

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *CNC (Computer Numerical Control)*

Computer numerical control (CNC) adalah mesin produksi yang dikendalikan dan dialokasikan oleh pengendali terkomputerisasi. Kontroler menggunakan motor untuk menggerakkan setiap sumbu alat mesin dan benar-benar mengatur arah, kecepatan, dan lamanya motor berputar. Jalur pemesinan terlebih dahulu diprogram oleh operator ke dalam komputer mesin, kemudian program tersebut dijalankan untuk mengendalikan proses pengerjaan. Program ini berisi data koordinat numerik yang dipadukan dengan perintah kontrol serta kode fungsi mesin yang mengatur setiap gerakan dan operasi pemotongan. Istilah *Numerical Control (NC)* merupakan sebutan awal untuk teknologi ini dan hingga saat ini masih sering digunakan sebagai istilah yang memiliki makna serupa dengan *Computer Numerical Control (CNC)* (Paliling, 2020).



Gambar 2.1 *CNC*
(Abu, 2020)

2.2 Pengertian *Endmill*

Endmill merupakan salah satu alat pemotong (*cutting tool*) paling fundamental dalam ekosistem permesinan *CNC* milling yang fleksibilitasnya sangat diandalkan untuk berbagai kebutuhan manufaktur. Dari segi komposisi material, alat ini umumnya diproduksi menggunakan *high speed steel* (HSS) yang ulet atau karbida yang memiliki tingkat kekerasan ekstrem, serta dikonfigurasi dengan satu atau lebih mata sayat (*flute*) yang berfungsi sebagai jalur evakuasi beram saat proses penyayatan berlangsung (Putra dkk., 2022).

2.3 Jenis-Jenis *Endmill*

Endmil terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

2.3.1 *Endmill* Persegi (*Square Endmill*)

Endmill persegi (*square end mill*) atau *flat-endmill* merupakan salah satu jenis pahat potong yang paling umum digunakan dalam proses permesinan frais. Pahat ini dirancang dengan ujung rata sehingga mampu menghasilkan sudut dalam benda kerja yang presisi hingga 90°. Bentuk geometri tersebut memungkinkan end mill digunakan untuk berbagai operasi pemotongan, seperti pembuatan alur (*slotting*), pembentukan profil (*profiling*), maupun pemotongan tegak lurus (*plunge cutting*) dengan tingkat kestabilan yang baik. Selain digunakan pada proses pemakanan kasar, pahat jenis ini juga berperan penting dalam proses finishing karena mampu meratakan permukaan

horizontal dan vertikal secara bersamaan, sehingga menghasilkan bidang kerja yang siku, rapi, dan memiliki ketelitian tinggi (Nurrohkayati, 2022).



Gambar 2.2 *Endmill Persegi (Square Endmill)*
(PT Indotech Trimitra Abadi, 2022)

2.3.2 *Endmill Ball Nose*

Ball nose endmill atau *ball nose cutter* adalah jenis pahat potong yang memiliki ujung berbentuk setengah bola dan digunakan untuk proses pemesinan dengan bentuk permukaan yang rumit serta melengkung. Pahat ini banyak digunakan pada industri pembuatan cetakan (*die and mold*) karena mampu menghasilkan kontur tiga dimensi dengan perpindahan permukaan yang lebih halus. Selain itu, *ball nose endmill* juga cocok digunakan untuk proses pembuatan alur (*slotting*) maupun lubang dangkal yang memiliki dasar berbentuk radius (Kirana & Yuhas, 2022).



Gambar 2.3 *Endmill Ball Nose*
(PT Indotech Trimitra Abadi, 2022)

2.3.3 Endmill Radius (*Bull Nose*)

Endmill radius atau yang sering disebut *bull nose endmill* merupakan pengembangan dari *square endmill* dengan penambahan radius kecil pada bagian sudut mata potongnya. Penambahan radius tersebut bertujuan untuk mengurangi konsentrasi tegangan yang biasanya terjadi pada sudut tajam 90 derajat. Dengan bentuk geometri seperti ini, risiko terjadinya *chipping* maupun kerusakan awal pada sisi potong dapat ditekan sehingga umur pahat menjadi lebih baik dan proses pemotongan lebih stabil (Chukwujekwu Okafor & Jasra, 2018).



Gambar 2.4 *Endmill Radius (Bull Nose)*
(PT Indotech Trimitra Abadi, 2022)

2.3.4 Endmill Chamfer

Endmill chamfer merupakan salah satu jenis pahat potong yang memiliki ujung berbentuk huruf V dengan sudut tertentu, umumnya 60° atau 90°. Bentuk ujung yang meruncing tersebut memungkinkan pahat digunakan untuk berbagai proses pemesinan, terutama dalam pembuatan *chamfer* maupun *bevel* pada bagian tepi benda kerja sehingga hasil permukaan menjadi lebih rapi dan presisi (Tatar & Svenningsson, 2022).



Gambar 2.5 *Endmill Chamfer*
(D. Anggraini, 2025)

2.3.5 *Roughing Endmill*

Roughing endmill merupakan salah satu jenis pahat frais yang umumnya digunakan pada tahap awal proses pemesinan atau roughing untuk mengikis material dalam jumlah besar secara cepat dan efisien. Pahat ini memiliki karakteristik berupa sisi potong bergerigi atau bergelombang pada bagian *cutting edge*. Bentuk tersebut berfungsi untuk memecah chip menjadi ukuran yang lebih kecil sehingga beban pemotongan dapat berkurang, temperatur pemotongan lebih rendah, serta getaran selama proses machining dapat diminimalkan (Denkena dkk., 2020).



Gambar 2.6 *Roughing Endmill*
(PT Indotech Trimitra Abadi, 2022)

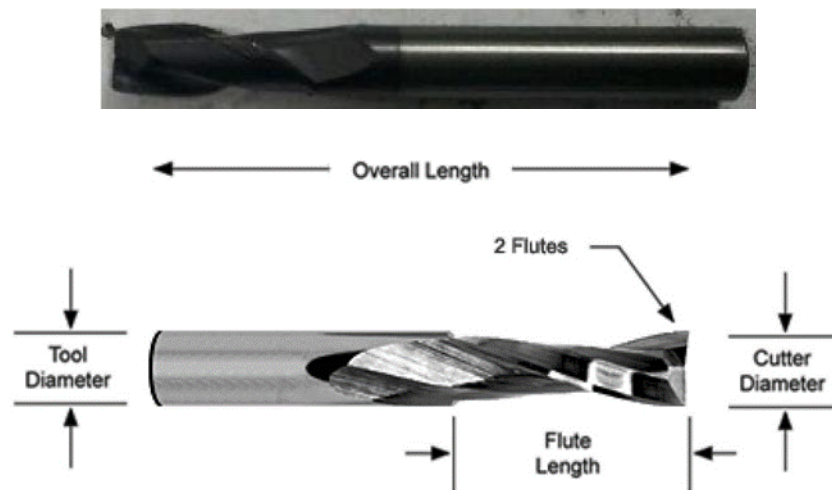
2.4 Jenis-jenis *Flute Endmill*

Flute pada *endmill* terdapat beberapa jenis, yaitu:

2.4.1 *Endmill 2 Flute*

Endmill 2 flute memiliki karakter utama yang terletak pada kapasitas ruang geramnya yang luas sehingga memiliki jalur pembuangan geram yang efisien, terutama pada material dengan karakteristik geram panjang seperti aluminium (Bintarto dkk., 2018). Secara fungsional, alat ini memungkinkan penggunaan parameter permesinan yang lebih tinggi, namun memiliki keterbatasan dalam menghasilkan kualitas *finishing*

jika dibandingkan dengan *endmill 4 flute* yang lebih unggul dalam kekasaran permukaan. Oleh karena itu, dalam praktik industry, *endmill 2 flute* lebih diutamakan untuk pemesinan aluminium guna menjaga keseimbangan antara produktivitas dan stabilitas proses. (Rohman dkk., 2023).



Gambar 2.7 *Endmill 2 Flute*
(Butar dkk., 2023)

2.4.2 *Endmill 3 Flute*

Endmill 3 flute sering dianggap sebagai pilihan yang paling seimbang dalam proses pemesinan, khususnya untuk material non-ferrous seperti aluminium dan tembaga. Pahat jenis ini memiliki kombinasi antara kemampuan pembuangan geram (*chip evacuation*) yang cukup baik seperti *endmill 2 flute*, serta kekuatan dan kestabilan yang lebih tinggi karena jumlah mata potongnya lebih banyak. Selain itu, konfigurasi tiga mata potong mampu mengurangi terjadinya getaran atau vibrasi saat proses pemotongan berlangsung, terutama pada putaran spindle yang tinggi. Kondisi tersebut

membuat *endmill 3 flute* dapat digunakan untuk proses *roughing* dengan laju pemakanan yang relatif besar, namun tetap mampu menghasilkan kualitas permukaan yang halus pada proses finishing (Bastomi & Imanda, 2022).



3 flute

Gambar 2.8 *Endmill 3 Flute*
(D. Anggraini, 2025)

2.4.3 *Endmill 4 Flute*

Endmill 4 flute merupakan jenis alat potong yang memiliki empat sisi pemotong sehingga mampu bekerja dengan laju pemakanan (*feed rate*) yang lebih tinggi karena proses pemotongan terjadi lebih sering dalam satu kali putaran. Jumlah *flute* yang lebih banyak membuat beban pemotongan menjadi lebih merata, namun ruang antar *flute* menjadi lebih sempit sehingga pembuangan geram kurang optimal, terutama pada material yang menghasilkan chip dalam jumlah besar. Walaupun demikian, *endmill 4 flute* memiliki keunggulan dalam menghasilkan permukaan benda kerja yang lebih halus dan tingkat presisi yang lebih baik dibandingkan *endmill 2 flute* maupun *3 flute*. Oleh karena itu, jenis *endmill* ini lebih banyak digunakan pada proses *finishing* atau

pengerjaan akhir yang membutuhkan kualitas permukaan tinggi dan toleransi dimensi yang lebih presisi (Rohman dkk., 2023).



4 flute

Gambar 2.9 *Endmill 4 Flute*
(D. Anggraini, 2025)

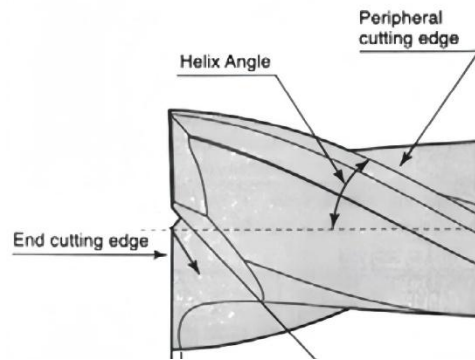
2.5 Geometri *Endmill 2 Flute*

Geometri *endmill 2 flute* merupakan bentuk dan sudut mata potong yang memiliki dua alur (*flute*). Desain ini menyediakan ruang geram yang lebih besar sehingga pembuangan geram lebih lancar dan risiko penumpukan geram berkurang. Karena itu, *endmill 2 flute* banyak digunakan pada permesinan material lunak seperti aluminium (Bintarto dkk., 2018).

2.5.1 *End Cutting Edge* (Mata Potong Ujung)

End Cutting Edge adalah bagian mata potong yang terletak pada ujung *endmill* dan berfungsi melakukan pemotongan pada arah aksial. Bagian ini berperan penting saat proses plunging atau saat pahat mulai memasuki benda kerja. Ketajaman *end*

cutting edge sangat memengaruhi kemampuan potong dan kualitas hasil pemesinan (Nurrohkayati, 2022).



Gambar 2.10 *End Cutting Edge*
(Kechagias, 2024)

2.5.2 *Peripheral Cutting Edge* (Mata Potong Keliling)

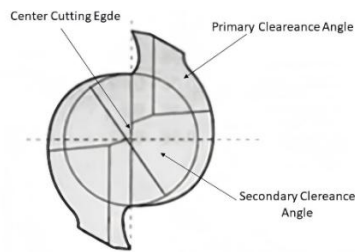
Peripheral Cutting Edge merupakan mata potong yang berada di sepanjang sisi heliks *endmill*. Bagian ini berfungsi melakukan pemotongan utama saat proses milling berlangsung. Kondisi dan ketajaman sisi potong ini sangat menentukan kualitas permukaan benda kerja serta efisiensi proses pemesinan (Anwar dkk., 2018).

2.5.3 *Helix Angle* (Sudut *Helix*)

Helix Angle adalah sudut kemiringan *flute* terhadap sumbu *endmill*. Sudut *heliks* berfungsi membantu proses pembuangan geram, mengurangi getaran, serta menghasilkan pemotongan yang lebih halus. *Endmill* untuk aluminium umumnya menggunakan sudut *heliks* yang lebih besar untuk meningkatkan kemampuan evakuasi geram (Abriandika dkk., 2025).

2.5.4 *Primary Clearance Angle* (Sudut Bebas Primer)

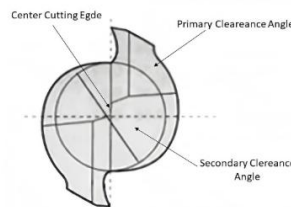
Primary Clearance Angle adalah sudut bebas pertama yang terletak tepat di belakang mata potong dengan sudut 25° - 50° . Sudut ini berfungsi mengurangi gesekan antara pahat dan benda kerja sehingga proses pemotongan dapat berlangsung lebih ringan. Sudut bebas primer juga membantu mempertahankan ketajaman *cutting edge* (Sriyanto dkk., 2022).



Gambar 2.11 *Primary Clearance Angle*
(Kechagias, 2024)

2.5.5 *Secondary Clearance Angle* (Sudut Bebas Sekunder)

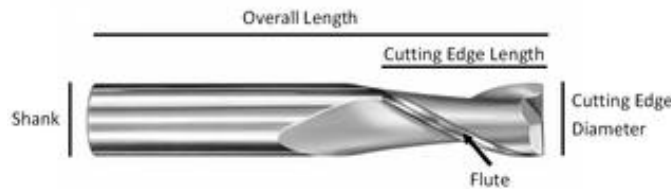
Secondary Clearance Angle merupakan sudut bebas kedua yang berada di belakang sudut bebas primer dengan sudut 30° - 50° . Fungsinya adalah memberikan ruang bebas tambahan sekaligus mempertahankan kekuatan mata potong. Kombinasi sudut bebas primer dan sekunder yang tepat dapat meningkatkan umur pakai *endmill* (Nurrohkayati, 2022).



Gambar 2.12 *Secondary Clearance Angle*
(Kechagias, 2024)

2.5.6 Flute (Alur Geram)

Flute merupakan alur spiral pada badan *endmill* yang berfungsi sebagai jalur pembuangan geram selama proses pemotongan. Pada *endmill 2 flute*, jumlah alur yang lebih sedikit menghasilkan ruang geram yang lebih besar sehingga proses evakuasi geram menjadi lebih lancar. Karakteristik ini membuat *endmill 2 flute* sangat cocok digunakan untuk pemesinan material aluminium yang menghasilkan geram panjang (Putra dkk., 2022).

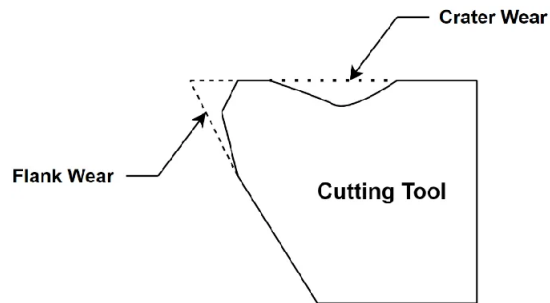


Gambar 2.13 *Flute* (Bits, 2017)

2.6 Keausan Alat Potong (*Tool Wear*)

Keausan alat potong merupakan degradasi fungsional pahat yang dipicu oleh gesekan selama proses permesinan. Fenomena ini muncul akibat friksi berkelanjutan antara alat potong dan benda kerja yang mengakibatkan pengikisan material secara bertahap (Septiadi & Sunarto, 2020). Bentuk keausan ini umumnya terbagi menjadi tiga kategori utama, *flank wear* (sisi depan), *crater wear* (permukaan atas), dan *chipping* (pecahnya mata potong). Durabilitas alat sangat dipengaruhi oleh parameter permesinan seperti kecepatan potong, *feed rate*, kedalaman potong, serta efektivitas pendinginan. Kegagalan dalam memitigasi keausan dapat memicu lonjakan gaya

potong dan penurunan akurasi dimensi, sehingga prosedur re-sharpening menjadi krusial untuk menjaga efisiensi produksi (ATIK, 2023).



Gambar 2.14 Keausan Alat Potong
(Sayyad dkk., 2021)

2.7 Pengasahan Kembali Alat Potong

Pengasahan alat potong merupakan tahap penting dalam menjaga dan mengembalikan kinerja pahat yang mengalami keausan akibat proses permesinan. Pengasahan bertujuan untuk mengembalikan geometri mata potong, seperti sudut *rake* dan sudut *clearance*, sehingga ketajaman alat tetap optimal (Panji, 2024). Pada pahat jenis *endmill*, proses ini umumnya dilakukan menggunakan mesin gerinda universal yang mampu mengatur posisi serta sudut pengasahan secara presisi. Tahapan yang dilakukan meliputi pemeriksaan kondisi awal pahat, penyetelan posisi sudut pengasahan bagian ujung (*end cutting edge*) dan sudut lainnya (Martina dkk., 2025). Proses ini harus dilakukan dengan hati hati agar tidak terjadi perubahan geometri yang berlebihan yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan saat pemotongan. Pengasahan yang tepat dapat meningkatkan kualitas hasil permesinan, menurunkan gaya potong, serta memperpanjang umur pakai alat, sedangkan kesalahan dalam pengasahan dapat

menyebabkan getaran, menurunkan kualitas permukaan benda kerja, dan mempercepat kerusakan alat (Yahya, 2022).



Gambar 2.15 Proses Pengasahan Endmill
(A. Anggraini dkk., 2024)

2.8 Mesin Asah Universal

Mesin asah universal merupakan salah satu jenis mesin perkakas yang digunakan untuk mengasah dan memperbaiki berbagai macam alat potong, seperti *endmill* dan mata bor. Mesin ini memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi karena dilengkapi dengan berbagai mekanisme pengaturan, seperti pengaturan sudut potong, posisi benda kerja, serta gerakan meja kerja yang dapat disesuaikan. Dengan kemampuan tersebut, mesin asah universal mampu menghasilkan geometri pahat yang presisi sesuai dengan standar pemotongan yang dibutuhkan (Dewadi dkk., 2023).

Dalam proses pengasahan *endmill*, mesin ini berperan penting dalam membentuk kembali sudut-sudut agar ketajaman alat potong kembali optimal, selain itu penggunaan mesin asah universal juga dapat memperpanjang umur pakai alat potong serta meningkatkan efisiensi biaya produksi, karena alat yang telah aus tidak perlu

langsung diganti dengan yang baru, melainkan dapat digunakan kembali setelah proses pengasahan yang tepat (Putra dkk., 2022).



Gambar 2.16 Mesin Asah Universal

2.9 Material Aluminium

Material aluminium merupakan salah satu material yang sering digunakan dalam proses milling karena memiliki sifat ringan, mudah dibentuk, serta memiliki kemampuan mesin (*machinability*) yang baik. Namun demikian, Aluminium juga memiliki karakteristik khusus seperti menghasilkan geram panjang dan cenderung menempel pada alat potong, yang dapat mempengaruhi kualitas permukaan hasil permesinan. Oleh karena itu, diperlukan pemilihan alat potong yang tepat agar diperoleh hasil yang optimal. (Herlambang & Budiarto, 2024).



Gambar 2.17 Material Aluminium
(Sifa dkk., 2023)