บทที่ 2

เป้าหมายเชิงเศรษฐศาสตร์ของการตัดวัสดุ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการกลึงปอกเพื่อประหยัดเวลาหรือค่าใช้จ่าย ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะอาศัยโมเดลทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎีและหลักการเชิงเศรษฐศาสตร์ในการตัดวัสดุ เพื่อให้บรรลุ เป้าหมาย คือหาค่าความเร็ว และอัตราการป้อนที่เหมาะสมที่สุดในการตัด

โดยเป้าหมายเชิงเศรษฐศาสตร์ในการตัดวัสดุที่มีผู้นิยมนำมาพิจารณามี 2 แบบ คือ

1. ต้องการให้ต้นทุนต่อชิ้นต่ำสุด (minimum cost per piece)
2. ต้องการให้เวลาต่อชิ้นต่ำสุด (minimum time per piece) หรือบางที่เรียกว่า ต้องการให้อัตราการผลิตสูงสุด (maximum production rate) คือจำนวนผลิตต่อเวลาสูงสุด

การตั้งเป้าหมายว่าต้องการตัดโลหะให้ต้นทุนต่อชิ้นต่ำสุด เป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่า ระบบการผลิตในบางโรงงานยังไม่ซับซ้อน การพิจารณาประหยัดค่าใช้จ่ายในการตัดวัสดุก็จะมีผลในการลดค่าใช้จ่ายของทั้งโรงงานอย่างเห็นได้ชัด และการประหยัดค่าใช้จ่ายในการตัดวัสดุ ไม่ได้มีผลทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นๆ

ในกรณีของการตั้งเป้าหมายว่าต้องการตัดโลหะให้เวลาต่อชิ้นต่ำสุดเป็นไปตามสมมุติฐานระบบการผลิตในโรงงานในสมัยปัจจุบันมีความซับซ้อน การพิจารณาประหยัดค่าใช้จ่ายเฉพาะการตัดวัสดุ อาจจะไม่มีผลในการลดค่าใช้จ่ายของทั้งโรงงาน เพราะการประหยัดค่าใช้จ่ายเฉพาะในการตัดวัสดุอาจจะไปเพิ่มค่าใช้จ่ายในส่วนอื่น ดังนั้นแนวทางการประหยัดที่ได้ผลดีกว่าจึงน่าจะเป็นการประหยัดเวลาต่อชิ้นในการตัดเสียก่อน คือให้เครื่องจักรและคนที่ทำงานด้านการตัดวัสดุทำงานที่ได้รับมอบหมายให้เสร็จอย่างรวดเร็วที่สุด แล้วนำเวลากำลังเครื่องจักร และกำลังคนที่ประหยัดได้ไปใช้การทำงานอย่างอื่น

สภาวะที่ทำให้การตัดโลหะให้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายต่อชิ้นต่ำสุดจะไม่เหมือนกับสภาวะที่ทำให้เวลาต่อชิ้นต่ำสุด เมื่อเป็นเช่นนี้ผู้วางแผนการผลิตจำเป็นต้องเลือกทางใดทางหนึ่งเพียงทางเดียวและไม่สามารถทำให้ได้ทั้งสองกรณีพร้อมกัน และต่อไปจะเป็นการพิจารณาการเลือกสภาวะตัดในกรรมวิธีการกลึง ซึ่งเป็นกรรมวิธีการผลิตที่ใช้กันมาก

2.1 การเลือกสภาวะการตัดเพื่อให้ต้นทุนต่อชิ้นต่ำสุด (minimum cost per piece)

การพิจารณาเริ่มที่การหาโครงสร้างของต้นทุนการผลิตต่อชิ้น โดยการหาว่าต้นทุนการผลิตของชิ้นงานหนึ่งชิ้นประกอบไปด้วยอะไรบ้าง

ต้นทุนการผลิตในการตัดชิ้นงานหนึ่งชิ้น โดยทั่วๆ ไป จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบดังนี้

$$C_p = C_l + C_u + C_s + C_m + C_t \tag{2-1}$$

เมื่อ C_p = ต้นทุนการผลิตต่อชิ้น (production cost per piece)

C_l = ต้นทุนการใส่ชิ้นงานเข้าก่อนการตัดต่อชิ้น (loading cost per piece)

C_u = ต้นทุนการถอดชิ้นงานออกจากที่หลังจากการตัดต่อชิ้น (unloading cost per piece)

C_s = ต้นทุนการติดตั้งใบมีดเข้าที่ก่อนการตัดต่อชิ้น (setting cost per piece)

C_m = ต้นทุนการตัดต่อชิ้น (machining cost per piece)

C_t = ต้นทุนเกี่ยวกับใบมีดต่อชิ้น (tooling cost per piece) หมายถึงค่าเปลี่ยนใบมีด ค่าลับคมมีด และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับใบมีดเคลื่อนที่ผ่านเนื้อชิ้นงาน โดยไม่รวมราคาหรือค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับใบมีด

ต้นทุนการใส่ชิ้นงานเข้าก่อนการตัดต่อชิ้น C_l จะเป็นผลคูณของเวลาที่ใช้ใส่ชิ้นงาน (T_l) กับอัตราค่าใช้จ่าย นั้นคือ

$$C_l = (a_0 + a_l)T_l \tag{2-2}$$

เมื่อ a_l = อัตราค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการใส่ชิ้นงาน

a_0 = อัตราค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องจักรต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้นที่โรงงานจะต้องจ่าย ไม่ว่าจะใส่ชิ้นงานหรือไม่ก็ตาม (machine burden cost per min) เช่น ค่าแรงทางอ้อม ค่าไฟฟ้าที่ให้แสงสว่าง ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรที่นอกเหนือจากการใช้งาน

ต้นทุนการถอดชิ้นงานออกจากที่หลังการตัดต่อชิ้น C_u จะเป็นผลคูณของเวลาที่ใช้ถอดชิ้นงาน (T_u) กับอัตราค่าใช้จ่าย

$$C_u = (a_0 + a_u)T_u \tag{2-3}$$

เมื่อ a_u = อัตราค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการถอดชิ้นงาน

ในการตัด ต้องมีเวลาที่คมมีดเคลื่อนที่ย้อนกลับคืนที่ตั้งเดิม และตั้งความลึกของการตัดก่อนการตัดครั้งต่อไป เวลานี้เรียกว่าเวลาในการตั้งใบมีดต่อชิ้น (tool setting time, T_s) และจะต้องมีค่าใช้จ่ายในช่วงเวลานี้ด้วย คือ C_s โดยที่

$$C_s = (a_0 + a_s)T_s \tag{2-4}$$

เมื่อ a_s = อัตราค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการติดตั้งชิ้นงาน

ต้นทุนการตัดจริงต่อชิ้น C_m เป็นผลคูณของเวลาที่ใช้ตัด (T_m) กับอัตราค่าใช้จ่ายโดยตรงในการตัด

$$C_m = (a_0 + a_m + a_d)T_m \tag{2-5}$$

เมื่อ a_m= อัตราค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการตัดชิ้นงาน เช่น ค่าแรงของช่าง และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกล

a_d = ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรเนื่องจากการใช้งาน

T_m = เวลาที่คมมีดตัดลงไปบนชิ้นงานจริงๆ

ต้นทุนเกี่ยวกับการตัดต่อชิ้น C_t หาได้จาก

$$C_t = [(a_0 + a_m + a_d)T_d + (b_0 + b_g + b_d)T_g] / N_w \quad (2\text{-}6)$$

เมื่อ T_d = เวลาที่ใช้เปลี่ยนคมมีดหนึ่งคม (tool changing time per edge)

b_0 = อัตราค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องลับคมมีดต่อหน่วยเวลาที่โรงงานจะต้องจ่าย (tool grinder burder cost per min) เช่น ค่าแรงทางอ้อม ค่าไฟฟ้าที่ให้แสงสว่าง ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรที่นอกเหนือจากการใช้งาน

b_g = อัตราค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการลับมีดในแต่ละครั้ง เช่น ค่าแรงของช่างลับมีดต่อการลับหนึ่งครั้ง ค่าไฟฟ้าในการขับเครื่อง และ ค่าสึกหรอของวงล้อเจียระไนที่ใช้ลับคมมีด

b_d = เป็นค่าเสื่อมราคาของเครื่องลับใบมีดขณะใช้งาน

T_g = เวลาที่ใช้ลับคมมีดโดยเฉลี่ยต่อครั้ง (tool grinding time)

N_w = จำนวนของชิ้นงานที่ได้ต่อการลับคมมีดหนึ่งครั้งหรือต้องเปลี่ยนคมใหม่

ในขั้นตอนต่อไปเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งจำเป็นต้องทราบรายละเอียดของกรรมวิธีการตัดมากขึ้น เช่น ถ้าเป็นการตัดเป็นกรณีของการกลึงปอกผิวชิ้นงานรูปทรงกระบอกโดยใช้เครื่องกลึงธรรมดา (engine lathe) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการตัดโลหะที่ง่ายและรู้จักกันดีที่สุด จากการการทดลองโดย ศุภโชค และคณะพบว่า

$$T_l = 0.299 + 2.032 \times 10^{-7} \times LD^2 \quad (2\text{-}7)$$

เมื่อ T_l = เวลาที่ใช้ใส่ชิ้นงานหนึ่งชิ้น (min)

L = ความยาวของชิ้นงาน (mm)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (mm)

$$T_u = 0.259 + 1.773 \times 10^{-7} \times LD^2 \quad (2\text{-}8)$$

เมื่อ T_u = เวลาที่ใช้ถอดชิ้นงานต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้น (min)

$$T_s = N_p(0.048 + 0.224 \times 10^{-3} L) \quad (2\text{-}9)$$

เมื่อ T_s = เวลาที่ใช้ในการตั้งใบมีดต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้น (min) ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ ในกรณีนี้เป็นของเครื่องกลึงธรรมดา

N_p = จำนวนครั้งของการปาดผิวชิ้นงานหนึ่งชิ้น (number of pass per piece)

$$T_m = N_p L/(f\omega) \quad (2\text{-}10)$$

เมื่อ T_m = เวลาที่คมมีดตัดลงไปบนชิ้นงานจริง (min)

f = อัตราป้อน (mm/rev)

ω = ความเร็วรอบ (rev/min)

ในการตัดวัสดุนิยมใช้ความเร็วในการตัด v (m/min) เป็นตัวแปรแทนความเร็วรอบ ω ดังนั้นจึงอาจเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$T_m = N_p L\pi D/(1000fv) \quad (2\text{-}11)$$

ในขั้นตอนต่อไปเราจะพิจารณาถึงอายุการใช้งานของคมมีด โดยสมมุติว่าอายุการใช้งานของคมมีดจะแปรเปลี่ยนกับความเร็วในการตัด และสามารถแสดงได้โดยสมการอายุคมมีดอย่างง่ายๆ ดังต่อไปนี้

$$T = Cv^n \quad (2\text{-}12)$$

เมื่อ C และ n เป็นค่าคงตัวสำหรับส่วนผสมของใบมีดและชิ้นงานแต่ละคู่ หาได้จากการทดลองที่มีผู้เผยแพร่ไว้ เวลา T เริ่มนับศูนย์จากเวลาที่เริ่มใช้งานของคมมีดใหม่ หรือเปลี่ยนคมใหม่

N_w = จำนวนชิ้นงานที่คมมีดหนึ่งคมสามารถตัดได้ก่อนที่จะต้องนำไปลับใหม่ หรือเปลี่ยนคมใหม่ ค่านี้หาได้จาก

$$N_w = T / T_m \tag{2-13}$$

จากนั้นแทนค่า T และค่า T_m จากสมการด้านบนจะสามารถแสดงได้ว่า

$$N_w = Cv^n / \{N_p L\pi D / (1000 fv)\} \tag{2-14}$$

$$N_w = 1000 fCv^{n+1} / (N_p L\pi D) \tag{2-15}$$

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ค่าใช้จ่ายในการกลึงปอกผิวชิ้นงานหนึ่งชิ้น C_p คือ

$$\begin{aligned} C_p &= C_l + C_u + C_s + C_m + C_t \\ &= (a_0 + a_l)T_1 + (a_0 + a_u)T_u + (a_0 + a_s)T_s + (a_0 + a_m + a_d)T_m \\ &\quad +[(a_0 + a_m + a_d)T_c + (b_0 + b_g + b_d)T_g] / N_w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (a_0 + a_l)(0.299 + 2.032\times10^7 \times LD^2) + (a_0 + a_u)(0.259 + 1.773\times10^7 \times LD^2) \\ &\quad +(a_0 + a_s)N_p(0.048 + 0.224\times10^{-3} L) \\ &\quad +(a_0 + a_m + a_d)N_p L\pi D / (1000 fv) \\ &\quad +[(a_0 + a_m + a_d)T_d + (b_0 + b_g + b_d)T_g] / \{1000 fCv^{n+1} / N_p L\pi D\} \end{aligned} \tag{2-16}$$

2.2 การเลือกสภาวะการตัดเพื่อให้เวลาต่อชิ้นต่ำสุด (minimum time per piece)

รูปแบบของการเลือกสภาวะการตัดเพื่อให้เวลาต่อชิ้นต่ำสุดในการกลึงปอกผิว เวลาทั้งหมด T_p ในการใช้ผลิตชิ้นส่วนหนึ่งชิ้นคือ

$$T_p = T_l + T_u + T_s + T_m + T_c \tag{2-17}$$

เมื่อ T_l = เวลาที่ใช้ใส่ชิ้นงานต่อชิ้น

T_u = เวลาที่ใช้ ถอดชิ้นงานต่อชิ้น

T_m = เวลาที่ใช้ตัดซึ่งเป็นเวลาที่คมมีดตัดผ่านชิ้นงานจริงๆ

T_s = เวลาที่ใช้ตั้งใบมีดต่อหนึ่งชิ้นงานรวมทั้งเวลาที่ใบมีดเดินทางถอยกลับเมื่อตัดชิ้นงานเสร็จในแต่ละครั้งไปยังตำแหน่งตั้งต้นการตัดครั้งต่อไป

T_c = เวลาที่ใช้เปลี่ยนคมมีดต่อหนึ่งชิ้นงาน

ถ้าการตัดเป็นกรณีของการกลึงปอกผิวชิ้นงานรูปทรงกระบอก โดยเครื่องกลึงชนิดธรรมดา จากการการทดลองโดย ศุภโชค และคณะพบว่า

$$T_l = 0.299 + 2.032 \times 10^{-7} \times LD^2 \tag{2-18}$$

เมื่อ T_l = เวลาที่ใช้ใส่ชิ้นงานหนึ่งชิ้น (min)

L = ความยาวของชิ้นงาน (mm)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (mm)

$$T_u = 0.259 + 1.773 \times 10^{-7} \times LD^2 \tag{2-19}$$

T_u = เวลาที่ใช้ถอดชิ้นงานต่อชิ้น (min)

T_s แปรเปลี่ยนไปตามชนิดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ ในกรณีของเครื่องกลึงธรรมดา T_s ทราบได้จากผลการทดลอง คือ

$$T_s = N_p(0.048 + 0.224 \times 10^{-3} L) \tag{2-20}$$

เมื่อ N_p = จำนวนครั้งของการปาดผิวชิ้นงานหนึ่งชิ้น

เวลาที่คมมีดตัดผ่านชิ้นงานจริงๆ T_m คำนวณได้จาก

$$T_m = N_p L/(f\omega) \tag{2-21}$$

เมื่อ T_m = เวลาที่คมมีดตัดลงไปบนชิ้นงานจริง (min)

f = อัตราป้อน (mm/rev)

ω = ความเร็วรอบ (rev/min)

ในการตัดวัสดุนิยมใช้ความเร็วในการตัด v (m/min) เป็นตัวแปรแทนความเร็วรอบ ω ดังนั้นจึงอาจเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$T_m = N_p L\pi D/(1000fv) \tag{2-22}$$

อายุการใช้งานของคมมีดจะแปรเปลี่ยนกับความเร็วในการตัด โดยทั่วไปแล้วสมการอายุใบมีดอย่างง่ายๆ ที่รู้จักกันดีโดยทั่วไปเป็นสมการแบบ เอกซ์โพเนนเชียล ดังต่อไปนี้

$$T = Cv^n \tag{2-23}$$

เมื่อ C และ n เป็นค่าคงตัวสำหรับส่วนผสมของใบมีดและชิ้นงานแต่ละคู่ หาได้จากการทดลองที่มีผู้เผยแพร่ไว้ เวลา T เริ่มนับศูนย์จากเวลาที่เริ่มใช้งานของคมมีดใหม่ หรือเปลี่ยนคมใหม่

N_w=จำนวนชิ้นงานที่คมมีดหนึ่งคมสามารถตัดได้ก่อนที่จะต้องนำไปลับใหม่หรือเปลี่ยนค่านี้หาได้จาก

$$N_w = T/T_m \tag{2-24}$$

จากนั้นแทนค่า T และค่าT_m จากสมการด้านบนจะสามารถแสดงได้ว่า

$$N_w = Cv^n/\{N_p Lp\pi D/(1000fv)\}$$

$$N_w = 1000fCv^{n+1}/(N_p L\pi D) \tag{2-25}$$

$$T_c = T_d/N_w$$

$$T_c = T_d N_p L\pi D/(1000 fCv^{n+1}) \quad (2\text{-}26)$$

เมื่อ T_c = เวลาที่ใช้เปลี่ยนคมมีดต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้น

T_d = เวลาที่ใช้เปลี่ยนคมมีดหนึ่งคม โดยค่านี้ถือเป็นค่าคงที่สำหรับใบมีดแต่ละชนิด

ค่าของเวลาทั้งหมดต่อชิ้น T_p หาได้จาก

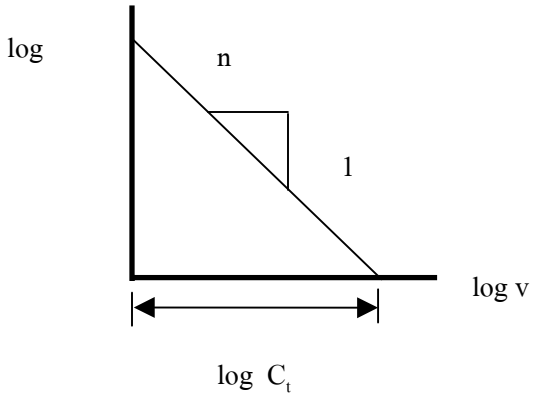
$$\begin{aligned} T_p &= T_l + T_u + T_s + T_m + T_c \\ &= (0.299 + 2.032\times10^{-7}\times LD^2) + (0.259 + 1.773\times10^{-7}\times LD^2) \\ &\quad + N_p(0.048 + 0.224\times10^{-3}L) + N_p L\pi D/(1000 fv) + T_d N_p L\pi D\times10^{-3}/(fCv^{n+1}) \end{aligned} \quad (2\text{-}27)$$

2.3 สมการอายุคมมีด (tool life equation)

อายุการใช้งานของใบมีด เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเป็นตัวบ่งบอกว่าการตัดโลหะในสภาวะการตัดอย่างหนึ่ง จะทำได้หรือไม่ ถ้าอายุการใช้งานของคมมีดน้อยเกินไป การตัดจะทำไม่ได้ หรือถ้าฝืนตัดให้ได้ก็จะต้องใช้จำนวนใบมีดหลายคม เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูงทั้งที่อาจจะได้ชิ้นงานสำเร็จเป็นชิ้นส่วนคุณภาพต่ำ จนอาจจะยอมรับไม่ได้อีกด้วย ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องอายุการใช้งานใบมีดและได้หาความสัมพันธ์ระหว่างอายุคมมีดกับตัวแปรที่ใช้ควบคุมการตัด เช่น ความเร็วในการตัด สมการความสัมพันธ์นี้เรียกว่า “สมการอายุคมมีด”

<u>สมการอายุคมมีดแบบ เทเลอร์ (Taylor’s tool life equation)</u>

Frederick W.Taylor เป็นคนแรกที่ทำการทดลอง และเสนอรูปแบบของสมการอายุใบมีดจากการทดลองกลึงเหล็กกล้าโดยใช้ใบมีดเหล็กกล้าไฮสปีดและตั้งเกณฑ์ว่า คมมีดหมดอายุเมื่อแตกหักจริง เขาพบว่าค่าของอายุการใช้งานของคมมีด (T) จะลดลงเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์นี้จะแสดงเป็นเส้นตรงในสเกลลอการิทึม ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1



ภาพประกอบ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุคมมีดกับความเร็วในการตัดตามแนวความคิดเทเลอร์

จากรูปพบว่า

$$\log v = \log C_t - n \log T$$
$$v = C_t T^{-n} \tag{2-28}$$

$vTe^n = C_t$ สมการนี้เรียกว่าสมการอายุคมมีดแบบเทเลอร์ (Taylor tool life equation) เมื่อ C_t เป็นค่าคงตัวเรียกว่า “Taylor constant” และ n เป็นค่าคงตัวเรียกว่า “Taylor exponential” สมการนี้เป็นสมการที่รู้จักกันดีมานานในวงการวิชาการระดับนานาชาติ หรืออาจแปลงสมการเสียใหม่ตามความนิยมในปัจจุบันได้เป็น

$$v^{1/n} T = C_t^{1/n}$$
$$T = K v^{-1/n} \tag{2-29}$$

เมื่อ

$K = C_t^{1/n}$ เป็นค่าคงตัวหรืออาจเขียนใหม่ได้เป็น $T = Kv^{ev}$ โดยที่ ev เป็นเลขยกกำลังของความเร็วในการตัด ซึ่งเป็นค่าคงตัว

<u>สมการคมมีดแบบขยายความแบบเทเลอร์</u>

หลังจากที่มีสมการอายุคมมีดแบบเทเลอร์แล้ว มีผู้พบว่านอกจากความเร็วในการตัด (v) แล้ว อัตราการป้อน (f) และความลึกในการตัด (d) ก็มีอิทธิพลต่ออายุใบมีดเช่นกัน ในลักษณะที่คล้ายกับอิทธิพลของความเร็ว ดังนั้นสมการอายุคมมีดอาจจะขยายรูปเป็น

$$\log(T) = K_1 + (ev)\log v + (ef)\log f + (ed)\log d \qquad (2\text{-}30)$$

เมื่อ K_1 ev ef และ ed เป็นค่าคงตัว โดยสมการดังกล่าวยังนิยมนำไปเขียนใหม่ในรูปของสมการเอกโปเนนเชียล (exponential tool life equation) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของสมการอายุคมมีดแบบขยายความของเทเลอร์ (extended Taylor tool life equation) สมการอายุคมมีดแบบเทเลอร์เป็นแบบที่ใช้กันมากที่สุดเพราะเป็นรูปแบบที่เข้าใจง่าย และมีความละเอียดเพียงพอในการนำไปใช้งาน สมการอายุคมมีดต่างๆ ได้รวบรวมแสดงไว้ในภาคผนวก ก. นั้นสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของใบมีดได้