การศึกษาแบบจำลองการสึกหรอเครื่องมือตัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซี เอ็น ซี

A Study Model of Tool Wear for Simulation of Virtual Machining in Boring Processes on CNC Machining Centers

วิโรช ทัศนะ[1]* และ ดอน แก้วดก[1]

[1] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
1771/1 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง แขวงสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250
*ติดต่อ: wiroj@tni.ac.th, +66-2763-2600, +66-2763-2600

บทคัดย่อ

การตัดเฉือนเสมือนจริงมีความจำเป็นต่อการประมาณการของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ซับซ้อนก่อนปฏิบัติการผลิตจริงโดยการจำลองของกระบวนการต่างๆ ทางกายภาพ และการสึกหรอของเครื่องมือตัดก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่มีอิทธิผลต่อการประมาณการของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองการสึกหรอเครื่องมือตัดในกระบวนการคว้านขึ้นรูปชิ้นงานบนเครื่องกัดซี เอ็น ซี โดยการสร้างโมเดลจำลองรูปร่างการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ระบบพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต พารามิเตอร์การตัดเฉือน และการสึกหรอของเครื่องมือตัด ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยการส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 ของกลุ่มจุดหลายๆ จุดบนพื้นผิวรูปร่างชิ้นงานของกระบวนการคว้านขึ้นรูปที่ถูกสร้างขึ้น แบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ทำให้พวกเรามีระบบวิธีการในการประมาณการของพื้นผิวชิ้นงานจริงเบื้องต้น

คำหลัก: การตัดเฉือนเสมือนจริง การเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ กระบวนการคว้านขึ้นรูป การจำลองกระบวนการตัดเฉือน เครื่องกัดซีเอ็นซี

Abstract

The virtual machining and tool wear of the inserted cutting tools are one of the most important characteristics to estimate the machining parameters of machined parts before real machining. The objective of the present research is to propose a simulation model of the shape generation processes in the boring operations of the generated faces, based on the machining parameters. The simulation model includes the models of the shape generation motions considering kinematic motion deviations, the inserted cutting tool geometries and tool wear. The shape generation motions with deviations are mathematically described by 4 by 4 transformation matrices. A set of points on the bored holes are generated through the boring process simulations. The proposed method provides us with a systematic method to simulate the primarily bored faces.

Keywords: Virtual machining, Kinematic motion deviation, Boring processes, Machining process simulations, CNC machining center

1. บทนำ

ในโลกปัจจุบันของการแข่งขันทางด้านคุณภาพ ความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำ และความพึงพอใจของลูกค้าสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการเร่งพัฒนาการผลิตทางด้านกายภาพและโลกไซเบอร์ให้สูงขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงการผลิตในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งเครื่องจักรกลการผลิตแบบสมัยใหม่ของโรงงานอุตสาหกรรม ต้องมีการเกี่ยวพันอย่างใกล้ชิดกับอินเทอร์เน็ตของสิ่งของ (Internet of Things) และการผนวกกับระบบไซเบอร์ทางกายภาพ ที่สามารถปรับปรุงการผลิตและกระบวนการทางธุรกิจให้สามารถปรับปรุงได้อย่างคล่องตัว

กรรมวิธีการผลิตจาก “จริง” ไป “เสมือนจริง” ก็เป็นหนึ่งในความสำคัญของการผลิตในยุคอุตสาหกรรม 4.0 โดยความช่วยเหลือของคอมพิวเตอร์ทางด้านเทคนิคการจำลองทางกายภาพของระบบการผลิตเสมือนจริงและเลียนแบบพฤติกรรมของระบบกรรมวิธีการผลิตก่อนที่จะไปทำการผลิตจริง เพื่อลดจำนวนของการทดสอบและทดลองในโรงฝึกปฏิบัติงาน

การตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซี เอ็น ซี ก็มีความจำเป็นต่อการประมาณการของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ซับซ้อนก่อนการผลิตจริง โดยการจำลองของกระบวนการต่างๆ ทางกายภาพในพื้นที่ปฏิบัติงานจริง และการสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่มีอิทธิผลต่อการประมาณการของพารามิเตอร์ต่างๆ ของการตัดเฉือนชิ้นงานบนเครื่องกัดซีเอ็นซี และหลายๆ ผลงานวิจัยในสาขานี้ยังไม่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสึกหรอเครื่องมือตัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปชิ้นงานบนเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยการสร้างโมเดลจำลองรูปร่างการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ (Kinematics) และพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต พารามิเตอร์การตัดเฉือนและการสึกหรอของเครื่องมือตัด ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยการส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 ของกลุ่มจุดหลายๆ จุดบนพื้นผิวรูปร่างชิ้นงานคว้านขึ้นรูป ซึ่งสร้างขึ้นโดยการสร้างแบบจำลองที่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนสถิตในกระบวนการคว้านขึ้นรูป การเบี่ยงเบนของเพลาหมุน รูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต และพารามิเตอร์การสึกหรอของเครื่องมือตัด

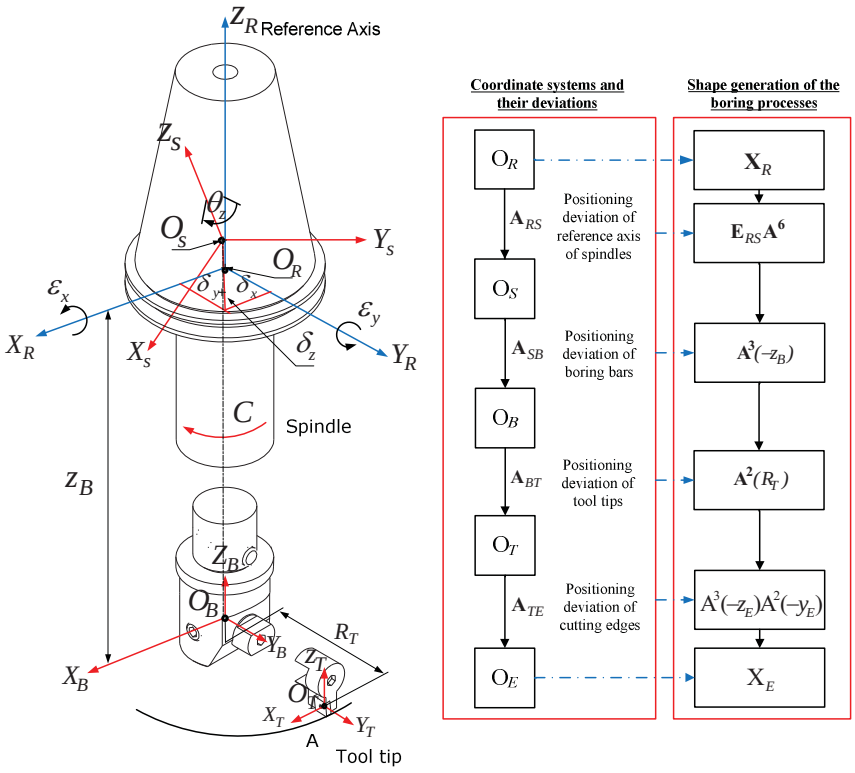
2. โมเดลการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูป [1]

2.1 การเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ในกระบวนการคว้านขึ้นรูป

กระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยส่วนมากจะทำการตัดเฉือนโดยการใช้ตัวจับยึดเครื่องมือตัดในเพลาหมุน (Spindle rotations) และหลังจากนั้นก็ทำการป้อนตัดในแนวเส้นตรงตามแนวแกน Z ดังนั้นการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเพลาหมุนก็เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการประเมินค่าการเบี่ยงเบนของกระบวนการคว้านขึ้นรูป

จากรูปที่ 1 แสดงระบบพิกัดของการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูป ซึ่งกำหนดโดยการเป็นตัวแทนการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่ โดยมี O_R, O_S, O_B, O_T และ O_E เหล่านี้เป็นตัวแทนของระบบพิกัดแกนอ้างอิง เพลาหมุน แกนเพลาคว้าน จุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ต และรัศมีปลายมีดที่คำนึงถึงการสึกหรอตามลำดับ

กระบวนการสร้างรูปร่าง (The shape generation processes) ของการจำลองเบี่ยงเบนเครื่องจักรกลและเครื่องมือกล โดยทั่วไปจะใช้ทฤษฎีการสร้างรูปร่างเคลื่อนที่ (The shape generation motions) [2] และ



รูปที่ 1 ระบบพิกัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูป

รวมทั้งพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ตที่คำนึงถึงการสึกหรอ ระบบพิกัดสำหรับกระบวนการคว้านขึ้นรูปได้แสดงในรูปที่ 1 โดยระบบพิกัดแกนอ้างอิง O_R ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ISO 230-1 [3-4] และระบบ O_S, O_B, O_T และ O_E ถูกกำหนดและนำเสนอไว้โดย Thasana et al. (2014) ซึ่งโมเดลสำหรับการจำลองค่าเบี่ยงเบนเคลื่อนที่ของกระบวนการคว้านขึ้นรูปด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยการส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 สามารถแสดงดังสมการที่ 1 ดังนี้

$$\mathrm{X}_R = \mathrm{E}_z^{-1}\mathrm{A}^3(z)^{-1}\mathrm{E}_{RS}\mathrm{A}^6_{RS}(\theta_z)\mathrm{E}_\theta\mathrm{A}^3_{SB}(-z_B)\mathrm{A}^2_{BT}(R_T)\mathrm{A}^2_{TE}(-y_E)\mathrm{A}^3_{TE}(-z_E)\mathrm{X}_E \quad (1)$$

โดยที่

E_z : ตำแหน่งและความตรงเบี่ยงเบนในแนวแกน Z

E_{RS} : การเบี่ยงเบนในแนวขนานของเพลาหมุนจากระบบพิกัดอ้างอิง

E_θ : ตำแหน่งและการหมุนเบี่ยงเบนของเพลาหมุน

θ_z : มุมของเพลาหมุน

z : ตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

z_B : ความยาวตามแนวแกน Z ของแกนเพลาคว้าน

R_T : ตำแหน่งรัศมีระหว่างจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตกับแกนเพลาคว้าน

y_E : ระยะทางระหว่าง O_T และ O_E ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตและรัศมีปลายมีดแกน Y

z_E : ระยะทางระหว่าง O_T และ O_E ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตและรัศมีปลายมีดแกน Z

งานวิจัยนี้ได้นำระบบพิกัดและพารามิเตอร์การเบี่ยงเบนดังได้แสดงไว้ก่อนหน้านี้ เพื่อมาประยุกต์ใช้ใน

การศึกษาแบบจำลองการสึกหรอเครื่องมือตัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็นซี ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.2 สูตรการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ในกระบวนการคว้านขึ้นรูป

(ก) การเคลื่อนที่เพลาหมุน

การเคลื่อนที่เพลาหมุนถูกแสดงโดยสมการที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$\mathrm{A}_{RS_actual} = \mathrm{E}_z^{-1}\mathrm{A}^3(z)^{-1}\mathrm{A}_{RS}^6(\theta_z)\mathrm{E}_\theta$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_x(z) - \delta_y(C)\sin\theta_z \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & \delta_y(C)\cos\theta_z - \delta_y(z) + \delta_x(C)\sin\theta_z \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & -\delta_z(z) - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่

ε_x : ตำแหน่งมุมการเบี่ยงเบนของแกน X ในเพลาหมุนแกน C

ε_y : ตำแหน่งมุมการเบี่ยงเบนของแกน Y ในเพลาหมุนแกน C

$\delta_x(C)$: ตำแหน่งการเบี่ยงเบนของแกน X ในเพลาหมุนแกน C

$\delta_y(C)$: ตำแหน่งการเบี่ยงเบนของแกน Y ในเพลาหมุนแกน C

(ข) การเคลื่อนที่ของเพลาคว้าน

การเคลื่อนที่ของเพลาคว้านถูกแสดงโดยสมการที่ 3 ดังต่อไปนี้

$$\mathrm{A}_{SB_actual} = [Eq.(2)]\mathrm{A}_{SB}^3(-z_B)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & f_1 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & f_2 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & -\delta_z(z) - z_B - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่

$$f_1 = \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_x(z) - \delta_y(C)\sin\theta_z - z_B(\varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z)$$

$$f_2 = \delta_y(C)\cos\theta_z - \delta_y(z) + \delta_x(C)\sin\theta_z + z_B(\varepsilon_x\cos\theta_z - \varepsilon_y\sin\theta_z)$$

(ค) การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ต

การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตถูกแสดงโดยสมการที่ 4 ดังต่อไปนี้

$$\mathrm{A}_{BT_actual} = [Eq.(3)]\mathrm{A}_{BT}^2(R_T)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & f_3 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & f_4 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \varepsilon_x R_T - z_B - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่

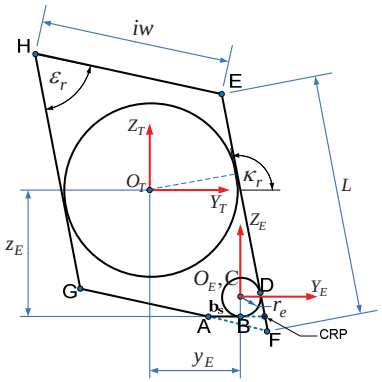
$$f_3 = \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_x(z) - \delta_y(C)\sin\theta_z - R_T\sin\theta_z - z_B(\varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z)$$

$$f_4 = \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_y(z) + \delta_x(C)\sin\theta_z + R_T\cos\theta_z + z_B(\varepsilon_x\cos\theta_z - \varepsilon_y\sin\theta_z)$$

(ง) การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางรัศมีปลายมีด

เครื่องมือตัดหลายชนิดของเม็ดมีดอินเสิร์ตซึ่งมีอยู่ 17 รูปร่าง ได้ถูกกำหนดในมาตรฐาน ISO 13399 ของรูปร่างเรขาคณิตเม็ดมีดอินเสิร์ต [5] ดังรูปที่ 2 แสดงโมเดลรูปร่างเรขาคณิตทั่วไปของเม็ดมีดอินเสิร์ตแบบขนาน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการวางตำแหน่งจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ต O_T ของรูปร่างเรขาคณิต

การแยกแยะมุมเอียงของเม็ดมีดจำเป็นต้องใช้โมเดลทางกลศาสตร์และคิเนเมติกส์ของการตัดเฉือนและการควบคุมจุด โดยพิจารณาที่ฟังก์ชันของพารามิเตอร์เม็ดมีดอินเสิร์ต ซึ่งได้นำเสนอโดย Kaymakci et al. (2012) และ Thasana et al. (2014) ระบบพิกัดของการควบคุมจุดกำหนดบนพื้นฐานมาตรฐานรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ตดังสมการที่ 5 ต่อไปนี้



รูปที่ 2 รูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต

$$A_{TE_actual} = [Eq.4]A_{TE}^{2}(-y_E)A_{TE}^{3}(-z_E)$$

$$A_{TE_actual} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & f_3 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & f_4 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \varepsilon_x R_T - z_B - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_E \\ 0 & 0 & 1 & -z_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่

$$y_E = \frac{b_s - (iw\cos(\varepsilon_r + \kappa_r)}{2} - \frac{L\cos(\kappa_r)}{2} - 2r_e\frac{\cot(\kappa_r) - 1}{\sin(\kappa_r)} + \ldots$$
$$\frac{\cos(\varepsilon_r + \kappa_r)((b_s\sin\kappa_r - r_e(\cos\kappa_r - 1))}{\sin(\varepsilon_r)}$$

$$z_E = \sin(\varepsilon_r + \kappa_r)\frac{b_s\sin(\kappa_r) - r_e(\cos(\kappa_r) - 1)}{\sin(\varepsilon_r)} \ldots$$
$$-\frac{iw\sin(\varepsilon_r + \kappa_r)}{2} - \frac{L\sin(\kappa_r)}{2} - r_e$$

ε_r : มุมปลายมีด

iw : ความกว้างเม็ดมีดอินเสิร์ต

L : ความยาวเม็ดมีดอินเสิร์ต

κ_r : มุมคมตัดเม็ดมีดอินเสิร์ต

b_s : ความยาวคมตัดกวาดผิว

r_e : รัศมีปลายมีด

3. โมเดลจำลองการสึกหรอเครื่องมือตัด

ในกระบวนการคว้านขึ้นรูป การตัดเฉือนในระยะสุดท้ายของอายุการใช้งานเครื่องมือตัดโดยบ่อยครั้งมากจะมีสาเหตุมาจากการคายเศษและการแตกหักของคมตัดของรัศมีปลายมีด การเกิดขึ้นนี้เป็นเพราะกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็นซีเป็นการตัดเฉือนแบบขัดจังหวะการตัดเฉือน ซึ่งรัศมีปลายมีดคมตัดจะเข้าไปและคงอยู่บนชิ้นงานหลายๆ ครั้งต่อวินาที ดังนั้นรัศมีปลายมีดจึงเป็นจุดวิกฤติอันตรายในการเกิดการสึกหรอเพราะมันอยู่ข้างหลังบนพื้นผิวของการตัดเฉือน ซึ่งรัศมีปลายมีดจะมีผลกระทบโดยตรงกับการเกิดการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) บนการเปลี่ยนแปลงของรัศมีปลายมีด และการสึกหรอบนผิวหลบเกิดขึ้นบ่อยมากที่สุด โดยขึ้นอยู่กับวัสดุเครื่องมือตัดและการประยุกต์ใช้

ในงานวิจัยนี้ค่ามากที่สุดของการสึกหรอบนผิวหลบ (VB_{max}) จะถูกพิจารณาที่ระยะขนาด 0.4 มิลลิเมตร บนพื้นฐานของการแนะนำของ Kalpakjian and Schmid (2006), Ramaswami (2010) และสมการอายุการใช้งานเครื่องมือตัดแบบขยายความของเทย์เลอร์ (Taylor's extended equation) ซึ่งหลายๆ งานวิจัยได้นำเสนอดังสมการที่ 6 ต่อไปนี้

$$t_{tool} = \sqrt[n]{\frac{C}{vf^{n_1}d^{n_2}}} \quad (6)$$

โดยที่

t_{tool} : อายุการใช้งานเครื่องมือตัด

C, n, n_1, n_2 : ค่าคงที่

v : ความเร็วตัด

f : อัตราป้อน

d : ความลึกของการตัด

ค่าต่างๆของค่าคงที่ได้นำมาจาก Meng et al. (2000) เมื่ออัตราป้อน ความเร็วตัด และความลึกของการตัด ได้ใส่เข้าไปในโมเดลการจำลองตามสมการอายุการใช้งานเครื่องมือตัดดังสมการที่ 6 ซึ่งสมมติว่าเครื่องมือตัดกำลังดำเนินการอยู่ในขั้นตอนของสถานะการสึกหรอคงที่ (Study state wear) อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดในแต่ละการตัดเฉือนที่ต้องการ ก็จะสามารถประมาณการได้ดังสมการที่ 7 โดยการอ้างอิงจาก Ramaswami (2010) ถ้าระยะป้อน ความเร็วรอบ และความลึกของการ

ตัดถูกรักษาไว้คงที่ ดังนั้นการสึกหรอของเครื่องมือตัดในระหว่างการดำเนินการตัดเฉือนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$L_{wear} = \left(\frac{VB_{\max}}{t_{tool}} \right) * t_m \qquad (7)$$

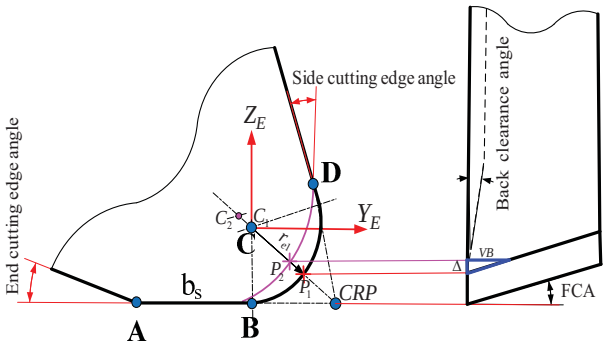
โดยที่

L_{wear} : ระยะการสึกหรอของเครื่องมือตัดสำหรับการจำลอง

VB_{max} : ค่าสึกหรอบนผิวหลบมากที่สุด

t_m : เวลาการตัดเฉือน

การสึกหรอบนผิวหลบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของรัศมีและตำแหน่งของรัศมีปลายมีดดังแสดงในรูปที่ 3 ถ้าการสึกหรอบนผิวหลบทันทีที่ใดๆ ขอบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดนอกสุดของรัศมีปลายมีด สามารถคำนวณที่ฟังก์ชันของมุมหลบหน้า (Front clearance angle (FCA)) ได้ดังสมการที่ 8 – 9 [7]



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรัศมีปลายมีด

$$\Delta = \frac{VB_{\max}}{\tan(90 - FCA)} \qquad (8)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & -\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)} & 0 \\ a_2 & b_2 & -\sqrt{(a_2^2 + b_2^2)} & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{c2} \\ z_{c2} \\ r_{e2} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 \\ -c_2 \\ r_{e1} - \Delta \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (9)$$

เมื่อแกน Y และแกน Z ของจุดศูนย์กลางรัศมีปลายมีด (y_c, z_c) ถูกคำนวณ แกนทั้งหมดเหล่านี้ก็สามารถฉายไปบนมุมคายเศษ เพื่อคำนวณแกน X ของรัศมีปลายมีดในชั่วขณะทำการตัดเฉือน (x_c) สมการของผิวคายเศษสามารถกำหนดโดยการใช้มุมคายด้านบน (Back rake angle) และมุมคายด้านข้าง (Side rake angle) โดยสมมติว่าจุดเริ่มต้นศูนย์กลางปลายมีดตัดผ่านตลอดผิวคายเศษ ซึ่งตำแหน่งของผิวคายเศษจะถูกกำหนดโดยเฉพาะ

การชดเชยระหว่างการสึกหรอ $[x_{c2},\ y_{c2},\ z_{c2}]$ สามารถผสานรวมกันเข้าไปในตำแหน่งการเคลื่อนของเม็ดมีดอินเสิร์ตของเครื่องมือตัดจากสมการที่ 5 ดังนั้นตำแหน่งของ O_E ของจุดศูนย์กลางรัศมีปลายมีดสำหรับการเบี่ยงเบนการสึกหรอเครื่องมือตัดของการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็นซี สามารถแสดงดังสมการที่ 10 ดังนี้

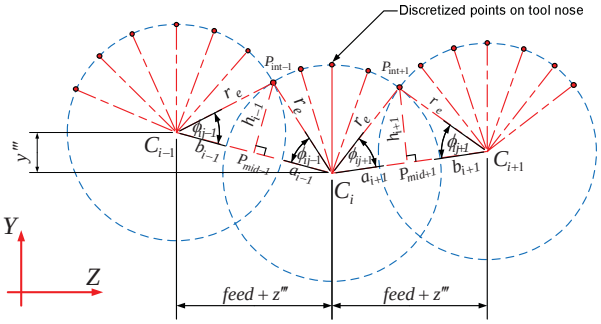
$$A_{VB_actual} = [Eq.6] + \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (10)$$

4. การสร้างแบบจำลองของผิวคว้านขึ้นรูปแบบ 3 มิติ

การจำลองการสึกหรอเครื่องมือตัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็น ซี ถูกดำเนินการและจัดรูปของจุดในการวิเคราะห์การสร้างเพื่อเป็นตัวแทนของผิวการคว้านขึ้นรูป ซึ่งประกอบด้วยการใส่ข้อมูลบนพื้นฐานของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พารามิเตอร์การตัดเฉือน เรขาคณิตของคมตัดเม็ดมีดอินเสิร์ต และการสึกหรอเครื่องมือตัด ดังแสดงขั้นตอนการจำลองเสมือนจริงของกระบวนการคว้านขึ้นรูปที่ได้ถูกนำเสนอจาก Thasana et al. (2014)

เมื่อตำแหน่งของสันคมตัดจากรัศมีปลายมีดถูกได้รับในลำดับต่อไปก็จะสร้างจุดทั้งหมดบนการสร้างผิวคว้านขึ้นรูปของชิ้นงาน ซึ่งจุดของสันคมตัดจากรัศมีปลายมีดคมตัดเดียวบนจุดสัมผัสของสันคมตัด สามารถอธิบายในระนาบภาพตัด ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4 มุมของจุดวิกฤต

เครื่องมือตัดจะถูกประมาณสำหรับการเป็นตัวแทนของรัศมีปลายมีด ซึ่งสร้างผิวของการตัดเฉือนด้วยการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ที่ได้ถูกพิจารณา รัศมีปลายมีดก็จะไม่มีความยาวเท่ากันบนเส้นตรงยาว และการยึดของรัศมีปลายมีดก็จะเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องด้วย ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ รัศมีปลายมีดไม่ต่อเนื่องก็สามารถแสดงและประเมินผิวการจำลองการคว้านขึ้นรูป



รูปที่ 4 รูปร่างเรขาคณิตของรัศมีปลายมีดด้วยการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์และการสึกหรอเครื่องมือตัด

มุมสัมผัสเริ่มต้นและสุดท้ายของรัศมีปลายมีดด้วยการตัดเฉือนบนชิ้นงานสามารถถูกคำนวณโดยสมการที่ 11 - 12 ซึ่งได้อ้างอิงมาจาก Ramaswami (2010) และ Thasana et al. (2014)

$$\phi_{ij-1} = \cos^{-1}\left[\frac{\overrightarrow{P_{int-1}C_i} \bullet \overrightarrow{C_{i-1}C_i}}{\left|\overrightarrow{P_{int-1}C_i}\right|\left|\overrightarrow{C_{i-1}C_i}\right|}\right] \quad (11)$$

$$\phi_{ij+1} = \cos^{-1}\left[\frac{\overrightarrow{P_{int+1}C_i} \bullet \overrightarrow{C_{i+1}C_i}}{\left|\overrightarrow{P_{int+1}C_i}\right|\left|\overrightarrow{C_{i+1}C_i}\right|}\right] \quad (12)$$

การส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 เพื่อจำลองผิวเสมือนจริงของการตัดเฉือนกระบวนการคว้านขึ้นรูปจากระนาบแกน YZ เพื่อวางแนวทางการหมุนที่เหมาะสม โดยขึ้นอยู่กับมุมการหมุนของเพลาหมุน โดยการนำเอาสมการที่ 10 มาประยุกต์หาค่าเบี่ยงเบนในแต่ละแกนของผิวคว้านขึ้นรูปทั้งหมด (x''', y''', z''') ของการจำลองตัดเฉือนเสมือนจริง ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 13 ดังนี้

$$F_t = (f)\cdot\left(\frac{\theta_z}{2\pi}\right); \quad R_{inst} = \sqrt{x'''^2 + y'''^2}$$

$$\begin{aligned} X_{surf_boring} &= \left(R_d + R_{inst} + r_e \cdot \cos\phi_{ij+1}\right)\cdot \sin\theta_z \\ Y_{surf_boring} &= \left(R_d + R_{inst} + r_e \cdot \cos\phi_{ij+1}\right)\cdot \cos\theta_z \\ Z_{surf_boring} &= F_t + z''' + r_e \cdot \cos\phi_{ij+1} \end{aligned} \quad (13)$$

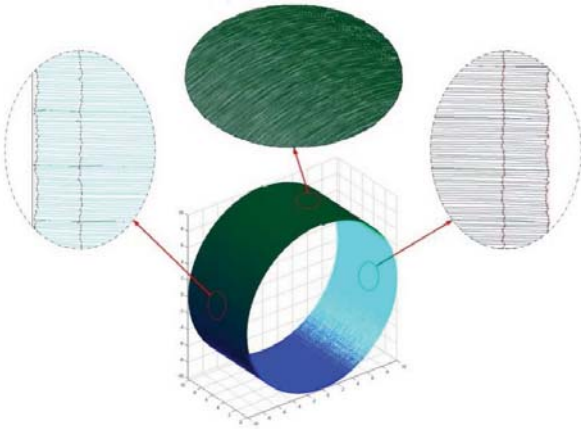
โดยที่

$X_{surf_boring}, Y_{surf_boring}, Z_{surf_boring}$: ตำแหน่งแกน XYZ ของจุดบนผิวการคว้านขึ้นรูป

R_d : รัศมีของผิวคว้านขึ้นรูป

R_{inst} : ระยะเบี่ยงเบนในชั่วขณะของจุดศูนย์กลางรัศมีปลายมีดจากแกนของชิ้นงาน

รูปที่ 5 เป็นการแสดงตัวอย่างของการสร้างผิวจำลองเสมือนจริงของกระบวนการคว้านขึ้นรูป โดยใส่พารามิเตอร์ของการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต พารามิเตอร์การตัดเฉือน และการสึกหรอของเครื่องมือตัด ซึ่งผิวการคว้านขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้จากการจำลอง เป็นกลุ่มของจุดบนผิวการตัดเฉือนที่ได้ถูกสร้างและสอดแทรกขึ้น



รูปที่ 5 ตัวอย่างผิวคว้านขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการจำลองเสมือนจริง

6. สรุป

การศึกษาแบบจำลองการสึกหรอเครื่องมือตัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซี เอ็น ซี ซึ่งได้นำเสนอเพื่อประเมินการเบี่ยงเบนรูปร่างของการสร้างผิวชิ้นงานเสมือนจริง สามารถสรุปดังต่อไปนี้

(1) โมเดลจำลองที่ได้นำเสนอเป็นการแทนของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการสึกหรอของเครื่องมือตัดกับระบบพิกัดการอ้างอิงของหัวเพลาหมุน ซึ่งกระทำเข้าไปในการพิจารณาของระบบการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของระบบเครื่องมือตัดสำหรับการคว้านขึ้นรูป

(2) ระบบวิธีที่ได้นำเสนอเป็นการประเมินความเบี่ยงเบนรูปร่างของการตัดเฉือนบนพื้นฐานของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการสึกหรอเครื่องมือตัดของสันคมตัด

(3) โมเดลจำลองที่นำเสนอและวิธีการที่ได้ถูกประยุกต์เพื่อจำลองของการตัดเฉือนเสมือนจริงสำหรับกระบวนการคว้านขึ้นรูปของผิวการตัดเฉือน ได้ถูกประมาณบนพื้นฐานการใส่ข้อมูลของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พารามิเตอร์การตัดเฉือน เรขาคณิตคมตัดเม็ดมีดอินเสิร์ต และการสึกหรอเครื่องมือตัด ทำให้ผู้วิจัยสามารถประมาณการของผิวชิ้นงานเสมือนจริงได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Thasana, W., Sugimura, N., Iwamura K. and Tanimizu, Y. (2014). A study on estimation of 3-dimensional surface roughness of boring processes including kinematic motion deviations, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,* vol. 8, No.4, February 2014, Paper No. 14-00096.

[2] Sugimura, N. and Murabe, A. (1997). A study an analysis of alignment errors of 5-axis machine tools, paper presented in *the International Conference on Manufacturing Milestones toward the 27 Century*, JSME, Japan.

[3] ISO 230-1: 2012 (2012). *Test code for machine tools -Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*, ISO, pp. 107-109.

[4] Choi, J. P., Lee, S. J. and Kwon, H. D. (2003). Roundness error prediction with a volumetric error model including spindle error motions of a machine tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, April 2002, pp. 923-928.

[5] Kaymakci, M., Kilic, Z. M. and Altintas, Y. (2012). Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations, *International Journal of Machine Tools &* Manufacture, Vol. 54-55, December 2011, pp. 34-45.

[6] Kalpakjian, S. and Schmid, S.R. (2006). *Manufacturing Engineering and Technology:* Chapter 21, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, pp. 607 – 646.

[7] Ramaswami, H. (2010). *An integrated framework for virtual machining and inspection of turned parts, Ph.D. Thesis, University of Cincinnati,* URL:http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ucin1282574694, accessed on 5/4/2010.

[8] Meng, Q., Arsecularatne, J. A., and Mathew, P. (2000). Calculation of Optimum Cutting Conditions for Turning Operations using a Machining Theory, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40(12), March 2000, pp. 1709-1733.