



Perilaku *Bake Hardening* Baja *Ultra Low Carbon* dengan Variasi *Pre Strain*, Temperatur, dan Waktu *Paint Baking*

Dikki Purwantoni^{a,1}, Alfirano^{b,2} Anidinnie Juniarsih^{c,3}

^aJurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jendral Sudirman Km 3, Kotabumi Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten, 42435, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada Agustus 21
Direvisi pada September 21
Disetujui pada Oktober 21

Kata kunci:

Baja pengerasan hasil pemanggangan, cat pemanggang, kuat luluh, kemampuan mengeras saat dipanggang.

Keywords:

Bake hardening steel, paint baking, pre strain, yield strength, bake hardenability.

ABSTRAK

Bake hardening steel merupakan baja lembaran yang memiliki sifat mampu bentuk yang baik selama proses pembentukan (press forming) kemudian kekuatan dan kekerasannya akan meningkat setelah dilakukan proses paint baking. Konsep dasar pembuatan bake hardening steel adalah menyisakan sejumlah kecil atom karbon (C) terlarut di dalam baja, dan mengatur nitrogen (N) yang terlarut agar terikat sebagai senyawa yang stabil. Aplikasi bake hardening steel banyak dijumpai pada industri otomotif seperti bodi mobil. Di dalam penelitian ini digunakan baja ultra low carbon dengan variasi perlakuan yang diberikan seperti pre strain 0, 5, dan 10%, temperatur paint baking 90, 170, dan 3000C serta waktu paint baking 5, 20 dan 45 menit. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik dan pengamatan metalografi untuk melihat struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan jumlah pre strain sangat mempengaruhi terhadap kekuatan dan kekerasan material, seperti yang terjadi pada temperatur 1700C dengan waktu 20 menit, terjadi peningkatan yield strength dari 164 Mpa, 225 Mpa, dan 250 Mpa. Begitu juga bake hardenability meningkat dari -1 Mpa, 65 Mpa, dan 95 Mpa. Baja ultra low carbon menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan baja low carbon. Nilai maksimum bake hardenability baja ultra low carbon sebesar 95 Mpa, sedangkan baja low carbon sebesar 77 Mpa.

ABSTRACT

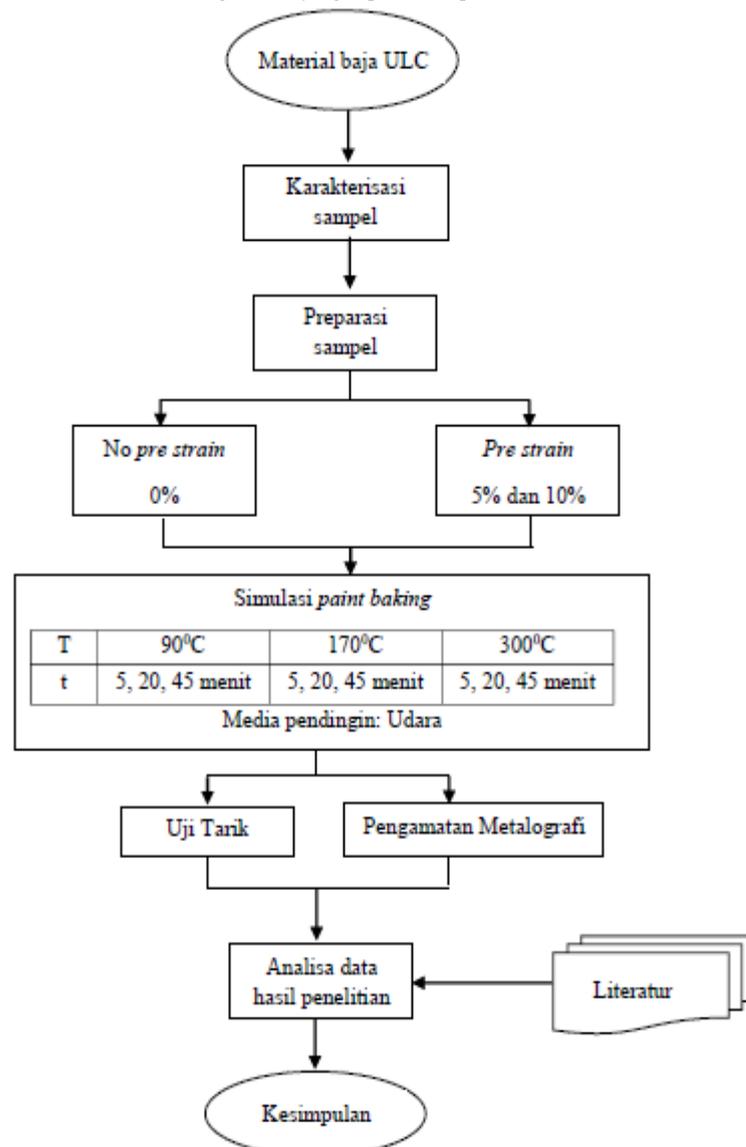
Bake hardening steel is a sheet steel that has the properties of being able to good shape during forming process then strength and the paint baking process is carried out. Draft the basis for making bake hardening steel is to leave a small number of atoms dissolved carbon (C) in the steel, and regulates the dissolved nitrogen (N) so that backing as a stable compound. There are many applications of bake hardening steel found in the automotive industry such as car bodies. In this research ultra low carbon steel is used with a variety of treatments given such as pre-strain 0, 5, and 10% and 3000 C and time paint baking 5, 20, and 45 minutes. The tests carried out are tensile tests and metallographic observations to see the microstructure. Research result showed that the addition of the number of pre-strain greatly affected the to the strength and hardness of the material, as occurs at the temperature 1700 C with a time of 20 minutes, an increase in yield strength of 164 MPa, 225 MPa, and 250 MPa. Likewise bake hardenability increased from -1 MPa, 65 MPa, and 95 MPa. Ultra low carbon steel exhibits excellent mechanical properties better than low carbon steel. Maximum roast value hardenability of ultra low carbon steel is 95 MPa, while low carbon steel of 77 MPa.

1. Pendahuluan

Perkembangan dan pertumbuhan industri otomotif sekarang ini sangatlah pesat, hal ini ditandai dengan terus bertambahnya jumlah kendaraan yang dimiliki oleh masyarakat saat ini.[4] Banyak masyarakat yang menggunakan mobil sebagai alat transportasi menuju tempat tujuannya. Hal ini memungkinkan terjadinya resiko kecelakaan di jalan. Seperti di negara-negara eropa, 40.000 orang meninggal setiap tahun akibat kecelakaan otomotif dan biaya administrasi untuk kecelakaan ini sangat tinggi, mencapai 160 miliar euro. Untuk mengurangi korban jiwa atau kerusakan, dan bahkan mengurangi tingkat kecelakaan, maka industri-industri otomotif berusaha untuk mengatasi masalah tersebut. [5] Untuk itu industri otomotif menginginkan material yang memiliki kekuatan yang tinggi dan tahan terhadap penyok (denting resistance). Selain itu tujuan dari industri otomotif seperti industri mobil dan menjadi prioritas khusus adalah mereduksi berat.[3] Bake hardening steel merupakan solusi yang tepat untuk kebutuhan tersebut. Bake hardening steel dapat memberikan peningkatan tegangan luluh yang lebih tinggi sekitar 20% dari tegangan luluh awal (20-70 Mpa) tergantung pada jenis baja, komposisi kimia, jumlah regangan, serta siklus pemanasan yang berpengaruh terhadap mekanisme aging pada bahan.[2] Reduksi berat badan mobil yang diperoleh yaitu melalui penggunaan baja yang lebih tipis, tetapi masih memenuhi standar kekuatan, sehingga dapat menghemat konsumsi 2 bahan bakar. Kadar karbon yang rendah dan kandungan unsur paduan dari baja tersebut (bake hardening steel) akan menghasilkan sifat mampu bentuk yang baik selama proses pembentukan (press forming) dan kekuatannya akan meningkat setelah dilakukan proses paint baking. [1] Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh A. Momeni, K. Dehghani, S. Abbasi dan M. Torkan menggunakan sampel baja low carbon, dengan berbagai perlakuan seperti temperatur annealing (680, 730, dan 7800C), waktu (10, 20, dan 30 menit), pre strain (4, 6, dan 8%), dan temperatur paint baking (150, 180, dan 2100C) dengan waktu paint baking selama 20 menit.[1] Hasilnya menunjukkan bahwa perlakuan yang diberikan berpengaruh terhadap nilai bake hardenability. Semakin tinggi temperatur dan semakin lama waktu paint baking, maka nilai bake hardenability juga akan semakin meningkat.[1] Berdasarkan literatur yang mengatakan bahwa bake hardening steel dapat dibuat dengan menggunakan baja low carbon atau baja ultra low carbon, untuk itu penulis melakukan penelitian pada sampel baja ultra low carbon dengan berbagai variasi perlakuan yang diberikan, seperti pre strain (0, 5, dan 10%), temperatur paint baking (90, 170, dan 3000C), serta waktu paint baking (5, 20, dan 45 menit), sehingga setelah penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran terhadap peningkatan sifat mekanik dan nilai bake hardenability.

2. Metode Penelitian

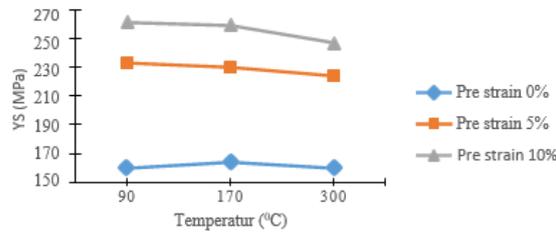
Secara skematik, penelitian ini digambarkan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1.



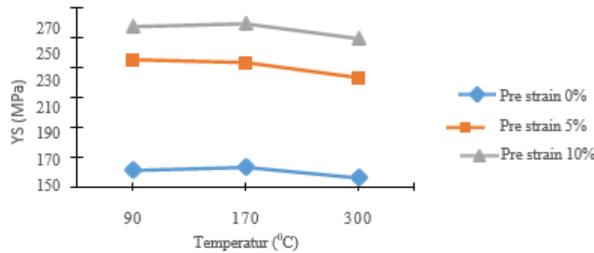
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

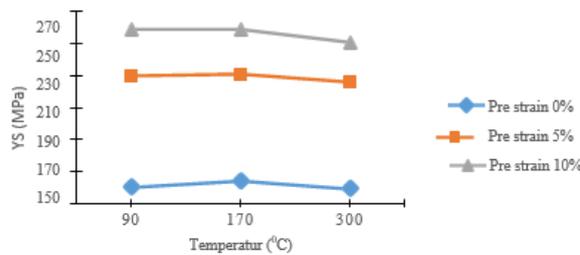
3.1. Pengaruh Pre Strain dan Temperatur Paint Baking terhadap Yield Strength (YS) dan Bake Hardenability (BH) pada Waktu 5 menit, 20 menit, dan 45 menit



Gambar 2. Pengaruh Pre Strain dan Temperatur Paint Baking terhadap YieldStrength pada Waktu 5 Menit

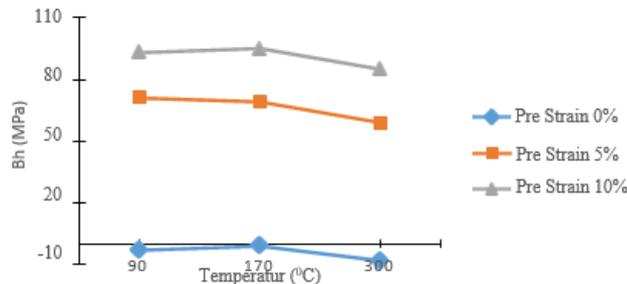


Gambar 3. Pengaruh Pre Strain dan Temperatur Paint Baking terhadap YieldStrength pada Waktu 20 Menit

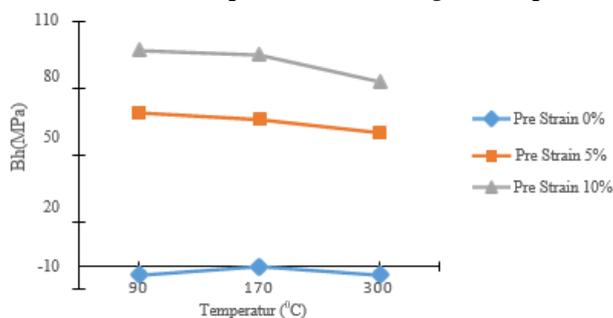


Gambar 4. Pengaruh Pre Strain dan Temperatur Paint Baking terhadap Yield Strength pada Waktu 45 Menit

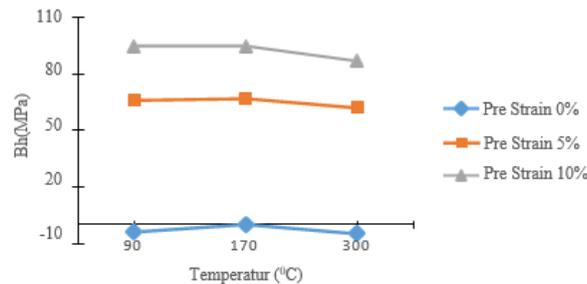
Gambar 4 sampai 4 merupakan grafik yang menunjukkan pengaruh *pre strain* dan temperatur *paint baking* terhadap *yield strength* pada waktu 5 menit, 20menit, dan 45 menit. Terlihat bahwa penambahan *pre strain* sangat berpengaruh terhadap *yield strength*. Setiap penambahan *pre strain* mulai dari 0%, 5%, hingga 10% selalu meningkatkan *yield strength*. Sebaliknya pada peningkatan temperatur *paint baking* dari 90°C ke 170°C, *yield strength* cenderung meningkat. Hal ini disebabkan karena meningkatnya laju atom-atom interstisi terlarut yang berdifusi menuju dislokasi sehingga terbentuk sejumlah atom-atom interstisi yang menduduki posisi di daerah atmosfer Cottrell. Selanjutnya atom-atom interstisi tersebut distabilkan oleh atom Ti dan/atau Nb.^[5] Ketika temperatur *paint baking* dinaikkan hingga 300°C, *yield strength* mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena atom interstisi yang menduduki daerah atmosfer Cottrell telah dijenuhkan oleh sejumlah kecil atom karbon. Apabila dislokasi telah jenuh, segregasi atom karbon berikutnya tidak mempengaruhi *yield strength*.^[16] Selain mempengaruhi *yield strength*, penambahan *pre strain* dan temperatur *paint baking* juga berpengaruh terhadap nilai *bake hardenability*, seperti terlihat pada gambar 6, 7, dan 8 untuk tiap waktu tahan berbeda.



Gambar 5. Pengaruh Pre Strain dan Temperatur Paint Baking terhadap Bake Hardenability dengan Waktu 5 Menit



Gambar 6. Pengaruh Pre Strain dan Temperatur Paint Baking terhadap Bake Hardenability dengan Waktu 20 Menit



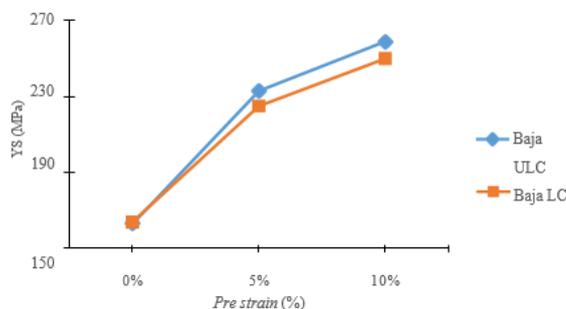
Gambar 7. Pengaruh *Pre Strain* dan Temperatur *Paint Baking* terhadap *BakeHardenability* dengan Waktu 45 Menit

Berdasarkan Gambar 6 sampai 7, terlihat bahwa *pre strain* sangat mempengaruhi *bake hardenability*, yakni *bake hardenability* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *pre strain* yang diberikan. *Bake hardenability* berbanding lurus dengan *yield strength*. Semakin besar *yield strength*, maka *bake hardenability* juga akan semakin besar. Sama halnya dengan *yield strength*, pada peningkatan temperatur *paint baking* dari 90°C ke 170°C, *bake hardenability* cenderung meningkat, namun pada saat temperatur *paint baking* dinaikkan hingga 300°C, *bake hardenability* mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena atom interstisi yang menduduki daerah atmosfer Cottrell telah dijenuhkan oleh sejumlah kecil atom karbon. Hasil penelitian menunjukkan terdapat *bake hardenability* yang bernilai negatif, yaitu pada sampel tanpa *pre strain*. Hal ini disebabkan karena tidak adanya interaksi antara dislokasi dan atom terlarut interstisi. Selain itu *yield strength* sampel awal sebelum pemanasan lebih besar dibandingkan dengan *yield strength* setelah pemanasan. Hal ini juga bisa dilihat dari struktur mikro sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 13 sampai Gambar 15. Penambahan *pre strain* sangat berpengaruh terhadap kekuatan dan kekerasan material. Mekanisme penguatan material yang terjadi karena penambahan *pre strain* adalah mekanisme pengerasan regangan (*strain hardening*). Penambahan *pre strain* kepada material pada dasarnya adalah menciptakan suatu deformasi yang menyebabkan bertambahnya kerapatan dislokasi di dalam kristal. *Strain hardening* terjadi akibat penumpukan dislokasi di dalam kristal dan merupakan sumber tegangan untuk melawan pergerakan dislokasi lainnya.^[5] Penambahan *pre strain* terhadap spesimen berpengaruh terhadap kerapatan dislokasi. Penambahan dislokasi terjadi selama proses *pre strain* yang menempel pada atom bebas terlarut dan menyebar ke inti dislokasi pada saat proses *baking* dan akibatnya nilai *yield strength* akan meningkat.^[13] Penyebab yang lain adalah pada saat *paint baking*, ada sejumlah kecil atom terlarut yang bergerak dengan mekanisme difusi dan masuk ke posisi dislokasi dimana pada akhirnya mengunci pergerakan dislokasi sehingga kekuatan bahan akan meningkat.^[2] Berdasarkan model Cottrell-Bilby sesuai persamaan 2.1 dapat menjelaskan bahwa logam yang diberi regangan menyebabkan terjadinya pergeseran atom-atom interstisi karbon didalam logam menuju dislokasi. Semakin dekat jarak dislokasi dengan atom, maka energi yang dibutuhkan agar terjadi pergeseran atom-atom interstisi akan semakin besar sehingga suatu saat dislokasi tidak dapat bergerak.^[7]

Tingkat difusi atom karbon di dalam struktur akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *paint baking*. Dengan demikian, interaksi antara dislokasi dan atom karbon meningkat dengan kenaikan temperatur *paint baking*.^[4] Semakin tinggi temperatur, akan menyebabkan laju atom-atom interstisi terlarut (terutama karbon dan/ nitrogen) berdifusi menuju dislokasi untuk menghasilkan sejumlah atom-atom interstisi yang menduduki posisi pada daerah atmosfer Cottrell, yang kemudian atom-atom interstisi ini akan distabilkan oleh atom Ti dan/atau Nb.^[5] Atom-atom interstisi karbon dan nitrogen yang stabil pada posisinya itu akan menghalangi dan mengunci pergerakan dislokasi-dislokasi, sehingga akan menyebabkan kekuatan dan kekerasan meningkat. Namun apabila temperatur pemanasan terlalu tinggi maka dapat menimbulkan kondisi *over aging* yaitu kondisi dimana logam akan mengalami penurunan kekuatan, kekerasan dan *bake hardenability* apabila dilakukan pemanasan yang terlalu tinggi atau waktu yang terlalu lama.^[11]

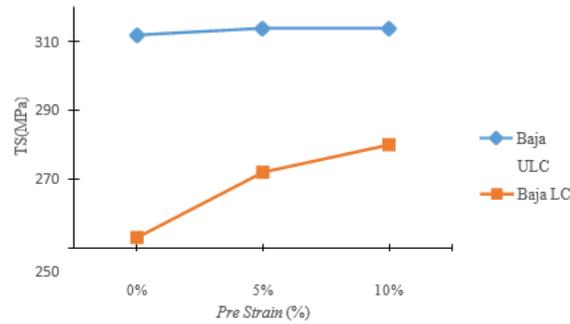
3.2. Perbandingan Sifat Mekanik Baja Low Carbon (LC) dengan Baja Ultra Low Carbon (ULC)

Data Sifat mekanik yang diamati adalah *yield strength*, *tensile strength*, elongasi, dan *bake hardenability*. Tujuannya adalah agar kita dapat melihat dan menentukan baja manakah yang lebih baik digunakan untuk pembuatan *bake hardening steel*. Untuk membandingkan sifat mekanik antara baja *low carbon* dengan *ultra low carbon* yaitu dengan menggunakan data studi pendahuluan dan data penelitian yang dilakukan pada temperatur 170°C dengan waktu 20 menit dengan variasi *pre strain* 0%, 5%, dan 10% seperti ditunjukkan pada Gambar 8 sampai dengan 11.



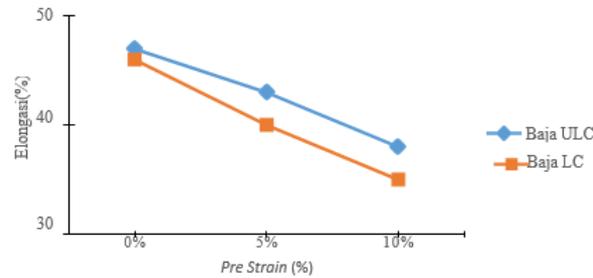
Gambar 8. Perbandingan *Yield Strength* Baja LC vs ULC

Gambar 9 memperlihatkan bahwa *yield strength* baja *ultra low carbon* lebih tinggi dibandingkan baja *low carbon*, dimana maksimum *yield strength* baja *ultra low carbon* yaitu 259 MPa, sedangkan baja *low carbon* hanya 250 MPa.



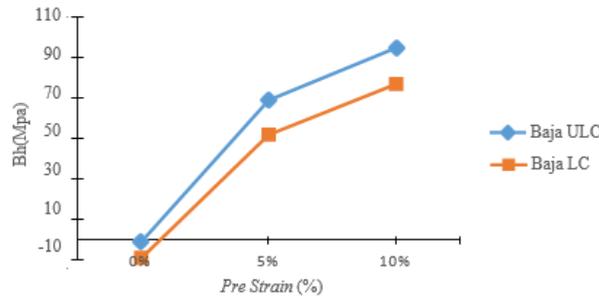
Gambar 9. Perbandingan Tensile Strength Baja LC vs ULC

Perbandingan *tensile strength* baja *low carbon* dengan baja *ultra low carbon* ditunjukkan pada gambar 10. *Tensile strength* baja *ultra low carbon* jauh lebih tinggi daripada baja *low carbon*. Maksimum *tensile strength* baja *ultra low carbon* diperoleh pada sampel dengan penambahan *pre strain* 10% yaitu 314 MPa, sedangkan baja *low carbon* sebesar 280 MPa.



Gambar 10. Perbandingan Elongasi Baja LC vs ULC

Gambar 11 menunjukkan perbandingan elongasi baja *low carbon* dengan baja *ultra low carbon*. Elongasi berbanding terbalik dengan kekuatan. Semakin tinggi kekuatan logam, maka elongasinya akan menurun. Terlihat bahwa elongasi baja *ultra low carbon* lebih tinggi dibandingkan baja *low carbon*.

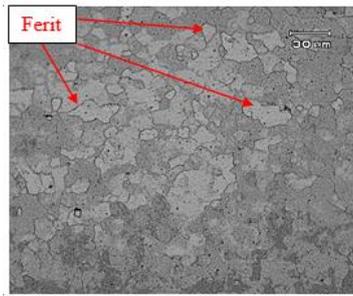


Gambar 11. Perbandingan Bake Hardenability Baja LC vs ULC

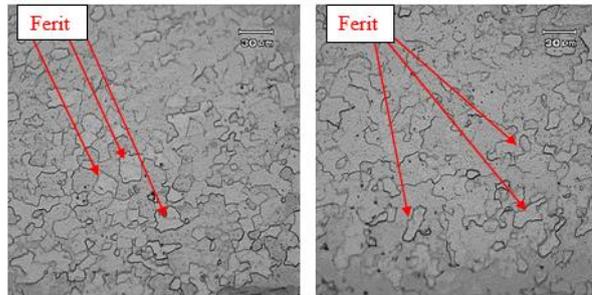
Perbandingan *bake hardenability* pada baja *low carbon* dengan baja *ultralow carbon* pada temperatur 170°C dan waktu 20 menit dengan variasi *pre strain* ditunjukkan pada Gambar 11. Terlihat bahwa baja *ultra low carbon* memiliki *bake hardenability* yang lebih tinggi dibandingkan baja *low carbon*, yaitu 95 MPa, sedangkan baja *low carbon* hanya 77 MPa. Berdasarkan gambar 8 dan 10 terlihat bahwa *yield strength* dan *tensile strength* baja *ultra low carbon* lebih tinggi dibandingkan dengan baja *low carbon*. Dengan mengacu pada komposisi kimia baja, seharusnya baja *low carbon* memiliki *yield strength* dan *tensile strength* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja *ultra low carbon*, karena baja *ultra low carbon* dengan kandungan karbon sebesar 0,009% hanya memiliki fasa ferit, sedangkan baja *low carbon* dengan kandungan karbon sebesar 0,03% memiliki fasa ferit dan perlit. Dimana fasa perlit merupakan campuran dari fasa ferit dan sementit (Fe_3C) yang menyebabkan peningkatan terhadap kekuatan dan kekerasan.^[16] Namun hasil penelitian menunjukkan hasil sebaliknya. Peningkatan *yield strength* dan *tensile strength* merupakan akibat dari pemberian *pre strain*. Apabila *pre strain* yang diberikan semakin besar, maka dislokasi yang terbentuk juga akan semakin banyak dan kerapatannya juga semakin tinggi sehingga sulit untuk bergerak (terkunci), artinya kekuatan dan kekerasan akan meningkat. Berbeda dengan *yield strength* dan *tensile strength*, elongasi (keuletan) suatu baja akan menurun seiring dengan meningkatnya kekuatan dan kekerasan.^[16] (dapat dilihat pada Gambar 10). Untuk membandingkan sifat mekanik antara baja *low carbon* dengan *ultra low carbon* lebih tepat dengan menggunakan data grafik *bake hardenability* seperti yang ditunjukkan pada gambar 11. Setelah dihitung besarnya *bake hardenability*, maka dapat dilihat bahwa baja *ultra low carbon* memberikan sifat *bake hardenability* yang lebih baik dibandingkan dengan baja *low carbon* pada seluruh kondisi percobaan (*pre strain*, temperatur, dan waktu). Dapat disimpulkan bahwa baja *ultra low carbon* memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan baja *low carbon*, sehingga lebih cocok digunakan untuk pembuatan *bake hardening steel*.

3.3. Struktur Mikro Bake Hardening Steel

Setelah Gambar 13, 14, dan 15 merupakan gambar struktur mikro dari *bake hardening steel* sampel awal, tanpa *pre strain* dan *paint baking*, serta dengan penambahan *pre strain* dan *paint baking*. Dapat dilihat bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa ferit. Hal ini bisa juga diketahui berdasarkan komposisi kimia sampel, dengan kadar karbon sebesar 0,009% C.



Gambar 12. Sampel Awal



Gambar 13. (a) PS 0%; T 170°C; t 20' (kiri); (b) PS 10%; T 170°C; t 20'

Secara keseluruhan fasa yang terbentuk adalah ferit, dan untuk membandingkan kekuatan dan kekerasan masing-masing sampel dapat dilihat dari bentuk dan ukuran ferit. Terlihat bahwa fasa ferit pada sampel tanpa *pre strain* dan dilakukan proses *paint baking* cenderung lebih bulat dibandingkan dengan sampel awal. Artinya kekuatan pada sampel awal lebih besar dibandingkan dengan sampel tanpa *pre strain* dan dilakukan proses *paint baking*. Hal inilah yang menyebabkan *bake hardenability* bernilai negatif seperti yang terlihat pada Gambar 6 sampai Gambar 8. Berbeda dengan sampel tanpa *pre strain*, pada sampel yang diberi *prestrain* dan dilakukan proses *paint baking* terlihat butir feritnya lebih lonjong dan pipih. Semakin besar *pre strain* yang diberikan, maka butir ferit yang terbentuk akan semakin pipih. Tentunya dengan butir ferit yang lebih pipih menunjukkan bahwa kekuatan dan kekerasan sampel tersebut lebih besar. *Bake hardening steel* pada dasarnya adalah proses penguatan regangan yang disebabkan oleh perpindahan atom terlarut interstisi (terutama karbon dan/atau nitrogen) ke situs dislokasi yang dihasilkan selama proses pembentukan. Dislokasi tidak bisa bergerak karena ada penghalang berupa atom karbon.^[5] Pada saat dilakukan *press forming*, secara metalurgis sebenarnya adalah pemberian regangan pada material. Oleh karena itu akan terjadi perubahan bentuk butir pada strukturmikronya. Semakin besar regangan yang diberikan, maka semakin kecil bentuk butir yang terjadi.^[13] Logam yang diberi regangan menyebabkan terjadinya pergeseran atom-atom interstisi karbon di dalam logam menuju dislokasi. Atom karbon/nitrogen memegang peran penting dalam proses luluh karena atom tersebut berinteraksi dengan dislokasi dan menguncinya. Penguncian dislokasi terjadi karena energi regangan akibat distorsi atom terlarut dapat ditiadakan bilamana atom tersebut menempati daerah struktur dengan parameter kisi lokal yang menyamai parameter kisi natural dari atom terlarut. Kondisi ini terjadi karena segregasi atom terlarut ke dislokasi, dan atom substitusi yang besar menempati posisi kisi di daerah yang merentang, serta atom yang kecil menempati daerah kompresi. Atom interstisi yang kecil cenderung bersegregasi ke lokasi interstisi di bawah setengah bidang. Jadi, bila terdapat dislokasi dan atom terlarut dalam kisi, mungkin terjadi interaksi medan tegangan yang menurunkan energi regangan sistem. Dengan demikian, terdapat gaya gerak yang menarik atom terlarut ke dislokasi dan apabila waktu yang diperlukan untuk difusi mencukupi, akan terbentuk atmosfer atom terlarut di sekitar setiap dislokasi.^[16]

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Semakin besar penambahan *pre strain* maka semakin besar pula peningkatan kekuatan dan kekerasan material, dimana nilai *bake hardenability* tertinggi didapat pada sampel dengan *pre strain* 10%, temperatur *paint baking* 90°C dan waktu *paint baking* selama 5 menit, yaitu sebesar 97 Mpa.
2. Baja *ultra low carbon* hasil *pre strain* dan *paint baking* memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan baja *low carbon*, dimana nilai maksimum *bake hardenability* baja *ultra low carbon* sebesar 95 Mpa, sedangkan baja *low carbon* sebesar 77 Mpa.
3. Struktur mikro yang terbentuk pada baja adalah fasa ferit.

Lampiran A. Data Hasil Pengujian

Tabel A.1 Tabel Hasil Penelitian

Sampel	Yield Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongasi (%)	Bake Hardenability (Bh) (Mpa)
Sampel 0	164	312	47	0
Sampel 1	160	309	48	-4
Sampel 2	233	312	42	69
Sampel 3	261	312	37	97
Sampel 4	161	310	47	-3

Sampel 5	235	312	42	71
Sampel 6	257	313	38	93
Sampel 7	160	312	47	-4
Sampel 8	230	309	43	66
Sampel 9	259	309	37	95
Sampel 10	164	312	47	0
Sampel 11	230	311	40	66
Sampel 12	259	315	37	95
Sampel 13	163	312	47	-1
Sampel 14	233	314	43	69
Sampel 15	259	314	38	95
Sampel 16	164	312	47	0
Sampel 17	231	312	42	67
Sampel 18	259	314	37	95
Sampel 19	160	311	46	-4
Sampel 20	224	312	42	60
Sampel 21	247	310	37	83
Sampel 22	156	310	47	-8
Sampel 23	223	310	42	59
Sampel 24	249	313	37	85
Sampel 25	159	310	47	-5
Sampel 26	226	312	42	62
Sampel 27	251	312	37	87

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Momeni, A. Dkk. “*Bake Hardening of A Low Carbon Steel For Automotive Applications*”. Association of Metallurgical Engineering of Serbia
- [2] Haryono, Didied. 2004. “*Pengaruh Regangan Awal dan Waktu Tahan pada Temperatur Paint Baking terhadap Sifat Bake Hardenability dan Sifat Mampu Stretching dan Deep Drawing pada Baja Karbon Rendah Spesifikasi CQ 3 EN*”. [tesis] Departemen Teknik Metalurgi dan Material Program PascaSarjana Bidang Ilmu Teknik: Universitas Indonesia.
- [3] Ahmed Ali, Hasyim. 2008. “*Bake Hardening of Low Carbon Steels*”. Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Eng. & Tech.
- [4] Das, Sourav.2012.”*Bake Hardening in Low Carbon and Medium Carbon Steels*” [Thesis]. Indian Institute Of Technology: Kharagpur.
- [5] Prakash Seth, Prem. 2014. “*Study of Bake-Hardening Behaviour of Ultra-LowCarbon BH 220 Steel at Different Strain Rates*” [Thesis]. Departement of Metallurgical and Materials Engineering National Institute of Technology.
- [6] Kawasaki, Kaoru, Takehide Senuma, and Shioru Sanagi, “*Bake Hardenability of Cold Rolled Ti-Bearing Extra Low Carbon Steel Sheet*”, Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corporation,2000.
- [7] Manikandan, G. Dkk. 2014. “*Effect of Yield Strength, Pre-Strain and Curvature on Stiffness and Static Dent Resistance of Formed Panel*”. Research and Development, Tata Steel Limited, Jamshedpur 831001, India.
- [8] Soenen.B, De.A.K, Vandeputte.S, Cooman.De.B.C. 2004.”*Competition between grain boundary segregation and Cottrell atmosphere formation during static strain aging in ultra low carbon bake hardening steels*”. Laboratory for Iron and Steelmaking, University of Ghent, Belgium.
- [9] Ballarin. V Dkk. 2009. “*Mechanism and Modeling of Bake-Hardening Steels: Part I. Uniaxial Tension*”. The Mineral & Materials Society and ASM International.
- [10] Nikolaevich, Savkin Alexey dkk. 2014. “*Advance Materials of Automobile Bodies in Volume Production*”. Volgograd State Technical University.

-
- [11] Chiang, Lung-Jen. Dkk. 2011. “*Effect of Annealing Conditions on Bake Hardenability For ULC Steels*”. Iron and Steel Research & Development Departement China Steel Corporation.
- [12] Kuang, C.F. Dkk. 2014. “*Effect of Quenching and Tempering on the Microstructure and Bake Hardening Behavior of Ferrite and Dual Phase Steels*”. Research Institute, Boashan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai, China.
- [13] Kumar Seal, Ritesh. 2006. “*New Ultra Low Carbon High Strength Steels with Improved Bake Hardenability for Ehnanced Strech Formability and Dent Resistance*”. B. Tech, Indian Institute of Technology (I.I.T.) Bombay.
- [14] Arcelormittal. “*Bake Hardening Steel*”. Automotive Worldwide22q.
- [15] Etta Mamang dan Sopiiah. 2010. “*Metodologi Penelitian Pendekatan Praktisdalam Penelitian*”. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [16] Smallman, R.E, Bishop,R J. 2000. “*Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*”. Jakarta: Erlangga.