

PERANCANGAN PACK CARBURIZING DENGAN METODA EKSPERIMEN SUNGGUHAN MENGGUNAKAN ARANG LAMTORO LOKAL PULAU TIMOR

Oktovianus Dharma Rerung

Jurusan Teknik Mesin, Program Studi D4 Produksi dan Perawatan
Politeknik Negeri Kupang
Email: s55_mr@yahoo.co.id

Dedy Nataniel Uly

Jurusan Teknik Mesin, Program Studi D3 Teknik Otomotif
Politeknik Negeri Kupang
Email: dedy_ully@yahoo.com

ABSTRAK

Pack carburizing adalah salah satu cara perlakuan panas untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja. Penelitian ini menggunakan arang lamtoro lokal pulau Timor yang biasa digunakan sebagai kayu bakar oleh masyarakat tradisional. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari sifat fisis dan mekanis baja karbon rendah akibat pengarbonan. Metode yang digunakan adalah eksperimen sungguhan yaitu melakukan pengarbonan baja dengan *holding time* 1-4 jam dengan *quencing* air. Hasil penelitian menunjukkan *holding time* berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan tarik (σ) dan kekerasan (HRC) tetapi berbanding terbalik dengan regangan (ϵ). Nilai kekerasan baja juga meningkat signifikan antara 374.66% ~ 394.50%, dengan perubahan fisis dari transformasi fasa lamelar perlit menjadi fasa martensit. Model matematis yang dibentuk masing-masing hubungan *holding time* terhadap *yielding strength*, kekerasan dan regangan. Variabel – variable X dari masing-masing pendekatan matematis tersebut mengalami penambahan/penurunan maka variabel Y mengikuti operasi aljabar yang terbentuk dari persamaan regresi maupun eksponensial tersebut. Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan arang kayu lamtoro lokal Timor baik digunakan untuk bahan pengarbonan baja.

Kata kunci: *pack carburizing*; arang lamtoro; sifat fisis dan mekanis; model matematis.

ABSTRACT

Pack carburizing is one way of heat treatment to increase the hardness of steel surfaces. This research uses local lamtoro charcoal from the island of Timor which is commonly used as firewood by traditional communities. The purpose of this study was to determine the characteristics of the physical and mechanical properties of low carbon steel due to carbonization. The method used is a real experiment that is doing steel carbonization with 1-4 hour holding time with water cooling. The results showed that holding time was directly proportional to the increase in tensile strength (σ) and hardness (HRC) but were inversely proportional to strain (ϵ). The steel hardness value also increases significantly between 374.66% ~ 394.50%, with the physical change from the transformation of the pearlite lamellar phase to the martensite phase. The mathematical model formed by each holding time relationship to yielding point, hardness and strain. The X variables of each approach mathematically experiencing an increase/decrease, the variable Y follows the algebraic operation formed from the regression equation and the exponential. This research proves that the use of Timorese local lamtoro charcoal is good for steel carbonization.

Keywords: *pack carburizing; lamtoro charcoal; physical properties and mechanical properties; mathematical model.*

1. PENDAHULUAN

Masyarakat desa-desa di pulau Timor provinsi Nusat Tenggara Timur sebahagian masih menggunakan kayu sebagai sumber energi yang digunakan sebagai kayu bakar untuk memasak. Keunikan alam dari pulau Timor yang terkenal gersang, tanah bebatuan karang dan kadar kelembaban yang rendah berdampak pada pohon dan tumbuhan yang tumbuh. Pohon yang tumbuh menyukai tempat yang beriklim

panas dan gersang, seperti cendana, kesambi, lontar, dan beberapa tanaman lainnya termasuk lamtoro. Salah satu jenis kayu yang multi fungsi oleh penduduk lokal adalah pohon lamtoro dimana daunnya digunakan untuk makanan ternak dan batangnya sebagai kayu bakar. Secara umum pohon lamtoro bukanlah kayu yang keras dibandingkan jenis kayu lainnya. Walaupun demikian kayu lamtoro mempunyai keunikan dimana mempunyai kadar karbon terikat yang cukup tinggi tetapi nilai kalornya relative lebih rendah dari kayu keras lainnya yang tumbuh di pulau Timor. Hasil penelitian penelitian terdahulu menunjukkan dimana kadar karbon terikat pada arang arang kayu jati adalah 80,18 % dengan nilai kalor 7.141 kal/gram sedangkan lamtoro lebih besar yaitu. 85,18 % dengan nilai kalornya lebih rendah yaitu 7.062,18 kal/gram [1]. Selanjutnya disebutkan bahwa kadar karbon terikat mempengaruhi penurunan besi oksida dari biji besi pada saat produksi logam. Kadar karbon terikat yang tinggi akan disenangi untuk produksi logam [2]. Dengan demikian akan menjadi menarik meneliti lebih jauh penggunaan arang lamtoro untuk *carburizing* pada logam ferro.

Logam ferro merupakan komponen utama industri manufaktur baik yang menggunakan baja maupun besi tuang. Khusus untuk *spare part* dari komponen perlu memperhatikan karakteristik logam yang digunakan agar dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Logam dengan karbon rendah banyak digunakan karena mempunyai keuletan yang tinggi dan mudah dikerjakan dengan mesin-mesin perkakas. Akan tetapi baja karbon yang mempunyai kandungan karbon yang rendah juga memiliki kekerasan rendah, tegangan tarik rendah dan mudah mengalami keausan. Oleh sebab itu *spare part* baja tersebut perlu dilakukan proses *carburizing* untuk menambah kekerasan dan kekuatan. Beberapa sifat mekanik dari hasil *carburizing* adalah tegangan yaitu perbandingan antara gaya tarik yang berkerja benda terhadap luas penampang benda tersebut. Batas dari elastisitas dari tegangan taik adalah kekuatan luluh disebut *yielding point*. Regangan adalah pebandingan antara pertambahan panjang benda terhadap panjang benda mula-mula dan kekerasan ketahanan bahan atau logam terhadap deformasi indentasi. Pada umumnya pengujian kekerasan bertujuan untuk mengukur tahanan dari bahan atau logam terhadap deformasi plastis. Proses karburasi padat berlangsung permukaan baja karbon rendah pada suhu di daerah austenitik, yang umumnya adalah antara 800°C hingga 950°C untuk baja karbon rendah [3]. Proses *carburizing* pada baja karbon rendah dapat meningkatkan kekerasan pada permukaan sehingga mampu tahan terhadap gesekan. Salah satu metode *carburizing* adalah proses *pack carburizing*. *Pack carburizing* adalah benda kerja dan karbon diletakkan dalam sebuah container untuk memastikan optimum permukaan yang akan dikeraskan. Menurut beberapa penelitian sebelumnya yang dilakukan E. Gunawan yang menggunakan berbagai macam bahan yang mengandung karbon, Sujita menggunakan serbuk arang tongkol dan serbuk arang cangkang mutiara, Aidha dan Mirantie Dwiharsanti, dkk, yang menggunakan arang tempurung kelapa dan bahan katalisator BaCO₃. Tujuan penelitian mereka adalah untuk mengetahui factor-faktor yang berpengaruh terhadap kekerasan baja karbon rendah dan menghasilkan baja karbon dengan tingkat kekerasan yang diinginkan [4][5][6][7].

Menyimak akan data-data tentang arang lamtoro dan penelitian industri yang telah dilakukan sebelumnya, maka penelitian ini ingin mencermati sejauhmana pengaruh pengarbonan baik pengujian eksperimental dengan eksperimen sungguhan maupun pendekatan penelitian industri dengan cara faktorial terhadap *tensile strength*, *hardness test* dan *strain* diikuti dengan perubahan foto mikrostruktur hasil pengujian metalografi. Secara eksperimental sungguhan akan menghasilkan hubungan sebab akibat dengan pengamatan langsung dan eksperimen dengan pendekatan regresi menghasilkan pendekatan matematis untuk mengetahui karakteristik dari masing-masing pengujian (*tensile*, *hardness* dan *strain*) terhadap *holding time*. Mengingat jumlah data yang disajikan dalam pengamatan langsung jumlahnya tidak terlalu banyak maka dalam pendekatan matematis dilakukan dengan menghitung persamaan matematis dengan menggunakan software sigmaplot.

Deformasi dalam mekanika kontinum adalah transformasi sebuah benda dari kondisi semula ke kondisi terkini. Makna dari "kondisi" dapat diartikan sebagai serangkaian posisi dari semua partikel yang ada di dalam benda tersebut. Sebuah deformasi dapat disebabkan oleh gaya eksternal, gaya internal, dalam penelitian ini gaya eksternal dapat diakibatkan oleh temperatur austenite dan gaya internal karena perubahan nilai karbon. Regangan adalah bagian dari deformasi, yang dideskripsikan sebagai perubahan relatif dari partikel-partikel di dalam benda yang bukan merupakan benda kaku. Definisi lain dari regangan bisa berbeda-beda tergantung pada bidang apa istilah tersebut digunakan atau dari dan ke titik mana regangan terjadi. Dalam benda kontinu, bidang yang terdeformasi dihasilkan dari tegangan yang diaplikasikan akibat adanya gaya atau pemuaiian di dalam benda. Hubungan antara tegangan dan regangan diekspresikan sebagai persamaan konstitutif, seperti hukum Hooke mengenai elastisitas linear. Benda yang terdeformasi dapat kembali ke kondisi semula setelah gaya yang diaplikasikan dilepas, dan itu disebut sebagai deformasi elastis. Namun ada juga deformasi tidak dapat dikembalikan meski gaya telah dilepas, yang disebut dengan deformasi plastis, yang terjadi ketika benda telah melewati batas elastis atau *yield* dan merupakan hasil dari slip atau mekanisme dislokasi pada tingkat atom. Tipe lainnya dari deformasi yang tidak dapat kembali yaitu deformasi *viscous* atau deformasi viskoelastisitas. Dalam kasus

deformasi elastis, fungsi respon yang terkait dengan regangan terhadap tegangan dijelaskan dalam ekspresi tensor hukum Hooke.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen sungguhan (*true experiment design*) dan pendekatan eksperimental factorial. Metode eksperimen sungguhan merupakan rancangan penelitian yang meneliti tentang kemungkinan sebab akibat antara kelompok yang diberi perlakuan dengan kelompok kontrol (kelompok tidak diberi perlakuan) [8]. Sedangkan pendekatan matematis eksperimen dengan menghitung persamaan matematis dari hubungan sebab akibat dengan regresi linear dari masing-masing variabel (*hardness*, *yielding point* dan *strain*) yang dipengaruhi oleh *holding time*. Regresi linier adalah metode statistika yang digunakan untuk membentuk model atau hubungan antara satu atau lebih variabel bebas X dengan sebuah variabel respon Y. Analisis regresi dengan satu variabel bebas X disebut sebagai regresi linier sederhana, sedangkan jika terdapat lebih dari satu variabel bebas X, disebut sebagai regresi linier berganda [9]. Sedangkan untuk menjelaskan pendekatan *exponential smoothing* adalah peramalan intuitif metode yang menitik beratkan pada timeseries yang diamati. Pendekatan ini biasanya dikaitkan dengan kesederhanaan, efisiensi komputasi, kemudahan menyesuaikan respon terhadap perubahan dalam proses perkiraan, dan akurasi yang wajar. Setelah mempelajari teori tentang regangan dalam pengujian tarik maka pengujian yang cocok dengan hal ini adalah karakteristik hasil *holding time* terhadap *strain*.

Rancangan penelitian menggunakan bahan baja karbon rendah ST 37 berpenampang bulat berdiameter 10 mm. Keseluruhan jumlah spesimen uji yang disiapkan adalah untuk pengujian tarik sebanyak 15 (lima belas) spesimen uji, pengujian kekerasan sebanyak 5 (lima) spesimen uji dan pengujian metalografi 5 (lima) spesimen uji. Penjelasan masing-masing kelompok perlakuan dijelaskan sebagai berikut:

2.1 Kelompok Yang Mendapat Perlakuan

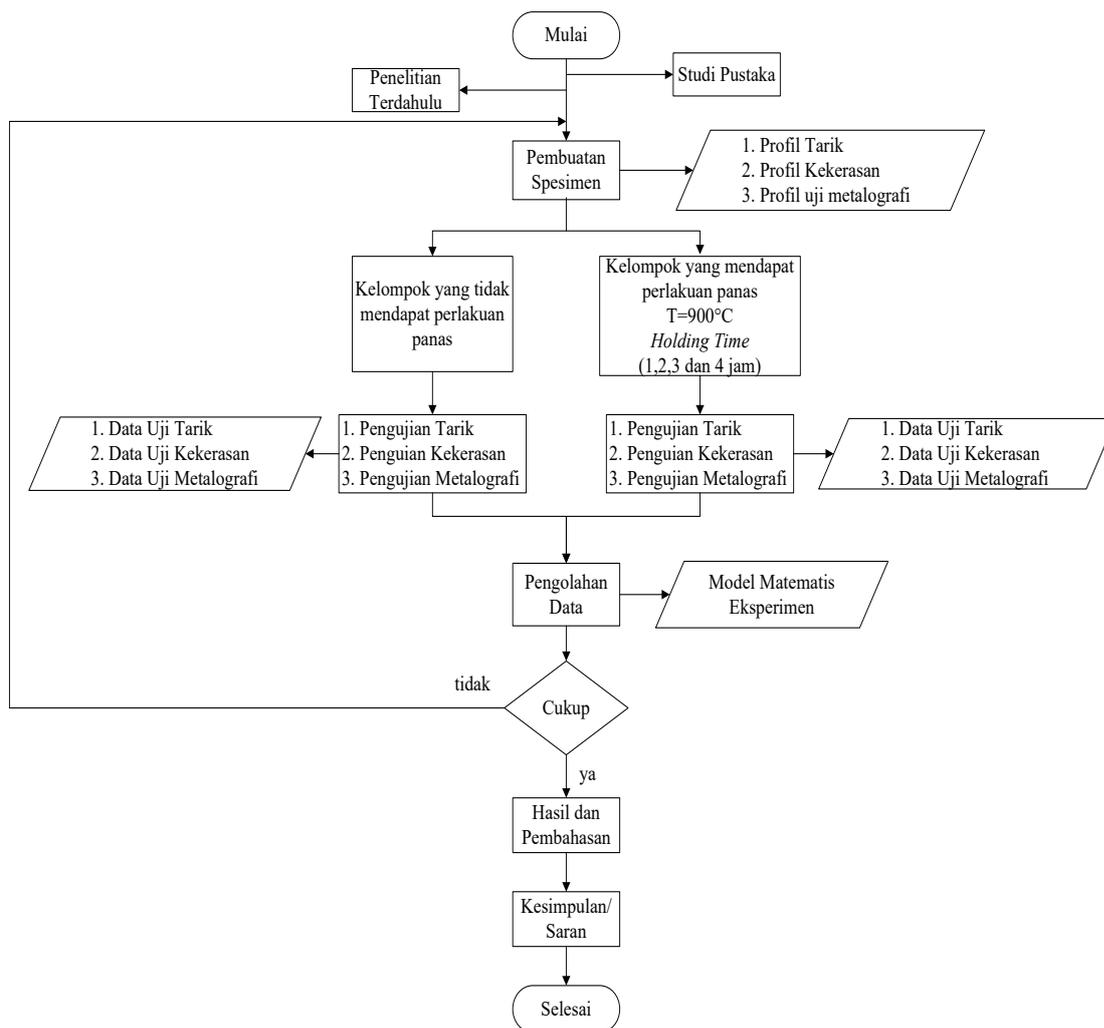
Carburizing merupakan suatu proses penambahan kandungan karbon pada permukaan baja untuk mendapatkan sifat baja yang lebih keras pada permukaan seperti yang dilakukan penelitian terdahulu menggunakan gas karburising [10]. Kelompok *pack carburizing* dengan perlakuan panas pada 900 °C pada *holding time* 1, 2, 3 dan 4 jam. Disiapkan 12 (dua belas) spesimen uji tarik untuk kelompok ini, dimana masing-masing 3 (tiga) spesimen untuk setiap *holding time* (1 jam, 2 jam, 3 jam dan 4 jam). Pengujian tarik mengikuti standarisasi di seluruh dunia, misalnya di Amerika dengan ASTM E8 dan Jepang dengan JIS 2241. Untuk pengujian kekerasan dan uji metalografi masing-masing 4 spesimen dengan rincian tiap-tiap perlakuan waktu 1 hingga 4 jam *holding time* masing-masing 1(satu) spesimen uji. Pengujian kekerasan menggunakan pengujian *Hardness Rockwell C* dan pengujian metalografi menggunakan mikroskop *binocular* terkoneksi *software* HIROX KH-1300.

2.2 Kelompok Yang Tidak Mendapat Perlakuan

Kelompok tidak mendapat perlakuan panas dipakai sebagai pembanding hasil uji yang telah dilakukan kelompok yang mendapat perlakuan. Terdiri dari 3(tiga) specimen tarik dan masing-masing 1(satu) specimen uji kekerasan dan uji metalografi. Pengujian yang dilakukan sama dengan metoda pengujian kelompok yang mendapat perlakuan kecuali indentor pengujian kekerasan menggunakan *Hardness Rockwell B*. Jika diuraikan dalam hubungan sebab akibat antar variabel, maka kelompok yang mendapat perlakuan membentuk variabel bebas; adalah suhu perlakuan panas 900° C, *holding time* pada 1,2,3 dan 4 jam dan media pendingin yang dipilih adalah pendingin air. Variabel bergantung adalah nilai hasil pengujian tarik, pengujian kekerasan dan perubahan fasa hasil pengujian metalografi. Sedangkan variabel kontrol adalah nilai pengujian tarik, pengujian kekerasan dan uji metalografi yang tidak mendapat perlakuan.

Hasil yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk melihat hubungan kekuatan tarik luluh (σ) *yield point* dan regangan (%) *strain* pada *holding time* 1 hingga 4 jam. Demikian juga bagaimana fenomena kekerasan yang terjadi pada material baja karbon rendah dengan kondisi yang sama. Pengujian metalografi dipakai sebagai gambaran visual transformasi fasa pada desain *pack carburizing* menggunakan arang lamtoro lokal Pulau Timor.

2.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan proses karburising baja karbon rendah menggunakan arang lamtoro lokal Kupang pada kotak *heat treatment* dan dimasukkan ke dalam tungku hingga 900°C. Terdapat 3 jenis bentuk profil benda uji yang digunakan berdasarkan rancangan penelitian yaitu profil uji tarik, profil uji kekerasan dan profil uji metalografi. Waktu tahan (*holding time*) masing-masing selama 1, 2, 3 dan 4 jam untuk masing-masing bentuk uji profil. Media quenching pendingin yang digunakan adalah air yang disebut juga sebagai pendinginan cepat. Setelah pendinginan dilakukan masing-masing bentuk profil uji dikumpulkan sesuai waktu perlakuannya. Adapun pengujian yang dilakukan adalah kelompok pengujian tarik, kelompok pengujian kekerasan dan kelompok pengujian metalografi.

3.1 Hasil

Setelah melaksanakan proses *pack carburizing* kemudian dilakukan pengujian masing-masing karakteristik dengan eksperimen sungguhan dan pengamatan langsung. Hasil dari data tersebut kemudian dihitung atau ditampilkan sesuai hasil pengamatan dan ditabelkan. Tabel data hasil pengujian tarik (*tensile test*), pengujian kekerasan (*hardness test*) ditabel seperti di bawah ini sedangkan data hasil foto microstruktur hasil pengujian metalografi diberi penjelasan.

Tabel 1. Data hasil pengujian tarik dan pengujian kekerasan

\varnothing (mm)	<i> Holding Time</i>	Beban (F) (N)	ΔL (mm)	<i> Yield Point</i> (N/mm ²)	ϵ ($\Delta L/L_0 \cdot 100$) (%)	σ (F/A ₀) (N/mm ²)	<i> Hardness</i> HRB HRC	
9,70	Tanpa	44.800,00	23,33	410,24	25,92	606,55	95,06	-16
9,80	Perlakuan	43.100,00	22,44	388,65	25,54	571,69	98,65	21
9,80	Panas	42.900,00	21,89	396,60	24,32	569,04	96,20	-17
9,77		43.600,00	22,55	398,50	25,26	582,43	96,64	-18
9,90		49.700,00	20,10	487,39	20,96	645,96		50,33
9,80	1 Jam	48.700,00	19,25	462,76	21,39	632,96		49,22
9,80		48.900,00	19,70	494,76	21,89	635,56		48,78
9,83		49.100,00	19,68	481,64	21,41	638,16		49,44
9,90		52.600,00	18,86	500,39	20,96	683,65		51,34
9,85	2 Jam	51.500,00	18,67	491,07	20,74	676,21		54,20
9,90		52.000,00	18,90	502,99	21,00	675,85		50,45
9,88		52.033,33	18,81	498,15	20,90	678,57		52,00
9,85		51.900,00	17,99	517,33	19,99	681,46		51,85
9,90	3 Jam	54.200,00	17,85	515,99	19,83	704,45		52,45
9,80		52.300,00	17,90	505,37	19,89	693,73		52,80
9,85		52.800,00	17,91	512,90	19,90	693,21		52,37
9,85		54.900,00	16,98	555,41	18,87	720,85		55,34
9,90	4 Jam	54.700,00	17,88	549,78	19,87	710,94		52,45
9,90		57.600,00	18,20	567,98	20,22	748,64		51,23
9,88		55.733,33	17,69	557,72	19,65	726,81		53,01

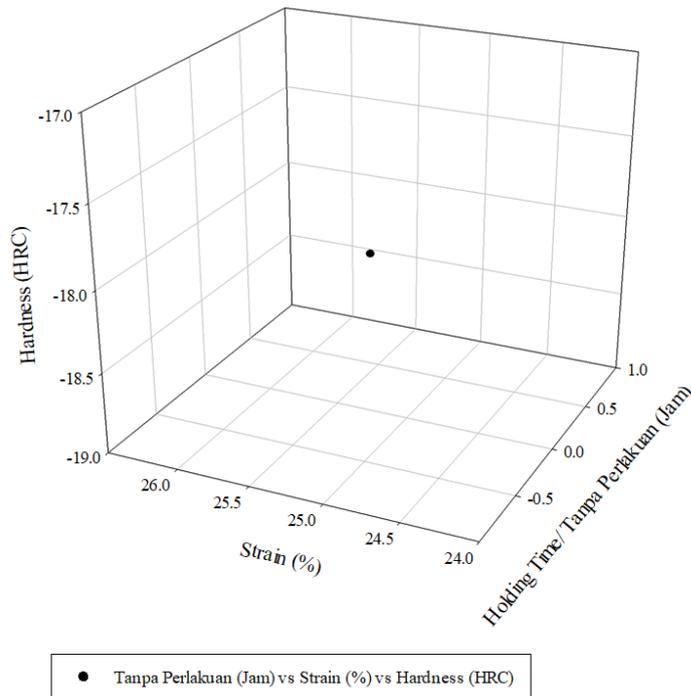
Pada tabel 1. Hasil pengujian Tarik dan Pengujian kekerasan juga menunjukkan hubungan *holding time* terhadap kekerasan *yielding point* dan *hardness*.

3.2 Pembahasan

3.2.1 Hubungan Holding Time, Hardness dan Strain

Regangan atau strain adalah perubahan pada ukuran benda karena gaya dalam kesetimbangan dibandingkan dengan ukuran semula. *Strain* juga dapat dikatakan sebagai tingkat deformasi. Tingkat deformasi tersebut dapat memanjang, memendek, membesar, mengecil dan sebagainya. Pembebanan akan mengalami deformasi. Perbandingan antara deformasi dengan panjang mula-mula disebut sebagai regangan. *Holding time* adalah Mempertahankan suhu pada waktu tertentu sehingga temperaturnya merata dan perubahan struktur baja terjadi secara merata. Sedangkan kekerasan material menggunakan metoda *rockwell* ini didasarkan pada penekanan sebuah *indentor* dengan suatu gaya tekan tertentu ke permukaan yang rata dan bersih dari suatu logam yang diuji kekerasannya. Setelah gaya tekan dikembalikan ke gaya *minor* maka yang dijadikan dasar perhitungan nilai kekerasan *rockwell* bukanlah hasil pengukuran diameter ataupun diagonal bekas lekukan tetapi justru “dalamnya bekas lekukan yang terjadi itu”. Inilah kelainan cara *rockwell* dibandingkan dengan cara pengujian kekerasan lainnya. Pengujian *rockwell* yang umumnya biasa dipakai ada ke jenis yaitu HR_A, HRB, dan HRC. HR itu sendiri merupakan suatu singkatan dari kekerasan *rockwell* atau *rockwell hardness number* dan kadang-kadang disingkat dengan huruf R saja.

Secara umum data hasil pengujian memberikan gambaran karakteristik tiga dimensi seperti di bawah ini. Hubungan *holding time*, *hardness* dan *strain* tanpa perlakuan *pack carburizing* menunjukkan pada satu titik hubungan dari ketiganya. *Holding time* pada 0 jam, *hardness test* pada skala 96.64 HRB atau -18 HRC dan *strain* sebesar 26.26 %. Jika dijelaskan lebih jauh materialnya lunak dan elastis.

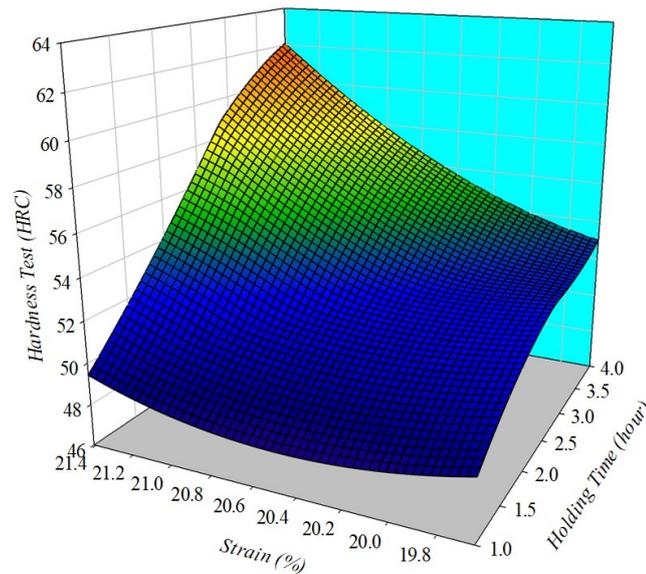


Gambar 2. Hubungan *Holding Time*, *Hardness* Dan *Strain* Tanpa Perlakuan *Pack Carburizing*

Deskripsi untuk material yang mendapat perlakuan *pack carburizing* dimulai dari kondisi seperti pada gambar 1. Secara perlahan temperature dalam tungku mulai bergerak dari titik 0 °C hingga mencapai temperatur austenit pada 900 °C, kemudian ditahan 1 – 4 jam (*holding time*). Pada temperature inilah proses difusi dalam baja mulai bekerja unsur karbon pada arang akan mengikat ferro yang mengakibatkan konsentrasi arang bertambah dan baja menjadi lebih keras. Hubungan yang dari ketga variabel, *holding time*, *hardness* dan *strain* menunjukkan pergerakan *hardness* meningkat berbanding lurus dengan peningkatan *holding time*, sedangkan pergerakan *strain* menurun atau berbanding terbalik dengan meningkatnya *holding time*. Dari tabel hasil dan gambar 2 pengujian terlihat perubahan - perubahan sifat mekanik akibat perlakuan panas, sebagai berikut:

- Kekuatan (σ) tarik meningkat berbanding lurus dengan waktu waktu tahan (*holding time*). Setiap perubahan waktu *holding time* 1, 2, 3 dan 4 jam meningkatkan kekuatan tegangan yielding point maupun kekuatan tarik maksimum.
- Sebaliknya regangan (ϵ) yang terjadi berbanding terbalik dengan peningkatan *holding time* dalam tungku. Semakin lama *holding time* akan menurunkan *strain*, yang juga berarti peningkatan tensile *strength* akan menurunkan *strain*. *Strain* menurun dari benda asli tanpa perlakuan 25.26% menjadi 21.41% - 19.65 % pada *holding time* 1-4 jam, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.
- Jika dibandingkan dengan benda aslinya dimana tegangan tarik maksimum berkisar 582 N/mm² meningkat menjadi 726.81 N/mm² pada *holding time* 4 jam pengujian. Demikian juga pada kekuatan yielding point benda asli 398,50 N/mm² meningkat menjadi 557 N/mm² pada *holding time* 4 jam pengujian.
- Pada pengujian kekerasan mengindikasikan peningkatan kekerasan yaitu pada benda asli 96.64 HRB atau jika dikonversikan pada indenter *Rockwell C* sekitar -18 HRC menjadi 49.44 HRC – 53.01 HRC pada *holding time* 1-4 jam. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kekerasan yang sangat significant dengan pengujian karburisasi menggunakan arang pohon lamtoro lokal pulau Timor.

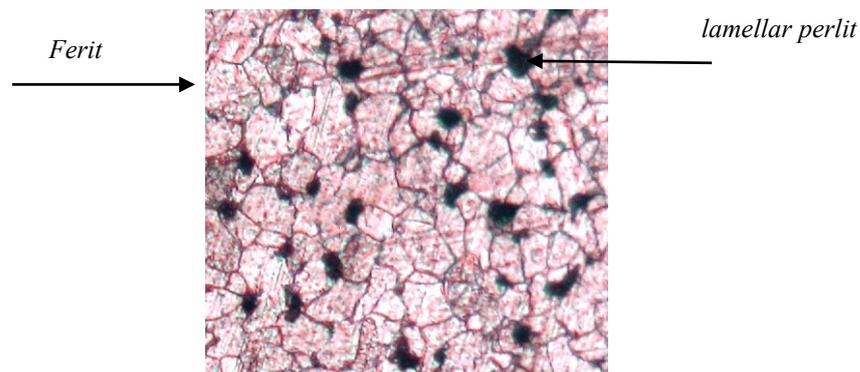
Dari penjelasan tersebut di atas menunjukkan adanya perubahan sifat mekanik baja yang mendapat perlakuan panas dengan *carburizing*. Arang kayu lamtoro lokal pulau Timor bisa direkomendasikan sebagai salah satu jenis arang yang cocok untuk proses pengarbonan.



Gambar 3. Hubungan Holding Time, Hardness dan Strain Setelah Perlakuan Pack Carburizing

3.2.2 Hasil Penelitian Metalografi

Pada baja karbon rendah misalnya bahan ST 37 kristal yang terbentuk adalah ferit dan perlit, yaitu ferit atau disebut juga besi alfa adalah istilah material untuk besi murni dengan struktur kristal *body centered cubic* (BCC). Perlit merupakan suatu fasa yang mengandung 0,83 % karbon yang terdiri dari campuran ferit dan sementit. Dalam hal karakteristik, perlit memiliki struktur yang lebih keras dibanding ferit, disebabkan adanya fasa sementit dalam bentuk lamelar, dimana sementit memiliki sifat yang keras sedangkan ferit sifatnya lunak dan ulet. Penambahan karbon yang disebut *carburizing* atau karburasi, dilakukan dengan cara memanaskan pada temperatur yang cukup tinggi yaitu pada temperature austenit dalam lingkungan yang mengandung atom karbon aktif, sehingga atom karbon aktif tersebut akan berdifusi masuk ke dalam permukaan baja dan mencapai kedalaman tertentu. Setelah proses difusi, diikuti perlakuan pendinginan cepat (*quenching*), sehingga diperoleh permukaan yang lebih keras, tetapi liat dan tangguh bagian tengahnya. Difusi adalah gerak spontan dari atom atau molekul di dalam bahan yang cenderung membentuk komposisi yang seragam. Hukum pertama Fick's menyatakan bahwa difusi dari sebuah elemen dalam suatu bahan substrat merupakan fungsi koefisien difusi dan gradien konsentrasi. Gradien konsentrasi adalah jumlah atom yang terdapat disekitar substrat dibandingkan dengan jumlah atom yang terdapat di dalam substrat. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan difusi yaitu, temperatur, komposisi dan waktu.



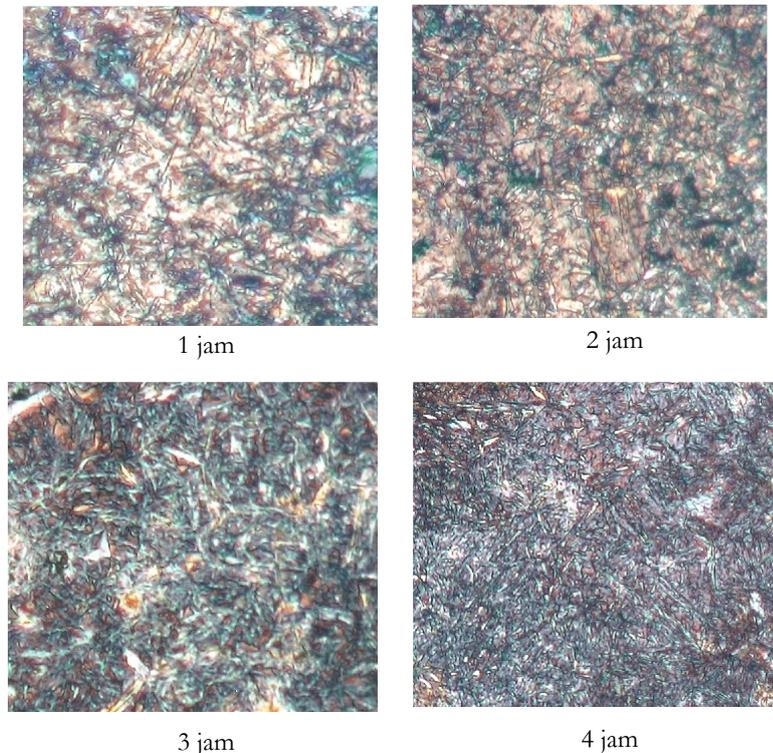
Gambar 4. Mikrostruktur ST 37 Bahan Dasar Pengujian Yang Tidak Mendapat Perlakuan

Dalam gambar 4 dan 5 menunjukkan perubahan mikrostruktur terhadap *holding time*. Struktur yang terbentuk adalah martensit yang keras akibat dari proses difusi pada temperature 950°C dengan pencelupan cepat. Penjelasan gambar sebagai berikut:

- a. Pada *holding time* 1 jam terlihat mikrostruktur martensit berbentuk jarum terlihat lebih terang berpadu dengan sedikit perlit.

- b. Pada *holding time* 2 jam terlihat mikrostruktur martensit berbentuk jarum terlihat semakin banyak.
- c. Pada *holding time* 3 dan 4 jam menunjukkan gambar semakin gelap dipenuhi oleh mikrostruktur martensit yang menunjukkan proses difusi berjalan dengan baik.

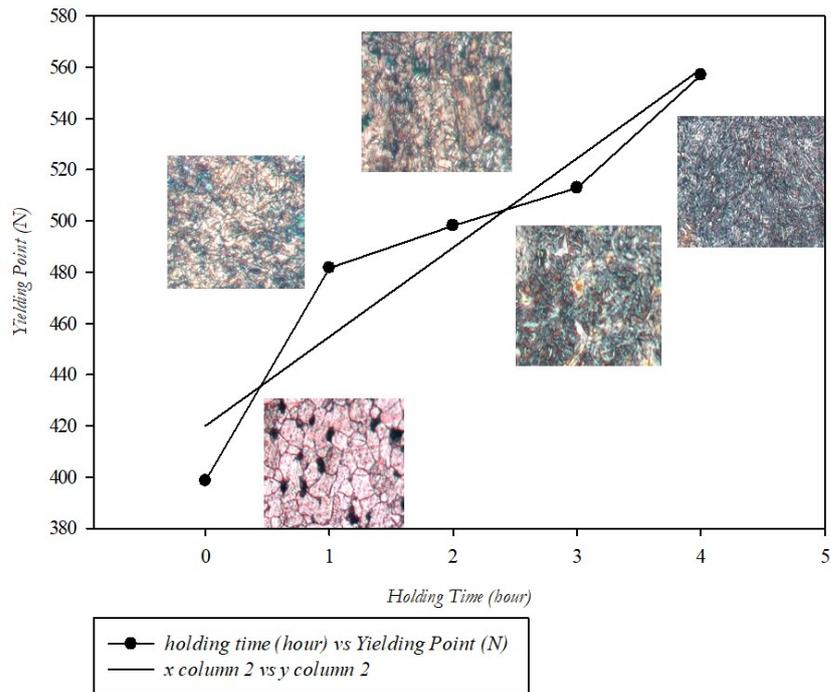
Untuk menjelaskan lebih jauh bagaimana pengaruhnya terhadap sifat mekanikal, tensile *yielding point*, *hardness test* dan *strain* dari material baja ST 37 yang telah mendapat perlakuan *pack carburizing* akan dijelaskan hubungan-hubungan matematis dalam penjelasan selanjutnya.



Gambar 5. Foto Mikrostruktur *Pack Carburizing* Berdasarkan Waktu Penahanan Tungku (*Holding Time*)

3.2.3 Model Matematis Pengujian Tarik

Titik luluh yang juga disebut *yielding point* adalah titik batas dimana benda uji terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban dalam setiap pengujian. Titik pembebanan ini ditandai sebagai kekuatan luluh (*yielding strength*). Pada pengujian ini dilakukan untuk semua kelompok benda uji baik yang tidak mendapat perlakuan maupun yang mendapat perlakuan. Kelompok benda uji yang tidak mendapat perlakuan yang disebut sebagai benda asli menunjukkan nilai *yielding strength* sebesar 398.50 N/mm². Baja-baja yang mendapat perlakuan berturut-turut *holding time* 1 jam sebesar 481.64 N/mm², 2 jam sebesar 498.15, 3 jam sebesar 512.90 N/mm² dan 4 jam sebesar 557.72 N/mm². Data ini menunjukkan *holding time* berpengaruh besar terhadap peningkatan kekuatan bahan yang telah mengalami perlakuan karburisasi. Peningkatan *yielding strength* diikuti dengan perubahan foto micro structure permukaan masing-masing benda uji. Gambar *microstructure* benda asli menunjukkan ferit dan lamellar perlit sedangkan perubahan yang ekstrim pada gambar micro structure perlakuan 1-4 jam. Gambar micro structure pada permukaan benda kerja yang mendapat perlakuan karburisasi menunjukkan lamellar perlit dan martensit. Martensit yang semakin lama-semakin gelap dapat dimaknai sebagai penambahan karbon pada setiap fasa. Lamellar perlit menunjukkan gumpalan karbon sedangkan fasa martensit adalah keras dan getas.



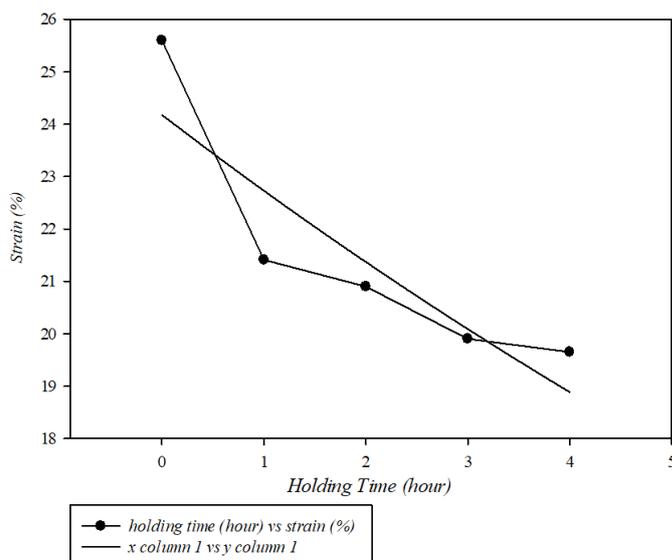
Gambar 6. Grafik Hubungan Holding Time Terhadap Yielding Point Pengujian Tarik

Tabel 2. Equation polynominal, lineat $f = y_0+a*x$

	<i>R</i>	<i>Rsqr</i>	<i>Adj Rsqr</i>	<i>Standard Error of Estimate</i>
	0.9476	0.8980	0.8639	21.5230
<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	
<i>y0</i>	419.8420	16.6717	25.1830	0.0001
<i>a</i>	34.9700	6.8062	5.1380	0.0143

Nilai *R* atau *Multiple R*. Menunjukkan korelasi antara variabel bebas dengan variabel tergangungnya (tidak bebas). Harga *R* sebesar 0,9476 menunjukkan nilai korelasi variabel *X*(*holding time*) dengan variabel *Y* (*Yielding point*). Selanjutnya *R Square* adalah koefisien determinasi yang menunjukkan pengaruh langsung variabel bebas terhadap variabel tergangungnya yang dinyatakan dalam persentase. Koefisien determinasi 0,898 berarti bahwa variabel *X* (*holding Time*) memengaruhi secara langsung variabel *Y* (*yielding point*) sebesar 89.80% sedangkan (100-89.80)%= 10.20% dipengaruhi oleh faktor lain diluar variabel *X*. *Adjusted R Square* merupakan koefisien determinasi yang telah terkoreksi dengan jumlah variabel dan ukuran sampel sehingga dapat mengurangi unsur bias jika terjadi penambahan variabel. *Adjusted R Square* sebesar 0,8639 berarti variasi variabel *Y* dapat dijelaskan oleh variabel *X* sebesar 86.39% atau variabel *X* (*holding time*) memengaruhi variabel *Y* sebesar 86.39%. *Standart Error of the Estimate* menunjukkan penyimpangan antara persamaan regresi dengan nilai dependent riil sebesar 21.52 satuan variabel dependent (jika variabel *Y* dalam satuan maka besarnya penyimpangan adalah sebesar 21.52 satuan). Semakin kecil nilai *Std. Error of the Estimate* maka semakin baik persamaan regresi tersebut sebagai alat prediksi. Pada umumnya *S.E* < *Std*. Pada estimasi ini terlihat nilai *S.E* lebih besar dari pada *Std*, hal ini diakibatkan adanya perlakuan pack carburizing yang dilakukan mengakibatkan peningkatan *yielding point* yang cukup ekstrim dari benda aslinya (tanpa perlakuan). Hal lain yang bisa mempengaruhi adalah jumlah data yang tersebar terbatas.

Dari hasil di atas diperoleh persamaan regresi $Y = 419.84 + 34.97X$, yang berarti bila variabel *X* berada pada posisi 0 point maka nilai variabel *Y* sebesar 419.84 (tidak mengalami perubahan/stagnasi) dan bila variabel *X* mengalami penambahan/penurunan maka variabel *Y* mengikuti operasi aljabar yang terbentuk dari persamaan regresi tersebut. Persamaan regresi yang dihasilkan bukanlah hubungan yang sangat ideal karena masih adanya bias karena pengaruh faktor-faktor lain, tetapi setidaknya sudah mencerminkan hubungan penetapan waktu (*holding time*) yang diinginkan terhadap kekuatan *yielding point*.



Gambar 8. Grafik Hubungan *Holding Time Terhadap Strain Pengujian Tarik*

Telah disebutkan pada penjelasan data penelitian sebelumnya bahwa *holding time* berbanding terbalik dengan *strain* sehingga pendekatan model matematis yang digunakan adalah bentuk eksponensial dengan regresi. Nilai *R* atau *Multiple R*. Menunjukkan korelasi antara variabel bebas dengan variabel tergangungnya (tidak bebas). Harga *R* sebesar 0,8893 menunjukkan nilai korelasi variabel *X(holding time)* dengan variabel *Y (strain)*. Selanjutnya nilai *R Square* adalah koefisien determinasi yang menunjukkan pengaruh langsung variabel bebas terhadap variabel tergangungnya yang dinyatakan dalam persentase. Koefisien determinasi 0,7908 berarti bahwa variabel *X (holding Time)* memengaruhi secara langsung variabel *Y (strain)* sebesar 79.08% sedangkan $(100-79.08)\% = 20.92\%$ dipengaruhi oleh faktor lain diluar variabel *X*. Besaran *Adjusted R Square* merupakan koefisien determinasi yang telah terkoreksi dengan jumlah variabel dan ukuran sampel sehingga dapat mengurangi unsur bias jika terjadi penambahan variabel. *Adjusted R Square* sebesar 0,7211 berarti variasi variabel *Y (strain)* dapat dijelaskan oleh variabel *X* sebesar 72.11% atau variabel *X (holding time)* memengaruhi variabel *Y* sebesar 72.11%.

Standart Error of the Estimate menunjukkan penyimpangan antara persamaan regresi dengan nilai dependent riil sebesar 0.2597 satuan variabel dependent (jika variabel *Y* dalam satuan maka besarnya penyimpangan adalah sebesar 0.2597 satuan). Semakin kecil nilai *Std. Error of the Estimate* maka semakin baik persamaan regresi tersebut sebagai alat prediksi. Pada umumnya $S.E < Std.$ Dari hasil di atas diperoleh persamaan regresi $Y=24.18 \exp (-0.0618 X)$ yang berarti bila variabel *X* berada pada posisi 0 point maka nilai variabel *Y (hardness)* sebesar 24.18 HRC (tidak mengalami perubahan/stagnasi) dan bila variabel *X* mengalami penambahan maka variabel *Y* mengikuti operasi aljabar yang terbentuk dari persamaan eksponensial tersebut. Persamaan eksponensial yang dihasilkan adalah hubungan yang cukup ideal untuk menjelaskan bagaimana *holding time* berpengaruh terhadap penurunan *strain*

Tabel 3. Equation: exponential decay, single, 2 parameter $f = a \cdot \exp(-b \cdot x)$

	<i>R</i>	<i>Rsqr</i>	<i>Adj Rsqr</i>	<i>Standard Error of Estimate</i>
	0.8893	0.7908	0.7211	0.2597
	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
<i>a</i>	24.1807	1.0197	23.7145	0.0002
<i>b</i>	0.0618	0.0181	3.4204	0.0418

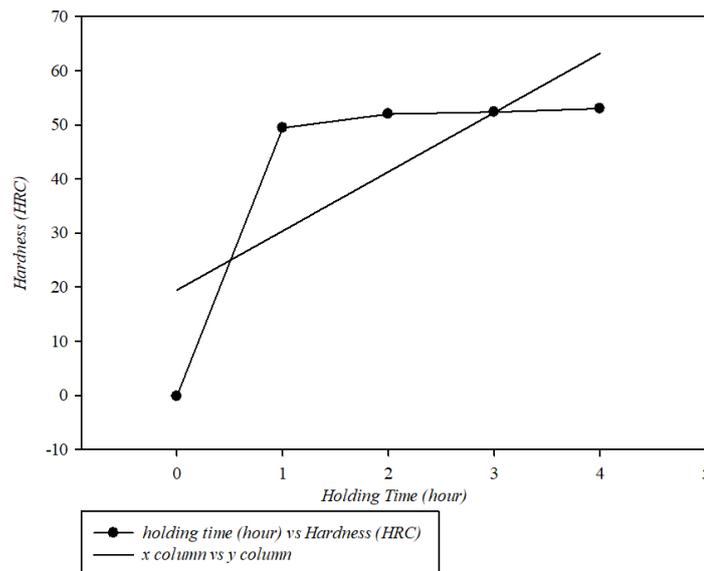
3.2.4 Model Matematis Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan metoda hardness RockWell, menggunakan indenter B dan C. Indenter Rockwell B digunakan untuk specimen yang tidak dikaburising dan Indenter Rockwell C untuk specimen yang telah dikaburising. Sebagai catatan indenter skala Rockwell B yang digunakan pada specimen tanpa karburising akan dikonversikan ke indenter Rockwell C dengan melihat tabel konversi kekerasan (terlampir) untuk melihat perubahan pada skala yang sama. Hasil pengujian kekerasan diperlihatkan dalam tabel di bawah ini. Secara umum tabel hasil pengujian kekerasan memperlihatkan bahwa proses pengarbonan padat dengan menggunakan arang lamtoro lokal member pengaruh terhadap peningkatan kekerasan pada benda uji. Baja ST 37 yang digunakan sebagai bahan dasar pengujian terlihat cukup *significant* hasilnya yaitu sebelum pengerasan sebesar 96.64 HRB atau setara dengan (- 18 HRC) meningkat *significant* hingga mencapai kekerasan 49.44 HRC (satu jam waktu tahan), 52.00 HRC (2 jam

waktu tahan), 52.37 HRC (tiga jam waktu tahan) dan 53.01 HRC (empat jam waktu tahan). Perubahan kenaikan kekerasan pada setiap jam penahanan secara umum terlihat namun tidak ekstrim anatar waktu waktu tahan. Dengan hasil ini memperlihatkan bahwa proses pengarbonan untuk merubah sifat mekanik baja menggunakan arang lamtoro lokal pulau Timor berlangsung dengan sempurna. Untuk lebih jelasnya dapat di deskripsikan dalam grafik persamaan linear berikut ini:

Nilai R atau *Multiple R*. Menunjukkan korelasi antara variabel bebas dengan variabel tergantungnya (tidak bebas). Harga R sebesar 0,7436 menunjukkan nilai korelasi variabel X (*holding time*) dengan variabel Y (*hardness*). *Selanjutnya nilai R Square* merupakan koefisien determinasi yang menunjukkan pengaruh langsung variabel bebas terhadap variabel tergantungnya yang dinyatakan dalam persentase. Koefisien determinasi 0,5529 berarti bahwa variabel X (*holding Time*) memengaruhi secara langsung variabel Y (*hardness*) sebesar 55.29% sedangkan $(100-55.29)\% = 44.71\%$ dipengaruhi oleh faktor lain diluar variabel X . *Adjusted R Square* merupakan koefisien determinasi yang telah terkoreksi dengan jumlah variabel dan ukuran sampel sehingga dapat mengurangi unsur bias jika terjadi penambahan variabel. *Adjusted R Square* sebesar 0,4039 berarti variasi variasi variabel Y (*hardness*) dapat dijelaskan oleh variabel X sebesar 40.39% atau variabel X (*holding time*) memengaruhi variabel Y sebesar 40.39%.

Standart Error of the Estimate menunjukkan penyimpangan antara persamaan regresi dengan nilai dependent riil sebesar 17.95 satuan variabel dependent (jika variabel Y dalam satuan maka besarnya penyimpangan adalah sebesar 17.95 satuan). Semakin kecil nilai *Std. Error of the Estimate* maka semakin baik persamaan regresi tersebut sebagai alat prediksi. Pada umumnya $S.E < Std$. Pada estimasi ini terlihat nilai $S.E$ lebih besar dari pada Std , hal ini diakibatkan adanya perlakuan pack carburizing yang dilakukan mengakibatkan peningkatan *yielding point* yang cukup ekstrim dari benda aslinya (tanpa perlakuan). Hal lain yang bisa mempengaruhi adalah jumlah data yang tersebar terbatas.



Gambar 7. Grafik Hubungan *Holding Time Terhadap Hardness Pengujian Kekerasan*

Tabel 4. *Equation Polynominal, Lineat f = y0+a*x*

	R	Rsq	$Adj Rsqr$	<i>Standard Error of Estimate</i>
	0.7436	0.5529	0.4039	17.9456
	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	t	P
$y0$	19.4660	13.9006	1.4004	0.2559
a	10.9310	5.6749	1.9262	0.1497

Dari hasil di atas diperoleh persamaan regresi $Y = 19.47 + 10.93X$, yang berarti bila variabel X berada pada posisi 0 point maka nilai variabel Y (*hardness*) sebesar 19.47 HRC (tidak mengalami perubahan/stagnasi) dan bila variabel X mengalami penambahan/penurunan maka variabel Y mengikuti operasi aljabar yang terbentuk dari persamaan regresi tersebut. Persamaan regresi yang dihasilkan bukanlah hubungan yang sangat ideal karena masih adanya bias karena pengaruh faktor-faktor lain, tetapi setidaknya sudah mencerminkan hubungan penetapan waktu (*holding time*) yang diinginkan terhadap *hardness* dari material tersebut.

Perbedaan nilai kekerasan atau *hardness* sebelum dan sesudah perlakuan pack karburizing sangat ekstrim meningkat tajam dari 96.64 HRB atau setara dengan -18 HRC menjadi 49.44 HRC. Suatu peningkatan kekerasan yang sungguh luar biasa, sehingga jika dihubungkan dalam titik-titik korelasi yang

saling mempengaruhi maka akan terjadi bias yang cukup besar karena data yang tidak ada perlakuan dan data perlakuan digabungkan dalam analisis yang sama. Peningkatan kekerasan yang *significant* menunjukkan proses pack karburizing dengan menggunakan arang lamtoro pulau Timor berlangsung dengan baik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji sifat mekanik dan sifat fisis dari pengarbonan menggunakan arang kayu lamtoro lokal pulau Timor pada temperatur 900°C, dapat disimpulkan beberapa kajian sebagai berikut:

- a. Perubahan sifat mekanik tegangan tarik yielding point dari baja karbon rendah sebelum pengarbonan dan setelah pengarbonan pada satu jam waktu tahan, meningkat dari 398.50 N/mm² menjadi 471.59 N/mm² dan Tegangan tarik maksimum dari 582.43 N/mm² menjadi 620.40 N/mm².
- b. Sifat mekanik untuk kekuatan *yielding point* dan kekuatan tarik maksimum meningkat berbanding lurus dengan waktu tahan dalam tungku dari satu jam hingga empat jam. Tegangan yielding point pada waktu tahan satu jam dari 471.59 N/mm² menjadi 514.69 N/mm² pada empat jam waktu tahan dan tegangan tarik maksimum pada waktu tahan satu jam dari 620.40 N/mm² menjadi 686.84 N/mm² pada waktu tahan empat jam. Perubahan sifat mekanik kekerasan sebelum pengarbonan yaitu dari kekerasan 96.64 HRB ~ (18) HRC menjadi menjadi kekerasan 49.44 HRC pada satu jam waktu tahan hingga kekerasan 53.01 HRC pada empat jam waktu tahan. Dapat disebutkan sebagai peningkatan kekerasan antara 374.66% ~ 394.5%.
- c. Perubahan sifat fisis sebelum pengarbonan yang terlihat pada foto binocular sampel uji struktur ferit dan perlit dan setelah pengarbonan bertransformasi dari lamelar perlit menjadi martensit yang bersifat keras.
- d. Data hasil penelitian dengan kecenderungan data berbanding lurus didekati dengan model matematis regresi linear sederhana seperti *holding time* terhadap tegangan luluh (*yielding point*) sebesar $Y = 419.84 + 34.97X$, dan *holding time* terhadap kekerasan (*hardness*) sebesar $Y = 19.47 + 10.93X$. Sedangkan hubungan antara *holding time* dan regangan (*strain*) didekati dengan model matematis eksponensial menghasilkan nilai $Y = 19.47 + 10.93X$.
- e. Dengan pendekatan model matematis ini dapat mempermudah untuk menentukan kekuatan bahan baik tegangan (*tensile*), regangan (*strain*) dan kekerasan (*hardness*) sesuai keinginan atau kebutuhan dengan menetapkan waktu tahan (*holding time*) yang tepat di dalam tungku *heat treatment*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Salim, "Karakteristik dan Mutu Arang Kayu Jati (*Tectona grandis*) dengan Sistem Pengarangan Campuran pada Metode Tungku Drum," *J. Ris. Ind.*, vol. 8, no. 2, pp. 53–64, 2016.
- [2] T. State, *The State of Food and Agriculture*. 2014.
- [3] B. H. Setiamarga, N. Kurniawati, and U. Rumendi, "Pack Carburizing Pada Sprocket Sepeda Motor Dengan Material Baja Karbon Rendah," *JTM Inst. Teknol. Bandung*, vol. 21, no. 1, 2006.
- [4] E. Gunawan, "Analisa Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah (ST41) dengan Metode Pack Carburizing," *Tek. Eng. Sains J.*, vol. 1, no. 2, pp. 117–124, 2017.
- [5] Sujita, "Aplikasi Serbuk Arang Tongkol Jagung Dengan Serbuk Cangkang Kerang Mutiara Sebagai media Carburizer Proses Pack Carburizing Baja Karbon Rendah," *J. Rekayasa Mesin Univ. Mataram*, vol. 7, no. 3, pp. 145–149, 2016.
- [6] A. F. Abidah and N. S. Drastiawati, "Analisis SS400 Hasil Carburizing Media Arang Tempurung Kelapa - Ba CO₃ Dengan Variasi Temperatur Pemanasan dan Holding Time Ditinjau Dari Pengujian Kekerasan dan Struktur Mikro," *JTM Univ. Negeri Semarang*, vol. 07, no. 02, pp. 1–8, 2019.
- [7] M. Dwiharsanti, W. S. Jaman, and S. Virdhian, "Perancangan Eksperimen Baja Karbon Rendah Hasil Proses Pack Carburizing dengan Metode Ekperimen Faktorial," *Jurna Ris. Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 92–97, 2016.
- [8] A. Jaedun, *Metodologi Penelitian Eksperimen*. 2011.
- [9] Syilfi, D. Ispriyanti, and D. Safitri, "Analisis Regresi Linier Piecewise Dua Segmen," *J. Gaussian Univ. Diponegoro*, vol. 1, no. 1, pp. 219–228, 2012.
- [10] A. Wisnujati, "Analisis Perlakuan Carburizing Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Pada Bahan Sprocket Mitasi Sepeda Motor," *J. SIMETRIS*, vol. 8, no. 1, pp. 127–134, 2017.