

# KONTRIBUSI PENELITIAN BEBERAPA ASPEK SISTEM PERPIPAAN PADA PROSES PERANCANGAN

Darmawan Harsokoesoemo

I Wayan Suweca

Bagus Budiwantoro

Jurusan Teknik Mesin ITB

Djoeli Satrijo

Program Studi Teknik Mesin, UNDIP

Gatot Santoso

Jurusan Teknik Mesin Unpas

## ABSTRAK

*Makalah ini mengetengahkan dua program dasar proyek penelitian berjudul "Penelitian Beberapa Aspek Sistem Perpipaian dan Penyusunan Konsep Kode Perancangan, Pembuatan, Perakitan dan Pengujian Sistem Perpipaian Indonesia", yaitu : (1) penyusunan konsep kode perancangan sistem perpipaian industri dan (2) penelitian tentang distribusi tegangan pada percabangan pipa dan pipa belokan serta penelitian tentang fleksibilitas sistem perpipaian.*

*Hasil proyek penelitian ini, yaitu (1) konsep kode perancangan, (2) algoritma analisis fleksibilitas sistem perpipaian dan (3) diagram distribusi tegangan untuk berbagai percabangan pipa dan pipa belokan, akan memberikan kontribusi dalam meningkatkan kemampuan rekayasa dan perancangan sistem perpipaian dalam bidang industri proses dan industri perminyakan, yang merupakan industri penting bagi ekonomi negara.*

## 1. PENDAHULUAN

Makalah ini mengetengahkan hasil-hasil penelitian PHB I/1 1992 Nomor 065/P4M/DPPM/PHB/1992 dan PHB I/2 1993 Nomor 064/P4M/DPPM/PHB I/2/1993 berjudul Penelitian Beberapa Aspek Sistem Perpipaian dan Penyusunan Konsep Perancangan, Pembuatan, Perakitan dan Pengujian Sistem Perpipaian Industri. Di sini secara ringkas dikemukakan beberapa dampak positif yang diharapkan terjadi dalam memajukan kemampuan

rekayasa dan perancangan sistem perpipaian industri dibidang industri proses dan industri perminyakan di Indonesia.

Ada dua program dasar yang dilaksanakan dalam kegiatan penelitian tersebut di atas, yaitu :

1. Penyusunan konsep perancangan sistem perpipaian industri.
2. Penelitian tentang distribusi tegangan pada percabangan pipa dan pipa belokan serta penelitian tentang fleksibilitas sistem perpipaian.

Konsep perancangan sistem perpipaan merupakan penerjemahan dari ANSI/ASME Code B31.3 tentang Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping, yaitu salah satu kode perancangan sistem perpipaan yang paling banyak digunakan di dunia. Terjemahan kode tersebut, jika telah selesai, dapat diajukan kepada lembaga standar di Indonesia sebagai sebuah naskah yang dapat untuk diadopsi menjadi standar Indonesia.

Jika naskah terjemahan ANSI/ASME B31.3 tersebut akhirnya dapat diadopsi menjadi standar Indonesia dengan penyesuaian-penyesuaian yang dianggap perlu, maka hal tersebut merupakan suatu langkah maju dan merupakan kontribusi nyata bagi memajukan kemampuan rekayasa dan perancangan sistem perpipaan industri Indonesia. Peningkatan kemampuan tersebut akan memungkinkan industri dalam negeri memegang peranan penting di bidang industri proses dan industri perminyakan. Sistem perpipaan adalah urat nadi industri proses dan industri petroleum, karena bahan-bahan untuk proses mengalir melalui sistem perpipaan tersebut. Adapun industri proses dan industri perminyakan adalah tulang punggung kegiatan ekonomi suatu negara, termasuk Indonesia dimana keduanya merupakan industri dasar yang penting.

Dampak hasil-hasil penelitian lainnya pada kemampuan rekayasa dan perancangan sistem perpipaan akan dibahas dalam uraian berikut.

## 2. BEBERAPA ASPEK PERANCANGAN YANG BELUM DIATUR DALAM ANSI/ASME CODE B31.3.

Dari segi perancangan sistem perpipaan, ada sedikitnya dua hal utama yang tidak diatur oleh ANSI/ASME Code B31.3, yaitu:

pada percabangan pipa dan pipa belokan

ANSI/ASME Code B31.3. tidak mengandung rumus-rumus maupun petunjuk perhitungan fleksibilitas sistem perpipaan, yaitu perhitungan tentang defleksi, baik defleksi lateral maupun defleksi sudut, dan tentang gaya dan momen yang bekerja pada bagian-bagian sistem perpipaan yang kritis, "Rancangan tidaklah perlu dianalisa lebih lanjut jika (1) sistem perpipaan tersebut adalah duplikat suatu sistem perpipaan yang terbukti sukses dalam operasi, dan (2) sistem perpipaan yang dirancang dapat dengan mudah dinilai cukup baik dengan membandingkan dengan sistem perpipaan lain yang telah dianalisa ANSI/ASME B31.3 juga hanya memuat rumus-rumus fleksibilitas untuk sistem perpipaan yang ditumpu pada 2 titik tumpu saja, suatu hal yang boleh dikatakan tidak pernah terjadi pada praktek.

Seperti telah dijelaskan di atas metode menentukan distribusi tegangan pada percabangan pipa dan pipa belokan tidak dicakup dalam ANSI/ASME Code B31.3. Dalam ANSI/ASME Code B31.3 hanya terdapat rumus-rumus berikut untuk menghitung tegangan lentur pada pipa belokan dan pipa percabangan  $90^\circ$ :

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_1 M_1)^2 + (i_0 M_0)^2}}{Z} \quad (1)$$

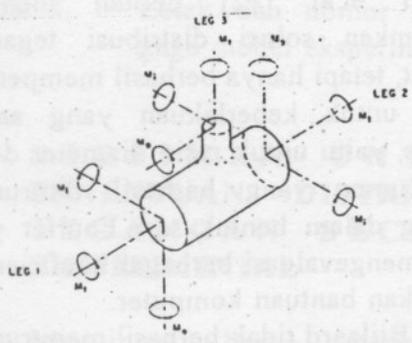
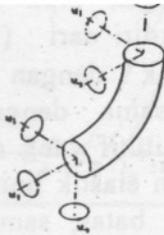
di mana

$M_1$  = momen lentur dalam bidang yang melalui kedua sumbu pipa (untuk percabangan pipa, lihat gambar),

$M_0$  = momen lentur dalam bidang yang tegak lurus bidang pertama (lihat gambar),

$i_1$  = faktor intensifikasi tegangan untuk bidang sumbu,

$i_0$  = faktor intensifikasi tegangan untuk bidang tegak lurus bidang sumbu.



Gambar 1. Momen inplane dan outplane pada belokan dan percabangan pipa.

Selanjutnya tegangan ekivalen yang terjadi dihitung dari rumus :

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \quad (2)$$

di mana

$S_t$  = tegangan torsi akibat  $M_t$

Rumus-rumus di atas jelas merupakan rumus empirik yang belum memuat kemajuan analisis dalam mekanika. Pertanyaan yang timbul dari rumus tentang  $S_E$  adalah tentang teori kegagalan (failure theory) apa yang dipakai. Sedang rumus untuk  $S_b$  dapat menimbulkan sedikitnya 2 pertanyaan, yaitu (1) di titik mana  $S_b$  tersebut terjadi dan (2) faktor intensifikasi tegangan  $i_i$  dan  $i_o$  dalam Apendiks D ANSI/ASME B31.3. berasal dari uji lelah oleh Markl dan kawan-kawan [10], [11] dan bukan faktor konsentrasi tegangan yang lazimnya dipakai sebagai pengali tegangan nominal.

letak gaya atau beban berupa gaya pada ujung-ujung percabangan pipa dan pipa belokan.

Berdasarkan hal-hal tersebut di atas kedua topik tersebut dipilih sebagai bahan penelitian aspek-aspek sistem perpipaan.

### 3. ANALISIS FLEKSIBILITAS SISTEM PERPIPAAN

Ada beberapa metode analisis fleksibilitas sistem perpipaan, beberapa diantaranya : (1) grapho-analytical method, (2) elastic center method, (3) general analytical method dan (4) metode matriks. Kecuali metode (4) yang kini telah berkembang menjadi metode finite element yang dilakukan dengan bantuan komputer, ketiga metode lainnya adalah metode yang dilakukan secara manual, karena itu terdesak pemakaiannya oleh program paket dengan bantuan komputer. Pada saat ini, dapat dikatakan semua analisis fleksibilitas sistem perpipaan dilakukan dengan bantuan program paket komputer yang tersedia secara komersial.

Laboratorium Perancangan Mesin ITB mempunyai 2 macam program paket untuk analisis fleksibilitas sistem perpipaan, yaitu CAESAR II dan AUTOPIPE dari AUTODESK, Inc. yang lebih baru.

Skema layout sistem perpipaan yang akan dianalisis fleksibilitasnya dibuat dengan bantuan program paket AUTOPIPE, ditetapkan dimensi-dimensi fisiknya, ditetapkan letak dan tipe titik-titik tumpunya, ditetapkan letak peralatan seperti katup dll. pada sistem perpipaan, dan ditetapkan letak titik-titik atau potongan-potongan yang dianggap berbahaya. Setelah besar dan macam beban yang bekerja pada sistem perpipaan ditetapkan, maka program akan menghitung defleksi, gaya dan momen dalam semua arah pada potongan-potongan berbahaya. Dengan mengetahui gaya dan momen yang

bekerja di potongan-potongan berbahaya, maka kemudian dapat dihitung tegangan-tegangan yang terjadi disitu, baik dengan menggunakan rumus-rumus dalam kode perancangan maupun dengan menggunakan metode finite element lebih lanjut. Dalam hal defleksi atau tegangan melampaui batas yang diijinkan, dapat dilakukan iterasi secara manual untuk memperoleh dimensi dan material pipa yang dapat memikul beban-beban yang bekerja pada sistem perpipaan.

Analisis fleksibilitas sistem perpipaan dengan menggunakan paket program yang lain mungkin memberikan hasil-hasil yang tidak tepat sama. Pemilihan program paket yang memberikan hasil terbaik adalah tanggung jawab perancang.

Kini dapat diresumekan, bahwa skema layout sistem perpipaan yang memenuhi fungsi yang disyaratkan adalah hasil pra-perancangan, yang harus diperiksa defleksi dan tegangan yang terjadi di potongan-potongan berbahaya agar tidak melampaui batas defleksi dan batas tegangan yang diijinkan. Untuk dapat melakukan pemeriksaan tegangan yang terjadi tersebut harus dilakukan analisis fleksibilitas sistem perpipaan terlebih dahulu. Hal yang disebut terakhir tidak dicakup dalam ANSI/ASME Code B31.3.

#### 4. PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN DI DAERAH PERCABANGAN PIPA DAN PIPA BELOKAN

Penentuan distribusi tegangan di daerah percabangan pipa dapat dilakukan secara : (1) teoritik, (2) eksperimental dan (3) secara numerik dengan bantuan komputer.

Pada perhitungan distribusi tegangan secara teoritik, maka dibuat model matematik untuk percabangan pipa

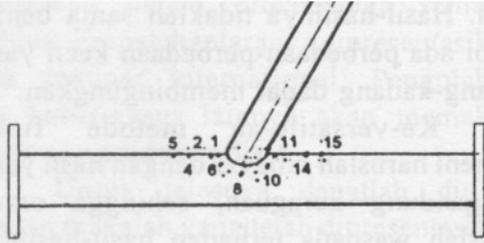
menguasai distribusi tegangan pipa daerah percabangan pipa dan di pipa belokan yang terdiri dari : (1) persamaan diferensial gerak dengan percepatan percepatannya sama dengan nol, (2) persamaan konstitutif yang dalam hal ini adalah persamaan elastik linier untuk badan dan (3) kondisi batas, sampai sekarang belum mempunyai *closed form solution*. Ernigan et.al [12] pernah mencoba menurunkan solusi distribusi tegangan tersebut, tetapi hanya berhasil memperoleh rumus untuk keberlakuan yang sangat terbatas, yaitu untuk rasio diameter  $d/D < 0,3$ . Rumus yang berhasil diturunkan tertuang dalam bentuk seri Fourier yang untuk mengevaluasi berbagai koefisiennya diperlukan bantuan komputer.

Bijlaard tidak berhasil menurunkan rumus distribusi tegangan, tetapi dapat menyusun cara untuk menghitung tegangan-tegangan berbahaya di daerah percabangan pipa dan pipa belokan akibat berbagai beban [13].

Welding Research Council Bulletin 107 memuat cara-cara untuk menghitung tegangan yang terjadi dalam bejana di daerah sambungan dengan nosel [14].

Pada program penelitian ini tidak dilakukan penentuan distribusi tegangan secara teoritik, tetapi dilakukan penentuan distribusi tegangan secara eksperimental dengan membaca regangan yang terjadi di beberapa titik yang diduga berbahaya dengan bantuan strainage yang banyak diantaranya berupa rosette. Hasil pembacaan regangan tersebut kemudian dikonversikan menjadi tegangan, yaitu tegangan maksimum dan tegangan minimum di daerah sepanjang las dan tegangan hoop dan tegangan aksial di "punggung" pipa utama dan pipa cabang.

Contoh peletakan strainage pada spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  adalah seperti pada gambar berikut :

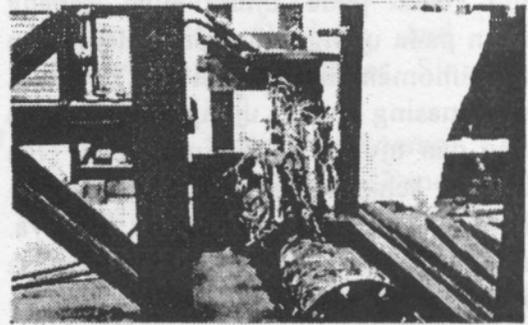


Gambar 2. Letak dan nomor strain-gage model eksperimen

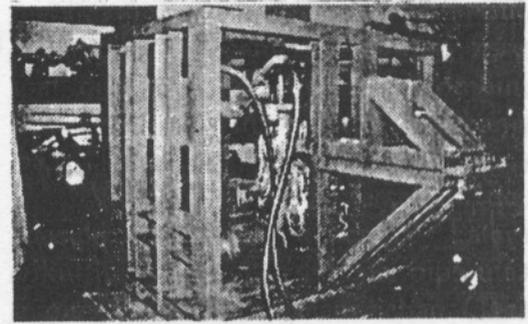
## 5. SPESIMEN UNTUK PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN SECARA EKSPERIMENTAL

Mengingat harga strain-gage rosette yang sangat mahal dan pada spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  diperlukan sedikitnya 18 buah rosette, maka hanya dibuat 3 buah spesimen yaitu : (1) spesimen percabangan pipa  $90^\circ$  dengan  $d_{nom} = D_{nom} = 4.0$ " schedule 40, (2) spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  dengan  $d_{nom} = 3.0$ " dan  $D_{nom} = 4.0$ " schedule 40 dan (3) pipa belokan dengan  $d_{nom} = 0.75$ ". Rossette dipasang di titik-titik potong antara pipa utama dan pipacabang dengan bidang  $\beta = 0^\circ$ , yaitu bidang yang melalui kedua sumbu pipa yang berpotongan dan terletak di sebelah kanan titik potong kedua sumbu, di titik-titik pada pipa utama dan pipa cabang di bidang  $\beta = 180^\circ$  dan di titik-titik sepanjang las (lihat gambar 1). Pembacaan regangan dilakukan dengan bantuan strain amplifier-strain indicator.

Contoh spesimen percabangan  $90^\circ$  yang dipasang pada test rig diperlihatkan pada foto-foto berikut ini. Untuk beban tekanan internal, maka test rig sebenarnya tidak diperlukan, tetapi untuk beban eksternal maka diperlukan test rig untuk memegang spesimen (dapat dijepit pada salah satu ujung pipa utama atau dijepit di kedua ujung pipa utama) dan untuk memegang *plunger* yang memberi gaya



Gambar 3. Spesimen percabangan  $90^\circ$  yang dipasang pada test rig



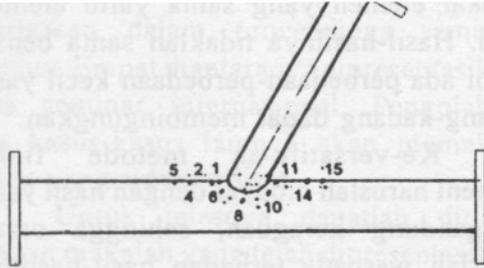
## 6. PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN DENGAN METODE FINITE ELEMENT

Penentuan distribusi tegangan dengan metode finite element inilah sebenarnya yang sangat *versatile*, karena dapat dipakai untuk berbagai kombinasi variabel yang terlibat pada percabangan pipa.

Variable-variabel tersebut dapat dimasukkan dalam beberapa katagori berikut ini, yaitu : (1) dimensi pipa utama dan pipa cabang, (2) macam beban, (3) tipe tumpuan, (4) cara pembuatan percabangan pipa dan (5) macam material.

Dalam kategori dimensi pipa utama dan pipa cabang misalnya terlihat beberapa variabel berikut  $D_o$ ,  $d_o$ ,  $T$ ,  $t$ ,  $\alpha$ , dan jika dipakai penguat pada sambungan pipa maka terdapat sedikitnya dua variabel lagi, yaitu  $r$  dan  $s$ .

Dalam kategori macam beban terlihat lebih banyak lagi variabel. Untuk



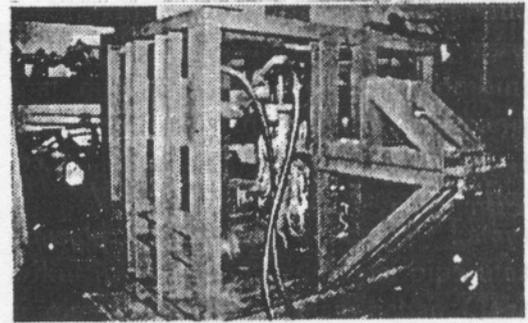
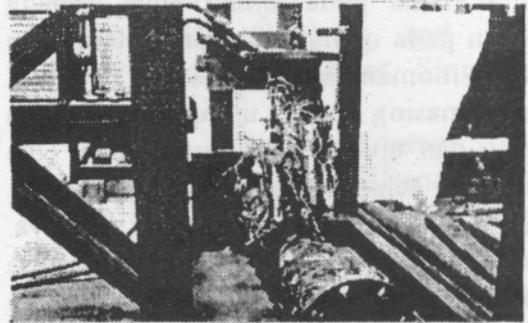
Gambar 2. Letak dan nomor strain-gage model eksperimen

## 5. SPESIMEN UNTUK PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN SECARA EKSPERIMENTAL

Mengingat harga strain-gage rosette yang sangat mahal dan pada spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  diperlukan sedikitnya 18 buah rosette, maka hanya dibuat 3 buah spesimen yaitu : (1) spesimen percabangan pipa  $90^\circ$  dengan  $d_{nom} = D_{nom} = 4.0"$  schedule 40, (2) spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  dengan  $d_{nom} = 3.0"$  dan  $D_{nom} = 4.0"$  schedule 40 dan (3) pipa belokan dengan  $d_{nom} = 0.75"$ . Rossette dipasang di titik-titik potong antara pipa utama dan pipacabang dengan bidang  $\beta = 0^\circ$ , yaitu bidang yang melalui kedua sumbu pipa yang berpotongan dan terletak di sebelah kanan titik potong kedua sumbu, di titik-titik pada pipa utama dan pipa cabang di bidang  $\beta = 180^\circ$  dan di titik-titik sepanjang las (lihat gambar 1). Pembacaan regangan dilakukan dengan bantuan strain amplifier-strain indicator.

Contoh spesimen percabangan  $90^\circ$  yang dipasang pada test rig diperlihatkan pada foto-foto berikut ini. Untuk beban tekanan internal, maka test rig sebenarnya tidak diperlukan, tetapi untuk beban eksternal maka diperlukan test rig untuk memegang spesimen (dapat dijepit pada salah satu ujung pipa utama atau dijepit di kedua ujung pipa utama) dan untuk memegang *plunger* yang memberi gaya

eksternal out-of-plane.



Gambar 3. Spesimen percabangan  $90^\circ$  yang dipasang pada test rig

## 6. PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN DENGAN METODE FINITE ELEMENT

Penentuan distribusi tegangan dengan metode finite element inilah sebenarnya yang sangat *versatile*, karena dapat dipakai untuk berbagai kombinasi variabel yang terlibat pada percabangan pipa.

Variable-variabel tersebut dapat dimasukkan dalam beberapa kategori berikut ini, yaitu : (1) dimensi pipa utama dan pipa cabang, (2) macam beban, (3) tipe tumpuan, (4) cara pembuatan percabangan pipa dan (5) macam material.

Dalam kategori dimensi pipa utama dan pipa cabang misalnya terlihat beberapa variabel berikut  $D_o$ ,  $d_o$ ,  $T$ ,  $t$ ,  $\alpha$ , dan jika dipakai penguat pada sambungan pipa maka terdapat sedikitnya dua variabel lagi, yaitu  $r$  dan  $s$ .

Dalam kategori macam beban terlihat lebih banyak lagi variabel. Untuk

bekerja di potongan-potongan berbahaya, maka kemudian dapat dihitung tegangan-tegangan yang terjadi disitu, baik dengan menggunakan rumus-rumus dalam kode perancangan maupun dengan menggunakan metode finite element lebih lanjut. Dalam hal defleksi atau tegangan melampaui batas yang diijinkan, dapat dilakukan iterasi secara manual untuk memperoleh dimensi dan material pipa yang dapat memikul beban-beban yang bekerja pada sistem perpipaan.

Analisis fleksibilitas sistem perpipaan dengan menggunakan paket program yang lain mungkin memberikan hasil-hasil yang tidak tepat sama. Pemilihan program paket yang memberikan hasil terbaik adalah tanggung jawab perancang.

Kini dapat diresumekan, bahwa skema layout sistem perpipaan yang memenuhi fungsi yang disyaratkan adalah hasil pra-perancangan, yang harus diperiksa defleksi dan tegangan yang terjadi di potongan-potongan berbahaya agar tidak melampaui batas defleksi dan batas tegangan yang diijinkan. Untuk dapat melakukan pemeriksaan tegangan yang terjadi tersebut harus dilakukan analisis fleksibilitas sistem perpipaan terlebih dahulu. Hal yang disebut terakhir tidak dicakup dalam ANSI/ASME Code B31.3.

#### 4. PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN DI DAERAH PERCABANGAN PIPA DAN PIPA BELOKAN

Penentuan distribusi tegangan di daerah percabangan pipa dapat dilakukan secara : (1) teoritik, (2) eksperimental dan (3) secara numerik dengan bantuan komputer.

Pada perhitungan distribusi tegangan secara teoritik, maka dibuat model matematik untuk percabangan pipa

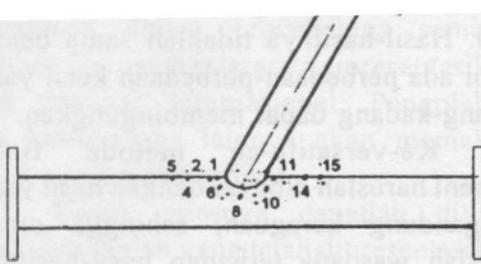
menguasai distribusi tegangan pipa di daerah percabangan pipa dan di pipa belokan yang terdiri dari : (1) persamaan diferensial gerak dengan percepatan-percepatannya sama dengan nol, (2) persamaan konstitutif yang dalam hal ini adalah persamaan elastik linier untuk baja dan (3) kondisi batas, sampai sekarang belum mempunyai *closed form solution*. Ernigan et.al [12] pernah mencoba menurunkan solusi distribusi tegangan tersebut, tetapi hanya berhasil memperoleh rumus untuk keberlakuan yang sangat terbatas, yaitu untuk rasio diameter  $d/D < 0,3$ . Rumus yang berhasil diturunkan tertuang dalam bentuk seri Fourier yang untuk mengevaluasi berbagai koefisiennya diperlukan bantuan komputer.

Bijlaard tidak berhasil menurunkan rumus distribusi tegangan, tetapi dapat menyusun cara untuk menghitung tegangan-tegangan berbahaya di daerah percabangan pipa dan pipa belokan akibat berbagai beban [13].

Welding Research Council Bulletin 107 memuat cara-cara untuk menghitung tegangan yang terjadi dalam bejana di daerah sambungan dengan nosel [14].

Pada program penelitian ini tidak dilakukan penentuan distribusi tegangan secara teoritik, tetapi dilakukan penentuan distribusi tegangan secara eksperimental dengan membaca regangan yang terjadi di beberapa titik yang diduga berbahaya dengan bantuan strainage yang banyak diantaranya berupa rosette. Hasil pembacaan regangan tersebut kemudian dikonversikan menjadi tegangan, yaitu tegangan maksimum dan tegangan minimum di daerah sepanjang las dan tegangan hoop dan tegangan aksial di "punggung" pipa utama dan pipa cabang.

Contoh peletakan strainage pada spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  adalah seperti pada gambar berikut :



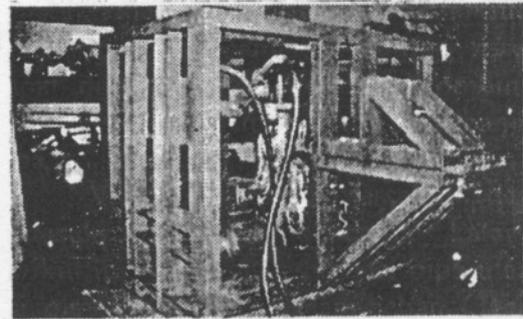
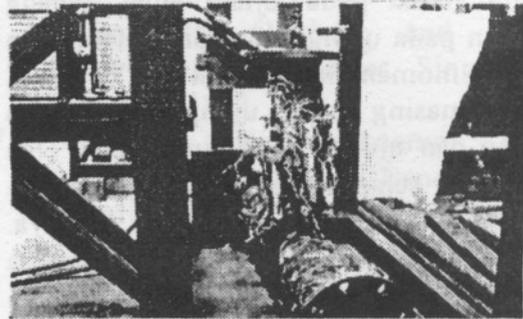
Gambar 2. Letak dan nomor strain-gage model eksperimen

## 5. SPESIMEN UNTUK PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN SECARA EKSPERIMENTAL

Mengingat harga strain-gage rosette yang sangat mahal dan pada spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  diperlukan sedikitnya 18 buah rosette, maka hanya dibuat 3 buah spesimen yaitu : (1) spesimen percabangan pipa  $90^\circ$  dengan  $d_{nom} = D_{nom} = 4.0"$  schedule 40, (2) spesimen percabangan pipa  $60^\circ$  dengan  $d_{nom} = 3.0"$  dan  $D_{nom} = 4.0"$  schedule 40 dan (3) pipa belokan dengan  $d_{nom} = 0.75"$ . Rossette dipasang di titik-titik potong antara pipa utama dan pipacabang dengan bidang  $\beta = 0^\circ$ , yaitu bidang yang melalui kedua sumbu pipa yang berpotongan dan terletak di sebelah kanan titik potong kedua sumbu, di titik-titik pada pipa utama dan pipa cabang di bidang  $\beta = 180^\circ$  dan di titik-titik sepanjang las (lihat gambar 1). Pembacaan regangan dilakukan dengan bantuan strain amplifier-strain indicator.

Contoh spesimen percabangan  $90^\circ$  yang dipasang pada test rig diperlihatkan pada foto-foto berikut ini. Untuk beban tekanan internal, maka test rig sebenarnya tidak diperlukan, tetapi untuk beban eksternal maka diperlukan test rig untuk memegang spesimen (dapat dijepit pada salah satu ujung pipa utama atau dijepit di kedua ujung pipa utama) dan untuk memegang *plunger* yang memberi gaya

eksternal out-of-plane.



Gambar 3. Spesimen percabangan  $90^\circ$  yang dipasang pada test rig

## 6. PENENTUAN DISTRIBUSI TEGANGAN DENGAN METODE FINITE ELEMENT

Penentuan distribusi tegangan dengan metode finite element inilah sebenarnya yang sangat *versatile*, karena dapat dipakai untuk berbagai kombinasi variabel yang terlibat pada percabangan pipa.

Variable-variabel tersebut dapat dimasukkan dalam beberapa katagori berikut ini, yaitu : (1) dimensi pipa utama dan pipa cabang, (2) macam beban, (3) tipe tumpuan, (4) cara pembuatan percabangan pipa dan (5) macam material.

Dalam kategori dimensi pipa utama dan pipa cabang misalnya terlihat beberapa variabel berikut  $D_o$ ,  $d_o$ ,  $T$ ,  $t$ ,  $\alpha$ , dan jika dipakai penguat pada sambungan pipa maka terdapat sedikitnya dua variabel lagi, yaitu  $r$  dan  $s$ .

Dalam kategori macam beban terlihat lebih banyak lagi variabel. Untuk

tipe tumpuan jepit pada salah satu ujung pipa utama misalnya, terdapat 12 macam beban, yaitu 3 buah gaya dalam arah X, Y dan Z baik pada ujung pipa cabang maupun pada ujung bebas pipa utama dan 3 buah momen dalam arah X, Y dan Z masing-masing pada ujung bebas pipa cabang dan ujung bebas pipa utama. Dan demikian selanjutnya dengan variabel-variabel dalam ketiga kategori lainnya. Penelitian lengkap yang mencakup semua variabel yang terlibat dalam percabangan pipa dan kombinasinya, tidaklah mungkin dilakukan oleh seorang atau satu kelompok peneliti saja. Hasil penelitian baru akan selalu menambah dan melengkapi pengetahuan orang tentang distribusi tegangan pada daerah percabangan pipa.

Perlu dicatat disini bahwa distribusi tegangan hasil perhitungan dengan metode finite element adalah hasil pendekatan numerik. Hasil pendekatan dengan memakai program paket yang satu dapat berlainan dengan hasil pendekatan dengan memakai program paket lainnya, karena itu keberlakuan hasil metode finite element haruslah diperiksa dengan hasil eksperimental.

Pada penelitian ini, dipakai 3 buah program paket finite element, yaitu : (1) program paket SAP yang berplat-form komputer PC, (2) program paket STRESSLAB dari Computer Vision, dengan plat-form workstation SUN dan (3) program paket MECHANICA dari RASNA dengan plat-form workstation SILICON GRAPHICS.

Model finite element dapat berupa shell ataupun solid. Untuk penentuan distribusi tegangan dengan program paket STRESSLAB, misalnya, dipakai baik elemen shell maupun elemen solid. Hasilnya tidaklah sama benar, seperti misalnya distribusi tegangan aksial pada pipa utama percabangan  $90^\circ$  akibat tekanan internal ada yang berharga negatif jika

program paket tersebut diatas, juga dicoba dipakai elemen yang sama yaitu elemen shell. Hasil-hasilnya tidaklah sama benar tetapi ada perbedaan-perbedaan kecil yang kadang-kadang dapat membingungkan.

Ke-versatile-an metode finite element haruslah dibayar dengan hasil yang mengandung keraguan, sehingga orang haruslah waspada terhadap hasil-hasilnya dan hati-hati dalam mengambil kesimpulan. Pengecekan dengan hasil eksperimental harus selalu dilakukan. Ironisnya adalah dititik dimana terjadi tegangan hoop maksimum maksimum, yaitu titik potong antara pipa utama dan pipa cabang di bidang  $\beta = 0^\circ$ , di titik itulah tidak dapat dipasang strainingage.

## 7. HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI DISTRIBUSI TEGANGAN PADA PERCABANGAN PIPA

Banyaknya variabel yang terlibat pada percabangan pipa menyebabkan banyaknya macam kombinasi spesimen beban-tumpuan yang dapat dibuat yang menghasilkan banyak macam data yang dapat diperoleh, diolah dan dipresentasikan.

Sebagai contoh, perhatikan percabangan pipa  $90^\circ$  dengan  $d_{nom} = D_{nom} = 4.0"$ . Kasus-kasus yang dapat dipelajari adalah : (1) pipa utama dijepit pada salah satu ujungnya, sedang bebannya adalah (1) tekanan internal, (2) eksternal in-plane, (3) eksternal out-of-plane di ujung bebas pipa cabang, (4) momen puntir di ujung bebas pipa cabang, (5) in-plane di ujung bebas pipa utama, (6) eksternal di ujung bebas pipa utama, (7) momen puntir di ujung bebas pipa utama, (8) pipa utama dijepit di kedua ujungnya dengan beberapa macam beban di ujung pipa cabang. Belum lagi jika  $d_{nom}/D_{nom}$  diubah-ubah.

Ada lebih kurang 30 kasus percabangan pipa yang, baik dari hasil eksperimentalnya maupun data numeriknya

diterbitkan dalam proceedings seminar tersebut. Empat diantaranya dipresentasikan pada seminar internasional. Pengolahan data kasus-kasus lainnya akan memakan waktu yang tidak sedikit.

Untuk jelasnya dapatlah dirinci delapan makalah yang telah dipresentasikan dan 7 diantaranya diterbitkan dalam proceeding seminar yang bersangkutan :

1. Darmawan Harsokoesoemo, Gatot Santoso, "The Influence of Diameter Ratio On The Stress Concentration Around 90° Pipe Intersection Due to Internal Pressure", The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka Japan, April 10-15, 1994.
2. Darmawan Harsokoesoemo, Gatot Santoso, "Pengaruh Rasio Diameter Pada Distribusi Tegangan Pada Daerah Percabangan Pipa 60° Akibat Tekanan Internal", Seminar Metode Elemen Hingga, Bandung, 23-24 Desember 1993.
3. I Wayan Suweca, Djoeli Satrijo, "Pengalaman Dalam Pemodelan Elemen Hingga Untuk Perhitungan Distribusi Tegangan Pada Daerah Percabangan Pipa", Seminar Metode Elemen Hingga, Bandung, 23-24 Desember 1993.
4. Darmawan Harsokoesoemo, Giovanni B. R., I.W. Suweca, D. Satrijo, "Experimental Set-Up for Stress Distribution Around 60° Branch Pipe Connection Due to External Loads", Experimental & Theoretical Mechanics '93, Bandung, 7-9 Desember 1993.
5. Darmawan Harsokoesoemo, I.W. Suweca, B. Budiwantoro, D. Satrijo, "Distribusi Tegangan pada Daerah Percabangan Pipa 60° Akibat Beban Eksternal", Simposium Nasional Ilmu Pengetahuan dan Teknologi dalam Rekayasa Aeronotika, Bandung, 27-29 Juli 1993.
6. Darmawan Harsokoesoemo, S.

Around 90° Branch Pipe Connection Due to Internal Forces", The Third International Offshore and Polar Engineering Conferences, Singapore, 6-11 June, 1993.

7. Darmawan Harsokoesoemo, I.W. Suweca, D. Satrijo, "Experimental Investigations of Stress Distribution Around 90° Branch Pipe Connections Due To Internal Pressure", Pressure Vessel & Piping Technology Seminar, Singapore, May 24-25, 1993.
8. Darmawan Harsokoesoemo, Satryo Soemantri, Bagus Budiwantoro, Giovanni B. Rahardjo, Djoeli Satrijo, "Penelitian Eksperimental Distribusi Tegangan pada Percabangan Pipa Tegaklurus akibat Tekanan Internal", Makalah pada Evaluasi Akhir Tahun Penelitian Hibah Bersaing, Bandung, 14 Februari 1993.

## 8. ALGORITMA PERANCANGAN SISTEM PERPIPAAN

Sistem perpipaan mengalirkan fluida dari satu bejana (atau lebih) ke bejana (atau bagian-bagian) lainnya. Sistem Perpipaan dapat pula mengalirkan fluida dari satu bejana ke terminal pencurahan fluida.

Agar dapat melakukan fungsinya dengan baik, sistem perpipaan dilengkapi dengan berbagai macam katup, katup kendali atau control valves, katup pengaman, pompa, expansion loops, dll.

Agar sistem perpipaan dapat memikul fluida yang mengalir di dalamnya, beratnya sendiri dan dapat memikul beban eksternal, seperti beban angin, gempa, dll., maka sistem perpipaan harus ditumpu pada banyak titik tumpu dengan berbagai macam tumpuan.

Algoritma perancangan sistem Perpipaan dapat digambarkan terdiri dari beberapa langkah berikut :

1. Menentukan diameter internal pipa

yang diperlukan berdasarkan massa fluida yang mengalir per satuan waktu dan kecepatan aliran fluida

$$Q = \frac{\pi}{4} D_i^2 V \quad (3)$$

Q = Volume fluida yang mengalir per satuan waktu, m<sup>3</sup>/s

V = kecepatan aliran fluida, m/s

D<sub>i</sub> = diameter internal pipa, m.

2. Menetapkan tebal dinding pipa dan material pipa dengan menggunakan ketentuan-ketentuan yang ada dalam kode perancangan, seperti misalnya ANSI/ASME Code B31.3.

$$t_m = \frac{P D_o}{2 (SE_q + PY)} + A \quad (4)$$

t<sub>m</sub> = tebal dinding pipa minimum yang diperlukan

P = tekanan internal

D<sub>o</sub> = diameter eksternal pipa

S = tegangan yang diijinkan pada temperatur rancang

A = tambahan total dinding mengingat ada korosi, erosi dll.

Y = koefisien yang dapat dilihat pada kode perancangan

E<sub>q</sub> = faktor kualitas, yang harganya dapat dilihat pada kode perancangan

3. Menarik garis sistem perpipaan di antara bejana-bejana yang dihubungkan oleh sistem perpipaan, berdasarkan geografi dan elevasi permukaan tanah dan peralatan lain yang berada diantara bejana-bejana tersebut.
4. Menetapkan letak peralatan-peralatan, seperti katup-katup dll., yang diperlukan pada sistem perpipaan.
5. Menetapkan letak pipa belokan, titik percabangan, expansion loops dan titik-titik tangkapan dan pemisahan

pada sistem perpipaan.

7. Melakukan analisis fleksibilitas sistem perpipaan, yaitu menghitung besar arah gaya, momen, defleksi yang bekerja atau yang terjadi pada potongan-potongan berbahaya.
8. Menghitung tegangan-tegangan yang terjadi pada potongan-potongan berbahaya dengan menggunakan rumus-rumus dan ketentuan-ketentuan lain dalam kode perancangan.
9. Melakukan iterasi jika defleksi yang diperoleh pada langkah ke-7 dan tegangan yang diperoleh pada langkah 8 melebihi harga-harga yang diijinkan

Langkah 3, 4, dan 5 dilakukan oleh perancang sistem perpipaan berdasarkan pengalaman kumulatifnya setelah berkali-kali merancang sistem perpipaan. Pada langkah-langkah tersebut lebih banyak digunakan "rules of thumb" dan tabel-tabel yang disusun berdasarkan pengalaman daripada perhitungan berdasarkan rumus-rumus analitik. Langkah-langkah berikutnya yaitu langkah 6, 7 dan 8 merupakan kegiatan analitik, sebagian berdasarkan ketentuan-ketentuan dalam kode perancangan dan sebagian lain adalah analisis yang telah dikenal dalam mekanika, baik analisis teoritik maupun analisis numerik.

## 9. KONTRIBUSI PENELITIAN SISTEM PERPIPAAN PADA PROSES PERANCANGAN

Seperti telah dijelaskan pada bagian Pendahuluan, maka konsep kontribusinya perancangan, pembuatan, perakitan dan pengujian sistem perpipaan, jika berhasil diterima sebagai kode standar merupakan kontribusi nyata pada proses perancangan sistem perpipaan.

merancang sistem perpipaan adalah algoritma analisis fleksibilitas sistem dengan menggunakan program komputer, yaitu program komputer AUTOPIPE dari AUTODESK, Inc. dan program CAESAR II. Perlu dicatat disini bahwa analisis fleksibilitas sistem perpipaan adalah kegiatan analisis yang tidak dicakup dalam kode perancangan ANSI/ASME B31.3, sehingga diperlukan panduan diluar kode. Algoritma yang disusun dalam bentuk yang mudah dipahami oleh perancang, tidak seperti halnya buku-buku manual yang tebal-tebal dan sukar dimengerti, akan merupakan hasil proyek ini. Algoritma perancangan sistem perpipaan tersebut dapat dijadikan sebagai buku panduan untuk kursus-kursus singkat dalam meningkatkan kemampuan para perancang.

Distribusi tegangan pada percabangan pipa dan pipa belokan tidak tercantum dalam kode perancangan ANSI/ASME Code B31.3. Distribusi tegangan berbagai kasus percabangan pipa dan pipa belokan yang tertuang dalam diagram, kurva maupun tabel hasil proyek penelitian ini dapat digunakan oleh para perancang untuk memperoleh gambaran yang lebih luas tentang distribusi tegangan, besar tegangan maksimum dan lokasinya, pengaruh rasio diameter, dll. Hal tersebut akan memperdalam pengertian perancang sehingga kualitas hasil perancangannya dapat meningkat.

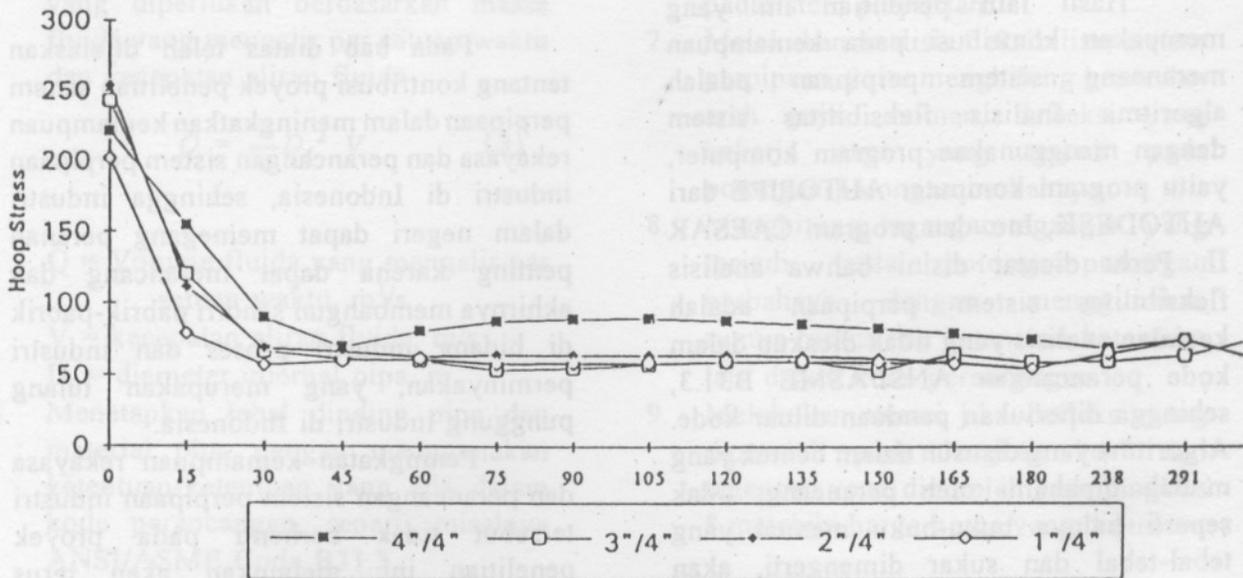
Disini dapat dicatat pula bahwa gaya dan momen yang bekerja pada percabangan pipa dan pipa belokan yang diperlukan untuk menghitung tegangan-tegangan yang terjadi dengan menggunakan rumus-rumus dalam kode perancangan, harus diperoleh dari analisis fleksibilitas sistem perpipaan yang tidak dicakup dalam kode perancangan.

tentang kontribusi proyek penelitian sistem perpipaan dalam meningkatkan kemampuan rekayasa dan perancangan sistem perpipaan industri di Indonesia, sehingga industri dalam negeri dapat memegang peranan penting karena dapat merancang dan akhirnya membangun sendiri pabrik-pabrik di bidang industri proses dan industri perminyakan, yang merupakan tulang punggung industri di Indonesia.

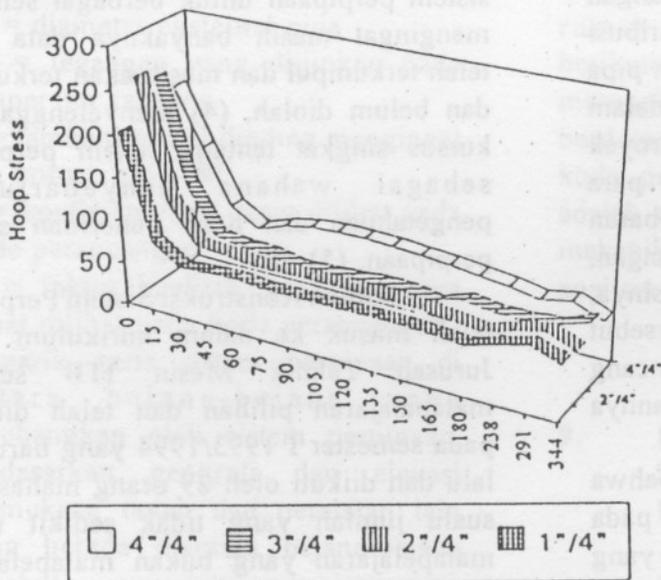
Peningkatan kemampuan rekayasa dan perancangan sistem perpipaan industri tersebut tidak berhenti pada proyek penelitian ini, melainkan akan terus berlanjut dalam wujud kegiatan : (1) mencantumkan matapelajaran Konstruksi Sistem Perpipaan dalam kurikulum Jurusan Teknik Mesin ITB, (2) memberikan tugas akhir, baik tingkat sarjana maupun tingkat pasca sarjana, dalam bidang sistem perpipaan, (3) menyiapkan makalah tentang sistem perpipaan untuk berbagai seminar, mengingat masih banyaknya data yang telah terkumpul dan masih akan terkumpul dan belum diolah, (4) menyelenggarakan kursus singkat tentang sistem perpipaan sebagai wahana penyebaran pengetahuan dan hasil penelitian sistem perpipaan, (5) dll.

Kuliah Konstruksi Sistem Perpipaan telah masuk ke dalam kurikulum 1993 Jurusan Teknik Mesin ITB sebagai matapelajaran pilihan dan telah dimulai pada semester I 1993/1994 yang baru saja lalu dan diikuti oleh 29 orang mahasiswa, suatu jumlah yang tidak sedikit untuk matapelajaran yang bukan matapelajaran wajib.

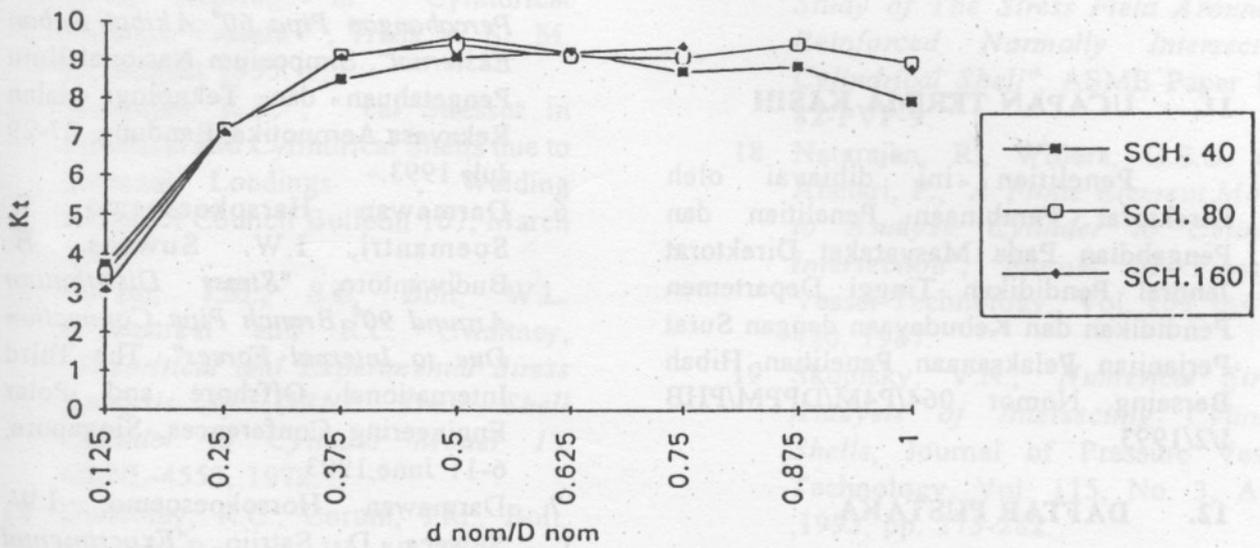
Pada saat ini sedang menyelesaikan tugas akhirnya dalam bidang sistem perpipaan, dua tugas sarjana dan dua lagi tugas pasca sarjana. Makalah tentang sistem perpipaan yang dipresentasikan dalam berbagai seminar dan diterbitkan dalam proceeding seminar, baik seminar di dalam maupun di luar negeri, terus



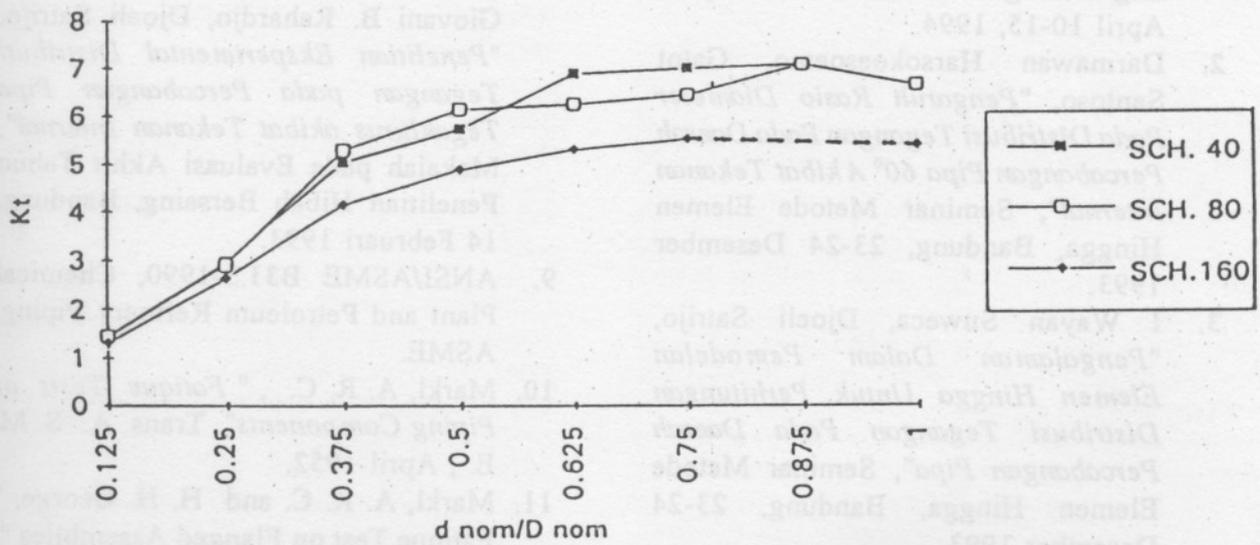
Gambar 4. Distribusi tegangan hoop pada pipa utama schedule 40



Gambar 5. Distribusi tegangan hoop pada pipa utama schedule 40



Gambar 6. Konsentrasi tegangan hoop pada pipa utama  $D/T = d/t$



Gambar 7. Konsentrasi tegangan aksial pada pipa utama  $D/T = d/t$

mengalir dari Laboratorium Perancangan Mesin ITB.

## 11. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Hibah Bersaing Nomor 064/P4M/DPPM/PHB I/2/1993.

## 12. DAFTAR PUSTAKA

1. Darmawan Harsokoesoemo, Gatot Santoso, "The Influence of Diameter Ratio On The Stress Concentration Around  $90^\circ$  Pipe Intersection Due to Internal Pressure", The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka Japan, April 10-15, 1994.
2. Darmawan Harsokoesoemo, Gatot Santoso, "Pengaruh Rasio Diameter Pada Distribusi Tegangan Pada Daerah Percabangan Pipa  $60^\circ$  Akibat Tekanan Internal", Seminar Metode Elemen Hingga, Bandung, 23-24 Desember 1993.
3. I Wayan Suweca, Djoeli Satrijo, "Pengalaman Dalam Pemodelan Elemen Hingga Untuk Perhitungan Distribusi Tegangan Pada Daerah Percabangan Pipa", Seminar Metode Elemen Hingga, Bandung, 23-24 Desember 1993.
4. Darmawan Harsokoesoemo, Giovanni B. R., I.W. Suweca, D. Satrijo, "Experimental Set-Up for Stress Distribution Around  $60^\circ$  Branch Pipe Connection Due to External Loads", Experimental & Theoretical Mechanics 1993, Bandung, 7-8 Desember 1993.
5. Darmawan Harsokoesoemo, I.W. Suweca, B. Budiwantoro, D. Satrijo, "Distribusi Tegangan pada Daerah Percabangan Pipa  $60^\circ$  Akibat Beban Eksternal", Simposium Nasional Ilmu Pengetahuan dan Teknologi dalam Rekayasa Aeronotika, Bandung, 27-29 Juli 1993.
6. Darmawan Harsokoesoemo, S. Soemantri, I.W. Suweca, B. Budiwantoro, "Stress Distribution Around  $90^\circ$  Branch Pipe Connection Due to Internal Forces", The Third International Offshore and Polar Engineering Conferences, Singapore, 6-11 June, 1993.
7. Darmawan Harsokoesoemo, I.W. Suweca, D. Satrijo, "Experimental Investigations of Stress Distribution Around  $90^\circ$  Branch Pipe Connections Due To Internal Pressure", Pressure Vessel & Piping Technology Seminar, Singapore, May 24-25, 1993.
8. Darmawan Harsokoesoemo, Satriyo Soemantri, Bagus Budiwantoro, Giovanni B. Rahardjo, Djoeli Satrijo, "Penelitian Eksperimental Distribusi Tegangan pada Percabangan Pipa Tegaklurus akibat Tekanan Internal", Makalah pada Evaluasi Akhir Tahun Penelitian Hibah Bersaing, Bandung, 14 Februari 1993.
9. ANSI/ASME B31.3-1990, Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping, ASME.
10. Markl, A. R. C. , " Fatigue Tests of Piping Components", Trans. A. S. M. E. , April 1952.
11. Markl, A. R. C. and H. H. George, " Fatigue Test on Flanged Assemblies ", Trans. A . S. M. E. , January 1950.
12. Eringen, A. C. et. al. " Stress Concentrations in Two Normally Intersecting Cylindrical Shells Subject to Internal Pressure", Welding Research Council Bulletin 139, April 1969.

13. Bijaard, F. F., "Stresses From Local Loadings in Cylindrical Pressure Vessels", Trans. A. S. M. E., August 1955.
14. Wichman, K.R., "Cal Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings", Welding Research Council Bulletin 107, March 1979.
15. Corum, J.M., S.E. Bolt, W.L. Greenstreet and R.C. Gwaltney, "Theoretical and Experimental Stress Analysis of ORNL Their Shell Cylinder to Cylinder Model 1", ORNL-4553, 1972.
16. Gwaltney, R.C., Corum, J.M., Bolt, S.E. and Bryson, J.W., "Experimental Stress Analysis of Cylinder to Cylinder Shell Models and Comparison with Theoretical Predictions", Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Nov. 1976, pp. 283-290.
17. Khan, A.S. et al., "A Comparative Study of The Stress Field Around a Reinforced Normally Intersection Cylindrical Shell", ASME Paper No. 82-PVP-9.
18. Natarajan, R., Widera, G.E.O. and Afshari, P., "A Finite Element Model to Analyze Cylinder to Cylinder Intersection", Journal of Pressure Vessel Technology., Vol. 109, p-411-420, 1987.
19. Skopisky, V.N., "Numerical Stress Analysis of Intersecting Cylinder Shells, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 115, No. 3, Aug. ,1993, pp. 275-282.
20. Mershan, J.L., "PVRC Research on Reinforcement of Opening in Pressure Vessels", The Welding Research Council Bulletin 89, July 1963.