



STUDI SURVAI PENELITIAN KONDISI PERKERASAN JALAN UNTUK PENELITIAN PERKERASAN JALAN

A. Tatang Dachlan

RINGKASAN

Tulisan ini menguraikan suatu studi pengembangan metode penilaian kondisi lapis permukaan jalan, yang sejak tahun 1988 dilakukan pada penelitian perkerasan jalan, yaitu sebagai bagian dari pada program kerja sama penelitian antara Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dengan **TRL (Transport and Research Laboratory)**, Inggris.

Berbagai prosedur dan formulir standar yang telah ada sebelumnya dapat digunakan untuk kegiatan suatu survai dengan mencatat berbagai kerusakan dan kondisi. Tingkat ketelitian pencatatan sering kali erat kaitannya dengan tujuan survai, tetapi dalam beberapa hal diperlukan survai yang lebih detail dan mempunyai ketelitian yang lebih tinggi. Pengumpulan data pada penelitian perkerasan yang dilaksanakan ini dilakukan sampai dengan tiga tahap, di mana bahwa dalam tiga tahap tersebut diharapkan sudah dapat memenuhi kebutuhan studi ini.

Beberapa contoh prosedur survai telah dipelajari. Sebagai hasilnya adalah telah tersusun petunjuk survai kondisi Tahap-1, Tahap-2 dan Tahap-3, dikenal dengan PCS-1, PCS-2 dan PCS-3, sebagaimana diuraikan pada uraian selanjutnya. Disamping itu diuraikan juga hal-hal yang berkaitan dengan pengaturan/pengorganisasian survai serta hal-hal yang dialami pada saat penerapannya. Cara pelaksanaan yang dipilih mendekati cara yang diuraikan pada **TRRL Overseas Road Note 1**, tetapi dengan penilaian bentuk kerusakan retak yang lebih mendetail.

Klasifikasi retak yang digunakan pada survai Tahap-1 ini diambil dari prosedur yang sama dengan yang telah diterapkan pada proyek **JKR-TRRL**, di Malaysia. Penggunaan klasifikasi kerusakan dan penekanan pada nilai kuantitatifnya didasarkan pada hasil pengukuran-pengukuran, dengan maksud untuk mengurangi penyimpangan penilaian sehingga dapat memperbaiki tingkat kebenaran data yang dikumpulkan.

Pada survai ini tidak dilakukan upaya untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan, karena hal ini hanya dapat dilakukan melalui penyelidikan yang mendalam termasuk pengujian struktural dan pengambilan contoh (pembuatan lubang) serta penguasaan pengetahuan tentang sifat-sifat bahan. Meskipun demikian, pengalaman menunjukkan bahwa dengan melihat ada atau tidak adanya kerusakan-kerusakan tertentu serta pengetahuan tentang posisi kerusakan yang terjadi, misalnya apabila dikaitkan dengan pola lalu lintas, maka terjadinya penyebab kerusakan akan mudah dapat dikenali atau diidentifikasi.

SUMMARY

This paper describes a development of the road surface condition methode, that carried out for research since 1988, and as part of the IRE-TRL colaborative research programme. Various standard forms and procedures exist which can be used for such a survey and which record a variety of defects and conditions. The detail resorded is often closely related to the purpose of the survey although, in some cases an apparent high level of detail and accuracy is suggested. This methode in this study is expected that up to three levels of detail are required.

Examples are listed in forms and the content of these has been reviewed and assessed. As a result, three procedures have been devised and described below. Details relating to the organisa-tion of a survey and experience in its use are also given. The procedures chosen closely follows that given in TRRL Overseas Road Note-1 although, more detail is reqiured in assessing cracking defects.

The classification of cracking used derives from a procedure adopted on the JKR-TRRL projects in Malaysia. The use of this classification and emphasis on quantitative assessment is intended to reduce operator bias and thus improve the reliability of any data gathered.

The assessment to identify the cause of distresses is not made in the survey, since it is believed that this can only be determined with certainty by performing an in-depth investigation including structural tests and trial pits and with knowledge of the properties of materials. However, from experience, the presence or absence of certain defects and knowledge of their position eg. with respect to traffic patterns can enable certain forms of distress to be identified.

1. PENGENALAN DAN LATAR BELAKANG

Tingkat ketelitian data yang perlu dikumpulkan pada survei kondisi perkerasan tergantung pada tujuan survei tersebut. Pengumpulan data pada penelitian perkerasan yang dilaksanakan sebagai bagian Program Penelitian **P3J-TRRL** ini dilakukan sampai dengan tiga tahap, di mana diharapkan bahwa dalam tiga tahap tersebut dapat memenuhi kebutuhan penelitian ini.

Tahap pengumpulan data tersebut adalah sebagai berikut:

- **Tahap-1 (PCS-1)** : Penilaian secara visual dan beberapa pengukuran setiap jarak 100 m pada beberapa ruas jalan, yang kemudian diikuti dengan survei **NAAS-RA** untuk setiap internal jarak 0,5 sampai 1 km.
- **Tahap-2 (PCS-2)** : Penilaian secara visual dan pengukuran yang lebih teliti pada setiap sub-ruas jalan sepanjang 10 m.
- **Tahap-3 (PCS-3)** : Pengukuran yang lebih mendetail pada titik yang terletak pada lokasi dan posisi tertentu dengan menggunakan sebuah kisi-kisi (grid) seluas 1 meter persegi.

Survei Tahap-1 (PCS-1) adalah ditujukan untuk mengidentifikasi suatu ruas jalan yang teliti (mendetail) dengan cara penilaian relatif cepat tetapi cukup untuk pelaksanaan survei berikutnya.

Survei Tahap-2 (PCS-2), adalah dilaksanakan pada studi pemantauan perkerasan, yang

meliputi penentuan pembagian ruas jalan menjadi bagian-bagian ruas jalan yang lebih pendek dan pengukuran yang lebih teliti (mendetail) lagi misalnya pengukuran lebar retak.

Pada survei Tahap-3 (PCS-3), pengukuran dilakukan menggunakan suatu petak atau kisi-kisi (grid) yang relatif kecil dengan luas kira-kira satu meter persegi, ditempatkan di sekitar titik yang ditinjau. Dari survei jenis ini dapat dibuat suatu kurva antara lendutan dan umur jalan yang juga menyangkut bentuk hubungan (korelasi) antara sifat-sifat struktur perkerasan dengan nilai kondisi permukaan perkerasan.

Untuk keperluan praktis, survei Tahap-1 atau yang sejenis dapat digunakan untuk mengidentifikasi ruas-ruas jalan yang memerlukan pemeliharaan atau penyelidikan lebih jauh untuk perencanaan suatu perkerasan. Untuk tujuan-tujuan penelitian, survei Tahap-1 ini (yang menyangkut penilaian secara kualitatif dan kuantitatif) adalah digunakan untuk mengidentifikasi berbagai tingkat (rentang) kondisi pada perkerasan lama, yaitu dengan cara menilai jenis serta tingkat keparahan dan penyebaran kerusakan serta melalui pengambilan contoh atau foto-foto kerusakan yang mewakili data dikumpulkan dapat digunakan juga untuk mengembangkan suatu hubungan (kurva) penurunan kondisi perkerasan yang diselidiki.

Berbagai prosedur dan formulir standar yang telah ada sebelumnya dapat digunakan untuk kegiatan suatu survei dengan tujuan tertentu, yang mana dalam hal ini dapat dicatat berbagai kerusakan dan kondisi. Dalam beberapa hal dikehendaki survei yang lebih detail dan mempunyai ketelitian yang lebih tinggi.

Dari hasil penelaahan contoh prosedur survei yang telah dipelajari, maka disusun konsep petunjuk survei kondisi Tahap-1 sampai Tahap-3 sebagaimana diuraikan pada butir-butir di bawah. Di samping itu diuraikan juga

hal-hal yang berkaitan dengan pengaturan/pengorganisasian survai serta hal-hal yang dialami pada saat pene-rapannya. Cara pelaksanaan yang dipilih mendekati cara yang diuraikan pada TRRL Overseas Road Note 1, tetapi dengan penilaian retak yang lebih teliti (mendetail).

Penilaian bentuk retak yang digunakan pada survai ini diambil dari prosedur yang diterapkan pada proyek JKR-TRRL di Malaysia. Penggunaan klasifikasi kerusakan dan penekanan penilaian adalah pada nilai kuantitatifnya (berdasarkan pengukuran - pengukuran) dengan maksud untuk mengurangi penyimpangan penilaian sehingga dapat memperbaiki kebenaran atau keandalan data yang dikumpulkan.

Pada survai ini tidak dilakukan upaya untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan, karena hal ini hanya dapat dilakukan melalui penyelidikan yang mendalam seperti pengujian struktur dan pengambilan contoh dan pembuatan lubang uji serta penguasaan pengetahuan tentang sifat-sifat bahan. Meskipun demikian, pengalaman menunjukkan bahwa dengan melihat ada atau tidak adanya kerusakan-kerusakan tertentu serta pengetahuan tentang posisinya, misalnya apabila dikaitkan dengan pola lalu lintas, maka terjadinya penyebab kerusakan akan segera dapat dikenali.

Pemilihan bagian-bagian ruas jalan untuk penyelidikan yang lebih teliti (mendetail) pada penelitian tahap berikutnya didasarkan pada data hasil survai PCS-1, hasil analisa data perencanaan dan pelaksanaan (desk study) serta pertimbangan terhadap beberapa parameter yang dapat mempengaruhi perilaku perkerasan selama umur rencananya.

2. PENILAIAN KONDISI TAHAP-1 (PCS-1)

Penilaian atau pengukuran tipe kerusakan dilakukan pada Formulir PCS-1 dengan mencantumkan hasil penilaian dan pengukuran mengenai tingkat keparahan (intensity), penyebaran (extent) dan posisi kerusakan. Pencatatan dilakukan pada setiap jarak 100 meter sepanjang ruas jalan tersebut. Jenis-jenis kerusakan yang diukur seperti diuraikan pada uraian berikut :

2.1 A L U R (Rutting)

Alur diukur di bawah mistar 2 meter dengan

alat pengukur alur (wedges) dengan pencatatan sebagai berikut :

- 2.1.1. Posisi alur, jejak roda bagian luar atau outer wheel track (OWT) dan jejak roda bagian dalam atau inner wheel track (IWT).
- 2.1.2. Kedalaman alur maksimum (M = Maximum), diukur pada titik yang menunjukkan atau diperkirakan mempunyai alur paling dalam.
- 2.1.3. Kedalaman alur rata-rata (A = Average), diambil nilai rata-rata dari pengukuran alur pada jarak-jarak 10, 50 dan 90 meter.
- 2.1.4. Jenis alur (T = Type), dibedakan karena disebabkan deformasi atau menurun (**D = Depression**) atau bergeser (**P = Pushing**).

2.2 RETAK-RETAK (Cracks)

- 2.2.1. Posisi retak (P = Position) dibedakan terdiri dari retak tepi (**E = Edge**), **OWT**, retak di antara jejak roda (**ML = Middle Lane**), **IWT**, retak di daerah tengah jalan (**CL = Centre Line**).
- 2.2.2. Tingkat keparahan retak (I = Intensity); yang dicatat adalah tingkat keparahan yang paling tinggi di antara tingkat keparahan sebagai berikut :
 - 0** - Tidak ada retak;
 - 1** - Retak tunggal;
 - 2** - Retak lebih dari satu yang retakannya tidak saling berhubungan;
 - 3** - Retak lebih dari satu yang retakannya saling berhubungan;
 - 4** - Retak lebih dari satu yang retakannya saling berhubungan satu sama lain dan jarak retakannya kurang dari 300 mm (membentuk bongkahan atau blok-blok);
 - 5** - Retak parah disertai lepasnya blok-blok.
- 2.2.3. Lebar retak (W = width)
Pengukuran dilakukan menggunakan fuller sebagai pengukur retak dan dicatat dalam satuan milimeter.
- 2.2.4. Jenis Retak (T = Type); Beberapa jenis kerusakan retak yang dicatat didasarkan kepada arah atau bentuk dari pada kerusakan retak yang paling parah seperti yang disebutkan di atas

kemudian dipilih salah satu dari jenis-jenis berikut :

- Arah memanjang (L = Longitudinal);
- Arah melintang (T = Transversal);
- Parabola (P = Parabola);
- Tidak beraturan (I = Irregular);
- Blok atau bongkah (B = Blok), retakannya tertutup atau berhubungan tapi kerusakan tersebut bukan disebabkan oleh lalu lintas.
- Retak kulit buaya (C = Crocodile), retakannya tertutup atau berhubungan dan kerusakan tersebut disebabkan oleh lalu lintas.

2.2.5. **Penyebaran Retak (E = Extent)**, merupakan panjang daerah yang retak atau daerah yang dipengaruhi retak, dan dicatat dalam satuan meter.

2.3 AMBLAS (Depression)

2.3.1. Jumlah amblas (**N = Normal**);

2.3.1. Jumlah luas (**A = Area**) dalam satuan meter persegi.

2.4 LUBANG-LUBANG (Potholes)

Yang dimaksud dengan lubang adalah rongga pada permukaan yang mempunyai diameter kira-kira 150 mm atau lebih dan mempunyai kedalaman kira-kira 25mm atau lebih. Pencatatan dilakukan sebagai berikut:

2.4.1. Jumlah lubang (**N = Number**);

2.4.2. Jumlah luas lubang; dalam satuan meter persegi;

2.5 TAMBALAN/PERBAIKAN STRUKTUR (Patches of Structures)

2.5.1. Posisi: OWT, IWT dan keseluruhan (**ALL**);

2.5.2. Jumlah (**N**);

2.5.3. Panjang/jarak (**E**) dalam satuan meter pada bekas jejak roda, **OWT, IWT**;

2.5.4. Level (**L**), beda tinggi maksimum di atas atau dibawah permukaan jalan.

2.5.5. Luas (**A = Area**), dalam satuan meter persegi;

2.5.6. Jenis (**T = Type**), pencatatan dipilih salah satu jenis bahan campuran berikut :

- Batu pecah (**G = Gravel**);
- Penetrasi Makadam (**P = Penetration Macadam**);
- Aspal campuran panas (**H = Hot Mix**).

2.6 TAMBALAN PERMUKAAN (Surface Patches)

(lihat 2.5, 1 s/d 5)

Pencatatan dipilih jenis lapis permukaan sebagai berikut:

- Buras (**S = Sand Seal**);
- Burtu (**DB = SBST**);
- Burda (**SB = SBST**).

2.7 TEKSTUR PERMUKAAN (Surface Texture)

Tekstur permukaan bisa dibedakan terhadap gradasi campuran. Gradasi kasar akan menampilkan tekstur yang lebih kasar. Ada 3 macam tekstur permukaan jalan yang perlu dicatat yaitu :

2.7.1. Halus (**S = Smooth**)

2.7.2. Normal (**N = Normal**)

2.7.3. Kasar (**R = Rough**)

2.8 TAMPAK PERMUKAAN (Surface Appearance)

Tampak permukaan yang dicatat dibedakan terhadap keadaan kandungan aspal yang tampak di atas permukaan jalan, kemudian dicatat salah satu dari tingkat kerusakan sebagai berikut:

- - 2 - Pelepasan butir (Ravelling);
- - 1 - Kekurangan aspal atau kurus (Dry/Lean);
- 0 - Normal;
- +1 - Berserat-serat halus seperti retak rambut tetapi bukan retak (Veins);
- +2 - Kelebihan aspal atau aspal gemuk (Pools Bitumen);
- +3 - Aspal meleleh dari bagian bawah permukaan (Bleeding).

2.9 PENGELUPASAN BUTIR (Picking out)

- Jumlah dalam satuan meter persegi.

2.10 PELIPATAN/BERGULUNG (Slippage)

- Ada/tidak ada.

2.11 GELOMBANG/KERITING (Waves)

- Ada/tidak ada.

2.12 SAMBUNGAN MEMANJANG (Longitudinal Joint)

- 2.12.1. Normal (N = Normal);
- 2.12.2. Ambias (D = Depression);
- 2.12.3. Pelepasan Butir (R = Ravelling);
- 2.12.4. Tambalan (P = Patching).

2.13 KERUSAKAN TEPI (Edge Defect)

- 2.13.1. Retak (C = Cracks);
- 2.13.2. Gompal (S = Spalling);
- 2.13.3. ambias (D = Depression).

2.14 KEDUDUKAN BAHU JALAN (Shoulder)

- 2.14.1. Lebih rendah dari permukaan perkerasan (L = Lower);
- 2.14.2. Rata dengan permukaan perkerasan (N = Normal);
- 2.14.3. Lebih tinggi dari permukaan perkerasan (H = Higher).

2.15 BENTUK PROFIL MELINTANG JALAN (Road Shape)

- 2.15.1. Baik, cembung (G = Good);
- 2.15.2. Datar (F = Flat);
- 2.15.3. Cekung (D = Dish).

2.16 DRAINASE (Drainage)

- 2.16.1. Berfungsi efisien (G = Good);
- 2.16.2. Kurang berfungsi (F = Fair);
- 2.16.3. Tidak berfungsi (P = Poor), tidak efisien misalnya tertahan, tergerus, mampet dan lain-lain.

2.17 LEBAR PERKERASAN JALAN (Road Width)

1. Dinyatakan dalam satuan meter.

3. PENILAIAN KONDISI TAHAP-2 (PCS-2)

Seperti pada Penilaian Kondisi Tahap-1, maka PCS-2 mencatat bentuk-bentuk

kerusakan yang dilaporkan dan dicatat atau diukur adalah persentase dari tingkat keparahan, luas kerusakan yang ditentukan dengan jarak posisinya seperti yang dikehendaki dalam Formulir PCS-2 terlampir.

3.1 A L U R (Rutting)

Alur diukur dibawah mistar 2 meter dengan alat pengukur alur (Wedges) dengan pencatatan sebagai berikut :

- 3.1.1. Posisi alur, jejak roda bagian luar atau outer wheel track (OWT) dan jejak roda bagian dalam atau inner wheel track (IWT).
- 3.1.2. Kedalaman alur maksimum (M = Maximum), diukur pada titik yang menunjukkan atau diperkirakan mempunyai alur paling dalam diantara jejak roda sepanjang 10 m untuk satu subseksi.
- 3.1.3. Jenis alur (T = Type), dibedakan karena disebabkan deformasi atau menurun (D = Depression) atau bergeser/ menggulung (P = Pushing).

3.2 RETAK-RETAK (Cracks)

- 3.2.1. Posisi retak (P = Position) dibedakan terdiri dari retak tepi (E = Edge), OWT, retak di antara jejak roda (ML = Middle Lane), IWT, retak di daerah tengah jalan (CL = Centre Line).
- 3.2.2. Tingkat keparahan retak (I = Intensity); yang dicatat adalah tingkat keparahan yng paling tinggi di antara tingkat keparahan sebagai berikut :

- 0 - Tidak ada retak;
- 1 - Retak tunggal;
- 2 - Retak lebih dari satu yang retakannya tidak saling berhubungan;
- 3 - Retak lebih dari satu yang retakannya saling berhubungan;
- 4 - Retak lebih dari satu yang retakannya saling berhubungan satu sama lain dan jarak retakannya kurang dari 300 mm (membentuk bongkahan atau blok-blok);
- 5 - Retak parah disertai lepasnya blok-blok.

3.2.3. Lebar retak (W = width)

Pengukuran dilakukan menggunakan fuller sebagai pengukur retak dan dicatat dalam satuan milimeter.

3.2.4. **Jenis Retak (T = Type)**; Beberapa jenis kerusakan retak yang dicatat didasarkan kepada arah atau bentuk dari pada kerusakan retak yang paling parah seperti yang disebutkan di atas kemudian dipilih salah satu dari jenis-jenis berikut :

- **Arah memanjang (L = Longitudinal)**;
- **Arah melintang (T = Transversal)**;
- **Parabola (P = Parabola)**;
- **Tidak beraturan (I = Irregular)**;
- **Blok atau bongkah (B = Blok)**, retaknya tertutup atau berhubungan tapi kerusakan tersebut bukan disebabkan oleh lalu lintas.
- **Retak kulit buaya (E = Crocodile)**, retaknya tertutup atau berhubungan dan kerusakan tersebut disebabkan oleh lalu lintas.

3.2.5. **Penyebaran Retak (E = Extent)**, merupakan panjang daerah yang retak atau daerah yang dipengaruhi retak, dan dicatat dalam satuan meter.

3.3 TAMBALAN/PERBAIKAN STRUKTUR (Patches of Structures)

3.3.1. Posisi: OWT, IWT dan keseluruhan (**ALL**);

3.3.2. **Jumlah (N)**;

3.3.3. **Panjang/jarak (E)** dalam satuan meter pada bekas jejak roda, **OWT**, **IWT**;

3.3.4. **Level (L)**, beda tinggi maksimum di atas atau dibawah permukaan jalan.

3.3.5. **Luas (A = Area)**, dalam satuan meter persegi;

3.3.6. **Jenis (T = Type)**, pencatatan dipilih salah satu jenis bahan campuran berikut :

- Batu pecah (**G = Gravel**);
- Penetrasi Makadam (**P = Penetration Macadam**);
- Aspal campuran panas (**H = Hot Mix**).

3.4 TAMBALAN PERMUKAAN (Surface Patches)

(lihat 3.3, 1 s/d 5)

Pencatatan dipilih jenis lapis permukaan sebagai berikut:

- Buras (**S = Sand Seal**);
- Burtu (**DB = SBST**);
- Burda (**SB = SBST**).

3.5 LUBANG-LUBANG (Potholes)

(Lihat 3.3, 1 s/d 5)

Yang dimaksud dengan lubang adalah rongga pada permukaan yang mempunyai diameter kira-kira 150 mm atau lebih dan mempunyai kedalaman kira-kira 25 mm atau lebih. Pencatatan dilakukan seperti disebutkan pada 3.3 dari 1 s/d 5.

3.6 TEKSTUR PERMUKAAN JALAN (Surface Texture)

Tekstur permukaan bisa dibedakan terhadap gradasi campuran. Gradasi kasar akan menampilkan tekstur yang lebih kasar. Ada 3 macam tekstur permukaan jalan yang perlu dicatat yaitu :

- 3.6.1. Halus (**S = Smooth**)
- 3.6.2. Normal (**N = Normal**)
- 3.6.3. Kasar (**R = Rough**)

3.7 TAMPAK PERMUKAAN (Surface Appearance)

Tampak permukaan yang dicatat adalah dibedakan terhadap keadaan kandungan aspal yang tampak di atas permukaan jalan, kemudian dicatat salah satu dari tingkat kerusakan sebagai berikut:

- -2 - Pelepasan butir (Ravelling);
- -1 - Kekurangan aspal atau kurus (Dry/Lean);
- 0 - Normal;
- +1 - Berserat-serat halus seperti retak rambut tetapi bukan retak (Veins);
- +2 - Kelebihan aspal atau aspal gemuk (Pools Bitumen);
- +3 - Aspal meleleh dari bagian bawah permukaan (Bleeding).

3.8 BERGULUNG (Slippage)

- Ada/tidak ada.

3.9 GELOMBANG/KERITING (Waves)

- Ada/tidak ada.

3.10 SAMBUNGAN MEMANJANG (Longitudinal Joint)

- 3.10.1. Normal (N = Normal);
 - 3.10.2. Amblas (D = Depression);
 - 3.10.3. Pelepasan Butir (R = Ravelling);
 - 3.10.4. Tambalan (P = Patching).
- ### 3.11 KERUSAKAN TEPI (Edge Defect)
- 3.11.1. Retak (C = Cracks);
 - 3.11.2. Gompal (S = Spalling);
 - 3.11.3. amblas (D = Depression).

4. PENILAIAN KONDISI TAHAP-3

Pada Penilaian Kondisi tahap ketiga, sebagian besar pencatatan hampir sama dengan penilaian tahap lainnya namun untuk tahap ketiga ini dilakukan pada luas yang terbatas dan menggunakan kisi-kisi (grid) seluas 1 m². Pencatatan disediakan Formulir PCS- 3 terlampir yang ditetapkan untuk mencatat keparahan kerusakan, jarak dan posisi yang diperlukan untuk dinilai sebagai berikut :

4.1 A L U R (Rutting)

Alur diukur dibawah mistar 2 meter dengan pencatatan sebagai berikut :

- 4.1.1. Posisi, jejak roda bagian luar outer wheel track (OWT) dan jejak roda bagian dalam atau inner wheel track (IWT).
- 4.1.2. Kedalaman alur (Depth), diukur disekitar titik penurunan (alur).
- 4.1.3. Tipe / Jenis / bentuk (Type), dibedakan dengan deformasi/menurun (D = Depression) atau bergeser (P = Pushing).

4.2 RETAK (Cracks)

- 4.2.1. Posisi retak (P = Position), yang penting dilaporkan hasil pencatatan dengan menggunakan sebuah kisi-kisi (grid) berjarak 10 cm seluas 1 m².
- 4.2.2. Panjang retak (L = Length); merupakan jumlah panjang retak atau daerah yang dipengaruhi retak dalam satuan meter.
- 4.2.3. Tingkat keparahan retak (I = Inten-

sity); penilaian secara visual yang dicatat adalah tingkat keparahan yang paling tinggi di antara tingkat keparahan sebagai berikut :

- 0 - Tidak ada retak;
- 1 - Retak tunggal;
- 2 - Retak lebih dari satu yang retakannya tidak saling berhubungan;
- 3 - Retak lebih dari satu yang retakannya saling berhubungan;
- 4 - Retak lebih dari satu yang retakannya saling berhubungan satu sama lain dan jarak retakannya kurang dari 300 mm (membentuk blok-blok);
- 5 - Retak parah disertai lepasnya blok-blok.

4.2.4. Lebar retak (Width)

Pengukuran dilakukan menggunakan fuller sebagai pengukur retak dan dicatat dalam satuan milimeter.

- 4.2.5. Jenis Retak (T = Type); Beberapa jenis kerusakan retak yang dicatat didasarkan kepada arah atau bentuk dari pada kerusakan retak yang paling parah seperti yang disebutkan di atas kemudian dipilih salah satu dari jenis-jenis berikut :

- Arah memanjang (L);
- Arah melintang (T);
- Parabola (P);
- Tidak beraturan(I);
- Blok atau bongkah (B), retakannya tertutup atau berhubungan tapi kerusakan tersebut bukan disebabkan oleh lalu lintas.
- Retak kulit buaya (C), retakannya tertutup atau berhubungan dan kerusakan tersebut disebabkan oleh lalu lintas.

- 4.2.6. Kerusakan bentuk retak lainnya (Other Cracks), disebutkan posisi retak lainnya pada daerah tersebut seperti E (Edge), L (Longitudinal Joint), dan bentuk retak lainnya seperti H (Hair line).

4.3 TAMBALAN/PERBAIKAN STRUKTUR (Patches of Structures)

4.3.1. **Posisi:** OWT, IWT dan keseluruhan (ALL);

4.3.2. **Jumlah (N);**

4.3.3. **Panjang/jarak (E)** dalam satuan meter pada bekas jejak roda, OWT, IWT;

4.3.4. **Level (L)**, beda tinggi maksimum di atas atau dibawah permukaan jalan.

4.3.5. **Luas (A = Area)**, dalam satuan meter persegi;

4.3.6. **Jenis (T = Type)**, pencatatan dipilih salah satu jenis bahan / campuran berikut :

- Batu pecah (G = Gravel);
- Penetrasi Makadam (P = Penetration Macadam);
- Aspal campuran panas (H = Hot Mix).

4.4 TAMBALAN PERMUKAAN (Surface Patches)

(lihat 4.3, 1 s/d 5)

Pencatatan dipilih lapis permukaan sebagai berikut:

- Buras (S = Sand Seal);
- Burtu (DB = SBST);
- Burda (SB = SBST).

4.5 TEKSTUR PERMUKAAN (Surface Texture)

Tekstur permukaan bisa dibedakan terhadap gradasi campuran. Gradasi kasar akan menampilkan tekstur yang lebih kasar. Ada 3 macam tekstur permukaan jalan yang perlu dicatat yaitu :

- 4.5.1. Halus (S)
- 4.5.2. Normal (N)
- 4.5.3. Kasar (R)

4.6 TAMPAK PERMUKAAN (Surface Appearance)

Tampak permukaan yang dicatat adalah dinilai terhadap keadaan kandungan aspal yang tampak di atas permukaan jalan, kemudian dicatat salah satu dari tingkat kerusakan sebagai berikut :

- -2 - Pelepasan butir (Ravelling);
- -1 - Kekurangan aspal atau kurus (Dry/Lean);
- 0 - Normal;
- +1 - Berserat - serat halus seperti retak rambut tetapi bukan retak (veins);
- +2 - Kelebihan aspal atau aspal gemuk (Pools Bitumen);
- +3 - Aspal meleleh dari bagian bawah permukaan (Bleeding).

4.7 LUBANG (Pothole)

(Lihat 4.3)

4.8 GULUNGAN/DORONGAN (SLIPPAGE)

Ada/Tidak.

5. KOMPOSISI TIM DAN CARA KERJA

Prosedur ini telah digunakan setelah melalui beberapa tahap percobaan, penerapan dan penyempurnaan di lapangan. Dari pengalaman penggunaan prosedur ini telah diperoleh suatu cara kerja dengan susunan tim yang optimum.

Tim terdiri dari 3 orang teknisi, 1 sopir, dan 2 orang pengatur lalu lintas. Pengukuran retak dan alur dikerjakan secara simultan oleh 2 orang teknisi sedangkan penilaian keseluruhan dan pencatatan dilakukan oleh teknisi ketiga, yang juga bertindak sebagai ketua tim.

Sebelum data dimasukkan ke dalam Formulir PCS-1, terlebih dahulu data tersebut (terutama mengenai retak dan alur) dicatat pada buku catatan lapangan yang disediakan, kemudian pada akhir setiap 100 m data dan hal - hal lain dimasukkan ke dalam Formulir PCS 1 (pengisian harus lengkap).

Selama survai dilakukan, kendaraan yang digunakan untuk survai ditempatkan pada posisi sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai pelindung terhadap lalu lintas. Pengatur lalu lintas berdiri pada suatu tempat sejauh 30 - 50 meter dari daerah yang sedang di survai dan mengatur lalu lintas sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu survai dan tidak terjadi kemacetan.

6. PERALATAN

Perlengkapan survai penilaian kondisi pada umumnya menggunakan beberapa peralatan,

kecuali untuk beberapa hal diperlukan peralatan khusus.

Adapun peralatan yang digunakan untuk PCS-1 dan PCS-2 adalah sebagai berikut :

1. Meteran gelinding (Wheel meter);
2. Mistar dengan sisi yang rata (Straight Edge) panjang 2 meter
3. Meteran pita baja stainless panjang 3 meter;
4. Pengukur alur (wedges);
5. Pengukur lebar retak (fuller);
6. Jaket refleksi, jas hujan;
7. Rambu - rambu lalu - lintas;
8. Formulir standar;
9. Buku petunjuk penilaian kondisi jalan;
10. kendaraan ringan.
11. Catatan, papan clip dan alat bantu lainnya.

Peralatan untuk PCS-3 sama dengan untuk PCS-1 dan PCS-2 tetapi ditambah dengan :

1. Camera;
2. Tripot;
3. Kisi - kisi ukuran 10 cm seluas 1 m².

7. DAFTAR PUSTAKA

1. TRRL Overseas Road Note 1, Maintenance for District Engineers.
2. Paterson WDO (1967) Road Deterioration and Maintenance.

PENULIS

Ir. A. Tatang Dachlan, Sarjana Teknik Sipil ITS adalah Staff bidang Teknik Jalan, selama ini turut aktif dalam kelompok pengkajian dan penelitian teknik jalan sejak tahun 1976

Sheet :
of :

DATE		
Date	Mont	Year

CONTRACT / PACKAGE	
Name:	
N	:

TRAFFIC DIRECTION :	TRAFFIC LINES NO :	OF :	SECTION DATUM POINT :	Km :	SECTION NO :	From.Km.	To Km.
---------------------	--------------------	------	-----------------------	------	--------------	----------	--------

[illegible]

Remarks :	
-----------	--

Recorder : _____

14: SRF TEX = Surface Texture
15: SRF APP = Surface Appearance
-2 = Raveling +1 = Voids
-1 = Dry/Lean +2 = Pools asphalt
0 = Normal +3 = Bleeding

16: PIC = Picking Out
17: SLP = Slippage
18: WAV = Waves

10: LNJ = Longitudinal Joint
20: EDG = Edge
21: SHD = Shoulder
22: RHS = Road Shape
23: DRN = Drainage
24: Road Width
25: Sev = Severity
26: Min Spc = Minimum Spacing
27: NBR = Number

Transversal Cracks

~~FIT-PCST-M92~~
Rev. May 92

Sheet :
of :

CONTRACT/ PACKAGE	
Name:	
No :	

Time Started:	Remarks :	Re cord :
Time Finished:		

- ```

20 : SURFAPP = Surface Appearance
 -2 = Flaveling +1 = Veneer
 -1 = Dry/Lean +2 = Pools asphalt
 0 = Normal +3 = Bleeding

21 : SLP = Slipage
22 : WAV = Waving
23 : LTN = Longitudinal Joint
24 : EDG = Edge defect

```

FH:PCS2-MW2, revised may 92



# PAVEMENT CONDITION SURVEY LEVEL 3

|          |           |      |       |      |       |
|----------|-----------|------|-------|------|-------|
| PROVINCE | ROAD LINK | DATE |       |      |       |
| Name:    | Name:     | day  | month | year | Name: |
| No :     | No :      |      |       |      | No:   |

SHEET No :  
01 :

|         |                    |                  |     |               |     |
|---------|--------------------|------------------|-----|---------------|-----|
| METHOD: | TRAFFIC DIRECTION: | TRAFFIC LINE:NO. | OF. | SURVEY DATUM: | KM: |
|---------|--------------------|------------------|-----|---------------|-----|

| STATION | POSITION | RUTTING |      | CARRIAGEWAY CRACKING |       |      |        | OTHER CRACKS |               | PATCHES |     | SURF.<br>APP<br>*) | OTHER DEFECTS |         | Photo<br>No. | REMARKS |
|---------|----------|---------|------|----------------------|-------|------|--------|--------------|---------------|---------|-----|--------------------|---------------|---------|--------------|---------|
|         |          | DEPTH   | TYPE | SEV                  | WIDTH | TYPE | LENGTH | EDGE         | LONG<br>JOINT | PAV     | SUR |                    | POTHOLE       | SLIPAGE |              |         |
| 1       | 2        | 3       |      |                      | 4     |      |        |              | 5             |         | 6   | 7                  | 8             |         | 9            | 10      |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | OWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |
|         | IWT      |         |      |                      |       |      |        |              |               |         |     |                    |               |         |              |         |

Time Started:  
Time Finished:

\*) SURF.APP:

-2 = Ravelling +1 = Voids  
-1 = Dry/Lea +2 = Pools asphalt  
0 = Normal +3 = Bleeding

fn:pcs3m92, rev may92  
Recorder:



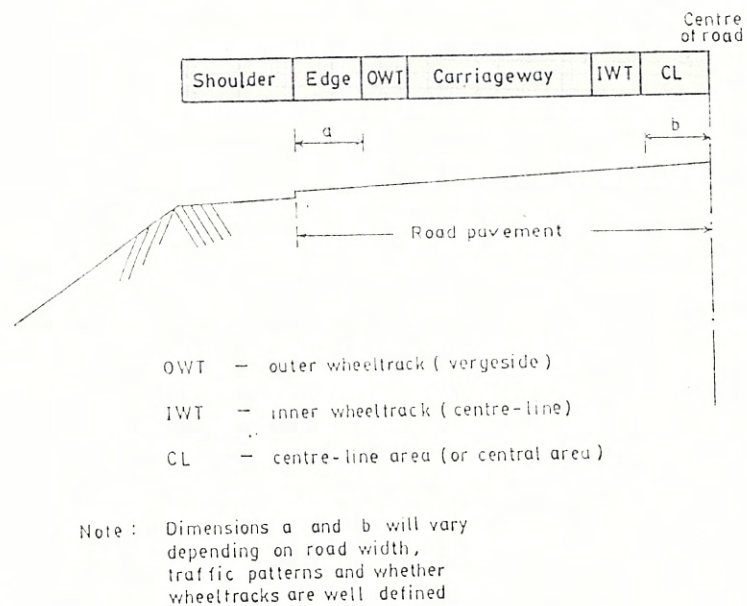
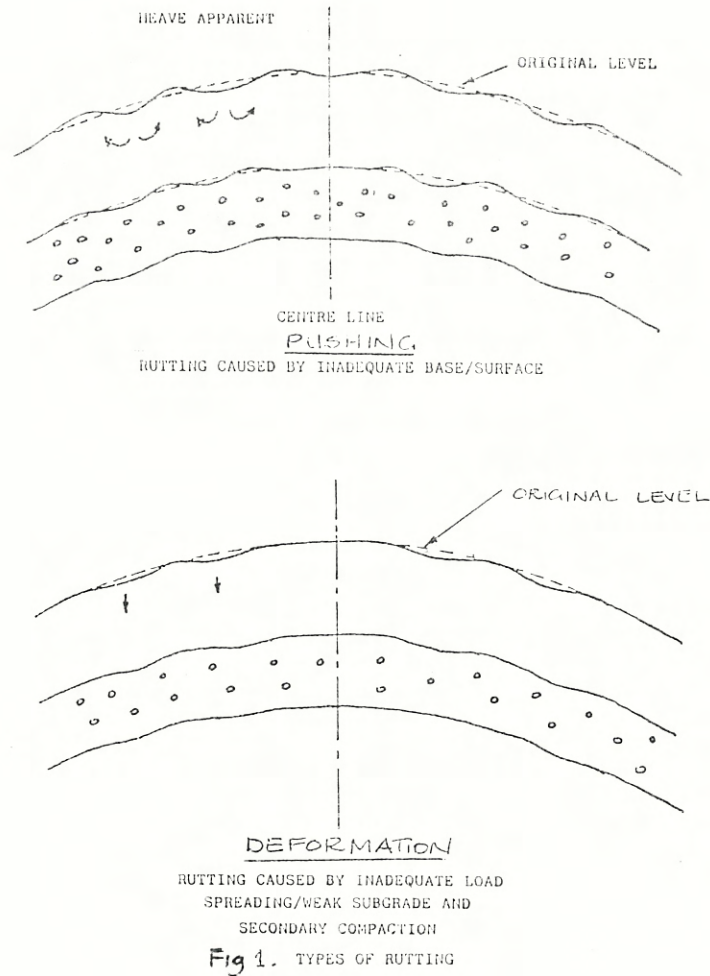


Fig. 2 IDEALISED HALF SECTION SHOWING POSITIONS OF ROAD ELEMENTS REFERRED TO IN PCS 1



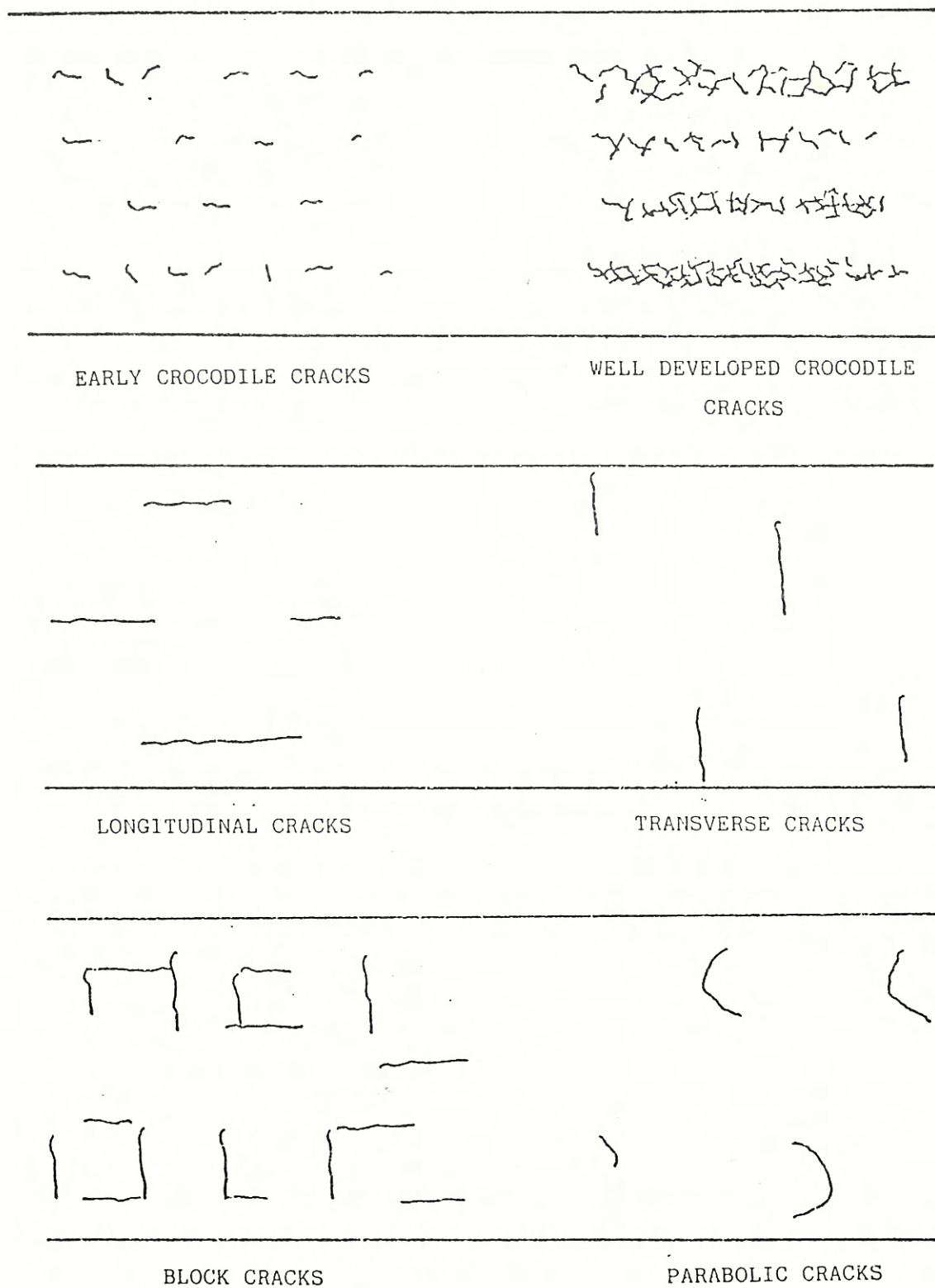


Fig.3 TYPES OF CRACKING



## ASSESSMENT OF CRACKING

| NOTES                | EDGE AREA | IOWT | CARRIAGEWAY | IWT | CENTRE LINE AREA |
|----------------------|-----------|------|-------------|-----|------------------|
| Spacing (S) < 300 mm |           |      |             |     |                  |
| Loose Bloks          |           |      |             |     |                  |
| Spacing > 300 mm     |           |      |             |     |                  |
| SEVERITY             | 3         | 5    | 0           | 4   |                  |
| TYPE                 | L         | C    | -           | C   |                  |
| EXTENT               | 18        | 14   | 0           | 15  |                  |

Recorder:

Example 1. Longitudinal, irregular and crocodile cracking

## ASSESSMENT OF CRACKING

| EDGE AREA | OWT | CARRIAGEWAY | IWT | CENTRE LINE AREA |    |
|-----------|-----|-------------|-----|------------------|----|
|           |     |             |     |                  |    |
|           |     |             |     |                  |    |
|           |     |             |     |                  |    |
|           |     |             |     |                  |    |
|           |     |             |     |                  |    |
|           |     |             |     |                  |    |
| SEVERITY  | 2   | 3           | 2   | 3                | 2  |
| TYPE      | T   | I           | T   | I                | T  |
| EXTENT    | 15  | 18          | 16  | 18               | 16 |

Recorder:

Example 2. Transverse and irregular cracking



ASSESSMENT OF CRACKING

| EDGE AREA | OWT | CARRIAGEWAY | IWT | CENTRE LINE AREA |
|-----------|-----|-------------|-----|------------------|
|           |     |             |     |                  |
| SEVERITY  | 3   | 3           | 3   | 3                |
| TYPE      | B   | B           | B   | B                |
| EXTENT    | 20  | 20          | 20  | 20               |

Recorder: *NY*

Example 3. Block cracking across carriageway (not traffic associated).

ASSESSMENT OF CRACKING

| EDGE AREA | OWT | CARRIAGEWAY | IWT | CENTRE LINE AREA |
|-----------|-----|-------------|-----|------------------|
|           |     |             |     |                  |
| TYPE      | B   | I           | B   | C                |
| SEVERITY  | 4   | 3           | 4   | 4                |
| EXTENT    | 2   | 5           | 11  | 5                |

Recorder: *NY*

Example 4. Irregular, block and crocodile cracking





# EVALUASI LEBAR RETAK PADA BALOK BETON PRATEGANG PARSIAL YANG MENGALAMI LENTUR MURNI

H. RIDWAN SUHUD

## RINGKASAN

*Tulisan ini menyajikan perkembangan lebar retak pada balok beton prategang parsial dengan persentase prategang yang minimum. Sekalipun untuk beton prategang parsial, timbulnya retak merupakan hal yang wajar, namun demikian lebar retak tetap harus dibatasi, lebih-lebih bagi balok prategang parsial yang kandungan tulangan beton biasanya agak besar. Untuk mendapatkan informasi yang lebih jelas tentang ini telah dilakukan percobaan terhadap balok prategang parsial dengan persentase prategang 60 %. Balok ini mempunyai penampang segi empat, yang diprategang dengan cara pretension dan dibebani dengan lentur murni.*

*Percobaan ini dilakukan di Laboratorium Struktur, Département de Genie Civil, INSA Toulouse, Perancis.*

## SUMMARY

*This paper presents Crack Width Condition in partially prestressed Concrete beam at minimum rate of prestress. Some lack of Knowledge, however, still exists, especially about the permissible crack width. The crack width must be limited, particularly when a partially prestressed concrete beam has some what large ordinary steel reinforcement. A series of tests was carried out in order to obtain more information in this field. The beam were tested in pure bending, the had rectangular cross sections and were prestressed by pre-tention at 60 % rate of prestress.*

*These tests were carried at Laboratory of Structures, Departement of Civil Engineering, INSA - Toulouse, France.*

## I. PENDAHULUAN

Seperti telah disepakati dalam CEB/F.I.P.-1970 [1], bahwa dalam beton prategang parsial (beton kelas III), timbulnya retak merupakan hal yang wajar, seperti halnya dalam beton bertulang biasa (beton kelas IV). Baik pada beton bertulang maupun pada beton prategang parsial, besarnya lebar retak inilah yang merupakan masalah, sehingga perlu diadakan pembatasan mengenai lebar retak tersebut. Hal ini tidak lain karena untuk menghindari timbulnya karatan (korosi) pada tulangan, lebih-lebih tulangan prategang (tulangan aktif), yang memikul tegangan jauh lebih tinggi daripada tulangan beton biasa.

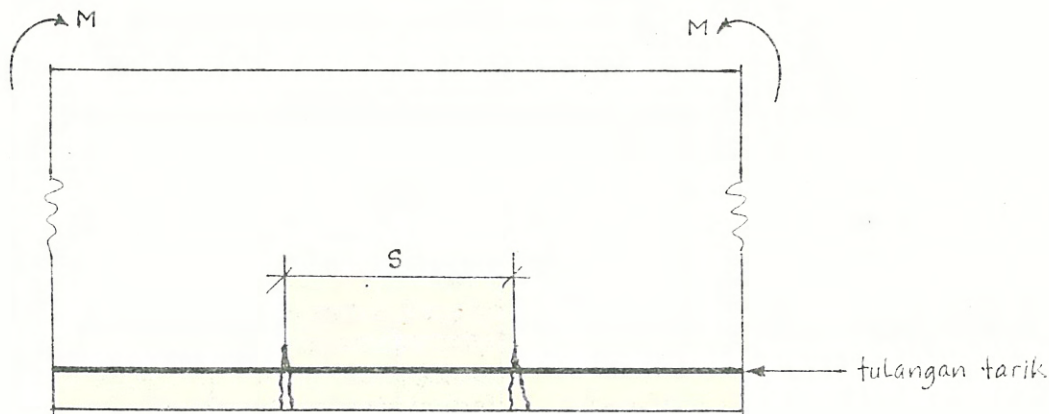
Didalam peraturan-peraturan mengenai beton ber-tulang, misalnya P.B.I.-1971 [2], telah diberikan petunjuk-petunjuk untuk menghitung lebar retak, namun untuk beton prategang parsial, di mana keadaan retak ini akan menimbulkan resiko yang lebih besar, tampaknya perhitungan lebar retak tersebut tidak begitu sederhana. Dengan demikian untuk kepentingan perencanaan, diperlukan data penelitian yang akan memberikan kesimpulan, bahwa untuk persentase prategang tertentu meskipun balok prategang parsial tersebut akan retak, tetapi lebar retaknya tidak akan membahayakan. Dengan kata lain, apabila diambil persentase prategang tertentu, tanpa menghitung besarnya lebar retak,



maka struktur yang direncanakan akan terjamin keamanannya terhadap bahaya karatan.

## II. PERHITUNGAN TEORITIS LEBAR RETAK

### II.1 Konsep Dasar



Gambar - 1 : Pola Retak

#### Tulangan tarik

Apabila sebuah balok beton bertulang mengalami lenturan murni, sehingga menimbulkan retak, maka besarnya lebar retak di tempat tulangan adalah :

$$W = \epsilon_s \cdot S_r \quad \dots \dots \dots (3)$$

Di mana  $W$  = lebar retak

$\epsilon_s$  = regangan (deformasi)  
tulangan tarik

$S_r$  = jarak antara dua retak

$\epsilon_{sm}$  = deformasi rata-rata  
tulangan tarik

$S_{rm}$  = jarak rata-rata antara  
dua retak

Selanjutnya deformasi rata-rata tulangan tarik ( $\epsilon_{sm}$ ) dihitung dengan rumus berikut :

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[ 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right) \right] 0,4 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Di mana :

$\sigma_s$  = Tegangan dalam tulangan tarik di tempat retak pada pembebanan yang ditinjau

$\sigma_{sr}$  = tegangan dalam tulangan tarik, yang dihitung dengan anggapan, bahwa suatu penampang akan retak apabila tegangan tarik maksimum yang terjadi akan mempunyai nilai yang sama dengan kekuatan tarik dari beton yang digunakan (direncanakan sebelumnya).

$\beta_1$  = Koefisien yang menunjukkan kemampuan lekat dari tulangan, di mana :

$$\beta_1 = \frac{1}{2,5 k_1}$$

### II.2 Rumus Pendekatan

Besarnya deformasi tulangan tarik ( $\epsilon_s$ ) dan jarak antara dua retak ( $S$ ) tergantung pada banyak parameter, sehingga baik para ahli maupun peraturan-peraturan tentang beton, menyajikan berbagai rumus pendekatan untuk dapat meramalkan besarnya lebar retak yang akan terjadi secara teoritis.

Salah satu rumus pendekatan tersebut telah disajikan oleh CEB /FIP-1978 [4] sebagai berikut :

$$W_m = \epsilon_{sm} \cdot S_{rm}$$

Di mana :

$W_m$  = lebar retak rata-rata



$\beta_1 = 1$  ; untuk tulangan berulir

$\beta_1 = 0,5$  untuk tulangan polos

$\beta_2$  = Koefisien yang menunjukkan pengaruh dari lamanya pembebanan atau penulangan beban.

$\beta_2 = 1$ ; untuk pembebanan pertama

$\beta_2 = 0,5$  ; untuk pembebanan jangka lama atau pembebanan siklik dengan frekuensi yang tinggi.

Kemudian jarak retak rata-rata ( $S_{rm}$ ) dihitung dengan rumus :

$$S_{rm} = 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{\theta}{\rho_r}$$

Di mana :

$c$  = Tebal selimut beton

$k_1$  = Koefisien yang menunjukkan kemampuan lekat dari tulangan; di mana

$$k_1 = \frac{1}{2,5 \beta_1}$$

$k_1 = 0,4$ ; untuk tulangan berulir

$k_2 = 0,8$ ; untuk tulangan polos

$k_2$  = Koefisien yang menunjukkan pengaruh bentuk distribusi tegangan pada penampang.



$k_2 = 0,125$ ; untuk balok terlentur



$k_2 = 0,25$ ; untuk balok yang mengalami tarik murni



$k_2 = 0,25 \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2 \epsilon_1}$  ; untuk

balok mengalami tarik eksentris atau untuk daerah badan dari balok.

$\epsilon_1$  dan  $\epsilon_2$  : deformasi beton yang dihitung pada penampang yang retak.

$\theta$  = diameter tulangan

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{c,ef}}$$

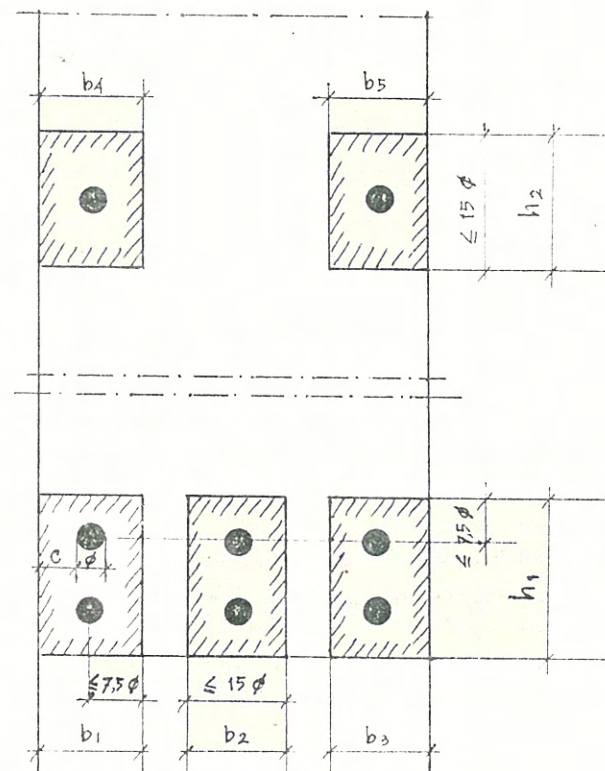
$A_s$  = luas penampang tulangan yang terkandung dalam beton seluas  $A_{c,ef}$

$A_{c,ef}$  = luas beton efektif, yaitu luas beton yang mempunyai pengaruh terhadap lebar retak.

$A_{c,ef} = b_{ef} \cdot h_{ef}$

$b_{ef} = \sum b_i$

$h_{ef} = \sum h_i$



Gambar-2 Luas Beton Effektiv

### II.3 Lebar Retak Karakteristik

Beton bukan bahan yang serba sama (homogen), meskipun dibuat dengan adukan yang sama, kekuatan beton disepanjang balok belum tentu sama. Retak akan timbul (terjadi) lebih dulu di tempat yang terlemah dan tempat ini sama sekali tidak diketahui sebelumnya. Dengan demikian jarak antara dua retak tidak akan seragam, yang mengakibatkan besarnya lebar retak juga tidak akan seragam. Hal ini akan mengakibatkan adanya lebar retak yang lebih kecil daripada lebar retak rata-rata ataupun lebih besar. Lebar retak yang lebih besar dari lebar



retak rata-rata inilah yang harus dibatasi. Sehubungan dengan pembatasan ini CEB-FIP/1978 [4] mendefinisikan harga lebar retak karakteristik ( $W_k$ ), yang besarnya :

$$W_k = 1,7 W_m$$

$W_k$  ini dibatasi oleh harga 0,1 & 0,2 dan 0,4 mm, tergantung pada kondisi lengkungan dan kombinasi pembebanan.

### III. PERCOBAAN

#### III.1 Karakteristik Benda Uji

Benda uji adalah balok prategang parsial pretension dengan persentase prategang 60 %. Persentase ini diambil karena diperkirakan merupakan persentase minimum, dimana balok ini lebih menunjukkan sifat-sifat beton prategang daripada beton bertulang [5].

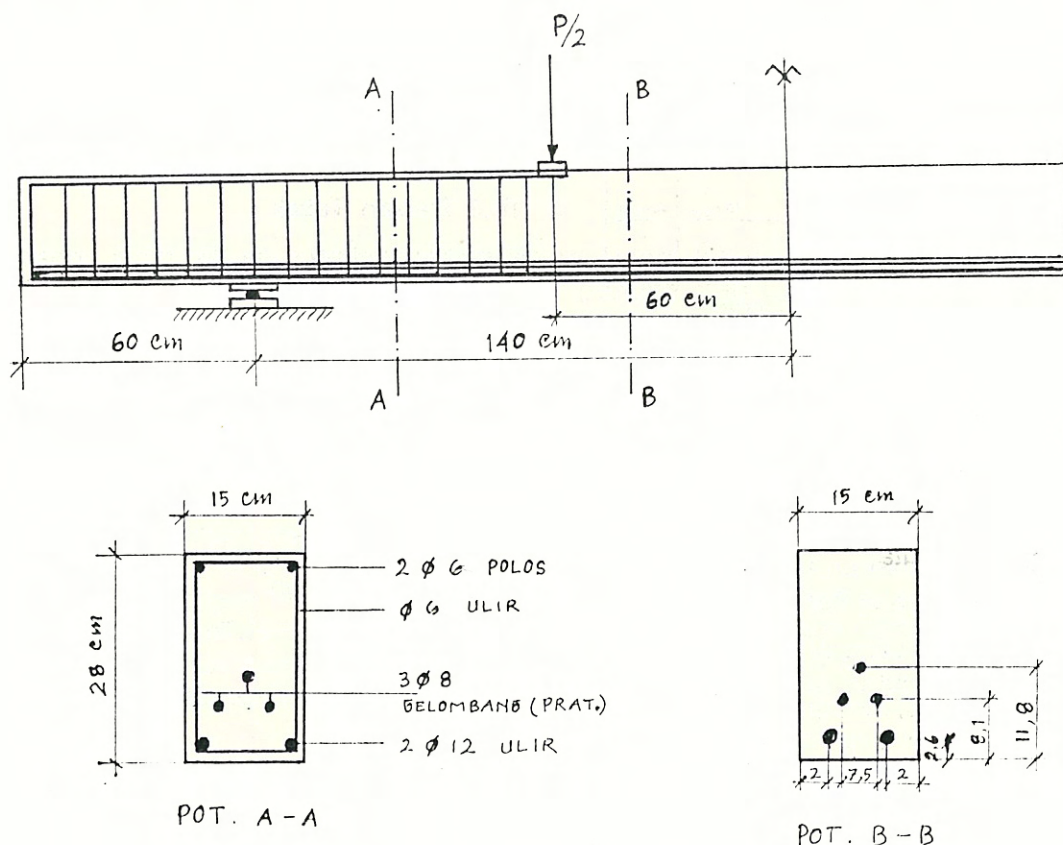
Dimensi dan penulangan balok tersebut seperti gambar berikut :

- Luas penampang baja prategang, monostrand bergelombang  $A_a = 3 \varphi 8 \text{ mm} = 1,5 \text{ cm}^2$
- Luas penampang besi beton berulir;  
 $A_p = 2 \varphi 12 \text{ mm} = 2,26 \text{ cm}^2$
- Persentase prategang adalah bagian momen runtuh yang diimbangi oleh baja prategang saja [6].

Batas elastis konvensional bagian regangan permanen  $2 \frac{0}{00}$ . ( $\sigma_{02}$ ) dari besi beton berulir sama dengan  $4685 \text{ kg/cm}^2$  ( $468,5 \text{ MPA}$ ) dan modulus elastisitasnya adalah;

$2,14 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$  ( $2,14 \cdot 10^5 \text{ MPA}$ ). Sedangkan batas elastis baja prategang sama dengan  $15200 \text{ kg/cm}^2$  ( $1520 \text{ MPA}$ ) dan modulus elastisitasnya adalah  $2,2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$  ( $2,2 \cdot 10^5 \text{ MPA}$ ).

Kekuatan tekan rata-rata dari beton pada umur 28 hari sama dengan  $435 \text{ kg/cm}^2$  ( $43,5 \text{ MPA}$ ) dan kekuatan tariknya adalah  $33 \text{ kg/cm}^2$  ( $3,3 \text{ MPA}$ ). Kekuatan tekan beton tersebut



Gambar-3 Penulangan Balok



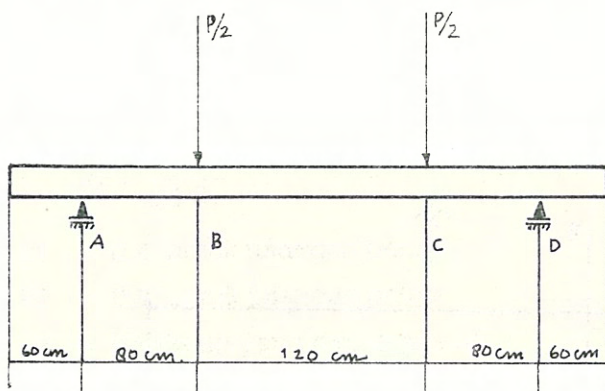
sebagai hasil dari benda uji silinder dengan diameter 16 cm dan tinggi 32 cm, sedangkan kekuatan tariknya sebagai hasil dari percobaan lentur dan percobaan belah (splitting test) [17].

Balok uji di prategang setelah beton berumur 14 hari dan percobaan pembebanan dilakukan pada waktu beton berumur 28 hari.

Tegangan awal baja prategang ( $\sigma_{ai}$ ) sama dengan  $13000 \text{ kg/cm}^2$  (1300 MPA), sedangkan tegangan efektif ( $\sigma_{aef}$ ) setelah kehilangan tegangan akibat perpindahan serentak, susut, rangkai dan relaksasi adalah  $11195 \text{ Kg/cm}^2$  (1119,5 MPA).

### III.2 Pembebanan

Balok uji dibebani seperti pada gambar-4.



Gambar-4 Skema Pembebanan

Bagian BC adalah daerah yang diamati dimana bagian ini hanya memikul lentur murni.

Pembebanan dilakukan dalam dua tahap berturut-turut :

- dari nol sampai beban kerja  $P = 7500 \text{ Kg}$  (75 kN), untuk lenturan dengan pertambahan tegangan yang konstan.
- dari beban kerja sampai runtuh dengan pertambahan lendutan yang konstan (0,2 mm/menit).

### III.3 Pengukuran

Deteksi retak pertama dan pengukuran lebar retak dilakukan dengan bantuan transducer CADI-10, sedangkan posisi retak dicari dengan bantuan mikroskop yang mempunyai kekuatan antara 10 sampai 100 kali pembesaran.

Deteksi retak pertama dilakukan dengan transducer, karena terjadinya retak tersebut tidak dapat dilihat dengan mata telanjang.

## IV. HASIL PENELITIAN

### IV.1 Jarak Retak dan Perkembangan Lebar Retak

Jarak antara dua retak secara teoritis dan menurut pengamatan tertera dalam tabel-1, sedangkan perkembangan lebar retak baik secara teoritis maupun menurut pengamatan terlihat dalam Gambar-5.

Lebar retak yang diukur adalah lebar retak pada sumbu tulangan yang paling bawah.

| Jarak retak teoritis CEB-FIP/1978 (mm) | Jarak retak hasil pengamatan (mm) |           |          |
|----------------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------|
|                                        | Minimum                           | Rata-rata | Maksimum |
| 92                                     | 60                                | 85        | 130      |

Tabel-1 Jarak Retak

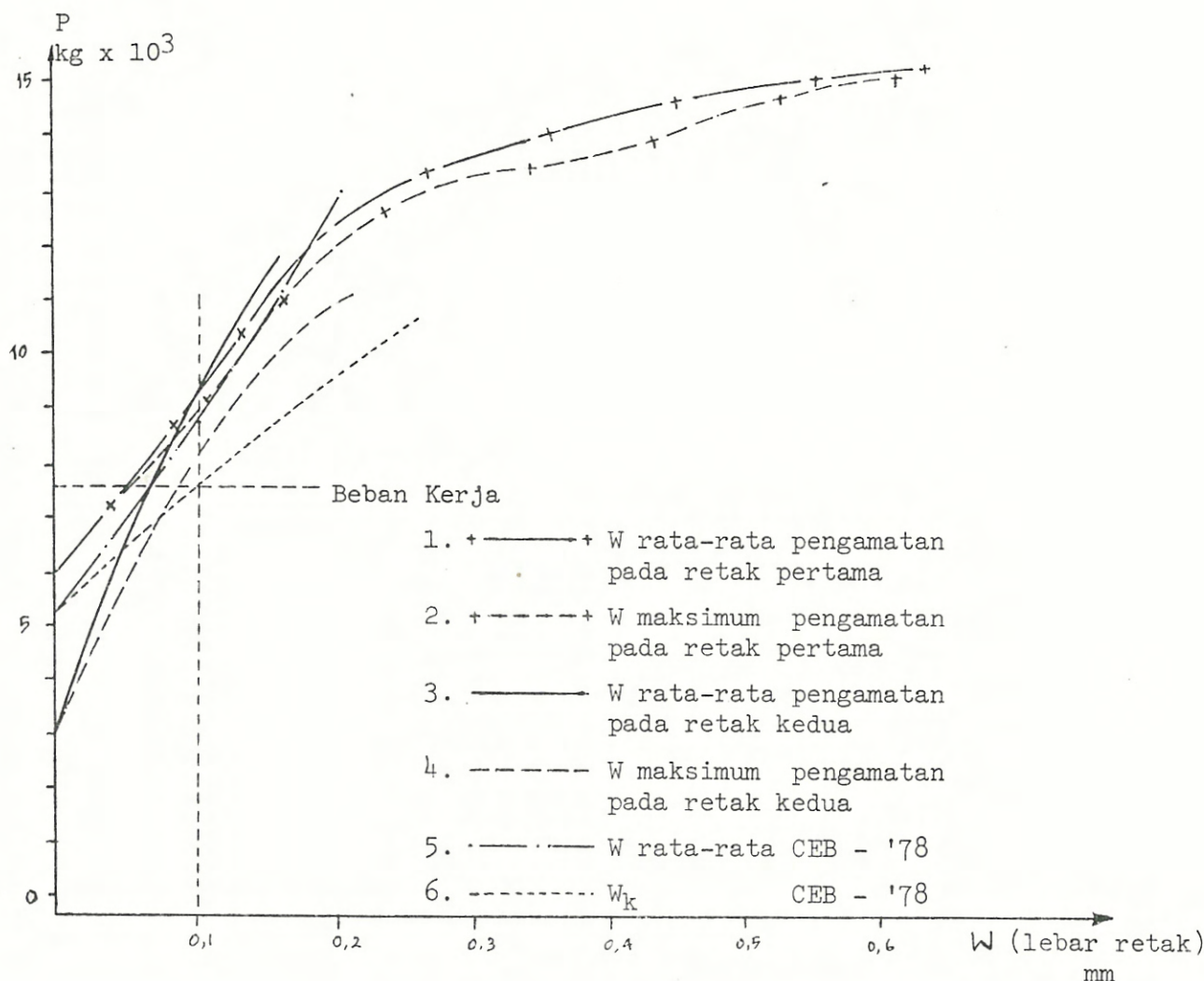
### IV.2 Beban Retak

Tampak penting juga diketahui beban retak pertama, baik yang sesungguhnya (aktual) dimana retak tersebut belum dapat dilihat dengan mata telanjang, maupun pada waktu retak tersebut sudah mulai dapat dilihat (nyata) untuk dibandingkan dengan harga teoritisnya. Harga-harga ini dapat dilihat didalam Tabel-2.

| Keadaan                                                             | Teoritis | Aktual | Nyata |
|---------------------------------------------------------------------|----------|--------|-------|
| Retak Pertama                                                       |          |        |       |
| Beban ( $P_{cr}$ ) Kg (0,01 kN)                                     | 5500     | 5275   | 6275  |
| Momen ( $M_{cr}$ ) Kgm (0,01 kNm)                                   | 2200     | 2110   | 2510  |
| Kekuatan tarik beton ( $\sigma_{br}$ ) Kg/cm <sup>2</sup> (0,1 MPA) | 33       | 29     | 47    |

Tabel-2 Beban Retak





Gambar-5 Perbandingan antara lebar retak teoritis dan pengamatan untuk balok 60 % prategang.

## V. PEMBAHASAN

Dari hasil-hasil diatas dapat dilihat, bahwa perbandingan antara hasil perhitungan teoritis dan pengamatan untuk lebar retak disekitar beban kerja ( $P_{serv} = 7500 \text{ Kg}$ ) sangat dekat, dimana hasil perhitungan teoritis sedikit lebih besar dari pada hasil pengamatan. Sedangkan lebar retak hasil pengamatan ini masih dibawah batas-batas yang diijinkan, yaitu kurang dari 0,1 mm. Lebar retak sama dengan 0,1 mm tercapai pada beban 9000 Kg (diatas beban kerja), tetapi apabila beban dihilangkan, retak tersebut menutup kembali.

Dengan demikian apabila hasil perhitungan teoritis, masih sama dengan batas harga yang diijinkan, berarti masih menunjukkan harga yang aman, baik untuk lebar retak rata-rata ( $W_m$ ), maupun lebar retak karakteristik ( $W_k$ ).

Lebar retak hasil pengamatan menunjukkan harga yang lebih besar dari pada hasil perhitungan teoritis, apabila tulangan sudah mencapai plastis. Hasil pengamatan juga menunjukkan, bahwa apabila pembebanan disekitar beban kerja dihilangkan, maka retak yang terjadi akan menutup dengan sempurna.

Selanjutnya mengenai beban dekompressi [1], hasil perhitungan teoritis mempunyai harga sama dengan 3715 Kg, sedangkan menurut pengamatan adalah 3075 kg. Harga beban dekompressi menurut pengamatan kira-kira 50 % dari beban retak pertama. Sekalipun demikian pertambahan lebar retak pada pembebanan yang kedua tidak menunjukkan harga yang berarti, karena pada tahap pembebanan sekitar beban kerja (7500 kg),



lebar retak pada pembebanan yang kedua ini masih sekitar 0,1 mm.

Demikian halnya harga-harga beban retak pertama ( $P_{cr}$ ) dan kekuatan tarik beton ( $\sigma_{br}$ ), antara hasil perhitungan teoritis dan pengamatan, mempunyai nilai yang berdekatan.

Apabila keruntuhan balok tersebut diperhatikan, maka harga momen runtuh teoritis ( $M_{rt\ th}$ ) dan momen runtuh pengamatan ( $m_{rt\ eks}$ ) sangat berdekatan, yaitu momen runtuh teoritis,  $M_{rt\ th}$  sama dengan 6,46 tm (64,6 kNm) dan momen runtuh pengamatan  $M_{rt\ eks}$  sama dengan 6,35 tm (63,5 kNm). Harga-harga ini jauh diatas momen batasnya ( $M_{ult}$ ) [6], dimana momen batas ini sebesar 4,57 tm (45,7 kNm). Ditinjau dari angka-angka diatas, maka keamanan terhadap runtuh cukup besar, sedangkan momen kerja ( $M_{serv}$ ) diambil:

$$M_{serv} = \frac{M_{ult}}{1,5} \dots \dots \dots [5]$$

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### VI.1 Kesimpulan

Dengan mengambil persentase minimum dari beton prategang parsial sama dengan 60 %, lebar retak yang terjadi pada tahap beban kerja masih lebih kecil dari 0,1 mm. Harga ini lebih kecil dari pada harga-harga batas yang diijinkan, misalnya oleh CEB-FIP/1978, yaitu 0,1 mm, 0,2 mm dan 0,4 mm, tergantung pada kondisi disekeliling struktur. Dengan demikian apabila untuk suatu balok prategang parsial yang persentase prategangnya lebih besar atau sama dengan 60 %, maka tanpa menghitung lebar retaknya pun, struktur tersebut sudah aman. Hal ini disebabkan karena disamping lebar retak yang terjadi lebih kecil dari pada batas-batas yang diijinkan, juga apabila bebannya dihilangkan, retak yang telah terjadi akan menutup kembali.

Selain itu lebar retak yang akan terjadi pada level tulangan prategang (tulangan aktif) lebih kecil dari pada hasil pengamatan, karena posisi tulangan prategang lebih sentris dari pada posisi tulangan beton biasa (tulangan pasif), dimana pengamatan lebar retak tersebut telah dilakukan.

Perhitungan teoritis menurut CEB-FIP/1978 [4], baik untuk jarak antara dua retak maupun lebar retak, sangat memuaskan.

### VI.2 Saran

Perhitungan secara teoritis lebar retak akan mempunyai perbedaan yang berarti dibandingkan dengan hasil pengamatan apabila evaluasi kehilangan tegangan pada tulangan prategang kurang teliti. Oleh karena itu agar lebar retak yang akan terjadi sesuai dengan hasil perhitungan teoritisnya, maka perhitungan kehilangan prategangnya harus seteliti mungkin.

### DAFTAR PUSTAKA

1. CEB-FIP : *Recommandation Internationales pour le calcul et l'execution des ouvrages du beton-1970.*
2. PBI - 1971 : *Peraturan Beton Bertulang Indonesia- 1971.*
3. F.LEONHARDT : *Crack Control and Concrete Structures, IABSE SURVEYS S-4/1977.*
4. CEB-FIP : *Code Modele CEB-FIP/1978 pour les structures en beton. Bulletin d'information no.124/125F.*
5. R.SUHUD : *Contribution a l'etude du compartemen des poutres armees precontrantes par fils adherents sous chargement direct. These Docteur-Ingenieur, Toulouse, Janvier 1981.*
6. R.SUHUD : *Beton Prategang Parsial Jurnal PUSLITBANG JALAN, Juli 1990.*
7. R. SUHUD : *Disain Campuran Beton Jurnal PUSLITBANG JALAN, Juni 1991.*

### PENULIS

*Dr.Ir.H.Ridwan Suhud adalah Dosen pada Jurusan Teknik Sipil ITB tahun 1983 S3 Struktur (Doktor) khusus dalam beton Prategang Partial dari Institut National Des Sciences Appliquess (INSA) Toulouse, Perancis.*





# PENDEKATAN LINIER PROGRAMMING METODA FINITE DIFFERENCE DALAM MENGHITUNG BEBAN BATAS DARI PELAT PERSEGI

WAWAN WITARNAWAN SUKARJA

## RINGKASAN

*Penerapan pemograman matematis terhadap analisa batas digunakan untuk menghitung beban runtuh dari pelat-pelat bujur sangkar dan persegi yang menerima beban merata. Berbagai kombinasi kondisi perletakan pelat ditinjau dalam perhitungan ini. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan metoda pendekatan ini cukup dekat dengan hasil-hasil lain yang sudah diterbitkan.*

## SUMMARY

*The application of Mathematical Programming to the limit analysis is used to calculate the collapse loads of square and rectangular plates under uniformly distributed pressure loading. different combinations of edge support conditions were considered. Close agreement with reported solutions are obtained in all cases.*

## I. PENDAHULUAN

Sebagaimana telah disebutkan pada penerbitan lalu, maka pada kesempatan ini penulis akan menjelaskan mengenai penerapan metoda pemograman linier di dalam memecahkan persoalan analisa beban batas dari struktur pelat persegi isotropis yang diberi beban merata serta beban terpusat pada berbagai kondisi perletakan. Mengingat teori pendekatan batas bawah (lower bound) yang dipilih, maka didalam pemograman linier ini beban atau faktor beban akan dimaksimumkan dengan batasannya adalah persamaan-persamaan keseimbangan (equilibrium) dan kelelahan (yield).

Cara central difference dipilih dalam memecahkan persamaan - persamaan keseimbangan yang non-linier dan pendekatan garis lurus terpatah (piecewise linier appoximation) digunakan untuk melinierkan permukaan leleh (yield surface) dari material.

Dengan membuat program komputernya, maka secara mudah semua persamaan- persamaan diatas dapat secara langsung

di'generate' melalui suatu program yang interactive. Sedangkan Sciconic digunakan untuk memecahkan persoalan pemograman linier-nya.

## II. PERSAMAAN KESEIMBANGAN PELAT

Dengan menggunakan anggapan-anggapan yang biasa digunakan pada teori pelat tipis (seperti oleh Szilard, 1974), maka persamaan-persamaan differential dari elemen pelat (Gambar 1) dapat diturunkan sebagai berikut:

$$Q_{yz}^* = Q_{yz} + \frac{\partial Q_{yz}}{\partial y} dy \dots \dots \dots (1a)$$

$$Q_{xz}^* = Q_{xz} + \frac{\partial Q_{xz}}{\partial x} dx \dots \dots \dots (1b)$$

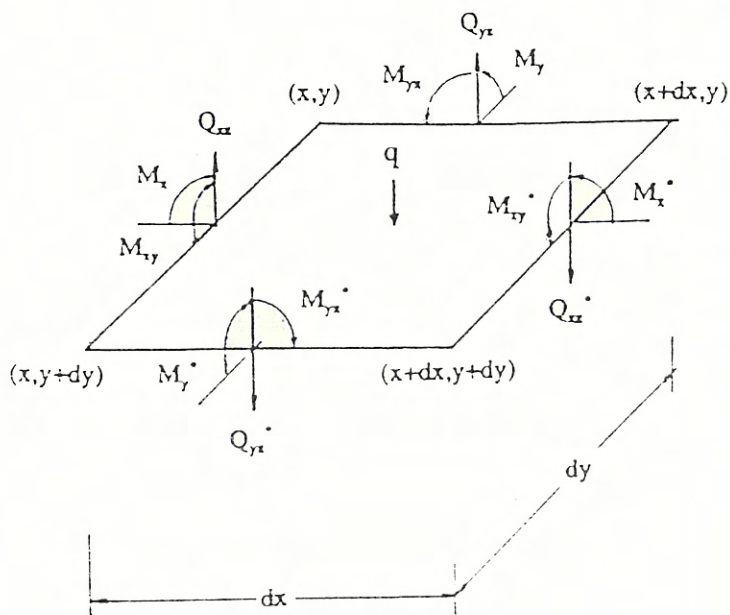
$$M_y^* = M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy \dots \dots \dots (1c)$$



$$M_x^* = M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx \dots \dots \dots (1d)$$

$$M_{yx}^* = M_{yx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} dy \dots \dots \dots (1e)$$

$$M_{xy}^* = M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx \dots \dots \dots (1f)$$



Gambar 1. Element differential dari pelat

Dari keseimbangan gaya dan momen terhadap sumbu-sumbu x, y dan z dan dengan membuat beberapa penyederhanaannya, maka diperoleh persamaan differential sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -q \dots \dots (2)$$

### III. Syarat-syarat batas

Sebagai mana telah dibahas pada penerbitan terdahulu (struktur balok), agar diperoleh analisa gaya-gaya pada keseluruhan struktur secara benar, maka syarat-syarat batas gaya harus dimasukkan kedalam persamaan keseimbangan. Adapun tiga macam syarat batas gaya yang biasa digunakan pada pelat adalah :

(a) Perletakan sederhana (simply supported):

$$M = 0 \dots \dots \dots (3a)$$

(b) Perletakan bebas (free supported)

$$M = 0 \dots \dots \dots (3b)$$

$$M_{xy} = 0 \dots \dots \dots (3c)$$

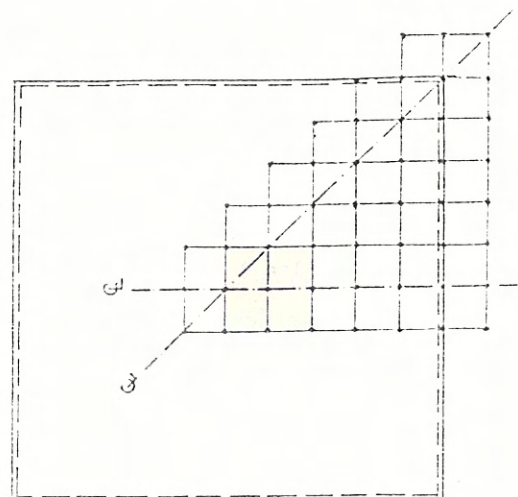
(c) Perletakan jepit (clamped) :

$$\text{Tidak ada batasan} \dots \dots \dots (3d)$$

### IV. Penerapan finite difference pada persamaan keseimbangan

Untuk menerapkan finite difference pada persamaan keseimbangan, maka terlebih dahulu pelat dipolakan (discretized) kedalam titik-titik yang mempunyai jarak sama di dalam arah sumbu x dan y.

Untuk pelat - pelat yang dalam hal geometri, pembebanan dan kondisi perletakannya adalah simetris, maka cukup hanya seperdelapan bagian dari pelat dianalisa (Gambar 2). Sedangkan bila sifat simetrisnya hanya terhadap satu sumbu saja, maka hanya setengah dari pelat yang dianalisa (Gambar 3)

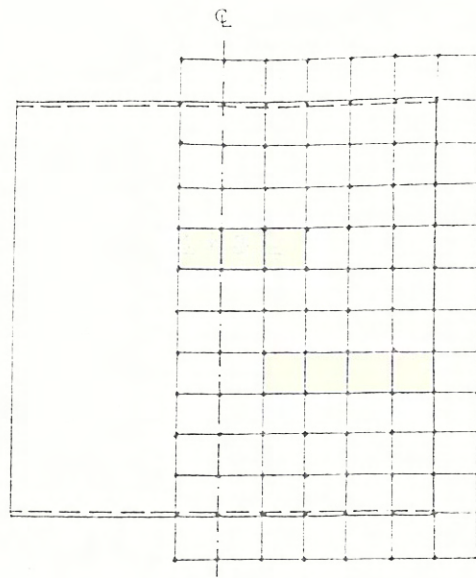


Gambar 2. Jaring finite difference untuk seperdelapan bagian pelat

Mengingat pada pelat momen-momen merupakan fungsi dua variabel.  $M = M(x,y)$ , maka konsep finite difference perlu dikembangkan agar dapat digunakan pada fungsi yang mempunyai dua variabel.

Tinjau suatu jaring (mesh) dari pelat seperti ditunjukkan pada gambar 4. Dengan menerapkan pendekatan central difference terhadap titik 5, maka persamaan keseimbangan yang berlaku pada titik 5 adalah sebagai berikut;





Gambar 3. Jaring finite difference untuk setengah bagian pelat

$$\left[ \frac{M_{x4} - 2M_{x5} + M_{x6}}{h^2} \right] - 2 \left[ \frac{M_{xy3} - M_{xy9} - M_{xy1} + M_{xy7}}{4h^2} \right] + \left[ \frac{M_{y2} - 2M_{y5} + M_{y8}}{h^2} \right] = -q \quad \dots \dots \dots (4)$$

Dengan memperkenalkan variabel-variabel baru  $a_i = M_{xi}/Mp$ ,  $b_i = M_{yi}/Mp$ ,  $c_i = M_{xyi}/Mp$  dan  $\mu p = 2qh^2/Mp$  ( $\mu$  adalah faktor beban) maka

untuk pelat yang isotropis persamaan (4) dapat ditulis dalam bentuk tanpa dimensi sebagai berikut:

$$2(a_4 - 2a_5 + a_6) + 2(b_2 - 2b_5 + b_8) - (c_3 - c_9 - c_1 + c_7) - \mu p = 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

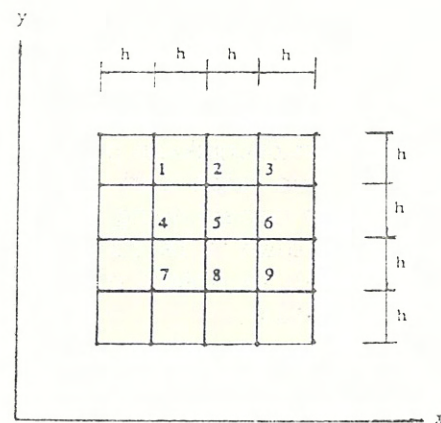
Operator finite difference yang berlaku untuk  $a_i$ ,  $b_i$  dan  $c_i$  dapat dilihat pada gambar 5.

Secara umum, persamaan keseimbangan dari keseluruhan struktur dapat disajikan dalam bentuk matrix :

$$\underline{A} \underline{a} + \underline{B} \underline{b} - \underline{C} \underline{c} + \mu \underline{p} = \underline{0} \quad \dots \dots (6)$$

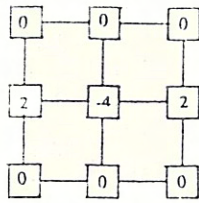
Di mana matrix-matrix  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$  dan  $\underline{C}$  diperoleh dari (5); vektor-vektor  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$ , dan  $\underline{c}$  merupakan kumpulan variabel-variabel  $a_i$ ,  $b_i$  dan  $c_i$  untuk semua titik (nodes); dan  $\underline{p}$  dikenal sebagai vektor beban.

Agar supaya syarat batasan keseimbangan dipenuhi, maka syarat-syarat batas gaya dari (3) harus dimasukkan dalam (6)

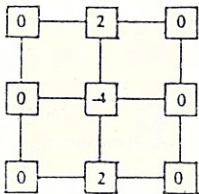


Gambar 4. Jaring dua dimensi untuk pelat

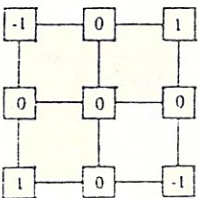




(a)  $a_i$



(b)  $b_i$



(c)  $c_i$

Gambar 5. Finite difference operator

## V. Contoh-contoh perhitungan

### V.1 Pelat bujur sangkar

#### V.1.1 Beban merata

Di dalam contoh ini beban-beban runtuh (collapse loads) diperoleh dari 6 type pelat bujur sangkar ( $2L \times 2L$ ) yang menerima beban merata ( $q$ ). Berbagai kombinasi dari kondisi-kondisi perletakan ditunjukkan pada gambar 6. Kriteria leleh dari Tresca dan Johansen seperti yang dibebankan pada bagian 1 terdahulu, akan digunakan di dalam menganalisa pelat-pelat ini.

Perhitungan beban batas untuk pelat 1 akan diberikan secara detail dalam pembahasan ini. Sebagai dasar awal perhitungan, maka seperempat bagian pelat dibagi kedalam jaring finite difference ukuran  $2 \times 2$  (Gambar 7). Mengingat alasan simetris, maka hanya setengah bagian pelat yang dianalisa. Pemograman linear dari

kasus ini adalah :

$$\mu_c = \max \mu \dots \dots \dots (7a)$$

dengan batasan :

syarat keseimbangan :

$$\underline{A} \underline{a} + \underline{B} \underline{b} - \underline{C} \underline{c} + \underline{\mu} \underline{p} = \underline{0} \dots \dots \dots (7b)$$

syarat batas gaya :

$$a_9, a_{14}, a_{19}, a_{24}, a_{29} = 0 \dots \dots \dots (7c)$$

$$b_7, b_8, b_9, b_{27}, b_{28}, b_{29} = 0$$

syarat simetris :

$$a_6 - a_8 = 0$$

$$a_{11} - a_{13} = 0$$

$$a_{16} - a_{18} = 0$$

$$a_{21} - a_{23} = 0$$

$$a_{26} - a_{28} = 0$$

$$c_7, c_{12}, c_{17}, c_{22}, c_{27} = 0 \dots \dots \dots (7d)$$

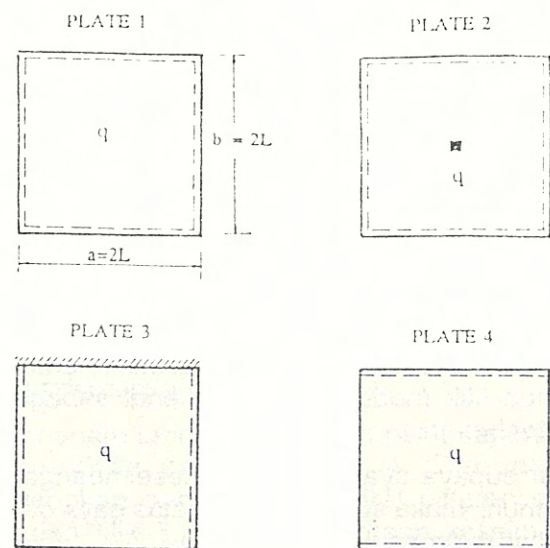
$$c_6 + c_8 = 0$$

$$c_{11} + c_{13} = 0$$

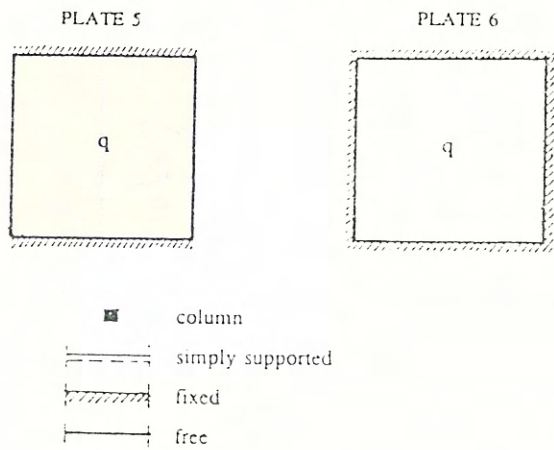
$$c_{16} + c_{18} = 0$$

$$c_{21} + c_{23} = 0$$

$$c_{26} + c_{28} = 0$$







di mana :

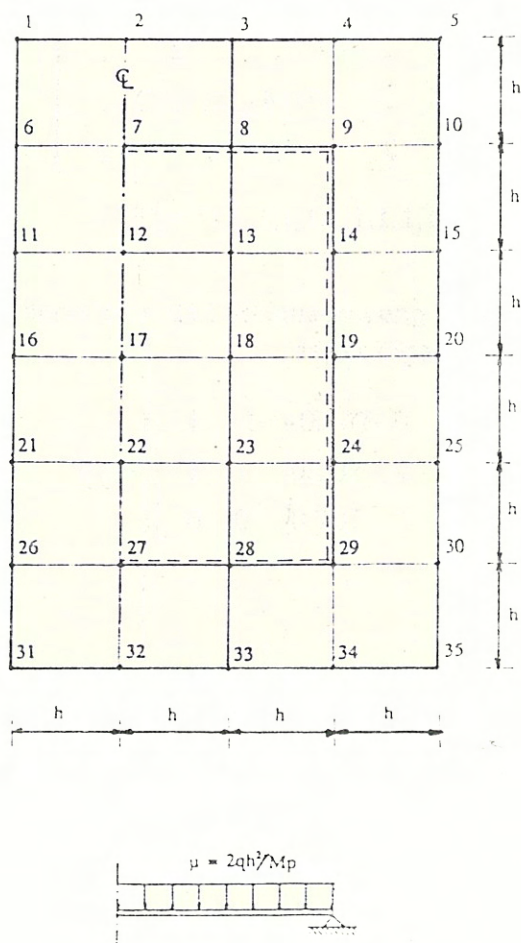
$$\underline{a}^T = [a_6, \dots, a_{30}] \quad (7f)$$

$$\underline{b}^T = [b_2, b_3, b_4, b_7, b_8, b_9, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{17}, b_{18}, b_{19}, \\ b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{27}, b_{28}, b_{29}, b_{32}, b_{33}, b_{34}] \quad \therefore (7g)$$

$$\underline{c}^T = [c_1, \dots, c_{35}] \dots \dots \dots (7h)$$

$$p^T = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \dots (7i)$$

Gambar 6. Enam type pelat bujur sangkar

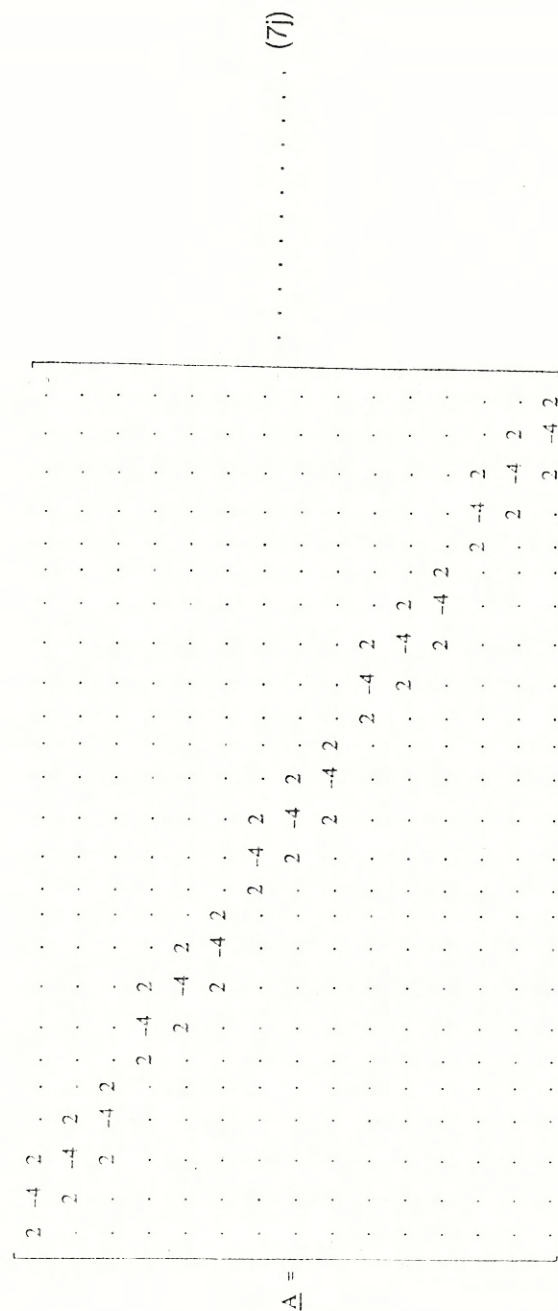


Gambar 7. Jaring ukuran 2x2 dan pembelahan merata

syarat leleh :

$$\underline{Q} - \underline{V} \underline{x} = \underline{0}, \quad \underline{x} \geq \underline{0} \dots (7e)$$

$$\underline{U}^T \underline{x} \leq \underline{1}$$









untuk kondisi leleh Tresca, Gambar 8, maka kuantitas dari (7e) dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\underline{V} = \text{diag} [\underline{V}^j]$$

$$\underline{V}^j = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & -0.5 & 0.5 & -0.5 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7n)$$

$$\underline{x}^T = [\dots, \underline{x}^{jT} \dots] \dots \dots \dots (7o)$$

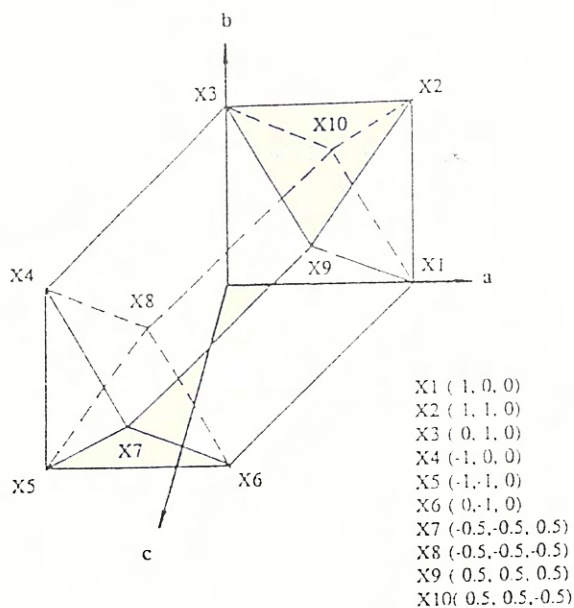
$$\underline{x}^{jT} = [X1, \dots, X10]$$

$$\underline{U}^T = \text{diag} [\underline{U}^{jT}] \dots \dots \dots (7p)$$

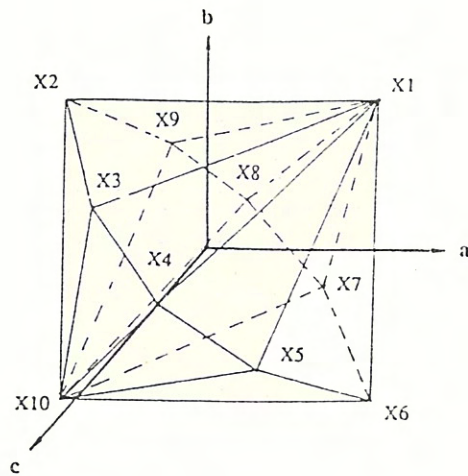
$$\underline{U}^{jT} = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$$

Bila kriteria leleh dari Johansen yang digunakan (Gambar 9), maka komponen  $\underline{V}^j$  dari (7n) dapat diganti dengan :

$$\underline{V}^j = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -0.707 & 0 & 0.707 & 1 & 0.707 & 0 & -0.707 & -1 \\ 1 & 1 & 0.707 & 0 & -0.707 & -1 & -0.707 & 0 & 0.707 & -1 \\ 0 & 0 & 0.707 & 1 & 0.707 & 0 & -0.707 & -1 & -0.707 & 0 \end{bmatrix}$$



Gambar 8. linearized tresca yield surface



X1 ( 1, 1, 0)  
 X2 (-1, 1, 0)  
 X3 (-0.707, 0.707, 0.707)  
 X4 ( 0, 0, 1)  
 X5 ( 0.707,-0.707, 0.707)  
 X6 ( 1,-1, 0)  
 X7 ( 0.707,-0.707,-0.707)  
 X8 ( 0, 0,-1)  
 X9 (-0.707, 0.707,-0.707)  
 X10(-1,-1, 0)

Gambar 9. Linearized Johansen yield surface

Problema ini melibatkan 101 batasan (15 syarat keseimbangan, 11 batasan gaya, 15 syarat simetris, 60 syarat leleh) dan 232 variabel. Faktor beban runtuh  $p = 0.8824$  diperoleh untuk kondisi leleh Tresca. Perlu dicatat bahwa  $p = 0.333 \mu$ . Harga ini 8,5% lebih kecil dari yang pernah diperoleh Koopman dan Lance's yaitu sebesar 0.964; Didalam hal ini Koopman dan Lance's (1965) membagi seperempat bagian dari pelat kedalam jaring 5x5.

Untuk memperoleh hasil yang lebih baik, maka untuk selanjutnya seperempat bagian dari pelat dibagi kedalam jaring yang lebih halus yaitu ukuran 4x4 (Gambar 10). Faktor beban runtuh yang diperoleh dari berbagai type pelat (Gambar 6) dengan kondisi leleh dari Tresca dan Johan-

sen, dapat dilihat dari tabel 1. Untuk perbandingan, maka hasil-hasil lain yang diperoleh dari literatur juga diberikan.

#### V.1.2. Kombinasi beban merata dan terpusat.

Di dalam kasus ini maka pelat bujur sangkar yang ditumpu sederhana pada keempat sisinya diberi beban merata  $q (= \mu Mp/2h^2)$  dan satu beban terpusat ( $p$ ) yang bekerja ditengah pelat, Gambar 11. Besar beban terpusat divariasikan terhadap beban merata.

Di dalam model finite difference ini, maka beban terpusat dianggap bekerja diatas area  $h^2$ . Bila  $p = kqab$ , maka beban terbagi rata ekuivalennya data ditulis sebagai,

$$w = \frac{k q a b}{h^2}$$

sehingga komponen beban untuk titik 37 menjadi,

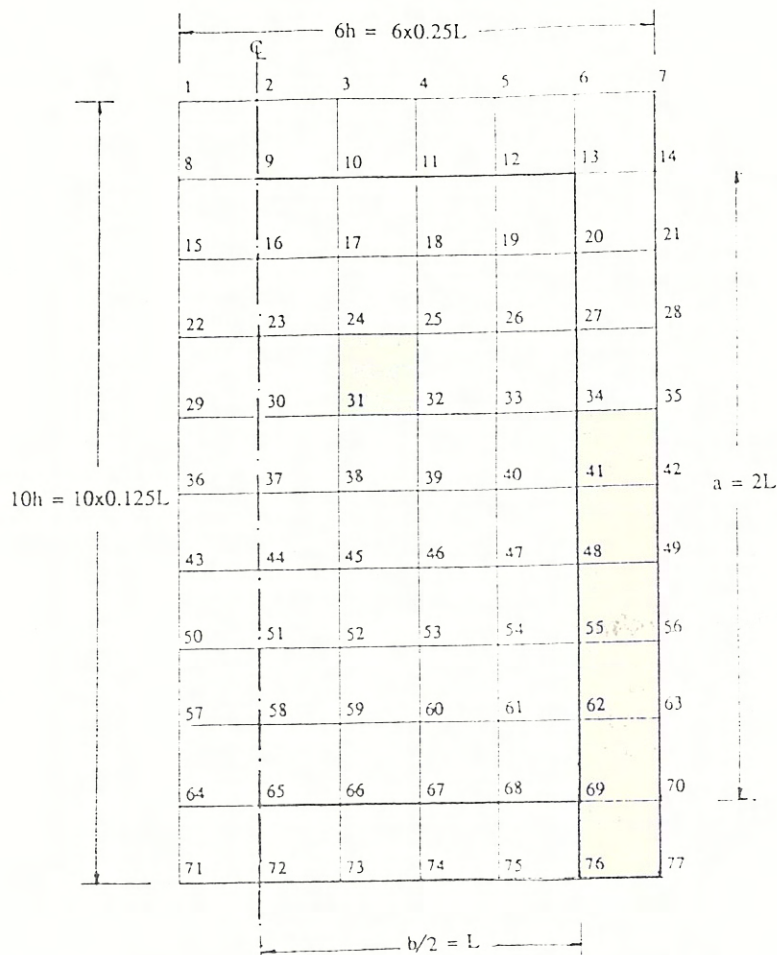
$$\mu p_{37} = \frac{2 q h^2}{Mp} \left( 1 + \frac{w}{q} \right)$$

dengan mensubstitusikannya (8) ke (9), maka

$$\mu p_{37} = \mu \left( 1 + \frac{k a b}{h^2} \right)$$

$$\mu = 2qh^2/Mp.$$





Gambar 10. Jaring finite difference ukuran 4x4

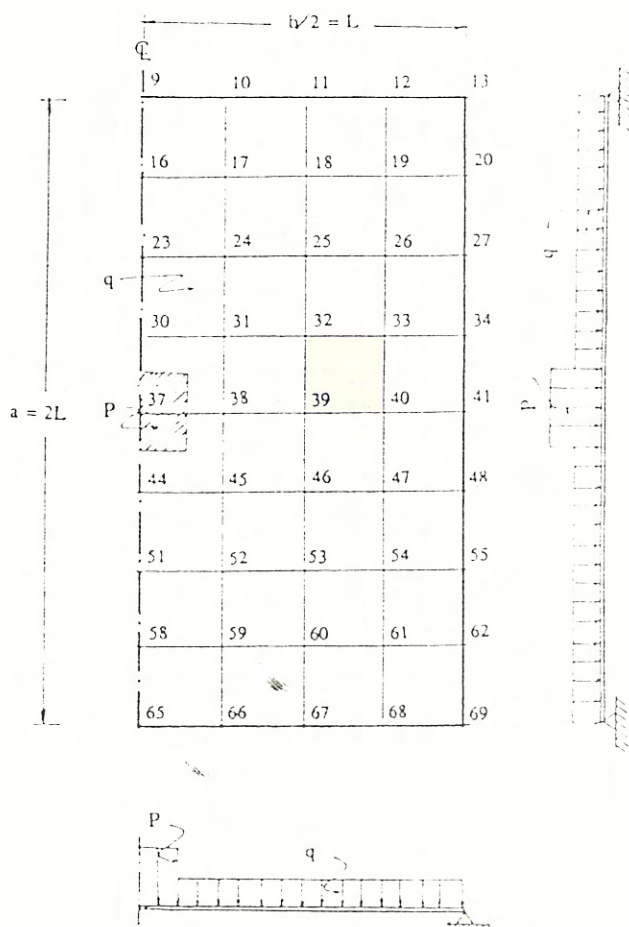
| Plate | $p^*$  |                           |                                    |
|-------|--------|---------------------------|------------------------------------|
|       | Tresca | Johansen                  |                                    |
| 1.    | 0.9476 | 1.0138                    | Present study                      |
|       | 0.9640 | -                         | Koopman and Lance (1965), mesh:5x5 |
|       | -      | 1.0000                    | Nielsen (1990)                     |
|       | -      | 1.0000                    | Save and Massonet (1972)           |
|       | -      | 1.0000 <sup>(u),(l)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986)       |
| 2.    | 1.7475 | 1.8189                    | Present study                      |
| 3.    | 1.2460 | 1.3520                    | Present study                      |
|       | -      | 1.0000 <sup>(l)</sup>     | Manolakos and Mamalis (1986)       |
|       | -      | 1.4767 <sup>(u)</sup>     | Manolakos and Mamalis (1986)       |
| 4.    | 0.8797 | 0.9075                    | Present study                      |
| 5.    | 1.0173 | 1.2386                    | Present study                      |
| 6.    | 1.5524 | 1.6720                    | Present study                      |
|       | 1.5960 | -                         | Koopman and Lance (1965), mesh:5x5 |
|       | -      | 1.7855                    | Nielsen (1990)                     |
|       | -      | 1.3333 <sup>(l)</sup>     | Manolakos and Mamalis (1986)       |
|       | -      | 2.0000 <sup>(u)</sup>     | Manolakos and Mamalis (1986)       |
|       |        | 2.0000                    | Save and Massonet (1972)           |

$$p^* = qL^2/6Mp = 1.333 \mu$$

<sup>(l)</sup> lower bound

<sup>(u)</sup> upper bound

Tabel 1. Plat bujur sangkar : (ukuran jaring 4x4)



Gambar 11. Pelat dengan beban merata dan terpusat

Dengan memvariasikan  $k$ , maka beban runtuh untuk berbagai ratio antara  $p$  terhadap  $q$  dapat diperoleh dengan menggunakan metoda pemrograman linear. Hasilnya, yang dibandingkan dengan hasil pendekatan batas atas (upper-bound) dari Szillard (1984), disajikan dalam tabel 2 dan gambar 12. Sekali lagi terlihat walaupun solusi ini didasarkan atas pendekatan bawah (lower bound) akan tetapi hasilnya tidak selalu dibawah batas exact, mengingat dalam pendekatan ini leleh hanya terjadi pada titik-titik finite difference saja walaupun mungkin kenyataannya kondisi leleh sudah terjadi diantara titik-titik finite difference.

## V.2 Pelat persegi panjang

Sebagaimana pada contoh V.1.1, maka pada pelat persegi panjang ( $4L \times 2L$ ) yang menerima beban merata  $q$ , analisa beban batas dilakukan untuk pelat-pelat dengan berbagai kondisi perletakan. Lihat Gambar 13.

Karena alasan simetris, maka pemolaan (discretization) dari pelat dapat dilakukan hanya pada seperempat bagian dari pelat. Gambar 14 menunjukkan penomoran dari model yang sudah dipolakan.

Kondisi-kondisi keseimbangan dan lelehnya persis sama dengan yang ada pada pelat bujur sangkar. Perbedaannya hanya terletak pada titik 8 sampai dengan 14 yang sekarang berada pada garis simetris sehingga kondisi-kondisi simetris dapat diterapkan kepada titik-titik tersebut. Hasil dari perhitungan terhadap pelat-pelat ini ditunjukkan pada tabel 3.

## VI. Kesimpulan

1. Hasil analisa kekuatan batas yang diperoleh dari metode pendekatan ini cukup dekat dengan hasil-hasil yang didapat peneliti lainnya.
2. Sekali lagi terlihat, walaupun metoda pendekatan ini didasarkan pada teori pendekatan batas bawah akan tetapi hasilnya tidak selalu harus dibawah hasil exact, mengingat leleh hanya dan / atau dipaksakan terjadi pada titik-titik finite difference saja. Jadi semakin halus jaring (mesh) dibuat akan semakin tepat hasil yang diperoleh.
3. dengan membuat program yang interactive, maka persoalan dapat diselesaikan dengan mudah, cepat dengan hasil yang akurat.

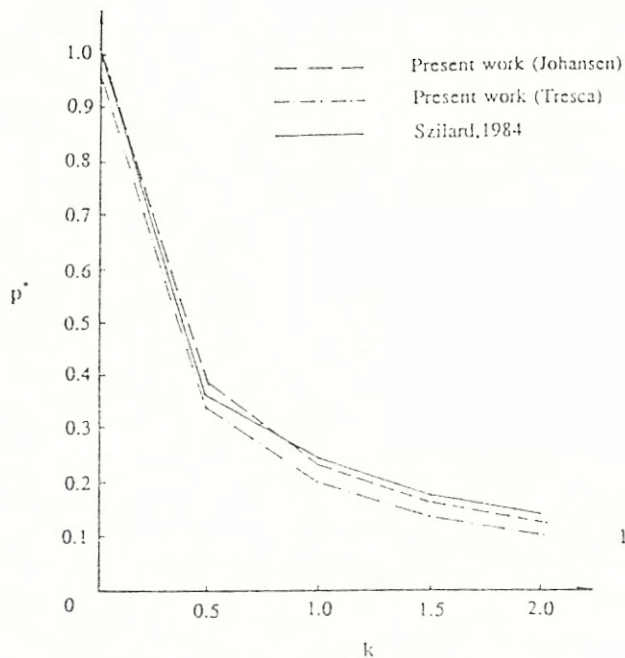
| No | $k = \frac{p}{qab}$ | Collapse multiplier $p^*$<br>(load factor) |          |                   |
|----|---------------------|--------------------------------------------|----------|-------------------|
|    |                     | Tresca                                     | Johansen | Szillard, 1984(+) |
| 1. | 2.0                 | 0.1040                                     | 0.1263   | 0.1412            |
| 2. | 1.5                 | 0.1368                                     | 0.1621   | 0.1783            |
| 3. | 1.0                 | 0.1973                                     | 0.2288   | 0.2403            |
| 4. | 0.5                 | 0.3407                                     | 0.3805   | 0.3568            |
| 5. | 0.0                 | 0.9476                                     | 1.0138   | 1.0000            |

$$p^* = qL^2/6Mp = 1.333 \mu$$

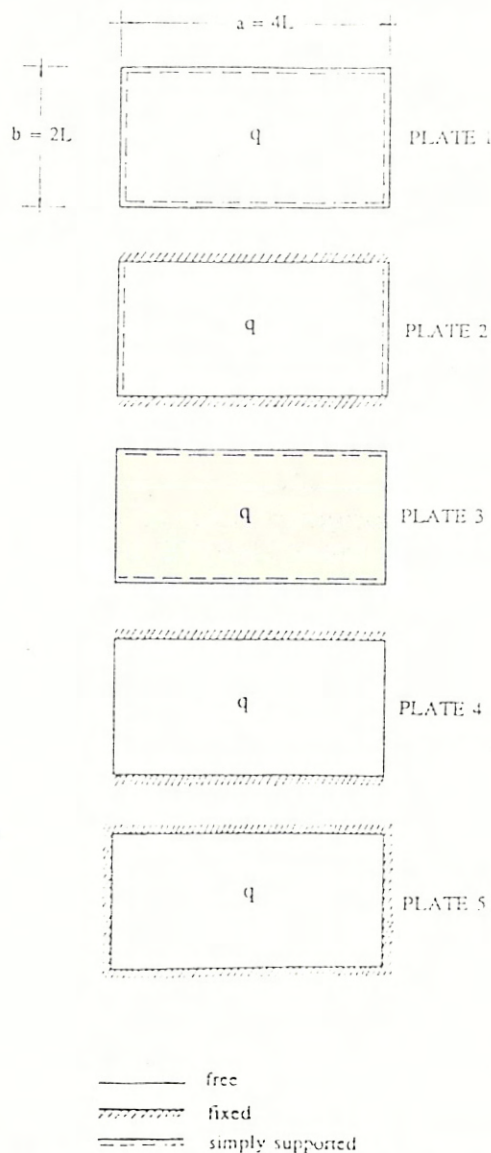
(+) Johansen yield, upper bound solution

Tabel 2. Variasi beban runtuh dari berbagai ratio beban terpusat terhadap beban merata.

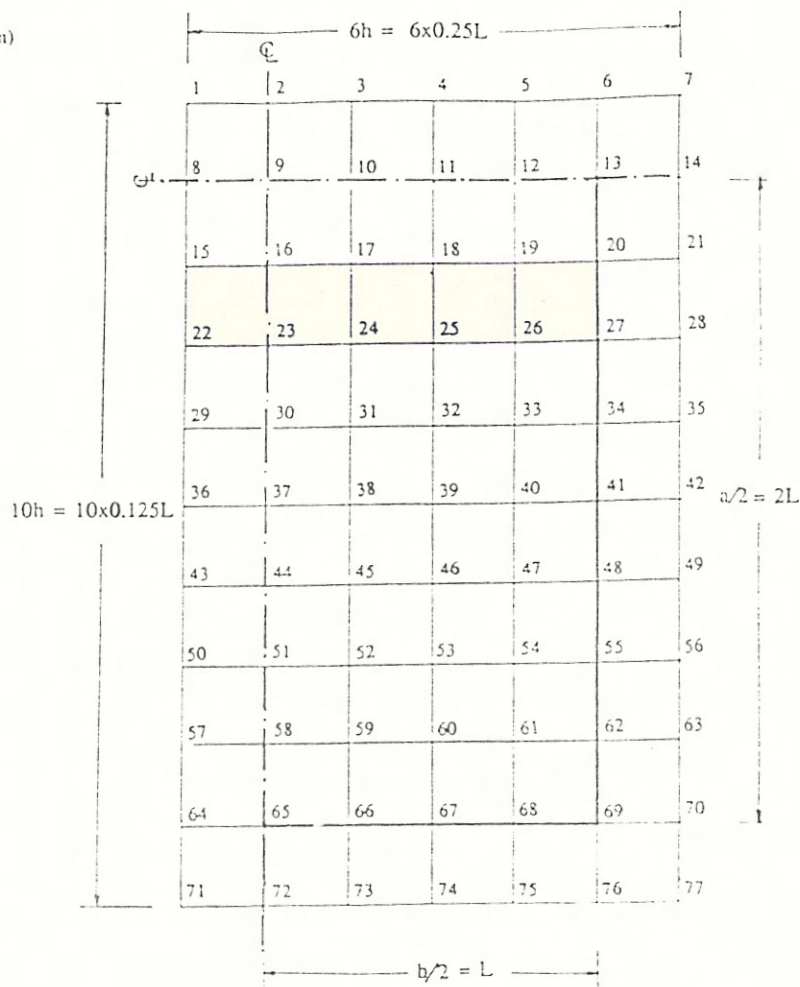




Gambar 12. Variasi  $p^*$  terhadap  $k$



Gambar 13. Lima type pelat persegi panjang



Gambar 14. Model pelat persegi panjang

#### Daftar pustaka

1. Charnes, A. and Greenberg, H.J. (1951). Plastic collapse and linear programming, Amer. Math. Soc, Abstract 506.
2. Koopman, D.C. and Lance, R.H. (1965). On linear programming and Plastic limit analysis, Jnl. Mech. Phys. Solids, 13, 77-87.
3. Maier, G. (1970). A matrix theory of piecewise linear elastoplasticity with interacting yield planes, Meccanica, 5, 54-56.
4. Manolacos, D.E. and Mamalis, A.G. (1986). Upper-and Lower- bounds for rectangular plates transversely loaded, Int. Jnl. Mech. Sci., 28, 801-812.
5. Nielsen, M.P. (1990). Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice Hall, New Jersey.
6. Save, M.A. and Messo-net, C.E. (1972). Plastic Analysis and Design of Plates,

| Plate | $p^*$  |                       |                              |
|-------|--------|-----------------------|------------------------------|
|       | Tresca | Johansen              |                              |
| 1.    | 0.6102 | 0.6565                | Present study                |
|       | -      | 0.6000                | Nielsen (1990)               |
|       | -      | 0.60000               | Save and Massonet (1972)     |
|       | -      | 0.5833 <sup>(a)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986) |
|       | -      | 0.5892 <sup>(u)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986) |
| 2.    | 0.9360 | 0.9550                | Present study                |
|       | -      | 0.7500 <sup>(a)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986) |
|       | -      | 1.0000 <sup>(u)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986) |
| 3.    | 0.5860 | 0.5885                | Present study                |
| 4.    | 0.6629 | 0.6871                | Present study                |
| 5.    | 1.0186 | 1.0515                | Present study                |
|       | -      | 1.1670                | Nielsen (1990)               |
|       | -      | 0.8333 <sup>(a)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986) |
|       | -      | 1.1784 <sup>(u)</sup> | Manolakos and Mamalis (1986) |

$$p^* = qL^2/6Mp = 1.333 \mu$$

<sup>(a)</sup> lower bound

<sup>(u)</sup> upper bound

Tabel 3. Beban runtuh untuk pelat persegi panjang

Shells and Disks, North-Holland Publishing, Amsterdam-London.

7. Sciconic (1990). Sciconic user guide version 2.00, SD-Scicon, Wavendon, Milton Keynes.
8. Shull, H.E and Hu, L.W. (1963). Load-carrying capacities of simply supported rectangular plates, Jnl. Appl. Mech., 30, 617- 621.
9. Szilard, R. (1974). Theory and Analysis of Plates, Classical and Numerical Methods, Prentice Hall, New Jersey.

## PENULIS

*Ir Wawan Witarnawan Sukarja, Msc. ME, lulusan sarjana teknik Sipil ITB tahun 1980 dan Master of Science dalam bidang teknik jalan dari ITB tahun 1984.*

*Master of Engineering dalam bidang struktur dari UNSW Sidney tahun 1992, adalah peneliti pada bidang Konstruksi Bangunan Pelengkap Jalan Pusat Litbang Jalan sejak tahun 1980 sampai sekarang.*



## **FORMAT ARTIKEL FORUM PENELITIAN**

**Pendahuluan  
Metoda Penelitian  
Kerangka Pemikiran  
Hasil dan Pembahasan  
Kesimpulan dan Saran  
Daftar Pustaka  
Lampiran**

