

# ANALISIS PENGARUH RADIUS *BENDING* PADA PROSES *BENDING* MENGGUNAKAN PELAT SPCC-SD TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO

Istianto Budhi Rahardja<sup>1</sup>, Nana Rahdiana<sup>2\*</sup>, Dodi Mulyadi<sup>3</sup>, Sumanto<sup>4</sup>, Abduh Al Afghani<sup>5</sup>,  
Anwar Ilmar Ramadhan<sup>6</sup>, Sukarman<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Program Teknologi Pengolahan Hasil Perkebunan Kelapa Sawit, Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi, Bekasi, 17520

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Industri, Universitas Buana Perjuangan, Karawang, 41361

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Buana Perjuangan, Karawang, 41361

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Karawang, Jl. Surotokunto No.2, Karawang, 41371

<sup>5</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Buana Perjuangan, Karawang, 41361

<sup>6</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta, 10510

<sup>7</sup>Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana, Jl. Cikopak No. 53, Purwakarta, 41151

email: [istianto@cwe.ac.id](mailto:istianto@cwe.ac.id)<sup>1</sup>, [nana.rahdiana@ubpkarawang.ac.id](mailto:nana.rahdiana@ubpkarawang.ac.id)<sup>2\*</sup>, [dodi.mulyadi@ubpkarawang.ac.id](mailto:dodi.mulyadi@ubpkarawang.ac.id)<sup>3</sup>,  
[sumanto.eng@gmail.com](mailto:sumanto.eng@gmail.com)<sup>4</sup>, [tm19.abduhafgani@mhs.ubpkarawang.ac.id](mailto:tm19.abduhafgani@mhs.ubpkarawang.ac.id)<sup>5</sup>, [anwar.ilmar@ftumj.ac.id](mailto:anwar.ilmar@ftumj.ac.id)<sup>6</sup>,  
[sukarman@stt-wastukencana.ac.id](mailto:sukarman@stt-wastukencana.ac.id)<sup>7</sup>

## ABSTRAK

*Paper ini membahas tentang pengaruh radius bending pada kualitas hasil bending dan pengaruhnya terhadap perubahan microstructure. Proses bending merupakan salah satu proses pembentukan logam (metal forming) dengan metode pembentukan dingin. Pada proses bending salah satu hal yang harus diperhatikan adalah penggunaan radius bending dan besarnya gaya yang diberikan. Penelitian ini menggunakan metode ekperimental dengan menggunakan material baja carbon rendah SPCC-SD dengan ketebalan 1.0 mm. Spesifikasi material SPCC-SD mengacu pada JIS-3141. Penelitian dilakukan pada proses bending dengan menggunakan mesin power press berkapasitas 40 ton pada proses pembuatan omega clamp 1.5 Inchi. Pengamatan difokuskan pada zona radius bending R 0.8 mm dan R 2.5 mm. Hasil pengujian mengkonfirmasi bahwa terjadi keretakan disekitar zona bending R 0.8 mm sedangkan pada zona radius bending R 2.5 mm tidak ditemukan. Penelitian ini juga mengkonfirmasi adanya perubahan microstructure pada penggunaan radius bending R 0.8 mm. Pada penggunaan zona bending R 0.8 mm telah dikonfirmasi terjadi perubahan menjadi butiran pearlite berdiameter 3.09  $\mu\text{m}$ -6.97  $\mu\text{m}$ . Sementara pada zona bending R 2.0 hanya terjadi perubahan pergeseran pearlite ke pusat bending dan tidak sampai terbentuk butiran pearlite.*

**Kata kunci:** Struktur micro, Pembentukan baja, Baja karbon rendah, Pearlite, Radius penekukan

## ABSTRACT

*This paper study the influence of bending radius on bending results' quality and its effect on microstructure changes. The bending process is one of the metal forming types with the cold forming process. In the bending process, one thing to consider is using a bending radius, and a total force applied. This study used an experimental method using low-carbon steel material SPCC-SD with a thickness of 1.0 mm. SPCC-SD material specifications used according to JIS-3141. The research was carried out in the bending process using a 40-ton capacity power press machine for the 1.5-inch omega clamp manufacturing process. The investigation focused on bending radius zones. It found cracks around R 0.8 mm' bending zone while the R 2.5 mm bending radius zone not observed. The investigation confirmed the changes in the microstructure in the use of a 1.0 mm bending radius. Using the R 0.8 mm bending zone, confirmed that there changed size grain to 3.09  $\mu\text{m}$ -6.97  $\mu\text{m}$  diameter pearlite. While in the bending zone R 2.0, there was only a change in the pearlite shift to the bending center and without changed the pearlite grain.*

**Keywords:** Microstructure, Metal forming, Low-carbon steel, Pearlite, Bending radius

## PENDAHULUAN

Teknologi pembentukan logam (*metal forming*) dengan menggunakan lembaran logam (*sheet metal*) merupakan salah satu teknologi manufaktur paling awal yang dikembangkan dalam industri manufaktur [1]. Bersamaan dengan terus meningkatnya perkembangan industri manufaktur, teknologi *metal forming* sehingga penggunaan produk lembaran logam telah banyak digunakan di hamper semua sektor industri, seperti industri otomotif, elektronik, industri pertambangan, industri pesawat terbang dan lain-lain [2-4]. Salah satu bentuk proses *metal forming* adalah proses *bending* (penekukan). Pendekatan penekukan logam telah banyak dikembangkan dalam menanggapi meingkatnya ketelitian toleransi pembentukan logam, munculnya beragam bentuk, dan berbagai tipe spesifikasi plat [5-6].

Berdasarkan perlakuan suhu, metode pembentukan logam dibagi dalam dua proses yaitu pembentukan dingin (*cold working*) yang dilakukan pada suhu kamar dan pembentukan panas (*hot working*) dengan temperatur tinggi [4]. Proses pembentukan dingin dilakukan tanpa pemanasan benda kerja. Pembentukan dingin merupakan pembentukan plastis logam di bawah suhu rekristalisasi dan dilakukan di suhu kamar [8].

Tipe proses pembentukan logam lainnya didasarkan pada tipe penekukanya ada dua yaitu, pembentukan kinematik (*kinematic shaping*) dan pembentukan dengan *dies* (*shaping with rigid tools*). Proses pembentukan kinematik lebih fleksibel. Bentuk akhir komponen dari proses *kinematic shaping* tidak ditentukan oleh bentuk alat, tetapi ditentukan oleh gerakan relatif alat dan benda kerja. Pembentukan dengan *dies* dipengaruhi oleh geometri benda kerja yang diinginkan, terutama yang berkaitan dengan lengkungan, dan faktor *springback* setelah penekanan. Karena geometri *dies* dan benda tetap, proses pembentukan ini menghasilkan reproduktifitas tinggi dan waktu pemrosesan lebih pendek dalam banyak kasus [9]. Proses *bending* termasuk *metal forming* jenis *cold working*. Proses *bending* bisa

dilakukan dengan metode *kinematic shaping* ataupun dengan *dies* (*shaping with rigid tools*) [10]. Beberapa faktor yang mempengaruhi umur pemakaian *dies* antara lain kekerasan die, tingkat kedalaman alur atau konfigurasi lain dalam cetakan, apakah *flash* diizinkan atau tidak, dan komposisi logam kerja. Kekerasan *dies* memiliki pengaruh besar pada umur pemakaian *dies*. *Dies* yang dikeraskan menjadi 50 hingga 55 HRC sering kali memiliki umur total 190.000 hingga 200.000 unit pada proses *metal forming* baja karbon rendah ke bentuk sederhana. Dalam aplikasi yang serupa, *dies* dari bahan yang sama yang dikeraskan pada 35 HRC hingga 40 HRC hanya memiliki umur total hanya 30.000 unit [11].

Baja karbon rendah memiliki  $\leq 0,30\%$  karbon. Umumnya disuplai sebagai produk lembaran atau strip, dalam kondisi cold-rolled atau kondisi anil [12]. Untuk baja dengan formabilitas tinggi, kandungan karbon kurang dari 0,1% dengan kadar magnesium 0,4%, digunakan untuk panel bodi mobil, pelat tipis, dan produk kawat. Untuk pelat dan bagian struktural baja canai, kandungan karbonnya adalah 0,3% dengan kandungan magnesium 1,5%, digunakan untuk proses *stamping*, *forging*, tabung *seamless* atau *plate boiler* [8].

Penelitian tentang pembentukan logam (*metal forming*) telah banyak dilakukan. Huang melakukan penelitian *microstructure* untuk Peregangan-Bending Baja Dual-Fase dengan pendekatan *Representative volume elements* (RVE). Penelitian menggunakan material DP590 and DP780. Mode kegagalan mikrostruktur dalam berbagai kondisi pembebanan dalam uji regangan-tekuk dipelajari, dan berbagai mekanisme kegagalan dalam tekukan-regangan dianalisis. Hasil komputasi dan analisis distribusi tegangan-regangan menunjukkan bahwa dalam model RVE, regangan sebagian besar terjadi pada fase ferit, sedangkan fase martensit melakukan sebagian besar tegangan tanpa regangan yang signifikan. Kegagalan adalah hasil dari dehomogeneity deformasi antara fase martensit dan fase ferit. Berbagai tampilan dan

pertumbuhan rongga awal berbeda tergantung pada *radius bending* [13].

Pada penelitian lainnya, Liu melakukan penelitian mikro struktur dan evolusi tekstur selama ekstrusi dan deformasi *bending-shear* dengan menggunakan baja paduan magnesium AZ31. Penelitian menggunakan teknologi *severe plastic deformation* (SPD) dengan menggunakan metode *Direct Extrusion and Bending-Shear* (DEBS). Teknik SPD baru — DEBS — dapat secara efektif memperbaiki butiran dan meningkatkan struktur mikro paduan AZ31 Mg. Ukuran butir berkurang secara signifikan dari 253  $\mu\text{m}$  menjadi 6,2  $\mu\text{m}$  setelah ekstrusi pada 370°C karena adanya *dynamic recrystallization* (DRX). Deformasi *bending-shear* ditemukan sangat penting untuk tekstur tuning paduan AZ31 karena pembukaan sistem *slip non-basal* dan inisiasi DRX selama DEBS, yang mengarah pada perubahan homogenitas pada struktur mikro lanjut. Evolusi tekstur menyatakan bahwa tekstur basal yang kuat yang terbentuk dalam ekstrusi langsung dapat lebih lanjut dilemahkan oleh deformasi *bending-shear* [14].

Penelitian lanjutan juga dilakukan oleh Su dengan melakukan investigasi proses roll dengan menggunakan kondisi batas pembentukan lima batas (*five-boundary*) fungsi distribusi. Penelitian ini menggunakan material baja Q235, SUS 304 dan DP780. Pada baja Q235 untuk ketebalan 2.0 mm memiliki butir mikroskopis yang sedikit berubah dibandingkan dengan ukuran butir mikroskopis berdasarkan fungsi distribusi kondisi lima batas. Namun, perubahan butiran mikroskopis dengan ketebalan yang berbeda terlihat jelas. Ini menunjukkan bahwa ketebalan lembaran berpengaruh signifikan terhadap regangan transversal dari zona pembentukan material (*forming zone*). Butir mikroskopis di zona *bending* baja DP780 berbentuk topi menunjukkan fenomena ketegangan dan kompresi, tetapi perubahan dalam ukuran butir tidak jelas. Secara bersamaan, regangan tarik butir di lapisan luar zona lentur di sepanjang arah ketebalan lembaran lebih besar dari

regangan tekan di lapisan dalam, yang menunjukkan bahwa pengurangan ketebalan di zona lentur tidak bisa dihindari [15].

Berbeda dengan penelitian-penelitian di atas, penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasi pengaruh radius *bending* pada proses *stamping* terhadap perubahan *microstructure* dan kualitas hasil *bending*. Proses *bending* dalam penelitian ini menggunakan radius R 0.8 dan R 2.5 mm. Metode yang digunakan adalah metode ekperimental dengan menggunakan material baja carbon rendah (SPCC-SD) mengacu pada JIS 3141 [12] [16]. Penelitian dilakukan dengan mengambil studi kasus pada proses *bending* dengan menggunakan *dies* *stamping* pada pembuatan *omega clamp* 1.25” sebagai objek penelitian. Uji *metallography* dilakukan dengan memotong secara melintang benda kerja pada dua titik di R1 dan R2 untuk dilakukan uji *metallography*.

## METODE PENELITIAN

### *Omega clamp* dan Material

Proses *bending omega clamp* dilakukan dengan *dies* dan punch sehingga termasuk metode *shaping with rigid tools*. *Omega clamp* merupakan salah satu klem pipa yang banyak digunakan untuk mengikat atau menjepit pipa pada dinding beton atau kayu. Kapasitas beban *omega clamp* ditentukan oleh panjang dan tebal pipa yang digunakan. Kapasitas penjepit ditentukan oleh panjang pipa yang digunakan. Ketika mengacu pada perpipaan, *omega clamp* juga digunakan untuk menghubungkan pipa ke unit gantungan pipa.

Penelitian ini membahas pengaruh radius terhadap perubahan *microstructure* pada proses *stamping omega clamp* 1.25”. Material yang digunakan adalah SPCC-SD (JIS 3141) dengan ketebalan 1.0 mm. Proses *bending* menggunakan mesin *power press* kapasitas 40 ton. Sedangkan uji metalografi dilakukan di laboratorium teknik mesin Universitas Buana Perjuangan.

Material yang digunakan diambil dari *heat no. SP45572* yang merupakan plat produksi dari

PT X. Spesifikasi material SPCC-SD yang digunakan adalah tersaji pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Sifat-sifat mekanik pelat SPCC-SD

Mechanical properties	Standard	Actual
UTS (MPa)	≥ 270	316
YS (MPa)	≤ 240	179
Elongation (%)	≥ 46	46
Harness (HRB), max.	≤ 57.	44.1

Sementara itu komposisi kimia material yang digunakan tersaji pada tabel 2.

**Tabel 2.** Komposisi kimia pelat SPCC-SD

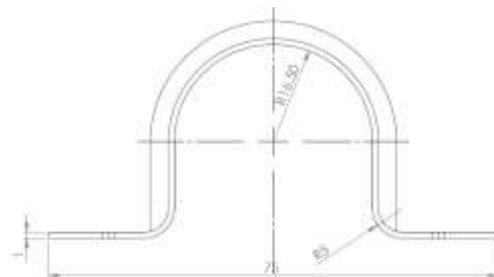
Unsur	Standard	Aktual
C	≤ 0.12	0.0343
Mn	≤ 0.5	0.205
S	≤ 0.45	0.0032
P	≤ 0.40	0.0077
Si	-	0.002

Dengan melihat prosentase unsur karbon pada tabel 2 dapat diketahui bahwa material SPCC-SD (JIS 3141) merupakan jenis baja karbon rendah dan ekuivalen dengan standar ASTM A366-91 [17] [18]. Ekperimen ini menggunakan sample dengan dua radius *bending* yaitu radius *bending* R 0.8 mm dan R 2.5 mm. Gambar *omega clamp* yang digunakan dalam penelitian ini tersaji pada gambar 1.

**Proses Bending Omega clamp**

Radius *bending* akan mempengaruhi kualitas hasil *bending*. *Dies bending omega clamp* dirancang dengan menggunakan R 0.8 mm pada radius R1 dan R 2.5 mm pada radius R2. Material *Dies* dan Punch menggunakan

material SKD11 yang dikeraskan (*hardening process*). Kekerasan material berkisar antara 55 – 59 HRC. Prosed *bending omega clamp* tersaji pada Gambar 2.



**Gambar 1.** Omega clamp 1.25 inci

Nilai radius *bending* akan mempengaruhi dimensi total dan kegagalan material (keretakan material). Nilai radius *bending* berbanding lurus dimensi *blank* material yang kita gunakan yang akan mempengaruhi efisiensi penggunaan material. Ketidaktepatan saat menentukan radius *bending* akan berpengaruh pada dimensi akhir suatu komponen. Pada sisi lain juga harus dihindari adanya keretakan hasil *bending* yang bisa mempengaruhi ketangguhan suatu komponen. Hal terpenting untuk mencegah keretakan material pada proses *bending* adalah dengan menggunakan radius *bending* yang tidak terlalu kecil [19].

*Tensile strength* dan ketebalan merupakan variebel yang akan mempengaruhi dimensi dan kualitas proses *metal forming*. Karenanya, penentuan radius *bending* harus memperhatikan *tensile strength* dan ketebalan material yang akan digunakan. Radius minimum untuk material dengan *tensile strength* sampai dengan 490 N/m<sup>2</sup> tersaji pada Tabel 3 [19].

**Tabel 3** Minimum radius *bending*

<i>Tensile strength</i> [N/mm <sup>2</sup> ]	Bending direction	Ketebalan material				
		1.0	> 1 - 1,5	> 1.5 - 2,5	> 2,5 – 3.0	> 3.0 – 4.0
≤ 390	<i>transverse</i>	1.0	1.6	2.5	3.0	5.0
	<i>longitudinal</i>	1.0	1.6	2.5	3.0	6.0
390 - 490	<i>transverse</i>	1.2	2.0	3.0	4.0	5.0
	<i>longitudinal</i>	1.2	2.0	3.0	4.0	6.0



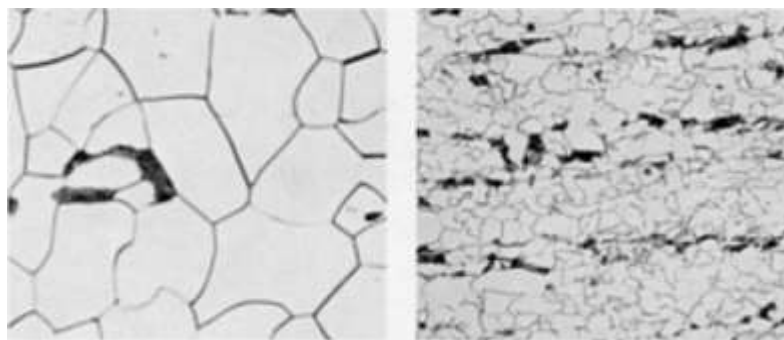
**Gambar 2.** Proses *bending omega clamp* 1.5 inci

### Mikroskop optik dan Struktur mikro

Pengujian *microstructure* dilakukan di laboratorium Universitas Buana Perjuangan (UBP) Karawang, dengan menggunakan *microscop* optik yang dihubungkan dengan *camera* beta ke perangkat komputer. Struktur mikro merupakan struktur yang bisa diamati melalui mikroskop baik itu mikroskop optik maupun mikroskop elektron. Beberapa informasi yang bisa diperoleh dari struktur mikro antara lain identifikasi masing-masing

fasa yang ada, presentase dan distribusi fasa, inklusi (pengotor), presipitat maupun ukuran butir. Contoh *microstructure* dari low-carbon steel dan high-strength low-alloy steel setelah proses rolling tersaji pada Gambar 3.

Proses pengujian diawali dengan melakukan *polishing* permukaan sample yang sudah dimounting pada resin. Setelah proses pemolesan dilakukan proses *etching* dengan menggunakan nital 5%. Proses pengujian *Microstructure* tersaji pada Gambar 4.



(a) low-carbon steel

(b) high-strength low-alloy steel

**Gambar 3.** *Microstructure* setelah proses rolling



**Gambar 4.** Pengujian *Microstructure* menggunakan mounting.

*Ferrite* merupakan larutan padat besi yang mengandung karbon atau satu atau lebih unsur paduan seperti silikon, kromium, mangan, dan nikel [ASM Vol.20]. Fasa *Ferrite* berwarna putih dan disebut juga fasa alpha ( $\alpha$ ). Fasa *Ferrite* mempunyai karakteristik yang lunak dan liat. Pada suhu ruang, kadar karbonnya 0,008%, sehingga dapat dianggap besi murni. Kadar maksimum karbon sebesar 0,025% pada suhu 723° C. *Ferrite* bersifat magnetik sampai suhu 768° C. Baja feritik sepenuhnya diperoleh hanya ketika kandungan karbonnya rendah. Fitur mikrostruktur yang paling jelas adalah batas butir ferit. Ferit adalah fase kekuatan rendah yang lunak. Jika ukuran butir ferit halus, daktilitas dan kemampuan bentuk yang baik diperoleh. Karena ferit memiliki struktur kristal *body-centered cubic* (bcc), baja feritik menunjukkan transisi dari perilaku ulet menjadi getas saat suhu menurun atau ketika laju regangan meningkat [19]. Dua jenis larutan padat memberikan karakteristik berbeda untuk ferit. Larutan padatan interstitial dari besi dan karbon merespon dengan cepat selama perlakuan panas, sedangkan larutan padatan substitusi berperilaku lamban selama perlakuan panas, seperti dalam homogenisasi.

Fasa austenite adalah campuran besi dan karbon yang terbentuk karena adanya pembekuan. Pada proses pendinginan selanjutnya austenite berubah menjadi ferrit dan pearlit dan sementite. Austenite juga merupakan fase dengan kekuatan rendah yang lunak. Sifat lunak dari fasa austenite karena memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) dan paduan austenitik tetap elastis terlepas dari suhu atau laju regangan kecuali perubahan fasa terjadi. Untuk memperoleh baja austenit sepenuhnya diperlukan komposisi kimia yang cermat dengan sejumlah besar elemen penstabil austenit — karbon, nitrogen, nikel, dan mangan — harus ada dibandingkan dengan elemen yang menstabilkan ferit. Beberapa contoh dari paduan besi austenitik adalah baja tahan karat austenitik dan baja mangan austenitik. Fitur mikrostruktur yang paling terlihat dari paduan fase-tunggal ini adalah batas butir austenit. Paduan-paduan ini juga mengandung kembar

anil dalam kondisi larutan anil yang ditempa [19] [20].

Fasa *pearlite* berwarna hitam yang merupakan campuran mekanis yang terdiri dari dua fasa, yaitu ferrit dengan kadar karbon 0,025% dan sementite dalam bentuk lamellar (lapisan pipih) dengan kadar karbon 6,67% yang berselang-seling rapat terletak bersebelahan. Pearlit merupakan struktur mikro dari reaksi eutektoid lamellar. Sifat *pearlite* adalah lebih keras dan lebih kuat dari pada *Ferrite* tetapi kurang liat dan tidak magnetis. Perlit merupakan campuran ferit dan sementit di mana dua fase terbentuk dari austenit dalam pola lamelar bergantian. Pembentukan perlit membutuhkan pendinginan yang relatif lambat pada daerah austenit dan tergantung pada komposisi baja. Bentuk perlit pada suhu di bawah suhu kritis lebih rendah dari baja yang bersangkutan dan dapat dibentuk secara isothermal atau dengan pendinginan terus menerus. Kenaikan kekerasan baja dapat ditingkatkan dengan menaikkan laju pendinginan tanpa pembentukan konstituen lainnya. Saat suhu reaksi isothermal menurun atau laju pendinginan meningkat, jarak antarlamin menurun. Kekuatan dan ketangguhan baja *pearlitic* meningkat seiring dengan penurunan jarak *interlamellar* [4][19][20].

*Bainit* merupakan fasa yang terjadi akibat transformasi pendinginan yang sangat cepat pada fasa austenite ke suhu antara 250°C-550°C dan ditahan pada suhu tersebut (isothermal). Seperti perlit, bainit merupakan komposit dari ferit dan sementit [19]. Tidak seperti perlit, ferit memiliki morfologi asikuler dan karbida adalah partikel diskrit. Karena perbedaan morfologis ini, bainit memiliki karakteristik properti yang jauh berbeda dari perlit. Secara umum, baja bainitik memiliki kekuatan tinggi ditambah dengan ketangguhan yang baik, sedangkan baja *pearlitic* memiliki kekuatan tinggi dengan ketangguhan yang buruk [19].

*Martensite* merupakan fasa dimana *ferrite* dan sementite bercampur, tetapi bukan dalam lamellar, melainkan jarum-jarum sementite. Fasa ini terbentuk dari *austenite* meta stabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat

tertentu. Terjadinya hanya presipitasi  $Fe_3C$  unsur paduan lainnya tetapi larut transformasi *isothermal* pada  $260^\circ C$  untuk membentuk dispersi karbida yang halus dalam metrik ferrit. Martensite bilah (*lath martensite*) terbentuk jika kadar C dalam baja sampai 0,6% sedangkan di atas 1 % C akan terbentuk *martensite* pelat (plate martensite). Perubahan dari tipe bilah ke pelat terjadi pada interval  $0,6\% < C < 1,08\%$ . Secara umum Sifat dari *martensite* adalah rapuh dan keras, kekerasan tergantung dari komposisi karbon. *Martensite* berbentuk seperti jarum. Contoh mikrostruktural (deteksi preferensial) dalam sampel baja stainless AISI 416 tersaji pada Gambar 5 [19][20].

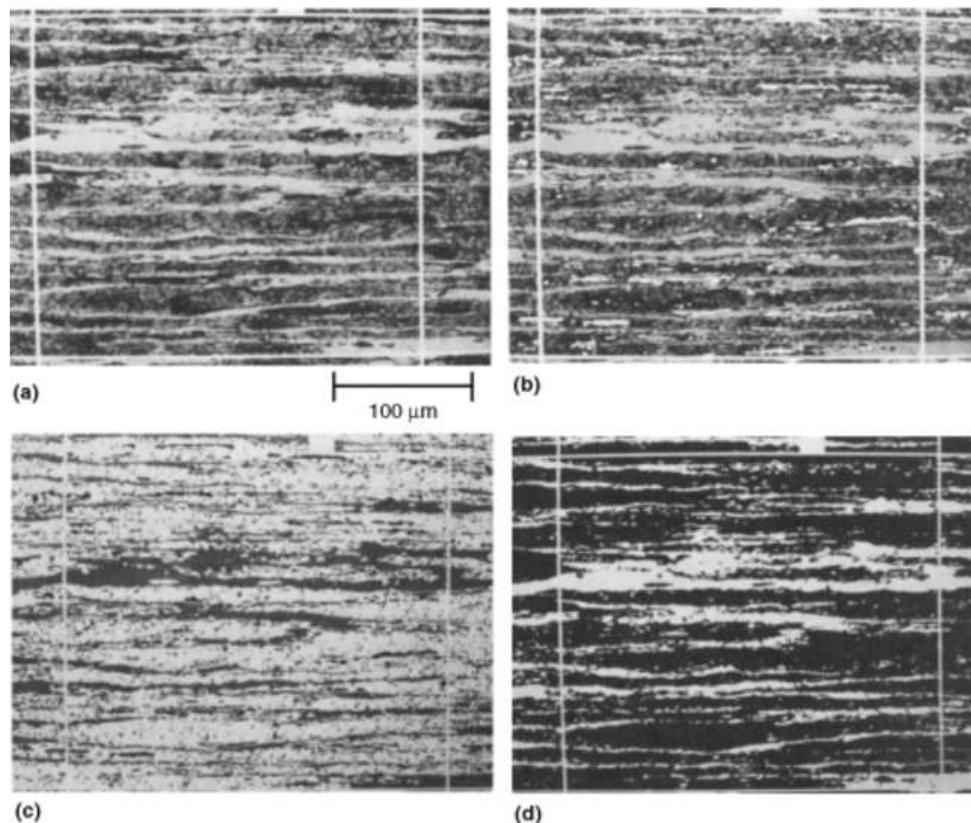
Karbida besi (sementite) merupakan baja paduan yang melebihi batas daya larut membentuk fasa kedua. Karbida besi mempunyai komposisi kimia  $Fe_3C$ . Dibandingkan dengan ferrit, karakteristik fasa sementite sangat keras. Senyawa karbida besi di dalam ferrit akan meningkatkan kekerasan baja, tetapi karakteristik dari karbida besi murni tidak

liat. Karbida ini tidak dapat menyesuaikan diri dengan adanya konsentrasi tegangan sehingga kurang kuat. Secara umum karakteristik dari karbida besi (sementite) adalah keras, rapuh dan magnetis [19][20]. Sifat keraas dan rapuh pada karbida besi (sementite) mirip dengan karakteristik *martensite*. Diagram fasa baja carbon tersaji pada Gambar 6 [19].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

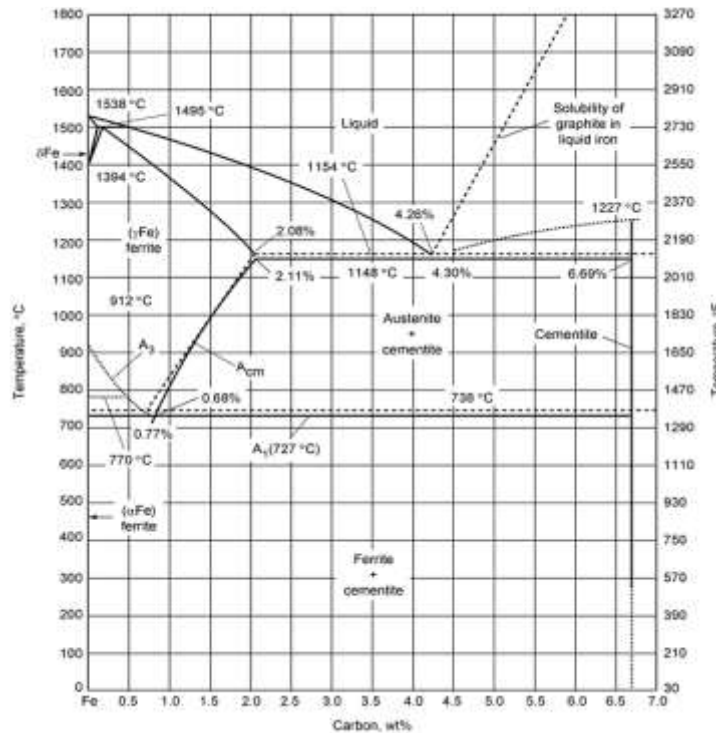
### Evaluasi Hasil *Bending*

Proses *bending omega clamp* menggunakan material 1.0 mm. Fokus pengamatan dilakukan pada pengamatan visual pada zona *bending* R 0.8 mm dan R 2.5 mm. Pada zona radius *bending* R 0.8 mm ditemukan adanya keretakan kecil disebagian besar alur *bending*. Keretakan terjadi pada luasan  $120^\circ$  dari arah gaya axial proses *bending*. Hal ini dapat dipahami karena daerah ini mendapatkan tegangan geser tertinggi dari gaya aksial yang diberikan dibandingkan daerah lainnya.



**Gambar 5.** Microstructure baja stainless AISI 416 - dietsa dengan reagen Vilella. (a) Gambar aktif (b) Mangnan sulfida (putih). (c) Martensit temper (putih). (d) Deteksi preferensi  $\delta$ -ferrit (putih)





Gambar 6. Diagram fasa baja carbon

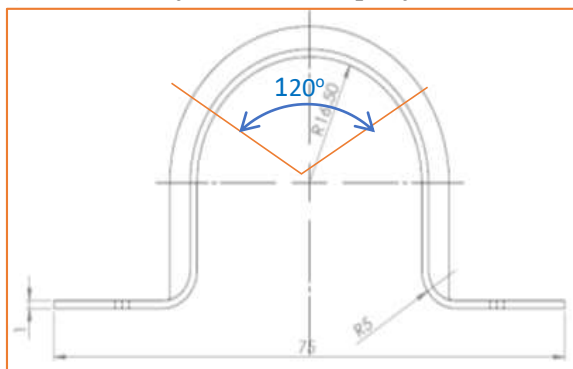
Tingginya tegangan geser pada daerah ini disebabkan oleh kecilnya radius pada zona *bending* tersebut. Kondisi ini sesuai dengan teori bahwa tegangan geser berbanding terbalik dengan luas zona. Artinya semakin kecil radius *bending* akan semakin kecil pulan zona *bending*nya dan akan semakin besar tegangan geser yang terjadi pada lokasi tersebut. Sementara pada R 2.5 mm tidak ditemukan adanya keretakan pada semua sisi *bending*. Keretakan pada zona *bending* R 0.8 mm tersaji pada Gambar 7.

**Analisis Microstructure**

Analisis regangan transversal pada zona *bending* lembaran baja SPCC-SD dipelajari

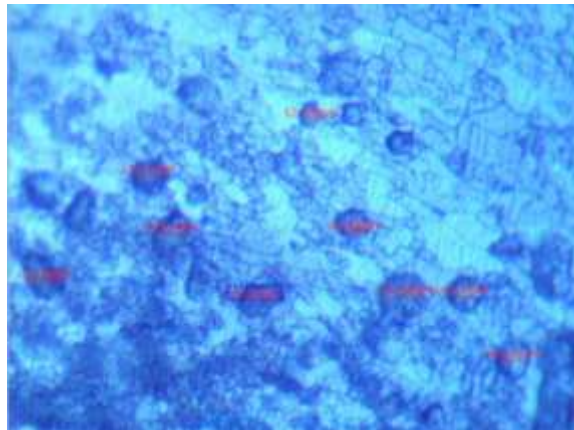
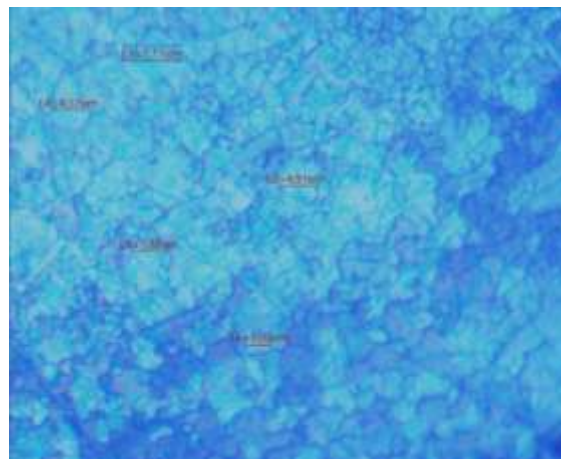
berdasarkan pada struktur mikro dari bahan dan pengaruh radius pada proses *bending* pada struktur mikro lembaran baja. Hasil pengamatan *microstructure* pada kedua area tersebut tersaji pada 8.

Gambar 8.a menunjukkan data *microstructure* pada zona R 0.8 mm yang mengalami keretakan proses *bending*. Dari gambar tersebut terlihat adanya perubahan butiran *pearlite* menjadi bentuk bulat hitam karena adanya gaya aksial yang lebih tinggi tepat pada radius *bending* R 0.8 mm. Perubahan butiran *pearlite* menjadi butiran lebih kecil mengindikasikan adanya peningkatan kekerasan dan ketangguhan pada daerah tersebut.



Gambar 7. Lokasi retak pada zona radius *bending* R 0.8 mm



(a) *Microstructure* pada zona R 0.8 mm(b) *Microstructure* pada zona R 2.5 mm**Gambar 8.** *Microstruture* baja carbon rendah dengan *etching* nital 5% perbesaran 500 x

Fasa ferite pada zona R 0.8 mm juga terlihat lebih sedikit. Gambar 8.b menunjukkan data *microstructure* pada zona R 2.5 mm. Pada zona *bending* R 2.5 mm tidak mengalami keretakan proses *bending*. Dari gambar tersebut terlihat adanya perubahan butiran *pearlite* yang tidak terlalu signifikan. *Pearlite* yang berwarna hitam hanya sedikit terkontrastari pada sekitar zona *bending* R 2.5 mm. Kondisi ini terlihat berbeda jika dibandingkan dengan zona *bending* R 0.8 mm. Meskipun mendapatkan gaya aksial pada proses *bending*nya tetapi masih lebih rendah jika dibandingkan dengan zona radius R 0.8 mm. Terjadi pergeseran butiran *pearlite* juga mengindikasikan adanya sedikit peningkatan kekerasan dan ketangguhan pada daerah tersebut. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa agar tidak terjadi keretakan, minimum radius *bending* yang digunakan untuk ketebalan material 1.0 mm adalah radius R 1.0 mm [18].

## KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, sampel baja *SPCC-SD* dengan ketebalan 1.0 mm digunakan sebagai objek penelitian untuk menginvestigasi pengaruh radius *bending* terhadap perubahan *microstructure* pada lokasi kegagalan retak di zona *bending* R 0.8 mm. Semakin kecil radius *bending* maka tegangan geser/lateral yang dialami sebagai akibat gaya aksial yang ditimbulkan pada zona *bending* akan semakin tinggi. Hal ini dikonfirmasi pada hasil *bending* yang mengalami keretakan pada zona *bending* R 0.8 mm sedangkan pada zona *bending* R 2.5 mm tidak terjadi keretakan. Pengaruh penggunaan radius *bending* terhadap perubahan *microstructure* dikonfirmasi bahwa semakin kecil radius *bending* akan membentuk butiran *pearlite* yang signifikan dimana pada pengamatan *microstructure* pada zona radius R 0.8 mm terjadi pembentukan butiran *pearlite*

yang lebih halus, sementara pada zona *bending* R 2.5 mm hanya terjadi pergesetan letak *pearlite* di sekitar pusat *bending*. Penelitian selanjutnya akan dilakukan dengan menganalisis kekuatan tarik dan kekerasan pada zona *bending* R 0.8 mm dan R 2.5 mm.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih peneliti sampaikan kepada **Universitas Buana Perjuangan Karawang** yang telah memberikan fasilitas pengujian *microstructure*. Terima kasih juga peneliti sampaikan kepada **P.T. Isaka Alindo Nusantara** yang telah memberikan kesempatan dalam pengambilan data dan sample pada proses *bending*.

#### REFERENSI

- [1] Z. C. Lin and D. A. Y. Chang, "Selection of sheet metal bending machines by the PRISM-inductive learning method," *J. Intell. Manuf.*, vol. 7, no. 4, pp. 341–349, 1996.
- [2] V. Miguel, J. Coello, A. Calatayud, M. C. Manjabacas, A. Martínez, and C. Ferrer, "An approach to evaluation of sheet bending force under successive multiaxial stress condition," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 3, pp. 1588–1596, 2009.
- [3] Z. Sun and L. Lang, "Effect of stress distribution on springback in hydroforming process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 5–8, pp. 2773–2782, 2017.
- [4] S. L. Semiatin, *Forming and Forging*, Fourth. ASM International, 1996.
- [5] F. Vollertsen, A. Sprenger, J. Kraus, and H. Arnet, "Extrusion, channel, and profile bending: A review," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 87, no. 1–3, pp. 1–27, 1999.
- [6] S. K. Ghosh, "Handbook of metal forming," *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 16, no. 3. pp. 353–356, 1988.
- [7] N. P. Padghan, P. D. Deshpande, and C. N. Sakhale, "Force Analysis of Metal Sheet in Bending Operation on Sheet Bending Machine," vol. 4, no. 01, pp. 267–271, 2015.
- [8] M. Fahmi, *Metallurgy II. Metallurgy*. Surabaya: Metallurgy Laboratory Mechanical Engineering Dep ITS-Surabaya, 2008.
- [9] S. Huang, C. F. He, and Y. X. Zhao, "Microstructure-Based RVE Approach for Stretch-Bending of Dual-Phase Steels," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 25, no. 3, pp. 966–976, 2016.
- [10] X. Y. Liu, L. W. Lu, K. Sheng, and T. Zhou, "Microstructure and Texture Evolution During the Direct Extrusion and Bending–Shear Deformation of AZ31 Magnesium Alloy," *Acta Metall. Sin. (English Lett.)*, vol. 32, no. 6, pp. 710–718, 2019.
- [11] D. Sun, L. Y. Yang, and C. J. Su, "Research on roll forming based on bending angle distribution function," *Suxing Gongcheng Xuebao/Journal Plast. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 107–112, 2019.
- [12] S. Mark, *JIS G 3141 Cold-reduced carbon steel sheets and strips*. 2005.
- [13] S. T. Pasaribu, S. Sukarman, A. D. Shieddieque, and A. Abdulah, "Optimasi Parameter Proses Resistance Spot Welding pada Pengabungan Beda Material SPCC," 2019, no. September.
- [14] W. Stichel, *Handbook of comparative world steel standards; USA-United Kingdom-Germany-France-Russia-Japan-Canada-Australia-International*. Hrsg.: Albert & Melilli, 552 Seiten. *ASTM Data Series DS 67, American Society for Testing and Materials, PA, USA 1996, £ 195.00*, vol. 48, no. 6. 1997.
- [15] T. Altan, *Metal Forming Handbook*, no. 5. Springer Verlag Berlin, 1998.
- [16] Vander Voort and W. Baldwin, "Metallography and Microstructures Handbook," *ASM Int.*, vol. 9, p. 2733, 2004.
- [17] R. LeSar and R. LeSar, "Materials selection and design," *Introd. to Comput. Mater. Sci.*, pp. 269–278, 2013.