

Bab II

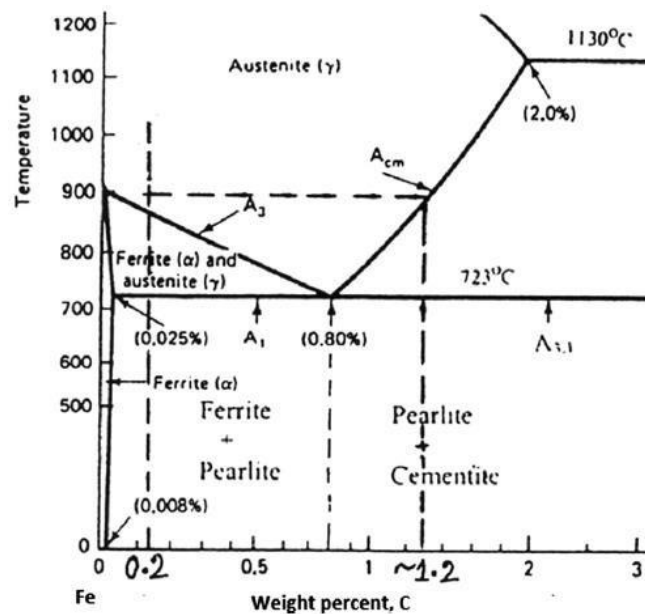
Tinjauan Pustaka

2.1 Baja Carbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja *carbon* rendah memiliki kandungan hingga 0,30% C. Kategori baja terbesar di kelas ini adalah produk canai datar (lembaran atau *strip*), biasanya dalam kondisi canai dingin dan anil. Baja yang dapat dibentuk ini memiliki kandungan *carbon* yang sangat rendah, kurang dari 0,10% C dan kurang dari 0,4% Mn. Penggunaannya secara umum adalah untuk panel bodi, pelat timah, dan produk kawat. Untuk bagian lembaran logam dan baja canai, kandungan *carbon* dapat ditingkatkan menjadi sekitar 0,30% dan mangan dapat ditingkatkan hingga 1,5%. Bahan ini dapat digunakan untuk produksi seperti halnya, stempel, tempa, tabung mulus, dan pelat ketel. Lembaran dan *strip* baja *carbon* rendah canai dingin diproduksi dari gulungan canai panas dengan reduksi dingin ke ketebalan yang diinginkan baik di pabrik tandem kontinu atau pabrik reduksi dingin terbalik. Proses pengerolan dingin memungkinkan produksi alat pengukur yang lebih tipis daripada pengerolan panas. Keuntungan lain dari baja canai dingin adalah penyelesaian permukaan yang sangat baik dan stabilitas dimensi. Karena baja canai keras dan kurang produktif. Baja dianil untuk mengoptimalkan sifat mampu bentuk kecuali diperlukan pengerasan kerja penuh (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Umumnya, baja *carbon* mengandung hingga 2% total tembaga dan dapat dibagi menjadi baja *carbon* rendah, baja *carbon* sedang, baja *carbon* tinggi, dan baja *carbon* ekstra tinggi. Baja *ferriteeik*, baja *carbon* sangat rendah dengan

kemampuan pengerasan yang cukup yang berubah pada pendinginan menjadi struktur *ferritee acicular* kekuatan tinggi yang sangat halus (bainit *carbon* rendah) alih-alih struktur *ferritee poligonal* biasa. Lembaran dan *strip* baja *carbon* rendah canai panas biasanya diproduksi di pabrik canai panas terus menerus. Beberapa *hot rolling mills* dapat menghasilkan ukuran lembaran baja *carbon* rendah serendah 1,214 mm (0,0478 inci), tetapi 1,897 mm (0,0747 inci) dianggap sebagai batas praktis yang lebih rendah (A. S. M. *International & Committee*, 2005).



Gambar 2. 1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Baja mengandung fasa *austenite* pada temperatur karburisasi. Karburisasi berkaitan dengan larutan padat *carbon* dalam fasa *austenite*. Batas kadar *carbon* pada fasa ini bergantung pada temperatur dan komposisi baja itu sendiri. Kadar *carbon* maksimum yang dapat larut dalam *austenite* pada temperatur karburisasi berada pada garis Acm. Jika temperatur karburisasi yang digunakan sebesar 900 °C, maka kadar *carbon* maksimum yang larut sebanyak 1,2 wt%, hal ini

ditunjukkan pada Gambar 2.1. Baja *carbon* rendah tidak cukup keras untuk membentuk *martensite*, kecuali di bagian yang paling tipis, sehingga mereka terutama diproduksi dengan struktur mikro *ferriteeik* yang memiliki keuletan yang baik untuk pengerjaan dingin dan operasi pembentukan. Proses *rolling* yang terkontrol serupa digunakan di seluruh dunia untuk menghasilkan baja *carbon* rendah butiran halus. Dalam beberapa kasus, pembentukan lembaran logam baja *carbon* rendah, pemilihan proses deoksidasi dapat berdampak signifikan pada kinerja baja. Dalam kasus seperti itu, tepat untuk menunjukkan praktik yang diinginkan. Pada baja *carbon* rendah silikon biasanya mempengaruhi kualitas permukaan dan kondisi ini lebih terlihat pada kadar *carbon* sulfida rendah (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Selain produk *strip* dan baja *carbon* rendah, banyak produk tambahan tersedia yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan spesifik pelanggan. Produk ini sering dibuat dari baja *carbon* rendah dengan kimia yang sedikit berbeda. Untuk dianggap sebagai kadar *carbon* rendah normal, baja harus mengandung tidak lebih dari 0,25% C, 1,65% Mn, 0,60% S dan 0,60% Cu, tetapi tidak ada nitrogen, fosfor, boron. Mungkin juga mengandung sejumlah kecil unsur lain seperti saat hadir sendiri atau dalam kombinasi, mereka efektif dalam memberikan sifat tertentu. Nilai baja *carbon* rendah yang dijelaskan di bawah ini dirancang untuk memberikan produk lembaran dan *strip* dengan kekuatan, kemampuan bentuk dan/atau ketahanan korosi yang lebih baik. Mangan adalah elemen penguat larutan padat untuk *ferritee* dan juga memiliki efek meningkatkan *hardenability*. Mangan ditambahkan dalam jumlah 1,0 hingga 1,5% ke baja *carbon* rendah (0,15 hingga

0,25% C) untuk memberikan kekuatan dengan keuletan yang baik dalam pengerolan panas (kekuatan hasil sekitar 275 MPa atau 40 ksi), lembaran dan *strip* canai dingin. Nitrogen adalah penambah *interstitial* yang kuat dan fosfor adalah penambah larutan padat *ferritee* yang efektif. Baik sekitar 0,010 hingga 0,015% N atau 0,07 hingga 0,12% P ditambahkan ke baja *carbon* rendah canai panas dan canai dingin dengan kekuatan luluh dalam kisaran 275 hingga 345 MPa (40 hingga 50 ksi). Bagian struktural untuk konstruksi dan mobil. Bagian cetakan yang diperoleh dari baja yang mengandung nitrogen dapat diperkuat lebih lanjut untuk mencapai kekuatan luluh pada kisaran 415-485 MPa (60-70 ksi) sebagai akibat dari penuaan regangan yang terjadi pada suhu *curing*. Boron adalah pembentuk karbida dan nitrida kuat yang meningkatkan kekuatan baja *carbon* rendah yang dipadamkan dan ditempa dengan membentuk *martensite* dan memperkuat kerak *ferritee*.

Cetakan baja *carbon* yang mengandung boron tersedia sebagai alternatif hemat biaya untuk baja *carbon* tinggi dan paduan rendah yang digunakan dalam lembaran dan *strip*. Baja boron *carbon* rendah memiliki sifat pembentuk dingin yang lebih baik dan dapat diberi perlakuan panas dengan kekerasan yang sebanding dan ketangguhan yang lebih tinggi untuk berbagai aplikasi seperti perkakas, bagian mesin, dan pengencang. Tembaga dalam jumlah hingga 0,5% tidak hanya sebagai penguat larutan padat kecil untuk *ferritee*, tetapi juga memberikan ketahanan korosi atmosfer yang lebih baik bersama dengan retensi cat yang lebih baik dalam aplikasi yang terpapar sepenuhnya ke elemen. Akibatnya, pelanggan sering menentukan baja yang mengandung tembaga (minimum 0,20% Cu) untuk digunakan pada lembaran dan *strip* struktural yang terkena korosi atmosferik. Hampir semua produk

pelat dan *strip* baja *carbon* rendah dapat disuplai dalam tingkat bantalan tembaga tertentu (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Penarikan dingin dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh batang baja *carbon* canai panas masing-masing sekitar 10% dan 70%. Sebagai contoh, batang baja *carbon* rendah canai panas dengan rasio titik tarik dan luluh sekitar 0,55 akan memiliki rasio sekitar 0,85 setelah penarikan dingin. Perpanjangan, pengurangan area, dan penurunan resistensi dampak, tetapi perubahan ini relatif kecil untuk banyak aplikasi struktural dan teknik. Peningkatan kekuatan ditarik dingin menarik yang ingin meningkatkan rasio kekuatan-terhadap-berat dan mengurangi biaya dengan menghilangkan penambahan paduan dan perlakuan panas. Ini juga berguna dalam aplikasi yang melibatkan ulir, takik, *cutting*, stabilitas dimensi, dan faktor desain lain yang dapat memengaruhi kekuatan secara negatif. Namun, harus diingat bahwa distribusi sifat mekanik dalam *grade* baja tarik dingin mungkin tidak memberikan kontrol yang ketat seperti yang dapat dicapai dengan perlakuan panas pada tingkat kekuatan yang sama. Perbedaan dalam teknik penggilingan dan derajat pengerjaan dingin dapat menghasilkan beberapa variasi sifat Baja *carbon* rendah biasanya diberi perlakuan panas untuk menambah ketahanan pada sudut kepala atau permukaan penjepit. *Carburizing* ringan atau *carbonitriding* sering digunakan untuk meningkatkan daya tahan. Saat pendinginan dan pengerasan mur, baja harus memiliki kemampuan pengerasan yang memadai. Meningkatkan jumlah *carbon* dan mangan atau menambahkan elemen paduan lain untuk meningkatkan kekerasan mengurangi kesesuaian material untuk pengerjaan dingin. Untuk alasan ini, baja boron *carbon* rendah banyak digunakan untuk bagian

yang dikeraskan dengan kekuatan tinggi. Kandungan *carbon*nya yang rendah memudahkan pengerjaan dingin, dan boron meningkatkan kemampuan pengerasan. Pemotongan benang dapat dilakukan sebelum atau sesudah perlakuan panas, tergantung pada kelas kompatibilitas benang yang diperlukan dan kekerasan mur yang diberi perlakuan panas (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

Dalam baja *carbon*, kandungan *carbon* dan mangan adalah konstituen utama dari faktor komposisi yang menentukan kinerja baja dalam kondisi pemanasan dan pendinginan tertentu. Sejumlah besar baja yang digunakan untuk aplikasi pengelasan terdiri dari baja *carbon* rendah yang mengandung hingga 0,30% C. Struktur *nodular* lebih disukai ketika kekerasan minimum dan keuletan maksimum penting. Baja *carbon* rendah jarang dianil untuk pemesinan. Hal ini karena saat dianil, menjadi sangat lunak dan kenyal serta cenderung menghasilkan serpihan berserat panjang yang menyebabkan masalah penanganan pada peralatan mesin dan menyebabkan permukaan akhir yang kasar pada komponen mesin. Ketika baja semacam itu digulung, biasanya dilakukan untuk memungkinkan pengerjaan dingin yang parah. Daktilitas material yang tinggi dalam keadaan canai panas dapat mengurangi kekuatannya secara signifikan tanpa mengalami meningkatkan kekuatan materialnya secara berlebihan (A. S. M. *International & Committee*, 2005).

2.2 Baja SS400

Baja SS400 adalah material baja dengan kadar *carbon* yang rendah dengan rentangnya berkisar 0,19%, sehingga bajanya tidak dapat dikeraskan secara langsung. Baja SS400 dikenal sebagai baja konstruksi yang sering digunakan dalam

bidang konstruksi bangunan, seperti halnya rangka atap, rangka jembatan dan balok konstruksi (Rahman & Sunyoto, 2021). Berikut dibawah ini merupakan komposisi materialnya (Sujita Darmo, Padang, & Wiratama, 2020).

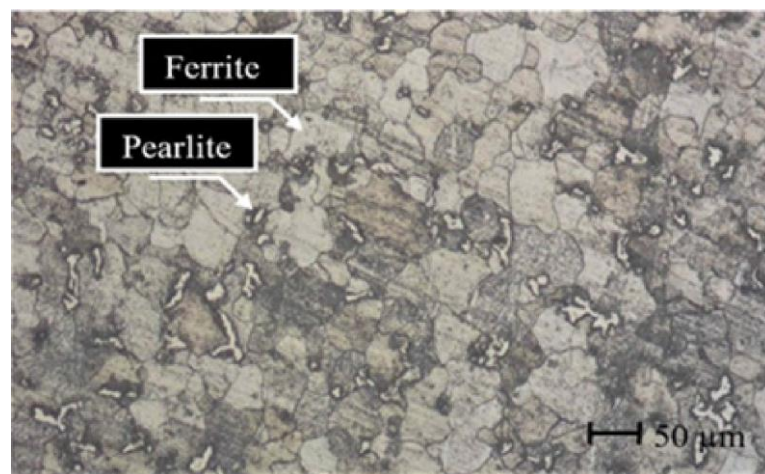
Tabel 2. 1 Komposisi Kimia

Unsur Kimia	Persentase
Besi (Fe)	98,11
Carbon (C)	0,159
Molibdenum (Mo)	0,078
Mangan (Mn)	0,624
Tembaga (Cu)	0,241
Krom (Cr)	0,11
Niobium (Nb)	0,16
Titanium (Ti)	0,008

Baja SS400 adalah jenis baja struktural yang umum digunakan dalam konstruksi dan industri. Baja ini memiliki sifat mekanik yang baik, termasuk nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan kekerasan yang signifikan. Nilai UTS baja SS400 berkisar antara 400 hingga 510 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa baja ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi, sehingga mampu menahan beban yang diberikan padanya. Kekuatan tarik yang tinggi ini sangat penting dalam aplikasi struktural, di mana baja SS400 digunakan untuk menahan beban yang berat dan memberikan kestabilan struktur. Selain itu, kekerasan baja SS400 juga cukup tinggi.

Baja SS400 memiliki fasa *ferritee* dan *pearlite*. Fase *ferritee* ditampilkan dalam warna cerah sedangkan *pearlite* ditampilkan dalam warna gelap. Jumlah fase *ferritee* terlihat lebih banyak dibandingkan fase *pearlite*. Kemudian memiliki kekerasan yang rendah sebesar 122,6 HV. Fase *ferritee* sendiri membuat sifat ulet dalam baja. Baja ini biasanya memiliki kekerasan sekitar 150 hingga 180 *Brinell*

Hardness Number (BHN). Kekerasan yang tinggi ini menunjukkan bahwa baja SS400 memiliki ketahanan aus yang baik, sehingga mampu menghadapi tekanan dan gesekan yang tinggi tanpa mengalami deformasi atau keausan yang signifikan. Nilai UTS yang tinggi sebesar 461 MPa dan kekerasan sebesar 160 BHN. (Asrofi, 2020)



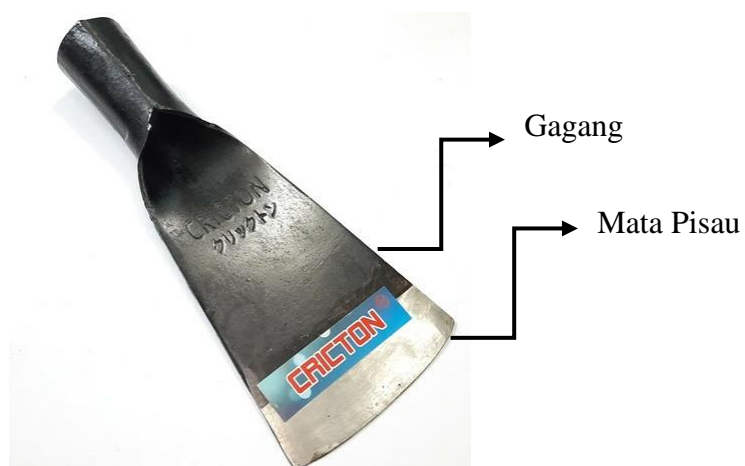
Gambar 2. 2 Struktur mikro Baja SS400 (Baghdadchi, 2021)

2.2.1 Aplikasi Baja SS400 sebagai Dodos

Baja SS400 adalah jenis baja *carbon* rendah yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk aplikasi di industri kelapa sawit. Baja SS400 memiliki kekuatan tarik yang cukup tinggi, yaitu sekitar 400 MPa, dan memiliki kekuatan lentur yang baik. Selain itu, baja SS400 juga memiliki sifat korosi yang baik, sehingga cocok untuk digunakan dalam lingkungan yang korosif seperti di industri kelapa sawit.

Dodos kelapa sawit, juga dikenal sebagai cangkang kelapa sawit, adalah bahan padat yang terbentuk saat buah kelapa sawit diproses. Dodos kelapa sawit memiliki karakteristik khas, seperti tekstur kasar dan serat yang

kuat. Secara umum, dodos kelapa sawit digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan bakar alternatif, bahan bangunan, dan bahan tahan api (Setiawan, 2014). Untuk meningkatkan penggunaan dodos kelapa sawit secara berkelanjutan, penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan metode produksi yang lebih efisien dan aplikasi yang lebih luas. Pemilihan material yang tepat untuk dodos kelapa sawit memainkan peran penting dalam memaksimalkan nilai tambah dari limbah kelapa sawit ini dan mendukung upaya mencapai keberlanjutan dalam industri kelapa sawit. Pemilihan material yang tepat untuk dodos kelapa sawit sangat penting karena berdampak pada kualitas produk akhir dan dampak lingkungan. Salah satu kriteria yang diperhatikan adalah kekuatan dan daya tahan. Dodos kelapa sawit yang memiliki serat kuat memberikan kekuatan dan ketahanan yang dibutuhkan dalam aplikasi tertentu, seperti bahan bangunan. Kemampuan material untuk diolah dan dikombinasikan dengan bahan lain juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan material. Standar yang digunakan dalam penggunaan dodos kelapa sawit bervariasi tergantung pada aplikasinya



Gambar 2. 3 Dodos Kelapa Sawit

Apabila ditinjau dari bentuknya, dodos memiliki beberapa bagian seperti yang tertera pada Gambar 2.4, dimana bagian tersebut mencakup kepada mata pisau, gagang, dan pipa besi. Dalam hal ini, yang memiliki fokus utama dalam peningkatan kekerasan adalah mata pisau. Hal ini dikarenakan mata pisau dodos yang akan menjadi syarat mutu untuk memotong kelapa sawit. Beberapa standar umum mencakup pengujian kekuatan, ketahanan terhadap api, dan kompatibilitas dengan bahan lain. Sebagai contoh, dalam penggunaan dodos kelapa sawit sebagai bahan bangunan, diterapkan standar konstruksi dan kebakaran untuk memastikan keamanan struktur dan perlindungan terhadap risiko kebakaran. Dalam aplikasinya, Dodos kelapa sawit memiliki standar yang digunakan, yaitu Standar Nasional Indonesia (SNI) 8205:2016. Standar ini adalah salah satu standar yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN) di Indonesia. Standar ini berjudul "Alat panen kelapa sawit - Dodos - Syarat mutu dan metode uji". SNI ini ditetapkan pada tanggal 20 September 2016 oleh Komite Teknis 21-01-S1 Permesinan dan Alsintan (Alat Mesin Pertanian). SNI 8205:2016 mengatur tentang spesifikasi teknis dan metode uji yang harus dipenuhi oleh alat panen kelapa sawit jenis dodos.

Standar ini bertujuan untuk memastikan kualitas dan kesesuaian alat panen kelapa sawit tersebut, sehingga dapat digunakan dengan efektif dan aman dalam proses panen kelapa sawit. Dalam standar ini, terdapat beberapa aspek yang diatur, termasuk persyaratan mutu alat panen kelapa

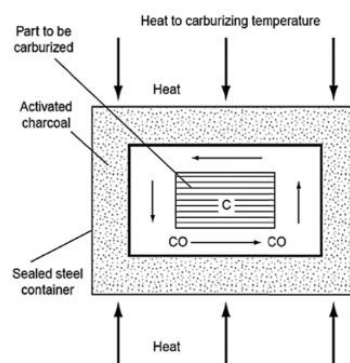
sawit, seperti dimensi, material, ketahanan, kekuatan, dan kemampuan fungsional. Selain itu, standar ini juga memberikan metode uji yang harus dilakukan untuk memastikan bahwa alat panen kelapa sawit tersebut memenuhi persyaratan yang ditetapkan. SNI 8205:2016 merupakan salah satu dari banyak standar yang diterbitkan oleh BSN dalam rangka mengatur berbagai aspek dalam berbagai sektor industri di Indonesia. Standar-standar nasional seperti SNI memiliki peran penting dalam menjaga kualitas, keselamatan, dan keandalan produk atau layanan yang dihasilkan di Indonesia. Dodos sendiri memiliki kekerasan minimum 45 HRC atau sekitar 446 HV. Dengan nilai minimal ini, dodos dapat beroperasi dengan baik pada pemrosesan kelapa sawit untuk skala industri. Nilai 446 HV merupakan nilai minimum operasional dan dapat tetap diterima pada kondisi lebih tinggi daripada nilai tersebut (SNI, 2016).

2.3 Pack Carburizing

Pack Carburizing adalah proses di mana *carbon* monoksida yang berasal dari senyawa padat terurai pada permukaan logam menjadi *carbon* baru dan *carbon* dioksida. *Carbon* yang baru terbentuk diserap ke dalam logam, dan *carbon* dioksida segera bereaksi dengan bahan *carbon* yang ada dalam senyawa *carburizing* padat untuk menghasilkan *carbon* monoksida segar. Pembentukan *carbon* monoksida ditingkatkan oleh *energizer* atau katalis, seperti barium *carbonat* (BaCO_3), kalsium *carbonat* (CaCO_3), kalium *carbonat* (K_2CO_3), dan natrium *carbonat* (Na_2CO_3), yang terdapat dalam senyawa *carburizing*. *Energizer* ini memfasilitasi

pengurangan *carbon* dioksida dengan *carbon* untuk membentuk *carbon* monoksida. Dengan demikian, dalam sistem tertutup, jumlah *energizer* tidak berubah.

Carburizing berlanjut selama *carbon* cukup hadir untuk bereaksi dengan kelebihan *carbon* dioksida (A. International, 2010). *Pack carburizing* tidak lagi menjadi proses komersial utama. Hal ini terutama disebabkan oleh penggantian dengan proses *carburizing* gas dan cair yang lebih terkontrol dan lebih sedikit tenaga kerja. Namun, setiap keuntungan biaya tenaga kerja *carburizing* gas atau *carburizing* cair yang mungkin dimiliki *carburizing* berlebih dapat ditiadakan jika benda kerja memerlukan langkah tambahan seperti pembersihan dan penerapan lapisan pelindung dalam operasi penghentian *carburizing*. Masalah lingkungan juga menyebabkan berkurangnya penggunaan *carburizing* kemasan. Namun, itu masih memiliki aplikasi untuk beberapa penggunaan khusus. Berikut dibawah ini merupakan skematik dari proses *pack carburizing*



Gambar 2. 4 Skematik Proses *Pack Carburizing* (Elmi Hosseini & Li, 2016).

Keuntungan yang didapat dari proses *pack carburizing*, yaitu dapat menggunakan berbagai tungku karena menghasilkan lingkungan yang terkandung

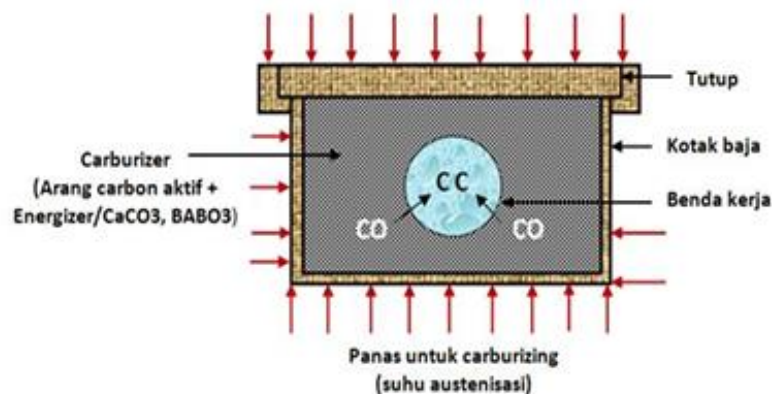
sendiri, cocok untuk pendinginan lambat pekerjaan dari suhu *carburizing*, prosedur yang mungkin menguntungkan untuk bagian yang akan diselesaikan mesinnya setelah karburisasi dan sebelum pengerasan, dibandingkan untuk *carburizing* gas dan menawarkan pilihan teknik *stop-off* yang lebih luas untuk *carburizing* selektif. Sedangkan kekurangan dari proses ini, antara lain tidak cocok untuk produksi kedalaman wadah yang dangkal di mana diperlukan toleransi kedalaman wadah yang ketat, tidak dapat memberikan tingkat fleksibilitas dan akurasi kontrol atas kandungan *carbon* permukaan dan gradien *carbon* yang dapat diperoleh dalam *carburizing* gas, tidak cocok untuk pendinginan langsung atau pendinginan dalam cetakan; dengan demikian, penanganan dan pemrosesan tambahan diperlukan untuk operasi pengerasan, lebih banyak waktu pemrosesan diperlukan untuk *carburizing* kemasan daripada untuk *carburizing* gas atau cair karena perlunya pemanasan dan pendinginan massa termal ekstra yang terkait dengan kompon dan wadah, dan ini adalah padat karya (A. International, 2010).

Carburizing adalah penambahan *carbon* ke permukaan baja *carbon* rendah pada suhu (umumnya antara 850 dan 950°C, atau 1560 dan 1740°F) di mana *austenite*, dengan kelarutannya yang tinggi untuk *carbon*, memiliki struktur kristal yang stabil. Pengerasan komponen dilakukan dengan melepas bagian dan pendinginan atau membiarkan bagian menjadi dingin perlahan dan kemudian memanaskan kembali ke suhu *austenite*isasi untuk mempertahankan sifat permukaan yang sangat keras. Pada *quenching*, casing *martensite carbon* tinggi yang tahan aus dan lelah ditumpangkan pada inti baja *carbon* rendah yang keras. Baja *carburizing* yang digunakan dalam pengerasan kasus biasanya memiliki

kandungan *carbon* dasar sekitar 0,2% berat, dengan kandungan *carbon* lapisan *carburizing* ditetapkan antara 0,8 dan 1,0% berat. (Soenoko & Siswanto, 2018)

Pada Gambar 2.2, terdapat beberapa komponen yang digunakan dalam proses *carburizing*, yaitu tutup, kotak baja, benda kerja, panas (suhu austenisasi), dan *carburizer*. . Tutup digunakan dalam proses *carburizing* untuk menutupi kotak baja yang berisi benda kerja. Tutup tersebut berfungsi untuk menciptakan lingkungan yang terkontrol di dalam kotak, sehingga proses *carburizing* dapat berjalan dengan efektif dan mencegah kebocoran gas atau kerusakan lingkungan yang tidak diinginkan. Kotak baja merupakan wadah yang digunakan untuk menempatkan benda kerja selama proses *carburizing*. Kotak baja ini biasanya terbuat dari baja tahan panas yang kuat dan tahan terhadap lingkungan yang korosif. Fungsi utama kotak baja adalah melindungi benda kerja dari kontaminasi lingkungan eksternal dan mempertahankan kondisi lingkungan yang tepat di sekitar benda kerja selama proses *carburizing*. Benda kerja adalah komponen atau material yang akan mengalami proses *carburizing*. Benda kerja biasanya terbuat dari baja yang ingin ditingkatkan kekerasannya dengan mengintroduksi *carbon* ke dalam lapisan permukaan. Proses *carburizing* bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aus, kekerasan, dan kekuatan benda kerja. Panas atau suhu austenisasi adalah suhu tinggi yang diterapkan pada benda kerja selama proses *carburizing*. Suhu ini mencapai titik *austenite*, yaitu titik ketika struktur kristal baja berubah menjadi *austeniteik* yang memungkinkan difusi *carbon* yang efektif ke dalam material. *Carburizer* adalah material yang digunakan untuk memasok *carbon* ke permukaan benda kerja selama proses *carburizing*. *Carburizer* biasanya berupa

padatan atau gas yang mengandung *carbon*, seperti paduan *carburizing* atau gas *carburizing*. Fungsi *carburizer* adalah untuk menyediakan sumber *carbon* yang diperlukan agar *carbon* dapat didifusikan ke dalam permukaan benda kerja dan mempengaruhi sifat material tersebut. (Negara, 2016)



Gambar 2. 5 Proses *Pack Carburizing* (Negara, 2016)

Metode *carburizing* meliputi *carburizing* gas, *carburizing* vakum, *carburizing* plasma (ion), *carburizing* rendaman garam, dan *carburizing* kemasan. Metode ini memperkenalkan *carbon* dengan menggunakan atmosfer (gas atmosfer, plasma, dan vakum), cairan (penangas garam), atau senyawa padat (kemasan). Sebagian besar bagian *carburizing* diproses dengan *carburizing* gas, menggunakan gas alam, propana, atau butana. Vakum dan *carburizing* plasma berguna karena tidak adanya oksigen di atmosfer tungku. Rendaman garam dan *carburizing* bungkus memiliki kepentingan komersial yang kecil tetapi masih dilakukan sesekali (Kwetniewski, 2013).

Pack carburizing, juga disebut *carburizing* padat atau kotak, adalah proses *carburizing* tertua. Dalam hal ini metode pengerasan, spesimen dikemas dalam campuran kokas dan arang dengan “*energizers*” kemudian dipanaskan dalam wadah

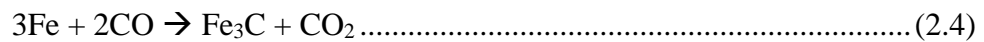
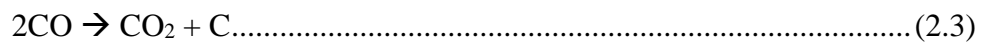
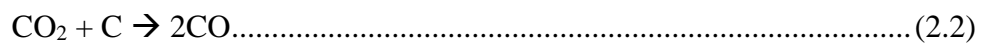
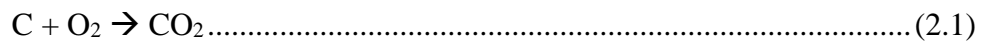
tertutup. Meskipun merupakan proses padat karya, *carburizing* kemasan masih dilakukan di beberapa ruang alat karena persyaratan fasilitasnya minimal. Metode pak adalah yang tertua dari proses *carburizing* dan selama bertahun-tahun yang paling banyak digunakan. Penggunaannya dalam beberapa tahun terakhir, bagaimanapun, telah menurun secara signifikan karena perbaikan dalam prosedur *carburizing* alternatif (terutama *carburizing* gas) dan juga karena keterbatasan proses yang melekat. Senyawa *carburizing* komersial umum dapat digunakan kembali dan mengandung 10 sampai 20% *carbonat* logam alkali atau alkali tanah yang terikat pada arang kayu keras atau kokas dengan minyak, tar, atau *molase*. Barium *carbonat* adalah *energizer* utama, biasanya terdiri dari sekitar 50 sampai 70% dari total kandungan *carbonat*. Sisa *energizer* biasanya terbuat dari kalsium *carbonat*, meskipun natrium *carbonat* dan kalium *carbonat* juga dapat digunakan. Dapat diketahui bahwa barium *carbonat*, yang sekarang ditunjuk oleh peraturan pemerintah sebagai bahaya kesehatan karena toksisitasnya dan masalah pembuangan yang ditimbulkannya, secara bertahap dihentikan oleh pabrikan AS sebagai katalis dalam operasi *carburizing* kemasan. Arang kayu keras lebih reaktif daripada kokas sebagai sumber *carbon* untuk *carburizing* kemasan. Namun demikian, kokas menawarkan keuntungan tertentu, seperti penyusutan minimum, kekuatan panas yang baik, dan konduktivitas termal yang baik. Oleh karena itu, senyawa *carburizing* yang lebih aktif mengandung arang dan kokas, dengan senyawa tipikal yang mengandung persentase kokas yang lebih besar (A. International, 2010). Karena kerugian yang terkait dengan penggunaan senyawa

carburizing kemasan, senyawa baru biasanya ditambahkan ke senyawa bekas sebelum digunakan kembali.

Kehilangan *energizer* biasanya sedikit lebih tinggi daripada kehilangan senyawa lainnya. Oleh karena itu, persentase senyawa baru yang sedikit lebih besar digunakan untuk memastikan bahwa tingkat *energizer* tidak turun di bawah kira-kira 5 sampai 8%. Ketika pendinginan langsung atau metode penanganan mekanis yang berat digunakan, laju penambahan mungkin setinggi satu bagian senyawa baru menjadi dua bagian senyawa bekas. Ketika pendinginan tungku dan metode penanganan yang hati-hati digunakan, laju penambahan dapat berupa satu bagian senyawa baru menjadi tiga sampai lima bagian senyawa bekas. Senyawa yang digunakan sering disaring untuk menghilangkan denda. Senyawa tersebut kemudian dicampur secara menyeluruh dengan bahan *make up*. Karena banyak senyawa, terutama yang dari jenis arang terlapis, sangat rapuh, mereka memerlukan penanganan yang hati-hati untuk meminimalkan kerugian akibat pembentukan debu atau partikel halus (A. International, 2010).

Proses *Pack carburizing* berisi udara. Oksigen di udara paket bergabung dengan *carbon* pada suhu tinggi dan menghasilkan *carbon* dioksida (reaksi 2.1). Kemudian, *carbon* dioksida bereaksi dengan atom *carbon* yang ada dalam kemasan, dan sebagai hasilnya dihasilkan *carbon* monoksida (reaksi 2.2). *Carbon* monoksida terurai pada permukaan baja menjadi atom *carbon* dan *carbon* dioksida (reaksi 2.3). Atom *carbon* (atom C) dengan cepat diserap pada permukaan logam dan berdifusi ke dalam logam. Sekali lagi, menurut reaksi 2.2, *carbon* dioksida yang direproduksi bereaksi dengan lebih banyak *carbon* untuk menghasilkan lebih

banyak *carbon* monoksida. *Cementite* terbentuk di bagian paling permukaan baja (reaksi 2.4). *Carbon* yang ada dalam *cementite* kemudian larut dalam *austenite* dan berdifusi ke dalam (Elmi Hosseini & Li, 2016). Berikut rincian reaksinya dapat dilihat dibawah ini



Saat ini, bahan *energizer* digunakan untuk meningkatkan kedalaman *casing*. Pembentukan *carbon* monoksida ditingkatkan oleh *energizer* atau katalis, seperti barium *carbonat* ($BaCO_3$), kalsium *carbonat* ($CaCO_3$), kalium *carbonat* (K_2CO_3), dan natrium *carbonat* (Na_2CO_3), yang terdapat dalam senyawa *carburizing* . *Energizer* ini memfasilitasi pengurangan *carbon* dioksida dengan *carbon* untuk membentuk *carbon* monoksida. Dengan demikian, dalam sistem tertutup, jumlah *energizer* tidak berubah. *Carburizing* berlanjut selama *carbon* cukup hadir untuk bereaksi dengan kelebihan *carbon* dioksida. Namun, *energizer* yang paling terkenal dan mungkin paling efektif adalah $BaCO_3$. Misalnya, barium *carbonat* terurai pada suhu tinggi dan menghasilkan *carbon* dioksida (reaksi 2,5) (Elmi Hosseini & Li, 2016).

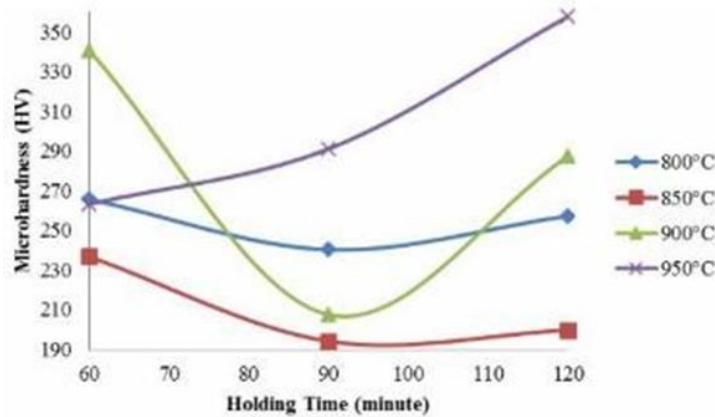


Dengan menghasilkan *carbon* dioksida dalam kemasan, tekanan CO_2 meningkat. Menurut reaksi 2.2, *carbon* dioksida bereaksi dengan atom *carbon* yang ada dalam kemasan dan menghasilkan *carbon* monoksida. Jika rasio *carbon* monoksida menjadi *carbon* dioksida pada suhu konstan lebih dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah yang benar, dan fenomena karburisasi terjadi. Tetapi ketika rasio *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida pada suhu konstan kurang dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah kiri, dan fenomena *decarburizing* terjadi. Ketika *carbon* berdifusi ke dalam baja, kandungan *carbon* di permukaan meningkat dibandingkan dengan inti baja, sehingga setelah pendinginan baja di dalam minyak, kekerasan permukaan meningkat dan inti tetap fleksibel

2.3.1 Pengaruh Waktu Tahan (*Holding Time*)

Tingkat perubahan kedalaman kasus pada suhu *carburizing* tertentu sebanding dengan akar kuadrat waktu. Tingkat karburisasi demikian tertinggi pada awal siklus dan secara bertahap berkurang seiring dengan perpanjangan siklus. Hal ini berbanding lurus berkembangnya struktur fasa yang terbentuk. Dengan seiring lamanya proses yang dilakukan, maka fasa yang terbentuk selama proses berlangsung akan semakin cepat, dan diikuti dengan menaikkan laju difusi atom *carbon* menuju permukaan bajanya agar

mengalami pengerasan. Lama waktu tahan dalam proses *carburizing* memiliki pengaruh langsung terhadap kedalaman penetrasi *carbon* ke dalam material. Semakin lama waktu tahan, semakin dalam *carbon* dapat meresap ke dalam permukaan material. Ini mengartikan bahwa material akan memiliki lapisan yang lebih dalam dengan kandungan *carbon* yang lebih tinggi, yang pada gilirannya akan meningkatkan kekerasan permukaan material tersebut. Selain itu, lama waktu tahan juga mempengaruhi proses difusi *carbon* ke dalam material. Dalam proses *carburizing*, *carbon* harus difusikan ke dalam material secara merata untuk mencapai hasil yang diinginkan. Lama waktu tahan yang cukup akan memberikan waktu yang lebih baik bagi *carbon* untuk difusikan secara merata, sehingga menghasilkan lapisan *carburizing* yang homogen dan konsisten di seluruh permukaan material. Selain meningkatkan kekerasan permukaan, lama waktu tahan yang tepat juga dapat mempengaruhi ketahanan aus material. Lama waktu tahan yang cukup akan memungkinkan *carbon* meresap lebih dalam ke dalam material, sehingga meningkatkan kekerasan dan ketahanan ausnya. Material yang telah mengalami proses *carburizing* dengan lama waktu tahan yang optimal akan mampu menghadapi beban dan gesekan yang lebih tinggi tanpa mengalami keausan yang signifikan (Hosseini, 2016).



Gambar 2. 6 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Kekerasan
(ASM International, 1991)

Didapatkan pengaruh dari waktu tahan terhadap kekerasan pada baja, dapat dilihat pada Gambar 2.6 dimana terjadi fluktuasi terhadap kekerasan material dengan variasi temperatur dan waktu tahan. Didapatkan bahwa semakin tinggi waktu tahan proses karburisasi maka cenderung menghasilkan nilai kekerasan yang meningkat. Selain itu, didapatkan pula bahwa temperatur yang ideal adalah 950°C dimana kekerasan meningkat secara eksponensial (ASM International, 1991).

Selain itu, waktu penahanan juga berpengaruh terhadap terbentuknya struktur mikro dan fasa pada paduan. Proses *carburizing* pada baja dapat mempengaruhi struktur mikro dan fasa dari baja tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi perubahan struktur mikro dalam baja selama proses *carburizing* adalah waktu penahanan, waktu, dan siklus pendinginan. Struktur mikro yang terjadi setelah pendinginan akan tergantung pada laju pendinginan. Selama proses *carburizing*, terjadi beberapa perubahan struktur mikro, dimana perubahan ini akan

menyebabkan terjadinya perubahan sifat dari logam tersebut. Tujuan dari proses *carburizing* adalah untuk meningkatkan ketahanan aus dengan jalan mempertinggi kekerasan permukaan baja *carbon* dan meningkatkan karakteristik fatik dari baja *carbon* tersebut. Pada proses pengerasan permukaan dengan metode *carburizing*, penambahan kadar *carbon* dilakukan dengan mendifusikan *carbon* melalui permukaan baja sehingga permukaan baja mengandung cukup *carbon* untuk dikeraskan dengan pendinginan (Brien, 2020). Dari lamanya waktu penahanan ini cenderung akan menghasilkan banyaknya fasa *pearlite* pada mikrostruktur, dan berkurangnya fasa *ferrite*.

Dalam proses *carburizing*, waktu menjadi faktor kritis yang mempengaruhi penetrasi *case depth*. Penetrasi *case depth* adalah parameter yang mengukur sejauh mana unsur *carbon* dapat menembus permukaan benda kerja. Penetrasi yang lebih dalam dapat dicapai dengan meningkatkan waktu paparan benda kerja dalam proses *carburizing* atau dapat dikatakan bahwa *case depth* meningkat seiring dengan meningkatnya waktu *carburizing* (Ramli & Wu, 2022). Hal ini terjadi karena adanya reaksi difusi antara *carbon* dalam atmosfer gas *carburizing* dan permukaan benda kerja. Selama proses *carburizing*, *carbon* berdifusi melalui permukaan benda kerja dan memperkaya komposisi *carbon* pada lapisan permukaan. Dengan peningkatan waktu *carburizing*, molekul *carbon* dapat bergerak lebih jauh ke dalam, menghasilkan penetrasi *depth case* yang lebih besar. Dari nilai

case depth juga akan mempengaruhi kekerasan dan pembentukan fasa dari material.

Waktu tahan juga berpengaruh terhadap kekerasan dan fasa yang terbentuk pada material. Diketahui bahwa seiring dengan meningkatnya waktu tahan maka akan menghasilkan distribusi fasa *pearlite* yang lebih menyeluruh. Hal ini akan meningkatkan kekerasan dikarenakan difusi yang terjadi cenderung lebih tinggi seiring dengan meningkatnya waktu tahan. Dengan demikian, jika bahan atau logam tertentu dikenai waktu tahan yang lebih lama, maka akan terjadi peningkatan distribusi fasa *pearlite* secara keseluruhan. Peningkatan ini kemudian berkontribusi pada peningkatan kekerasan bahan tersebut. Hal ini disebabkan oleh tingginya tingkat difusi yang terjadi selama proses waktu tahan yang lebih lama, di mana partikel-partikel dalam bahan memiliki lebih banyak waktu untuk bergerak dan berinteraksi satu sama lain. Akibatnya, struktur fasa *pearlite* yang terbentuk lebih merata dan padat, yang pada gilirannya meningkatkan kekerasan bahan tersebut (Okwesileze, 2022).

Waktu tahan pada proses *carburizing* memainkan peran penting dalam menentukan laju difusi *carbon* ke dalam bahan logam. *Carburizing* adalah proses perlakuan panas di mana bahan logam ditempatkan dalam atmosfer yang kaya akan *carbon* untuk meningkatkan kadar *carbon* di permukaannya. Pada umumnya, semakin lama bahan logam terkena waktu tahan dalam atmosfer *carburizing*, semakin tinggi laju difusi *carbon*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan konsentrasi *carbon* antara permukaan bahan

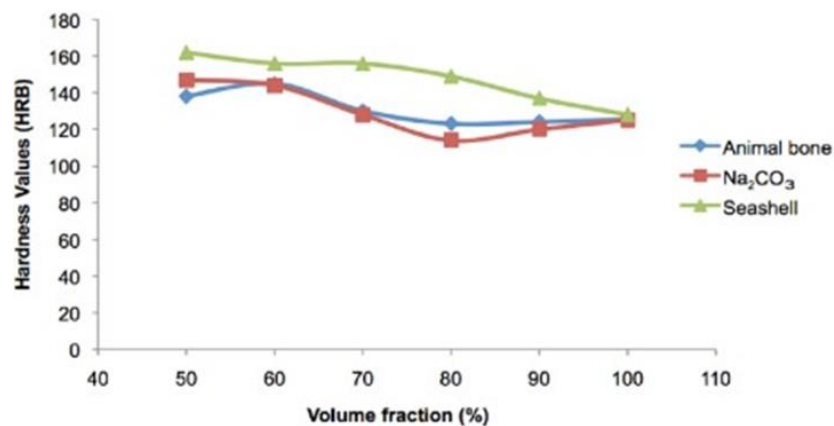
logam yang memiliki kandungan *carbon* rendah dan atmosfer *carburizing* yang memiliki kandungan *carbon* tinggi. Selama waktu tahan yang lebih lama, atom *carbon* akan berdifusi secara perlahan dari atmosfer *carburizing* ke permukaan bahan logam. Hal ini akan meningkatkan koefisien difusi seiring bertambahnya waktu tahan (Utami & Istana, 2019).

2.3.2 Pengaruh Komposisi *Carburizer*

Untuk jumlah bahan *energizer* yang berbeda, dengan menambah waktu *carburizing*, kedalaman wadah akan mengalami peningkatan. Bahan *energizer* digunakan untuk meningkatkan kedalaman *casing*. Pembentukan *carbon* monoksida ditingkatkan oleh *energizer* atau katalis, seperti barium *carbonat* (BaCO_3), kalsium *carbonat* (CaCO_3), kalium *carbonat* (K_2CO_3), dan natrium *carbonat* (Na_2CO_3), yang terdapat dalam senyawa *carburizing*. *Energizer* ini memfasilitasi pengurangan *carbon* dioksida dengan *carbon* untuk membentuk *carbon* monoksida. Dengan demikian, dalam sistem tertutup, jumlah *energizer* tidak berubah. *Carburizing* berlanjut selama *carbon* cukup hadir untuk bereaksi dengan kelebihan *carbon* dioksida. Namun, *energizer* yang paling terkenal dan mungkin paling efektif adalah BaCO_3 . Misalnya, barium *carbonat* terurai pada suhu tinggi dan menghasilkan *carbon* dioksida (reaksi 2.5) (Elmi Hosseini & Li, 2016).



Dengan menghasilkan *carbon* dioksida dalam kemasan, tekanan CO_2 meningkat. Menurut reaksi 2.2, *carbon* dioksida bereaksi dengan atom *carbon* yang ada dalam kemasan dan menghasilkan *carbon* monoksida. Jika rasio *carbon* monoksida menjadi *carbon* dioksida pada suhu konstan lebih dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah yang benar, dan fenomena karburisasi terjadi. Tetapi ketika rasio *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida pada suhu konstan kurang dari rasio kesetimbangan *carbon* monoksida terhadap *carbon* dioksida, reaksi 2.3 berjalan ke arah kiri, dan fenomena *decarburizing* terjadi. Ketika *carbon* berdifusi ke dalam baja, kandungan *carbon* di permukaan meningkat dibandingkan dengan inti baja, sehingga setelah pendinginan baja di dalam minyak, kekerasan permukaan meningkat dan inti tetap fleksibel (Ihom & Andona, 2018)



Gambar 2. 7 Hubungan Kekerasan dan Fraksi (ASM International, 1991)

Didapatkan pengaruh dari fraksi *energizer* terhadap kekerasan material. Pada Gambar 2.6 dapat dilihat bahwa kekerasan cenderung

meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi *energizer* yang menandakan bahwa fraksi kaburizer cenderung menurun dalam satuan volume fraksi. Kondisi ini dapat ditinjau berdasarkan fenomena yang terjadi selama proses *hardening* pada material dimana melibatkan jumlah kandungan *carbon* pada permukaan (ASM Internasional, 1991).

Nilai fraksi berat komposisi *carburizer* dapat mempengaruhi jenis dan distribusi fasa yang terbentuk dalam struktur mikro baja. Penambahan *carburizer* dengan nilai fraksi berat komposisi yang tinggi akan meningkatkan kandungan *carbon* pada permukaan baja. Lonjakan kandungan *carbon* ini dapat menyebabkan terbentuknya fasa *pearlite* yang memiliki kekerasan yang tinggi. Selain itu, fasa *pearlite* yang terbentuk juga dapat menghasilkan kekuatan yang baik pada baja (Benarioua, 2018). Lebih dari itu, peningkatan komposisi juga dapat menginisiasi fasa karbida ataupun *cementite* pada permukaan yang dapat menghasilkan kekerasan yang meningkat secara signifikan (Soenoko & Siswanto, 2018). Selain itu, nilai fraksi berat komposisi *carburizer* juga dapat mempengaruhi ukuran dan distribusi butir dalam struktur mikro baja. Dalam proses *carburizing*, *carburizer* yang ditambahkan dapat berinteraksi dengan matriks baja, membentuk karbida dan mengubah ukuran butir. Penambahan *carburizer* dengan nilai fraksi berat komposisi yang tinggi cenderung menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil dan distribusi yang lebih homogen. Hal ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Namun, seiring dengan peningkatan nilai fraksi berat komposisi *carburizer*, ada kemungkinan

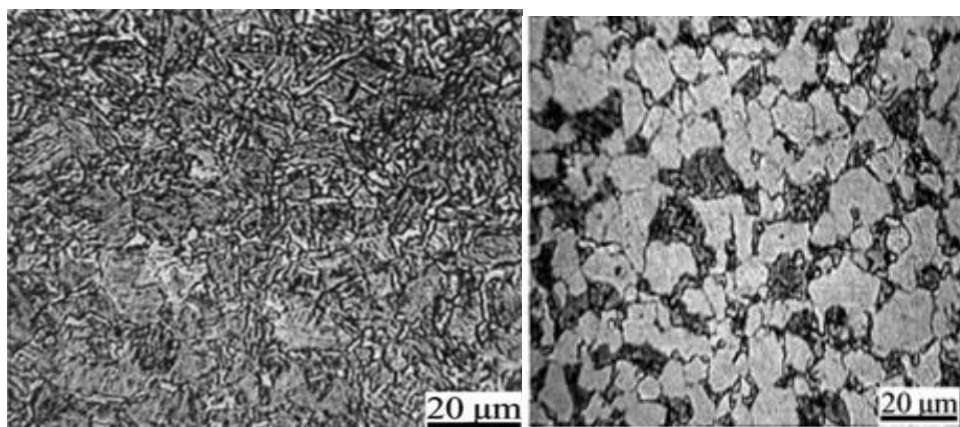
terjadinya segregasi *carbon* pada struktur mikro baja. Segregasi *carbon* dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam sifat mekanik dan ketangguhan baja.

Selanjutnya diketahui mengenai pengaruh komposisi *carburizer* yang tinggi terhadap meningkatnya kekerasan material. Tingginya konsentrasi dari *carburizer* akan menghasilkan deposit *carbon* yang terkonsentrasi pada permukaan. *Carburizer* yang memiliki kandungan *carbon* yang tinggi akan memberikan sumber *carbon* yang melimpah selama proses *carburizing*. *Carbon* yang ditambahkan ke permukaan benda kerja akan berdifusi dan memperkaya lapisan permukaan dengan kandungan *carbon* yang lebih tinggi. Hal ini akan menyebabkan peningkatan kekerasan material pada permukaan dan membentuk lapisan *case* yang keras dan tahan aus. Selain itu, deposit *carbon* yang terkonsentrasi pada permukaan juga memberikan perlindungan terhadap korosi dan abrasi (Ihom & Andona, 2018).

Peningkatan jumlah *energizer* yang tinggi dalam proses karburisasi memiliki pengaruh signifikan terhadap meningkatnya koefisien difusi pada material. Secara teoritis, semakin tinggi nilai katalis, maka akan menghasilkan difusi yang cenderung cepat dalam rentang waktu tertentu. Hal ini akan menghasilkan peningkatan difusivitas atom *carbon* yang lebih tinggi dibandingkan sampel dengan nilai katalis yang lebih rendah. Energi yang tinggi memungkinkan partikel *carbon* untuk bergerak secara lebih aktif dan menembus permukaan material dengan lebih efisien. Hal ini

mengakibatkan peningkatan laju difusi *carbon* ke dalam material, yang pada gilirannya meningkatkan kandungan *carbon* pada lapisan permukaan. (Joshua, 2021).

Terdapat pengaruh yang signifikan dari komposisi nilai *carburizer* terhadap kekerasan material. Nilai fraksi berat komposisi *carburizer* mengacu pada persentase *carbon* yang terkandung dalam bahan *carburizer* yang ditambahkan ke dalam proses *carburizing*. Pada umumnya, semakin tinggi nilai fraksi berat komposisi *carburizer*, semakin tinggi pula nilai kekerasan baja yang terbentuk. Hal ini dikarenakan penambahan *carburizer* dengan kandungan *carbon* yang tinggi akan meningkatkan konsentrasi *carbon* pada permukaan baja. *Carbon* yang terlarut dalam matriks baja akan membentuk fasa *martensite* yang memiliki kekerasan yang tinggi. Oleh karena itu, penambahan *carburizer* dengan nilai fraksi berat komposisi yang tinggi dapat meningkatkan kekerasan baja secara signifikan. Namun, perlu diperhatikan bahwa nilai fraksi berat komposisi *carburizer* yang terlalu tinggi juga dapat memiliki dampak negatif. Jika terlalu banyak *carburizer* yang ditambahkan, dapat terjadi pembentukan fasa karbida yang berlebihan.



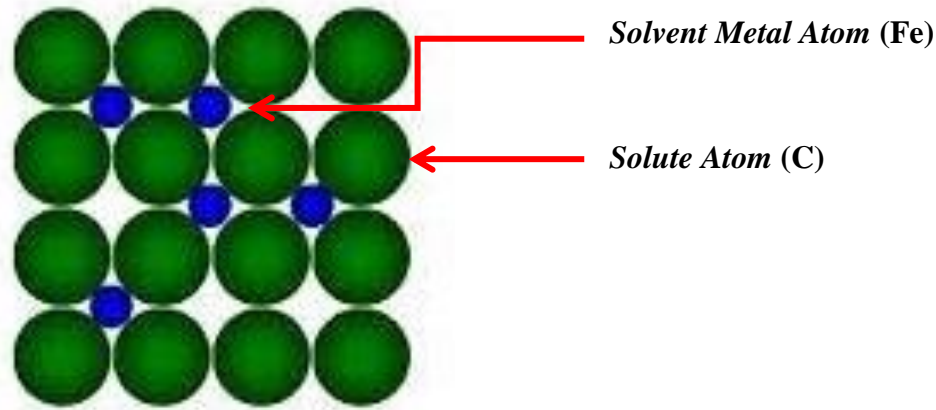
Gambar 2. 8 Sampel Hasil *Pack Carburizing* (Elmi Hosseini & Li, 2016).

2.4 Difusi Carbon

Difusi pada proses *carburizing* adalah fenomena penting yang terjadi dalam perlakuan panas logam untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan ausnya. *Carburizing* adalah proses pengenalan *carbon* ke permukaan logam, khususnya baja, untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Dalam proses ini, logam ditempatkan dalam atmosfer yang kaya akan *carbon*, seperti gas amonia atau campuran gas metana dan hidrogen, pada suhu tinggi. Dalam proses *carburizing*, difusi menjadi aspek utama yang mempengaruhi penyerapan *carbon* oleh logam. Difusi adalah pergerakan atom atau molekul dari area berkonsentrasi tinggi ke area berkonsentrasi rendah. Dalam hal ini, *carbon* berdifusi dari atmosfer yang kaya akan *carbon* ke permukaan logam yang memiliki konsentrasi *carbon* yang lebih rendah. Berbagai faktor mempengaruhi laju difusi dalam proses *carburizing*. Salah satunya adalah suhu. Semakin tinggi suhu, semakin cepat laju difusi *carbon* ke dalam logam. Selain itu, komposisi logam juga berpengaruh. Logam yang memiliki struktur mikro yang lebih longgar atau serbuk logam yang memiliki luas permukaan yang besar memiliki laju difusi yang lebih tinggi. Selain itu, durasi proses juga menjadi faktor penting dalam difusi pada proses *carburizing*. Proses yang lebih lama memberikan waktu yang lebih banyak bagi *carbon* untuk berdifusi ke dalam logam, sehingga meningkatkan kedalaman lapisan *carburizing* yang dihasilkan.

Pengendalian difusi dalam proses *carburizing* dapat dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter seperti suhu, komposisi atmosfer, dan durasi proses. Misalnya, suhu yang dikontrol secara cermat dapat memastikan laju difusi

yang sesuai untuk mencapai tingkat *carburizing* yang diinginkan tanpa menyebabkan distorsi atau kerusakan pada logam.



Gambar 2. 9 Skema Difusi *Carbon* C pada Fe (Benarioua, 2018)

Dalam difusi *carbon*, dikenal istilah difusi *interstitial*. Difusi ini merupakan fenomena dimana atom *carbon* menembus secara *interstitial* atau celah antara atom-atom besi dalam struktur kristal. Dapat dilihat pada Gambar 2.5 bahwa difusi *interstitial* umumnya terjadi pada celah antara atom besi dengan koordinasi tetrahedral. Atom *carbon* yang cukup kecil dapat masuk ke dalam celah ini. Proses difusi interstitial terjadi pada suhu tinggi, ketika atom besi memiliki energi kinetik yang cukup untuk memungkinkan atom *carbon* bergerak melalui celah *interstitial*. Difusi interstitial terjadi melalui pergerakan atom *carbon* dari celah ke celah di sepanjang jalur yang tersedia antara atom besi (Utami H. , 2017).

2.5.1 Difusi Tidak Menetap (*Unsteady State*)

Unsteady state diffusion, juga dikenal sebagai difusi tidak mantap, mengacu pada proses difusi di mana konsentrasi partikel atau zat yang sedang berdifusi tidak mencapai kesetimbangan dalam jangka waktu

tertentu. Dalam unsteady state diffusion, terdapat perubahan yang signifikan dalam konsentrasi partikel selama periode waktu tertentu. Dalam kondisi difusi mantap, konsentrasi partikel di seluruh sistem mencapai kesetimbangan, di mana laju difusi masuk sama dengan laju difusi keluar. Namun, dalam unsteady state diffusion, kondisi kesetimbangan belum tercapai dan perubahan konsentrasi masih terjadi (Utami H. , 2017).

Unsteady state diffusion dapat terjadi pada beberapa kondisi, antara lain adalah:

1. Perubahan konsentrasi awal: Jika terdapat perubahan tiba-tiba dalam konsentrasi awal partikel di suatu daerah, maka akan terjadi unsteady state diffusion. Contohnya adalah ketika konsentrasi partikel berubah akibat perubahan suhu atau komposisi atmosfer.
2. Perubahan kondisi batas: Jika kondisi batas sistem berubah, seperti perubahan suhu atau konsentrasi pada permukaan atau batas sistem, maka akan terjadi unsteady state diffusion. Misalnya, ketika ada perubahan tiba-tiba pada konsentrasi partikel di permukaan yang mempengaruhi laju difusi masuk atau keluar dari sistem.
3. Perubahan waktu: Jika waktu difusi masih dalam rentang yang signifikan, unsteady state diffusion terjadi karena partikel belum mencapai kesetimbangan. Ini sering terjadi pada proses difusi pada skala waktu yang sangat kecil, seperti pada skala nano atau mikro.

2.5.2 Koefisien Difusi

Koefisien difusi adalah ukuran yang menggambarkan seberapa

cepat atau lambat atom atau molekul dapat berdifusi atau bergerak melalui suatu medium. Secara spesifik, koefisien difusi mengukur laju pergerakan partikel-partikel tersebut sebagai respons terhadap perbedaan konsentrasi, gradien konsentrasi, atau perbedaan potensial lainnya dalam sistem.

Koefisien difusi dapat dinyatakan dalam berbagai satuan tergantung pada jenis difusi dan medium yang terlibat. Satuan umum untuk koefisien difusi adalah meter persegi per detik (m^2/s). Namun, tergantung pada jenis materi yang berdifusi, satuan lain seperti centimeter persegi per detik (cm^2/s) atau milimeter persegi per detik (mm^2/s) juga dapat digunakan.

Dalam menentukan koefisien difusi, digunakan sebuah hukum yang dicetuskan oleh fisikawan Jerman bernama Adolf Fick pada abad ke-19. Hukum ini disebut sebagai Hukum Fick Kedua yang menjelaskan kalkulasi mengenai konstanta pada permukaan yang ditulis sebagaimana persamaan di bawah ini:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

Hukum Fick Kedua dengan kondisi permukaan konsentrasi konstan (constant *surface* concentration) adalah variasi dari Hukum Fick Kedua yang mempertimbangkan situasi di mana konsentrasi partikel pada permukaan difusi tetap konstan sepanjang waktu. Ini berarti bahwa pada permukaan di mana difusi terjadi, konsentrasi partikel dijaga pada tingkat yang konstan.