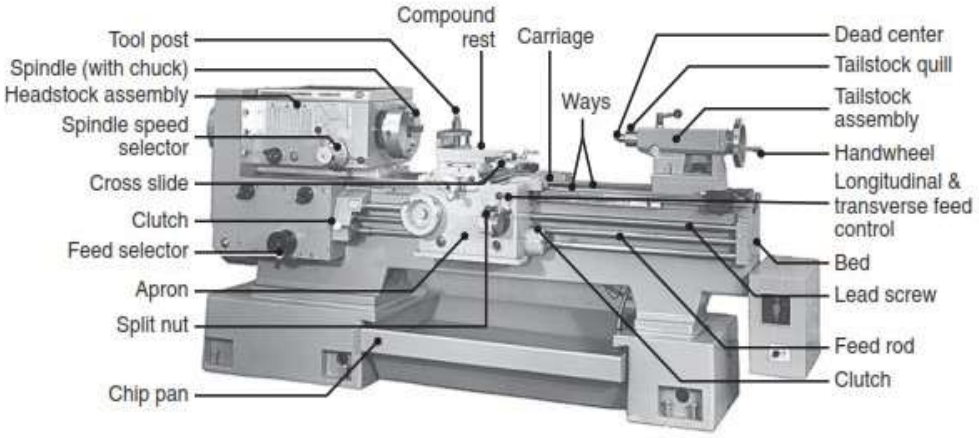
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Proses Pemesinan Bubut (*Turning*)

Proses pembubutan merupakan salah satu metode pemesinan yang digunakan untuk menghasilkan bentuk silinder dengan cara menyayat permukaan benda kerja menggunakan pahat potong. Pada proses ini, benda kerja diputar oleh spindle mesin bubut, sementara pahat digerakkan secara terkontrol untuk menghilangkan material dan menghasilkan dimensi serta kualitas permukaan yang diinginkan. Pembubutan bekerja berdasarkan interaksi antara gerakan putar benda kerja dan gerakan translasi pahat, yang menghasilkan gaya potong, panas, hingga getaran selama proses berlangsung (Burrahman, 2024).



Gambar 2.1 Komponen Mesin Bubut
Sumber : Akhmadi, 2024

2.1.1 Prinsip Kerja Mesin Bubut

Prinsip kerja mesin bubut didasarkan pada perubahan energi putar menjadi energi pemotongan. Benda kerja dijepit pada *chuck* dan diputar sesuai

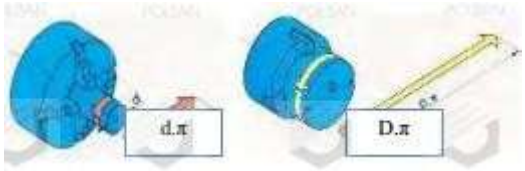
kecepatan yang ditentukan. Pahat yang terpasang pada *tool post* kemudian digerakkan mendekati permukaan benda kerja untuk memotong material. Stabilitas putaran, kekakuan pahat, dan ketepatan gerakan sangat penting untuk menjaga proses pemotongan tetap halus dan terkendali.

2.1.2 Jenis-Jenis Parameter Mesin Bubut

Menurut Elvan (2025) terdapat tiga parameter utama yang menentukan keberhasilan pemotongan, yaitu:

1. Kecepatan putar (rpm)

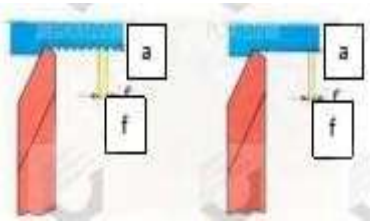
Menentukan laju putaran benda kerja dan sangat memengaruhi suhu pemotongan, keausan pahat, serta potensi munculnya getaran *chatter*.



Gambar 2.2 Kecepatan putar (rpm)
Sumber : Elvan, 2025

2. Gerak makan (*feed rate*)

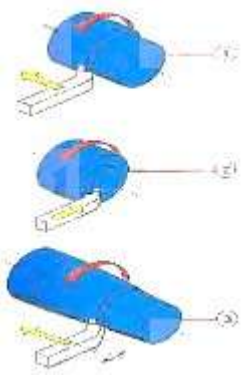
Merupakan perpindahan pahat per putaran benda kerja. Feed besar menghasilkan permukaan yang lebih kasar dan gaya potong yang lebih tinggi.



Gambar 2.2 Gerak makan (*feed rate*)
Sumber : Elvan, 2025

3. Kedalaman potong (*depth of cut*)

Menentukan ketebalan material yang disayat. Depth besar meningkatkan gaya pemotongan dan risiko getaran paksa.



Gambar 2.3 Kedalaman potong (*depth of cut*)
Sumber : Elvan, 2025

Ketiga parameter tersebut memiliki hubungan langsung terhadap kualitas permukaan dan getaran selama proses bubut. Kecepatan putar yang optimal mampu menekan panas dan getaran, sehingga menghasilkan permukaan yang lebih halus. Sebaliknya, kecepatan terlalu tinggi dapat memicu getaran tidak stabil (*chatter*) yang memperburuk kekasaran permukaan. Gerak makan yang besar menyebabkan alur sayatan lebih kasar dan meningkatkan gaya potong, sementara depth of cut yang terlalu besar memicu getaran paksa karena beban pemotongan meningkat. Kombinasi parameter yang tepat sangat penting agar proses pemotongan berlangsung stabil, getaran dapat ditekan, dan hasil akhirnya memiliki tingkat kekasaran yang rendah.

2.2. Pahat Insert Karbida (*Carbide Insert*)

Pahat insert karbida merupakan salah satu jenis pahat potong yang paling banyak digunakan dalam proses pemesinan modern, terutama pada mesin bubut CNC dan mesin bubut konvensional berkecepatan tinggi. Pahat ini terbuat dari material komposit keras berbasis tungsten carbide yang dicampur dengan pengikat cobalt, sehingga menghasilkan struktur pahat yang sangat kuat, keras, tahan panas, dan mampu bekerja pada kondisi pemotongan berat. Keunggulan utama pahat karbida terletak pada ketahanannya terhadap deformasi termal, ketajaman ujung pahat yang stabil, serta kemampuan mempertahankan keteguhan struktural saat menghadapi gaya pemotongan tinggi (Akhmadi, 2024). Oleh karena itu, pahat ini sangat cocok digunakan untuk proses pembubutan material keras seperti baja paduan tinggi, termasuk baja ST 90 yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2.5 Pahat Insert Karbida
Sumber : Akhmadi, 2024

2.2.1 Komponen Pahat Insert Karbida

Menurut Elvan (2025) pahat insert karbida terdiri dari dua komponen utama yang saling melengkapi yaitu:

1. Tungsten Carbide (WC), yang memberikan sifat kekerasan tinggi, ketahanan aus, dan kemampuan menahan beban tekan yang besar. Material ini merupakan fase keras yang bertanggung jawab atas daya tahan pahat terhadap tekanan dan panas pemotongan.
2. Cobalt Binder (Co), yang berfungsi sebagai pengikat antar partikel tungsten carbide. Cobalt memberikan sifat keuletan (*toughness*) sehingga pahat tidak mudah pecah atau retak saat dikenai gaya dinamis selama proses pemotongan.

Komposisi WC–Co yang seimbang sangat penting. Kadar WC yang tinggi meningkatkan kekerasan namun mengurangi ketangguhan pahat, sedangkan kadar Co yang tinggi meningkatkan keuletan tetapi menurunkan kekerasan. Oleh karena itu, produsen insert karbida merancang komposisi optimal agar pahat mampu bekerja pada kecepatan potong tinggi tanpa mengalami kerusakan dini atau keausan berlebih.

2.2.2 Kelebihan Pahat Insert

Menurut Gimastian (2025) kelebihan pahat insert karbida dibandingkan pahat HSS dan pahat konvensional meliputi beberapa aspek penting yaitu:

a. Ketahanan aus yang sangat tinggi, memungkinkan pemotongan berlangsung dalam waktu lama tanpa penurunan kualitas sayatan.

b. Kemampuan bekerja pada kecepatan tinggi, bahkan pada rentang 80–200 m/min, karena materialnya stabil terhadap panas hingga suhu 800–1.000°C.
c. Stabilitas termal dan mekanik yang baik, sehingga pahat tidak mudah mengalami pelengkungan atau keretakan meskipun menerima gaya potong yang fluktuatif.
d. Dapat diganti dengan cepat, karena bentuknya berupa insert yang dapat dilepas, sehingga mempermudah perawatan dan meningkatkan efisiensi pemesinan.

Pahat insert karbida tersedia dalam berbagai bentuk geometri yang disesuaikan dengan kebutuhan pemotongan. Beberapa jenis insert umum antara lain CNMG, TNMG, DNMG, VNMG, SNMG, yang masing-masing memiliki sudut ujung, radius tip, dan ketebalan berbeda. Geometri ini memengaruhi arah aliran chip, gaya pemotongan, dan kemampuan pahat menghasilkan permukaan halus. Misalnya, insert tipe CNMG lebih stabil untuk pemotongan berat, sedangkan tipe VNMG lebih cocok untuk pemotongan profil detail tetapi kurang kuat untuk pemotongan kasar (Husni, 2020).

Pengaruh kekerasan material insert dan geometri pahat terhadap kekasaran permukaan sangat signifikan. Insert dengan kekerasan tinggi dapat mempertahankan ketajaman ujung pahat lebih lama, sehingga menghasilkan permukaan benda kerja yang lebih halus dan seragam. Selain itu, geometri pahat, seperti sudut potong (*rake angle*), sudut bebas (*clearance angle*), dan radius ujung pahat (*nose radius*), sangat menentukan karakteristik hasil

permukaan. Radius ujung pahat yang besar cenderung menghasilkan sayatan lebih halus karena distribusi gaya pemotongan lebih merata pada area kontak. Namun, radius yang terlalu besar dapat meningkatkan gaya pemotongan sehingga memperbesar risiko getaran atau *chatter* apabila kaku mesin tidak memadai (Iman, 2024).

Selain itu, interaksi antara pahat karbida dan material benda kerja juga memengaruhi stabilitas pemotongan. Pada baja ST 90 yang memiliki kekuatan tarik tinggi dan sifat abrasif, keausan pahat dapat terjadi lebih cepat jika kondisi pemotongan tidak optimal. Kondisi seperti ini, pahat insert karbida mampu memberikan performa lebih baik dibandingkan pahat lain karena ketahanannya terhadap gaya gesek, panas, dan tekanan yang tinggi. Pada penelitian ini, penggunaan insert karbida menjadi penting mengingat variasi kecepatan putaran yang tinggi akan menghasilkan panas pemotongan besar, sehingga pahat harus memiliki ketahanan yang sesuai untuk menjaga kualitas permukaan dan mengurangi getaran (Husni, 2020).

Dengan demikian, pahat insert karbida berperan sangat penting dalam menentukan hasil pemesinan, terutama dalam menghasilkan kekasaran permukaan yang rendah dan meminimalkan getaran. Pemilihan jenis insert, komposisi material pahat, serta geometri pahat yang sesuai sangat menentukan keberhasilan proses pembubutan, terutama saat digunakan pada material keras dan kecepatan putaran tinggi seperti dalam penelitian ini.

2.2.3 Spesifikasi Pahat Bubut

Pahat bubut adalah alat potong tunggal yang digunakan pada mesin bubut untuk menghilangkan material dari benda kerja dengan cara menyayat. Pahat ini bekerja berdasarkan prinsip gerak relatif antara benda kerja yang berputar dan pahat yang diam atau bergerak translasi. Kualitas hasil pembubutan sangat bergantung pada spesifikasi pahat yang digunakan, karena setiap jenis pahat memiliki kemampuan potong dan ketahanan aus yang berbeda.

Pemilihan bahan pahat sangat berpengaruh terhadap umur pahat, ketajaman, serta kecepatan potong yang dapat digunakan. Jenis-jenis bahan pahat antara lain:

1. High Speed Steel (HSS): Tahan panas hingga ±600°C, cocok untuk kecepatan potong rendah hingga sedang.
2. Carbide (Semen Karbida): Lebih keras dan tahan panas hingga ±1000°C, digunakan untuk kecepatan potong tinggi.
3. Ceramic dan Cermet: Digunakan untuk pembubutan finishing dengan kecepatan sangat tinggi.
4. CBN (Cubic Boron Nitride) dan Diamond (Intan): Digunakan untuk material sangat keras dan menghasilkan permukaan yang sangat halus.

Geometri pahat sangat menentukan performa pemotongan, gaya potong, serta kualitas permukaan benda kerja. Beberapa sudut penting pada geometri pahat antara lain:

a. Sudut potong utama (α / rake angle): Menentukan arah aliran geram; semakin besar sudutnya, semakin mudah geram keluar.
b. Sudut bebas (γ / clearance angle): Menghindari gesekan antara sisi pahat dan benda kerja.
c. Sudut ujung (corner angle): Mempengaruhi kekuatan ujung pahat dan hasil akhir pembubutan.
d. Sudut potong utama dan sekunder (κ_1 dan κ_2): Menentukan bentuk geram dan kestabilan proses pemotongan.

Pahat bubut memiliki berbagai bentuk dan ukuran sesuai dengan fungsinya yaitu pahat kanan dan pahat kiri adalah menentukan arah penyayatan. dan pahat rata, pahat ulir, pahat alur, dan pahat potong adalah disesuaikan dengan jenis pekerjaan. Ukuran pahat dinyatakan dalam dimensi batang, misalnya 20 × 20 mm atau 25 × 25 mm, tergantung ukuran dudukan dan jenis mesin bubut yang digunakan.

Sistem penjepitan mata pahat terdiri atas dua jenis utama, yaitu brazed tool dan insert tool. Pada brazed tool, mata pahat disambung secara permanen ke badan pahat menggunakan las, sedangkan insert tool memiliki mata pahat (insert) yang dapat dilepas dan diganti dengan yang baru. Jenis insert tool ini lebih efisien dan ekonomis dalam perawatan karena memungkinkan penggunaan beberapa sisi potong, serta umum digunakan pada mesin bubut CNC modern.

Berdasarkan standar ISO 1832, spesifikasi insert pahat biasanya dinyatakan dalam bentuk kode. Sebagai contoh, kode CNMG 120408 memiliki arti: huruf C menunjukkan bentuk insert (rhomboid 80°), N menunjukkan sudut bebas 0°, M menunjukkan tingkat toleransi ketepatan, dan G menunjukkan jenis penjepitan. Sedangkan angka 12 menunjukkan ukuran sisi (mm), 04 menunjukkan ketebalan (mm), dan 08 menunjukkan radius ujung pahat sebesar 0,8 mm. Standarisasi ini penting untuk mempermudah pemilihan dan penggantian pahat sesuai kebutuhan proses pemesinan.

Kinerja pahat bubut tidak hanya bergantung pada bahan dan bentuknya, tetapi juga dipengaruhi oleh beberapa faktor operasional, seperti kecepatan potong (Vc), gerak makan (f), kedalaman potong (a), pendingin dan pelumasan, serta kekakuan mesin dan sistem penjepitan. Semua faktor tersebut saling berkaitan dan harus diatur secara optimal agar proses pembubutan berjalan efisien, menghasilkan permukaan benda kerja yang presisi, serta memperpanjang umur pahat.

Pahat HSS dapat diasah ulang menggunakan gerinda halus dengan tetap menjaga geometri aslinya agar performanya tidak berubah. Sedangkan pada pahat jenis insert, tidak diperlukan proses pengasahan karena sisi potong yang tumpul cukup diganti dengan sisi potong baru atau insert yang lain. Dengan perawatan yang baik, umur pahat dapat lebih panjang, hasil pemotongan tetap presisi, dan produktivitas kerja dapat meningkat. Secara keseluruhan, spesifikasi pahat bubut harus disesuaikan dengan jenis material benda kerja,

jenis operasi (kasar atau halus), serta kemampuan mesin. Kombinasi bahan pahat, sudut potong, dan sistem penjepitan yang tepat akan menghasilkan proses pembubutan yang efisien, ekonomis, dan menghasilkan kualitas permukaan yang optimal.

2.3. Kecepatan Putaran (*Spindle Speed*)

Kecepatan putaran atau *spindle speed* merupakan salah satu parameter paling penting dalam proses pembubutan karena menentukan seberapa cepat benda kerja berputar selama pemotongan berlangsung. Kecepatan putaran dinyatakan dalam satuan *revolution per minute* (rpm) dan merupakan faktor yang secara langsung memengaruhi gaya pemotongan, temperatur pada daerah pemotongan, keausan pahat, serta kualitas akhir permukaan benda kerja. Pemilihan kecepatan putaran yang tepat sangat penting agar proses pemotongan berlangsung stabil dan efisien, terutama ketika memotong material keras seperti baja ST 90 yang memiliki kekuatan tarik tinggi (Iman, 2024).

Kecepatan putaran berhubungan erat dengan kecepatan potong atau *cutting speed* (Vc), yaitu kecepatan linear pada permukaan benda kerja yang bersentuhan dengan pahat. Hubungan antara kecepatan potong dan putaran spindle dapat dinyatakan melalui rumus dasar berikut:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$$

dengan keterangan:

- V_c= kecepatan potong (m/menit)
- π= konstanta (3,14)
- D= diameter benda kerja (mm)
- N= putaran spindle (rpm)

Rumus kecepatan potong tersebut mengacu pada persamaan yang digunakan oleh Akhmadi, Usman, dan Sanjaya (2024) dalam meneliti pengaruh kecepatan putaran dan pemakanan terhadap permukaan baja pada mesin bubut, sehingga formula ini menjadi dasar perhitungan kecepatan potong pada setiap variasi putaran spindle dalam penelitian ini.

Rumus ini menunjukkan bahwa semakin besar putaran spindle atau semakin besar diameter benda kerja, semakin tinggi pula kecepatan potong yang terjadi. Oleh karena itu, pengaturan kecepatan putaran sangat penting untuk menyesuaikan perubahan diameter benda kerja selama proses pembubutan, sehingga pemotongan tetap berada dalam kondisi aman dan efisien.

2.3.1 Aspek-Aspek kecepatan putaran

Menurut Lubis (2023) kecepatan putaran memberikan pengaruh signifikan terhadap berbagai aspek pemesinan, antara lain:

1. Suhu pemotongan

Kecepatan putaran yang tinggi menyebabkan gesekan meningkat antara pahat dan benda kerja, sehingga suhu pemotongan naik secara drastis. Suhu yang

terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi termal, oksidasi permukaan pahat, dan pelemahan struktur pahat, terutama pada pemotongan material keras seperti baja ST 90.

2. Ketahanan pahat (*tool life*)

Ketahanan pahat akan menurun jika kecepatan putaran terlalu tinggi karena keausan abrasif dan keausan difusi berlangsung lebih cepat. Meskipun pahat karbida memiliki stabilitas termal yang baik, kecepatan potong yang berlebihan tetap dapat mempercepat kerusakan pahat.

3. Kekasaran permukaan

Pada kecepatan optimal, permukaan benda kerja dapat menjadi lebih halus karena geram terpotong dengan stabil. Namun, jika kecepatan terlalu tinggi, pahat dapat kehilangan ketajaman dan menghasilkan alur sayatan yang tidak rata, sehingga meningkatkan nilai kekasaran permukaan (Ra). Sebaliknya, kecepatan terlalu rendah juga dapat menyebabkan geram putus-putus dan permukaan menjadi kasar.

4. Timbulnya getaran (chatter)

Kecepatan putaran merupakan salah satu penyebab utama timbulnya getaran chatter, yaitu getaran berulang yang terjadi akibat ketidakstabilan pemotongan. Kecepatan putar yang terlalu tinggi dapat memicu resonansi antara pahat, benda kerja, dan mesin, sehingga menghasilkan pola getaran yang tidak terkendali. Chatter sangat merugikan karena menimbulkan permukaan bergelombang, mempercepat keausan pahat, dan mengurangi presisi pemesinan.

Dengan demikian, kecepatan putaran merupakan parameter kritis yang harus diatur secara optimal agar proses pembubutan menghasilkan kualitas permukaan yang baik, pahat bekerja pada kondisi aman, dan getaran dapat diminimalkan. Kombinasi kecepatan putaran yang tepat dengan pemilihan pahat insert karbida dan penggunaan media pendingin seperti SAE 40 sangat penting untuk menjaga stabilitas proses pemotongan pada material baja ST 90.

2.4. Media Pendingin SAE 40

Media pendingin atau *coolant/lubricant* merupakan salah satu elemen penting dalam proses permesinan karena berfungsi mengatur suhu pemotongan, mengurangi gesekan, serta menjaga stabilitas proses pemotongan. Dalam operasi pembubutan, khususnya pada material keras seperti baja ST 90, panas yang timbul pada zona pemotongan bisa sangat tinggi akibat gesekan antara pahat, chip, dan benda kerja. Tanpa penggunaan coolant yang tepat, panas berlebih dapat menyebabkan keausan pahat yang cepat, distorsi termal pada benda kerja, serta penurunan kualitas permukaan. Oleh karena itu, pemilihan jenis media pendingin harus mempertimbangkan karakteristik material, kondisi pemotongan, dan parameter yang digunakan (Mu'arif, 2024).

2.4.1 Jenis Media Pendingin

Menurut Pambudi (2022) salah satu jenis media pendingin yang banyak digunakan adalah minyak pelumas SAE 40, yaitu oli dengan tingkat kekentalan tertentu yang mampu bekerja pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi. Minyak SAE 40 memiliki karakteristik utama sebagai berikut:

1. Viskositas tinggi, sehingga mampu membentuk lapisan pelumas yang stabil pada permukaan pahat dan benda kerja.
2. Daya pelumas (lubricity) yang baik, sehingga dapat mengurangi gesekan secara signifikan pada zona kontak chip–pahat.
3. Stabilitas termal yang kuat, sehingga tidak mudah terdegradasi meskipun terkena panas pemotongan yang tinggi.

Karakteristik tersebut menjadikan SAE 40 ideal digunakan pada proses pembubutan dengan beban berat dan kecepatan putaran tinggi, karena mampu menjaga stabilitas pahat dan hasil pemotongan.

2.4.2 Fungsi Media Pendingin

Menurut Mu'arif (2024) media pendingin SAE 40 memiliki beberapa fungsi penting dalam proses permesinan, antara lain:

1. Mengurangi panas pemotongan, sehingga mencegah terjadinya overheating pada pahat dan benda kerja.
2. Mengurangi gesekan antara chip dan pahat, sehingga chip dapat mengalir lebih lancar dan menghindari *built-up edge*.
3. Meningkatkan umur pahat, karena keausan abrasif maupun difusi dapat diminimalkan dengan adanya lapisan pelumas.
4. Menstabilkan getaran, karena lapisan oli mampu meredam kontak langsung antara pahat dan benda kerja sehingga mengurangi gaya pemotongan fluktuatif yang memicu getaran chatter.

Penggunaan minyak SAE 40 terbukti memberi pengaruh yang signifikan terhadap kualitas kekasaran permukaan dan tingkat getaran pada proses pembubutan. Dari sisi kekasaran permukaan, lapisan pelumas yang tebal dan stabil pada SAE 40 mampu mengurangi gesekan pada permukaan pahat, sehingga hasil pemotongan lebih halus dan nilai Ra cenderung lebih rendah. Lubrikasi yang baik juga mencegah terbentuknya *built-up edge* yang sering menyebabkan permukaan menjadi kasar dan tidak seragam (Putra, 2022).

Penggunaan SAE 40 membantu menjaga stabilitas pemotongan karena mengurangi gaya pemotongan yang fluktuatif. Saat gesekan berkurang, pahat tidak mengalami hentakan mikro yang biasanya memicu getaran paksa maupun getaran chatter. Dengan demikian, proses pemesinan menjadi lebih halus, pahat lebih stabil, dan pola getaran lebih terkontrol. Pengurangan getaran ini sangat penting dalam pembubutan material keras seperti baja ST 90 karena getaran berlebih dapat menyebabkan cacat permukaan, mempercepat keausan pahat, dan mengganggu akurasi dimensi.

Secara keseluruhan, media pendingin SAE 40 memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan performa pemesinan, baik dalam menjaga kualitas permukaan maupun dalam mengendalikan getaran. Kombinasi antara pahat insert karbida, kecepatan putaran yang sesuai, dan penggunaan SAE 40 sebagai coolant menciptakan kondisi pemotongan yang stabil, efisien, dan mampu menghasilkan permukaan yang lebih halus pada material baja ST 90.

2.5. Material Baja ST 90

Baja ST 90 merupakan salah satu jenis baja paduan tinggi (*high strength alloy steel*) yang banyak digunakan dalam industri karena kombinasi sifat mekaniknya yang sangat baik, khususnya kekuatan tarik tinggi, keuletan yang baik, serta ketangguhan (*toughness*) yang unggul pada berbagai kondisi pembebanan. Baja ini termasuk ke dalam kelompok Ni–Cr–Mo steel, yaitu baja yang dipadukan dengan unsur nikel (Ni), kromium (Cr), dan molibdenum (Mo) sehingga memiliki peningkatan kekuatan struktural dan ketahanan terhadap keausan. Baja ST 90 menjadi material yang banyak digunakan untuk aplikasi berat seperti poros mesin, gear, connecting rod, komponen aeronautika, serta elemen struktural yang membutuhkan kekuatan tinggi (Putra, 2022).



Gambar 2.6 Material Baja ST 90
Sumber : Putra, 2022

2.5.1 Komposisi Material Baja ST 90

Menurut Relvin (2024) baja ST 90 memiliki komposisi utama sebagai berikut:

1. Nikel (Ni) sekitar 1,65–2,0% yang berfungsi meningkatkan keuletan dan ketangguhan terutama pada suhu rendah.

2. Kromium (Cr) sekitar 0,7–0,9% yang memberikan ketahanan korosi dan meningkatkan kekerasan permukaan.
3. Molibdenum (Mo) sekitar 0,2–0,3% yang meningkatkan kekuatan tarik serta memperbaiki ketahanan terhadap panas.

Selain itu, baja ST 90 mengandung karbon sekitar 0,38–0,43% yang memberikan dasar kekerasan dan kekuatan setelah proses perlakuan panas (*heat treatment*). Sifat mekanik baja ST 90 menjadikannya salah satu baja paduan yang sangat kuat di kelasnya.

2.5.2 Sifat Material Baja ST 90

1. Kekuatan tarik tinggi (hingga 1080–1550 MPa setelah heat treatment), sehingga mampu bertahan pada tekanan yang besar.
2. Toughness yang baik, bahkan pada kondisi suhu rendah, membuatnya tahan terhadap benturan.
3. Kekerasan tinggi, terutama setelah proses *quenching* dan *tempering*, sehingga tahan terhadap keausan selama proses pemesinan maupun penggunaan.

Namun, sifat-sifat unggul ini juga membuat baja ST 90 memiliki tingkat kesulitan tersendiri saat dilakukan pemotongan. Perilaku baja ST 90 selama proses pemesinan sangat dipengaruhi oleh sifat kimia dan mekaniknya, sehingga memengaruhi panas pemotongan, getaran, dan kualitas permukaan.

2.5.3 Macam-Macam Perilaku Material Baja ST 90

Menurut Relvin (2024) beberapa perilaku khusus baja ST 90 dalam proses pemotongan antara lain:

1. Menghasilkan panas pemotongan yang tinggi, karena kekuatan tarik dan kekerasannya menyebabkan gesekan besar antara pahat dan benda kerja. Peningkatan panas ini dapat mempercepat keausan pahat dan memengaruhi kehalusan permukaan.
2. Potensial menimbulkan getaran chatter, karena baja keras seperti ST 90 menimbulkan gaya pemotongan yang fluktuatif. Jika kecepatan potong, geometri pahat, atau kekakuan mesin tidak optimal, getaran dapat terjadi dan mengganggu proses pemesinan.
3. Kekasaran permukaan sangat dipengaruhi oleh suhu pahat dan gaya pemotongan, di mana suhu tinggi dapat menyebabkan degradasi ketajaman pahat sehingga permukaan menjadi lebih kasar. Gaya pemotongan yang besar juga berkontribusi terhadap terbentuknya alur sayatan yang tidak stabil.

Dengan sifat-sifat tersebut, pemesinan baja ST 90 membutuhkan pemilihan parameter pemotongan yang tepat, pahat berkualitas tinggi seperti insert karbida, serta penggunaan media pendingin SAE 40 untuk mengendalikan suhu dan stabilitas pemotongan. Kombinasi faktor tersebut sangat penting agar proses pembubutan menghasilkan permukaan yang halus, getaran minimal, dan umur pahat yang lebih panjang.

2.6. Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness*)

Kekasaran permukaan atau *surface roughness* merupakan salah satu parameter kualitas hasil pemesinan yang sangat penting karena menggambarkan kondisi mikro pada permukaan benda kerja setelah dilakukan proses pemotongan. Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai deviasi kecil pada permukaan yang dihasilkan oleh proses penyayatan material, yang dapat berupa alur, gelombang, atau pola akibat interaksi pahat dengan benda kerja. Parameter kekasaran yang umum digunakan adalah Ra (Roughness Average), yaitu nilai rata-rata deviasi profil permukaan terhadap garis tengah. Nilai Ra menjadi acuan standar dalam industri manufaktur untuk menentukan tingkat kehalusan dan kualitas akhir suatu komponen (Relvin, 2024).

Nilai kekasaran permukaan rata-rata aritmatik (Ra) diperoleh dengan menjumlahkan seluruh hasil pengukuran kekasaran pada satu spesimen kemudian membaginya dengan jumlah titik pengukuran, sebagaimana dinyatakan dalam rumus berikut:

$$R_a = \frac{R_1 + R_2 + \cdots + R_n}{n}$$

dengan keterangan:

- R_a= kekasaran permukaan rata-rata aritmatik (μm)
- $R_1, R_2, \ldots, R_n$= nilai kekasaran permukaan pada setiap titik pengukuran (μm)
- n= jumlah titik pengukuran

Rumus perhitungan kekasaran permukaan rata-rata ini mengacu pada metode pengukuran yang digunakan oleh Pambudi, Abdillah, dan Andriyanto (2022) dalam menganalisis pengaruh kecepatan putaran spindle terhadap kekasaran permukaan benda kerja pada proses pembubutan, dan menjadi dasar perhitungan nilai Ra pada setiap spesimen dan setiap variasi kecepatan putaran dalam penelitian ini.

2.6.1 Faktor-Faktor Kekerasaan Permukaan

Menurut Rumbiak (2025) kekasaran permukaan dipengaruhi oleh berbagai faktor selama proses pemesinan. Faktor-faktor utama tersebut antara lain:

1. Kecepatan potong (*cutting speed*)

Kecepatan potong yang terlalu rendah dapat menyebabkan gerak chip yang tidak stabil, menghasilkan permukaan lebih kasar. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu tinggi dapat memicu panas berlebih yang menyebabkan pahat cepat aus dan menimbulkan goresan tidak rata.

2. Geometri pahat

Radius ujung pahat (*nose radius*), sudut potong, dan sudut bebas sangat menentukan alur permukaan. Radius besar menghasilkan permukaan lebih halus tetapi meningkatkan gaya pemotongan.

3. Kedalaman potong (*depth of cut*)

Depth yang besar menghasilkan gaya pemotongan tinggi sehingga meningkatkan getaran dan memperburuk kualitas permukaan. Depth kecil umumnya memberikan permukaan lebih baik.

4. Getaran saat pemotongan (vibration/chatter)

Getaran baik yang bersifat paksa maupun chatter menyebabkan gelombang pada permukaan dan meningkatkan nilai Ra secara signifikan. Getaran merupakan salah satu penyebab utama cacat permukaan pada material keras seperti baja ST 90.

5. Media pendingin

Penggunaan coolant seperti SAE 40 mengurangi gesekan dan panas, sehingga pahat tetap tajam dan permukaan lebih halus. Tanpa pendingin, kekasaran cenderung meningkat akibat keausan pahat yang cepat.

Kekasaran permukaan memiliki hubungan langsung dengan kualitas produk dan ketelitian dimensi. Semakin kecil nilai Ra, semakin tinggi kualitas permukaan yang dihasilkan, sehingga komponen dapat berfungsi optimal pada aplikasi yang membutuhkan gesekan rendah, ketepatan tinggi, dan umur pakai panjang. Kualitas permukaan yang baik juga memperbaiki kemampuan perakitan, mengurangi kebutuhan proses finishing lanjutan, serta meningkatkan ketahanan keausan komponen. Sebaliknya, permukaan yang kasar dapat menyebabkan peningkatan gesekan, ketidakpresisian dimensi, dan kemungkinan kegagalan komponen lebih cepat. Oleh karena itu, pengendalian kekasaran

permukaan menjadi aspek penting dalam proses pembubutan, terutama pada material kritis seperti baja ST 90 yang digunakan pada komponen bertegangan tinggi.

2.7. Getaran pada Proses Pemesinan (*Machining Vibration*)

Getaran pada proses pemesinan merupakan fenomena dinamis yang muncul ketika terjadi osilasi atau gerakan berulang pada sistem mesin, pahat, dan benda kerja selama proses pemotongan berlangsung. Proses pembubutan yang menggunakan pahat insert karbida, terutama pada material berkekuatan tinggi seperti baja ST 90, getaran menjadi faktor kritis yang menentukan stabilitas pemotongan dan kualitas permukaan akhir. Getaran tidak hanya berasal dari gaya pemotongan yang fluktuatif, tetapi juga dipengaruhi oleh kekakuan mesin, kondisi spindle, kualitas penjepitan pahat, dan efek termal akibat gesekan tinggi saat pemotongan. Secara umum, getaran muncul ketika sistem permesinan kehilangan kestabilan dinamisnya, sehingga gerakan pemotong tidak lagi sejalan dengan lintasan ideal yang seharusnya terjadi. Akibatnya, gerakan pahat menjadi tidak presisi dan menghasilkan permukaan yang bergelombang serta nilai kekasaran yang lebih tinggi (Rumbiak, 2025).

2.7.1 Jenis-Jenis Getaran

Menurut Burrahman (2024) getaran dikelompokkan ke dalam tiga jenis utama yang menjadi dasar analisis perilaku dinamis mesin:

1. Getaran bebas, yaitu getaran alami yang timbul akibat gangguan awal dan bergerak mengikuti frekuensi natural mesin tanpa adanya gaya luar.

2. Getaran paksa, yaitu getaran yang muncul akibat gaya pemotongan yang tidak konstan, misalnya akibat pembentukan chip yang terputus-putus atau spindle yang tidak seimbang.
3. Getaran chatter, yaitu getaran regeneratif yang paling berbahaya, ditandai dengan amplitudo yang semakin bertambah dan suara melengking. Chatter menyebabkan permukaan benda kerja menjadi bergelombang, mempercepat keausan pahat, dan dapat merusak komponen mesin.

2.7.2 Penyebab Getaran

Penyebab timbulnya getaran dalam proses bubut sangat kompleks dan saling berhubungan. Salah satu penyebab utama adalah pemilihan kecepatan putaran (rpm) yang tidak tepat sehingga mendekati frekuensi natural sistem. Ketika kecepatan putaran mendekati titik resonansi, getaran meningkat secara drastis dan memicu chatter. Faktor lain adalah kekakuan sistem pemegang pahat (tool holder), dudukan benda kerja, serta struktur mesin. Pahat atau holder yang kurang kaku akan lebih mudah berosilasi saat menerima gaya pemotongan. Selain itu, kondisi pahat seperti keausan, micro-chipping, atau geometri sudut potong yang tidak sesuai juga dapat menimbulkan gaya pemotongan yang tidak stabil. Proses pembentukan chip yang tidak konstan, terutama pada material keras seperti baja ST 90, dapat menghasilkan variasi gaya pemotongan yang menimbulkan getaran paksa. Suhu pemotongan yang tinggi akibat gesekan extreme juga menyebabkan deformasi termal sehingga kondisi pemotongan semakin tidak stabil (Gimastian, 2025).

Getaran yang tidak terkendali memberikan dampak signifikan terhadap kualitas hasil pemesinan dan performa alat. Dampak paling umum yang muncul adalah meningkatnya nilai kekasaran permukaan (Ra). Gerakan pahat yang berosilasi menciptakan pola gelombang atau *waviness* yang membentuk permukaan tidak rata dan sulit dikontrol. Selain itu, getaran mempercepat keausan pahat, terutama pada bagian *cutting edge*, sehingga umur pahat menjadi lebih pendek. Keausan yang cepat juga meningkatkan gaya pemotongan sehingga memperparah kondisi getaran. Getaran yang tinggi turut menyebabkan ketidakakuratan dimensi, toleransi yang tidak terpenuhi, hingga penurunan kualitas fungsional komponen hasil pemesinan. Pada kondisi ekstrem, getaran dapat menyebabkan patahnya pahat atau kerusakan pada sistem spindle akibat tegangan dinamis yang berlebihan. Semua dampak tersebut menyebabkan penurunan efisiensi produksi, peningkatan biaya pergantian pahat, dan ketidakstabilan proses yang merugikan operator maupun kualitas produk (Elvan, 2025).

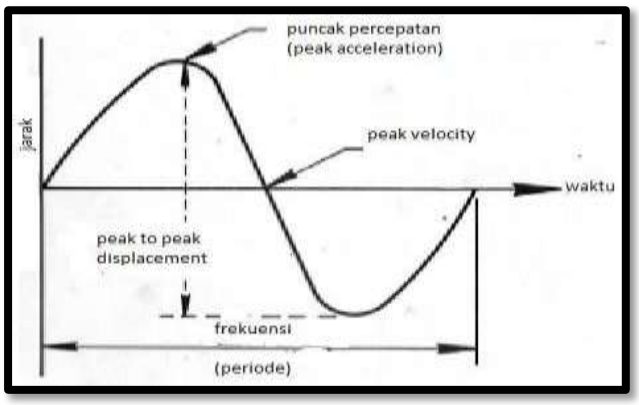
Hubungan antara getaran dan variasi kecepatan putaran merupakan aspek penting dalam optimasi pemesinan. Kecepatan putaran yang terlalu tinggi meningkatkan gaya dinamis sehingga lebih mudah menghasilkan chatter, terutama pada pemesinan bahan keras. Namun, kecepatan putaran yang terlalu rendah justru meningkatkan panas pemotongan karena kecepatan geser rendah, sehingga pahat dan benda kerja mengalami deformasi termal yang memicu getaran tambahan. Pada kecepatan optimal, gaya pemotongan menjadi stabil,

chip terbentuk secara kontinu, dan interaksi pahat benda kerja berjalan secara konsisten sehingga getaran dapat ditekan. Oleh karena itu, penentuan kecepatan putaran optimal sangat penting untuk menghasilkan kualitas permukaan terbaik dengan tingkat getaran minimal (Husni, 2020).

Penggunaan media pendingin SAE 40 berperan penting dalam mengurangi getaran selama proses bubut. Minyak SAE 40, dengan viskositas tinggi, mampu membentuk lapisan pelumas yang stabil di antara pahat dan chip sehingga mengurangi gaya gesek yang menjadi sumber getaran paksa. Pelumasan yang baik membuat aliran chip lebih stabil dan menekan perubahan gaya pemotongan yang tiba-tiba. Selain itu, SAE 40 memiliki stabilitas termal yang baik sehingga mampu menurunkan suhu pemotongan, mencegah deformasi termal pada pahat dan benda kerja. Pendinginan yang efektif juga menurunkan risiko terjadinya chatter karena geometri pahat tetap stabil dan tidak mengalami perubahan bentuk akibat panas. Dengan demikian, penggunaan SAE 40 bukan hanya berfungsi sebagai pendingin, tetapi juga sebagai media yang meningkatkan kestabilan dinamika pemotongan,

2.7.3 Amplitudo Getaran dalam Proses Pemesinan

Amplitudo getaran merupakan besar maksimum perpindahan yang terjadi pada sistem getaran akibat gaya pemotongan. Amplitudo dipengaruhi oleh kekakuan sistem, massa, redaman, dan frekuensi eksitasi. Amplitudo digunakan untuk menilai tingkat kestabilan proses karena semakin besar amplitudo, semakin tinggi risiko terjadinya chatter dan penurunan kualitas permukaan.



Gambar 2.7 Karakteristik Getaran
Sumber : (Hermawan. 1990)

Amplitudo meningkat tajam ketika frekuensi eksitasi mendekati frekuensi natural, sehingga pengaturan kecepatan potong dan peningkatan redaman sangat penting untuk menghindari resonansi dan chatter.

2.8 Rujukan Jurnal

Penelitian oleh Abbas dkk. (2022) menyoroti pengaruh kecepatan potong dan parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan pada baja ST 90 menggunakan pahat karbida multilapis. Penelitian ini ditemukan bahwa semakin tinggi kecepatan potong, nilai kekasaran permukaan cenderung menurun hingga batas optimum, sebelum meningkat kembali akibat kenaikan temperatur pada ujung pahat. Optimasi dilakukan menggunakan metode multi-objective, yang menunjukkan bahwa kombinasi kecepatan tinggi dengan laju pemakanan rendah mampu menghasilkan permukaan paling halus dengan efisiensi waktu tinggi. Hasil ini sejalan dengan konsep penelitian yang menggunakan variasi kecepatan untuk mencari kondisi paling ideal dalam menghasilkan kekasaran rendah pada baja keras seperti ST 90[1].

Fedai (2023) melakukan kajian eksperimental terhadap pengaruh kondisi pelumasan dry, MQL, dan nano-MQL terhadap performa pemotongan baja ST 90 menggunakan pahat karbida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pendingin berperan besar dalam menurunkan suhu pemotongan, mengurangi getaran, serta memperpanjang umur pahat. Media pendingin yang lebih kental dan memiliki daya pelumasan tinggi, seperti minyak SAE 40, berpotensi memberikan efek serupa karena dapat membentuk lapisan pelumas stabil di zona gesek. Penurunan getaran selama pemesinan berbanding lurus dengan perbaikan kualitas permukaan yang dihasilkan[2].

Muhamad dkk. (2022) meneliti mekanisme keausan pahat karbida multilapis dalam proses milling baja ST 90 di bawah kondisi kriogenik. Meskipun menggunakan nitrogen cair, hasil penelitian ini menunjukkan prinsip penting bahwa pendinginan efektif dapat memperlambat keausan pahat dan menjaga kekasaran permukaan tetap rendah. Fenomena tersebut relevan terhadap penggunaan pendingin cair seperti SAE 40 yang bekerja dengan prinsip penyerapan panas dan pelumasan ganda, sehingga mengurangi getaran akibat gaya potong yang tidak stabil[3].

Studi yang dilakukan oleh *Jurnal Tribologi* (2021), perbandingan antara pahat berlapis CVD dan PVD menunjukkan bahwa karakteristik lapisan pahat sangat memengaruhi hasil kekasaran permukaan pada pemotongan baja ST 90. Pahat dengan lapisan PVD memiliki ketahanan aus lebih baik pada kecepatan tinggi, menghasilkan nilai kekasaran lebih rendah, serta getaran lebih stabil.

Hasil ini memberikan gambaran bahwa pemilihan jenis insert karbida menjadi faktor kunci selain variasi kecepatan, khususnya saat digunakan bersamaan dengan media pendingin seperti SAE 40[4].

Penelitian oleh Sahoo dkk. (2020) melalui pendekatan *Mechanics & Industry* membahas pengaruh metode *pulsating MQL* terhadap suhu dan gaya pemotongan pada proses hard turning ST 90. Ditemukan bahwa fluktuasi kecepatan putaran memengaruhi intensitas getaran serta stabilitas lapisan cairan pelumas pada zona pemotongan. Dengan kecepatan yang lebih tinggi, terbentuk kondisi *hydrodynamic lubrication* yang dapat menurunkan amplitudo getaran. Temuan ini mendukung ide bahwa variasi kecepatan putaran berperan besar terhadap kekasaran dan frekuensi getaran dalam sistem pemesinan dengan pelumasan cair[5].

Penelitian oleh Kumar dkk. (2020) juga dalam jurnal *Mechanics & Industry* mengevaluasi performa pahat cermet yang tidak dirawat dan dirawat kriogenik saat memotong baja ST 90. Hasilnya menunjukkan bahwa pahat yang memiliki kekerasan dan stabilitas termal lebih tinggi menghasilkan permukaan lebih halus dengan frekuensi getaran lebih rendah. Pendinginan efektif mampu meminimalkan gaya potong fluktuatif, yang menjadi penyebab utama munculnya vibrasi pada sistem spindle–pahat–benda kerja[6].

Penelitian yang dilakukan oleh Arya dan Rahman (2021) di *Dinamika Teknik Mesin*, analisis terhadap variasi kecepatan putaran menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan hingga titik optimum mengurangi gaya pemotongan dan

kekasaran permukaan, tetapi bila terlalu tinggi justru meningkatkan getaran akibat ketidakseimbangan dinamis. Kondisi tersebut menggambarkan pentingnya pemilihan kecepatan ideal untuk menghindari resonansi pada sistem pahat karbida yang digunakan pada material keras seperti ST 90[7].

Studi oleh Kurbatov (2020) dalam *Journal of the Institute of Science and Technology* menjelaskan hubungan antara parameter pemotongan dengan nilai kekasaran pada baja paduan menengah (AISI 4140) yang memiliki sifat mekanik mirip ST 90. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi kecepatan putar tinggi dan pendinginan efektif menghasilkan pola getaran yang lebih halus. Media pendingin berfungsi menurunkan suhu dan meredam getaran mikro, sehingga dapat diadaptasi dalam penggunaan SAE 40 untuk material sejenis[8].

Penelitian oleh Bhattacharya dkk. (2024) dalam *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* membandingkan hasil pemotongan kering dengan pahat cermet yang diberi perlakuan kriogenik pada baja ST 90. Mereka menemukan bahwa perlakuan permukaan pahat meningkatkan konduktivitas termal dan mengurangi fluktuasi gaya potong, menghasilkan permukaan lebih rata dan amplitudo getaran lebih kecil. Kondisi ini menunjukkan pentingnya kestabilan termal dan pelumasan optimal seperti yang diharapkan dari penggunaan SAE 40 dalam penelitian serupa[9].

Terakhir, penelitian oleh Singh dan Patel (2021) mengenai analisis getaran dalam proses bubut baja paduan keras menunjukkan bahwa amplitudo getaran meningkat seiring kenaikan kecepatan spindle, terutama jika pendinginan tidak

cukup. Media pendingin dengan viskositas tinggi mampu meredam sebagian energi vibrasi melalui pembentukan lapisan pelumas yang tebal di antara chip dan pahat. Hal ini membuktikan bahwa variasi kecepatan dan penggunaan SAE 40 dapat memberikan keseimbangan optimal antara pendinginan dan redaman getaran