

บทที่ 2

เฟืองฟันตรง

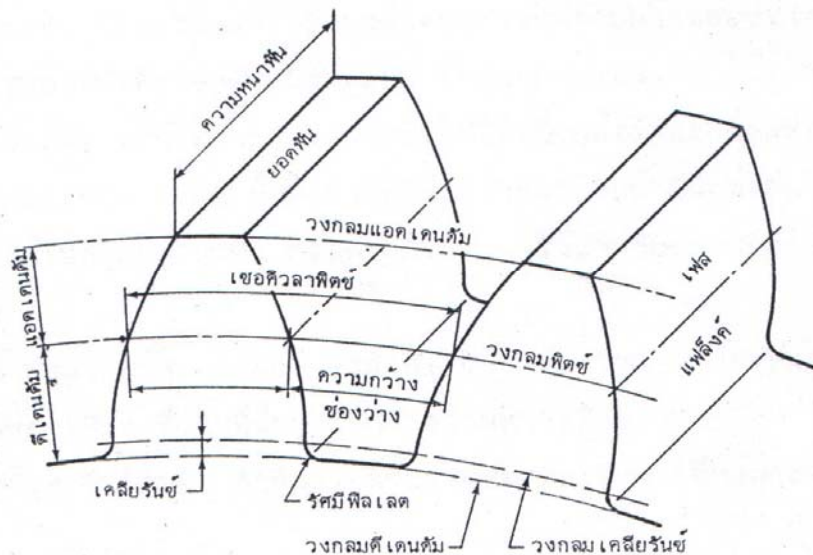
2.1 บทนำ

เมื่อมีล้อสองล้อสัมผัสกันและถูกกดให้ติดกัน สมมุติว่าที่ล้อแต่ละอันมีเพลายึดอยู่ ถ้าหมุนเพลาดัวใดตัวหนึ่ง จะพบว่าเพลาของอีกตัวหนึ่งก็จะหมุนตามไปด้วย เนื่องจากความฝืดของการสัมผัสเชิงเส้น (Line Contact) ของล้อทั้งสอง เครื่องมือที่ใช้ถ่ายทอดกำลัง และการหมุนระหว่างเพลาทิ้งสองนี้เรียกว่า ล้อความฝืด (Friction Wheel) แต่การถ่ายทอดแบบนี้ ใช้ได้แต่การถ่ายทอดกำลังน้อยๆ หรือการหมุนที่ไม่สู้จะสม่ำเสมอ

เพื่อให้ได้การถ่ายทอดการหมุนที่แม่นยำขึ้น และสามารถถ่ายทอดกำลังสูงๆ ระหว่างเพลาทิ้งสองได้ จึงได้มีการวางฟันไว้บนเส้นรอบวงของล้อทั้งสอง โดยให้ฟันแต่ละซี่ห่างกันด้วยระยะที่เท่าๆ กัน แล้วเรียกล้อที่มีฟันนี้เสียใหม่ว่า “เฟือง”

2.2. คุณสมบัติทั่วไปของเฟืองฟันตรง [12]

ในการให้คำจำกัดความเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของเฟือง พิจารณาจากรูป 2.1



รูปที่ 2.1 การเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของฟันเฟือง[12]

วงกลมพิตช์ (Pitch Circle) เป็นมิติหลักในการเรียกขนาดของเฟือง โดยบอกขนาดของเฟืองด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ (Pitch Diameter) ในทางทฤษฎีแล้วเฟืองคู่ที่สัมผัสกันจะต้องมีเส้นสัมผัสกัน ณ วงกลมพิตช์

เชอคิวลาพิตช์ (Circular Pitch) p เป็นระยะที่วัดบนวงกลมพิตช์ จากจุดหนึ่งบนฟันเฟืองไปยังอีกจุดหนึ่ง ณ ตำแหน่งเดียวกันบนฟันถัดไป จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าระยะนี้มีค่าเท่ากับผลรวมของความกว้างฟันและความกว้างช่องว่างระหว่างฟัน

โมดูล (Module) m เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์กับจำนวนฟันบนเฟือง หน่วยที่ใช้วัดโมดูลคือมิลลิเมตร โมดูลนี้เป็นดัชนีสำหรับบอกขนาดของฟันเฟืองในระบบเอสไอ

ไดอะมิทรีลพิตช์ (Diametral Pitch) P เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันบนเฟืองกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ ฉะนั้นจึงเป็นส่วนกลับของโมดูล ไดอะมิทรีลพิตช์นี้เป็นดัชนีสำหรับบอกขนาดของฟันเฟืองในระบบหน่วยอังกฤษ ซึ่งกำลังได้รับการเปลี่ยนแปลงให้เป็นระบบหน่วยเอสไออยู่ ดังนั้นความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์จึงใช้บอกเป็นนิ้ว

แอดเดนดัม (Addendum) a หรือช่วงสูงบน เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างยอดฟัน (top land) ถึงวงกลมพิตช์

ดีเดนดัม (Dedendum) d หรือช่วงสูงล่าง เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างโคนฟัน (bottom land) ถึงวงกลมพิตช์ ฉะนั้นความสูงของฟันเฟืองคือ ผลรวมระหว่าง a หรือ d

เคลียร์นซ์ (Clearance) c ในการที่เฟืองสองอันขบกัน ดีเดนดัมของเฟืองหนึ่งต้องมีค่ามากกว่าแอดเดนดัมของอีกเฟืองหนึ่ง เพื่อที่จะไม่ให้เกิดการขัดกันขึ้น ผลต่างระหว่างค่าดีเดนดัมและแอดเดนดัมนี้เรียกว่าเคลียร์นซ์ c (ดังรูป 2.1)

แบ็คแลช (Backlash) คือผลต่างระหว่างความกว้างช่องว่างระหว่างฟันเฟืองหนึ่งกับความกว้างของฟันเฟืองอีกอันหนึ่งที่ขบกัน โดยวัดตามแนวเส้นวงกลมพิตช์ ฉะนั้นในการขับด้วยเฟืองที่มีแบ็คแลช เฟืองขับจะสามารถหมุนไปได้เป็นมุมเล็กน้อยก่อนที่เฟืองตามจะหมุนไป แบ็คแลชนี้จำเป็นต้องมีอยู่เสมอ ทั้งนี้เพื่อให้มีช่องว่างสำหรับน้ำมันหล่อลื่น และเพื่อให้เฟืองสามารถขยายตัวได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตลาดจึงมีเพื่อเอาไว้สำหรับความผิดพลาดในการตัดรูปร่างของฟันเฟือง

ความหนาของฟัน (Face Width) b คือความหนาของฟันเฟืองวัดในทิศทางเดียวกับแนวแกนของเฟือง ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าความหนาเฟือง

แฟล็งก์ (Flank) คือผิวทางด้านข้างของฟันเฟือง ซึ่งอยู่ระหว่างวงกลมพิตช์กับวงกลมดีเดนดัม

อัตราทด (Velocity Ratio) m_w คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับต่อความเร็วเชิงมุมของเฟืองตาม ถ้าให้ “1” และ “2” แทนเฟืองขับและเฟืองตามตามลำดับ จากความรู้ทางกลศาสตร์ จะได้ว่า

$$m_{\omega} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

โดยที่ ω = ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

n = ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ (มิลลิเมตร หรือ นิ้ว)

N = จำนวนฟัน

อัตราส่วนเฟือง (Gear Ratio) m_g คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันของเฟืองต่อจำนวนฟันของเฟืองอื่น ถ้าเฟืองเป็นตัวขับแล้วจะได้

$$m_g = m_{\omega} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.2)$$

2.3 มาตรฐานการบอกขนาดของฟัน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดัชนีสำหรับบอกขนาดฟันเฟือง อาจบอกเป็นพิตช์ในระบบหน่วยอังกฤษ หรือบอกเป็นโมดูลในระบบหน่วยเอสไอ จากคำจำกัดความที่ผ่านมาจะได้ว่า

ไดอะมิทรีลพิตช์ $P = \frac{N}{d} \quad (2.3)$

โดยที่ d มีหน่วยเป็น นิ้ว

โมดูล $m = \frac{d}{N} \quad (2.4)$

โดยที่ d มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

และ เซอคิวลาพิตช์ $p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad (2.5)$

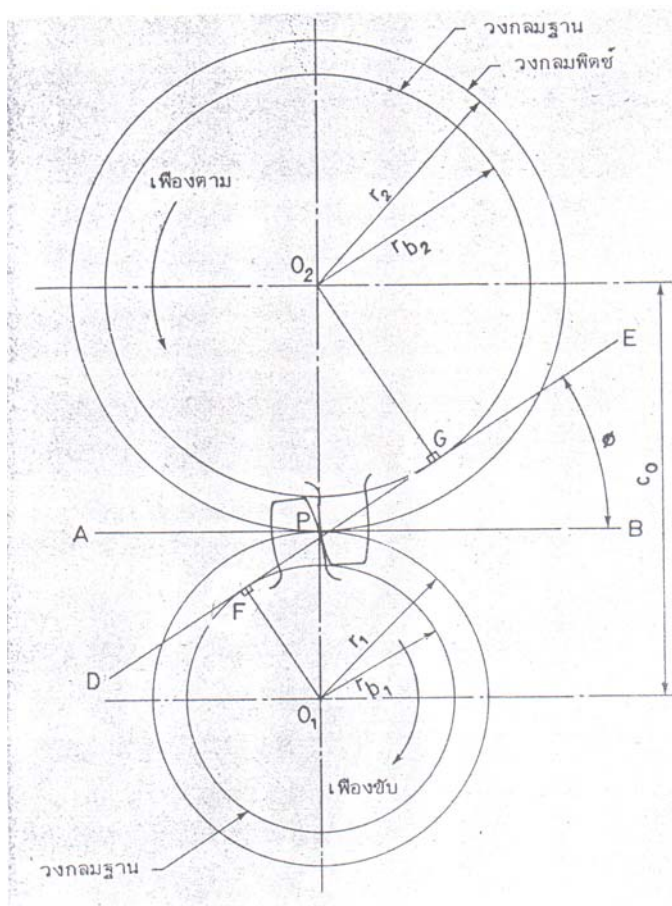
ดังนั้น $Pp = \pi \quad (2.6)$

สำหรับเฟืองที่ผลิตโดยวิธีการหล่อ ควรจะใช้ค่าเซอคิวลาพิตช์ ทั้งนี้เพราะจะทำให้สามารถทำแบบหล่อได้สะดวก ส่วนเฟืองที่ผลิตโดยวิธีการตัดกลึง (Machined) มักจะเรียกเป็นไดอะมิทรีลพิตช์ หรือโมดูล เพราะมีอุปกรณ์ในการตัดฟันเฟืองเป็นมาตรฐานอยู่แล้ว

2.4 การขั้กันของเฟืองและการทำงานของฟันเฟือง

เฟืองสองอันที่ขั้กันจะทำให้อัตราทดคงที่ก็ต่อเมื่อเฟืองคู่กันเป็นไปตามกฎการขั้กันของเฟือง ซึ่งกล่าวได้ว่า

รูปร่างของฟันเฟืองจะต้องทำให้เส้นตั้งฉากร่วม (Common Normal) ที่ลาก ณ จุดสัมผัสระหว่างฟันทั้งสองผ่านจุดคงที่จุดหนึ่ง ซึ่งอยู่บนเส้นที่โยงระหว่างจุดศูนย์กลางของฟันเฟืองทั้งสอง และจุดนี้เรียกว่าจุดพิตช์ (Pitch Point)



รูปที่ 2.2 การทำงานของฟันเฟืองที่ขบกัน[12]

ในการทำความเข้าใจกับข้อความนี้ให้พิจารณารูปที่ 2.2 จุดคงที่ดังกล่าวนี้คือจุด P ซึ่งอยู่บนเส้นที่โยงระหว่างจุดศูนย์กลาง O_1 และ O_2 ของเฟืองทั้งสอง รูปร่างของฟันเฟืองที่เป็นไปตามกฎการขบนี้เรียกว่า คอนจูเกตเคอฟ (Conjugate Curves) และที่นิยมใช้กันมากก็คืออินวอลูตเคอฟ (Involute curves) โดยเริ่มต้นจากวงกลมที่เรียกว่าวงกลมฐาน (Base Circle) เส้นตั้งฉากกับอินวอลูตเคอฟ DE ในรูปที่ 2.2 เป็นแนวเส้นที่แรงปฏิกิริยาที่ฟันเฟืองกระทำ เรียกว่า แนวของเส้นการกระทำ (line of action) หรือแนวแรงกด (Pressure Line) และมุม ϕ ในรูปเรียกว่ามุมกด (Pressure Angle)

จากการพิจารณารูปสามเหลี่ยม O_1FP และ O_2GP ในรูปที่ 2.2 จะพบว่ารัศมีของวงกลมฐานคือ

$$r_{b1} = r_1 \cos \phi \quad (2.7)$$

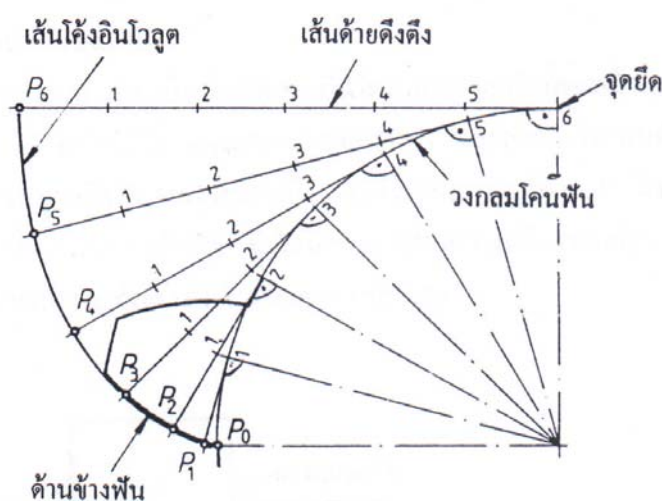
$$r_{b2} = r_2 \cos \phi \quad (2.8)$$

เขียนในรูปทั่วไป

$$r_b = r \cos \phi \quad (2.9)$$

ระยะทางที่วัดบนวงกลมฐานจากจุดหนึ่งบนฟันเฟืองหนึ่งไปยังจุดเดียวกันบนฟันเฟืองถัดไปเรียกว่า พิตช์ฐาน (Base Pitch) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเซอร์คูลาพิตช์ คือ

$$P_b = p \cos \phi \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.3 การเกิดเส้น โคงอิน โวลูต[2]

การเกิดเส้น โคงอิน โวลูตเคอฟ (Involute Curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเกิดจากการกลิ้งของเส้นเชือก (ตรง) ที่สัมผัสตั้งฉากกับแนวรัศมีบนเส้นรอบวงโคนฟันเฟืองไปยังจุด P ที่ต่อกันเป็นเส้นโค้งฟันอินโวลูต

2.5 ระยะการขบและอัตราส่วนการขบ

เมื่อเฟืองอันหนึ่งขบเฟืองอีกอันหนึ่ง จุดสัมผัสระหว่างฟันเฟืองเริ่มขึ้นเมื่อผิวด้านข้างของฟันเฟืองข้อสัมผัสกับปลายฟันเฟืองของเฟืองตาม และการสัมผัสจะสิ้นสุดลงเมื่อปลายฟันเฟืองของเฟืองข้อสัมผัสกับผิวด้านข้างของฟันเฟืองตาม

เนื่องจากปลายฟันเฟืองอยู่บนวงกลมแอดเดนดัม การสัมผัสระหว่างฟันเฟืองเริ่มขึ้นเมื่อวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองตามตัดกับแนวแรงกด และการสัมผัสสิ้นสุดลงเมื่อวงกลมแอดเดนดัม

ของเฟืองตามตัดกับแนวแรงกดอีกครั้งหนึ่ง ดังจุด A และ B ที่แสดงในรูปที่ 2.4 ระยะ AB นี้ เรียกว่า ระยะการขบซึ่งมีค่าเท่ากับ

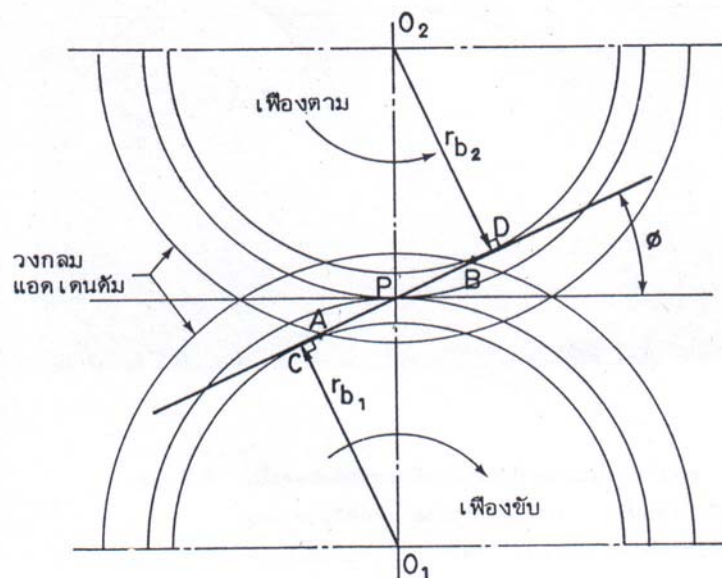
$$AB = \sqrt{(r_2 + a_2)^2 - (r_2 \cos \phi)^2} - r_2 \sin \phi + \sqrt{(r_1 + a_1)^2 - (r_2 \cos \phi)^2} - r_1 \sin \phi \quad (2.11)$$

โดยที่ r เป็นรัศมีของวงกลมพิตซ์ และ a เป็นแอดเดนดัม

ในขณะที่เฟืองขบกันควรมีฟันอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ขบกันอยู่ตลอดเวลา โดยปกติแล้วการขบกันมักจะมีมากกว่าหนึ่งคู่ วิธีการบอกจำนวนฟันที่ขบกันจะบอกเป็นอัตราส่วนการขบ (Contact Ratio) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการขบ และพิตซ์ฐาน นั่นคือ อัตราส่วนการขบ

$$m_c = \frac{AB}{P_b} \quad (2.12)$$

เพื่อให้เฟืองทำงานได้อย่างราบรื่นดี อัตราส่วนการขบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.5 การที่เฟืองคู่ใดมีอัตราส่วนการขบน้อยกว่าหนึ่ง หมายความว่าฟันของเฟืองคู่หนึ่งจะจากกันก่อนที่ฟันอีกคู่หนึ่งจะเข้ามาขบกัน ในกรณีเช่นนี้จะทำให้การให้การทำงานของเฟืองไม่ราบรื่นทั้งนี้เพราะจะมีแรงเนื่องจากการกระทบ (Impact) เกิดขึ้นมาก



รูปที่ 2.4 ระยะการสัมผัสของเฟือง[12]

2.6 การขัดกัน

ในการสร้างฟันเฟืองอินโวลูตเคอฟ จะเริ่มจากวงกลมฐาน ฉะนั้นส่วนของฟันเฟืองที่อยู่ต่ำกว่าวงกลมฐานจึงไม่เป็นอินโวลูตเคอฟ นั่นคือจะใช้กฎการขับเฟืองกับฟันเฟืองส่วนนี้ไม่ได้ ดังนั้นถ้ามีการขบระหว่างฟันเฟืองที่ระยะต่ำกว่าวงกลมฐาน ก็อาจทำให้เกิดการขัดกัน (Interference) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นเฟืองที่มีการขัดกัน จุด A และจุด B เรียกว่าจุดขัดกัน (Interference Point) ถ้ามีการสัมผัสระหว่างฟันนอกจุดนี้ (ถ้าวงกลมแอคเคนดัม ตัดแนวแรงกดนอกจุดนี้) ก็จะเกิดการขัดกันขึ้น เฟืองในรูป 2.5 มีการขัดกันเพราะว่าจุด C และ จุด D อยู่นอกจุด A และจุด B การจะดูว่าเฟืองคู่หนึ่งมีการขัดกันหรือไม่ ให้คำนวณหาระยะรัศมีของวงกลมแอคเคนดัม r_a ของเฟืองในรูปที่ 2.5 จะได้ว่า

$$r_a = \sqrt{(r \cos \phi)^2 + (c_0 \sin \phi)^2} \quad (2.13)$$

$$= \sqrt{r_b^2 + (c_0 \sin \phi)^2} \quad (2.14)$$

โดยที่

r = รัศมีวงกลมพิตช์

r_a = รัศมีของวงกลมแอคเคนดัม

c_0 = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟือง

วิธีที่จะป้องกันมิให้เกิดการขัดกันขึ้น ทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้คือ

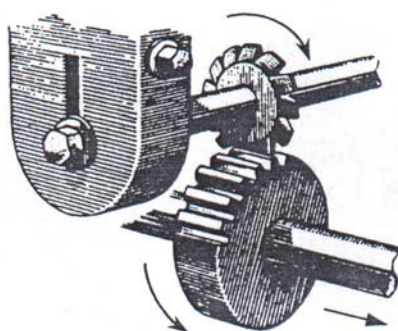
- 2.6.1 ใช้วิธีตัดเนื้อโลหะส่วนที่อยู่ต่ำกว่าวงกลมฐานออกบ้าง (Undercutting) ทั้งนี้เพื่อมิให้มีการสัมผัสระหว่างฟันเฟืองในบริเวณนี้ ข้อเสียในการทำเช่นนี้คือ ทำให้อัตราส่วนการขบลดลง และทำให้ฟันเฟืองบอบบางลง
- 2.6.2 ใช้วิธีตัดปลายฟันเฟืองให้สั้นลง (Stubbed teeth) ข้อเสียที่ตามมาคือทำให้อัตราส่วนการขบลดลง
- 2.6.3 การเพิ่มมุมกด ϕ จะลดขนาดของวงกลมฐาน วิธีนี้ทำให้ส่วนที่เป็นอินโวลูตเคอฟของฟันเฟืองเพิ่มขึ้น จึงสามารถกำจัดการขัดกันได้ แต่การเพิ่มมุม ϕ จะทำให้แรงปฏิกิริยา ณ ฟันเฟืองในแนวรัศมีของเฟือง (Separating force) เพิ่มขึ้น ทำให้การขบกันระหว่างฟันเฟืองมีความราบเรียบน้อยลง
- 2.6.4 การใช้เฟืองที่ไม่เป็นมาตรฐาน (Non – Interchangeable) กล่าวคือ ให้เฟืองอันเล็กมีแอคเคนดัมเพิ่มขึ้น (โดยลดดีเดนดัม ตามส่วนที่เพิ่มขึ้น) และให้เฟืองอันใหญ่มีแอคเคนดัมลดลง ซึ่งก็ทำให้ราคาเฟืองแพงขึ้น และไม่สามารถใช้ขับเฟืองอื่นๆ ที่เป็นมาตรฐานได้

2.7 วิธีการผลิตเฟือง [14]

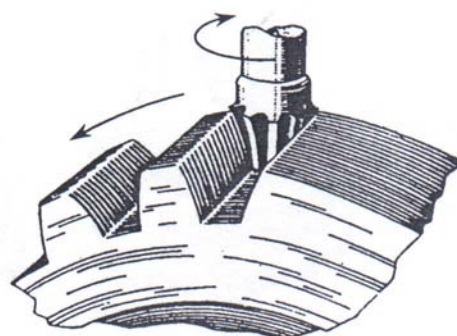
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการผลิตเฟืองบางวิธี และการผลิตเฟืองขั้นสำเร็จ (Finishing Gear) ตลอดจนผลของวิธีการผลิตนั้นๆ

2.7.1 วิธีการผลิต

1. มิลลิ่ง (Milling) วิธีนี้ใช้มีดตัดมิลลิ่ง (Milling cutter) ซึ่งมีรูปร่างตามลักษณะของร่องฟัน ดังรูปที่ 2.5 หลังจากตัดร่องฟันเสร็จหนึ่งร่องแล้ว เฟืองก็จะหมุนไปยังตำแหน่งการตัดถัดไปเรื่อยๆ ด้วยอุปกรณ์แบ่งฟัน (Index mechanism) ดังนั้นมิลลิ่งแต่ละอันจะตัดเฟืองได้เฉพาะจำนวนฟันและพิตช์ที่ต้องการเท่านั้นวิธีนี้จึงต้องใช้มีดตัดเฉพาะสำหรับเฟืองแต่ละอัน ในทางปฏิบัติอาจจะใช้มีดตัดอันเดียวตัดเฟืองที่มีจำนวนฟันแตกต่างกันได้ตามจำนวนช่วงฟันที่กำหนดของมีดตัด (เช่น เบอร์ 5 จะได้ 21-25 ฟัน) มีดตัดจะตัดได้ฟันเฟืองถูกต้องสำหรับจำนวนฟันต่ำสุดของช่วงฟันที่กำหนดไว้ นอกนั้นรูปร่างของฟันจะคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ตัดเฟืองที่มีพิตช์หยาบได้ทั้งการตัดหยาบและการตัดขั้นสำเร็จ ตลอดจนการตัดขั้นสำเร็จของเฟืองที่มีพิตช์ละเอียดปกติความหยาบของผิวฟันเฟืองอยู่ในช่วง 6.35-0.8 ไมโครเมตร (ความหยาบ rms) ตัดเฟืองที่มีความแข็งสูงสุด 43 Rc ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA 6

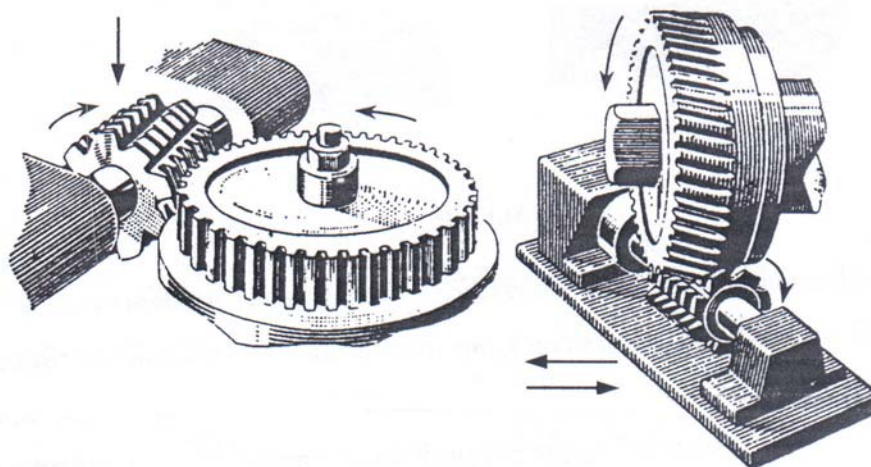


(ก) slotting cutter



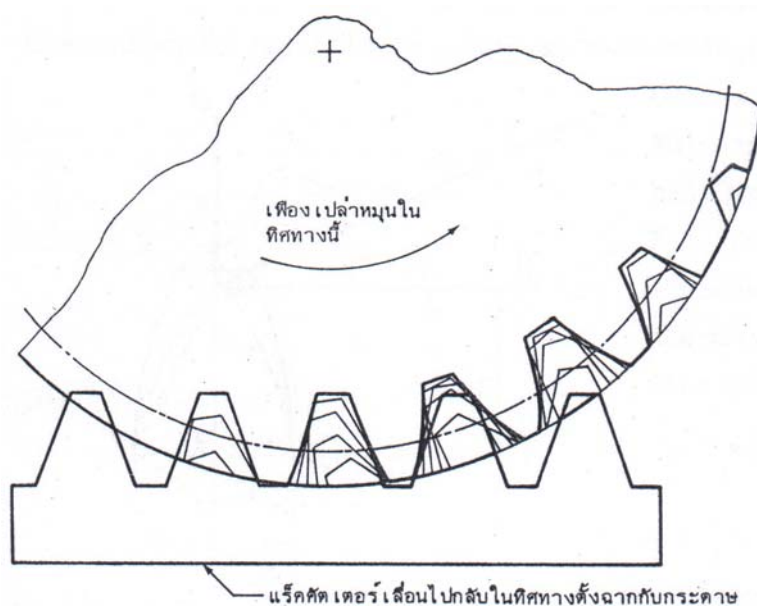
(ข) end mill

รูปที่ 2.5 การตัดด้วยมิลลิ่ง[14]



รูปที่ 2.6 การตัดเฟืองด้วยอีพ[14]

2. แร็คคัตเตอร์ (Rack Cutter) ในวิธีนี้ ตัวตัดฟันเฟืองเป็นแร็คหรือเฟืองซึ่งไม่มีความโค้งนั่นเอง (อาจเรียกว่า เฟืองสะพานหรือเฟืองบรรทัด) ดังแสดงในรูป 2.7 ในการทำงานคัตเตอร์จะเลื่อนไปกลับ (Reciprocation) เพื่อค่อยๆ ตัดเนื้อโลหะออกจากเฟืองเปล่า (Gear Blank) ซึ่งก็คือเฟืองที่ไม่มีฟัน จนกระทั่งวงกลมพิตช์ของเฟืองและคัตเตอร์สัมผัสกัน (วงกลมพิตช์ของแร็คเป็นเส้นตรง) จากนั้นเฟืองเปล่าก็เลื่อนไปสู่ตำแหน่งถัดไปของฟัน และวิธีการตัดก็กระทำซ้ำเช่นเดิม วิธีการนี้จะได้ฟันเฟืองที่เข้าใกล้รูปร่างที่ต้องการมาก ข้อเสียก็คือ ต้องใช้เวลาในการตัดเฟืองมาก เฟืองอันใหญ่มักจะนิยมใช้ตัดด้วยแร็คคัตเตอร์ ทั้งนี้เพราะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการตัดด้วยวิธีอื่นๆ



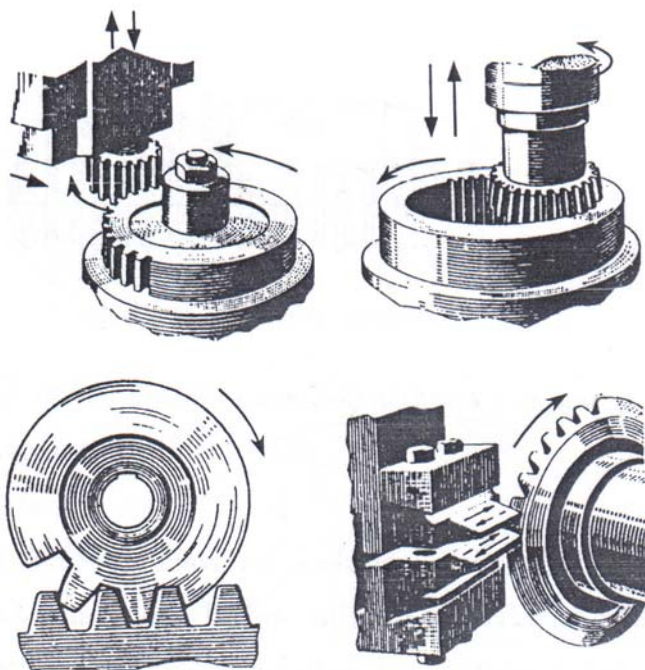
รูปที่ 2.7 การตัดเฟืองด้วยแร็คคัตเตอร์[12]

3. ฮีบบิง (Hobbing) วิธีนี้ใช้มีดตัดรูปทรงกระบอกคล้ายเฟืองहनอนดังแสดงในรูปที่ 2.8 มีดตัดหรือฮีบบิงและเฟืองเปล่า (Gear Blank) จะหมุนไปพร้อมกันและต่อเนื่องด้วยอัตราความเร็วเชิงมุมที่เหมาะสม เพื่อให้ตรงกับร่องฟันที่ต้องการตัดพอดี ใช้มีดตัดอันเดียวสำหรับแต่ละขนาดของพิตซ์และมุมกดคัน วิธีนี้ใช้ตัดเฟืองนอก ทำงานได้เร็ว ปกติความหยาบของผิวฟันเฟืองอยู่ในช่วง 3.175 – 0.41 ไมโครเมตร ตัดเฟืองที่มีความแข็งสูงสุด 43 Rc ถึง 48 Rc ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA 12

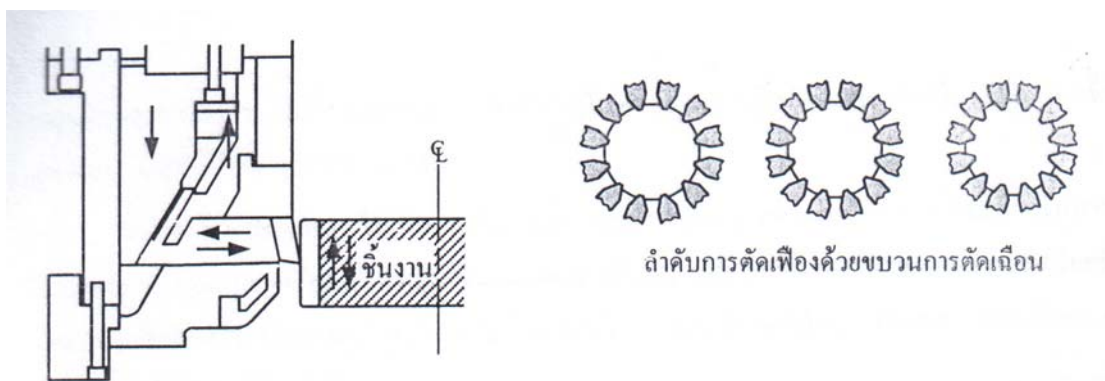
4. การไส (Shaping) วิธีนี้ใช้มีดตัดที่เป็นพีเนียนหรือ (rack) ดังแสดงในรูป 2.8 มีดตัดพีเนียนและเฟืองเปล่าหมุนไปเช่นเดียวกับเฟืองขบกัน มีดตัดพีเนียนเคลื่อนขึ้นลงตามแกนแนวตั้ง ตัดไสร่องฟันตามความลึกที่ปรับแต่ละครั้งเมื่อเฟืองหมุนครบหนึ่งรอบ วิธีนี้ใช้ตัดได้ทั้งเฟืองนอกและเฟืองใน ปกติความหยาบของผิวฟันอยู่ในช่วง 3.175-0.51 ไมโครเมตร ตัดเฟืองที่มีความแข็งสูงสุด 43 Rc ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA 12

5. การตัดเฉือน (Shear Cutting) วิธีนี้ใช้ตัดได้ทุกฟันพร้อมกันทีเดียว จำนวนของมีดตัดเท่ากับจำนวนฟันของเฟืองที่ต้องการตัดและยึดในแนวรัศมีด้วยที่ยึดมีดตัด ดังรูปที่ 2.9 วิธีตัดเคลื่อนเฟืองเปล่าผ่านมีดตัดตามความลึกของการตัดที่ปรับแต่ละครั้ง วิธีนี้เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก ตัดได้ทั้งเฟืองนอกและเฟืองใน ปกติความหยาบของผิวฟันอยู่ในช่วง 1.27 ไมโครเมตร

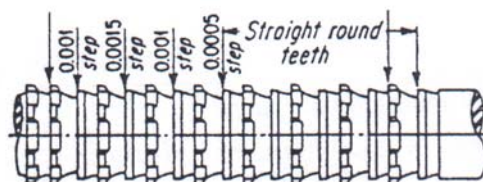
6. โบรซิง (Broaching) วิธีนี้ใช้ตัดได้ทุกฟันพร้อมกันทีเดียว โดยการกดมีดตัด รูปที่ 2.10 เคลื่อนผ่านเฟืองเปล่า เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก ตามปกติผลิตเฟืองใน ตัดเฟืองที่มีความแข็งสูงสุด 12 Rc ถึง 22 Rc ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA10



รูปที่ 2.8 การไส[14]



รูปที่ 2.9 การตัดเฉือน[14]



รูปที่ 2.10 Dwell tooth broach[14]

7. แม่พิมพ์ (Dies) ได้แก่ การหล่อ การอัดรีด (Extrusion) การตอกเจาะ (Punching) เหมาะสำหรับเฟืองที่รับโหลดเบาและหรือถ่ายทอดการเคลื่อนที่

2.7.2 การผลิตเฟืองขั้นสำเร็จ

1. เจียรระโน (Grinding) วิธีนี้ใช้สำหรับการตัดฟันพิตช์ละเอียด ตัดขั้นสำเร็จได้ทุกขนาดของฟันที่ชุบแข็ง (หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งทำให้เกิดการแปรรูป) บางครั้งใช้ตัดเฟืองพิตช์ละเอียดจากเฟืองเปล่าถ้าความแข็งมากกว่า 40Rc ปกติความหยาบผิวฟันอยู่ในช่วง 0.8-0.1 ไมโครเมตร ตัดเฟืองที่มีความแข็งสูงสุด 70Rc ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA15

2. ฮอนนิง (Honing) ให้เฟืองที่ชุบแข็งขับเฟืองพลาสติกที่เคลือบผงขัดด้วยความเร็วสูง ขจัดรอยแหวน ขอบหยาบ และความผิดพลาดเล็กน้อยตลอดจนปรับความเรียบของผิว ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA15

3. การขูดลอก (Shaving) วิธีนี้ให้เฟืองขับกับเฟืองหรือแร็คที่มีมิตต์ตัดพิเศษบนหน้าฟันในแนวความกว้าง มิตต์ด้านบนหน้าฟันจะทำหน้าที่ขูดลอกหน้าฟันของเฟืองอีกตัวออกเป็นสะเก็ด (Chip) เส้นบางๆ คล้ายเส้นผมละเอียด ทำการขูดลอกก่อนการชุบแข็งเพื่อขจัดชั้นของความเค้นตกค้างทำให้ลดการแปรรูประหว่างกรรมวิธีทางความร้อน ปกติความหยาบของผิวฟันอยู่ในช่วง 0.6-0.2 ไมโครเมตร ตัดเฟืองที่มีความแข็งสูงสุด 40Rc ผลิตได้ถึงขั้นคุณภาพ AGMA14

4. แลปปีง (Lapping) ให้เฟืองจับกับ Gear Shaped Lapping Tool ในตัวกลางที่มีผงขัดหรือบางครั้งเฟืองสองตัวจับกันและเคลื่อนสัมพันธ์กันในแนวแกน (ฟันตรงและฟันฮิลิก) ขัดการแปรรูปเล็กน้อยที่เกิดจากกรรมวิธีทางความร้อนและปรับปรุงความเรียบของผิว การทำแลปปีงมากเกินไป สามารถทำความเสียหายต่อโคงอินโวลูตได้ ปกติความหยาบของผิวฟันอยู่ในช่วง 0.2-0.1 ไมโครเมตร ผลิตได้ถึงชั้นคุณภาพ AGMA15

2.8 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (Tolerances)

ในการออกแบบให้สมรรถนะสูง ต้องการความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดโดยการทำงานของเฟือง ส่วนการออกแบบเฟืองทั่วไป ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ตามปกติขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตในโรงงานเอง ตารางที่ 2.1 แสดงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ตารางที่ 2.1 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

		ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของ			ความคลาดเคลื่อน
ชั้น	ชั้นคุณภาพ	ระยะจุดศูนย์กลาง, C มิลลิเมตร			ในการกระทำ
	AGMA	25-150	150-300	300-600	e (มิลลิเมตร)
1. พาณิชย	3-7	0.076	0.127	0.254	$e > 0.0508$
2. ความประณีตสูง	6-9	0.051	0.076	0.152	0.0254-0.0610
3. ความเที่ยงตรง	8-12	0.025	0.051	0.051	0.0127-0.0305
4. ความเที่ยงตรงสูงมาก	12-15	0.051	0.051	0.076	$e < 0.0127$

ชั้น 1 พาณิชย (Commercial) เป็นเฟืองที่ได้จากการตัดด้วยมิลลิ่ง ฮีบหรือการไส ความหยาบของผิวฟันระหว่าง 1.62-6.35 ไมโครเมตร ใช้สำหรับเครื่องจักรกลทั่วไป ความเร็วใช้งานต่ำ

$$V < 10 \text{ เมตร/วินาที}$$

ชั้น 2 เฟืองตัดด้วยความประณีตสูง (Gear Cut With Great Care) ตัดด้วยฮีบหรือตัดไส (อาจจะมีการชุดลอกและ/หรือแลปปีง) ความหยาบของผิวฟันระหว่าง 0.61-2.03 ไมโครเมตร ใช้สำหรับชิ้นส่วนเครื่องมือที่ต้องใช้ความระมัดระวังในการตรวจปรับตำ เครื่องใช้ภายในบ้าน ความเร็วใช้งานปานกลาง

$$V < 20 \text{ เมตร/วินาที}$$

ชั้น 3 ความเที่ยงตรง (Precision) ตัดด้วยฮีบหรือตัดไสแล้วชุดลอกและ/หรือเจียรใน แลปปีง ฯลฯ ความหยาบของผิวฟันระหว่าง 0.20-0.80 ไมโครเมตร ราคาแพง ใช้สำหรับชิ้นส่วน

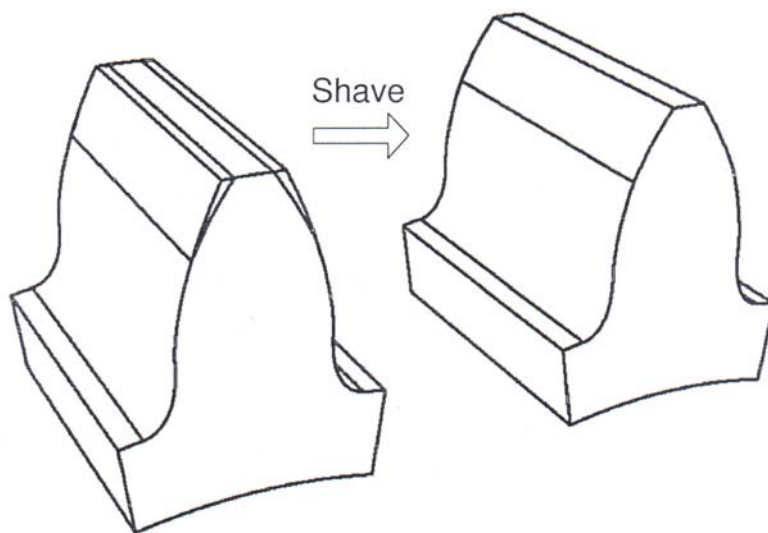
เครื่องมือกลที่ต้องใช้ความระมัดระวังในการตรวจปรับ กังหันไอน้ำและเครื่องยนต์อากาศยาน
ความเร็วในงานสูง

$$V < 100 \text{ เมตร/วินาที}$$

ขั้น 4 ความเที่ยงตรงสูง (Ultra precision) ตัดด้วยฮีบหรือตัดไสด้วยความประณีตสูงแล้ว
ขูดลอกและเจียรระไนด้วยความประณีต ความหยาบของผิวพื้นระหว่าง 0.10-0.40 ไมโครเมตร ราคา
แพงมาก ใช้สำหรับ Master Index Gear, Guidance System ความเร็วใช้งานสูงมาก

2.9 การปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเลื่อนหน้าฟัน [10]

กระบวนการปรับแต่งฟันเฟืองที่นิยมแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมได้อธิบายและมีตัว
แปรที่มีผลกระทบอย่างมากโดยเฉพาะต่อแรงพลัด



รูปที่ 2.11 การปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเลื่อนหน้าฟัน[10]

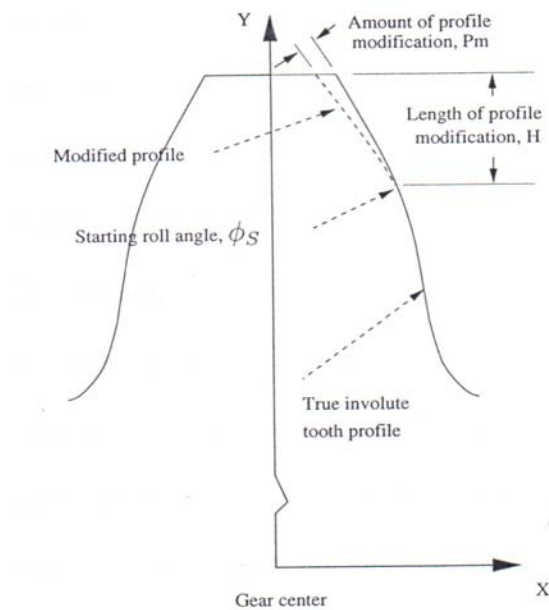
ในการปรับแต่งจะแบ่งได้เป็น 2 กรณี โดยทั่วไปที่พบในวงการอุตสาหกรรม กรณีแรก คือ
การปรับแต่งโดยวิธีเลื่อนหน้าฟันซึ่งจะทำการนำเนื้อวัสดุออกด้านข้างของฟันเฟืองทั้งสองข้างตาม
แนวหน้าฟันเฟือง จนถึงด้านบนของฟันหรือด้านปลายฟัน และความยาวการปรับแต่ง (หรือมุม
หมุนเริ่มต้น) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งผลรวมของการปรับแต่งและความยาวการปรับแต่ง(หรือมุม
หมุนเริ่มต้น) ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรสองตัวสำหรับการปรับแต่งโดยวิธีเลื่อนหน้าฟัน ดังแสดงใน
รูปที่ 2.12 ผลรวมของปลายฟันจะเป็นเชิงเส้น หรือพาราโบลา สำหรับการปรับแต่งโดยวิธีเลื่อน
หน้าฟัน ซึ่งมีผลอย่างมากในการทำงานของเฟืองที่ทำการปรับแต่ง ในการศึกษา การปรับแต่งฟัน
โดยเป็นรูปแบบพลาโบลิกที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ มีผลต่อการทำงานของภาระที่เกิดขึ้นใน
ขอบเขตที่กว้างและ ไรต่อความสูญเสีย ในการเปลี่ยนภาระที่กระทำ ผลรวมของการปรับแต่งปลาย

ฟันและความยาวในการปรับแต่ง กว้างเพียงกับการปรับแต่งเชิงเส้นถึงจุดปลาย จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างการปรับแต่งฟันเพียงจากมุมหมุนเริ่มต้นจนถึงจุดปลาย ผลรวมของการปรับแต่งจนถึงจุดปลาย P_{m_i} ที่ตำแหน่ง i ใดๆ โดยกำหนดได้จากสมการ

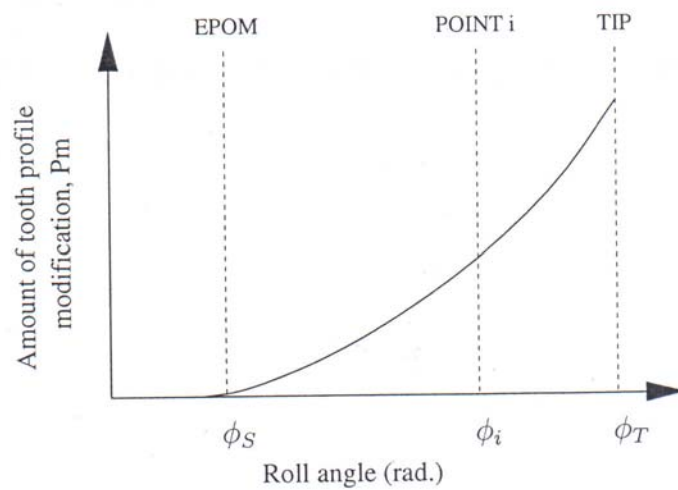
$$P_{m_i}(\phi) = P_m \left(\frac{\phi - \phi_S}{\phi_T - \phi_S} \right)^2 \quad (2.15)$$

เมื่อ P_m คือผลรวมของการปรับแต่งฟันเพียงที่จุดปลาย, ϕ_T และ ϕ_S คือมุมหมุนที่จุดปลายและจุดเริ่มต้นของการปรับแต่งฟันเพียงตามลำดับ

จากสมการที่ 2.15 นำมาซึ่งผลสรุปทำให้การส่งถ่ายที่ราบเรียบจากไม่ปรับแต่งอินโวลูต ถึงปรับแต่งอินโวลูต เครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ จุดความชันที่ ϕ_S^+ และ ϕ_S^- มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.12 การกำหนดค่าการปรับแต่งฟันเพียง[10]



รูปที่ 2.13 เส้นกราฟการปรับแต่งฟันที่มุมหมุนใดๆ[10]