



Pengaruh waktu tahan dan siklus *spheroidizing* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon rendah JIS G 3302 Grade SGC 400

Angga Pamilu Putra^a, Andinnie Juniarsih^a, Alfirano Alfirano^{a,1}

^aJurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jenderal Sudirman Km. 03 Kota Cilegon 42435, Indonesia

¹E-mail: alfirano@untirta.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 26 September 2020

Direvisi pada 03 Oktober 2020

Disetujui pada 20 November 2020

Tersedia daring pada 30 November 2020

Kata kunci:

Baja karbon rendah, JIS G 3302 grade SGC 400, *cycle heat treatment*, *spheroidizing*, *cylic spheroidizing*

Keywords:

Low carbon steel, JIS G 3302 grade SGC 400, *cycle heat treatment*, *spheroidizing*, *cylic spheroidizing*.

ABSTRAK

Spheroidizing annealing adalah suatu proses untuk memperbaiki nilai elongasi baja JIS G 3302 grade SGC 400 hasil pengerjaan dingin yang memiliki elongasi rendah. Penelitian ini, bertujuan untuk meningkatkan elongasi baja dengan mengetahui pengaruh waktu tahan dan siklus *spheroidizing* dengan menggunakan metode *cyclic heat treatment* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik dari baja 0,14% karbon. Baja karbon rendah ini dilakukan proses perlakuan panas pada temperatur 630°C, dengan waktu tahan selama 15, 30, dan 45 menit. Selanjutnya dilakukan variasi siklus *spheroidizing* sebanyak 1, 3 dan 5 siklus yang masing-masing ditahan selama 6 menit lalu didinginkan di udara bertekanan dengan menggunakan *blower*. Selanjutnya baja karbon rendah tersebut dilakukan uji tarik, uji kekerasan Vickers dan dilakukan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik dan juga *scanning electron microscope*. Dari hasil percobaan diperoleh sifat mekanik sampel yang memenuhi standar JIS G3302 grade SGC 400 yaitu sampel pada waktu tahan 15 menit dengan 3 dan 5 siklus pemanasan. Pada range ini diperoleh nilai kuat tarik 522 dan 481 MPa, kuat luluh 429 dan 30 MPa, dan elongasi 20 dan 24%. Sementara itu, pada waktu tahan 30 menit dengan 1, 3, dan 5 siklus pemanasan diperoleh kuat tarik 455, 415 dan 422 MPa, kuat luluh 361, 307 dan 313 MPa, dan elongasi 33, 37 dan 37%. Perubahan sifat mekanik baja ini disebabkan perubahan morfologi perlit menjadi ferit dan sementit dengan morfologi *spheroid (fragmented-lamell)* saat *spheroidizing annealing*.

ABSTRACT

Spheroidizing annealing aims to improve the elongation of JIS G 3302 grade SGC 400 cold-worked steel which has low elongation. The purpose of this study is to increase the elongation of steel by determining the effect of holding time and *spheroidizing* cycles using the *cyclic heat treatment* method on the microstructure and mechanical properties of 0.14% carbon steel. This low carbon steel was subjected to a heat treatment process using a temperature of 630°C, with a holding time of 15, 30, and 45 minutes and variations of *spheroidizing* cycles of 1, 3 and 5 cycles, with a holding time of 6 minutes and then cooled in forced-air cooling using a *blower*. Furthermore, this low carbon steel was subjected to tensile tests, Vickers hardness tests and microstructure observations using an optical microscope and a scanning electron microscope. From the experimental results, the mechanical properties of the sample that meet the JIS G3302 grade SGC 400 standard were samples at a holding time of 15 minutes with 3 and 5 heating cycles. In this range, the tensile strengths were 522 and 481 MPa, yield strength of 429 and 30 MPa, and elongation of 20 and 24%. Meanwhile, at the holding time of 30 minutes with 1, 3, and 5 heating cycles, the tensile strengths were 455, 415 and 422 MPa, yield strengths of 361, 307 and 313 MPa, and elongation of 33, 37 and 37%. The difference in mechanical properties is due to changes in the morphology of pearlite into ferrite and cementite with spheroid morphology (*fragmented-lamell*) during *spheroidizing annealing*.

Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.36055/tjst.v16i2.9176>



1. Pendahuluan

Salah satu material dasar untuk bidang keteknikan yang digunakan adalah baja [1]. Di antara jenis baja, baja karbon adalah baja yang sering sekali digunakan di bidang konstruksi. Salah satu jenis baja karbon adalah baja karbon rendah dimana baja karbon rendah ini mempunyai sifat mampu bentuk yang sangat baik dan juga mampu mesin yang baik. Kebanyakan hasil dari produk baja karbon rendah memiliki bentuk pelat hasil dari *cold-rolled* dan juga proses *annealing*. Baja karbon rendah ini mempunyai nilai kekuatan yang rendah dibandingkan dengan baja karbon yang lain, namun baja karbon rendah memiliki nilai keuletan dan ketangguhan sangat baik [2]. Saat ini, mendapatkan suatu material dengan kemampuan deformasi plastis dan kekuatan tinggi merupakan tantangan yang sulit, karena umumnya apabila kekuatan baja meningkat maka nilai elongasi turun [3].

Baja karbon rendah hasil *cold-rolled* dengan standar JIS G3302 grade SGC400 untuk aplikasi struktural dan sekrup ini memiliki standar nilai minimum pada *tensile strength* sebesar 400 MPa, *yield strength* sebesar 295 MPa, dan nilai elongasi sebesar 18% dan kandungan unsur karbon maksimal sebesar 0,25% C [4]. Hasil dari proses *cold-rolled* untuk menghasilkan baja lembaran karbon rendah ini menghasilkan bentuk butiran yang halus sehingga dapat meningkatkan nilai *tensile strength* dan *yield strength* dari baja namun juga dapat membuat nilai elongasi dari baja menurun, maka diperlukan suatu perlakuan panas *spheroidizing annealing* untuk memperbaiki nilai elongasi yang rendah [5].

Annealing dapat meningkatkan nilai elongasi baja secara signifikan sekaligus menurunkan nilai kekuatannya. Penurunan kekuatan baja ini menyebabkan baja tidak dapat memenuhi persyaratan minimum pada standar yang berlaku untuk aplikasi baja struktural. Sehingga diperlukan perlakuan panas lain untuk mensubstitusi proses *spheroidizing annealing* konvensional, yaitu dengan *cyclic spheroidizing annealing*. Proses *spheroidizing* ini membutuhkan waktu yang lama untuk menghasilkan 100% *spheroid*, maka dari itu perlu menggunakan metode *cyclic spheroidizing annealing* untuk mempercepat proses *spheroidizing*-nya [6].

Spheroidizing annealing konvensional pada baja membutuhkan waktu yang sangat lama untuk menyelesaikan prosesnya. Upaya awal *spheroidizing* yang melibatkan waktu tahan yang lama (72-100 jam) tepat di bawah suhu kritis yang lebih rendah (A1) diterapkan pada baja karbon sehingga dapat memecah semenit *lamellar* menjadi semenit *spheroid* semenit. *Spheroidizing annealing* memberikan keuletan yang lebih baik, meskipun mengorbankan sebagian kekuatan materialnya, dengan mikrostrukturnya terdiri dari semenit atau besi karbida yang berbentuk *spheroid* di dalam matriks α -*ferrite*. Namun, pengurangan kekuatan dan kinetika yang lamban adalah dua masalah utama yang terkait dengan perlakuan panas dengan *spheroidizing annealing* konvensional. Untuk mempercepat proses *spheroidizing*, maka dilakukanlah suatu metode dengan metode *cyclic spheroidizing annealing* [7].

Proses perlakuan panas dengan menggunakan metode *cyclic spheroidizing* dapat mempercepat proses *spheroidizing* pada baja karbon tanpa deformasi, menghasilkan struktur *spheroid* yang mendekati 100% dengan waktu yang relatif jauh lebih singkat. Faktor utama yang menyebabkan proses *cyclic spheroidizing annealing* ini lebih cepat dibandingkan dengan *spheroidizing* konvensional adalah karena pengaruh *non-equilibrium temperature reversal effect* selama *cyclic heat treatment* yang menyebabkan terjadinya eksitasi atom, sehingga dapat mengurangi energi aktivasi dan meningkatkan kinetika proses perlakuan panas. Setelah dilakukan *cyclic heat treatment* pada baja, kekuatannya akan menurun dan elongasinya akan meningkat [8].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, semakin lama waktu *spheroidizing annealing*, menghasilkan nilai kekuatan dan kekerasan yang menurun, namun nilai elongasinya meningkat. Waktu tahan yang sangat lama ini akan menyebabkan terjadi pertumbuhan ukuran butir yang besar, sehingga akan terjadi penurunan kekuatan baja secara signifikan. Maka dari itu diperlukan proses *spheroidizing annealing* dengan menggunakan metode *cyclic spheroidizing* yang dapat mempercepat proses *spheroidizing* [9]. Waktu tahan berpengaruh pada ukuran diameter butir ferit dan fraksi *fragmented lamell*. Semakin lama waktu tahannya maka akan semakin mempercepat proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir, sehingga diameter butir akan membesar dan semakin banyak terbentuknya *cementite* yang berbentuk *spheroid* atau *fragmented lamell*. Fraksi dari *fragmented lamell* meningkat dan proporsi dari perlit akan menurun secara drastis. Hal ini terjadi karena konversi perlit menjadi ferit dan *fragmented lamell* atau *spheroid* [10].

Penelitian ini dilakukan dengan memanaskan baja menggunakan metode *cyclic spheroidizing annealing* yang dilakukan variasi pada waktu tahan dan juga *cyclic spheroidizing* pada baja karbon rendah untuk mendapatkan sifat keuletan sekaligus kekuatan yang baik karena bentuk struktur mikro semenit *spheroid* yang dapat meningkatkan keuletan namun dapat mempertahankan kekuatannya [11]. Pada proses *spheroidizing*, siklus berpengaruh terhadap pembentukan *spheroid*. Penambahan siklus menyebabkan percepatan mekanisme fragmentasi *spheroid*, sehingga dengan bertambahnya siklus, menyebabkan pengecilan ukuran *spheroid*. Hal ini menyebabkan terjadinya mekanisme penguatan dispersi pada baja [10].

2. Metodologi Penelitian

Pada penelitian *cyclic spheroidizing* ini, sampel yang digunakan adalah baja karbon rendah hasil pengerjaan dingin. Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan spektrometer pada tiga titik pada permukaan sampel sebelum dilakukan perlakuan panas. Komposisi kimia sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia sampel baja pada penelitian ini.

Unsur	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
Persen berat	0,14	0,106	0,514	0,006	0,008	0,027	Setimbang

Sebelum dilakukan perlakuan panas, tiap sampel diberi kode untuk mempermudah penelitian. Kode sampel N merupakan sampel non-treatment. Kode sampel xxM-Sy meliputi; M: sampel setelah perlakuan panas, xx: waktu pemanasan (15-45 menit) dan y: jumlah siklus *spheroidizing*. Sampel dipotong sesuai dengan bentuk sampel uji tarik, uji kekerasan dan metalografi. Kemudian sampel dibersihkan permukaannya dengan menggunakan ampelas ukuran 1000#, kemudian dilakukan proses pemotongan sampel dengan ukuran 230 mm x 30 mm dan ketebalan 1,5 mm sesuai dengan JIS Z 2201 no. 5. Masing-masing sampel dipanaskan dengan menggunakan *muffle furnace* pada temperatur 6300C dengan variasi waktu tahan selama 15, 30 dan 45 menit, lalu didinginkan di udara bertekanan dengan menggunakan blower hingga temperatur ruang dengan kecepatan pendinginan 30C/detik.

Kemudian, masing-masing sampel dilakukan pemanasan siklik pada temperatur yang sama dengan waktu tahan selama 6 menit dengan variasi siklus sebanyak 1, 3 dan 5 dan didinginkan di udara bertekanan hingga temperatur ruang dengan kecepatan pendinginan 3^oC/detik. Setelah dilakukan proses perlakuan panas, sampel dilakukan pengujian yaitu uji kekerasan Vickers untuk mengetahui nilai kekerasan sesuai dengan standar JIS Z 2244, uji tarik yang

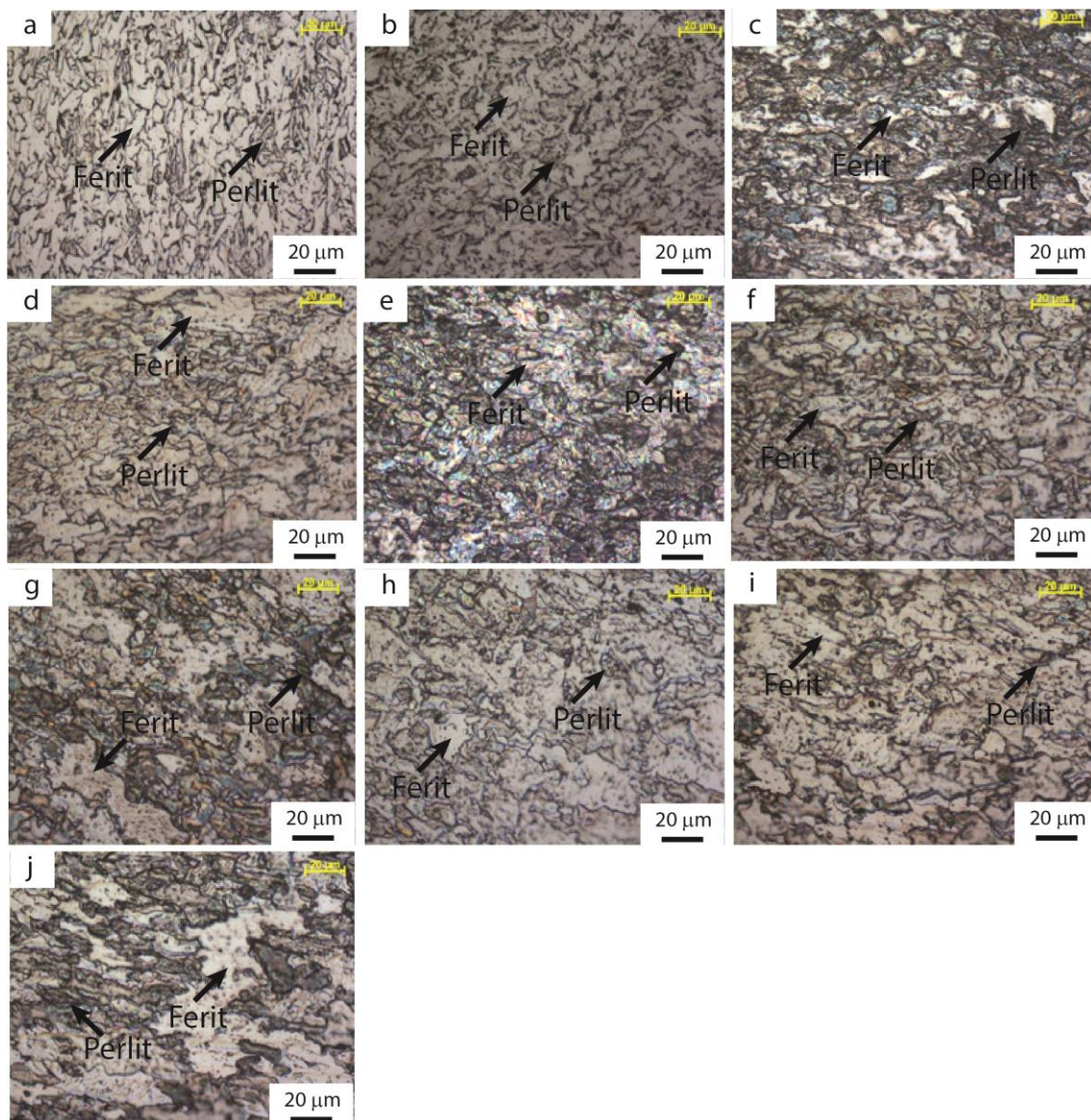
dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi sesuai dengan standar JIS Z 2201 no. 5. Serta metalografi untuk melihat struktur mikro yang terbentuk menggunakan mikroskop optik dan *scanning electron microscope* (SEM) JEOL type JSM-6390A.

Sampel yang telah dipotong, dilakukan proses *mounting* menggunakan *phenolic hot mounting resin* untuk mempermudah pemegangan sampel yang tipis dan kecil. Sampel dilakukan *grinding* dengan menggunakan ampelas berukuran 80, 100, 240, 320, 600, 800, 1000 dan 1200#. Lalu dilakukan *polishing* dengan ukuran 1 dan 3 μm menggunakan pasta alumina sebelum dilakukan etsa dengan menggunakan campuran antara larutan nital 3% dan larutan *picral* 3% dengan komposisi 50:50 selama 15 detik. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dan SEM-EDS. Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200, 500 dan 1000x. Pengamatan struktur mikro menggunakan SEM-EDS dengan perbesaran 2.000 dan 5.000x. Pengukuran ukuran *fragmented-lamell* dilakukan menggunakan aplikasi ImageJ. Pengukuran ukuran *fragmented-lamell* dilakukan dengan *console analyze particle* pada gambar struktur mikro perbesaran 5000x. Perhitungan ukuran butir pada gambar hasil mikroskop optik dengan menghitung ukuran butir secara manual dengan Standar ASTM E112.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengamatan Mikrostruktur dan Metalografi

Gambar struktur mikro dari sampel baja karbon rendah ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan observasi yang dilakukan diketahui adanya perubahan struktur mikro yang terjadi pada baja karbon rendah hasil pengerjaan dingin setelah dilakukan perlakuan panas.

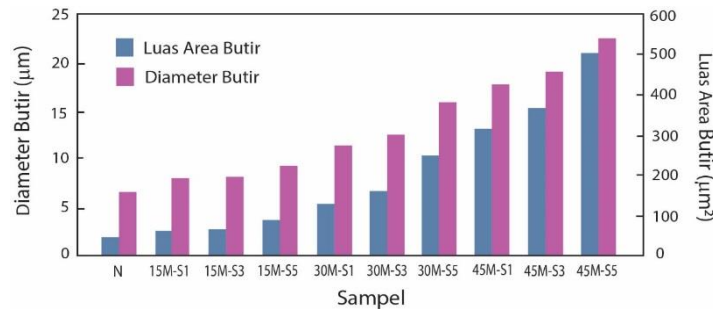


Gambar 1. Struktur mikro hasil pengamatan *Optical Microscope* dengan perbesaran 500x (a) Non-treatment; (b) 15M-S1; (c) 15M-S3; (d) 15M-S5; (e) 30M-S1; (f) 30M-S3; (g) 30M-S5; (h) 45M-S1; (i) 45M-S3; (j) 45M-S5.

Gambar 1(a) menunjukkan struktur mikro dari sampel baja *non-treatment* (N) hasil proses pengerjaan dingin, butirannya masih didominasi oleh bentuk butiran yang halus atau *elongated* karena mengikuti arah dari pengerolan. Gambar 1 (b) menunjukkan struktur mikro sampel 15M-S1 dengan bentuk butiran yang masih didominasi oleh bentuk butiran ferit yang pipih atau *elongated*, karena pemanasan yang sangat singkat. Gambar 1 (c) menunjukkan gambar struktur mikro dari sampel 15M-S3 (ukuran diameter sebesar 8,11 μm) yang didominasi oleh butiran yang *elongated*, namun ukuran butirnya lebih besar dari sampel 15M-S1 (ukuran diameter sebesar 7,9 μm). Gambar 1 (d) menunjukkan struktur mikro pada sampel 15M-S5 yang bentuk butirannya didominasi

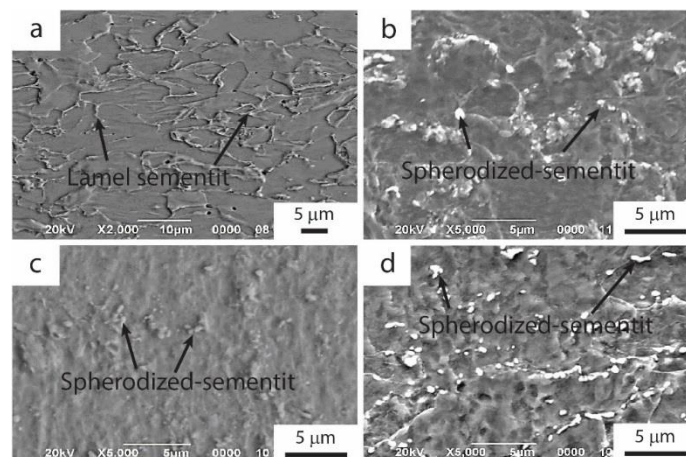
dengan butiran yang berbentuk *elongated*, namun ukuran butiran ferit-nya lebih besar dari sampel sebelumnya. Gambar 1 (e) menunjukkan struktur mikro pada sampel 30M-S1 yang bentuk butirannya didominasi oleh bentuk *elongated* namun sebagian butiran ferit-nya sudah *semi equiaxed*. Sedangkan pada Gambar 1 (f) dan Gambar 1 (g) masing-masing menunjukkan struktur mikro sampel 30M-S3 dan sampel 30M-S5 bentuk butirannya hampir seluruhnya berbentuk *equiaxed*. Gambar 1 (h) menunjukkan struktur mikro pada sampel 45M-S1 yang bentuk butirannya didominasi oleh bentuk butiran *equiaxed* dan hanya beberapa bentuk butiran yang masih *elongated*. Gambar 1 (i) menunjukkan struktur mikro sampel 45M-S3 butirannya berbentuk *equiaxed* yang lebih besar dari sampel sebelumnya. Gambar 1 (j) menunjukkan gambar struktur mikro sampel 45M-S5 yang bentuk butirannya seluruhnya sudah berbentuk butiran *equiaxed* yang lebih besar dari sampel-sampel sebelumnya.

Gambar 2 merupakan grafik pengaruh perlakuan panas *cyclic spheroidizing annealing* terhadap ukuran diameter dan luas area butir. Pada gambar tersebut memperlihatkan bahwa semakin meningkatnya waktu tahan dan siklus *spheroidizing*, maka ukuran butir ferit-nya semakin meningkat. Sementara itu, dengan meningkatnya waktu tahan dan siklus *spheroidizing* pada perlakuan panas *cyclic spheroidizing annealing*, diikuti dengan peningkatan ukuran butir pada sampel.



Gambar 2. Pengaruh perlakuan panas *cyclic spheroidizing annealing* terhadap ukuran diameter dan luas area butir.

Hal ini dapat terjadi dikarenakan dengan meningkatnya lama waktu tahan pada baja, maka akan mempercepat proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir (*grain growth*) dari baja canai dingin dan bentuk butirannya semakin *equiaxed* yang menyebabkan ukuran diameter butiran feritnya semakin besar. Namun sebaliknya pada lama waktu tahan yang lebih rendah bentuk butirannya berbentuk *elongated* yang lebih banyak, karena proses *grain growth*-nya yang berjalan lebih lambat dibandingkan dengan sampel pada waktu tahan yang lebih lama.



Gambar 3. Struktur mikro hasil *scanning electron microscope* pada sampel (a) *Non-treatment*; (b) 15M-S3; (c) 30M-S3; (d) 45M-S3.

Gambar 3 (a) menunjukkan gambar struktur mikro hasil dari SEM pada sampel yang belum dilakukan proses perlakuan panas atau *non-treatment*, yang sementitnya masih berbentuk lamel sementit. Struktur mikro sampel 15M-S3 ditunjukkan pada Gambar 3 (b) sudah mulai terdapat beberapa butiran berbentuk *fragmented-lamell* yang tersebar pada daerah batas butir dan butiran. Gambar 3 (c) menunjukkan gambar struktur mikro hasil pengamatan metalografi SEM-EDS sampel 30M-S3, jumlah dan fraksi dari *fragmented-lamell*-nya semakin banyak yang tersebar pada butiran dan disekitar batas butir dibandingkan pada sampel 15M-S3, begitu juga pada Gambar 3 (d) yang merupakan struktur mikro sampel 45M-S3, jumlah dan fraksi *fragmented-lamell*-nya semakin meningkat. Fraksi dari *fragmented-lamell*-nya semakin banyak dengan meningkatnya lama waktu tahan.

Sementit pada sampel *non-treatment* berbentuk lamel, dimana bentuk butirannya halus dan memanjang, diameter butir yang lebih halus tersebut menyebabkan batas batas butir menjadi lebih banyak. Kemudian setelah dilakukan *cyclic spheroidizing annealing*, sementit terfragmentasi menjadi *fragmented-lamell*. Dapat dilihat pada Tabel 3 yang juga menunjukkan ukuran *fragmented-lamell*, pada sampel 30M-S3 dan 45M-S3, terlihat bahwa dengan waktu tahan yang lebih lama, ukuran dari *fragmented-lamell* akan bertambah yaitu sebesar 0,143 µm pada sampel 30M-S3 dan 0,164 µm untuk sampel 45M-S3. Hal ini dapat terjadi karena adanya hubungan dengan ukuran ferit pada tiap sampel, proses pada *fragmentasi lamell* akan semakin cepat apabila ukuran feritnya semakin pipih karena adanya energi bebas permukaan yang lebih besar pada butiran ferit yang pipih yang akan menekan lamel-lamel sementit hingga akan terfragmentasi menjadi bentuk *spheroid*. Namun pada sampel 15M-S3 ukuran *fragmented-lamell*-nya lebih besar dari sampel 30M-S3 dan 45M-S3, hal tersebut karena proses mekanisme fragmentasi lamel tidak berlangsung signifikan. Penambahan siklus pada sampel 30M-S5 terlihat menghasilkan ukuran dari *fragmented-lamell* yang lebih kecil yaitu sebesar 0,096 µm daripada sampel 30M-S3 yaitu sebesar 0,143 µm.

Tabel 3. Ukuran dan fraksi fragmented-lamell.

Sampel	Ukuran fragmented-lamell (μm^2)	Fraksi fragmented-lamell (%)
15M-S3	0,261	21,75
30M-S3	0,143	33,46
30M-S5	0,096	44,11
45M-S3	0,164	38,13

Hal tersebut sesuai dengan mekanisme penguatan dispersi dari literatur bahwa ukuran partikel *fragmented-lamell* perlahan menurun dengan jumlah siklus perlakuan panas karena proses fragmentasi *lamell* yang intens ditambah dengan *generation of lamellar faults* yang lebih padat di bawah laju pendinginan yang lebih cepat (pendinginan udara bertekanan). Pendinginan dengan udara bertekanan diharapkan dapat menghasilkan daerah-daerah cacat, disebut sebagai *lamellar fault sites* [12]. Partikel-partikel semenit yang terdispersi (baik dalam bentuk *spheroid* atau dalam bentuk *non-spheroid*) dengan ukuran *submicroscopic* (ukuran $<1\mu\text{m}$) berkontribusi pada peningkatan kekuatan dengan memberikan efek penguatan dispersi yang lebih baik. Khususnya, partikel semenit berbentuk pelat (*non-spheroid*) dengan ukuran *submicroscopic* akan memberikan efek penguatan terbesar yang menyebabkan terhalangnya pergerakan dislokasi melalui *particle cutting mechanism* karena hal itu terkait dengan energi permukaan yang besar (karena partikel berbentuk pelat memiliki luas permukaan yang besar per satuan volume) [10, 13].

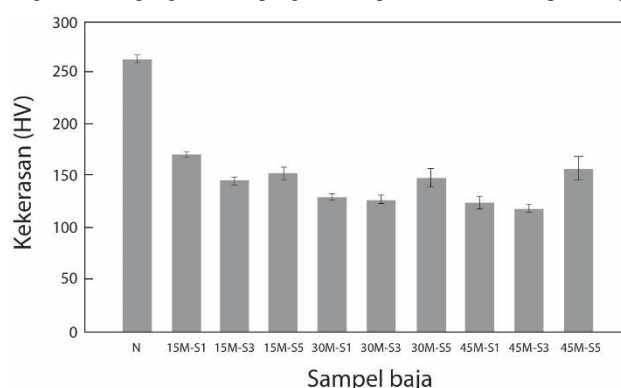
Dapat dilihat pada Tabel 3 yang juga menunjukkan ukuran dan fraksi *fragmented-lamell*, fraksi *fragmented-lamell* pada sampel 15M-S3 sebesar 21,75%, sampel 30M-S3 meningkat sebesar 33,46%, sampel 30M-S5 meningkat sebesar 44,11%, dan pada sampel 45M-S3 sebesar 38,13%. Artinya bahwa jumlah fraksi dari *fragmented-lamell* semakin bertambah dengan meningkatnya lama waktu tahan perlakuan panas dan siklus *spheroidizing*-nya. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa jumlah perlit *lamellar* menurun dan jumlah *fragmented-lamell* (*spheroid*) muncul seiring dengan bertambahnya waktu tahan dan meningkatnya jumlah siklus [14].

Meningkatkan siklus perlakuan, fraksi dari *fragmented lamell* juga meningkat dan proporsi dari perlit menurun secara drastis, jumlah perlit berkurang hingga sebagian besar dalam struktur mikro, ini terjadi karena konversi perlit menjadi area ferit dan *fragmented-lamell* dengan perlakuan panas yang berulang-ulang. Juga, area ferit ini (berasal dari *dissolution* perlit dan difusi karbon menuju batas butir) untuk siklus perlakuan panas yang lebih tinggi mengandung presipitat semenit yang lebih halus dibandingkan siklus perlakuan panas yang lebih sedikit.

3.2. Uji Kekerasan

Sampel baja karbon dilakukan pengujian kekerasan dengan indentasi yang dilakukan dengan pengujian kekerasan Vickers sesuai dengan yang ditetapkan pada standar JIS Z 2244. Pengujian kekerasan Vickers ini menggunakan indenter piramida intan dengan sudut sebesar 136° , menggunakan gaya tekan sebesar 200 kgf selama 10 detik. Indentasi dilakukan pada tiga titik pada permukaan sampel [15]. Nilai kekerasan tiap sampel dapat dilihat pada Gambar 5.

Nilai kekerasan dari tiap sampel bervariasi, dengan peningkatan waktu tahan kekerasannya akan semakin menurun. Namun dengan meningkatnya jumlah siklus *spheroidizing*-nya, kekerasannya akan semakin meningkat karena pengaruh dari efek penguatan dispersi yang dapat dilihat grafiknya pada Gambar 4. Hal tersebut dapat terjadi karena terjadinya pertumbuhan butir pada sampel dan percepatan mekanisme rekristalisasi dengan waktu tahan yang lebih lama, yang menyebabkan diameter butirnya akan bertumbuh dan semakin membesar sehingga jumlah batas butirnya akan semakin berkurang yang dapat membuat butiran menjadi lebih mudah untuk bergerak saat akan diberikan beban. Hanya sedikit dislokasi yang terhalang oleh batas butir yang menyebabkan dislokasi semakin mudah bergerak. Sehingga kekerasannya pun akan menurun. Namun semakin tinggi jumlah siklus *spheroidizing* yang dilakukan, kekerasannya pun akan meningkat karena pengaruh dari penguatan dispersi dari *spheroid* yang menyebar pada batas butir. Hal tersebut dapat terjadi karena terjadinya pertumbuhan butir pada sampel dan percepatan mekanisme rekristalisasi dengan waktu tahan yang lebih lama, yang menyebabkan ukuran butirnya akan bertambah dan semakin membesar. Butir yang besar akan menghasilkan jumlah batas butir yang semakin berkurang. Hal ini menyebabkan dislokasi menjadi lebih mudah untuk bergerak saat diberikan beban dari luar sehingga kekerasannya pun akan menurun [1]. Namun semakin tinggi jumlah siklus *spheroidizing* yang dilakukan, kekerasan baja akan meningkat karena pengaruh dari penguatan dispersi dari semenit *spheroid* yang menyebar pada batas butir.

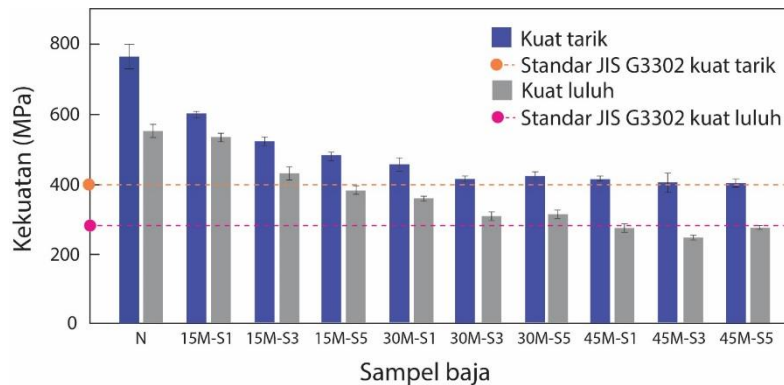
Gambar 4. Grafik pengaruh *spheroidizing* terhadap kekerasan.

3.3. Uji Tarik

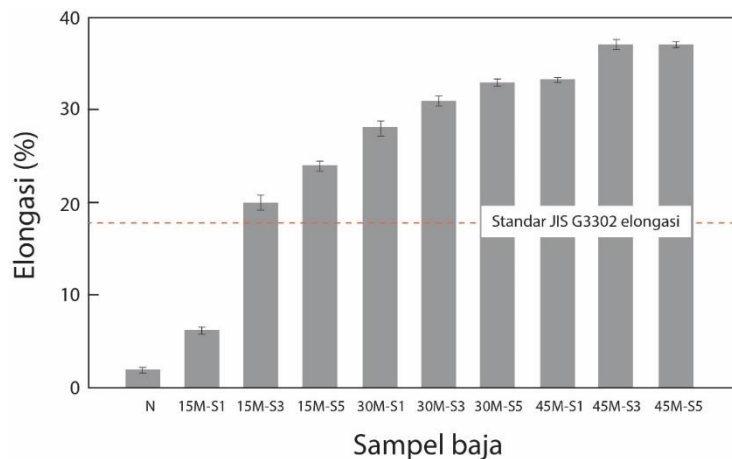
Sampel yang telah dipotong dengan ukuran sesuai dengan standar JIS Z 2201 no. 5 dilakukan uji tarik [16]. Nilai kuat Tarik, kuat luluh dan elongasi dari tiap sampel dapat dilihat pada Gambar 5. Semakin lama waktu tahan yang dilakukan pada proses pemanasan, maka nilai *tensile strength* dan *yield strength* pada baja akan semakin rendah, namun nilai elongasinya meningkat. Hal tersebut dapat terjadi karena terjadinya pertumbuhan butir pada sampel dan

percepatan mekanisme rekristalisasi dengan waktu tahan yang lebih lama, yang menyebabkan diameter butirnya akan bertumbuh dan semakin membesar sehingga jumlah batas butirnya akan semakin berkurang yang dapat membuat butiran menjadi lebih mudah untuk bergerak saat akan diberikan beban.

Hanya sedikit dislokasi yang terhalang oleh batas butir yang menyebabkan dislokasi semakin mudah bergerak, sehingga kekuatannya pun akan menurun. Namun semakin tinggi jumlah siklus *spheroidizing* yang dilakukan, kekuatannya pun akan meningkat. Nilai elongasi yang terendah pada sampel 15M-S1 dibandingkan sampel lain yang dilakukan perlakuan panas, dimana nilai elongasinya hanya sebesar 6%. Hal tersebut akan menyebabkan mekanisme pertambahan panjang akan berlangsung lebih cepat karena adanya konsentrasi tegangan yang lebih besar pada daerah batas butir, sehingga akan menimbulkan suatu *initial crack* yang hadir lebih awal pada daerah batas butir dengan konsentrasi tegangan pada batas butir yang lebih besar, sehingga mekanisme pertambahan panjangnya akan berlangsung lebih cepat. Grafik pengaruh *spheroidizing* terhadap kekuatan dan elongasi dari tiap sampel dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Grafik pengaruh *spheroidizing* terhadap kuat tarik dan kuat luluh.



Gambar 6. Grafik pengaruh *spheroidizing* terhadap elongasi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai perlakuan panas *cyclic spheroidizing annealing* dengan variasi waktu tahan dan siklus *spheroidizing* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon rendah JIS G3302 *grade*, dapat disimpulkan bahwa pengaruh lama waktu tahan terhadap sifat mekanik yakni semakin lama waktu tahan perlakuan panas yang diterapkan pada baja di dalam penelitian, menyebabkan peningkatan nilai elongasi, namun menurunkan sedikit nilai kuat tarik, kuat luluh dan kekerasannya. Pengaruh waktu tahan terhadap struktur mikro yakni semakin lama waktu tahan perlakuan panas maka fraksi *fragmented-lamell (spheroidized-sementit)* semakin besar. Jika dibandingkan dengan 1 siklus, pengaruh dari penguatan dispersi pada 3 siklus dan 5 siklus cenderung lebih signifikan. Pengaruh siklus terhadap sifat mekanik yakni dari 3 siklus ke 5 siklus menyebabkan terjadinya peningkatan nilai kuat tarik, kuat luluh dan juga kekerasannya. Pengaruh siklus terhadap struktur mikro yakni ukuran *spheroidized-sementit* yang semakin kecil dengan meningkatnya siklus sehingga akan meningkatkan kekuatan baja karbon.

Sampel baja karbon rendah yang memenuhi standar JIS G 3302 *grade* SGC 400 pada penelitian ini yakni variasi waktu tahan 15 menit pada 3 dan 5 siklus dengan nilai kuat tarik sebesar 522 dan 481 MPa, kuat luluh sebesar 429 dan 30 MPa, dan nilai elongasi sebesar 20 dan 24%. Variasi pada waktu tahan 30 menit pada 1, 3, dan 5 siklus dengan nilai kuat tarik sebesar 455, 415 dan 422 MPa, kuat luluh sebesar 361, 307 dan 313 MPa, dan nilai elongasi sebesar 28, 31 dan 33%.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Krakatau Steel atas penggunaan fasilitas peralatan karakterisasi dan uji sifat mekanik logam. Tidak lupa kami mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA atas bantuan administratif yang diberikan sehingga proses pengumpulan data dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Trenggono, A. & Alfirano. (2016). Efek parameter laku panas terhadap sifat mekanis baja paduan rendah kekuatan tinggi. *Jurnal Teknika*, vol. 12, no. 1, pp. 43-50.
- [2] Safarov, I. M., Korznikov, A. V., Galeyef, R., Sergeev, S., Gladkovskii, S. V., Borodin, E. M., & Pyshmintsev, I. Yu. (2014). Strength and impact toughness of low-carbon steel with fibrous ultrafine-grained structure. *The Physics of Metals and Metallography*, vol. 115, no. 3, pp. 295-302.
- [3] Canale L. C. F., Vatauvuk, J., & Totten, G. E. (2014). *Introduction to Steel Heat Treatment*. Elsevier Ltd.
- [4] Japanese Industrial Standard. (2010). *Ferrous Materials & Metallurgy II*. Tokyo: Japanese Standard Association.
- [5] Callister Jr., W. D. (2007). *Material Science and Engineering: An Introduction 7th Edition*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [6] Totten, E. G. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook 2nd Edition*. USA: CRC Press.
- [7] Yin, Y. J., Sun, J. Q., Zhao, A., & Gou, J. (2018). Ultra low carbon steel spheroidization and torsion. *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 25, pp. 968–974.
- [8] Wang, Z. Q. Lv. B., Wang, Z. H., Sun, S. H., & Fu, W. T. (2013). Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 574, pp. 143–148.
- [9] Schaneman Jr., R. A. (2009). The effects of prior microstructure on spheroidizing kinetics and cold workability in bar steels [Master Thesis]. Colorado: Faculty and Board of Trustees of the Colorado School of Mines.
- [10] Mishra, S., Mishra, A., Show, B. K., & Maity, J. (2017). Simultaneous enhancement of ductility and strength in AISI 1080 steel through a typical cyclic heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 688, pp. 262-271.
- [11] Kamyabi-Gol, A., & Sheikh-Amiri, M. (2010). Spheroidizing kinetics and optimization of heat treatment parameters in CK60 steel using taguchi robust design. *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 17, no 4, pp. 45-52.
- [12] Saha, A., Mondal, D. K., Koushik, B., & Maity, J. (2012). Microstructural modifications and changes in mechanical properties during cyclic heat treatment of 0.16 % carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 534, pp. 465–75.
- [13] Maji, S., Subhani A. R., Show, B. K., Maity, J. (2017). Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of eutectoid steel under cyclic heat treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 26, no. 7, pp. 3058-3070
- [14] Saha, A., Mondal, D. K., Maity, J. (2010). An alternate approach to accelerated spheroidization in steel by cyclic annealing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 20, pp. 114–119.
- [15] Japanese Industrial Standard, Z 2244. (2003). *Vickers Hardness Test – Test Method*. Tokyo: Japanese Standard Association.
- [16] Japanese Industrial Standard, Z 2201. (1998). *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*. Tokyo: Japanese Standard Association.