

PENGARUH ANNEALING DAN SKIN PAS ROLLING TERHADAP SIFAT MEKANIK PRODUK *ELECTROLYTIC CLEANING LINE (ECL)*, *BATCH TEMPERATE ROLL (BTR)*, DAN *COLD ROOL FINISHED (CRF)* PADA PROSES PEMBUATAN LEMBARAN BAJA AL KILLED STANDAR

Budi Sukarno

Program Studi Teknik Mesin FTI-ISTN Jakarta

E-mail: budi_sukarno@yahoo.com

Abstrak: Tahapan utama produk canai dingin adalah mengurangi ketebalan lembaran baja, kemudian melakukan perlakuan panas sistem tungku dalam serangkaian proses melalui 3 produk *line* berupa: produk *line* setelah ECL, produk *line* setelah BTR (*annealing*), dan produk *line* setelah akhir pengerolan CRF (*Skin Pas Rolling*). Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh *annealing* dan *skin pas rolling* terhadap sifat mekanik produk *Electrolytic Cleaning Line (ECL)*, *Batch Temperate Roll (BTR)*, dan *Cold Rool Finished (CRF)* pada proses pembuatan lembaran baja *al killed* standar. Pemilihan bahan baku pada penelitian ini adalah lembaran baja mampu bentuk G3141-SPCQ. Metodologi yang digunakan adalah uji komposisi kimia dan uji mekanis. Uji mekanis meliputi uji kedalaman tekan erichsen, uji kekerasan dan uji tarik. Dari uji tarik didapat nilai kekuatan luluh, kekuatan tarik, perpanjangan, koefisien pengerasan regangan, regangan dan regangan maksimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh proses perlakuan panas terhadap sifat mekanis adalah menghilangkan kerapuhan pada ECL, meningkatkan kedalaman tekan erichsen, serta perpanjangan dan menurunkan kekerasan. Sedangkan pengaruh proses setelah akhir pengerolan terhadap sifat mekanis adalah meningkatkan kekerasan, kekuatan tarik, serta koefisien pengerasan regangan dan menurunkan kedalaman tekan erichsen, kekuatan luluh, perpanjangan dan regangan maksimum.

Kata kunci: lembaran baja mampu bentuk, ecl, perlakuan panas, btr, proses setelah akhir pengerolan, crf.

Abstract: *Principal stages of cold canai product is reducing the thickness of steel sheet, and then performed the annealing system in the process in a series through 3 product lines as follow: line product after ECL, process line after BTR (annealing), and product line after CRF (skin pas rolling). The objective of this research is to define the influence of the annealing skin pas rolling toward the mechanical properties product line ECL, BTR, and CRF on the process of al killed steel sheet. The selected material is Al killed steel sheet G3141-SPCQ with using the methodology such as chemical composition and mechanical testing. Mechanical testing includes test of depth erichsen, hardness and strength. The result of strength test is yield strength, tensile strength, elongation, strain hardening coefficient and ultimate strain value. The result of the research showed the effect of annealing process to mechanical properties removes brittleness in ECL, increase the depth press erichsen and elongation as well as to reduce the hardness. While the effect of skin pass rolling process are increase the value of hardness, tensile strength, and strain hardening coefficient and decrease the depth press erichsen, yield strength, elongation and ultimate strain.*

Key words: *al killed steel sheet, ecl, annealing, btr, skin pas rolling, crf.*

PENDAHULUAN

Latar belakang penelitian ini adalah dengan adanya sifat mekanik suatu bahan yaitu sifat yang menyatakan bagaimana bahan itu bersikap terhadap gaya atau tekanan yang bekerja padanya. Sifat mekanis bahan yang paling umum di antaranya adalah uji kedalaman tekan *erichsen*, uji kekerasan dan uji tarik. Sifat mekanis suatu bahan membahas pula tentang bagaimana bahan dapat diperlakukan agar mudah dibentuk. Seperti contoh, suatu bahan logam yang akan dipakai sebagai bahan dasar yang harus ditempa. Dalam praktek ternyata adanya perubahan struktur kecilpun akan berakibat besar terhadap sifat mekanis bahan (*Hastono Rekso tenoyo, 1993*).

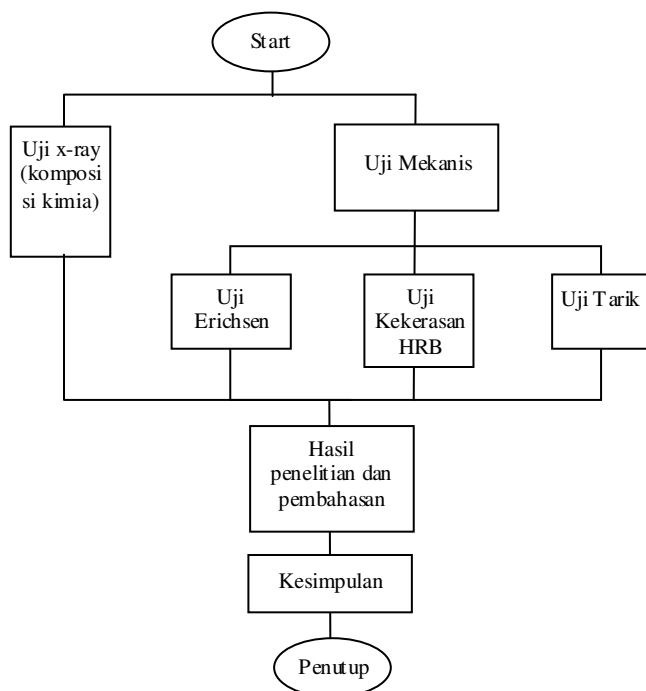
Pengujian mekanik dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik suatu bahan, yaitu kelakuan atau

respons material terhadap pembebanan mekanik (*Mardjono Siswosuwarno, 1994*). Sifat-sifat khas bahan industri perlu dikenal secara baik karena bahan tersebut dipergunakan untuk berbagai macam keperluan dalam berbagai keadaan. Sifat-sifat bahan yang diinginkan sangat banyak, termasuk: sifat-sifat mekanik (*Shinroku Saito, 1992*).

Tujuan penelitian ini untuk: (1) membahas sifat mekanik yang meliputi; uji kedalaman tekan erichsen, uji kekerasan dan uji tarik yaitu tegangan luluh, tegangan maksimal, regangan, regangan maksimal, dan koefisien pengerasan regangan (*n*). (2) melakukan berbagai pengujian; (a) uji x-ray komposisi kimia dan uji sifat mekanis yang meliputi uji erichsen untuk mengetahui kedalaman tekan erichsen serta (b) uji tarik untuk mengetahui tegangan luluh, tegangan maksimal,

termasuk koefisien pengerasan sistem tungku regangan lembaran baja mampu bentuk *all killed steel* standar. (3) mengetahui pengaruh *annealing* dan *skin pas rolling* terhadap sifat mekanik produk line ECL, BTR, dan CRF pada proses pembuatan lembaran baja *Al killed* standar.

Ruang lingkup penelitian ini adalah lembaran baja mampu bentuk *Al killed steel* G3141-SPCQ canai dingin sistem tungku/batch anil berketebalan 0.35 mm dengan kandungan karbon ekuivalen sebesar 0,039 – 0,062. Penelitian ini meliputi berbagai pengujian yakni uji komposisi kimia, uji kedalaman tekan erichsen, uji kekerasan (*hardness*) dan uji tarik seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian
Sumber: Hastono Reksotenoyo

PEMBAHASAN

Produk Dan Proses Pembuatan Baja Lembaran Canai Dingin

Pabrik canai dingin merupakan industri hilir dari *hot strip mill*. Tahapan pokok pembuatan produk ini adalah menipiskan (*reduction*) tebal lembaran baja dan kemudian dilakukan proses perlakuan panas atau *annealing*. Untuk menunjang agar hasil kedua proses tersebut berjalan baik dan sempurna, maka diperlukan proses-proses lainnya yaitu meliputi: pembersih karat (*continuous pickling line*), penipisan secara dingin (*tandem cold mill/cold rolling*), pembersihan secara ionisasi (*electrolytic cleaning line*), perlakuan panas regangan maksimal sist (*batch annealing furnace*),

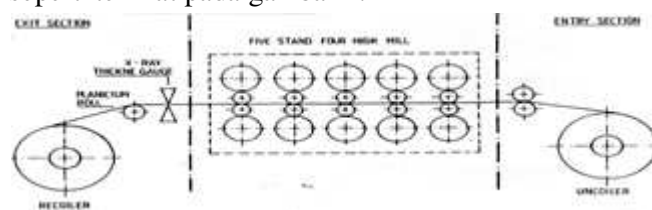
perbaikan sifat dan permukaan (*tempering*) pada produk *line CRF (Cold Roll Finished)*. Semua proses tersebut disesuaikan dengan ukuran yang diinginkan berdasarkan standar pesanan, baru di *packing*. (Hastono Reksotenoyo, 1993).

Continuous Pickling Line

Fungsi *continuous pickling line* adalah menghilangkan lapisan oksida besi dari permukaan *hot rolled strip* sebelum diproses canai dingin. Proses ini dilakukan dengan melewati *hot rolled strip* ke dalam tangki asam. Untuk membuat pencucian pada tangki asam menjadi efisien dan mempermudah keluar masuknya lembaran baja (*strip*) pada tangki asam yang panjang diperlukan proses yang terus menerus. Untuk itu dibutuhkan mesin las yang menyambung tiap coil yang akan diproses. Hasil pengelasan yang diinginkan harus kuat dan yang terpenting perubahan struktur logam setelah pengelasan diusahakan sekecil mungkin.

Tandem Cold Mill

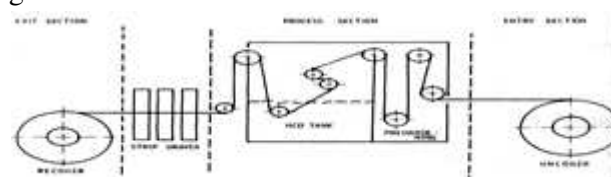
Unit ini dimaksudkan untuk penipisan secara dingin seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 2. Tandem Cold Mill
Sumber: Hastono Reksotenoyo

Electrolytic Cleaning Line

Pada reduksi dingin digunakan pelumas untuk mengurangi nilai pada *roll* dan *strip*. Sedangkan pada proses *annealing* pelumas dan kotoran pada strip harus dibersihkan untuk menghasilkan permukaan tanpa cacat. Cacat permukaan ini sangat tidak diminati calon pembeli besi lembaran canai dingin. Oleh karena sulit membersihkan minyak dan pelumas dari permukaan strip dengan bantuan air saja, maka diperlukan cara yang lebih ampuh, yaitu dengan arus listrik kerapatan tinggi. Sistem *electrolytic cleaning line* ini seperti terlihat pada gambar 3.

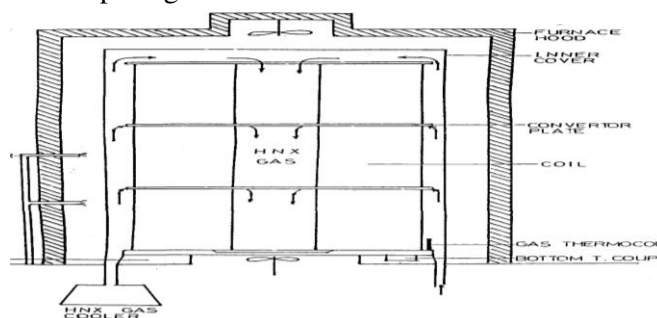


Gambar 3. Sistem electrolytic cleaning line
Sumber: Hastono Reksotenoyo

Setelah melewati proses *electrolytic cleaning line (ECL)*, *coil* dapat diproses lebih lanjut di dalam *Batch Annealing Furnace (BAF)* atau dikirim langsung ke *recoiling line*.

Batch Annealing Furnace

Kegunaan dari *Batch Annealing Furnace* adalah untuk memanaskan *strip* yang sudah dicanai dingin agar butir kristal pada *strip* mengalami proses rekristalisasi. Setelah reduksi dingin dan setelah melewati *electrolytic cleaning line*, *coil* dipanaskan dengan waktu dan suhu tertentu untuk mendapatkan struktur mikro yang sesuai dengan kebutuhan. Oleh karena proses *annealing* ini merubah struktur mikro dari *strip*, maka menjadikan unit ini merupakan yang penting setelah unit *Tandem Cold Mill (TCM)*. Akibat dari *annealing* ini adalah *strip* mempunyai karakteristik, *ductility*, *yield point*, perpanjangan (*elongation*), kehalusan (*softness*), serta kemampuan bentuk (*draw ability*) yang dapat disesuaikan dengan standard dan pesanan lembaran baja canai dingin. Rangkaian *batch annealing furnace* terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. *Batch Annealing Furnace*

Sumber: Hastono Reksotenoyo

Tempering

Proses *Tempering* adalah proses perbaikan sifat dan permukaan. Untuk tercapainya tujuan ini, setelah proses *annealing*, *coil* dipindahkan dengan *rail coil* dan dimasukkan ke *coil* ruangan penyimpanan (*storage plant, post cooling stand / dehumidification plant*) agar menjaga uap air di udara bebas tidak mengganggu dan menimbulkan karat pada *coil*. Ruang ini hanya dibuka ketika baik *rail coil* keluar masuk untuk mengangkat *coil*. Agar dapat mengusir udara luar yang kelembabannya tinggi, maka ruangan ini mempunyai tekanan udara yang lebih tinggi dari sekitarnya. Fungsi ruangan ini selain sebagai dapat menyimpan juga sebagai tempat menunggu *coil* pendingin dari suhu sekitar 140°C. Dari ruangan ini pula *coil* baru dilakukan canai dingin akhir (*cold roll finished*).

Hasil Uji Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan X-ray. Prosentase carbon *equivalent* CE dapat dihitung dengan persamaan $CE = \%C + 0,3\% (Si + P)$ (Hastono Reksotenoyo, 1992). Hasil uji komposisi kimia terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia

Kandungan unsur (%)	No Sample / No Coil			
	1	2	5	7
	53706	53873	54142	54143
C	0,039	0,043	0,053	0,060
Ci	Trace	Trace	Trace	Trace
Mn	0,231	0,240	0,225	0,325
P	0,007	0,006	0,005	0,005
Si	0,007	0,006	0,006	0,007
Cu	0,019	0,013	0,014	0,022
Ni	0,015	0,017	0,018	0,019
Cr	0,015	0,070	0,005	0,012
V	0,002	0,004	0,003	0,004
Al	0,050	0,034	0,037	0,045
CE	0,039	0,043	0,058	0,062

Sumber: Hasil penelitian

Hasil Uji Erichsen

Pengujian *erichsen* ini untuk mengetahui kemampuan bahan dalam proses *stretching*. Dalam pengujian ini kedalaman penekanan pada saat robek adalah indikasi kemampuan *stretching* bahan. Kriteria pengujian *erichsen* adalah mengukur kedalaman tekan yang dihasilkan dari besar gaya axial (Goerge E Dicter, Sriati Djaprie, 1998). Diameter bola tekan pada uji kedalaman tekan *erichsen* penelitian ini 10 mm. Kedalaman tekan *erichsen* h_{er} pada penelitian ini didapat:

$$h_{er\ ECL} = \frac{5,3+7,4+6,3+8,0}{4} = 6,75$$

$$h_{er\ BTR} = \frac{10,7+10,3+10,9+10,8}{4} = 10,67$$

$$h_{er\ CRF} = \frac{10,4+10,3+10,3+10,2}{4} = 10,3$$

Hasil Uji Kekerasan

Maksud uji kekerasan adalah untuk mengetahui ketahanan material terhadap deformasi plastis. Uji kekerasan ini menggunakan *hardness spec 30 T* yang dikonversikan dengan standar *rock well* skala B (ASTM.140).

Spesifikasi uji kekerasan tipe Ht 2003/220V/0.31. A.50 Hz dengan Skala: *Rock well superficial N* dan T. Nilai kekerasan (HRB) pada penelitian ini:

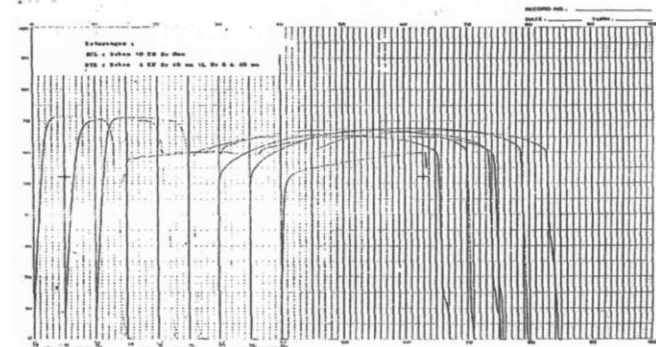
$$HRB_{ECL} = \frac{95+95+97+97}{4} = 96$$

$$HRB_{BTR} = \frac{42+49+40+47}{4} = 44,5$$

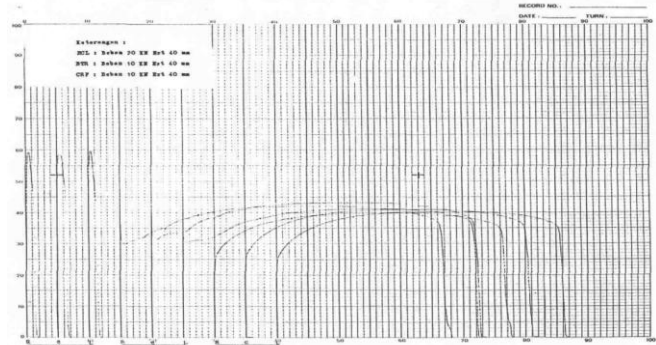
$$HRB_{CRF} = \frac{47+53+50+55}{4} = 51,52$$

Hasil Uji Tarik

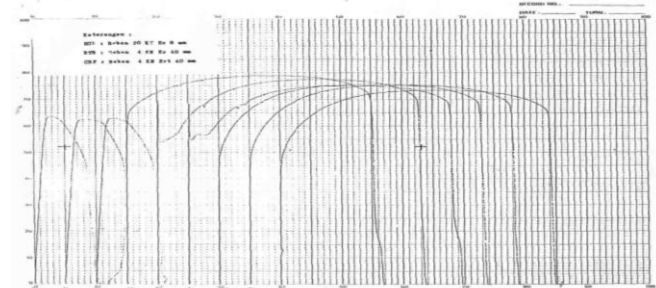
Maksud uji tarik adalah untuk mengetahui sifat mekanik material (Mardjono Siswosuwarno,1994). Spesifikasi uji mesin tarik dengan tipe RKM 200.



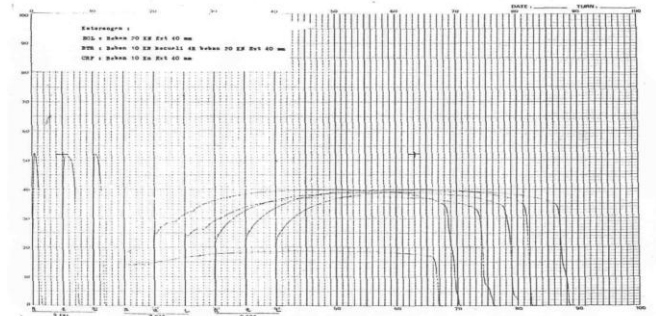
Grafik 1a. Hubungan Tegangan Tarik vs Regangan Sampel 1



Grafik 1b. Hubungan Tegangan Tarik vs Regangan Sampel 2



Grafik 1c. Hubungan Tegangan Tarik vs Regangan Sampel 3



Grafik 1d. Hubungan Tegangan Tarik vs Regangan Sampel 4
Gambar 5. Grafik Hubungan Tegangan Tarik vs Regangan Sampel

Hubungan tegangan tarik vs regangan sampel 1, 2, 3 dan 4 ditunjukkan pada Grafik 1a, 1b, 1c dan 1d sedang data uji sifat mekanis sampel 1, 2, 3 dan 4 ditunjukkan

pada Tabel 2a, 2b, 2c dan 2d.

Tabel 2.a. Data uji sifat mekanis Sampel 1

Tabel 2.1. Data uji sifat mekanis sampel 1																																			
PROD LINE	QUAL CODE	HARDNESS	SPEC LOC	HARDNESS TEST			HRB	ERICHSEN	ORG (mm) GADE	ORG WIDTH (mm)	MET	YIELD LOAD (N)	YS ACT (N/mm ²)	EL% G TEST (mm)	YS TS EL	n- Val																			
				1	2	3											AVG	AVG	AVG	AREA (mm ²)	P10	ULTIM LOAD (N)	TS ACT (N/mm ²)	TS (mm)	BK EU (%)	n Eu									
ECL	CQ	30T	R	80	80	81	80	96	R54	0,35	25,06	7090	808	4	0,99																				
				80	80	81	80	96									8,77	1151	815	50	2	A													
				80	80	81	80	96															0,95	25,09	6000	774	6	0,96							
				80	80	81	80	96																					8,78	7063	804	50	3	A	
79	80	80	80	95	R52	5,3	0,35	25,12	7030	799	6	0,96																							
79	80	80	80	95										R52	5,3	8,79	7114	809	50	3	A														
BTR	CQ	30T	R	43	44	45	44	42	108	0,35	25,15	2	2668									303	90	1,02	0,243										
				43	44	45	44	42						8,80	2444	1625	298	300	50	46	A					26,3	0,229								
				45	45	44	45	43																				0,35	25,14	2	3004	314	90	1,12	0,226
				45	45	44	45	43																											
43	43	43	43	40	107	107	0,35	25,13	2	2926	333	306	90	1,12	0,228	25,7																			
43	43	43	43	40													107	107	8,79	2452	2620	298	50	45	A	25,500									
CRF	CQ	30T	R	47	48	47	47	48	103	0,35	25,09	2168	247	80	0,81	0,177																			
				47	48	47	47	48									8,78	2596	2668	204	247	50	40	A	19,3	0,178									
				48	47	49	48	48																			0,35	25,09	2168	247	78	0,80	0,180		
				48	47	49	48	48																										8,78	2630
47	47	47	47	45	104	104	0,35	25,07	2160	246	326	78	0,80	0,177	19,4																				
47	47	47	47	45												104	104	8,78	2630	2710	309	50	39	A	19,7										

Sumber : Penelitian Mandiri

Tabel 2.b. Data uji sifat mekanis Sampel 2

PROD LINE	QUAL CODE	HARDNESS SPEC	SPEC LOC	HARDNESS TEST				HRB	ERICHSEN	ORG (mm) GADE	ORG WIDTH (mm)	MET	YIELD LOAD (N)	YS ACT (N/mm ²)	EL (%)	YS TS	n-Val	n
				1	2	3	AVG											
ECL	CQ	30T	R	80	80	81	80	96	7.5	0.65	25.12		12750	781	4	1		
				16.33		12750	781	50	2	B								
				0.65	25.11		12600	766	4	1								
				16.32		12500	766	50	3	B								
BTR	CQ	30T	R	48	49	48	48	48	10.3	0.38	25.13		2628	275	74	0.38	0.165	
				9.55		3092	3157	330	288	50	37	A	17.9	0.026				
				0.37	25.13		2788	300	76	0.90	0.207							
				9.30		2952	399	333	50	38	A	23.0						
CRF	CQ	30T	R	52	51	52	51.7	53	10.3	0.35	25.05		2092	238	78	0.69	0.187	
				8.77		2930	3034	346	235	50	39	A	20.6	0.185				
				0.35	25.05		2080	237	76	0.69	0.183							
				8.77		2924	3018	344	50	39	A	20.0						

Sumber: Penelitian Mandiri

Tabel 2.d. Data Uji Sifat Mekanis Sampel 4

PROD LINE	QUAL CODE	HARDNESS SPEC	SPEC LOC	HARDNESS TEST				HRB	ERICHSEN	ORG (mm) GADE	ORG WIDTH (mm)	MET	YIELD LOAD (N)	YS ACT (N/mm ²)	EL (%)	YS TS	n-Val	n
				1	2	3	AVG											
ECL	CQ	30T	R	82	81	82	81.7	98	6.7	0.56	25.08				4			
				14.04		11860	945	50	2	A								
				8.56		25.09		4										
				14.05		11730	835	50	2	A								
BTR	CQ	30T	R	42	41	42	41.7	38	11.3	0.56	25.09		2	3621	258	94	0.86	0.231
				14.05		3920	4200	299	255	50	47	A	25.9	0.233				
				0.56	25.09		2	3864	275	94	0.59	0.234						
				14.05		1410	4308	307	50	47	A	26.3						
CRF	CQ	30T	R	46	47	47	46.7	45	11.0	0.49	25.06		2	2740	223	86	0.69	0.790
				12.28		3830	3971	323	225	50	43	A	20.9	0.202				
				0.49	25.09		2	2820	229	84	0.69	0.188						
				12.29		3950	4091	333	50	42	A	2.7						

Sumber : Penelitian Mandiri

Tabel 2.C. Data Uji Sifat Mekanis Sampel 3

PROD LINE	QUAL CODE	HARDNESS SPEC	SPEC LOC	HARDNESS TEST				HRB	ERICHSEN	ORG (mm) GADE	ORG WIDTH (mm)	MET	YIELD LOAD (N)	YS ACT (N/mm ²)	EL (%)	YS TS	n-Val	n
				1	2	3	AVG											
ECL	CQ	30T	R	80	80	80	80	95	7.5	0.55	25.10				4			
				13.80		10600	761	50	2	B								
				0.55	25.07			4										
				13.79		10320	748	50	2	B								
BTR	CQ	30T	R	41	41	40	40.7	37	11.7	0.53	25.08		2	3420	257	92	0.91	0.244
				13.29		3440	3730	281	211	50	46	A	27.6	0.228				
				0.54	25.09		2	2692	191	90	0.65	0.219						
				13.55		3755	3892	291	50	45	A	24.5						
CRF	CQ	30T	R	45	45	45	45.3	43	11.0	0.50	25.08		2	2450	195	92	0.63	0.197
				12.54		3735	3891	310	199	50	46	A	21.7	0.194				
				0.50	25.06		2	2550	203	84	0.64	0.190						
				12.53		3840	3994	318	50	42	A	20.9						

Sumber : Penelitian Mandiri

Hubungan Tegangan Teknik (σ) vs Regangan Teknik (ϵ)

Khusus untuk tidak menunjukkan *yielding* yang jelas maka kekuatan luluh ditentukan dengan metode *offset* $\sigma_{0.5}$ yang artinya tegangan pada regangan 0,5% (Mardjono Siswosuwarno,1985). Dalam penelitian ini kekuatan luluh ditentukan dengan metode *offset* $\sigma_{0.5}$.

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_p} = \frac{P_u}{A_o} = \frac{F_{maks}}{A_o} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_o} \quad (2)$$

$$El = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (3)$$

Dimana:

σ_u = tegangan *ultimate/max (strength actual/ ultimate strength (N/mm²))*

$F_u = P_u$ = gaya *ultimate/maksimal (ultimated load) (N)*

σ_y = tegangan yield / kekuatan luluh (N/mm²)

F_y = gaya yield (yield load) (N)

El = perpanjangan (elongation) (%)

l_f, l_0 = panjang akhir, panjang awal (mm)

A_0 = area/luas penampang melintang sampel mula-mula (mm²)

A_f = area/luas penampang melintang akhir (mm²)

Hubungan Tegangan Sebenarnya (σ_s) – Regangan Sebenarnya (ϵ_s) (Hubungan true stress-true strain) (Cina Steel Corporation, PT Cold Rolling Mill Indonesia Utama)

$$A_0 \cdot L_0 = A_1 \cdot A_i \quad (4)$$

$$\sigma_s = \sigma(1 + e) \quad (5)$$

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0}{L_0} + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (6)$$

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (7)$$

$$\epsilon = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (8)$$

Dimana:

A_0 = luas (area) penampang mula-mula (mm^2)

L_0 = panjang mula (mm)

A_i = luas penampang sesaat (mm^2)

L_i = Tegangan sebenarnya (N/mm^2)

τ = Tegangan teknis (N/mm^2)

E = regangan teknis (%)

ϵ = regangan sebenarnya (true strain) (%)

ϵ_u = regangan maksimum (%)

ΔL = pertambahan panjang (m)

L = panjang mula-mula (m)

ΔL = pertambahan panjang (m)

Hubungan Elastisitas, Tegangan dan Regangan (<http://bebas.vlsm.org/v12/sponsor/sponsorpandumpin/g/proweda/fisika/fisika.htm>)

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{dan} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

dimana:

$$\text{sehingga} \quad E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{FL}{A\Delta L} \Leftrightarrow \Delta AL = \frac{FL}{EA}$$

τ = Tegangan teknis (N/mm^2)

F = gaya tarik (N)

A = luas penampang (mm^2)

ϵ = regangan sebenarnya (true strain) (%)

ΔL = pertambahan panjang (mm^2)

L = panjang mula-mula (m)

E = modulus Young (N/m^2 atau Pa)

Koefisien Pengerasan Regangan/Koefisien Strain Hardening (n)

Harga strain hardening koefisien dapat diukur melalui pengujian dengan daerah pengukuran yang teliti, terletak antara σ_y dan σ_u dimana σ_y tegangan yield atau tegangan luluh dan σ_u adalah tegangan ultimate atau tegangan maksimal. Secara matematis kurva antara σ_y dan σ_u dapat didekati dengan persamaan $Y = ax^n$ dengan harga n berkisar antara 0-1 sehingga bentuk persamaannya dapat dituliskan sebagai: $\sigma = K \epsilon^n$. Dengan demikian diperoleh besarnya regangan sebenarnya pada saat beban tarik maksimum, yaitu:

$$\epsilon_u \approx n$$

Arti fisik dari persamaan tersebut adalah bahwa logam yang mempunyai harga n yang tinggi baru akan mengalami "necking" setelah mencapai harga regangan yang besar. (Mardjono Siswosuwarno, 1991)

Persamaan ini disebut flow stress (tegangan alir) yang memperlihatkan kenaikan kekuatan akibat deformasi plastis. Bila persamaan tersebut dinyatakan dalam skala log σ vs log ϵ maka kemiringannya akan menunjukkan angka n.

Dari persamaan tersebut didapat persamaan baru sebagai berikut: $n = \frac{d \log \sigma}{d \log \epsilon}$ (Lawrence H. Van Vlack, 1991).

Prosedur Menentukan Nilai Koefisien Pengerasan Regangan (strain hardening) n dalam penelitian

Prosedur untuk mengukur harga/nilai (n value) dalam penelitian berdasarkan tabel standarisasi ASTM E 646-78 yang menunjukkan korelasi P_0/P_{10} , ϵ_u dan n. Tabel standarisasi ASTM 648-78 ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3. Standarisasi Ration Beban Pu/P10 untuk n dan EU (ASTM E 646-78)

Pu/P10	n	EU %	Pu/P10	n	EU %	Pu/P10	n	EU %	Pu/P10	n	EU %
1.001	0.109	11.5	1.039	0.193	21.3	1.076	0.236	26.6	1.114	0.271	1.3
1.002	0.115	12.2	1.040	0.194	21.4	1.077	0.237	26.7	1.115	0.272	31.4
1.003	0.120	12.8	1.041	0.195	21.6	1.078	0.238	26.8	1.116	0.273	31.6
1.004	0.124	13.2	1.042	0.197	21.7	1.079	0.239	27.0	1.117	0.274	31.8
1.005	0.128	13.8	1.043	0.198	21.9	1.080	0.24	27.1	1.118	0.275	31.7
1.006	0.131	14.0	1.044	0.199	22.1	1.081	0.241	27.3	1.119	0.276	31.8
1.007	0.134	14.3	1.045	0.201	22.2	1.082	0.242	27.4	1.120	0.276	31.9
1.008	0.137	14.7	1.046	0.202	22.4	1.083	0.243	27.6	1.121	0.277	32.0
1.009	0.139	15.0	1.047	0.203	22.5	1.084	0.244	27.8	1.122	0.278	32.1
1.010	0.142	15.3	1.048	0.204	22.7	1.085	0.245	27.7	1.123	0.279	32.2
1.011	0.144	15.5	1.049	0.206	22.8	1.086	0.246	27.9	1.124	0.28	32.3
1.012	0.147	15.8	1.050	0.207	23.0	1.087	0.247	28.0	1.125	0.281	32.4
1.013	0.149	16.1	1.051	0.208	23.1	1.088	0.248	28.1	1.126	0.281	32.5
1.014	0.151	16.3	1.052	0.209	23.3	1.089	0.249	28.3	1.127	0.282	32.6
1.015	0.153	16.6	1.053	0.211	23.4	1.090	0.250	28.4	1.128	0.283	32.7
1.016	0.155	16.9	1.054	0.212	23.6	1.091	0.251	28.5	1.129	0.284	32.8
1.017	0.157	17.0	1.055	0.213	23.7	1.092	0.252	28.6	1.130	0.285	32.9
1.018	0.159	17.3	1.056	0.214	23.8	1.093	0.253	28.7	1.131	0.286	33.1
1.019	0.161	17.5	1.057	0.215	24.0	1.094	0.254	28.9	1.132	0.286	33.2
1.020	0.163	17.7	1.058	0.216	24.2	1.095	0.254	29.0	1.133	0.287	33.3
1.021	0.165	17.9	1.059	0.218	24.3	1.096	0.255	29.1	1.134	0.288	33.4
1.022	0.167	18.1	1.060	0.219	24.5	1.097	0.256	29.2	1.135	0.288	33.5
1.023	0.169	18.3	1.061	0.220	24.6	1.098	0.257	29.3	1.136	0.289	33.6
1.024	0.170	18.5	1.062	0.221	24.7	1.099	0.258	29.5	1.137	0.289	33.7
1.025	0.172	18.7	1.063	0.222	24.9	1.100	0.259	29.6	1.138	0.291	33.9
1.026	0.173	18.9	1.064	0.223	25.0	1.101	0.260	29.7	1.139	0.292	33.9
1.027	0.175	19.1	1.065	0.224	25.1	1.102	0.261	29.8	1.140	0.293	34.0
1.028	0.177	19.3	1.066	0.225	25.3	1.103	0.262	29.9	1.141	0.293	34.1
1.029	0.178	19.5	1.067	0.226	25.4	1.104	0.263	30.0	1.142	0.294	34.2
1.030	0.180	19.7	1.068	0.228	25.5	1.105	0.264	30.1	1.143	0.295	34.3
1.031	0.181	19.9	1.069	0.229	25.7	1.106	0.264	30.3	1.144	0.296	34.4
1.032	0.183	20.0	1.070	0.23	25.8	1.107	0.265	30.4	1.145	0.297	34.5
1.033	0.184	20.2	1.071	0.231	25.9	1.108	0.266	30.5	1.146	0.297	34.6
1.034	0.185	20.4	1.072	0.232	26.1	1.109	0.267	30.6	1.147	0.298	34.7
1.035	0.187	20.6	1.073	0.233	26.2	1.110	0.268	30.7	1.148	0.299	34.8
1.036	0.188	20.7	1.074	0.234	26.3	1.111	0.269	30.8	1.149	0.300	34.9
1.037	0.190	20.9	1.075	0.235	26.5	1.112	0.27	31.0	1.150	0.300	35.0
1.038	0.191	21.1				1.113	0.271	31.1	1.151		

Contoh perhitungan:

Untuk menentukan besaran uji tarik, menentukan nilai elongation E_l (%) dan menentukan koefisien pengerasan regangan (strain hardening) n value untuk sampel 1 spec loc R pada produk line CTR yang ditampilkan oleh Data Uji Sifat Mekanik Sampel 1 adalah sebagai berikut:

a. Menentukan besaran uji tarik
 Org Gade (tebal sampel) = 0,35 mm
 Org Width (lebar) = 25,09 mm
 Area (luas) = 0,35 mm x 25,09 mm
 = 8,78 mm²
 Ultim Load = 2668 N
 TS Act = $\frac{2668N}{8,78 \text{ mm}^2} = 204 \text{ N/mm}^2$
 $P_{10} = 2596 \text{ N}$

$Y_S = \frac{247 + 204 + 247}{3} = 247 \text{ N/mm}^2$
 $TS = \frac{307 + 246 + 306}{3} = 326 \text{ N/mm}^2$

b. Menentukan nilai elongation E_l (%)

Gauge Length (GL) = 50 mm
 Test = 40 mm
 Elongation $E_l = \frac{40}{50} \times 100\% = 80 \%$

c. Menentukan koefisien pengerasan regangan (strain hardening) (n value)

$Y_s = 247 \text{ N/mm}^2$
 $TS = 326 \text{ N/mm}^2$
 $\frac{\bar{Y}_S}{\bar{TS}} = \frac{247}{326} = 0,81 \text{ N/mm}^2$
 $P_u = 2668 \text{ N}$
 $P_{10} = 2596 \text{ N}$
 $\frac{P_u}{P_{10}} = \frac{2668N}{2596N} = 1,029$ sehingga didapat n dan ϵ_u masing-

masing 0,178 dan 19,4% (ASTME 646-78)

Dimana:

P_u = Beban maksimal (N)
 P_{10} = Beban pada regangan 10% (N)
 N = koefisien pengerasan regangan (*strain hardening ratio*)
 ϵ_u = Regangan maksimal (%)

Selanjutnya berdasarkan analogi perhitungan di atas didapat hasil akhir dari uji tarik dari berbagai sampel pada produk line ECL, BTR dan CRF sebagai berikut:

Nilai kekuatan luluh (Y_s) hasil penelitian:

$\bar{Y}_{s \text{ BTR}} = \frac{300+288+292+325}{4} = 301,25$
 $\bar{Y}_{s \text{ CRF}} = \frac{247+235+236+272}{4} = 247,5$

Nilai tekanan tarik tensile strength (Ts) hasil penelitian :

$\bar{T}_{s \text{ CRF}} = \frac{305+332+304+329}{4} = 317,5$

$\bar{T}_{s \text{ CRF}} = \frac{325+341+330+331}{4} = 331,75$

Nilai elongation (E_l) hasil penelitian:

$E_{l \text{ ECL}} = \frac{5,3+4+2+5,3}{4} = 4,15$
 $E_{l \text{ BTR}} = \frac{91+79+83+87}{4} = 85$
 $E_{l \text{ CRF}} = \frac{79+75+79+83}{4} = 79$

Nilai koefisien *strain hardening* (n) hasil penelitian:

$n_{\text{BTR}} = \frac{0,229+0,025+0,235+0,225}{4} = 0,1785$
 $n_{\text{CRF}} = \frac{0,178+0,185+0,184+0,171}{4} = 0,1795$

Nilai regangan maksimum (E_u) hasil penelitian:

$E_{u \text{ BTR}} = \frac{25,7+21,3+25,4+25,3}{4} = 24,425$
 $E_{u \text{ CRF}} = \frac{19,4+20,3+20,3+17,9}{4} = 19,475$

PENUTUP

Kesimpulan

1. Hasil uji penelitian diproduksi *line ECL*

Berdasarkan data dan grafik uji tarik sifat material benda uji getas, nilai kekerasan rata-rata 96 HRB, nilai kekerasan dengan batas harga (95-97) HRB. Kedalaman tekan erichsen h_{er} dengan batas harga (5,3-8) mm, nilai kedalaman erichsen rata-rata $\bar{h}_{er} = 6,75$ mm. Elongation dengan batas harga (2-5,3)% dan elongation rata-rata $\bar{E}_l = 4,15\%$.

2. Hasil uji di produk *line BTR*

Berdasarkan data nilai kedalaman tekan erichsen dengan batas harga (10,3-10,9) mm dan nilai kedalaman tekan erichsen rata-rata $\bar{h}_{er} = 10,68$ mm Nilai kekerasan dengan batas harga (42-49) HRB dan nilai kekerasan rata-rata 44,5 HRB. Nilai kekuatan luluh (*yield strength*) $Y_s = 288-300 \text{ N/mm}^2$ dan nilai kekuatan luluh rata-rata $\bar{Y}_s = 301,25 \text{ N/mm}^2$

Nilai kekuatan tarik (*tensile strength*) σ_s dengan batas harga 304-329 N/mm^2 dan nilai kekuatan tarik rata-rata $\bar{\sigma}_s = 317,5 \text{ N/mm}^2$. Nilai *elongation* E_l dengan batas harga 79-91% dan nilai elongation rata-rata $\bar{E}_l = 85\%$. Nilai koefisien *strain hardening* n dengan batas harga 0,225-0,235 dan koefisien *strain hardening* rata-rata \bar{n} dengan batas harga 0,1785. Nilai *ultimate strain value* ϵ_u dengan batas harga 21,3-25,7 % dan *ultimate strain value* rata-rata $\bar{\epsilon}_u = 24,425 \%$

3. Hasil uji di produk *line CRF*

Berdasarkan data nilai kedalaman erichsen h_{er} dengan batas harga 10,2-10,4 dan nilai rata-rata $\bar{h}_{er} =$

10,3 mm. Nilai kekerasan dengan batas harga 47-55 HRB dan nilai rata-rata 51,25 HRB. Nilai kekuatan luluh *yield strength* Y_s dengan batas harga 235-272 N/mm², dan nilai kekuatan luluh rata-rata $\bar{Y}_s = 247,5$ N/mm².

Nilai kekuatan tarik (*tensile strength*) σ_s dengan batas harga 330-341 dan nilai kekuatan tarik rata-rata $\bar{\sigma}_s = 331,75$ N/mm². Nilai *elongation* $E\ell$ dengan batas harga 75-83 % dan nilai *elongation* rata-rata $\bar{E}\ell = 79\%$.

Nilai koefisien *strain hardening* n dengan batas harga 0,171-0,185 dan koefisien *strain hardening* rata-rata $\bar{n} = 0,1795$.

Saran

Untuk mendapatkan data-data yang akurat, perlu kiranya diadakan uji ulang, lebih akurat lagi sampel diperbanyak.

DAFTAR PUSTAKA

- China Steel Corporation, *Cold Rolling Mill* Indonesia Utama, *CSC Training Manual for CRM*, 1993.
- Dicter, George E.. *Metalurgi Mekanik*, edisi ketiga, jilid 2, Terjemahan Sriati Djaprie. Tanpa Penerbit. Tanpa Kota. 1988.
- Hastono Reksotenoyo, *Seri Teknologi Pengolahan Bahan Logam 18 Teknik Pembentukan Non Cutting*, Teori dan Aplikasi pada Industri Nasional, 1993.
- Hastono Reksotenoyo, *Teknologi Cor Gravity, Teori Dasar dan Aplikasi*, 1992
- Hastono Reksotenoyo, *Material Teknik, Logam, Polimer, Keramik, Komposit*, 1997.
- Lawrence H. Van Vlack, Sriati Djaprie, *Ilmu dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam)*, 1991.
- Mardjono Siswosuwarno, *Teknik Pembentukan Logam*, Jilid 1, Jurusan Mesin Fakultas Teknik Industri Institut Teknologi Bandung, 1985.
- Mardjono Siswosuwarno, *Seminar on Sheet Formability Metallurgy Engineering Department*, Bandung, Oktober, 1998.
- Mardjono Siswosumarno, *Pengujian Mekanik, Metoda, Interpretasi dan Penggunaannya*, 1998.
- Panduan Praktikum Ilmu logam, *Program Pelatihan Pengelola Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin*, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, 1994.
- Saito, Shinroku. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Terjemahan Tata Surdia. Pradnya Paramita, Jakarta. 1995.
- <http://bebas.vlsm.org/v12/sponsor/sponsorpandumping/proweda/fisika/fisika.htm>