

PENGARUH PERETAKAN BETON DALAM ANALISIS STRUKTUR BETON

Wiratman Wangsadinata¹, Hamdi²

1. Pendahuluan

Dalam analisis struktur beton, pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur-unsurnya menurut SNI 03-2847-2002 Pasal 12.11 (Ref.8) harus diperhitungkan. Untuk itu kekakuan unsur-unsur tersebut yang dihitung berdasarkan penampang utuh dikalikan dengan suatu faktor modifikasi kekakuan. Karena kekakuan lentur suatu unsur ditentukan oleh besaran EI , di mana E dan I adalah berturut-turut modulus elastisitas beton dan momen inersia unsur tersebut, faktor modifikasi kekakuan lentur dapat dikalikan kepada E atau kepada I . Demikian juga dengan besaran kekakuan puntir GJ , di mana G dan J adalah berturut-turut modulus geser beton dan konstanta puntir unsur tersebut, faktor modifikasi kekakuan puntir dapat dikalikan kepada G atau kepada J .

Faktor modifikasi kekakuan lentur unsur struktur beton ditetapkan nilainya di dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 12.11, sedangkan mengenai faktor modifikasi kekakuan puntir unsur tersebut tidak ada ketentuannya secara langsung. Karena itu, dalam analisis struktur beton di dalam praktek, nilai faktor modifikasi kekakuan puntir unsur struktur beton biasanya dipilih sendiri menurut pertimbangan masing-masing pelaku analisis. Di dalam makalah ini akan ditunjukkan, bahwa nilai faktor modifikasi kekakuan puntir unsur struktur beton tidak dapat diambil secara sembarang, karena terkait dengan nilai faktor modifikasi kekakuan lentur unsur tersebut, yaitu melalui rasio Poisson untuk beton dalam keadaan utuh ν_b dan dalam keadaan retak ν_{br} .

Penggunaan nilai-nilai faktor modifikasi kekakuan lentur unsur struktur beton dan faktor modifikasi kekakuan puntir unsur tersebut yang tepat adalah penting sekali, karena menentukan pola pemikulan beban oleh struktur sebagai lentur dan sebagai puntir. Pada unsur-unsur struktur tidak beraturan dengan sistem yang rumit yang memikul momen puntir yang penting, seperti pada balok tepi, balok silang, balok transfer, balok Vierendeel, penentuan besarnya momen puntir tersebut secara tepat adalah penting sekali, sebab menentukan kecukupan jumlah tulangan geser (senggang dan tulangan memanjang) yang diperlukan untuk memikul tegangan geser akibat kombinasi pembebanan lentur dan puntir yang terjadi.

2. Hubungan Antara Kekakuan Lentur dan Kekakuan Puntir Unsur Struktur

Menurut teori elastisitas di dalam sistem sumbu ortogonal x - y - z , suatu regangan perpanjangan (ekstensi) ϵ_x dalam arah- x akibat suatu pembebanan akan disertai dengan regangan pemampatan (kontraksi) ϵ_y dalam arah- y serta regangan pemampatan ϵ_z dalam arah- z menurut persamaan-persamaan berikut (Ref.1):

¹ Direktur Utama Wiratman & Associates, Guru Besar Emeritus Universitas Tarumanagara

² Divisi Komputer Wiratman & Associates

$$\epsilon_y = -\nu \epsilon_x \quad ; \quad \epsilon_z = -\nu \epsilon_x \quad \dots\dots\dots (1)$$

di mana ν adalah suatu konstanta bahan yang disebut rasio Poisson. Untuk bahan yang padat seperti baja nilainya biasanya diambil sebesar $\nu_s = 0,3$. Untuk bahan yang semakin kurang kepadatannya, semakin kurang pula nilai rasio Poisson-nya. Untuk beton dalam keadaan utuh rasio Poisson-nya biasanya ditetapkan sebesar $\nu_b = 0,20$. Untuk beton dalam keadaan retak tidak ada ketentuan mengenai nilainya, tetapi tentu akan lebih kecil dari ν_b dan dalam hal ini dapat diambil sebesar $\nu_{br} = 0,15$.

Hubungan antara modulus geser dan modulus elastisitas beton menurut teori elastisitas ditentukan oleh persamaan-persamaan berikut (Ref.1) :

- untuk beton dalam keadaan utuh :

$$G_b = \frac{E_b}{2(1 + \nu_b)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

- untuk beton dalam keadaan retak :

$$G_{br} = \frac{E_{br}}{2(1 + \nu_{br})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

di mana E_b dan G_b adalah modulus elastisitas dan modulus geser beton dalam keadaan utuh, sedangkan E_{br} dan G_{br} adalah modulus elastisitas dan modulus geser beton dalam keadaan retak.

Bila akibat peretakan beton faktor modifikasi kekakuan lentur dan faktor modifikasi kekakuan puntir unsur struktur beton dinyatakan berturut-turut sebagai :

$$\alpha_1 = \frac{E_{br}}{E_b} \quad ; \quad \alpha_2 = \frac{G_{br}}{G_b} \quad \dots\dots\dots (4)$$

maka dengan membagi pers.(3) dengan pers.(2) didapat persamaan yang memberi hubungan antara α_1 dan α_2 berikut :

$$\alpha_2 = \frac{1 + \nu_b}{1 + \nu_{br}} \alpha_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

dan dari pers.(3) dan (4) didapat persamaan modulus geser untuk beton dalam keadaan retak :

$$G_{br} = \frac{\alpha_1 E_b}{2(1 + \nu_{br})} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Dengan mengisikan $v_b = 0,20$ dan $v_{br} = 0,15$ ke dalam pers.(5) didapat :

$$\alpha_2 = 1,043 \alpha_1 \dots\dots\dots (7)$$

Dari pers.(7) terlihat, bahwa antara faktor modifikasi kekakuan puntir α_2 dan faktor modifikasi kekakuan lentur α_1 unsur struktur beton terdapat hubungan yang pasti dan terlihat pula, bahwa berlaku hubungan $\alpha_1 < \alpha_2 < 1$, yang mana barangkali tidak disadari sebelumnya. Dari pers.(5) terlihat, bahwa faktor modifikasi kekakuan puntir dan faktor modifikasi kekakuan lentur unsur struktur beton akan sama nilainya ($\alpha_2 = \alpha_1$) hanya bila rasio Poisson beton dalam keadaan utuh dan dalam keadaan retak diasumsikan sama nilainya ($v_b = v_{br}$), yang tentu tidak demikian halnya.

Di dalam Tabel 1 ditunjukkan nilai-nilai faktor modifikasi kekakuan puntir unsur struktur beton α_2 menurut pers.(5) untuk nilai-nilai faktor modifikasi kekakuan lentur unsur struktur beton α_1 menurut SNI 03-2847-2002 Pasal 12.11.

Tabel 1 Faktor modifikasi kekakuan lentur α_1 dan faktor modifikasi kekakuan puntir α_2 unsur struktur beton yang mengalami peretakan

| Unsur struktur beton | α_1 menurut SNI 03-2847-2002, Pasal 12.11 | α_2 menurut pers.(5) ($v_b = 0,20, v_{br} = 0,15$) |
|----------------------------|---|---|
| Pelat | 0,25 | 0,260 |
| Balok | 0,35 | 0,364 |
| Kolom | 0,70 | 0,728 |
| Dinding geser retak berat | 0,35 | 0,364 *) |
| Dinding geser retak ringan | 0,70 | 0,728 *) |

*)dalam arah sumbu minor

3. Penggunaan Faktor Modifikasi Kekakuan Unsur Struktur Beton Dalam Program Analisis Struktur

Dalam setiap program analisis struktur pada umumnya selalu harus diinputkan dua sifat utama bahan, yaitu modulus elastisitas bahan E dan rasio Poisson v bahan yang bersangkutan. Modulus geser bahan G kemudian dihitung sendiri oleh programnya. Maka, dalam analisis struktur tersebut diinputkan nilai-nilai modulus elastis bahan E dan rasio Poisson v bahan yang dihadapi.

Bila bahan struktur yang dihadapi adalah beton, dalam penggunaan program analisis struktur komersial terdapat dua opsi yang dapat ditempuh untuk memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur dalam analisisnya.

Opsi 1 adalah dengan menginputkan modulus elastisitas beton dalam keadaan retak $E = \alpha_1 E_b$ dan rasio Poisson beton dalam keadaan retak $v = v_{br} = 0,15$ untuk setiap unsur struktur. Kemudian, programnya akan menghitung modulus geser beton dalam keadaan retak $G = G_{br}$ menurut pers.(6). Dalam analisis struktur ini penampang unsur-unsur struktur ditinjau dalam keadaan utuh (tanpa ada reduksi), karena pengaruh peretakan

beton sudah diperhitungkan melalui penggunaan modulus elastisitas beton dan rasio Poisson beton yang direduksi. Program-program analisis struktur yang dapat memproses Opsi 1 ini adalah a.l. ETABS, SAFE, SAP, STAAD (Ref. 4, 5, 6, 7).

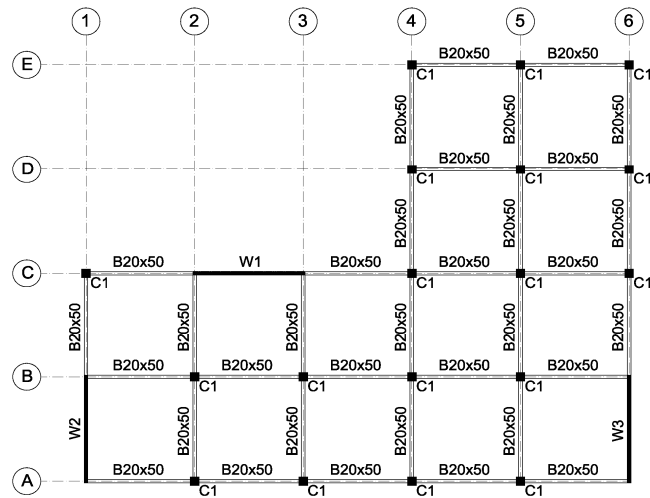
Opsi 2 adalah dengan menginputkan modulus elastisitas beton dan rasio Poisson beton dalam keadaan utuh (tanpa ada reduksi) : $E = E_b$ dan $\nu = \nu_b = 0,20$ untuk setiap unsur struktur. Kemudian, programnya akan menghitung modulus geser beton dalam keadaan utuh $G = G_b$ menurut pers.(2) dan mereduksi kekakuan lentur I dengan faktor modifikasi kekakuan lentur α_1 serta mereduksi kekakuan puntir J dengan faktor modifikasi kekakuan puntir α_2 , di mana α_1 dan α_2 merupakan data yang diinputkan. Program analisis struktur yang dapat memproses opsi ini adalah a.l. ETABS, SAP (Ref. 4, 6).

Jadi dapat dicatat, bahwa dalam penggunaan program ETABS atau SAP, Opsi 1 atau Opsi 2 dapat dipakai untuk memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur dalam analisisnya. Dalam hal ini harus diperhatikan, bahwa Opsi 1 dan Opsi 2 jangan sampai diterapkan bersama-sama, karena hal itu berarti pengaruh peretakan beton diperhitungkan dua kali, yaitu melalui penggunaan modulus elastisitas beton dan rasio Poisson beton yang direduksi dan melalui penggunaan kekakuan lentur dan kekakuan puntir unsur struktur beton yang direduksi.

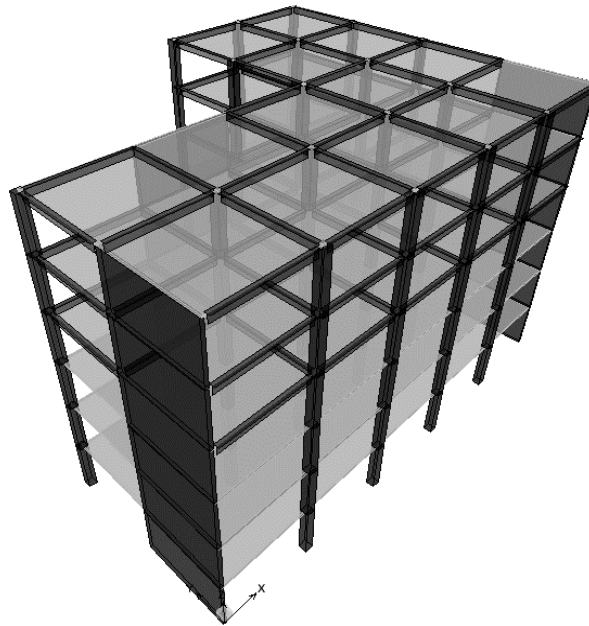
Usaha memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur melalui penggunaan dimensi penampang unsur struktur yang dimodifikasi sulit dilakukan, mengingat peran dimensi penampang terhadap kekakuan lentur dan terhadap kekakuan puntir tidak sama. Seperti diketahui, untuk penampang unsur struktur yang berbentuk persegi berlaku: $I_x = 1/12 bd^3$, $I_y = 1/12 b^3d$ dan $J = kdb^3$, sehingga tidak dapat ditentukan suatu nilai tinggi penampang unsur d atau suatu nilai lebar penampang unsur b yang merepresentasikan pengaruh derajat peretakan beton tertentu; terlebih lagi mengingat faktor k sangat rumit persamaannya, yaitu $k = 1/3 - 0,21 b/d (1 - b^4/12d^4)$ (Ref. 2, 3).

4. Beberapa Kajian

Berikut akan disajikan beberapa kajian mengenai pemakaian Opsi 1 dan Opsi 2 dalam memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur dalam analisisnya. Untuk itu ditinjau suatu contoh gedung 6 tingkat dengan denah berbentuk L seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 (a). Sistem strukturnya terdiri dari 18 kolom dan 3 dinding geser dengan tinggi 3,00 m sebagai unsur-unsur vertikalnya, sedangkan unsur-unsur horisontalnya terdiri dari flat plate dari lantai 1 s/d lantai 3 dan balok-balok dengan lantai biasa dari lantai 4 s/d lantai 6. Ukuran kolom semuanya adalah 0,50 m x 0,50 m, sedangkan tebal dinding geser semuanya 0,20 m. Tebal flat plate adalah 0,20 m, sedangkan ukuran balok semuanya adalah 0,20 m x 0,50 m dengan bentang 6,00 m yang memikul lantai dengan tebal 0,12 m. Sistem struktur secara 3D ditunjukkan dalam Gambar 1 (b). Beton dalam keadaan utuh mempunyai modulus elastisitas $E_b = 28.000$ MPa dan rasio Poisson $\nu_b = 0,20$, dan beton dalam keadaan retak mempunyai rasio Poisson $\nu_{br} = 0,15$. Dalam pemodelan struktur, balok-balok ditinjau berpenampang T, sehubungan lantai tingkat dimodelkan sebagai diafragma yang sangat kaku, sedangkan dinding-dinding geser dan flat plate dimodelkan sebagai cangkang (shell). Beban gravitasi setiap lantai dianggap 10 kN/m^2 . Program yang dipakai untuk analisis struktur adalah ETABS Version 8.50.



(a) Denah gedung



(b) Sistem struktur

Gambar 1 Contoh gedung 6 tingkat dengan denah berbentuk L dan sistem struktur terdiri dari kolom, dinding geser, balok dan flat plate

Dalam menerapkan Opsi 1 dan Opsi 2 untuk memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur dalam analisisnya, dipakai faktor-faktor modifikasi kekakuan unsur struktur beton seperti tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 2 Faktor modifikasi kekakuan unsur struktur untuk analisis struktur gedung pada Kajian I

| Unsur struktur | Opsi 1 ($v_{br} = 0,15$) α_1 | Opsi 2 ($v_b = 0,20$) | |
|--------------------|---|----------------------------|------------|
| | | α_1 | α_2 |
| Pelat (flat plate) | 0,25 | 0,25 | 0,260 |
| Balok | 0,35 | 0,35 | 0,364 |
| Kolom | 0,70 | 0,70 | 0,728 |
| Dinding geser | 0,70 | - | - |

Dari Tabel 2 terlihat, bahwa Opsi 2 tidak ditinjau pada unsur struktur yang berupa dinding geser, mengingat sulit sekali untuk menentukan hubungan antara kekakuan lentur dan kekakuan puntir untuk suatu unsur cangkang (shell). Karena itu, secara umum dapat disarankan, bahwa untuk memperhitungkan pengaruh peretakan beton pada dinding geser, sebaiknya selalu digunakan Opsi 1 dan tidak digunakan Opsi 2.

Kajian I adalah membandingkan hasil analisis dengan menggunakan Opsi 1 dan Opsi 2 dalam memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur. Yang dibandingkan adalah hasil analisis berupa waktu-waktu getar alami, momen lentur, gaya lintang serta momen puntir akibat beban gempa statik ekuivalen yang menangkap pada pusat massa dari masing-masing lantai tingkat. Ternyata, hasil menurut ke dua opsi tersebut tepat sama, sehingga tidak perlu diragukan lagi, bahwa masing-masing opsi tersebut dapat digunakan.

Kajian II adalah membandingkan hasil analisis dengan menggunakan Opsi 1 (yang benar) dan Opsi 2, tetapi dengan mengambil nilai α_2 yang sembarang. Dalam hal ini, Opsi 2 (a) meninjau faktor modifikasi kekakuan puntir untuk semua unsur struktur yang relatif rendah, yaitu sebesar $\alpha_2 = 0,10$, dan Opsi 2 (b) meninjau faktor modifikasi kekakuan puntir untuk semua unsur struktur yang relatif tinggi, yaitu sebesar $\alpha_2 = 0,90$, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Faktor modifikasi kekakuan untuk analisis struktur gedung pada Kajian II

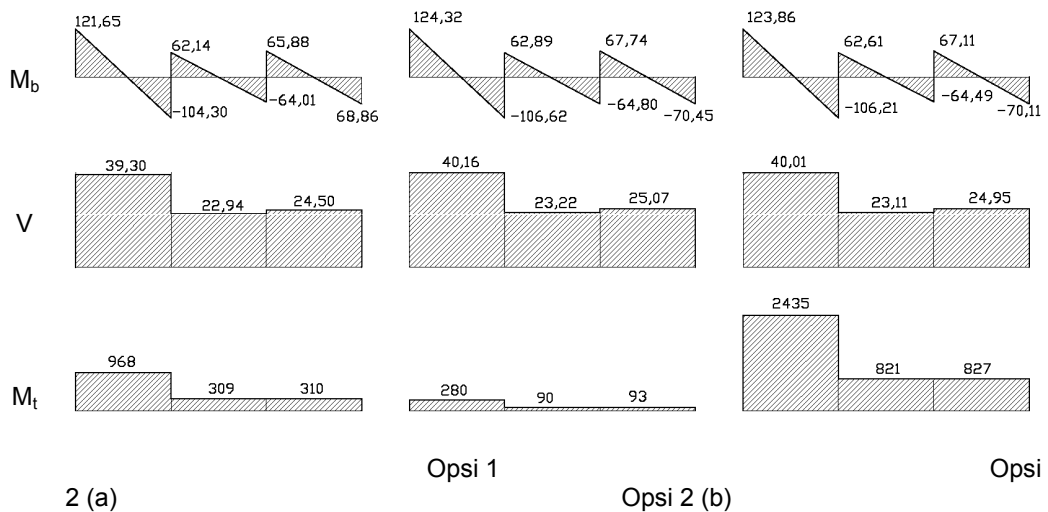
| Unsur struktur | Opsi 1 ($v_{br} = 0,15$) α_1 | Opsi 2 (a) ($v_b = 0,20$) | | Opsi 2 (b) ($v_b = 0,20$) | |
|--------------------|---|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| | | α_1 | α_2 | α_1 | α_2 |
| Pelat (flat plate) | 0,25 | 0,25 | 0,10 | 0,25 | 0,90 |
| Balok | 0,35 | 0,35 | 0,10 | 0,35 | 0,90 |
| Kolom | 0,70 | 0,70 | 0,10 | 0,70 | 0,90 |
| Dinding geser | 0,70 | - | - | - | - |

Pertama-tama yang dibandingkan adalah hasil analisis berupa waktu-waktu getar alami yang ditunjukkan dalam Tabel 4. Dari tabel tersebut dapat terlihat, bahwa penyimpangan dalam pengambilan kekakuan puntir tidak seberapa berpengaruh terhadap nilai waktu-waktu getar alami struktur gedung, setidaknya untuk 5 ragam pertama. Hal ini berarti, bahwa penyimpangan dalam pengambilan kekakuan puntir tidak seberapa berpengaruh terhadap beban gempa yang diserap oleh struktur gedung tersebut.

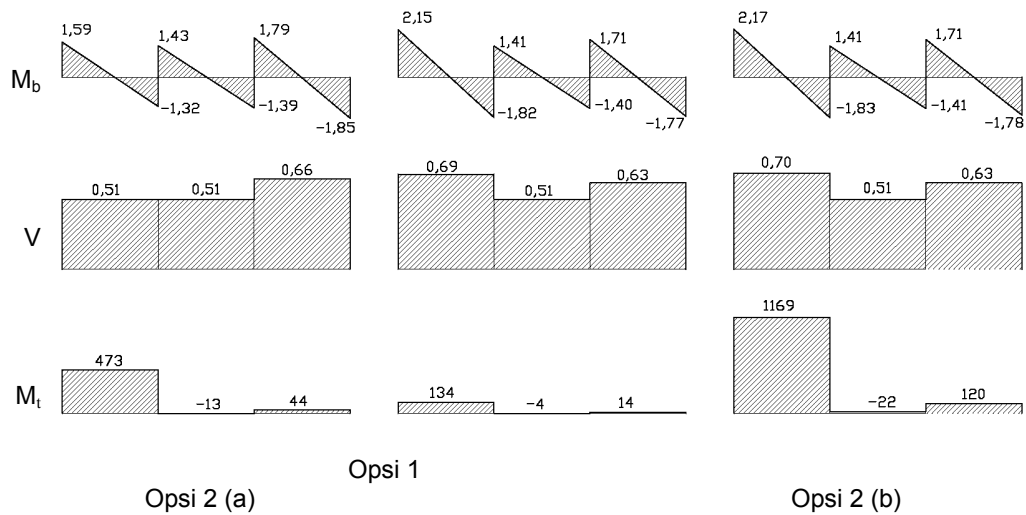
Tabel 4 Waktu getar alami struktur gedung berdasarkan 3 pada Kajian II

| Ragam | Opsi 1 (detik) | Opsi 2 (a) (detik) | Opsi 2 (b) (detik) |
|-------|----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 1,034 | 1,035 | 1,035 |
| 2 | 0,805 | 0,804 | 0,803 |
| 3 | 0,464 | 0,430 | 0,429 |
| 4 | 0,221 | 0,220 | 0,220 |
| 5 | 0,163 | 0,161 | 0,161 |

Selanjutnya, yang dibandingkan adalah hasil analisis berupa momen lentur (dalam kNm), gaya lintang (dalam kN) dan momen puntir (dalam Nm) akibat beban gempa statik ekuivalen. Untuk itu ditinjau balok Portal 6 di lantai 4, yang hasilnya ditunjukkan dalam Gambar 2 untuk beban gempa dalam arah-y dan dalam Gambar 3 untuk beban gempa dalam arah-x, masing-masing untuk Opsi 1, Opsi 2 (a) dan Opsi 2 (b).



Gambar 2 Momen lentur, gaya lintang dan momen puntir balok Portal 6 di lantai 4 untuk 3 opsi akibat beban gempa statik ekuivalen dalam arah-y



Gambar 3 Momen lentur, gaya lintang dan momen puntir balok Portal 6 di lantai 4 untuk 3 opsi akibat beban gempa statik ekuivalen dalam arah-x

Dari Gambar 2 dan Gambar 3 dapat terlihat, bahwa penyimpangan dalam pengambilan kekakuan puntir tidak seberapa berpengaruh terhadap momen lentur dan gaya lintang, tetapi terhadap momen puntir pengaruhnya cukup signifikan. Untuk pengambilan kekakuan puntir yang terlalu rendah ($\alpha_2 = 0,10$), momen puntir yang terjadi hanya termobilisasi sebagian dan terhadap yang benar (Opsi 1) nilainya hanya 29% untuk gempa arah-x maupun untuk gempa arah-y. Untuk pengambilan kekakuan puntir yang terlalu tinggi ($\alpha_2 = 0,90$), momen puntir yang terjadi termobilisasi berlebihan dan terhadap yang benar (Opsi 1) nilainya sampai 250% untuk gempa arah-x maupun untuk gempa arah-y.

Pada contoh struktur gedung ini yang dapat dikatakan cukup beraturan, pengambilan kekakuan puntir yang menyimpang menghasilkan momen puntir yang terjadi yang menyimpang cukup signifikan terhadap yang seharusnya terjadi. Penyimpangan ini akan lebih menyolok lagi pada struktur yang tidak beraturan dengan sistem yang rumit, seperti yang mengandung banyak balok silang, balok transfer, balok Vierendeel dan kantilever panjang.

Dengan pengambilan kekakuan puntir yang tepat, analisis struktur akan menghasilkan pola pemikulan beban oleh struktur sebagai lentur dan sebagai puntir yang tepat pula, sehingga kecukupan penulangan geser pada unsur-unsur yang memikul kombinasi pembebanan lentur dan puntir menjadi lebih terjamin.

5. Kesimpulan

Dari pembahasan di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan berikut:

1. Memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur dalam analisisnya, dapat dilakukan dengan cara mereduksi modulus elastisitas beton dalam keadaan utuh E_b dengan mengalikannya dengan faktor modifikasi kekakuan lentur α_1 menurut ketentuan SNI 03-2847-2002 dan bersamaan dengan itu

menginputkan nilai rasio Poisson untuk beton dalam keadaan retak $v_{br} = 0,15$ (Ops 1 dalam makalah ini).

2. Memperhitungkan pengaruh peretakan beton terhadap kekakuan unsur struktur dalam analisisnya, dapat juga dilakukan dengan cara mereduksi kekakuan lentur unsur-unsur struktur dengan mengalikannya dengan suatu faktor modifikasi kekakuan lentur α_1 menurut ketentuan SNI 03-2847-2002, dan bersamaan dengan itu mereduksi kekakuan puntir unsur-unsur struktur tersebut dengan mengalikannya dengan suatu faktor modifikasi kekakuan puntir α_2 yang nilainya bergantung pada nilai faktor modifikasi kekakuan lentur α_1 (Ops 2 dalam makalah ini).
3. Dengan menetapkan nilai rasio Poisson untuk beton dalam keadaan utuh sebesar $v_b = 0,20$ dan untuk beton dalam keadaan retak sebesar $v_{br} = 0,15$, dihasilkan hubungan antara α_1 dan α_2 menurut persamaan $\alpha_2 = 1,043 \alpha_1$, sehingga berlaku hubungan $\alpha_1 < \alpha_2 < 1$.
4. Penyimpangan dalam pengambilan kekakuan puntir tidak seberapa berpengaruh terhadap nilai waktu-waktu getar alami struktur, sehingga tidak seberapa berpengaruh juga terhadap beban gempa yang diserap oleh struktur tersebut.
5. Pada struktur yang cukup beraturan pengaruh penggunaan kekakuan puntir yang menyimpang dapat cukup signifikan terhadap momen puntir yang terjadi, apa lagi pada struktur yang tidak beraturan dengan sistem yang rumit, seperti yang mengandung banyak balok silang, balok transfer, balok Vierendeel dan kantilever panjang.
6. Dengan menginputkan nilai-nilai modulus elastisitas dan rasio Poisson yang tepat, atau menginputkan nilai-nilai faktor modifikasi kekakuan lentur dan faktor modifikasi kekakuan puntir yang tepat, analisis struktur akan menghasilkan pola pemikulan beban oleh struktur sebagai lentur dan sebagai puntir yang tepat pula, sehingga kecukupan penulangan geser pada unsur-unsur struktur yang memikul kombinasi pembebanan lentur dan puntir yang penting, menjadi lebih terjamin.

6. Referensi

1. Timoshenko, S.; Goodier, J.N. (1951): *"Theory of Elasticity"*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, Toronto, London, 1951.
2. Gere, J.M.; Weaver, W. (1965): *"Analysis of Framed Structures"*, D. Van Nostrand Co. Inc., Toronto, New York, London, 1965.
3. Jenkins, W.M. (1969): *"Matrix and Digital Computer Methods in Structural Analysis"*, McGraw-Hill, London, 1969.
4. ETABS Version 8.5.0, *"Integrated Building Design Software"*, Computer and Structure, Inc., Berkeley, California, USA, 2005.
5. SAFE Version 8, *"Integrated Design Of Flat Slabs, Foundation Mats & Spread Footings"*, Computer and Structure, Inc., Berkeley, California, USA, 2002.
6. SAP-2000 Version 8.3.7, *"Integrated Software For Structural Analysis & Design"*, Computer and Structure, Inc., Berkeley, California, USA, 2004.
7. STAADPro 2004, *"Structural Analysis and Design Software"*, Research Engineering International, A Division of netGuru, Inc., 2004.

8. SNI 03-2847-2002: "*Tata cara perencanaan struktur beton untuk bangunan gedung*", Badan Standarisasi Nasional, 2002.