

**การศึกษาลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดระหว่างการเซาะร่องด้วยดอกกัดฟันตรง
ผ่านการจำลองเส้นทางการตัดด้วย VBA สำหรับ AutoCAD**
**A Study of Undeformed Chip Characteristics during Full Slotting with Straight Flute
Endmill via Cutting Path Simulation with VBA for AutoCAD**

จิตะพล หุยนันท์* และ กฤษฎา ไสสุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ : โทรศัพท์ : 083 430 0404, โทรสาร : 02 988 3666 ต่อ 3103

E-mail: thitaphol.huyanant@gmail.com

บทคัดย่อ

ลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาความแม่นยำและความน่าเชื่อถือในแบบจำลองกระบวนการกัดเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงต่อแรงตัด อายุการใช้งานของดอกกัดและความสมบูรณ์ของผิวชิ้นงาน โดยลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดแบบเดิมนั้นพิจารณาจากเส้นสมมติของขอบตัดรูปวงกลมรัศมีเท่ากันดอกกัดซ้อนกัน ซึ่งแตกต่างไปจากเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของคมตัดที่เป็นรูป Trochoid

บทความนี้จึงนำเสนอเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดด้วยดอกกัดฟันตรงในการเซาะร่อง โดยการประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของคมตัดภายใต้เงื่อนไขใช้งานทั่วไปรวมกับการพัฒนาชุดคำสั่ง VBA บน AutoCAD ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนค่าอัตราป้อนต่อฟัน (f_z) จำนวนฟัน (z_n) และอัตราเร็วตัด (v_c) ของดอกกัดได้ และจะนำไปศึกษาเชิงเปรียบเทียบกับแบบจำลองความหนาเศษก่อนขาดจากงานวิจัยที่ผ่านมา

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดระหว่างการเซาะร่องด้วยเงื่อนไขการกัดและขนาดของดอกกัดตามคำแนะนำพบว่า ลักษณะจำเพาะซึ่งประกอบด้วยมุมเข้ามีด มุมออกมีด ความยาวเศษ และความหนาเศษชั่วขณะ ระหว่างแบบจำลองเดิมและแบบ Trochoid นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการนำค่าต่างๆ เหล่านี้ไปวิเคราะห์แรงตัด อายุงานดอกกัด และความสมบูรณ์ของผิวชิ้นงาน

คำหลัก: เศษก่อนขาด, เส้นทางการตัด, การเดินดอกกัด, VBA, AutoCAD

Abstract

Characteristics of undeformed chip are key factors to an improvement of accuracy and reliability of cutting process simulation since they directly impact on cutting forces, tool life, and surface integrity. Traditional characteristics of undeformed chip can be considered from an overlapping of two imaginary circular cutting edges with the same radius as an endmill cutter. It is different from a real cutting path that appears to be a trochoid.

This paper presents a tool to simulate a motion of straight flute cutting edges in slotting operation. The mathematical models of cutting path were implemented in conjunction with VBA programming for AutoCAD which can be response to changes in feed per tooth (f_z), number of flutes (z_n), and cutting speed (v_c) of the endmill cutter.

According to analysis results of the undeformed chip during full slotting under the recommended cutting conditions and diameter of each cutter, it was found that there are significantly differences among characteristics components between the traditional model and trochoid path – including entering angle, exiting angle, chip length, and instantaneous chip thickness – which directly impact on further analyses of cutting forces, tool life, and surface integrity with these parameters.

Keywords: Undeformed Chip, Cutting Path, End Milling, VBA, AutoCAD

1. บทนำ

กระบวนการกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงานในอุตสาหกรรมการผลิต [1] โดยแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือน นั้น มีความสำคัญต่อความสมบูรณ์ของผิวงานและอายุมีด ขณะที่ความถูกต้องของการคาดการณ์ผิวงานสำเร็จมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองกระบวนการกัดนั้น คือการประเมินหาลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาด โดยการหาลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดแบบดั้งเดิมพิจารณาจากเส้นสมมติของขอบตัดรูปวงกลมรัศมีเท่ากันดอกกัดซ้อนกัน ซึ่งแตกต่างไปจากเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของคมตัดที่เป็นรูป Trochoid ลักษณะจำเพาะซึ่งประกอบด้วยมุมเข้ามีด มุมออกมีด ความยาวเศษ และความหนาเศษชั่วขณะระหว่างแบบจำลองเดิมและแบบ Trochoid นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ

ในปี 1994 Spiewalk [2] ได้นำเสนอวิธีสร้างแบบจำลองการกัด แบบครบวงจร ด้วยลักษณะสำคัญของการพัฒนาเชิงวิเคราะห์และรวบรวมแบบจำลองเชิงตัวเลข และการกำหนดเมทริกซ์ของเรขาคณิตเครื่องมือ ต่อมาในปี 2001 Li et al [3] ประยุกต์ Taylor's series เพื่อพัฒนาแบบจำลองความหนาเศษก่อนขาดแบบใหม่ซึ่งให้ความแม่นยำมากกว่าแบบอุดมคติ และในปี 2003 Huyanan [4] ได้นำเสนอ

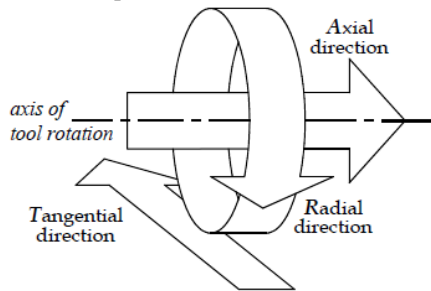
แบบจำลองลักษณะของเศษก่อนขาดในงานตัดเฉือนความเร็วสูงซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงการทดลองขึ้น

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดด้วยดอกกัดฟันตรงในการเซาะร่อง โดยการประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของคมตัดภายใต้เงื่อนไขใช้งานทั่วไปร่วมกับการพัฒนาชุดคำสั่ง VBA บน AutoCAD ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนค่าอัตราป้อนต่อฟัน, จำนวนฟัน, และอัตราเร็วตัด ของดอกกัดได้ จากนั้นจะนำไปศึกษาเชิงเปรียบเทียบกับแบบจำลองความหนาเศษก่อนขาดที่กล่าวมาข้างต้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานกัด (Milling) คือกระบวนการตัดเฉือนที่ใช้เครื่องมือกัดหรือมีดกัดในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ ขั้นตอนหลักในกระบวนการกัดเกี่ยวข้องกับการเสียรูปโดยการเฉือน (Shear Deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวงานใหม่ (Machined Surface) กระบวนการกัดส่วนมาก จะใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นงานโลหะให้มีรูปร่างต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือตัดที่มีหลายคมตัด (Multiple Cutting Edges) มีดตัดจะหมุนและเคลื่อนที่ช้า ๆ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานทำให้เกิดระนาบของผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อนของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของใบมีดตัด

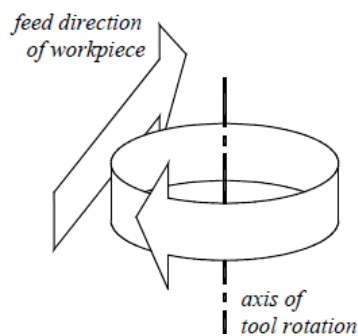
ถูกกำหนดด้วยอัตราเร็ว (Speed) ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาแสดงดังรูปที่ 1



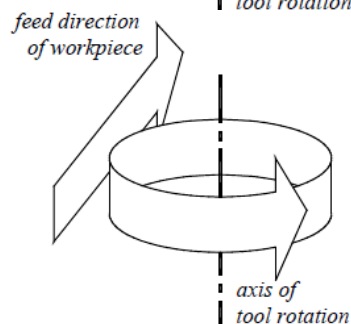
รูปที่ 1 ทิศต่างๆ ในงานกัด [4]

Down Milling (หรือ Climb Milling) เป็นการกัดตามกันระหว่างชิ้นงานกับคมตัด ซึ่งการกัดในลักษณะนี้คมตัดจะเริ่มตัดงานมากก่อนแล้ว ค่อยๆ ลดขนาดลงงานจะถูกกดอยู่กับที่ การกัดในลักษณะนี้เหมาะกับการกัดงานหนัก หมายถึงการป้อนกัดได้ทีละมากๆ และเลือกใช้กับมีดกัดที่มีจำนวนฟันกัดน้อยความแข็งแรงแต่ละฟันสูง แต่ผิวงานที่ออกมาจะหยาบเหมาะที่จะใช้กัดงานชิ้นแรก ดังรูปที่ 2(ก)

(ก) Down Milling



(ข) Up Milling



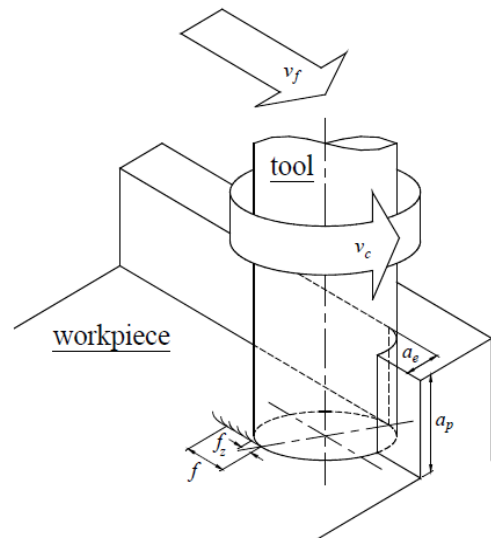
รูปที่ 2 การแบ่งประเภทงานกัด [4]

Up Milling เป็นการกัดสวนทางกันระหว่างชิ้นงานกับคมตัด การกัดลักษณะนี้คมตัดจะตัดงานทีละน้อยแล้วเพิ่มมากขึ้น คมตัดจะตัดเศษโลหะออก ดังรูปที่ 3(ข) การกัดในลักษณะนี้เหมาะกับงานกัดเบา หมายถึง

การป้อนกัดทีละน้อยๆ และเลือกใช้กับมีดกัดที่มีจำนวนคมตัดมาก หรือมีดกัดที่ใช้ไปนานๆ คมที่ถูกลับแต่งจนบาง ต้องใช้วิธีการกัดเช่นนี้

2.1. เงื่อนไขการกัดพื้นฐาน

เงื่อนไขการกัดพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งได้แก่ อัตราเร็วตัด (Cutting Speed, v_c), อัตราป้อน (Feed Rate, v_f), อัตราเร็วรอบ (Spindle Speed, n), ระยะป้อนต่อรอบ (Feed per Revolution, f), และระยะป้อนต่อฟัน (Feed per Tooth, f_z) ความลึกตัดแนวแกน (Axial Depth of Cut, a_p), ความลึกตัดแนวรัศมี (Radial Depth of Cut, a_e), และปริมาณของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดออกจากชิ้นงานต่อเวลา (Material Removal Rate, Q)

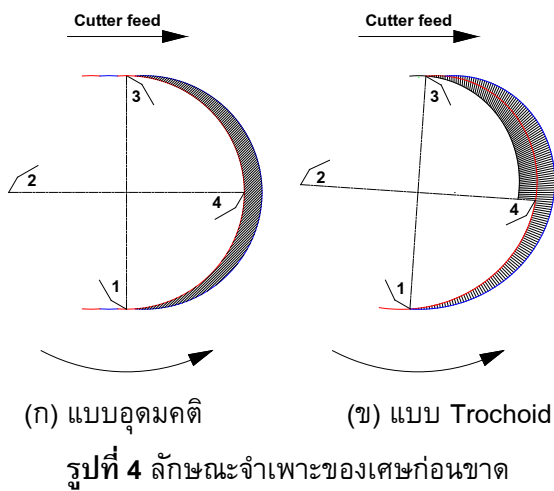


รูปที่ 3 ปัจจัยเงื่อนไขการกัดต่างๆ [4]

2.2. ลักษณะจำเพาะของเศษแบบอุดมคติ

ลักษณะการเคลื่อนที่ของขอบ คมตัดของดอกกัดซึ่งทำงานภายใต้สภาวะ อุดมคติโดยไม่มีผลกระทบใดๆ ที่อาจเกิดจาก ดอกกัดเยื้องศูนย์ เพลahmenเอียงพื้นของดอกกัดหมดคม หรือการโก่งตัวของเครื่องจักร เป็นต้น ทำให้สมมติได้ว่าที่ปลายของมีดกัดเป็นจุดที่อยู่บนเส้นโค้งของวงกลม ดังนั้นลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาด จึงกำหนดได้จาก ความแตกต่างของระยะทางระหว่างเส้นสองเส้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของคมตัดที่เกิดต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 4(ก) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการซ้อนทับของวงกลมรัศมีเท่ากับดอก

กัด และจะ แตกต่างไปจากเส้นทางการเคลื่อนที่จริง
ของคมตัดที่เป็นรูปแบบ Trochoid ดังรูปที่ 4(ข)



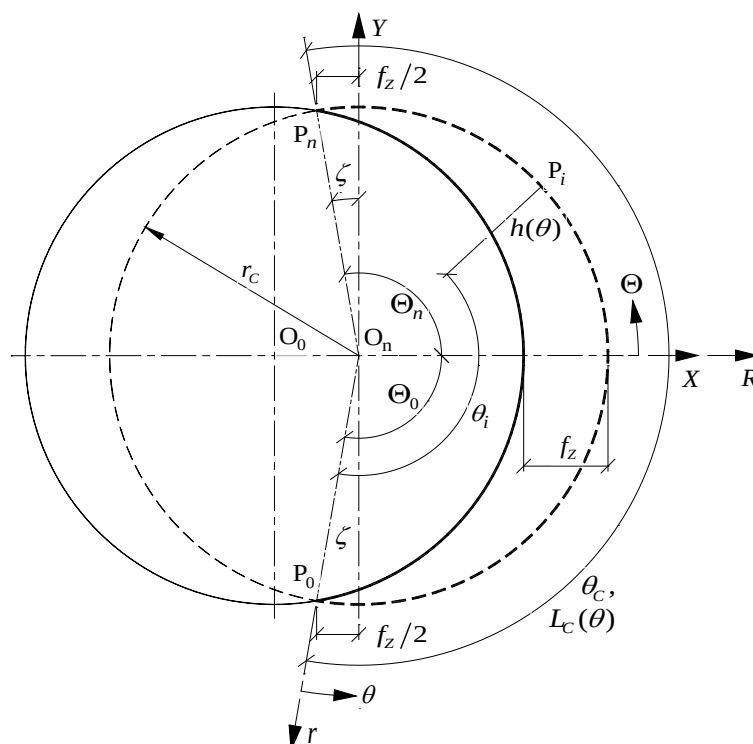
จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะจำเพาะของ
เศษก่อนขาดของ Huanan [4] ระหว่างเศษแบบบอดุม
คติและเศษแบบ Trochoid จากการกัดจริง (ซึ่งใช้เป็น
แนวทางในงานวิจัยนี้) แสดงให้เห็นว่า ลักษณะ
จำเพาะ (ซึ่งประกอบด้วย มุมเข้ามีด มุมออกมีด ความ
ยาวเศษ และความหนาเศษขณะ ใดๆ) ของทั้งสอง
กรณีนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ และจะ

ส่งผลกระทบต่อตรงต่อการนำค่าต่างๆ เหล่านี้ไป ใช้
วิเคราะห์ แรงตัด อายุงานดอกกัด และ ความสมบูรณ์
ของผิวชิ้นงาน

พิจารณารูปที่ 5 จะเห็นว่า คมมีดที่ 1 เริ่มกิน
ชิ้นงานที่ตำแหน่ง P_0 มุม θ คือระยะเชิงมุมตามเข็
มนาฬิกาขณะใด ๆ ระหว่างที่เกิดการตัดเฉือน และมุม
 $\Theta = \theta - \Theta_0$ คือตำแหน่งเชิงมุมขณะใด ๆ เทียบกับ
แกน X โดย $\Theta_0 = -(\pi/2 + \zeta)$ คือมุมเข้าของมีด
อ้างอิงจากจุด O_0 ขณะ $\Theta_n = \pi/2 + \zeta$ คือมุมออก
ของมีดอ้างอิงจากจุด O_n เมื่อมีดมีการตัดเท่ากับ r_c
และ $\zeta = \sin^{-1}(f_z/2r_c)$ สำหรับความยาวของเศษ
ก่อนขาด $L_c(\theta)$ สามารถหาได้จากระยะเชิงมุมเล็กๆ
 $\Delta\theta$ จากมุมเข้าไปถึงมุมออกซึ่งเท่ากับระยะเชิงมุม
ของการตัดเฉือน θ_c

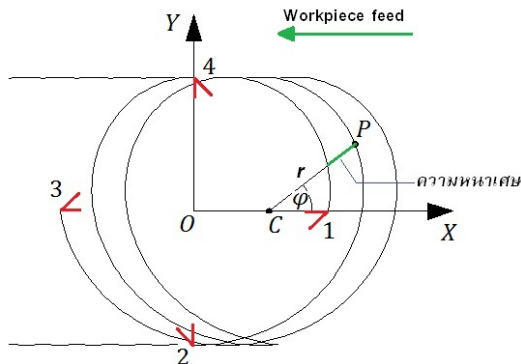
3. แบบจำลองเส้นทางการคมตัดแบบ Trochoid

โดยการศึกษารูปแบบการหมุนของดอกกัด
แบบฟันตรงเพื่อสร้างแบบจำลองโดยก ารประยุกต์
แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของคมตัด
ภายใต้เงื่อนไขใช้งานทั่วไปร่วมกับการพัฒนาชุดคำสั่ง
VBA บน AutoCAD ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการปรับ



รูปที่ 5 ลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดแบบบอดุมคติ

เปลี่ยนค่าอัตราป้อนต่อฟัน (f_z) ได้เช่นแบบอุดมคติ และยังสามารถตอบสนองต่อความแตกต่างของจำนวนฟัน (z_n) และอัตราเร็วตัด (v_c) ของดอกกัดได้อีกด้วย



รูปที่ 7 แบบจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัด

เมื่อ ρ คือรัศมีเสมือนของวงกลมที่กึ่งอยู่บนแกน X และ r คือรัศมีของมีดตัด โดยที่ ϕ คือตำแหน่งเชิงมุมของปลายมีด $\Delta\theta$ คือมุมการเคลื่อนที่ของปลายมีดในแต่ละจุด θ_0 คือมุมเข้า θ_E คือมุมออก และ $\Delta_z = 2\pi/n_z$ คือมุมเฟสระหว่างฟันสองฟันที่อยู่ติดกัน

$$\rho = \frac{f_z n_z}{2\pi}$$

จากหลักการของ Coordinate Geometry เราพิจารณาตำแหน่งจุดบนพื้นผิว 2 มิติด้วยวิธี Generic Fixed Point ระยะจากจุด C ไปยังจุด P คือรัศมีในที่นี่แทนด้วย r ตำแหน่งของจุด C ในระบบพิกัดคือ (x_c, y_c) และตำแหน่งของจุด P_i ในระบบพิกัดคือ (x_i, y_i) ดังนั้น

$$x_c^i = x_c^{i-1} + \rho \Delta\theta \cos\phi$$

$$y_c^i = y_c^{i-1} + \rho \Delta\theta \sin\phi$$

โดยที่

$$\Delta_z = 2\pi/n_z$$

$$\theta_z = \theta_0 - (z-1)\Delta_z$$

ดังนั้น

$$x^i = x_c^i + \cos\Delta\theta (x - x_c)^{i-1} - \sin\Delta\theta (y - y_c)^{i-1}$$

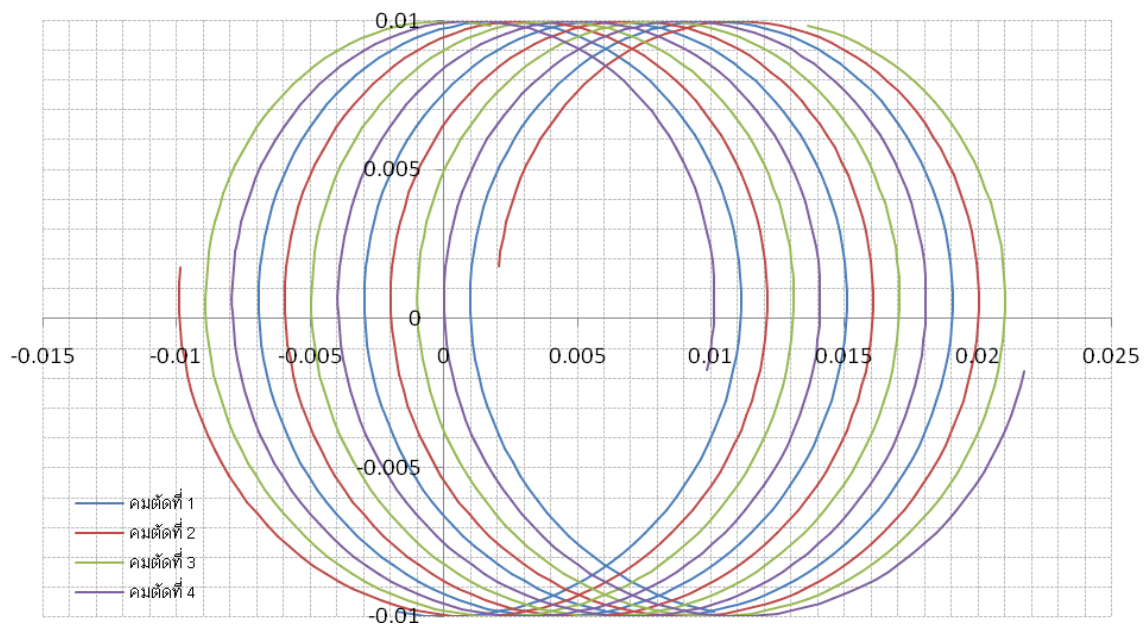
$$y^i = y_c^i + \sin\Delta\theta (x - x_c)^{i-1} + \cos\Delta\theta (y - y_c)^{i-1}$$

เขียนสมการให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์

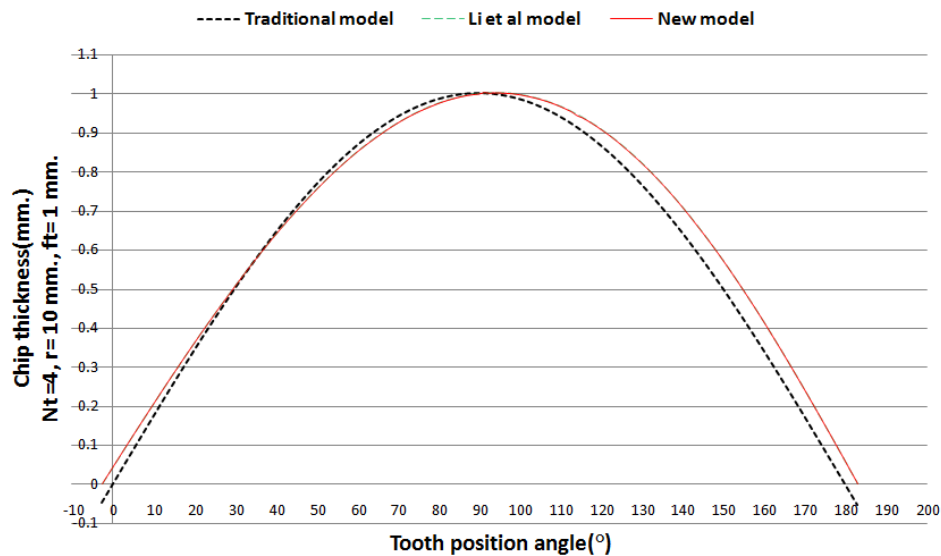
$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}^i = \begin{Bmatrix} x_c \\ y_c \end{Bmatrix}^i + \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & -\sin\Delta\theta \\ \sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{Bmatrix}^{i-1}$$

4. ผลการทดลอง

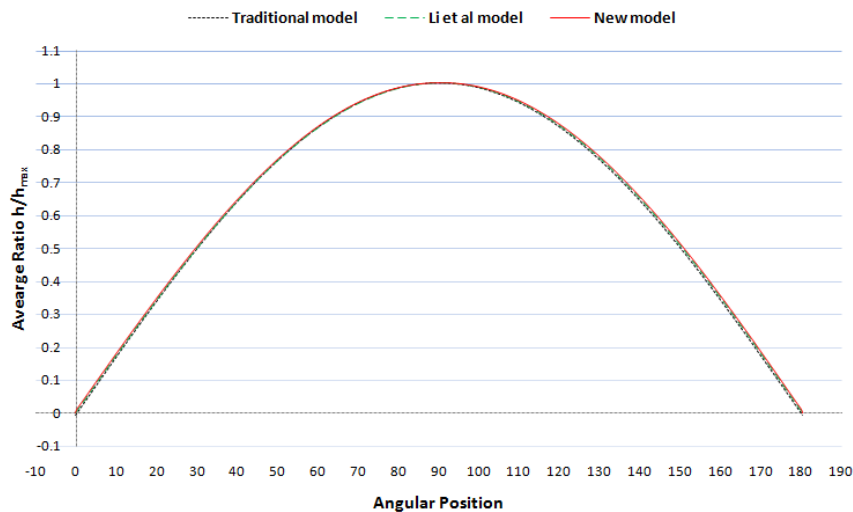
เมื่อจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดจากสมการที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ โดยพิจารณาที่ตำแหน่งปลายมีดกระทำกับผิวบนสุดของ ชิ้นงานลักษณะของเส้นทางการเคลื่อนที่ของคม ตัดจะ เคลื่อนที่ แบบ Trochoid ดังรูปที่ 8



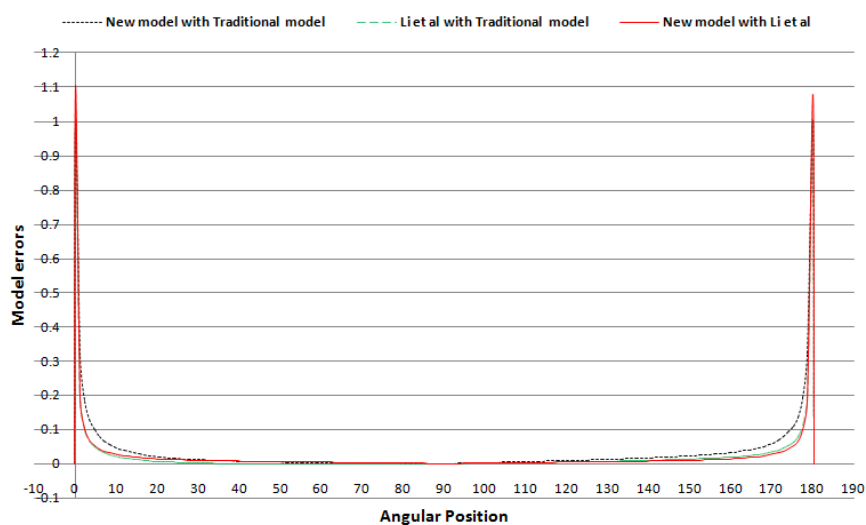
รูปที่ 8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของคมตัดจากสมการที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่



รูปที่ 9 กราฟแสดงความหนาของเศษก่อนขาดต่อตำแหน่งเชิงมุม



รูปที่ 10 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของเศษขณะเวลาใดๆ ต่อตำแหน่งเชิงมุม



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของสมการดั้งเดิม Li et al และสมการที่ปรับปรุงใหม่

ความหนาของเศษก่อนขาดจากสมการดั้งเดิม และสมการของ Li และคณะ เมื่อเทียบกับสมการที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่โดยพิจารณาที่ตำแหน่งปลายมีด กระทำกับผิวบนสุดของชิ้นงานที่ $D_c = 20\text{mm}$, $f_z = 1\text{mm/tooth}$ และ $z_n = 4\text{teeth}$ ดังรูปที่ 9 และทำการทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด 2 mm. 10 mm. 20 mm. และ 25 mm. จำนวนของฟัน กัดที่ 2, 4, 6 ตามลำดับและ feed per tooth ที่ 0.015, 0.05, 0.08 และ 0.09 จะได้ความหนาเฉลี่ยของเศษ ระหว่าง Traditional model, Li et al model และ New model ดังรูปที่ 10

ความยาวของเศษก่อนขาด				
	Traditional	New model		
Diameter (mm.)	All tooth	2 tooth	4 tooth	6 tooth
2	3.141593	3.125995	3.125529	3.125116
10	15.70796	15.655852	15.654239	15.65276
20	31.41593	31.332415	31.329796	31.327366
25	39.26991	39.175877	39.172913	39.17015

ตารางที่ 1 ความยาวของเศษก่อนขาด

ความหนาสูงสุดของเศษก่อนขาด				
	Traditional	New model		
Diameter (mm.)	All tooth	2 tooth	4 tooth	6 tooth
2	0.015	0.014995	0.014990	0.014985
10	0.05	0.049982	0.049964	0.049946
20	0.08	0.079970	0.079941	0.079912
25	0.09	0.089966	0.089933	0.08990

ตารางที่ 2 ความหนาสูงสุดของเศษก่อนขาด

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดระหว่างการเซาะร่องด้วยเงื่อนไขการกัดและขนาดของดอกกัดตามคำแนะนำพบว่า ลักษณะจำเพาะซึ่งประกอบด้วยมุมเข้ามีด มุมออกมีด ความยาวเศษ และความหนาเศษชั่วขณะของ Li et al model และ New model มีความใกล้เคียงกันมากแต่จะแตกต่างกันที่มุมเข้ามุมออกและความหนาสูงสุด และเมื่อนำไปเทียบ

กับ Traditional model จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนทั้งมุมเข้ามุมออกและความหนาสูงสุดของเศษก่อนขาด ความแตกต่างของมุมเข้ามุมออก ความหนาสูงสุด และความยาวของเศษ ระหว่าง Traditional model และแบบ Trochoid นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตรงต่อการนำค่าต่างๆ เหล่านี้ ไปวิเคราะห์แรงตัด อายุงานดอกกัด และคุณภาพผิวชิ้นงาน

พิจารณารูปที่ 11 New model เทียบกับ Traditional model และ Li et al model พบว่าที่ตำแหน่งมุมเข้าและมุมออกและความหนาสูงสุดของ New model และ Li et al model มีความแตกต่างกันเล็กน้อย จากตารางที่ 1 และ 2 พบว่าจำนวนฟันตัดมีผลกระทบต่อความหนาของเศษก่อนขาด และความยาวของเศษก่อนขาดและ เมื่อเพิ่ม จำนวนฟันตัด ความหนาของเศษและความยาวของเศษจะมีอัตราส่วนที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการพัฒนาชุดคำสั่ง VBA บน AutoCAD ซึ่งมีความสะดวกและสามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนค่าอัตราป้อนต่อฟัน (f_z) จำนวนฟัน (z_n) และอัตราเร็วตัด (v_c) ของดอกกัดได้ New model เป็นรูปแบบสมการที่ซับซ้อนน้อยกว่า Li et al model และสามารถบอก มุมเข้ามุมออก ความหนาของเศษชั่วขณะ และความยาวของเศษได้อย่างชัดเจน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bradbury, S.R. and Huyanan, T., Challenges facing surface engineering technologies in the cutting industry, Vacuum, Vol. 56, no.3, page. 173-177, 2000
- [2] S.A. Spiewak, Analytical modeling of cutting point trajectories in milling, ASME J. Eng. Ind. 116(1994) 440 - 448
- [3] H.Z. Li, K. Liu, X.P. Li, A new method for determining the undeformed chip thickness in milling, ASME J. Eng. Ind. 113(2001) 378 - 384
- [4] Huyanan, T., "Development of a Hybrid End Milling Analysis System", Ph.D Thesis, University of Sheffield, 2003