

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Mahendra A., dkk., (2023) mengatakan bawasannya Parameter proses pemotongan yang maksimal akan menghasilkan laju pemakanan material yang tinggi, sehingga dapat menghasilkan pula kekasaran permukaan (Ra) yang sesuai dengan yang diinginkan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan terendah yang dihasilkan oleh proses dari CNC milling dengan parameter yang digunakan dan untuk mengetahui tingkat kekasaran permukaan aluminium dengan menggunakan kedalaman potong, kecepatan potong, dan kecepatan putar untuk meningkatkan kualitas produk dan proses dalam waktu yang hampir bersamaan. Hasil optimasi ini digunakan untuk menguji pertimbangan operator saat menentukan kombinasi untuk mendapatkan nilai optimal.

Firmansyah Y. R. & Hasyim B. A., (2014) membahas tentang pengaruh parameter machining terhadap hasil akhir proses menggunakan benda kerja aluminium 2023 pada mesin CNC Milling TU-3A. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh variasi kedalaman pemakanan dan kecepatan pemakanan terhadap tingkat kekasaran, dan mengetahui pengaruh variasi jumlah mata sayat pahat endmill cutter 2 flute dan 4 flute. Hasil dari penelitian ini adalah semakin dalam pemakanan dan semakin sedikit jumlah mata sayat pahat maka tingkat kekasaran permukaan benda kerja akan semakin tinggi, semakin rendah kecepatan pemakanan maka semakin rendah tingkat kekasaran permukaan benda kerja, dan semakin banyak jumlah mata sayat maka semakin rendah tingkat kekasaran permukaan benda kerja.

Rahman M. A., (2022) mengatakan Proses permesinan dengan menggunakan CNC milling router 3 axis, pahat endmill jumlah 2 flute dan 4 flute yang dipakai dan dengan kecepatan spindel 10080 rpm untuk *depth of cut*

0.3 mm. Tujuan penelitian ini adalah Ada tidaknya pengaruh variasi jumlah mata sayat pahat potong terhadap tingkat kekasaran permukaan benda kerja hasil pemesian Mesin CNC router Milling 3 axis melalui uji kekasaran permukaan (Surface roughness tester) dan Untuk mengetahui pengaruh dari jumlah mata sayat pahat potong terhadap material yang terbuang atau *Material Removal Rate* (MRR), menggunakan mesin CNC Router 3 axis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa untuk pengujian MRR (*Material Removal Rate*) didapatkan bahwa dengan menggunakan pahat endmill 4 flout banyak material tertinggal dengan 3.3 gr.

Menurut Ramadhani N. A., dkk (2026) mengatakan bahwa proses anodizing dapat mengubah karakteristik permukaan melalui reaksi oksidasi elektrokimia yang membentuk lapisan aluminium oksida dan memodifikasi topografi permukaan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh proses anodizing terhadap kekasaran permukaan dan densitas aluminium 5058 dibandingkan dengan kondisi non treatment. Penelitian menggunakan metode eksperimen kuantitatif dengan spesimen aluminium berukuran 2×2 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen anodizing memiliki nilai rata-rata *Ra* sebesar 0,59 μm , *Rz* sebesar 4,78 μm , dan *Rq* sebesar 0,77 μm , sedangkan spesimen non-treatment memiliki nilai rata-rata *Ra* sebesar 0,20 μm , *Rz* sebesar 1,54 μm , dan *Rq* sebesar 0,28 μm . Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa anodizing membentuk tekstur oksida yang lebih kasar pada permukaan aluminium. Hasil pengujian densitas menunjukkan nilai 2,7058 g/cm³ pada spesimen non-treatment dan 2,7088 g/cm³ pada spesimen anodizing, dengan selisih sangat kecil sebesar 0,0030 g/cm³. Dengan demikian, anodizing berpengaruh nyata terhadap topografi permukaan, tetapi tidak memberikan perubahan signifikan terhadap densitas material. Temuan ini menunjukkan bahwa anodizing lebih berperan sebagai proses modifikasi permukaan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Aluminium

Aluminium, yang paling melimpah kedua setelah baja, merupakan logam yang umum. Di antara fitur yang paling menonjol adalah tingkat fleksibilitas yang tinggi dan ketahanan yang sangat baik terhadap korosi di sebagian besar kondisi lingkungan. Aluminium merupakan sejenis logam campuran yang ringan dengan berat jenis 2,7 gram/cm³. Konduktivitas listriknya 60% lebih dari tembaga sehingga biasa digunakan untuk peralatan listrik. Selain itu juga memiliki sifat penghantar panas, memiliki sifat pantul sinar yang baik sehingga digunakan pula pada komponen mesin, alat penukar panas, cermin pantul, komponen industri kimia dan lain – lain (Ilham J, 2019).

Setelah baja, aluminium lebih banyak digunakan daripada logam lainnya. Hal ini dikarenakan banyaknya manfaat aluminium, seperti bobotnya yang ringan dan ketahanannya terhadap korosi, yang menjadikannya material yang menarik. Aluminium murni, khususnya, terlalu lentur untuk berbagai penggunaan jadi, kekerasan dan kekuatannya harus ditingkatkan. Dua cara untuk mengeraskan dan memperkuat aluminium murni adalah dengan melelehkannya dalam keadaan panas atau memadukannya dengan menggunakan elemen paduan. (Meier M., 2004)

Paduan aluminium mengandung sejumlah komponen paduan yang bekerja sama untuk meningkatkan kualitas mekanis aluminium. Paduan aluminium terdiri dari unsur-unsur berikut :

1. Silikon (Si)
2. Tembaga (Cu)
3. Magnesium (Mg)
4. Nikel (Ni)
5. Mangan (Mn)

6. Seng (Zn)
7. Ferro (Fe)
8. Titanium (Ti)

Berdasarkan standar internasional (Surdia & Shinroku, 2005), klasifikasi paduan aluminium tempa dibagi menjadi 8 seri utama diantaranya :

a. Seri 1xxx (Aluminium Murni)

Aluminium seri 1000 adalah aluminium yang mengandung aluminium murni sebesar 99 % . Seri ini memiliki konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik , ketahanan korosi yang tinggi , dan sifat mampu bentuk (formabilitas) yang sangat baik . Namun aluminium seri 1000 mempunyai kekuatan mekanik yang relatif kekuatan mekanik rendah ,sehingga dapat digunakan sebagai komponen struktur dengan beban yang tinggi . Oleh karena itu, material ini dapat digunakan sebagai komponen struktural dengan beban tinggi . Karena kemurniannya yang tinggi , seri ini sering digunakan untuk listrik, reflektor , peralatan kimia , serta kemasan makanan dan minuman .kemurniannya, seri ini sering digunakan untuk listrik, reflektor , peralatan kimia , serta kemasan makanan dan minuman .

b. Seri 2xxx (Al – Cu)

Aluminium seri 2000 menggunakan tembaga (Cu) sebagai paduan unsur utama utama. Memiliki kekuatan tinggi yang dapat ditingkatkan dengan menggunakan panas (perlakuan panas) . karakteristik digunakan secara luas ini banyak di dalam industri penerbangan dan komponen struktural yang membutuhkan kekuatan tinggi .industri penerbangan pesawat dan komponen struktural yang memerlukan kekuatan tinggi . Namun kandungan tembaga menyebabkan ketahanan korosinya lebih rendah dibandingkan seri lainnya sehingga seringkali memerlukan lapisan tambahan untuk meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan .lebih sedikit dibandingkan seri

lainnya , sehingga seringkali memerlukan lapisan tambahan untuk meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan .

c. Seri 3xxx (Al – Mn)

Aluminium seri 3000 mengandung unsur mangan (Mn) sebagai unsur paduan utama dengan kadar sekitar 0,3–1,5%. Paduan ini mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan aluminium murni, disertai ketahanan korosi dan kemampuan pembentukan yang baik. Seri 3000 tidak dapat diperkuat melalui perlakuan panas, tetapi dapat ditingkatkan kekuatannya melalui pengerjaan dingin (*cold working*). Karena sifat tersebut, seri ini banyak digunakan pada peralatan rumah tangga, penukar panas (heat exchanger), kaleng minuman, dan material atap bangunan.

d. Seri 4xxx (Al – Si)

Aluminium seri 4000 menggunakan silikon (Si) sebagai unsur paduan utama dengan kandungan sekitar 3,6–13,5%. Penambahan silikon menyebabkan titik lebur material menjadi lebih rendah serta meningkatkan ketahanan aus. Oleh karena itu, seri ini banyak digunakan sebagai bahan pengisi pengelasan (*welding filler material*), pembuatan piston, dan komponen mesin yang membutuhkan ketahanan terhadap temperatur tinggi.

e. Seri 5xxx (Al – Mg)

Aluminium seri 5000 mengandung magnesium (Mg) sebagai unsur paduan utama dengan kadar sekitar 0,5–5,5%. Seri ini mempunyai kekuatan sedang hingga tinggi serta ketahanan korosi yang sangat baik, khususnya terhadap lingkungan laut. Selain itu, kemampuan pengelasannya sangat baik sehingga banyak digunakan pada industri perkapalan, tangki tekanan, bodi kendaraan, dan struktur yang beroperasi pada lingkungan korosif.

f. Seri 6xxx (Al – Mg – Si)

Aluminium seri 6000 merupakan kombinasi unsur magnesium (Mg) dan silikon (Si). Seri ini merupakan salah satu jenis aluminium yang paling populer karena memiliki kombinasi yang seimbang antara kekuatan mekanik, ketahanan korosi, kemampuan pengelasan, serta kemampuan pemesinan yang baik. Paduan seri ini juga dapat diperkuat melalui perlakuan panas. Oleh karena itu, aluminium seri 6000 banyak digunakan pada struktur mesin, profil ekstrusi, komponen otomotif, konstruksi, serta berbagai komponen hasil proses CNC. Jenis yang paling terkenal adalah Aluminium 6061 yang memiliki sifat mampu mesin (*machinability*) yang baik dan sangat cocok digunakan pada proses milling dan anodizing.

g. Seri 7xxx (Al – Zn)

Aluminium seri 7000 menggunakan seng (Zn) sebagai unsur paduan utama dan sering dikombinasikan dengan magnesium serta tembaga. Seri ini memiliki kekuatan tertinggi dibandingkan seri aluminium lainnya dan dapat diperkuat melalui perlakuan panas. Karakteristik tersebut membuat paduan seri 7000 banyak digunakan pada industri dirgantara, militer, serta komponen yang menerima beban tinggi. Meskipun memiliki kekuatan yang sangat tinggi, ketahanan korosinya lebih rendah dibandingkan seri 5000 dan 6000.

h. Seri 8xxx

Aluminium seri 8000 merupakan kelompok paduan yang menggunakan unsur lain selain yang terdapat pada seri sebelumnya, seperti litium (Li), besi (Fe), dan timah (Sn). Seri ini dikembangkan untuk aplikasi khusus yang membutuhkan karakteristik tertentu, misalnya kekuatan tinggi, konduktivitas listrik yang baik, atau berat yang lebih ringan.

2.2.2 Pahat Endmill

Pahat endmill merupakan salah satu jenis pahat potong yang digunakan pada proses permesinan frais (*milling*). Endmill memiliki bentuk seperti silinder dengan beberapa mata potong di sekelilingnya, dan biasanya juga memiliki mata potong di ujungnya, sehingga dapat digunakan untuk pemotongan aksial dan radial. Pahat ini digunakan pada mesin frais CNC maupun konvensional untuk berbagai proses pemotongan seperti slotting, contouring, dan drilling ringan (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Material dari pahat endmill sangat memengaruhi ketahanan aus dan kemampuan pemotongan. Umumnya, endmill dibuat dari *High-Speed Steel* (HSS), karbida (*carbide*), atau keramik. Pahat berbahan karbida memiliki kekerasan yang lebih tinggi dan tahan terhadap suhu tinggi, sehingga cocok untuk kecepatan potong yang tinggi. Namun, pahat ini juga lebih rapuh dibanding HSS (Groover, 2010).

Parameter pemotongan seperti kecepatan potong (*cutting speed*), kecepatan pemakanan (*feed rate*), dan kedalaman potong (*depth of cut*) sangat penting untuk performa pahat endmill. Pemilihan parameter yang tepat dapat memperpanjang umur pahat dan meningkatkan kualitas hasil pemotongan. Penggunaan parameter yang salah dapat menyebabkan keausan cepat, patahnya pahat, atau kualitas permukaan yang buruk (ToolingU-SME, 2020).

Endmill tersedia dalam berbagai jenis seperti flat endmill, ball nose endmill, corner radius endmill, dan roughing endmill. Flat endmill digunakan untuk membuat permukaan datar, sedangkan ball nose cocok untuk membuat kontur 3D atau permukaan melengkung. Roughing endmill memiliki bentuk bergerigi dan digunakan untuk penghilangan material cepat dalam operasi kasar (Ghosh & Mallik, 1985).

Geometri pahat endmill meliputi diameter, jumlah flute (mata potong), panjang mata potong, dan sudut heliks. Jumlah flutes memengaruhi kemampuan pemotongan dan hasil akhir permukaan. Endmill dengan flute lebih sedikit (misalnya dua) umumnya digunakan untuk pemotongan material lunak seperti aluminium karena memiliki ruang lebih besar untuk evakuasi chip. Sementara endmill dengan flutes lebih banyak digunakan untuk material keras dan memberikan hasil permukaan yang lebih halus (Stephenson & Agapiou, 2006).

Geometri pahat terdapat beberapa Jumlah Flute yang mengacu pada jumlah alur heliks pada pahat yang membentuk mata potong. Jumlah flute terdiri beberapa bentuk diantaranya :

1. 2-flute

Umumnya digunakan untuk pengerjaan material lunak seperti aluminium atau plastik, serta untuk chip clearance yang baik saat slotting (pembuatan alur).



Gambar 2. 1 Endmill 2 Flute

2. 3-flute

Menawarkan keseimbangan antara kekuatan dan chip clearance, cocok untuk berbagai material.



Gambar 2. 2 Endmill 3 Flute

3. 4-flute

Ideal untuk material keras dan operasi finishing karena memberikan kekakuan lebih tinggi dan hasil permukaan yang lebih halus, tetapi dengan chip clearance yang lebih terbatas.



Gambar 2. 3 Endmill 4 Flute

4. 5-flute

Digunakan untuk finishing presisi dan pemotongan material yang sangat keras, seperti paduan nikel. (Hoffman & Ratterman, 2017)



Gambar 2. 4 Endmill 5 Flute

2.2.3 *Computer Numerical Control (CNC)*

Penggunaan mesin CNC (*Computer Numerical Control*) telah merevolusi industri manufaktur modern, memungkinkan proses produksi yang lebih presisi, efisien, dan otomatis. Secara fundamental, mesin CNC adalah perangkat otomatis yang menggunakan program komputer untuk mengontrol gerakan alat potong atau perkakas lain dalam proses pengerjaan benda kerja. Sistem kontrol numerik pada mesin ini menggantikan kontrol manual yang sebelumnya sangat bergantung pada keahlian operator, sehingga meminimalkan potensi kesalahan manusia dan meningkatkan konsistensi hasil (Purwanto, 2017).

Teknologi CNC berkembang seiring dengan kemajuan dalam bidang mikroelektronik dan ilmu komputer. Jalur alat, kecepatan potong, laju pemakanan, dan fungsi mesin lainnya diatur oleh program CNC, yang sering disebut sebagai kode G Unit kontrol mesin kemudian mengubah proses ini menjadi gerakan mekanis yang tepat. Mesin CNC dapat melakukan operasi kompleks seperti penggilingan, pembubutan, pengeboran, dan pemotongan dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi berkat integrasi perangkat lunak dan perangkat keras. (Pramono, 2019).

Salah satu keunggulan utama mesin CNC adalah kemampuannya untuk menghasilkan produk dengan toleransi yang sangat ketat dan reproduksibilitas yang tinggi. Hal ini sangat krusial dalam industri yang memerlukan suku cadang presisi seperti otomotif, kedirgantaraan, dan medis. Selain itu, mesin CNC juga mendukung produksi massal dengan konsistensi kualitas yang terjaga, sekaligus memungkinkan fleksibilitas dalam perubahan desain produk melalui modifikasi program yang mudah. Otomatisasi yang ditawarkan oleh CNC juga berkontribusi pada peningkatan produktivitas dan pengurangan biaya tenaga kerja dalam jangka panjang (Setiawan, 2018).

Computer Numerical Control (CNC) memiliki beberapa jenis model sesuai dengan penggunaannya diantaranya :

1. Mesin Bubut CNC (CNC Turning)



Gambar 2. 5 Mesin CNC Turning

Mesin ini digunakan untuk membentuk benda kerja dengan cara memutar benda tersebut sambil alat potong diam melakukan pengerjaan. Ini ideal untuk membuat komponen yang memiliki simetri rotasi.

2. Mesin Frais CNC (CNC *Milling Machine*)



Gambar 2. 6 Mesin CNC *Milling*

Mesin ini bekerja dengan memutar alat potong (pisau frais) sementara benda kerja diam atau bergerak di bawah kendali komputer. Alat potong akan menghilangkan material dari benda kerja untuk membentuk berbagai geometri.

3. Mesin Router CNC (*CNC Router Machine*)



Gambar 2. 7 CNC Router

Mirip dengan mesin frais, tetapi router CNC lebih sering digunakan untuk memotong, mengukir, dan membentuk material yang lebih lunak seperti kayu, plastik, komposit, dan aluminium tipis.

4. Mesin Pemotong Plasma CNC (*CNC Plasma Cutting Machine*)



Gambar 2. 8 CNC Plasma Cutting

Mesin ini menggunakan busur plasma berintensitas tinggi untuk memotong material konduktif listrik, terutama logam. Gas plasma yang sangat panas melelehkan dan menguapkan material dengan cepat.

5. Mesin Pemotong Laser CNC (*CNC Laser Cutting Machine*)

Mesin ini memanfaatkan sinar laser yang sangat fokus untuk memotong, mengukir, atau menandai berbagai jenis material dengan presisi ekstrem.



Gambar 2. 9 CNC *Laser Cutting*

6. Mesin Potong Waterjet CNC (CNC *Waterjet Cutting Machine*)



Gambar 2. 10 CNC *Waterjet Cutting*

Mesin ini memotong material menggunakan jet air bertekanan sangat tinggi, seringkali dicampur dengan abrasif (pasir).

7. Mesin Gerinda CNC (CNC *Grinding Machine*)



Gambar 2. 11 CNC *Grinding*

Digunakan untuk menghaluskan permukaan benda kerja, mengurangi material dalam jumlah sangat kecil untuk mencapai toleransi dimensi dan kualitas permukaan yang sangat tinggi.

8. Mesin EDM CNC (*Electrical Discharge Machining*)



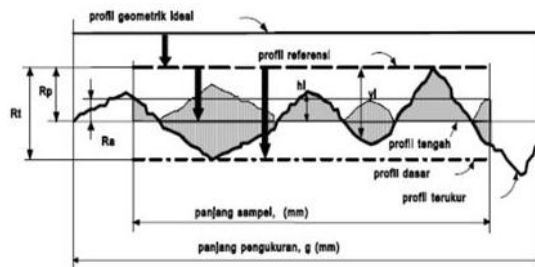
Gambar 2. 12 CNC *Electrical Discharge Machining*

Mesin ini menggunakan lucutan listrik (spark) untuk menghilangkan material dari benda kerja. Proses ini sangat efektif untuk memotong material yang sangat keras atau sulit dijangkau dengan metode konvensional. Ada dua jenis utama: Wire EDM (menggunakan kawat tipis) dan Sinker EDM (menggunakan elektroda berbentuk).

2.2.4 Uji Kekasaran

Kekasaran permukaan adalah salah satu parameter kualitas yang paling penting dalam proses manufaktur, termasuk pada pemesinan CNC (Computer Numerical Control). Dalam penerapannya, analisis yang sering dilakukan adalah pada bahan yang berwujud benda padat seperti aluminium, besi, dan logam sejenisnya. Bentuk dari suatu permukaan pada dasarnya dibedakan menjadi dua yaitu permukaan yang kasar (Roughness) dan permukaan yang bergelombang (waviness). Permukaan yang kasar berbentuk gelombang pendek yang tidak teratur dan terjadi karena getaran pisau (pahat) potong atau proporsi yang kurang tepat dari pemakanan (feed) pisau potong dalam proses pembuatannya. Sedangkan permukaan yang bergelombang mempunyai bentuk gelombang yang lebih panjang dan tidak teratur yang dapat terjadi karena beberapa faktor misalnya posisi center yang tidak tepat, adanya gerakan tidak lurus (non linear) dari pemakanan (feed), getaran mesin, tidak imbangnya (balance)

batu gerinda, perlakuan panas (heat treatment) yang kurang baik, dan sebagainya (Munadi, & Sudji. 1980).



Gambar 2. 13 Uji Kekasaran

Kekasaran dari bentuk permukaan dapat dibedakan menjadi empat tingkat, yaitu:

- a. Tingkatan Pertama, yaitu menunjukkan adanya kesalahan bentuk (from error). Kekasaran jenis ini disebabkan karena lenturan dari mesin perkakas dan benda kerja, kesalahan pada pencekaman benda kerja, pengaruh proses pengerasan (hardening).

Tingkat pertama,



Gambar 2. 14 Kekasaran Tingkat Pertama

- b. Tingkatan Kedua, yaitu menunjukkan permukaan yang berbentuk gelombang. Kekasaran jenis ini disebabkan karena kesalahan bentuk pada pisau (pahat) potong, posisi center yang kurang tepat, adanya getaran pada waktu proses pemotongan.

Tingkat kedua,



Gambar 2. 15 Kekasaran Tingkat Kedua

- c. Tingkatan Ketiga, yaitu menunjukkan profil permukaan yang berbentuk alur (grooves). Kekasaran jenis ini disebabkan adanya bekas – bekas proses pemotongan akibat bentuk pisau potong yang salah atau gerak pemakanan yang kurang tepat (feed).

Tingkat ketiga,



Gambar 2. 16 Kekasaran Tingkat Ketiga

- d. Tingkat Keempat, yaitu menunjukkan profil permukaan yang berbentuk serpihan (flakes). Kekasaran jenis ini disebabkan adanya tatal (beram) pada proses pengerjaan, pengaruh proses electroplating.

Tingkat keempat,



Gambar 2. 17 Kekasaran Tingkat Keempat

Nilai kekasaran permukaan umumnya dinyatakan dalam berbagai parameter, dengan Ra (Arithmetic Average Roughness) sebagai yang paling umum digunakan. Ra didefinisikan sebagai rata-rata absolut dari deviasi profil kekasaran dari garis tengah (mean line) dalam panjang sampling tertentu (ASME B46.1, 2009). Selain Ra, parameter lain seperti Rz (Maximum Peak-to-Valley Height) dan Ry (Maximum Roughness Depth) juga sering digunakan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang topografi permukaan. Pemilihan parameter yang tepat bergantung pada aplikasi spesifik dan persyaratan fungsional komponen. Berbagai faktor pada proses pemesinan C.

a. R_a , kekasaran rata – rata Aritmetis

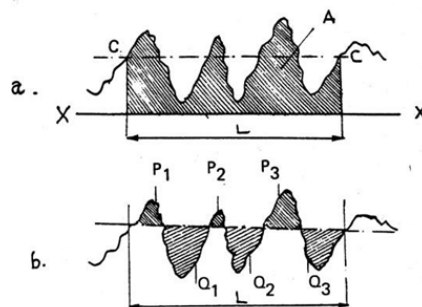
Merupakan harga rata – rata secara aritmetis dari harga *absolute* antara harga profil terukur dengan profil tengah, yaitu dengan cara membagi profil terukur (antara bukit dan lembah) menjadi dua bagian yang hampir sama luasnya, yaitu luasan daerah di atas ($P_1 + P_2 + \dots$ dan seterusnya) dan luasan daerah dibawah ($Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$ dan seterusnya). Dengan demikian harga R_a dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$R_a = \frac{\text{Luas daerah } P + \text{Luas daerah } Q}{L} \times \frac{1000}{V_v} (\mu m)$$

Dimana :

V_v : Perbesaran Vertikal Luas P dan Q (mm)

L : Panjang Sampel (mm)



Gambar 2. 18 Kekasaran Rata – Rata R_a

b. R_q , kekasaran rata – rata kuadratik

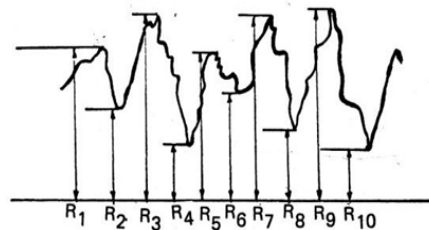
Kekasaran R_q , adalah akar bagi jarak kuadrat rata – rata antara profil terukur dengan profil tengah, dimana R_q menunjukkan variasi tinggi – rendah permukaan dengan menghitung akar kuadrat dari kuadrat deviasi setiap titik pengukuran.

c. R_z , kekasaran rata – rata dari puncak ke lembah

Kekasaran R_z , pada dasarnya hampir sama dengan kekasaran aritmetis R_a , tetapi cara menentukan R_z adalah lebih mudah

daripada menentukan R_a . Gambar 2.18 menunjukkan cara menentukan R_z . sampel pengukuran diambil sejumlah profil yang memuat misalnya 10 daerah, yaitu 5 daerah puncak dan 5 daerah lembah. Kemudian membuat garis lurus horizontal dibawah profil permukaan. Tarik garis tegak lurus dari masing – masing ujung puncak dan lembah ke garis horizontal. Dengan cara ini maka diperoleh harga R_z yang besarnya adalah:

$$R_z = \frac{1}{5} (R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9 + Pa) - \frac{1}{5} (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10}) \times \frac{1000}{V_v}$$



Gambar 2. 19 Kekasaran Rata – Rata R_z

2.2.5 Pelapisan Anodizing

Anodisasi didefinisikan sebagai proses elektrokimia yang bertujuan untuk meningkatkan ketebalan lapisan oksida alami pada permukaan logam, khususnya aluminium, guna memperbaiki sifat mekanis dan estetika material tersebut. Dalam prinsip kerjanya, benda kerja diposisikan sebagai anoda di dalam bak elektrolit yang mengandung larutan asam kuat (Munadi, & Sudji. 1980). setiap proses pengerjaan logam akan menghasilkan karakteristik tekstur atau penyimpangan profil permukaan tertentu yang harus dikontrol dan diukur secara presisi agar sesuai dengan spesifikasi geometris yang diinginkan. Melalui aliran arus listrik searah, anion oksigen di dalam elektrolit akan bergerak menuju anoda untuk bereaksi dengan atom aluminium guna membentuk lapisan aluminium oksida (Al_2O_3)

sementara kation akan bergerak menuju katoda dan terlepas dalam bentuk gelembung gas hidrogen.

Proses anodisasi dapat dijelaskan secara ilmiah melalui pendekatan Hukum Faraday yang mengatur hubungan kuantitatif antara jumlah muatan listrik yang digunakan dengan massa zat yang terbentuk pada elektroda. Secara termodinamika, anodisasi adalah proses elektrolisis di mana benda kerja aluminium difungsikan sebagai anoda dalam larutan elektrolit untuk menumbuhkan lapisan oksida (Al_2O_3). Menurut Hukum Faraday I, massa lapisan oksida yang terbentuk berbanding lurus dengan jumlah muatan listrik (Q) yang mengalir melalui sel tersebut, yang secara matematis dinyatakan dalam persamaan

$$m = \frac{Q \cdot M}{n \cdot F}$$

Keterangan :

m = Massa lapisan oksida yang terbentuk (g)

Q = Total muatan listrik

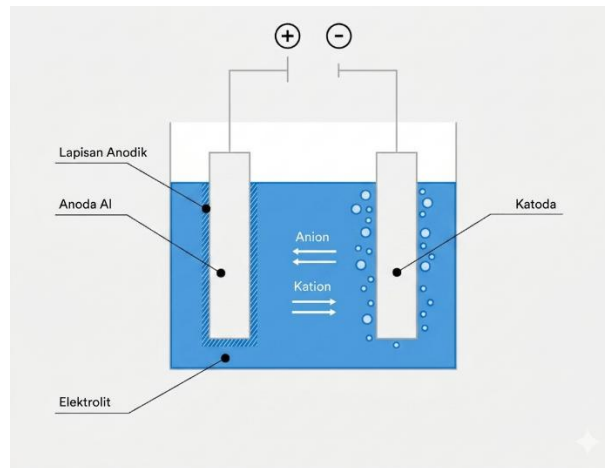
M = Massa molar zat

n = Jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi (valensi)

F = Konstanta faraday ($\approx 96,285$ Colomb/mol)

Proses anodizing melibatkan perendaman material aluminium sebagai anoda (kutub positif) dalam larutan elektrolit asam, seperti asam sulfat atau asam kromat. Selama proses elektrolisis, arus listrik dialirkan, menyebabkan air (H_2O) terurai menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksida (OH^-). Aluminium pada anoda bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) membentuk aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$), yang kemudian terdehidrasi menjadi aluminium oksida (Al_2O_3) yang stabil. Lapisan oksida yang terbentuk memiliki struktur mikropori yang memungkinkan pewarnaan (Priyono & Santoso, 2020). Proses ini

dikendalikan dengan cermat untuk memastikan ketebalan dan kualitas lapisan oksida yang diinginkan.



Gambar 2. 20 Proses Anodizing

Secara umum, ada beberapa jenis anodizing yang diklasifikasikan berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan dan ketebalan lapisan yang dihasilkan :

1. Anodizing Tipe I (Asam Kromat)

Digunakan untuk aplikasi di mana toleransi dimensi sangat ketat. Lapisan yang dihasilkan tipis, kurang dari $2.5\ \mu\text{m}$, dan memberikan ketahanan korosi yang baik tanpa mengubah dimensi secara signifikan (Susanto & Wibowo, 2018).

2. Anodizing Tipe II (Asam Sulfat)

Ini adalah jenis yang paling umum digunakan. Lapisan yang terbentuk relatif tebal ($2.5 - 25\ \mu\text{m}$), memiliki ketahanan korosi dan abrasi yang baik, serta mudah diwarnai (Lestari & Nugroho, 2021).

3. Anodizing Tipe III (Hardcoat/Hard Anodizing)

Menggunakan konsentrasi asam sulfat yang lebih tinggi dan suhu yang lebih rendah. Lapisan yang dihasilkan sangat tebal dan keras (lebih dari $25\ \mu\text{m}$), ideal untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan abrasi ekstrem (Haryanto & Wijaya, 2019)

Selama proses anodizing, Selama proses ini terjadi dua mekanisme penting yang berkontribusi terhadap peningkatan sifat permukaan, yaitu pembentukan ikatan oksidasi (ikatan Al–O) dan terbentuknya ikatan mekanis (*mechanical interlocking*) akibat struktur pori pada lapisan oksida. Adapun proses ikatan kimia yang terjadi pada saat proses anodizing berlangsung diantaranya sebagai berikut :

1. Oksidasi aluminium pada proses anodizing

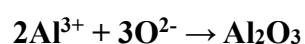
Dalam proses anodizing, benda kerja aluminium dihubungkan sebagai anoda (elektroda positif) dan dicelupkan ke dalam larutan elektrolit, umumnya asam sulfat (H₂SO₄). Ketika arus listrik dialirkan, atom aluminium pada permukaan kehilangan elektron (teroksidasi) menjadi ion aluminium (Al³⁺).



Reaksi ini menyebabkan atom aluminium melepaskan elektron dan berubah menjadi ion bermuatan positif. Ion (Al³⁺) yang terbentuk kemudian berreaksi dengan ion oksida (O²⁻) atau ion hidroksida (OH⁻) yang berasal dari dekomposisi air didalam elektrolit. Reaksi ini menghasilkan aluminium oksida (Al₂O₃) yang menempel pada logam. (Diggle, dkk 1969)

2. Pembentukan Ikatan Aluminium–Oksigen (Al–O)

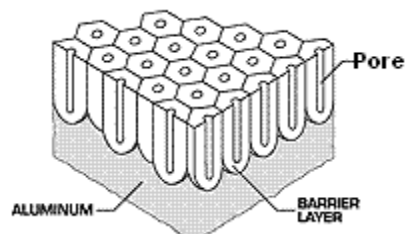
Ikatan kimia utama yang terbentuk selama anodizing adalah ikatan aluminium–oksigen (Al–O). Ketika ion Al³⁺ bertemu dengan ion O²⁻, terjadi transfer dan pembagian elektron yang menghasilkan struktur aluminium oksida



Ikatan Al–O memiliki karakter campuran ionik dan kovalen. Perbedaan elektronegativitas antara aluminium dan oksigen menyebabkan adanya transfer sebagian elektron dari aluminium ke oksigen (karakter ionik), sementara sebagian elektron tetap digunakan bersama (karakter kovalen). Kombinasi kedua karakter ini menghasilkan lapisan oksida yang sangat stabil, keras, dan memiliki daya lekat tinggi terhadap substrat aluminium.

3. Pembentukan Struktur Berpori pada lapisan oksida

Pada anodizing menggunakan elektrolit asam, seperti asam sulfat, lapisan oksida yang baru terbentuk tidak hanya mengalami pertumbuhan tetapi juga mengalami pelarutan sebagian oleh larutan elektrolit. Akibatnya terbentuk pori-pori mikroskopis hingga nanometrik yang tersebar merata pada lapisan oksida.



Gambar 2. 21 Struktur Berpori pada lapisan oksida

Barrier layer, yaitu lapisan oksida padat yang berada tepat di atas logam aluminium. Dan Porous layer, yaitu lapisan oksida berpori yang berada di bagian atas dan memiliki bentuk menyerupai sarang lebah (honeycomb structure). (Wirnick, dkk 1987)

4. Terjadinya *Mechanical Interlocking*

Mekanisme mechanical interlocking tidak terjadi hanya karena pembentukan lapisan oksida, tetapi terjadi ketika material lain seperti cat, perekat, resin, atau lapisan komposit diaplikasikan pada permukaan aluminium yang telah dianodisasi. Saat material pelapis masih dalam keadaan cair, material tersebut akan mengalir dan masuk ke dalam pori-pori lapisan oksida akibat gaya kapiler. Setelah mengalami proses pengeringan atau curing, material tersebut mengeras di dalam pori sehingga membentuk jangkar-jangkar mikroskopis yang terkunci secara fisik pada lapisan anodizing. (pocius, 2002)