

Pengaruh Gaya Siklis Aksial-Torsional pada Model Simulasi Sambungan Pipa Apung Menurut Teori Gaya Dua Permukaan

(The effect of axial-torsional forces on the simulation model of floating hose joint based on to-face force theory)

SAHLAN

ABSTRACT

The two-surface theory consists of a yield surface and a loading surface, in which the surface may be defined differently (axial and torsional). A Simulation experimental study on the inelastic behavior of tubular annealed aluminum alloy Alumina Duroll tubular specimens subjected to combined axial and torsional stress cycles is presented. Particular attention is paid to the question of how plastic strain is developed and how the yield surface moves along the 90° out-of-phase stress cycle for simulation model of floating hose. Experimental result agree qualitatively with the prediction of the two surface plasticity theory. This Research is based on case study research pipeline buoyancy (floating hoses)

Keywords: Permukaan luluh, analisis tegangan aksial dari torsi, teori gaya dua permukaan

PENDAHULUAN

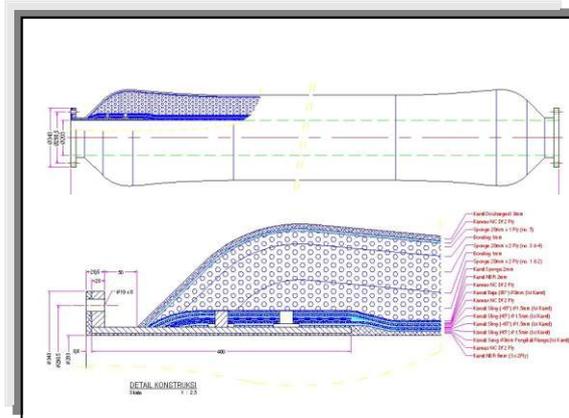
Pipa apung dipergunakan untuk mengalirkan minyak mentah (*crude oil*) dari kapal tanker ke kilang minyak karena faktor kapal tanker yang tidak bisa merapat kedermaga untuk berlabuh. Studi kasus kegagalan pengujian pipa apung (*floating hose*), dari penelitian Pusat Teknologi Industri Proses (PTIP), BPPT, yang saat dilakukan pengujian di lapangan di Kilang Minyak Bontang, Kalimantan Timur, ditemukan kebocoran minyak (*crude oil*) pada ujung sambungan molding pipa apung di pipa baja sambungan di dekat flens. Perkiraan awal, kebocoran kemungkinan diakibatkan oleh proses molding karet pipa apung dengan sambungan pipa baja kurang sempurna. Kebocoran ini masih dianggap sebagai kebocoran yang wajar. Bila dikaji atau dianalisis lebih mendalam lagi pada konstruksi dan struktur didalam pipa apungnya, pipa apung dengan proses molding, yang dibuat dari bahan komposit, karet, kanvas, dan baja sling (berdiameter 2,5 mm), dan dengan sifat komposit karet yang super-elastis, tentunya pada saat di uji dilapangan sangat kecil kemungkinannya terjadi kebocoran air pada sambungan pipa apung dan pipa baja. Kemungkinan kebocoran rembesan molding pipa apung terhadap pipa baja karena kedua permukaannya saling bergeseran. Terjadinya deformasi pada pipa baja menyebabkan kebocoran pada molding pipa apung. Pengujian performa pipa apung dilakukan di atas

permukaan laut yang berombak naik-turun dan mendorong maju-mundur. Akibatnya, pipa apung mendapat beban dari luar, yaitu gaya aksial dan torsional. Akibatnya baik pipa apung maupun pipa bajanya dapat mengalami deformasi, dan kedua permukaannya (molding pipa apung dan pipa baja) mengalami kontraksi sehingga pengikatannya saling bergeser satu terhadap yang lainnya.

Dengan simulasi model analisis teori gaya dua permukaan, sedikit banyak dapat menjadi pembuktian ilmiah, bahwa kebocoran rembesan air pada sambungan molding pipa apung dengan pipa baja, lebih disebabkan karena adanya deformasi pada pipa bajanya. Maka langkah berikutnya, tidak hanya melakukan tinjauan ulang pada proses molding pada pipa apung saja, namun pipa bajanya secara dimensional perlu disain ulang, yaitu melakukan perubahan bentuk dan ukurannya. Ini tentunya, perlu mempertimbangkan pada kekuatan pipa baja, sehingga deformasi yang terjadi bisa di tiadakan atau lebih kecil.

Prediksi awal, kemungkinan karena terjadi tekukan (*bending*), menimbulkan pergeseran antara permukaan kontak sisi dalam pipa apung dengan pipa baja, maka mengakibatkan pengkerutan pada molding sisi sambungan pipa baja (*tube*) dan pipa apung (*hose*), yang mana secara tidak langsung mengurangi kemampuan rekatan dan terjadi kebocoran rembesan pada sambungan rekatannya. Akibat yang lain antara sambungan *tube* dan *flens* terjadi deformasi tekukan.

Gambar 1 menunjukkan konstruksi atau struktur sambungan dan perekatan pipa baja dengan pipa apung dengan proses sambungan moulding.



GAMBAR 1. Konstruksi sambungan perekatan molding pipa baja dan pipa apung

Dari hasil uji di laboratorium Balai Besar Teknologi Konstruksi dan Struktur, BPPT, (Gambar 2), memperlihatkan terjadinya deformasi bengkok yang besar pada pipa baja dan flensnya saat diuji bengkok (*bending test*), yaitu kombinasi gaya tarik (sisi luar) dan tekan (pada sisi dalam) bengkokan, serta torsi mempengaruhi kerja pipa baja pada ujung karet pipa apung.

Gambar 3, menunjukkan kegagalan pada sambungan antara (*intermediate joint*) pipa apung akibat deformasi pada pipa baja-nya sehingga terjadi kebocoran berupa rembesan air pada pipa karet penyambung.



GAMBAR 2. Uji bengkok pipa apung eks PTIP



GAMBAR 3. Kegagalan sambungan perekatan akibat deformasi pada pipa baja

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh tegangan tarik/ tekan dan torsi pada model pipa silindris. Peneliti mengamati perilaku benda logam silindris berbentuk pipa (*tubing*) terhadap perilaku siklis (pembebanan berulang-ulang), yaitu perilaku dimana bila suatu logam mendapatkan gaya-gaya kombinasi dari luar maka gaya-gaya tersebut terdistribusi merata dan menjadi tegangan pada arah melingkar (*cyclic*). Hal ini bisa terjadi pada keadaan riil pada pipa-pipa penyambung antar pipa apung (*floating hose*) penyalur minyak mentah dari kapal tanker ke kilang minyak. Beban dinamis yang berasal dari dinamika ombak laut, yang naik turun dan maju-mundur, akan mempengaruhi kekuatan pipa penyambung antar pipa apung.

STUDI PUSTAKA

Teori gaya dua permukaan atau juga disebut dengan teori dua permukaan, yaitu teori yang menyatakan bahwa, apabila suatu benda kerja berbentuk tabung silindris (*pipa/tube*), menerima dua macam beban (bengkok dan punter/torsi) secara bersama-sama maka pada daerah permukaan luluh dan daerah permukaan yang terbebani memperlihatkan suatu lintasan kurva tegangan dan kurva regangan bilinear, atau kurva dua lintasan. Artinya batas permukaan luluhnya akan menutupi (daerah) batas perilaku elastis yang lemah atau kritisnya. Ini tentunya dapat dibuktikan dengan melakukan percobaan atau model simulasi di laboratorium, yaitu dengan cara benda kerja atau spesimen uji yang berbentuk silindris diberikan dua macam beban sekaligus yaitu beban aksial dan torsional. Model simulasi ini bertujuan untuk mengetahui bahwa variasi permukaan luluh yang terjadi baik bentuk dan ukurannya seperti yang terjadi dalam pengujian luluh yang sering dilakukan orang, secara

kualitatif mempunyai orientasi hubungan antara daerah luluh terhadap pengukuran regangan dan besarnya beban. Secara umum, berawal dari titik luluh bawah (*loweryield point*) sampai titik luluh atas (*upper yield point*) pada sampel uji akan terjadi perubahan pada permukaan kritisnya, dan luluh akan terus bergerak dan kemudian terbentuk takikan selama penambahan beban. Hukum kekerasan permukaan luluh dengan mengabaikan terjadinya deformasi, maka hukum ketetapan pengerasan kinematiklah yang relevan untuk dipergunakan.

Menurut Polushich, ada beberapa sifat siklis dua arah sumbu (*biaxial*) yang sangat kuat bila di dibandingkan dengan hasil uji berulang-ulang pada arah tegak lurus sumbu seperti pada model pengujian tarik kovensional. Sebagai contoh, pada perilaku arah tegak lurus sumbu, maka sifat siklis dua arah sumbu dari fase lingkaran regangan tidak sesuai dengan ketetapan teori tersebut diatas. Untuk memahami perilaku tentang sifat siklis dua arah sumbu, maka diperlukan percobaan bermacam-macam arah sumbu (*multiaxial*), dengan memberikan pembebanan yang proporsional, dengan rasio tegangan (atau bisa jadi pada regangan) nya yang tetap (konstan). Apabila dalam pemberian bebannya tidak proporsional (*overload*) pada arah sumbu aksialnya, memperlihatkan suatu lintasan regangan bilinear, atau lintasan kurva, dengan pergeseran sumbu 30° dan 60° diluar fasa lingkaran, dan seterusnya.

Didalam lintasan aksialnya, bidang geser maksimum berubah terus menerus, dan sudut antara tegangan yang terjadi dan tegangan rata-rata juga ikut berubah. Lintasan aksial mengalami kerenggangan maka akan terjadi pergeseran pada lintasan tegak lurus sumbu aksialnya, dan keluar dari fase lingkaran tegangan. Perlu disampaikan disini bahwa tegangan rata-rata selalu tegak lurus terhadap arah tegangan (proporsional) yang terjadi.

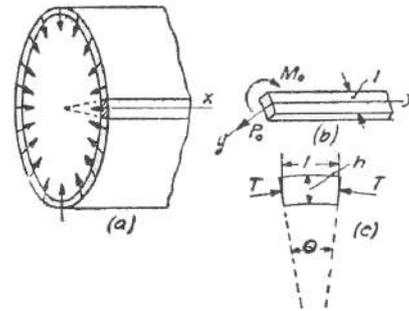
Analisis terhadap beban bengkok (*bending*) pada benda silindris potongan elemental, berbentuk strip, terhadap deformasi simetris pada sumbunya, maka lendutan strip yang terjadi membentuk bidang lengkungan terhadap bidang gaya reaktif sepanjang strip, dan selaras terhadap lendutan y . Oleh karena itu lendutan strip dalam keadaan yang sama terhadap pengaruh bengkok pada gelagar akan membentuk kurva lendutan lengkungan parabolik. Untuk mudahnya, diilustrasikan suatu potongan strip berdimensi satuan lebar,

dimana y merupakan pergeseran arah radial untuk beberapa potongan strip, dan kemudian jari-jari silinder terpendeknya pada sisi ini adalah r , maka diperoleh gaya lateral yang besarnya merupakan perbandingan terbalik antara regangan tekan dalam (y), dan jari-jari silinder r , dan tegangan tekannya adalah Ey/r . Oleh karena itu, bila strip melendut kedepan searah dengan sumbu silinder, maka gaya tekan lateral T , (Gambar 4), atau T besarnya persatuan panjang pada garis strip, adalah:

$$T = \frac{Ey}{r} h \quad (1)$$

Dengan sudut θ sama dengan $1/r$, gaya ini mempunyai resultan radial:

$$\frac{Eyh}{r} \theta = \frac{Eyh}{r^2} \quad (2)$$



GAMBAR 4. Deformasi arah aksial

Diasumsikan, arah ledutan pada strip (bisa diasumsikan disini bahwa θ merupakan sudut sangat kecil), maka gaya reaktif menyebar sepanjang strip akan selaras terhadap lendutan y . Oleh karena itu strip dalam keadaan yang sama terhadap pengaruh bengkok pada gelagar pada keadaan elastic akan sama dengan $k = Eh/r^2$. Pada beberapa perubahan bentuk potongan melintang, besarnya strip bentuk plat adalah $D = Eh^3/12(1 - \mu^2)$, ini dipergunakan pula untuk parameter ukur lendutan benda yang lentur. Persamaan difrensial didalam kurva lendutan pada strip menjadi:

$$D \frac{d^2 y}{dx^4} = \frac{Eh}{r^2} y \quad (3)$$

Maka:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Eh}{4Dr^2}} = \sqrt[4]{\frac{3(1 - \mu^2)}{r^2 h^2}} \quad (4)$$

Kurva lendutan pada strip menjadi:

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} [Po \cos \beta x - \beta Mo (\cos \beta x - \sin \beta x)] \quad (5)$$

Bila dilukiskan kedalam kurva osilator, panjang gelombang bending adalah:

$$l = \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi \sqrt{\frac{r^2}{3(1 - \mu^2)}} \quad (6)$$

Untuk perbandingan r yang relatif kecil, maka h juga menjadi kecil. Dari sini dapat dilihat bahwa bentuk bengkakan pada sambungan silinder terhadap flens pada pipa apung bersifat beban terlokalisir tegangan-tegangannya hanya terjadi di daerah sempit pada area sambungan pipa dan flensnya. Daerah beban yang terisolir pada sudut sambungan kepala flens akan terjadi beban kritis seperti yang terjadi pada daerah dekat silinder, ini seperti dirumuskan dalam persamaan (5). Selanjutnya ini dapat dipergunakan untuk memperkirakan perhitungan lendutan dan tegangan-tegangan didalam kepala flens.

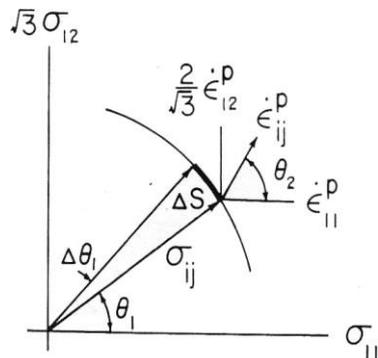
Korelasi hubungan data uji antara hasil uji pembebanan arah aksial dan torsi, tegangan efektif, σ_{23} , regangan plastis rata-rata, $\bar{\epsilon}_o$, dan pertambahan panjang lintasan tegangan, ΔS , didefinisikan sebagai:

$$\sigma_c = (\sigma_{11}^2 + 3\sigma_{12}^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\bar{\epsilon}_c^p = (\bar{\epsilon}_{11}^p)^2 + (2\bar{\epsilon}_{12}^p)^2 / 3^{1/2} \quad (8)$$

$$\Delta S = (\Delta\sigma_{11}^2 + 3\Delta\sigma_{12}^2)^{1/2} \quad (9)$$

Seperti terlihat pada Gambar 5, arah tegangan θ , arah regangan platis rata-rata, dapat dihitung dari data perbobaaan dengan:



GAMBAR 5. Arah regangan plastis rata-rata, dan arah tegangan

$$\tan \theta_1 = \frac{\sqrt{3}\sigma_{12}}{\sigma_{11}} \quad (10)$$

dan

$$\tan \theta_2 = \frac{2\bar{\epsilon}_{12}^p}{\sqrt{3}\bar{\epsilon}_{11}^p} \quad (11)$$

Panjang kelenturan lintasan didefinisikan:

$$E_p = \Delta S / [(\Delta\epsilon_{11}^p)^2 + (2\Delta\epsilon_{12}^p)^2 / 3]^{1/2} \quad (12)$$

METODE PENELITIAN

Gambar 6 merupakan bentuk dan ukuran spesimen uji yang dipakai untuk model simulasi atau percobaan. Bahan specimen uji dipilih dari bahan aluminum, dalam hal ini dipakai dari bahan Alumina Duroll. Setelah proses pembuatan, specimen uji di anil pada suhu 640°F selama satu jam. Metoda simulasi dalam penelitian ini menitik beratkan pada pengamatan regangan geser puntiran dan regangan aksialnya, dan dalam pengamatannya mempergunakan alat ukur regangan (*rosette strain gages*). Dan telah dilakukan pengujian, diperoleh besarnya regangan geser torsi dan aksialnya, dan dengan menggunakan persamaan (10), (11), dan (12) diperoleh besar dan arah regangan atau tegangan plastis rata-rata. Sebagai data pembanding, untuk pengamatan pengukuran regangan plastid rata-rata mikrometer dipasangkan pada ujung spesimen dan dengan rangkaian listrik jembatan Wheatstone maka akan diperoleh pengukuran besar/arah regangan plastis rata-rata dan tegangannya. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan hasil pengamatan yang mempergunakan alat ukur regangan.

Pertama-tama, pada daerah elastic, specimen A1 diberi beban. Ini bertujuan untuk menentukan dan melihat besarnya batas awal plastisnya. Setelah uji elastis selesai dilakukan, specimen diberikan beban uji tarik dari titik O ke A, seperti terlihat pada Gambar 7, sampai tegangan aksialnya mencapai σ_{11} , yaitu sebesar 80,6 Mpa, dan tegangan gesernya σ_{12} adalah nol, atau kurang lebih 0,09% setelah regangan plastisnya tercapai. Dan kemudian, dilanjutkan sampai lintasan lingkaran ABCDA. Dan dengan cara yang sama, hasil pengujian untuk empat

lintasan lingkarannya sapat dipetakan kemudian.

Hal yang sama dilakukan pengujian untuk specimen uji A2. Urutan hasil pembebanan uji seperti terlihat pada Tabel 1, dan lintasan tegangannya seperti pada Gambar 8, dimana pada tegangan aksial, titik-titik M, M', dan M'' mempunyai kedudukan yang berbeda, akan tetapi sangat dekat satu terhadap yang lainnya. Hanya M yang ditandai dalam Gambar 8 tersebut. Tegangan-tegangan efektif pada titik-titik ini mempunyai hubungan $\sigma_e |M \triangleleft \sigma_e M' \triangleleft \sigma_e M''|$ (tanda simbol ' \triangleleft ' dan ' \triangleleft ' artinya mempunyai kesamaan hubungan antara tegangan efektif pada kedudukan di L, N, dan P, A).

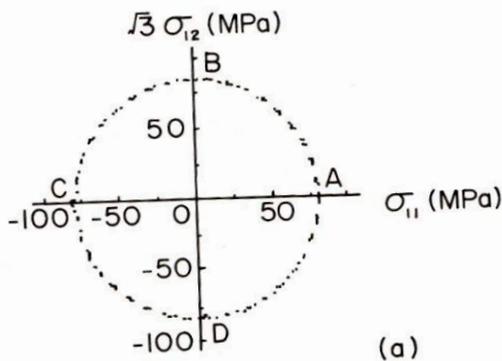


a). Pandangan muka



b). Pandangan samping

GAMBAR 6. Bentuk dan ukuran Spesimen

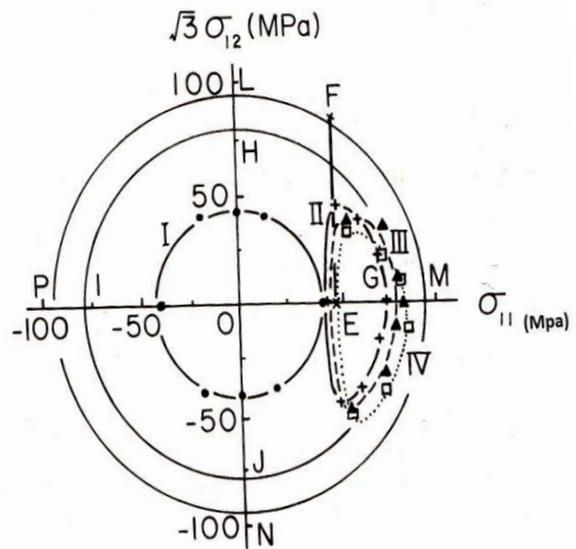


(a)

GAMBAR 7. Urutan pembebanan uji tegangan

TABEL 1. Urutan pembebanan Spesimen A2

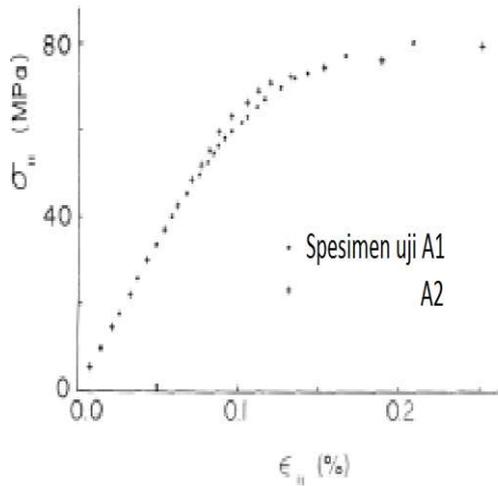
No. Lintasan	Lintasan Tegangan	Keterangan
1.		Membuat lintasan awal pengujian
2.		Membuat lintasan awal pembebanan titik I
3.	OG	Tegangan awal uji tarik
4.		Membuat lintasan pembebanan titik H berdasarkan $(R = 0,1)$
5.	GHIJG	Membuat lintasan pembebanan titik H berdasarkan
6.		Pengulangan untuk pembebanan pembebanan
7.	EFE	Lintasan titik - II $(R = 1,0)$
8.	GHIJG	Membuat lintasan pembebanan titik H berdasarkan
9.		Pengulangan untuk pembebanan pembebanan
10.	EFE	Lintasan titik - III $(R = 1,0)$
11.	GHI	Pengulangan untuk pembebanan pembebanan
12.	EFE	Kontrol lintasan pembebanan tegangan
13.	EO	Tegangan lintasan awal pembebanan
14.	OL	Lintasan titik - I $(R = 1)$
15.	LNMNL	Lintasan titik - I $(R = 1,02)$
16.	LP'NM'L	Lintasan titik - I $(R = 1,02)$
17.	L'M'N'P'L'	Lintasan titik - I $(R = 1,06)$



GAMBAR 8. Urutan tegangan dan permukaan luluh spesimen A2

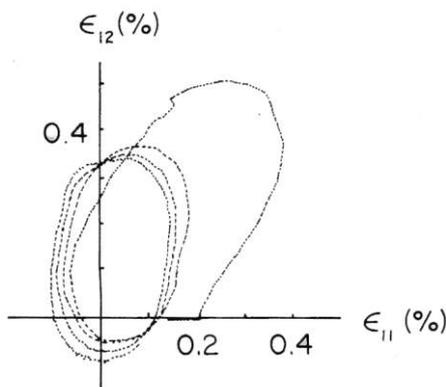
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji tarik elastis, data (kurva) tegangan-regangan membentuk garis mendekati bentuk garis persegi. Dari hasil pengujian, untuk specimen uji A1, modulus elastis Young, diperoleh sebesar $E = 70,4 \times 10^3$ Mpa, dan modulus gesernya $G = 26,3 \times 10^3$ Mpa. Dan untuk specimen uji A2, $E = 70,8 \times 10^3$ Mpa, $G = 26,2 \times 10^3$ Mpa. Maka dilukiskan kurva tegangan-regangan tegangan awalnya dimulai dari OA dan OG untuk specimen A1 dan A2 hasil terlihat seperti pada Gambar 9.

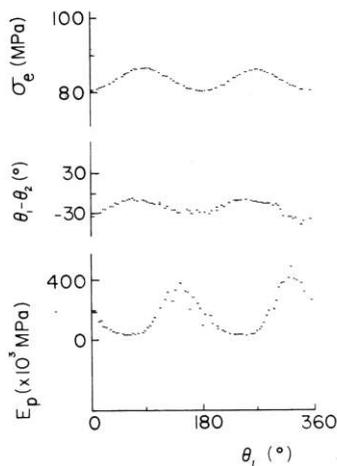


GAMBAR 9. Kurva tegangan-regangan tegangan awal

Pengaruh regangan terhadap lingkaran tegangan ABCDA dari spesimen A1 di lukiskan dalam Gambar 10.



GAMBAR 10. Pengaruh Regangan pada lingkaran tegangan



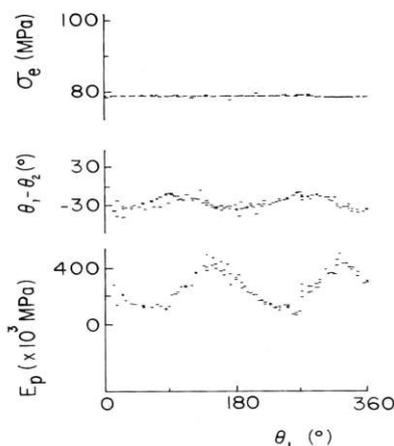
GAMBAR 11. Hasil pengujian yang menunjukkan hubungan timbal balik ABCDA

Didalam lima kali tahapan uji yang telah di lakukan pada GHIJG untuk spesimen A2, bermula dari uji pertama, maka diperoleh

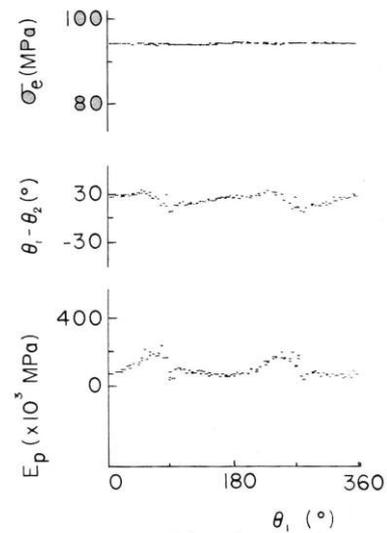
hubungan lintasan regangan yang sangat mendekati dengan pengaruh kondisi stabil atau tetap (*steady state*). Dan dalam Gambar 11 sampai dengan Gambar 15, σ_e , $\Delta\theta(=\theta_1 - \theta_2)$ dan E_p di lukiskan kembali kurva arah tegangan θ sepanjang lintasan lingkaran. Ini dapat dipastikan, bahwa arah regangan plastis rata-rata secara umum tidak serupa dengan arah tegangannya. Kurva regangan plastis rata-ratanya melengkung kedepan searah dengan pengaturan beban, dan banyaknya titik-titik pengujiannya bergantung pada banyaknya tahapan pengujian dari 2 sampai dengan 36 derajat. Kekakuan E_p juga akan terjadi penyebaran titik-titik yang kadang melampaui batas dari $6,9 \times 10^3$ Mpa sampai dengan $551,6 \times 10^3$ Mpa. Dan hal yang serupa terjadi pada regangan plastis rata-ratanya, sepanjang lintasan lingkaran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16, dimana lingkaran ketiganya adalah LMNPL.

Lintasan A1 adalah awal di rencanakannya model simulasi. Ini dimaksudkan untuk mendapatkan keadaan tegangan efektif yang konstan, dalam hal ini dipilih $R=1$. Namun ABCDA tidak serta merta menjadi harga patokan σ_{11} dan σ_{12} yang baku. Tujuan dari pada pengaturan dalam simulasi disini adalah untuk menentukan input sinyal pada rangkaian jembatan Wheatstone untuk $V_o \sin(\theta)$ dan $V_1 \sin(\theta + 90^\circ)$ menjadi 440 pada servo kontrolnya. Untuk harga $R=1$, maka V_o dan V_1 , yang diperoleh kemudian di jadikan bahan perbandingan 1,386, agar menjadi 1. Walaupun begitu, pengaturan kontrol secara manual atau mekanis sangat sulit dilakukan untuk memperoleh ketepatan yang tinggi dalam pengatur tegangan (listrik) nya. Data pengujian seperti pada Gambar 11 untuk $R=0,93$ pada A2 yang diperoleh harga R yang berbeda dari lintasan awalnya. Variasi harga R selama pengujian terhadap A2 memberikan beberapa kesamaan hasil. Gambar 11 variasi harga pada A2, R memperlihatkan hubungan timbal-balik, dan antara σ_e terhadap harganya lebih besar bila dibandingkan hasil pengujian untuk sampel uji A1. Ini bisa terjadi apabila titik tegangannya lebih dekat pada permukaan beban, dan arah regangan plastis rata-rata juga lebih mendekati arah tegangan. Namun pada keadaan

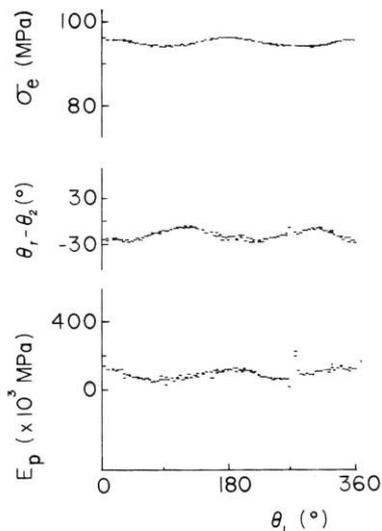
sebaliknya, bila tegangan di jauhkan dari permukaan tegangan, maka sudut antara regangan plastis rata-rata dan tegangannya akan menjadi lebih melebar. Hal yang sama juga terjadi hubungan timbal balik pada kurva E_p dan σ_e . Pada pengamatan tegangan efektifnya terjadi hal yang sebaliknya, artinya E_p dan σ_e menjadi turun, namun kekakuan permulaan, E_p , meningkat. Pada titik ini, idealnya permukaan kerja pipa sebagai benda kerja (specimen), berpotensi terdeformasi plastis. Walaupun begitu, hasil yang terjadi pada Gambar 12 – 14 sama sulitnya untuk menjelaskan terjadinya tegangan dan regangan pada permukaan pipa dan sambungan *flens*. Dan hasilnya adalah didalam lingkaran R sangat dekat antara satu terhadap lainnya, dan yang lebih besar terhadap sesamanya. Respon dari pada $\Delta\theta$ dan E_p masih sama keadaannya dengan $R = 0,93$. Untuk $R = 1,06$, seperti yang terlihat dalam Gambar 15, penyebaran $\Delta\theta$ dan E_p menjadi seragam sepanjang lintasan lingkaran, apabila permukaan pipa dan sambungan *flens* mendapatkan beban kerja berpotensi (terdeformasi) plastis (atau pada permukaan pembebanan) pada specimen A2, maka kurvanya mempunyai bentuk yang sama sebagai lintasan L'M'N'P'L' didalam sumbu aksial dan sisi tegangan geser puntirnya. Dari dua telaahan ini, menunjukkan adanya kebenaran teori dua permukaan dan sangat tepat atau relevan. Bukti ini dapat dilihat bila membandingkan dengan hasil untuk $R = 1$ diatas sebelumnya, yaitu adanya perbedaan antara permukaan pembebanan, dan diperolehnya permukaan pembebanan yang sangat kecil.



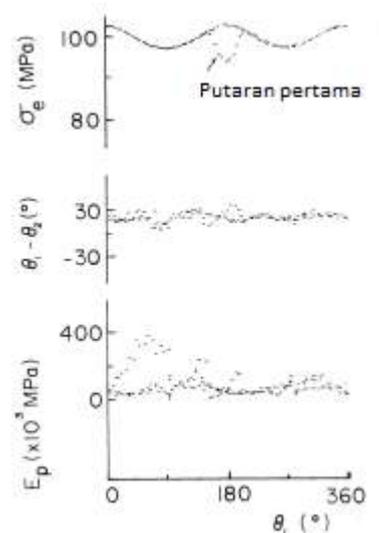
GAMBAR 12. Hasil pengujian GHIJG



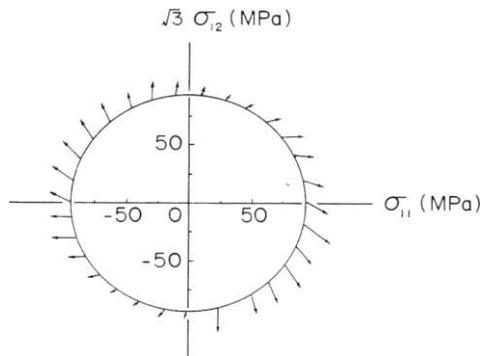
GAMBAR 13. Hasil pengujian LMNPL



Gambar 14. Hasil pengujian LP'NM'L



GAMBAR 15. Hasil pengujian L'M'N'P'L'

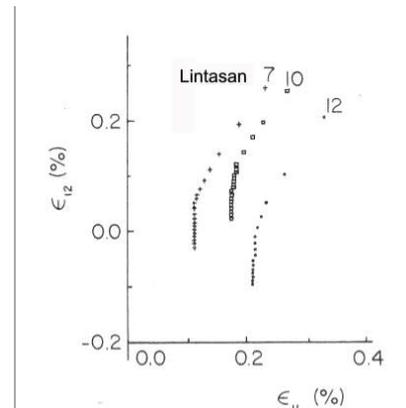


GAMBAR 16. Arah regangan pada lingkaran LMNPL

Seperti yang terlihat pada Gambar 9, yaitu pengamatan pada permukaan luluh pertama (titik II) yaitu saat sebelum pembebanan dimulai. Permukaan luluh III dan IV diperoleh lingkaran pertama dan kelima pada GHIJG, dan tidak ada pengaruh kekerasan yang berarti. Untuk lintasan arah berlawanan jarum jam GHIJG, permukaan luluh yang terjadi terlihat sama seperti apabila arah putarannya di balik searah jarum jam, dan juga dengan pengaruh terhadap banyaknya lingkaran. Untuk nomor lingkaran-tegangan yang makin besar, maka regangan permukaan luluh berkecenderungan untuk meninggalkan dibelakang titik pembebanan dan berpindah arah dari titik pangkal semula. Pengamatan yang sama, sesuai dengan percobaan sebelumnya, mengindikasikan bahwa permukaan pembebanan akan membesar selama dilakukan pembebanan siklis atau pembebanan berulang-ulang.

Untuk mendapatkan permukaan beban yang sesuai dengan tujuan simulasi awal, maka mengacu pada konsep atau metoda dasar bahwa nilai $\Delta\theta$ adalah nol, bilamana titik tegangan pada permukaan beban mempengaruhi permukaan pembebanan tegangan, regangan dan torsinya. Untuk Specimen uji yang diberi beban sepanjang EF kearah titik dimana awal arah regangan plastis rata-rata bertemu tepat dengan arah tegangan, maka permukaan pembebanan EF yang melewati langsung pada titiknya diasumsikan berada dikondisi permukaan bebannya. Permukaan yang terjadi setelah tahapan uji yang pertama, ke lima dan ke lima puluh lima siklis pada GHIJG, adalah merupakan hubungan lintasan regangan EF. Seperti yang terlihat pada Gambar 15, regangan plastis rata-rata berangsur-angsur berputar maju kedepan kearah tegangannya. Namun begitu, ukuran tegangannya akan meningkat pada setiap tahapan pengujian dan makin besar tegangannya maka makin besar pula tegangan yang terjadi pada permukaan bebannya.

Perkiraan titik tegangan yang sama di F (48,1; 48,1 Mpa) terjadi untuk semua tiga uji coba pada daerah sekitar EF.



GAMBAR 17. Hubungan lintasan regangan EF

Masalah yang timbul kemudian adalah bagaimana $|\Delta\theta|$ bisa memberikan variasi kuantitatif bilamana dilakukan banyak pengujian. Untuk menghitung nilai rata-rata $|\Delta\theta|$ pada setiap siklisnya, diperoleh hasil seperti yang diberikan pada Tabel 1 berikut ini.

TABEL 2. $|\Delta\theta|$ rata-rata pada setiap lingkaran

Lintasan Tegangan	Nomor lingkaran						
	1	2	3	4	5	34	50
ABCD	8,5	18,2	20,8	21,4			
GHIJG	14,7	22,6	22,2	22,8	23,9	27,2	27,2
LMNPL	22,4	23,6	23,9				
LP'NM'L	17,0	17,4	17,8				
L'M'N'P'L	20,9	19,6	20,6				

KESIMPULAN

Regangan plastis rata-rata tidak mempunyai arah yang sama sepanjang tegangan berada pada posisi 90 derajat diluar fasa lingkaran tegangan. Bungkakan atau bending (bilamana terjadi) menuju ke arah depan (maju), dan menuju arah pembebanan. Bahan aluminium, alloy Alumina Duroll untuk spesimen A2 yang dianil, menunjukkan bahwa teori dua permukaan sesuai untuk permukaan beban yang simpangan bakunya sangat kecil dari permukaan pembebanan. Permukaan pembebanan itu sendiri jelas lebih sempurna pendekatannya bila terjadi pada permukaan tegangan. Regangan plastis rata-rata bergantung pada jarak antara titik tegangan dan permukaan beban. Hal yang terjadi adalah jarak antara permukaan pembebanan dan permukaan

tegangan menurun untuk dua keadaan $|\Delta\theta|$ dan E_p menjadi ikut menurun.

Fenomena terjadinya pertambahan jumlah jumlah lingkaran tegangan yang semakin besar, ini bisa terjadi bilamana permukaan luluhnya berkecenderungan ketinggalan dibelakang titik beban dan bergeser ke titik awalnya. Bisa juga terjadi apabila arah regangan plastis rata-rata menyimpang jauh dari arah tegangannya. Fenomena ini menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan permukaan tegangan selama perputaran tegangan.

Untuk menguatkan dugaan awal, kebocoran yang terjadi pada sambungan molding pipa apung pada pipa baja pengikat lebih disebabkan karena adanya permukaan tegangan siklis yang berubah-ubah, ini tidak lain karena pengaruh gaya luar terhadap tegangan punter atau torsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Berghaus, D.G and Cannon, J.P, 2010. "Obtaininnng Derivatives from Experimental Data Using Smoothed-Spline Functions" EXPERIMENTAL MECHANICS
- Herlambang, Bambang, dan Djohana, "Pengujian Daya Tekuk Logam Aluminium", Prosiding Seminar Material Metalurgi 2012, Pusat Penelitian Metalurgi, LIPI, Serpong 2012.
- Matthews, F.L., dan Rawlins, R.D. 1994, Composite Materials Engineering and Science, Chapman and Hall, London.
- Piekutowski, A.J.2010. "Measurement of out-of-plane Displacements". Wright Peterson AFB, OH
- Polushicn, E.P., 1998, Defect and Falures of Materils, Elsevier Publishing Co. New York.
- Rowland,RE, Liber,T Daniel, I.m and Rose P.G 2010."Higher order numerical differentiation of experimental information" EXPERIMENTAL MECHANICS.
- Suryanarayana, A.V.K., 1979, Testing of Metallic Materials, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi
- Timoshenko, S., 2001, Strenth of Materials Part II Advanced, third Edition, Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, New York

PENULIS:

Sahlan ✉

Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik PLN, Jalan Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat.

✉Email: sahlan1956@yahoo.com