดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ ในการใช้ส่วนผลลัพธ์ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับ

4.2 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงแฟกทอเรียลของความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของดอกกัดร่องตัวที พบว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะระหว่าง ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวและดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของค่า P-Value ในเชิงสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ 54.65% ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถบ่งชี้ว่าค่า

ความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบที่ดีที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ด้วยดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ส่วนผลลัพธ์ความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์มีผลลัพธ์ที่ดีเป็นอันดับที่ 2 และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์ เป็นอันดับที่ 3 ตามลำดับ

4.3 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสมของค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวที โดยจากการวิเคราะห์พบว่า ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ในระยะในการตัดเฉือนที่ 12 เมตร เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมความพึงพอใจเชิงสถิติ (desirability) สูงสุดถึง 98.49% และจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักที่หายไปลดลงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.0001 กรัม ดังนั้นควรใช้ดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ในระยะการตัดเฉือนที่ 12 เมตร นั้นจะได้ค่าน้ำหนักที่หายไปของดอกกัดร่องตัวทีลดลงน้อยที่สุด

4.4 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าผลการตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสมของความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ โดยจากการวิเคราะห์พบว่าดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว เมื่อผ่านกระบวนการงานกัด CNC ในระยะในการตัดเฉือนที่ 4 เมตร เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมความพึงพอใจเชิงสถิติ 77.57% และจะทำให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบน้อยที่สุดเท่ากับ 1.0554 ไมโครเมตร

4.5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที พบว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะระหว่างดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวและดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิว สามารถบ่งชี้ว่าการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการกัดงานคือดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมคาร์โบไนตรายด์ ส่วนการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวทีที่ไม่เคลือบผิวมีผลลัพธ์ดีเป็นอันดับสอง และดอกกัดร่องตัวทีที่เคลือบผิวไทเทเนียมอลูมิเนียมไนตรายด์มีการสึกหรอมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระเรื่อง ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที โดยประยุกต์ใช้การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความกรุณาของท่านอาจารย์ที่ปรึกษา และ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขข้อบกพร่อง จนทำให้งานการศึกษาอิสระฉบับนี้สมบูรณ์และบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ช่วยเหลือในการใช้ห้องทดลอง เครื่องจักรกลอัตโนมัติ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ และขอขอบคุณท่านอาจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ผศ.ชาลี ตระการกูล เทคโนโลยีซีเอ็นซี (2548) สำนักพิมพ์: ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), สมาคม

[2] ข้อมูลของเครื่องกัดซีเอ็นซี ที่ใช้ในการศึกษาทดลองผลิต HASS-VERTICAL-CENTER-UMC-750 https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/universal-machine/models/umc-750.html สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2566

[3] T-slot milling cutter และตำแหน่งมิติของ T-slot [สืบค้นออนไลน์] https://th.dmtg-ht.com/info/milling-the-t-slot-28897614.html

[4] เครื่องมือตัดเฉือนดอกเอ็นมิลล์ (End Mil) และวัสดุสารประกอบคาร์ไบด์ (Carbide) หรือ (Cemented Carbide / Sintered Carbide) [สืบค้นออนไลน์] https://www.rscarbide.com/Blog/detail/10

[5] น้ำมันตัด (Cutting Oil) [สืบค้นออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2566 https://eastern-produce.com/cutting-oil-type-article/

[6] การเคลือบ PVD Coating คืออะไร? คุณสมบัติของ TiAlN & TiCN โดยบริษัท NISSIN ELECTRIC (THAILAND)

CO., LTD. บริษัท นิชชิน อีเลคทริค (ประเทศไทย) จำกัด สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2566 http://www.nissin-thai.com/th/business/fine-coating-service/

[7] การสึกหรอของมีดกับการกำหนดอายุการใช้งาน, ความสัมพันธ์ของพัฒนาการของการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank wear) กับการกำหนดอายุการใช้งานของใบมีด ISO. ISO3685 Tool Life Testing with Single Point Turning Tools. 2nd Edition (1993)

[8] Response Surface Methodology by Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-Cook

[9] สถิติวิศวกรรม = Engineering statistics / Douglas C. Montgomery, George C. Runger; แปลและเรียบเรียงโดย ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูล

[10] รศ.บรรเลง ศรนิล และ รศ.สมนึก วัฒนศรียกุล ตารางคู่มืองานโลหะ [2554] ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[11] นายศราวุฒิ สมบูรณ์ นายอนวรรษ จำเริญ และนาย ธนวัฒน์ ตันนิวัฒน์. 2562. การศึกษาการสึกหรอของดอกกัดหัวบอลเคลือบผิวด้วยสาร TiAlN และ AlCrN โดยวิธีคาโทดิก อาร์ค วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

[12] เจษฎา รุจิสมนภา. 2556. การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกเอ็นมิลล์ที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบโดยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์. วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมโลหะการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[13] เครือวัลย์ มั่นระวัง. 2558. การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่นในกระบวนการตัดเจาะเหล็กซิลิกอน. วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[14] เพียงขวัญ กันหาภัย. 2560. ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิวและรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25. วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[15] ปฏิพัทธ์ หงส์สุวรรณ และ บัญญัติ พันธ์ประสิทธิ์เวช, 2560. ปัจจัยในการกัดขึ้นงานด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์เคลือบผิวไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของคมตัดและความเรียบผิว วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม

[16] ภาพที่ 2.10 แสดง T-slot milling cutter และตำแหน่งมิติของ T-slot [สืบค้นออนไลน์] ที่ https://th.dmtg-ht.com/info/milling-the-t-slot-28897614.html สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2566.