

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Malik et al., 2019), mesin CNC router adalah mesin yang menggunakan sistem kontrol CNC (*Computer Numerical Control*) dengan gerakan utama yang berputar, dan pergerakannya dilakukan oleh alat potong atau *spindle milling*. Mesin perkakas CNC Router 3 axis dikendalikan oleh sistem PC (*Personal Computer*) dengan program CNC yang menggunakan perangkat lunak CAD/CAM. Program CNC diubah melalui perangkat lunak Mach3 lalu mengirimkan sinyal pada setiap sumbu x, y, dan z melalui motor stepper untuk menjalankan perintah operasional. Dalam proses produksi yang menggunakan mesin CNC Router 3 sumbu dibutuhkan akurasi bentuk dan ketepatan ukuran yang dihasilkan karena akan berdampak pada nilai jual produk tersebut.

Dalam studi yang dilakukan oleh (Cihad Bal & Dumanoğlu, 2019), sebelum menjalankan operasi pada mesin CNC, kondisi pemotongan seperti *spindle speed*, *step over*, *cutting speed*, *feed rate*, dan *cutting depth*, *cutter plunge speed*, *tool diameter*, *depth of cut* dan *tool strategy* harus dikonfigurasi dengan benar. Jika tidak, kemungkinan masalah terjadi pada kualitas permukaan produk kayu olahan dan panel berbahan dasar kayu. Temuan penelitian menunjukkan bahwa nilai kekasaran permukaan cenderung menurun seiring dengan peningkatan *spindle speed*, tetapi penurunan pada parameter *step over*, *feed rate*, dan *cutting depth*. Hingga saat ini, belum ada penelitian yang secara mendalam mengeksplorasi dampak parameter pemotongan terhadap waktu pemrosesan dan konsumsi energi pada *CNC router*, termasuk pada kekasaran permukaan pintu lemari yang terbuat dari bahan *MDF*.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Paiu et al., 2020), disebutkan bahwa penelitian mengenai *CNC milling* pada kayu padat telah diperluas untuk mencakup material berbasis kayu. *Face milling* sering digunakan dalam proses pengukiran MDF dan pembuatan furnitur. Hasil dari *CNC milling* pada MDF menunjukkan bahwa kekasaran permukaan panel MDF dipengaruhi oleh *spindle speed*, *feed rate*, *stepover*, dan *depth of cut*. Parameter pemesinan yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan adalah *feed rate*, *spindle*

speed, dan *tool diameter* ($p < 0,05$), dan tidak ada pengaruh signifikan dari *axial depth of cut* pada parameter ini.

Studi yang dilakukan oleh Evren (2022) menunjukkan bahwa penentuan parameter yang paling akurat sangat penting untuk menggambarkan kualitas permukaan bahan, seperti kekasaran permukaan dan tingkat keterbasahan. Faktor-faktor ini menjadi krusial dalam menentukan keberhasilan proses finishing kayu, seperti pengecatan, pelapisan, dan penggunaan pernis. Faktor utama yang memengaruhi kekasaran permukaan dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu faktor yang berasal dari sifat bahan itu sendiri, seperti jenis kayu, kepadatan, kekerasan, kelembaban, dan faktor dari proses yang diterapkan pada bahan, seperti *cutting tool diameter*, *tool shape*, *radius of the tool nose*, *spindle speed*, *step-over*, *depth of cut*, dan *feed rate*. Keterbasahan, yang sensitif terhadap interaksi antara permukaan kayu dan zat cair seperti air, perekat, cat, pernis, dan pelapis, secara tradisional diukur melalui sudut kontak, dimana sudut yang kecil menunjukkan kemampuan permukaan untuk lebih mudah dibasahi. Beberapa faktor kunci yang memengaruhi tingkat keterbasahan permukaan kayu melibatkan jenis kayu, kelembaban, arah serat, polaritas, pH, kekasaran permukaan, penuaan kayu, dan proses pengolahan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Bal (2020), disebutkan bahwa terdapat pengaruh dari beberapa parameter terhadap hasil kekasaran permukaan kayu di mesin CNC, seperti kepadatan, kadar air, dan *depth of cut* yang memengaruhi kekasaran permukaan sampel uji MDF. Nilai kekasaran permukaan (R_a , R_q , R_z) meningkat seiring dengan bertambahnya kadar air pada sampel uji MDF. Peningkatan kedalaman pemotongan pada sampel uji juga menyebabkan peningkatan nilai kekasaran permukaan. Pengaruh dari *depth of cut* lebih signifikan dibandingkan dengan pengaruh kepadatan dan kadar air terhadap uji kekasaran permukaan. Ditemukan bahwa nilai kekasaran permukaan menurun seiring dengan peningkatan kepadatan MDF. Tes yang dilakukan dalam penelitian ini menyoroti peran penting densitas dalam mempengaruhi kekasaran permukaan MDF yang diproses menggunakan mesin CNC.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Demir (2022), pengaruh parameter proses terhadap nilai kekasaran permukaan setelah proses mesin CNC pada panel kayu lapis, *particle board*, dan MDF yang umumnya digunakan dalam industri mebel, menunjukkan bahwa parameter pemrosesan CNC seperti diameter *cutting tools*, *spindle speed*, dan *feed rate* merupakan faktor kunci yang berhubungan dengan

nilai kekasaran permukaan (R_a , R_{max} , dan R_z) kayu lapis, *particle board*, dan panel MDF. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran permukaan panel kayu lapis dan MDF yang diproses dengan *cutting tools* berdiameter 2 mm lebih tinggi daripada yang diproses dengan *cutting tools* berdiameter 5 mm. Meskipun hasil serupa ditemukan untuk nilai R_a pada kelompok *particle board*, tidak ada perbedaan statistik yang ditemukan pada nilai parameter kekasaran permukaan lainnya (R_{max} dan R_z) tergantung pada peningkatan diameter *cutting tools*. *Spindle speed* yang meningkat menghasilkan permukaan yang lebih halus pada seluruh kelompok panel. Nilai kekasaran permukaan kelompok panel triplek dan *particle board* mengalami penurunan seiring dengan peningkatan *feed rate*. Permukaan paling halus untuk panel ini ditemukan pada *feed rate* 9 m/menit. Saat membandingkan nilai R_a yang diukur pada sampel panel setelah diproses dengan mesin CNC, kelompok kayu lapis menunjukkan permukaan paling halus, sementara nilai R_a tertinggi ditemukan pada sampel *particle board*.

Dalam penelitian Nur (2021) menemukan bahwa pengaturan kecepatan putaran pahat dan kecepatan gerak meja kerja pada mesin CNC Router yang ditelitinya hanya bisa diatur dalam bilangan bulat, tidak bisa pecahan. Berbeda dengan pengaturan kedalaman potong yang bisa diatur sangat presisi. Karena perbedaan jenis pengaturan ini, metode Taguchi dianggap paling sesuai. Metode ini mampu menggabungkan pengaturan yang berupa bilangan bulat dan pecahan untuk mendapatkan kombinasi pengaturan yang paling optimal. Dengan pengaturan yang optimal ini, diharapkan produk yang dihasilkan lebih sedikit cacatnya, umur pahat dan motor mesin lebih panjang, dan kinerja mesin secara keseluruhan lebih baik.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ender (2019), untuk menetapkan parameter CNC yang optimal untuk material kayu, digunakan dua model matematika yang dikembangkan berdasarkan desain *L27 orthogonal* dan metode RSM. Penting untuk dicatat bahwa kedua metode tersebut belum pernah digunakan dalam penelitian lain dalam literatur. Nilai R_a dan R_z dipengaruhi oleh interaksi antara *feed rate* dan *spindle speed*, masing-masing memberikan kontribusi sebesar 37,16% dan 34,47% terhadap PCR (%). Dua model matematika yang berbeda diterapkan dengan menggunakan model kuadrat. Selain itu, metode eliminasi mundur diterapkan untuk mengidentifikasi variabel yang tidak signifikan. Dalam konteks penelitian ini, kedua model ini dapat dianggap sebagai pendekatan eksperimental dan statistik untuk menganalisis,

memodelkan, dan mengoptimalkan operasi mesin CNC, khususnya pada proses pemotongan kayu.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Demir (2021), dikembangkan model Jaringan Saraf Tiruan (ANN) untuk memodelkan dampak variabel parameter CNC terhadap kekasaran permukaan kayu jenis cemara dan beech. Tingkat keberhasilan estimasi model ANN meningkat secara signifikan, dari 84,1% menjadi 99,24%. Meskipun terdapat hubungan kompleks dan nonlinier antara variabel input dan output, model yang dikembangkan memberikan hasil yang sangat memuaskan. Dari hasil analisis ANN, nilai kekasaran permukaan diprediksi berdasarkan jenis kayu dan diameter alat potong untuk nilai parameter CNC yang tidak digunakan dalam studi eksperimental. Faktor *spindle speed* dan *feed rate* memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kekasaran permukaan kayu cemara dan beech. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model ANN tingkat lanjut dapat efektif digunakan untuk memprediksi kekasaran permukaan bahan kayu yang memiliki spesies dan kadar air serupa dengan penelitian ini, yang diproses dengan CNC pada *spindle speed* (antara 10.000 dan 18.000 rpm) dan *feed rate* (antara 5 dan 9 m/menit) untuk setiap diameter *cutting tools*.

Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka

Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Permasalahan	Metode	Hasil penelitian
Bawono, dkk	2024	Optimasi Pengembangan Desain Ukiran Daun Pintu Presisi dan Unik pada Industri Kayu dengan Sentuhan <i>Artistic CAD/CAM</i>	kualitas tidak konsisten dan efisiensi waktu rendah pada mesin CNC Router mereka karena operasional yang masih manual dan mengabaikan parameter <i>machining</i> penting.	Penelitian ini menerapkan metode pengembangan dan pembuatan eksploratif desain ukiran daun pintu unik menggunakan teknologi <i>Artistic CAD/CAM</i> dan mesin CNC Router untuk membantu UMKM bersaing di industri kayu.	Hasil penelitian pada jurnal ini menunjukkan adanya kebutuhan akan terobosan dalam pengembangan desain daun pintu bermotif unik untuk bersaing di pasar industri kayu yang semakin ketat. Penelitian ini berfokus pada produksi daun pintu bermotif ornamen Batik Indonesia menggunakan teknologi <i>Artistic CAD/CAM</i> dan mesin CNC Router.
Bal, Zeynep	2020	<i>Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine.</i>	Parameter mesin CNC yang belum optimal dalam mencapai kekasaran permukaan yang diinginkan.	Percobaan dengan menggunakan spesimen $50 \times 60 \text{ mm}^2$ dan hasil permukaan diukur dengan <i>Mitutoyo surfest SJ-210</i> . <i>Surface Roughness test ANOVA</i>	Kepadatan, kadar air, dan kedalaman potongan MDF mempengaruhi kekasaran permukaan sampel uji MDF, Nilai kekasaran permukaan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kadar air sampel uji MDF. Nilai kekasaran permukaan meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman pemotongan. sampel uji. Nilai kekasaran permukaan menurun seiring dengan bertambahnya kepadatan MDF meningkat.

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Permasalahan	Metode	Hasil penelitian
Bal, Fevzi	2019	<i>Surface Roughness and Processing Time of a Medium Density Fiberboard Cabinet Door Processed via CNC Router, and the Energy Consumption of the CNC Router</i>	pengaruh parameter pemotongan tertentu dari router CNC terhadap kekasaran permukaan sampel uji ukuran sebenarnya. Selain itu, konsumsi energi dan total waktu pemrosesan router CNC diselidiki, sehubungan dengan parameter pemotongan.	Pengukuran kekasaran dilakukan pada delapan titik berbeda yang sejajar dengan jejak pemotong, Kekasaran permukaan diukur menggunakan Mitutoyo Surftest SJ-210Data dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA dua arah), dan perbedaan signifikan antar kelompok ditentukan dengan uji jarak berganda Duncan	Nilai Ra terendah sebesar 14,2 ditentukan dengan menggunakan kecepatan spindel 16.000 rpm dan kecepatan umpan 3 m/menit. Konsumsi energi router CNC menurun seiring dengan penurunan kecepatan spindel dan peningkatan laju pengumpanan. Konsumsi energi terendah adalah 5,4 Wh, dan diamati ketika menggunakan kecepatan spindel 8000 rpm, dan laju umpan 7 m/mnt. Waktu pemrosesan router CNC menurun seiring dengan meningkatnya laju pengumpanan. Waktu pemrosesan terendah adalah 47 detik, diukur pada laju umpan 7 m/menit.
Aydin, dkk	2021	Determination of CNC processing parameters for the best wood surface quality via artificial neural network	Nilai optimum parameter proses yang memberikan permukaan terbaik sifat kualitas untuk olahan kayu cemara dan beech dengan mesin CNC.	Lima spesimen (5 cm×5 cm) dan lima kali pengukuran dilakukan untuk masing-masing kelompok. Mitutoyo Surftest SJ-301 Tester digunakan untuk uji kekasaran permukaan	Hasil analisa ANN diperoleh nilai kekasaran permukaan diperkirakan berdasarkan jenis kayu dan alat pemotongnya diameter untuk nilai parameter CNC tidak digunakan dalam studi eksperimental. Kecepatan spindel dan laju pemakanan mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap kekasaran permukaan pohon cemara dan beech kayu.

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Permasalahan	Metode	Hasil penelitian
Ender, Kucuk	2019	<i>Optimization of Wood Machining Parameters in CNC Routers: Taguchi Orthogonal Array Based Simulated Angling Algorithm</i>	Penyajian pendekatan penentuan kekasaran permukaan minimum dengan melakukan integrasi RSM, DF dan SA dalam pemrosesan CNC	Sampel disiapkan dengan dimensi masing-masing 140 mm x 50 mm x 18 mm prosedur. Tingkat kepadatan pinus Cedar of Lebanon diukur secara acak melalui 27 sampel. Sampel ini diproses dengan CNC 3 sumbu. Program Alpha-CAM digunakan untuk menentukan jalur alat untuk sampel.	Dalam karya ini, pengaruh pemesinan pinus Cedar of Lebanon (<i>Cedrus libani</i>), karakteristik kekasaran permukaan diselidiki. Proses optimasi diadopsi dengan pendekatan gabungan ortogonal L27 algoritma memancing simulasi berbasis array. Desain eksperimental tiga tingkat dan empat faktor diterapkan mengidentifikasi faktor yang paling signifikan, fungsi keinginan dan algoritma memancing yang disimulasikan digunakan untuk mengoptimalkan prosedur pemesinan.
Firstiawan, dkk	2018	Optimasi Parameter Proses Pemesinan Cnc Milling terhadap Kekasaran Permukaan Kayu Jati dengan Metode Taguchi	mengetahui pengaruh variasi parameter pemesinan CNC <i>milling</i> (kecepatan <i>spindle</i> , laju pemakanan, kedalaman pemakanan, dan arah potong serat kayu) terhadap tingkat kekasaran permukaan kayu jati.	Penelitian ini menggunakan metode Taguchi, dibantu dengan analisis varian Taguchi (ANOVA Taguchi) dan perangkat lunak Minitab 15, untuk mengoptimalkan parameter pemesinan dan menganalisis karakteristik performanya.	Kekasaran permukaan optimal yang didapatkan adalah $4,12 \pm 0,42 \mu\text{m}$. Parameter optimal dicapai pada kecepatan spindle 3000 rpm, laju pemakanan 400 mm/menit, kedalaman pemakanan 2 mm, dan arah potong tangensial. Arah potong tangensial menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang lebih kecil.

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Permasalahan	Metode	Hasil penelitian
PAIU, dkk	2020	CAD-CAM-CAE in Wood Industry. a Case Study for Perforated Ornaments Processed On Cnc Router	protokol routing CNC dengan menggunakan perangkat lunak canggih untuk merancang, simulasi dan pengolahan material berbahan dasar kayu, sehingga diperoleh dekorasi berlubang.	tiga jenis bahan yaitu kayu cemara, kayu lapis poplar dan MDF. Perangkat lunak Aspire digunakan untuk merancang jalur alat sederhana yang dibentuk oleh garis lurus dan melengkung untuk mensimulasikan proses penggilingan dan juga untuk mentransfer informasi ke router CNC.	Parameter proses yang dipilih adalah kecepatan spindel 12000 rpm untuk kayu cemara dan kayu lapis poplar dan 18000 rpm untuk MDF; laju umpan 2 m/mnt untuk kayu cemara, 3 m/mnt untuk kayu lapis, dan 3,5 m/mnt untuk MDF. Kedalaman potong yang konstan adalah 3 mm untuk semua bahan.. Hasil penelitian ditemukan nilainya adalah 10.000 rpm dan 18.000 rpm untuk kecepatan spindel, 2 m/mnt dan 8 m/mnt untuk kecepatan pengumpanan dan 2 mm hingga 5 mm untuk kedalaman potong.
Irawan, dkk	2019	Pengaruh <i>Spindle Speed, Feed Rate, dan Depth Of Cut</i> Terhadap Akurasi Hasil Permesinan Pada Mesin CNC Router 3 Sumbu	Pengaruh <i>Spindle Speed, Feed Rate dan Depth of Cut</i> terhadap akurasi hasil permesinan pada mesin CNC Router 3 sumbu	Metode eksperimen, dimana proses pengambilan data bahan sebagai sampel diproses permesinan dengan CNC Router dengan variabel, kemudian dilakukan pengukuran di sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z pada beda kerja hasil proses permesinnan tersebut.	Keakurasian benda kerja hasil proses permesinan pada mesin CNC Router dipengaruhi oleh <i>Spindle speed, Feed Rate dan Depth Of Cut</i> dengan pengaruh sebesar; 91,8 % pada sumbu X, 74.3% pada sumbu Y, dan 5.5 % pada sumbu Z. Selain dari pengaruh <i>Spindle speed, Feed Rate dan Depth Of Cut</i> keakurasian benda kerja hasil proses permesinan pada mesin CNC Router 8.2% pada sumbu X, 25.4% pada sumbu Y, 94.5% pada sumbu Z

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Permasalahan	Metode	Hasil penelitian
Nur, dkk	2021	Metode Taguchi Untuk Optimasi Proses Engraving CNC Router GWeike WK1212 untuk Kayu Mahoni	Mengidentifikasi seting <i>motion speed</i> , <i>spindle speed</i> , dan <i>depth of per cut</i> dan menentukan nilai setting optimal menggunakan metode Taguchi	Metode Taguchi untuk mencari parameter mesin yang optimal. Metode ini melibatkan beberapa tahap yaitu perencanaan, eksperimen hingga analisis data. Tujuan akhirnya untuk menemukan kombinasi pengaturan faktor-faktor yang menghasilkan produk dengan kualitas terbaik dan proses produksi yang stabil.	Dengan menggunakan metode Taguchi, penelitian ini menemukan pengaturan optimal untuk mesin CNC Router G-Weike WK1212 saat mengukir kayu mahoni. Pengaturan terbaik adalah <i>spindle speed</i> 8 step, <i>motion speed</i> 7 step, dan <i>depth of cut</i> 0,5 mm.
Rudak, dkk	2018	<i>Motion of Chips When Leaving the Cutting Zone during Chipboard Plane Milling</i>	menjelaskan dan menganalisis secara mendalam gerakan serpihan saat meninggalkan zona potong selama proses penggilingan bidang papan partikel (<i>chipboard</i>), termasuk efektivitas pengumpulannya dan pengaruh parameter <i>cut direction</i> terhadap aliran serpihan.	penggilingan <i>chipboard</i> dengan berbagai desain mata pisau dan parameter potong, kemudian memotret serta mengukur sudut keluaran serpihan, dan membandingkan hasilnya dengan perhitungan matematis yang dikembangkan.	menjelaskan dan menganalisis secara mendalam gerakan serpihan saat meninggalkan zona potong selama proses penggilingan bidang papan partikel (<i>chipboard</i>), termasuk efektivitas pengumpulannya dan pengaruh parameter alat terhadap aliran serpihan.

2.2. Dasar Teori

Dasar teori menjadi pedoman bagi penelitian, memberikan arah, dan menetapkan tujuan penelitian secara jelas. Referensi dari dasar teori membantu peneliti menyelesaikan masalah yang relevan dalam konteks penelitian ini. Dasar teori yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut.

2.2.1. Kayu

Kayu merupakan bahan alami yang telah digunakan oleh manusia sejak zaman purba untuk berbagai keperluan, mulai dari konstruksi hingga pembuatan perabotan. Secara umum, kayu dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu kayu keras (*hardwood*) dan kayu lunak (*softwood*). Kedua jenis kayu ini memiliki perbedaan dalam hal struktur, sifat fisik, dan penggunaan. Kayu keras berasal dari pohon berdaun lebar (*angiospermae*). Kayu keras memiliki serat yang padat dan umumnya lebih berat daripada kayu lunak. Selain perbedaan antara kayu keras dan lunak, penting juga untuk memahami karakteristik kayu yang mempengaruhi penggunaannya. Faktor-faktor seperti ketahanan terhadap serangga, kekuatan, dan kemampuan untuk diukir atau dibentuk menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan kayu untuk berbagai proyek.

Dalam industri manufaktur, kayu menjadi salah satu bahan baku yang memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi. Kayu adalah salah satu material alami yang dihasilkan dari batang pohon berdaun lebar atau jarum yang telah diolah untuk digunakan dalam berbagai proses produksi. Keberagaman jenis kayu memberikan fleksibilitas dalam pemilihan bahan sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik produk yang diinginkan. Kayu memiliki sifat mekanis yang unik, seperti kekuatan, kekerasan, dan elastisitas, yang membuatnya sesuai untuk berbagai keperluan. Sifat ini memungkinkan kayu digunakan dalam pembuatan perabotan, konstruksi bangunan, alat transportasi, kemasan, dan berbagai produk manufaktur lainnya. Jenis kayu keras, seperti jati, nangka, dan mindi, seringkali dipilih untuk produk yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan terhadap keausan.

Proses pengolahan kayu dalam industri manufaktur melibatkan serangkaian tahap, termasuk penebangan, pengupasan kulit kayu, pengeringan, dan pemrosesan lebih lanjut sesuai dengan kebutuhan spesifik. Penggunaan teknologi modern, seperti mesin CNC dalam pemotongan dan pembentukan kayu, telah meningkatkan efisiensi waktu dan akurasi dalam produksi. Selain aspek mekanis, kayu juga memiliki daya estetika yang signifikan. Pola serat kayu

dan warna alaminya memberikan keindahan visual pada produk akhir. Dengan keberagaman jenisnya, kayu tetap menjadi pilihan utama dalam industri manufaktur, menggambarkan keterhubungan antara keunggulan mekanis, keindahan visual, dan komitmen terhadap lingkungan dalam pengembangan produk-produk berkualitas.

2.2.1.1. Kayu Jati

Kayu jati, dengan nama ilmiah *Tectona grandis*, telah lama dikenal sebagai salah satu jenis kayu terbaik di dunia. Pohon jati yang berasal dari kawasan Asia Tenggara ini menghasilkan kayu keras dengan kualitas yang sangat tinggi. Karakteristik uniknya membuatnya menjadi primadona dalam industri perkayuan dan telah digunakan selama berabad-abad untuk berbagai keperluan. Salah satu keunggulan utama kayu jati adalah kekuatan dan keawetannya. Serat kayu jati yang rapat dan kandungan minyak alami di dalamnya membuatnya sangat tahan terhadap serangan hama seperti rayap dan jamur, serta mampu bertahan dalam kondisi cuaca ekstrem. Selain itu, kayu jati juga memiliki tingkat kelenturan yang baik, sehingga mudah dibentuk dan diukir menjadi berbagai macam desain.

Salah satu ciri khas yang paling mencolok dari kayu jati adalah variasi warna dan teksturnya yang unik. Hal ini membuat setiap potongan kayu jati memiliki karakteristik yang berbeda-beda, sehingga menciptakan kesan alami dan eksklusif pada produk jadi. Warna kayu jati umumnya berkisar antara kuning keemasan hingga coklat kemerahan. Semakin tua usia pohon, warna kayu cenderung semakin gelap dan kaya. Sedangkan bagian kayu yang masih hidup berwarna putih keabu-abuan. Tekstur kayu jati cenderung kasar dan tidak rata, dengan pori-pori yang cukup besar. Arah seratnya bisa lurus, bergelombang, atau bahkan berpadu. Kombinasi antara warna dan tekstur inilah yang menciptakan pola serat yang indah dan khas pada kayu jati.



Gambar 2.1. Kayu Jati

(sumber : <https://interlineindonesia.com/kayu-jati-untuk-interior-rumah/>)

Stabilitas dimensi merupakan salah satu karakteristik unggulan kayu jati yang membuatnya begitu dihargai. Kayu ini memiliki tingkat penyusutan dan pengembangan yang sangat rendah, sehingga bentuk dan ukurannya cenderung tetap konsisten meskipun mengalami fluktuasi suhu dan kelembaban lingkungan. Sifat ini sangat krusial, terutama dalam aplikasi furnitur dan konstruksi yang memerlukan tingkat presisi tinggi. Kemudahan dalam pengolahan merupakan nilai tambah lain yang melekat pada kayu jati. Meskipun tergolong kayu keras, kayu jati relatif mudah dikerjakan baik dengan menggunakan peralatan tradisional maupun mesin modern. Hal ini memungkinkan para pengrajin untuk mewujudkan berbagai desain yang kompleks dan detail, sehingga menghasilkan produk akhir yang estetik dan berkualitas tinggi. Kandungan minyak alami dalam kayu jati berperan sebagai pelindung alami terhadap serangan hama dan pengaruh cuaca. Minyak ini juga memberikan permukaan kayu jati kilau alami dan tekstur yang halus. Namun, kandungan minyak yang tinggi ini dapat menyulitkan proses pengecatan, sehingga seringkali warna alami kayu jati justru dijadikan sebagai daya tarik utama.



Gambar 2.2. Hasil Akhir Kayu Jati

(sumber : <https://trembesisolid.com/product/jual-meja-makan-kayu-jati-tebal-terbaru/>)

2.2.1.2. Kayu Nangka

Kayu nangka adalah jenis kayu yang berasal dari pohon nangka (*Artocarpus heterophyllus*). Pohon ini banyak ditemukan di wilayah tropis, termasuk Indonesia. Kayu nangka memiliki karakteristik unik yang membuatnya banyak digunakan dalam berbagai bidang, terutama dalam industri per kayu. Beberapa karakteristik kayu nangka yang relevan dengan industri manufaktur adalah sebagai berikut. Sifat kuat dan tahan lama, sifat inilah yang menjadikan kayu nangka cocok digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan dasar pembuatan furnitur seperti daun pintu. Sifat ketahanan terhadap cuaca dan serangan hama juga membuat produk berbahan kayu nangka memiliki umur pakai yang panjang.

Kayu nangka memiliki tekstur yang relatif mudah dikerjakan, baik dengan menggunakan alat-alat tradisional maupun mesin modern seperti CNC Router. Hal ini memungkinkan para pengrajin dan produsen untuk menciptakan desain yang kompleks dan detail. Sifatnya yang stabil terhadap perubahan suhu dan kelembaban, sehingga meminimalkan risiko terjadinya perubahan bentuk atau retak pada produk jadi. Estetika yang menarik juga menjadi salah satu karakteristik pada kayu nangka karena corak serat kayu nangka yang unik memberikan tampilan yang natural dan elegan pada produk akhir.



Gambar 2.3. Kayu Nangka

(sumber : <https://www.rajawaliparket.com/2022/11/kayu-nangka.html>)

Kayu nangka (Gambar 2.3) memiliki tekstur yang halus dan serat yang beragam, dengan pola serat yang umumnya lurus, namun kadang-kadang sedikit bergelombang atau berombak. Tekstur halus ini membuat permukaan kayu terasa lembut dan mudah diolah, sehingga cocok untuk proses pengamplasan, ukiran, dan finishing. Pola serat yang menarik memberikan tampilan estetis alami, sehingga sering digunakan untuk membuat produk mebel yang ingin menonjolkan keindahan kayu secara alami. Kayu dengan serat lurus biasanya lebih mudah dipotong dan diolah, sementara serat yang bergelombang atau berpola memberikan efek visual yang lebih menarik dan artistik pada produk jadi.

Dalam hal kekuatan dan kekerasan, kayu nangka tergolong kayu dengan tingkat kekuatan sedang hingga tinggi. Kekerasannya membuatnya cukup tahan terhadap goresan dan benturan, sehingga cocok untuk digunakan pada produk yang memerlukan daya tahan, seperti meja, kursi, dan pintu. Meskipun tidak sekeras kayu jati atau merbau, kayu nangka memiliki kekuatan struktural yang cukup untuk mendukung beban, menjadikannya bahan yang dapat diandalkan untuk pembuatan mebel berat maupun ringan. Namun, sifatnya yang cukup keras tidak berarti sulit diolah; justru kekerasan yang moderat ini memungkinkan kayu nangka diukir dengan detail tanpa mudah retak, terutama ketika menggunakan peralatan modern seperti CNC Router. Kekuatan ini juga memberikan ketahanan terhadap deformasi, yang berarti kayu nangka lebih stabil dalam jangka panjang dan tidak mudah melengkung atau menyusut setelah pengolahan.

Warna dan penampilan kayu nangka (Gambar 2.4) adalah salah satu daya tarik utamanya. Kayu ini memiliki warna dasar yang kuning keemasan hingga coklat kekuningan, yang bisa menjadi semakin dalam dan kaya seiring berjalannya waktu karena proses oksidasi. Warna alaminya yang hangat dan cerah memberikan kesan elegan dan alami, menjadikannya ideal untuk produk yang ingin menonjolkan estetika kayu murni. Pola serat yang terlihat jelas pada permukaan kayu nangka memberikan kesan dinamis dan hidup, menciptakan nuansa alami yang disukai dalam desain interior klasik maupun kontemporer. Warna ini juga memiliki keunggulan karena mudah dipadukan dengan finishing yang berbeda, baik untuk mempertahankan tampilan natural atau mengaplikasikan warna lain. Permukaan kayu nangka dapat difinishing dengan lapisan pernis yang memberikan efek mengkilap, atau menggunakan minyak untuk hasil akhir yang lebih matte dan alami, memungkinkan berbagai variasi tampilan sesuai kebutuhan desain.



Gambar 2.4. Hasil Akhir Kayu Nangka

(sumber : https://www.tokopedia.com/storebutar/papan-meja-kayu-nangka-storebutar?utm_source=google&utm_medium=organic&utm_campaign=pdp)

2.2.1.3. Kayu Mindi

Kayu mindi (Gambar 2.5) yang juga dikenal sebagai *Melia azedarach*, adalah jenis kayu keras yang berasal dari pohon mindi. Pohon ini ditemukan di berbagai wilayah di Asia, termasuk Indonesia, dan memiliki karaktersitik dan sifat-sifat yang membuatnya cocok untuk berbagai keperluan dalam aplikasi di industri

manufaktur. Salah satu ciri utama kayu mindi adalah kepadatan dan kekerasannya yang cukup tinggi. Kekerasan kayu ini memberikan kestabilan yang baik pada berbagai kondisi lingkungan, termasuk perubahan suhu dan kelembaban. Hal ini membuatnya menjadi bahan yang cocok untuk digunakan dalam pembuatan perabotan, lantai, dan berbagai produk manufaktur. Keunggulan kayu mindi tidak hanya terletak pada sifat fisiknya yang kokoh, tetapi juga pada warna dan serat kayunya yang menarik. Kayu mindi umumnya memiliki warna yang bervariasi antara cokelat muda hingga cokelat tua, memberikan sentuhan estetika yang alami pada produk akhir. Kayu mindi juga dikenal memiliki serat yang lurus dan padat sehingga membuatnya mudah untuk diproses dan diolah. Serat kayu mindi juga dapat membentuk pola yang menarik sehingga menambah nilai seni pada berbagai produk manufaktur.



Gambar 2.5. Kayu Mindi

(sumber : <https://www.lemkayu.net/mengenal-kayu-mindi-dan-pemanfaatannya-lengkap-5409.html>)

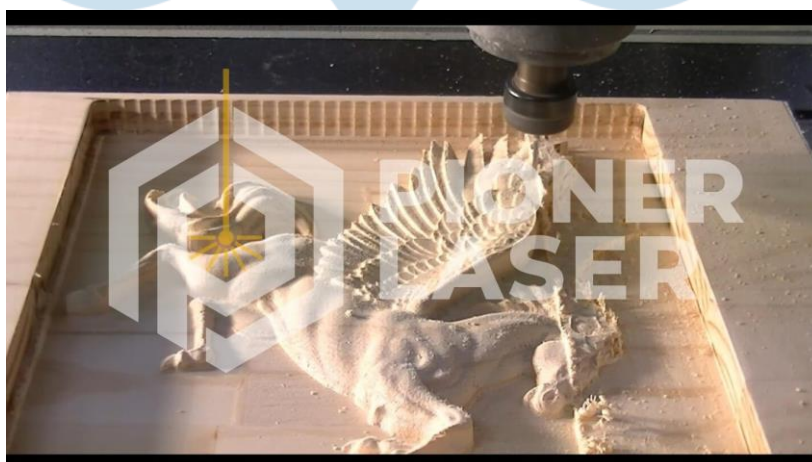
Dalam konteks industri manufaktur, kayu mindi sering digunakan untuk pembuatan furnitur (Gambar 2.6), terutama karena kekuatan dan daya tahan terhadap tekanan. Penggunaan kayu mindi tidak terbatas pada furnitur saja, tetapi juga meluas ke pembuatan bingkai pintu, jendela, dan elemen arsitektur lainnya. Kayu mindi sering menjadi pilihan dalam proyek-proyek konstruksi dan pembuatan produk kayu karena sifatnya yang tahan terhadap hama dan penyakit kayu. Oleh karena itu, kayu mindi menjadi bahan baku yang unggul dari segi kualitas.



Gambar 2.6. Hasil Akhir Kayu Mindi
(sumber : <https://courtina.id/kayu-mindi-solid/>)

2.2.2. Milling CNC

Milling CNC (Gambar 2.7) merupakan suatu proses manufaktur subtraktif yang memanfaatkan teknologi komputer untuk mengontrol pergerakan alat potong dalam membentuk sebuah benda kerja. Proses ini melibatkan sebuah mesin CNC yang dilengkapi dengan pahat berputar sebagai alat potong utama. Pahat ini akan bergerak secara presisi mengikuti program yang telah diinputkan ke dalam mesin, sehingga material yang tidak diperlukan pada benda kerja akan dihilangkan secara bertahap. Program CNC ini berisi instruksi-instruksi yang sangat detail mengenai gerakan pahat, kecepatan potong, dan parameter lainnya.



Gambar 2.7. Proses Milling CNC

(sumber : <https://pionerlaser.com/wp-content/uploads/2019/10/Jasa-CNC-Router-Kayu-Bandung.jpg>)

Keunggulan utama dari proses *milling* CNC adalah kemampuannya menghasilkan benda kerja dengan tingkat akurasi dan presisi yang tinggi, serta fleksibilitas dalam memproduksi berbagai bentuk geometri yang kompleks. Proses ini diawali dengan pembuatan desain tiga dimensi (3D) menggunakan *software* CAD (*Computer-Aided Design*). Desain 3D ini kemudian dikonversi menjadi kode *G-code* yang dapat dipahami oleh mesin CNC melalui *software* CAM (*Computer-Aided Manufacturing*). Kode *G-code* ini berisi instruksi-instruksi numerik yang mendefinisikan jalur pergerakan pahat, kecepatan potong, dan parameter lainnya. Setelah program CNC siap, benda kerja yang akan dikerjakan akan diikat dengan kuat pada meja mesin menggunakan *fixture*.

Mesin CNC kemudian akan menjalankan program CNC, menggerakkan pahat sesuai dengan instruksi yang telah diberikan. Material akan dihilangkan secara bertahap hingga terbentuk bentuk benda kerja yang diinginkan. Proses *milling* CNC banyak diaplikasikan dalam berbagai industri, seperti otomotif, *aerospace*, medis, dan elektronik, untuk menghasilkan komponen-komponen dengan toleransi yang sangat ketat. Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil akhir proses *milling* CNC antara lain adalah jenis material, jenis pahat, kecepatan potong, kecepatan pemakanan, kedalaman potong, lebar potong, pendinginan, dan kekakuan sistem. Dengan memahami prinsip kerja dan faktor-faktor yang mempengaruhi proses *milling* CNC, operator dapat mengoptimalkan penggunaan mesin CNC untuk menghasilkan produk yang berkualitas tinggi dan memenuhi kebutuhan industri.

2.2.3. PowerMill 2016

PowerMill 2016 (Gambar 2.8), adalah sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Autodesk, memiliki fungsi khusus untuk mendukung pembuatan program kontrol pada mesin CNC Router 3 sumbu (Cherpol, 2020). Perangkat lunak ini memiliki peran utama dalam sektor manufaktur, terutama dalam proses pemesinan yang melibatkan mesin CNC. Kemampuannya dalam membaca file CAD dalam format .VDA, .STL dan .IGES yang memberikan kemudahan kepada operator untuk mengimpor dan mengeksport desain mereka ke dalam *software* ini. Penerapannya yang luas terutama berfokus pada sektor-sektor kritis seperti otomotif, industri perkakas, dan penggunaan teknologi di bidang ruang angkasa.



Gambar 2.8. Software Powermill 2016

(sumber : <https://e-journal.uajy.ac.id/14028/3/TI074572.pdf>)

Keunggulan PowerMill 2016 tidak hanya terletak pada kemampuannya dalam mengelola model 2D dan vektor, melainkan juga pada fungsionalitasnya dalam pembuatan titik, pencarian koordinat, dan kemampuan mencerminkan proyek, memungkinkan pembuatan produk dengan tingkat presisi yang tinggi. Fitur-fitur ini memberikan fleksibilitas kepada operator dalam menciptakan produk dengan kontur yang detail dan presisi tinggi serta dapat menghasilkan hasil pemotongan yang halus dan jelas pada permukaan produk. PowerMill 2016 juga menawarkan berbagai fitur perintah dan menu yang memudahkan operator dalam proses pembuatan, termasuk menu *NC Program* untuk memuat *NC code*, menu *tools* untuk pemilihan alat yang digunakan seperti *cutter* beserta diameternya, menu *pattern*, menu *boundaries*, menu *toolpath* untuk pengeditan dan estimasi waktu menu *feature set*, menu *levels*, menu *models*, dan tampilan *workplane*. Oleh karena itu, PowerMill 2016 tidak hanya berperan sebagai alat bantu krusial dalam pembuatan program kontrol untuk mesin CNC, tetapi juga berkontribusi pada optimalisasi efisiensi waktu proses permesinan dan peningkatan kualitas produk akhir.

2.2.4. CNC Router

Mesin CNC Router yang merupakan singkatan dari *Computer Numerical Control Router* (Gambar 2.9), adalah jenis mesin perkakas yang digunakan untuk melakukan pemotongan, ukiran, dan pembentukan benda kerja berbasis koordinat yang telah diprogram secara digital. Mesin ini menggabungkan teknologi CNC dengan pergerakan tiga atau lebih sumbu, umumnya x, y, dan z, untuk mencapai presisi tinggi dalam proses pemesinan. Pada dasarnya, CNC Router adalah evolusi dari mesin router manual tradisional, di mana kendali

digital menggantikan operasi manual. Mesin CNC Router biasanya digunakan dalam berbagai industri, termasuk manufaktur kayu, logam, plastik, dan industri kreatif seperti pembuatan model atau seni ukir. Keunggulan utama CNC Router terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan produk dengan akurasi yang tinggi dan konsistensi, serta mampu memproses berbagai jenis material dengan hasil yang presisi.



Gambar 2.9. CNC Router 3 Axis

(sumber : <https://www.hendrickmanufacturing.com/hld-l-series-3-axis-cnc-router/>)

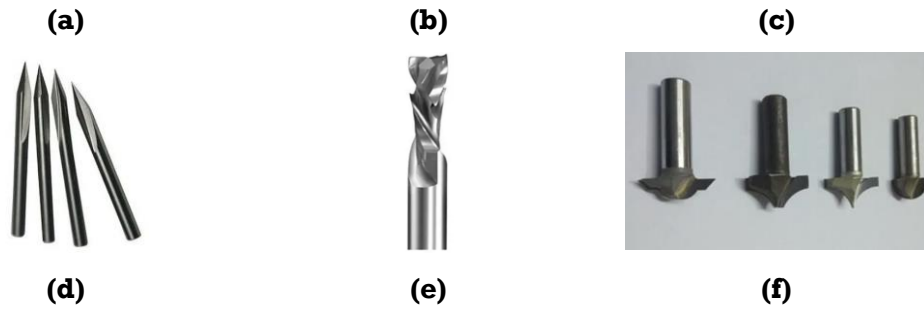
Proses kerja CNC Router dimulai dengan membuat desain digital menggunakan perangkat lunak CAD/CAM. Setelah desain selesai, program tersebut diunggah ke mesin CNC Router, yang kemudian akan membaca instruksi tersebut dan menggerakkan alat pemotong (*spindle*) sesuai dengan koordinat yang telah ditentukan. Ini memungkinkan mesin untuk melakukan pemotongan, ukiran, atau pembentukan material sesuai dengan desain yang telah diprogram. Kelebihan mesin CNC Router melibatkan efisiensi tinggi dalam produksi, kemampuan menghasilkan produk dengan tingkat detail yang tinggi, dan fleksibilitas dalam mengubah desain tanpa perlu mengganti alat. Mesin ini juga memungkinkan penggunaan berbagai jenis bahan, mulai dari kayu, logam, hingga plastik. Meskipun memiliki banyak keunggulan, penggunaan mesin CNC Router juga memerlukan pemahaman yang baik tentang pemrograman dan pengoperasian mesin tersebut. Oleh karena itu, pelatihan dan keterampilan teknis dalam menggunakan perangkat lunak CAD/CAM dan pengaturan mesin CNC menjadi kunci untuk memaksimalkan potensi mesin ini dalam lingkungan produksi modern.

2.2.4.1. Cutting Tools

Cutting tools pada CNC Router adalah perangkat pemotong yang digunakan dalam sistem CNC untuk mengolah material seperti kayu, plastik, logam ringan, atau material lainnya. *Cutting tools* untuk material kayu dalam mesin CNC Router memainkan peran krusial dalam mencapai hasil pemotongan yang akurat dan efisien. Pemilihan *cutting tools* yang tepat sangat penting karena berdampak langsung pada kualitas pemotongan, kecepatan produksi, dan umur pemotongan. Sejumlah faktor perlu dipertimbangkan dalam pemilihan *cutting tools*, seperti jenis kayu yang akan diproses, tekstur dan kekerasan kayu, serta desain geometri produk yang diinginkan.

Berikut adalah beberapa jenis *cutting tools* yang umum digunakan pada CNC Router. *Cutting tools* yang pertama yaitu jenis *End Mills* (Gambar 2.10.a), merupakan *cutting tools* paling umum pada CNC Router, *cutting tools* ini memiliki ujung potong silindris dan dapat digunakan untuk berbagai jenis pemotongan termasuk pemotongan datar, kontur, dan lubang. Kedua terdapat jenis *V-Bits* (Gambar 2.10.b), yang digunakan untuk membuat garis dan detail tajam pada material, *cutting tools* ini sering digunakan untuk mengukir huruf dan desain artistik pada kayu. Ketiga ada jenis *Ball Nose End Mills* (Gambar 2.10.c), yang memiliki ujung potong bola dan digunakan untuk membuat pemotongan dengan radius melengkung. *Cutting tools* ini cocok untuk pemotongan 3D dan permukaan yang melengkung. Selanjutnya ada jenis *Straight Flute Bits* (Gambar 2.10.d), yang digunakan untuk pemotongan material plastik dan aluminium. *Cutting tools* ini memiliki *flut* lurus yang efektif untuk membuang serpihan dan panas dari material. Selanjutnya terdapat jenis *Compression Bits* (Gambar 2.10.e), yang digunakan untuk pemotongan laminasi dan bahan komposit. Jenis ini memiliki ujung potong yang berbeda, dengan bagian atas berpotongan ke atas dan bagian bawah berpotongan ke bawah yang bertujuan untuk meminimalkan risiko serpihan. Terakhir ada jenis *Router Bits* (Gambar 2.10.f), yang merupakan jenis umum lainnya yang mencakup berbagai bentuk dan ukuran untuk pemotongan dan pengukiran.





Gambar 2.10. Tipe Cutting Tools ; a. End Mills ; b. V-Bits ; c. Ball Nose End Mills ; d. Straight Flute Bits ; e. Compression Bits ; f. Router Bits

(sumber : <https://www.elephant-cnc.com/blog/complete-buyer-guide-of-cnc-router-bits/>)

Pemilihan *cutting tools* pada CNC Router tergantung pada jenis material yang akan diproses, jenis pemotongan yang diinginkan, dan kebutuhan desain. Pengaturan parameter pemotongan seperti *toolpath strategy*, *cut direction*, *feed rate*, *spindle speed*, dll juga memengaruhi hasil akhir dari proses pemotongan CNC Router. Selain itu, pemilihan bahan cutting tools, seperti karbida tungsten, menjadi faktor kunci dalam menanggulangi abrasi dan memperpanjang umur pemotongan. Sistem pendingin dan penyemprotan debu juga penting untuk menjaga keberlanjutan operasi dan mencegah overheating. Dengan memahami karakteristik material kayu, persyaratan desain produk, dan kondisi operasional mesin CNC Router, pemilihan dan pengaturan optimal cutting tools akan membantu mencapai efisiensi produksi maksimal dan hasil akhir yang memuaskan.

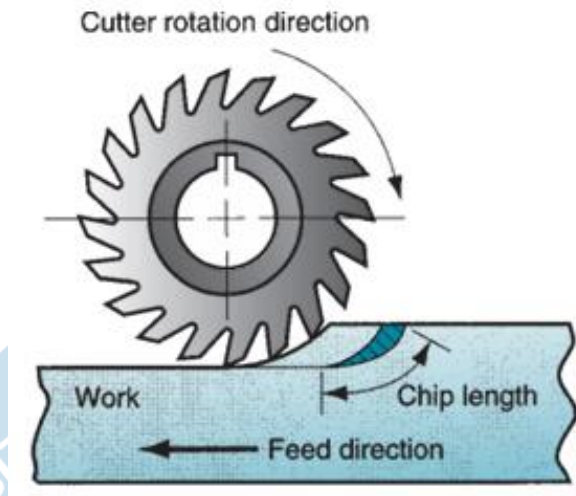
2.2.4.2. Cut Direction

Dalam dunia permesinan CNC, arah pemotongan atau *cut direction* memegang peranan penting dalam menentukan kualitas hasil akhir, umur mata pahat, dan efisiensi produksi. Terdapat tiga jenis arah pemotongan utama yang umum digunakan, yaitu *climb milling (climb down)*, *conventional milling (climb up)*, dan *any*.

a. Climb Milling (Climb Down)

Pada *climb milling*, mata pahat berputar searah dengan arah pergerakan benda kerja yang berarti bahwa mata pahat memotong material dengan ketebalan *chip* yang dimulai dari maksimum dan berkurang hingga nol. Kelebihan *climb milling* adalah menghasilkan hasil permukaan yang lebih baik, mengurangi getaran pada mata pahat, dan meningkatkan umur mata pahat. Namun, *climb milling* juga

dapat memberikan tekanan pemotongan yang lebih besar pada mata pahat dan benda kerja, sehingga perlu diperhatikan kekuatan dan kekakuan peralatan.

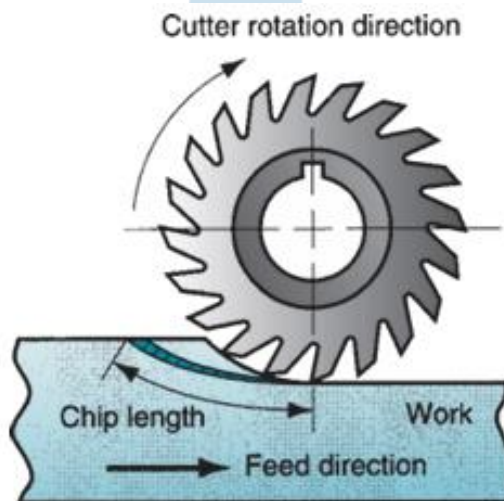


Gambar 2.11. Cut Direction Climb Milling (Climb Down)

(sumber : *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Mikell P. Groover)

b. Conventional Milling (Climb Up)

Pada *conventional milling*, mata pahat berputar berlawanan arah dengan arah pergerakan benda kerja. Ini berarti bahwa mata pahat memotong material dengan ketebalan *chip* yang dimulai dari nol dan meningkat hingga maksimum. Kelebihan *conventional milling* adalah memberikan tekanan pemotongan yang lebih rendah pada mata pahat dan benda kerja, sehingga cocok untuk memotong material yang keras atau menggunakan mata pahat yang sudah tumpul. Namun, *conventional milling* cenderung menghasilkan hasil permukaan yang lebih kasar dan meningkatkan getaran pada mata pahat.



Gambar 2.12. Cut Direction Conventional Milling (Climb Up)

(sumber : *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Mikell P. Groover)

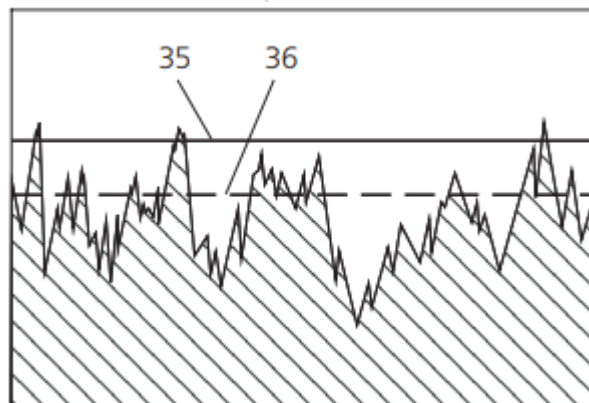
c. *Any*

Opsi "*any*" pada mesin CNC memberikan fleksibilitas kepada mesin untuk memilih arah pemotongan yang paling efisien berdasarkan geometri benda kerja dan parameter pemotongan lainnya. Dalam beberapa kondisi opsi *any* akan melakukan pergantian arah pemotongan antara *climb* dan *conventional*. Hal ini memungkinkan mesin untuk mengoptimalkan proses pemotongan dan mencapai hasil yang terbaik.

2.2.5. Surface Roughness

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada kayu merujuk pada tingkat ketidakrataan atau kekasaran yang terdapat pada permukaan kayu setelah melalui proses pengolahan. Ketidakrataan ini dapat berupa serat kayu yang terangkat, goresan alat potong, atau pori-pori kayu yang terbuka. Tingkat kekasaran permukaan kayu sangat dipengaruhi oleh jenis kayu, metode pengolahan, serta alat yang digunakan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan kayu adalah jenis kayu, kadar air kayu, metode pengolahan, alat potong, parameter pemotongan, arah serat kayu.

Faktor jenis kayu dikarenakan terdapat struktur serat kayu yang berbeda-beda akan menghasilkan tingkat kekasaran yang berbeda pula. Kayu dengan serat lurus cenderung lebih mudah menghasilkan permukaan yang halus dibandingkan kayu dengan serat berkelok-kelok. Faktor kadar air kayu dikarenakan kadar air kayu yang tinggi dapat menyebabkan kayu menjadi lebih lunak dan mudah berubah bentuk saat diproses, sehingga dapat mempengaruhi kekasaran permukaan. Faktor metode pengolahan dikarenakan metode pengolahan seperti penggergajian, penyerutan, atau pengamplasan akan menghasilkan tingkat kekasaran yang berbeda.



Gambar 2.13. Contoh Grafik Saat Pengukuran Kekasaran Permukaan

(sumber : <https://www.pruefmittel24.com/documents/93010010-PS1-Betriebsanleitung.pdf>)

Faktor alat potong dikarenakan jenis dan kondisi alat potong seperti pisau gergaji, pisau planer, atau amplas akan sangat mempengaruhi hasil akhir permukaan kayu. Faktor parameter pemotongan dikarenakan beberapa parameter seperti kecepatan potong, kecepatan pemakanan, dan kedalaman potong akan berpengaruh pada tingkat kekasaran permukaan. Faktor arah serat kayu dikarenakan arah pemotongan terhadap arah serat kayu juga akan mempengaruhi hasil akhir. Pemotongan searah serat umumnya menghasilkan permukaan yang lebih halus dibandingkan pemotongan menyilang serat. Untuk mengukur kekasaran permukaan kayu, umumnya digunakan profilometer atau alat ukur kekasaran permukaan lainnya, dan dalam penelitian ini menggunakan alat *MarSurf PS1*.

2.2.5.1. MarSurf PS1

MarSurf PS1 (Gambar 2.12) adalah salah satu jenis profilometer *stylus* yang digunakan secara luas dalam industri manufaktur untuk mengukur kekasaran permukaan suatu benda kerja. Alat ini dirancang untuk memberikan hasil pengukuran yang akurat dan presisi, sehingga sangat berguna dalam mengontrol kualitas produk. *MarSurf PS1* bekerja dengan cara menggerakkan sebuah *stylus* berujung tajam melintasi permukaan benda kerja. *Stylus* ini akan mengikuti kontur permukaan yang tidak rata, sehingga menghasilkan sinyal listrik yang merepresentasikan profil permukaan tersebut. Sinyal listrik ini kemudian diolah oleh perangkat elektronik dalam alat ukur untuk menghasilkan nilai-nilai kekasaran permukaan seperti:

1. *Ra (Average Roughness)*: Nilai rata-rata deviasi absolut profil permukaan dari garis tengah. Ini adalah parameter yang paling umum digunakan untuk menggambarkan kekasaran permukaan secara keseluruhan.
2. *Rz (Maximum Profile Peak to Valley Height)*: Jarak vertikal antara puncak tertinggi dan lembah terdalam dalam panjang pengukuran tertentu.
3. *Rq (Root Mean Square Roughness)*: Nilai efektif dari deviasi profil permukaan dari garis tengah.



Gambar 2.14. MarSurf PS1

(sumber : <https://hammondcompany.com/product/marsurf-ps1/>)

Beberapa komponen utama dalam alat *MarSurf PS1* adalah *stylus*, *actuator*, *transduser*, elektronik, layar tampilan. *Stylus* merupakan bagian yang bersentuhan langsung dengan permukaan benda kerja. Terbuat dari bahan yang keras dan tahan aus, seperti intan atau safir. *Actuator* untuk menggerakkan *stylus* melintasi permukaan benda kerja secara linier. *Transduser* untuk mengubah gerakan vertikal *stylus* menjadi sinyal listrik. Elektronik untuk menganalisis sinyal listrik dan menghitung nilai-nilai kekasaran. Layar Tampilan untuk menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk grafik dan nilai numerik.

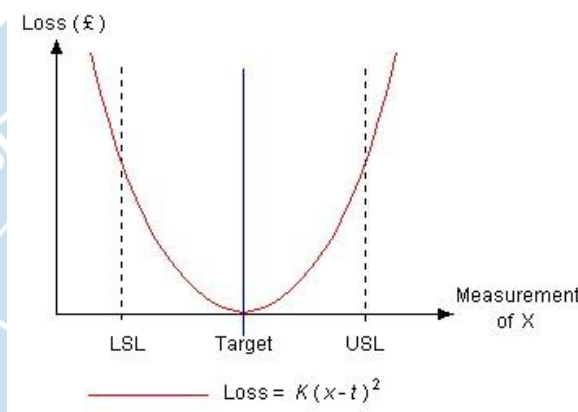
Keunggulan pada alat *MarSurf PS1* adalah akurasi tinggi karena mampu mengukur kekasaran permukaan dengan tingkat akurasi yang sangat baik, fleksibilitas karena dapat digunakan untuk mengukur berbagai jenis material dan bentuk permukaan, pengoperasian mudah karena dilengkapi dengan antarmuka (*interface*) yang *user-friendly*, fitur lengkap karena banyak model *MarSurf PS1* yang dilengkapi dengan fitur tambahan, seperti analisis profil permukaan yang lebih detail.

2.2.6. Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah suatu pendekatan eksperimental yang sangat efektif untuk mengoptimalkan proses dan produk. Metode ini dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi dan telah banyak digunakan dalam berbagai industri, termasuk manufaktur. Tujuan utama dari metode Taguchi adalah untuk mencapai kualitas produk yang tinggi dengan biaya yang rendah dan waktu yang singkat. Tidak hanya untuk memenuhi spesifikasi minimum, Metode Taguchi bertujuan untuk mencapai nilai target yang optimal untuk setiap karakteristik kualitas.

2.2.6.1. Fungsi Kehilangan

Fungsi Kehilangan adalah suatu konsep matematis yang menggambarkan hubungan antara nilai aktual suatu karakteristik kualitas produk dengan besarnya kerugian yang timbul akibat penyimpangan dari nilai target yang telah ditetapkan. Konsep ini merupakan salah satu pilar utama dalam Metode Taguchi. Berdasarkan Gambar 2.13 dibawah, memberikan representasi visual yang sangat baik mengenai fungsi kehilangan. Kurva parabola pada gambar menunjukkan bahwa semakin jauh nilai aktual dari nilai target, maka kerugian yang timbul akan semakin besar.



Gambar 2.15. Fungsi Kehilangan Kualitas Simetris

(sumber : <https://www.sentrakalibrasiindustri.com/metode-taguchi-untuk-optimisasi-proses-produksi/>)

Beberapa simbol yang ada pada fungsi kehilangan kualitas simetris sebagai berikut:

- Sumbu-X: Menunjukkan nilai pengukuran suatu karakteristik kualitas produk (misalnya, dimensi, kekuatan, dll.).
- Sumbu-Y: Menunjukkan besarnya kerugian atau biaya yang timbul akibat penyimpangan nilai pengukuran dari nilai target.
- Target: Nilai ideal atau target yang diinginkan untuk karakteristik kualitas tersebut.
- LSL (*Lower Specification Limit*): Batas bawah spesifikasi yang masih dapat diterima.
- USL (*Upper Specification Limit*): Batas atas spesifikasi yang masih dapat diterima.

Kurva kehilangan berbentuk parabola sehingga menunjukkan bahwa semakin jauh nilai pengukuran dari nilai target, maka kerugian yang timbul akan semakin

besar. Persamaan kurva ini umumnya adalah kuadrat yaitu $Loss = K(x-t)^2$, di mana:

K: Konstanta proporsionalitas

x: Nilai pengukuran aktual

t: Nilai target

Dalam konteks CNC router, metode taguchi dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter-parameter pemotongan seperti jenis kayu yang digunakan, *toolpath strategy*, *cut direction*, kecepatan *spindle*, kecepatan pemakanan, kedalaman potong, dll. Tujuannya adalah untuk mendapatkan hasil pemotongan yang optimal, seperti kekasaran permukaan yang rendah, akurasi dimensi yang tinggi, dan umur pahat yang panjang. Keuntungan menggunakan metode taguchi yaitu efisiensi karena dapat mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan dibandingkan dengan metode eksperimen tradisional, akurasi karena hasil yang diperoleh lebih akurat dan reliabel, fleksibilitas karena dapat diterapkan pada berbagai jenis masalah optimasi.

2.2.7. Minitab Statistical Software 2019

Minitab Statistical Software 2019 (Gambar 2.14) merupakan perangkat lunak statistik yang dapat membantu peneliti untuk melakukan analisis parameter pada mesin CNC router dengan tujuan meningkatkan kualitas hasil *surface* dan efisiensi produksi produk material kayu. Perangkat lunak ini menawarkan berbagai alat dan fitur yang dapat membantu peneliti dalam menyelesaikan tugas akhir dengan efektif dan efisien.



Gambar 2.16. Software Minitab 19

(sumber : <https://lanjutnews.com/minitab/>)

Minitab memungkinkan peneliti untuk menganalisis data parameter mesin CNC router secara komprehensif. Di *software* Minitab dapat melakukan analisis deskriptif untuk memahami karakteristik data, analisis inferensial untuk menguji hipotesis dan membangun model regresi, serta desain eksperimen Taguchi untuk mengoptimalkan kinerja mesin. Visualisasi data yang kuat dalam Minitab membantu peneliti memahami pola dan tren dalam data dengan mudah.

Interpretasi hasil analisis juga dipermudah dengan tabel dan ringkasan yang informatif. Minitab juga dapat membantu mengidentifikasi faktor-faktor signifikan yang memengaruhi kualitas hasil *surface* dan efisiensi waktu proses produksi. Hal ini memungkinkan peneliti untuk menentukan parameter optimal pada mesin CNC router, sehingga dapat menghasilkan produk material kayu dengan kualitas yang lebih tinggi dan lebih efisien terhadap waktu proses produksi.

