

Perkiraan Kehancuran Bangunan Rumah Toko di Kota Medan Akibat Skenario Terburuk Gempa Subduksi Nias

Ade Faisal dan Syafrina Mayang Sari

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU)

Jl. Mukhtar Basri No.3, Medan 20238. E-mail: adefaisal@umsu.ac.id

Abstrak

Pada umumnya bangunan rumah toko (*ruko*) di Kota Medan tidak direncanakan secara baik dan dibangun dengan pengawasan yang buruk, sehingga beresiko besar terhadap beban dinamis gempa. Getaran gempa dari zona subduksi Sumatera yang mengandung frekwensi rendah dan berdurasi panjang dirasakan beberapa kali di Kota Medan. Beberapa rumah dan hotel mengalami retak non struktural akibat getaran gempa Nias 2005. Untuk itu sejumlah contoh beton segar, baik itu beton segar ready-mix maupun beton segar campuran manual, beserta sejumlah potongan besi tulangan diambil di lokasi pembangunan *ruko* dan diuji di laboratorium. Tegangan tekan dan tegangan tarik hasil pengujian digunakan sebagai properti bahan model-model *ruko*. Model-model *ruko* ini terdiri dari 2, 3 dan 4 lantai dengan 1, 2 dan 3 pintu (*bentang*). Kemudian analisa non elastik struktur beton bertulang dilakukan menggunakan alat bantu program IDARC2D menggunakan gaya getaran gempa sintetik dari skenario terburuk gempa subduksi Nias. Hasilnya menunjukkan bahwa umumnya bangunan *ruko* ini mengalami banyak retak. Bahkan beberapa *ruko* menunjukkan kinerja yang sangat rendah dan tidak dapat diperbaiki akibat tingkat kehancuran yang tinggi.

Kata kunci: Medan, rumah toko, gempa sumatera dan analisa kehancuran.

Abstract

In Medan, the shop-house (*ruko*) buildings are generally not engineered-designed properly and constructed in bad supervision; hence it has big risk to dynamic loads like earthquake. The low frequency and long duration of earthquake vibrations were felt frequently in Medan due to earthquakes in Sumatra subduction zones. Moreover, some houses and hotels have been cracked caused the tremor from Nias earthquake in 2005. Therefore, a number of samples of fresh concrete, either ready-mix or mixed manually, and the stick of steel reinforcement are taken from *ruko* construction site and tested in the lab. The results of the material compression and tensile testing are used as material properties of *ruko* model. The *ruko* model consists of 2, 3, and 4 stories and 1, 2, and 3 bays. The inelastic analysis of reinforced concrete structures are then applied by using IDARC2D program and employed synthetic ground motion forces from Nias subduction earthquake scenarios. The result shows that most of *ruko* buildings experiencing cracks extensively, even some of them show a high damage level with very low performance and beyond repair.

Keywords: Medan, shop-house, sumatran earthquake and damage analysis.

1. Pendahuluan

Hampir di setiap jalan di kota Medan ditemukan bangunan *ruko* (rumah toko) yang berfungsi sebagai lokasi perdagangan sekaligus tempat tinggal. *Ruko* telah menjadi *trademark* di kota ini. Sayangnya secara struktural bangunan *ruko* terlihat tidak direncanakan sebagaimana mestinya. Bisa jadi dibuat dengan perencanaan yang

mengesampingkan perhitungan analisa struktur. Parahnya lagi sering didapati bangunan-bangunan bermasalah, izin yang diberikan hanya 2 lantai ternyata di lapangan berdiri 3 atau bahkan 4 lantai.

Posisi kota Medan terletak tidak begitu jauh dengan zona gempa, hanya sekitar $\pm 80-195$ km dari garis patahan *strike-slip* dan zona subduksi Sumatera, sebuah sistem

patahan yang sangat aktif seismisitasnya di Indonesia, bahkan di dunia. Laporan studi BMG [1] mencatat bahwa sejumlah getaran yang dirasakan di kota ini menunjukkan tren peningkatan intensitas yang signifikan. Umumnya tanah-tanah lunak yang terbebani getaran berfrekwensi rendah akan memberikan perioda alami yang mendekati perioda alami struktur bangunan bertingkat dan ini berbahaya. Getaran yang berfrekwensi rendah dan berdurasi panjang umumnya bersumber dari gempa jauh. Kekhawatiran akan resiko gempa seperti ini tidak dapat dianggap ringan karena sejarah pernah mencatat bahwa walaupun berjarak ± 350 km dari pusat gempa yang berkekuatan $M_S=8,1$, bangunan bertingkat di kota Mexico City, yang tidak direncanakan secara baik, hancur lebur secara mengerikan. Sebuah kejadian yang tidak terpikirkan oleh masyarakat awam dan masyarakat konstruksi di sana sebelumnya. Kota Medan sendiri terakhir kali mengalami getaran akibat gempa jauh adalah 28 Maret 2005. Gempa tersebut bersumber dari zona subduksi Nias, sekitar 225 km dari kota Medan dan berkekuatan $M_w=8,7$. Gempa ini sempat membuat retak non struktural beberapa bangunan rumah tinggal dan hotel di kota Medan.

Penelitian ini berusaha untuk mengetahui perilaku perpindahan atap bangunan rumah toko (ruko) terhadap beban gempa jauh, mengetahui tingkat kehancuran yang mungkin timbul dan mekanisme kehancuran akhir bila gempa jauh yang kuat terjadi. Studi ini juga diharapkan dapat memberi kontribusi yang bermanfaat seperti memberikan informasi kepada masyarakat dan pemerintah tentang perilaku dan sifat mudah runtuh/hancur (*vulnerability*) bangunan ruko terhadap getaran yang memiliki frekwensi rendah dan berdurasi panjang.

1.2. Pengaruh Gempa Terhadap Struktur Bangunan Bertingkat Beton Bertulang

Penyelidikan empiris dan studi yang terkait dengan teori respon dinamik pada struktur rangka beton bertulang yang dibebani getaran gempa yang kuat menunjukkan sebuah hubungan yang sangat jelas antara simpangan antar tingkat (*inter-*

story drift) dan potensi kegagalan struktur [2]. Studi lain menjelaskan bahwa harga kritis simpangan antar tingkat sebesar 2% terjadi pada lantai 7 pada bangunan beton bertulang 10 lantai yang dibebani gempa sangat kuat [3]. Sementara itu pengujian sampai hancur dengan menggunakan beban dinamis tiruan pada bangunan beton bertulang 4 lantai menghasilkan harga kritis simpangan antar tingkat sebesar 7,18% [4]. Sedangkan hasil studi lain pada bangunan beton bertulang berlantai 10 menunjukkan bahwa hancurnya kolom pertama kali terjadi seketika setelah simpangan mencapai 3% [5].

Untuk kasus gempa jauh di Singapura, gempa $M_w=7,6$ berjarak 400 km dari lokasinya mampu menghasilkan gaya geser dasar gempa sampai mencapai 10% dari berat struktur bangunan [6]. Sedangkan bangunan beton bertulang bertingkat banyak di Malaysia, khususnya di kota Kuala Lumpur dan Pulau Pinang, beresiko terhadap gempa jauh $M_w=7,8$ pada jarak 281 km dari Patahan Sumatera. Gempa seperti ini mampu memberikan gaya geser dasar gempa mencapai 29,7% dari berat bangunan beton berlantai 10. Gaya gempa ini ternyata dapat menyebabkan balok mengalami kegagalan struktur pada bangunan di sana, yang umumnya tidak mengikutkan pengaruh gempa jauh dalam perencanaannya [7]. Kondisi ini sangat mirip dengan kondisi yang terjadi pada bangunan ruko di Kota Medan, dimana bangunan ruko ini mengesampingkan perencanaan yang matang terhadap bahaya gempa.

1.3. Analisa Kehancuran Struktur Beton Bertulang

Park dkk [8] menghasilkan sebuah model struktur yang dapat mengevaluasi kehancuran struktur beton bertulang atau indeks kehancuran akibat gaya getaran gempa. Studi mereka menggunakan pengertian kehancuran sebagai sebuah fungsi linear dari deformasi maksimum dan merupakan pengaruh dari perulangan pembebanan bersiklus. Studi lain yang serupa juga dilakukan untuk mendeteksi kehancuran melalui penentuan bagian mana dari struktur yang melemah [9].

Kemudian Kunnath dkk [10,11] mengembangkan model kehancuran Park dkk untuk bagian ujung elemen. Lebih lanjut, indeks kehancuran dikembangkan dengan menggabungkan prinsip-prinsip yang disebutkan di atas dengan mempertimbangkan melemahnya elemen struktur akibat pembebanan bersiklus rendah. Hasil tersebut diperoleh dengan menggabungkan hasil-hasil dari analisa riwayat waktu dan analisa beban dorong [12].

2. Metodologi

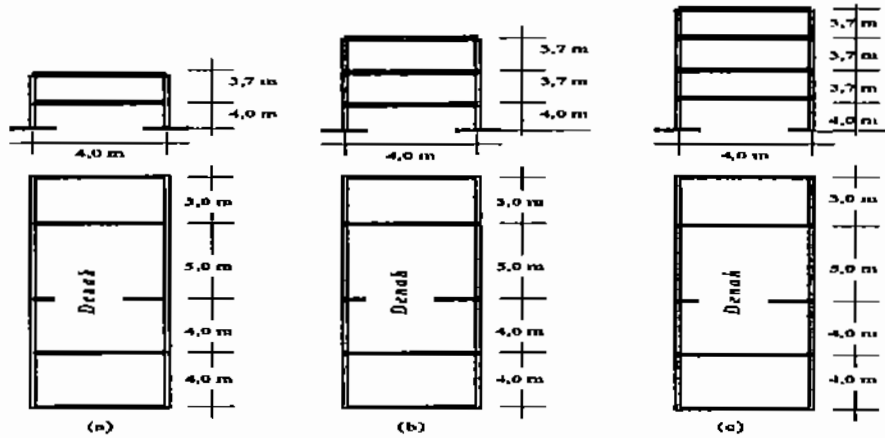
Model struktur yang diselidiki adalah bangunan beton bertulang ruko dengan karakteristik beton K175 ($f'_c=14,2$ MPa), $f_y=330$ MPa (tulangan utama dan tulangan sengkang) dan memiliki keadaan geometrik 2, 3 dan 4 lantai untuk 1, 2 dan 3 pintu. Tinggi lantai 2 terhadap lantai dasar adalah 4,0 meter sedangkan tinggi lantai-lantai berikutnya diasumsikan sama sebesar 3,7 meter. Lebar bentang satu pintu sebesar 4,0 m dan sama untuk setiap bentang-bentang berikutnya. Total jumlah bangunan ruko yang diselidiki berdasarkan keadaan geometrinya ini adalah 9 buah. Kekuatan material beton dan tulangan yang digunakan berdasarkan pengujian beton keras umur 28 hari berukuran silinder diameter 15 cm tinggi 30 cm dan/atau kubus 15x15x15 cm yang diambil dari beberapa pembangunan ruko di 10 lokasi di Kota Medan. Besi tulangan yang digunakan saat pelaksanaan konstruksi bangunan ruko juga diuji. Salah satu bentuk geometri kondisi bangunan ruko yaitu ruko 1 pintu dengan 2, 3 dan 4 lantai ditunjukkan pada Gambar 1. Sedangkan untuk ruko dengan geometri 2 dan 3 pintu semuanya sama kecuali jumlah bentang (pintu) pada bagian denah. Untuk properti penampang dan tulangan diambil berdasarkan keadaan di lapangan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Untuk ketebalan pelat lantai digunakan 12 cm dan pelat atap 10 cm. Struktur-struktur ini diberikan beban (i) gravitasi, (ii) bergerak, dan (iii) gempa.

Kombinasi beban-beban mengikuti syarat SNI 1727-1987 [13]. Beban gempa menggunakan beban riwayat waktu percepatan di permukaan tanah akibat skenario terburuk gempa subduksi Nias

[14,15] yang menggunakan fungsi atenuasi Youngs dkk. [16] modifikasi Petersen dkk. [17] (lihat Tabel 2). Gempa tersebut memiliki magnituda $M_w=9,3$ dan kedalaman 30 km dengan jarak ke Medan $R=195$ km. Gempa ini menghasilkan nilai percepatan puncak lebih kecil 23%-33% dibanding SNI-1726-2003 [18].

Perilaku respon struktur dievaluasi dengan menggunakan analisa kehancuran dan kinerja. Struktur dianalisa perilaku responnya sampai tidak linear atau mengalami kegagalan sehingga diketahui tingkat kinerjanya [8-12]. Untuk hal ini digunakan alat bantu berupa program IDARC2D versi 5,0 yang dikembangkan oleh Valles dkk [19]. Semua model ruko diasumsikan sebagai portal 2 dimensi tanpa panel pengisi dinding bata dan dianalisa secara dinamis non elastik. Properti beton (*unconfined*) dan besi tulangan diasumsikan memenuhi karakteristik kurva tegangan-regangan berikut [19]: persentase regangan pada kondisi kekuatan beton maksimum sebesar 0,2%, tegangan saat mengalami retak tarik adalah $0,12f'_c$, dan persentase regangan batas (*ultimate*) saat mengalami tekan adalah 0,67%. Sedangkan untuk besi tulangan kekuatan batasnya adalah $1,4 f_y$, modulus regangan saat *hardening* adalah $3,33 \text{ kN/mm}^2$ dan persentase regangan saat mulai *hardening* adalah 3,0%. Aturan pemodelan histeretik balok dan kolom yang digunakan adalah model histeretik multi-linear berorientasi *vertex* [19] sebagai berikut: parameter degradasi kekakuan adalah 100 (degradasi kecil), parameter degradasi kekuatan berbasis daktilitas 0,1 (deteriorasi nominal), parameter degradasi kekuatan berbasis energi histeretik adalah 0,05 (hampir tanpa deteriorasi) dan diasumsikan tidak terjadi *slip*.

Rekaman gempa yang dipakai untuk analisa dinamis non elastik adalah rekaman gempa subduksi $M_w=7,3$ Alaska 28/09/1979 dari stasiun gempa Icy Bay (Gambar 2) yang memiliki frekwensi rata-rata 1.48 Hz dengan durasi waktu 60 detik dan lompatan waktu 0,01 detik. Rekaman gempa ini dipilih berdasarkan metode usulan Bommer dan Acevedo [20] untuk mewakili getaran gempa jauh yang berasal dari kawasan *megathrust*



Gambar 1. Salah Satu Geometri Struktur Model Ruko (1 Pintu Dengan 2, 3 dan 4 Lantai).

Tabel 1. Hasil Survey Terhadap Ukuran Penampang dan Tulangan Bangunan Ruko di Kota Medan.

Level	Penampang		Tulangan Utama		Tulangan Senggang	
	Balok	Kolom	Balok	Kolom	Balok	Kolom
Lantai dasar	-	25 x 35 cm	-	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	-	Ø6-15 cm
Lantai 2	20 x 40 cm	25 x 25 cm	Tekan: 3 Ø 16 Tarik: 3 Ø 16 Badan: 2 Ø 14	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	Ø6-20 cm	Ø6-15 cm
Atap	20 x 30 cm	-	Tekan: 3 Ø 14 Tarik: 3 Ø 14	-	Ø6-20 cm	-

Struktur a:

Level	Penampang		Tulangan Utama		Tulangan Senggang	
	Balok	Kolom	Balok	Kolom	Balok	Kolom
Lantai dasar	-	25 x 35 cm	-	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	-	Ø6 -15 cm
Lantai 2	20 x 40 cm	25 x 35 cm	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø 16 Badan: 2 Ø 14	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	Ø6-20 cm	Ø 6-15 cm
Lantai 3	20 x 40 cm	-	Tekan: 3 Ø 16 Tarik: 3 Ø 16 Badan: 2 Ø 14	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	Ø6 -20 cm	Ø6 -15 cm
Atap	20 x 30 cm	-	Tekan: 3 Ø 14 Tarik: 3 Ø 14	-	Ø6 -20 cm	-

Struktur b:

Level	Penampang		Tulangan Utama		Tulangan Senggang	
	Balok	Kolom	Balok	Kolom	Balok	Kolom
Lantai dasar	-	25 x 40 cm	-	Tekan: 3 Ø22 Tarik: 3 Ø22 Badan: 2 Ø16	-	Ø6-15 cm
Lantai 2	20 x 50 cm	25 x 35 cm	Tekan: 3 Ø 16 Tarik: 3 Ø 16 Badan: 4 Ø 16	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	Ø6 -20cm	Ø6 -15 cm
Lantai 3	20 x 40 cm	25 x 35 cm	Tekan: 3 Ø 16 Tarik: 3 Ø 16 Badan: 2 Ø 14	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	Ø6 -20 cm	Ø6 -15 cm
Lantai 4	20 x 40 cm	25 x 35 cm	Tekan: 3 Ø 16 Tarik: 3 Ø 16 Badan: 2 Ø 14	Tekan: 3 Ø16 Tarik: 3 Ø16 Badan: 2 Ø16	Ø6 -20 cm	Ø6 -15 cm
Atap	20 x 30 cm	-	Tekan: 3 Ø 14 Tarik: 3 Ø 14	-	Ø6 -20 cm	-

Struktur c:

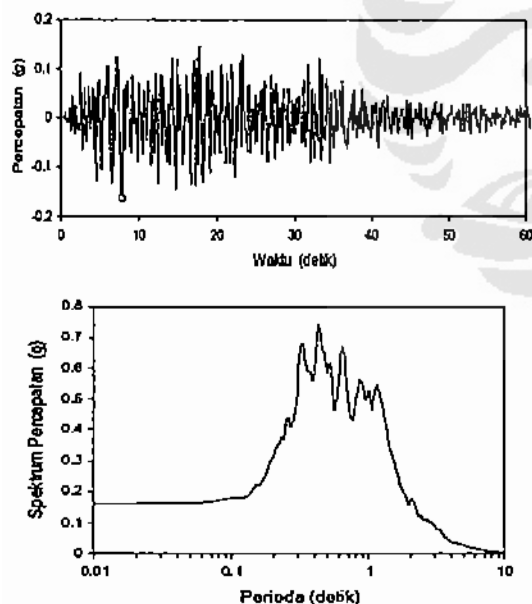
Tabel 2.
Percepatan Puncak Pada Batuan Dasar dan Permukaan Tanah untuk Kota Medan.

Sumber acuan	Percepatan puncak (g)			
	Batuan dasar	Tanah keras	Tanah sedang	Tanah lunak
SNI-1726-2003 untuk semua jenis gempa di wilayah 3 [18]	0.150	0.180	0.220	0.300
Skenario terburuk gempa Nias Mw=9,3; R=195 km [14,15]	0.100	0.138	0.169	0.230

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Kekuatan Material Beton dan Besi Tulangan

Hasil pengujian beton silinder dari pembuatan ruko menunjukkan tingkat yang bervariasi. Namun demikian campuran beton 1:2:3 tampak yang paling sering digunakan di lapangan untuk mendapat mutu beton K175 ($f'_c=14,2$ MPa). Hasil analisa statistik uji-T terhadap 80 benda uji menunjukkan bahwa nilai tengah untuk campuran 1:2:2 adalah yang paling tinggi, sedangkan untuk beton *ready mix* terdapat 2 nilai yang menunjukkan nilai di bawah 100 kg/cm^2 (9,8 MPa).



Gambar 2.
Rekaman Gempa Alaska 28/09/1979 Mewakili Gempa Subduksi Nias.

Tampak juga dengan jelas bahwa campuran 1:2:3 dan 2:3:5 menunjukkan gejala sedikit lebih rendah dari batas bawah yang seharusnya mereka capai untuk beton K175 dengan benda uji silinder ($145,2 \text{ kg/cm}^2$ atau 14,2 MPa). Kondisi yang sangat

sangat jauh dari yang diharapkan ditunjukkan hasil beton *ready mix* K175 yang diambil dari pembangunan ruko di 2 lokasi jalan yang berbeda. Penyebabnya adalah kecerobohan pelaksana yang mencampur beton *ready mix* dengan material tambahan karena alasan beton segar terlalu cair

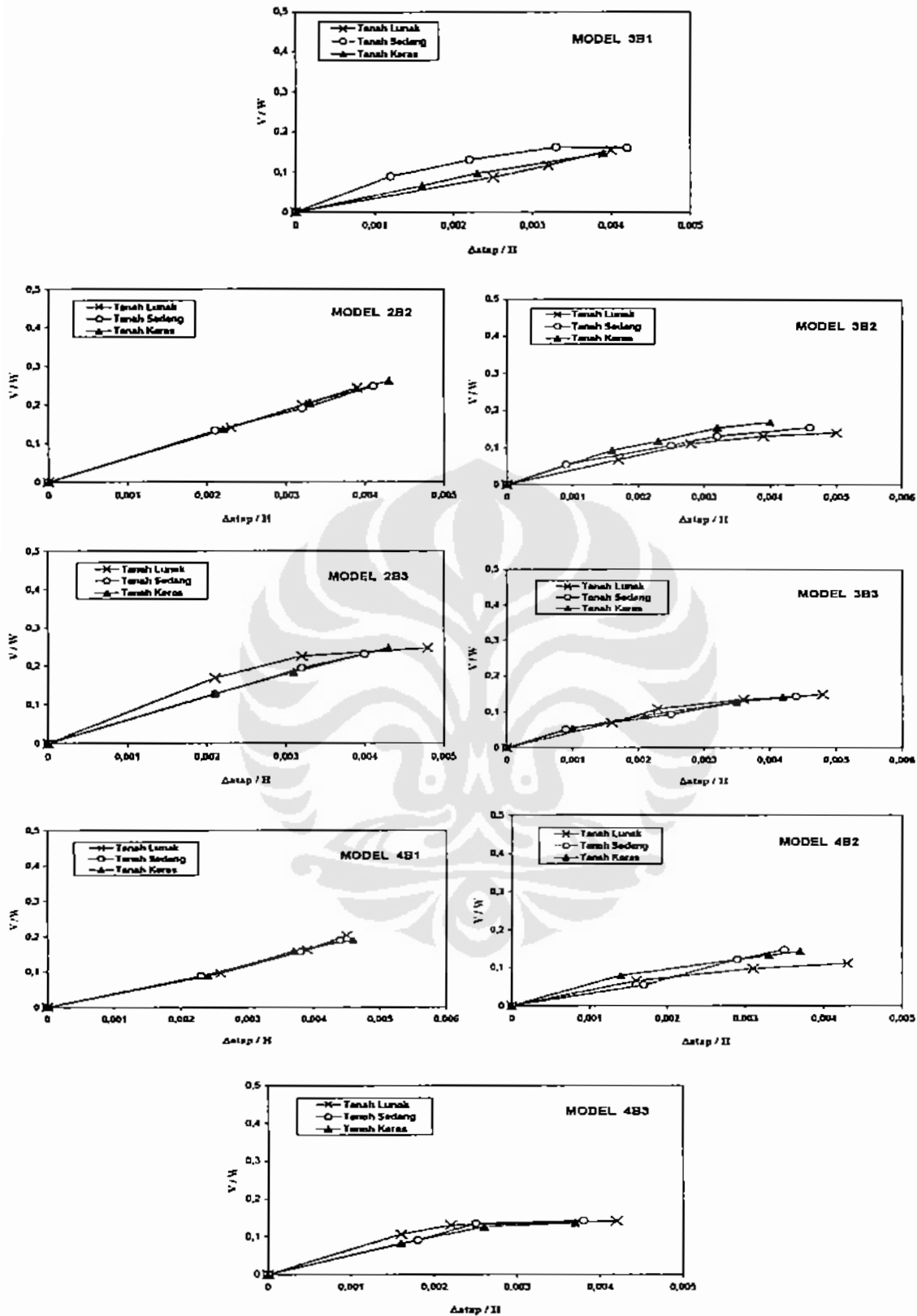
Untuk langkah selanjutnya hanya struktur beton bangunan ruko yang memakai metoda pencampuran tradisional 1:2:3, 2:3:5 dan 1:2:2 yang dianalisa. Maka nilai rata-rata kuat beton karakteristik yang diambil adalah $142,5 \text{ kg/cm}^2$ ($f'_c=14,2$ MPa) yang berasal dari 3 nilai batas bawah selang kepercayaan 95%. Tulangan baja U24 yang diambil sebagai benda uji dari lokasi pembangunan ruko secara umum tidak memiliki masalah sama sekali karena nilai yang diperoleh jauh lebih tinggi dari yang diperkirakan yaitu sebesar $f_y=330$ MPa.

3.2. Kapasitas Struktur Ruko

Respon setiap jenis struktur bangunan ruko dalam kurva kapasitas (koefisien gaya geser dasar V/W dan simpangan atap Δ_{atap}/H), yaitu sampai tahap elemen struktur (balok/kolom) mengalami leleh awal, terhadap skenario gempa terburuk ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil-hasil yang diperoleh ini sebagian besar memenuhi apa yang diperkirakan oleh ATC-40 dan FEMA 274 [21,22]. Dimana rata-rata bangunan ruko merespon skenario gempa subduksi Nias dengan simpangan maksimum 0,004-0,005.

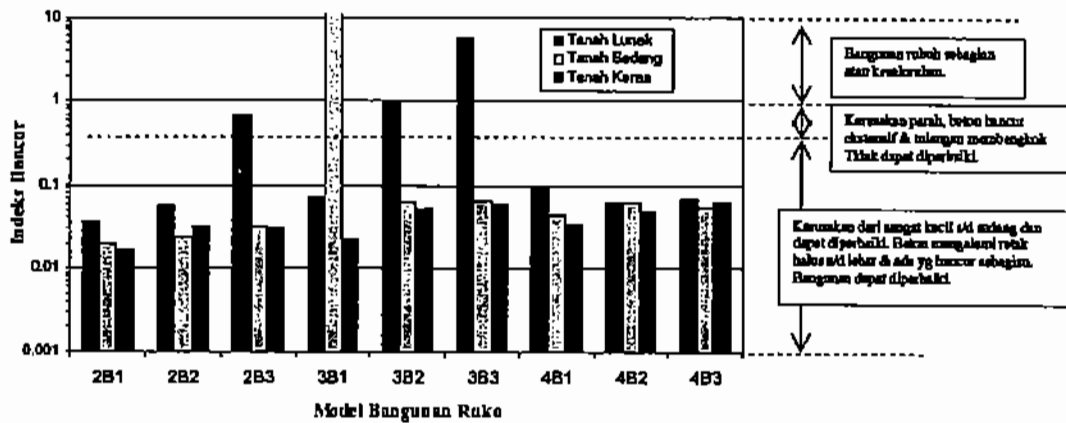
3.3. Kehancuran dan Kinerja Struktur

Diperkirakan bangunan ruko yang paling hancur akibat skenario terburuk gempa subduksi Nias adalah bangunan ruko 3 lantai 1 pintu (3B1) yang terletak di atas tanah sedang dan bangunan ruko 3 lantai 3 pintu (3B3) yang terletak di atas tanah lunak. Kedua bangunan ini diperkirakan akan rubuh pada sebagian strukturnya atau bahkan seluruh strukturnya (Gambar 4).

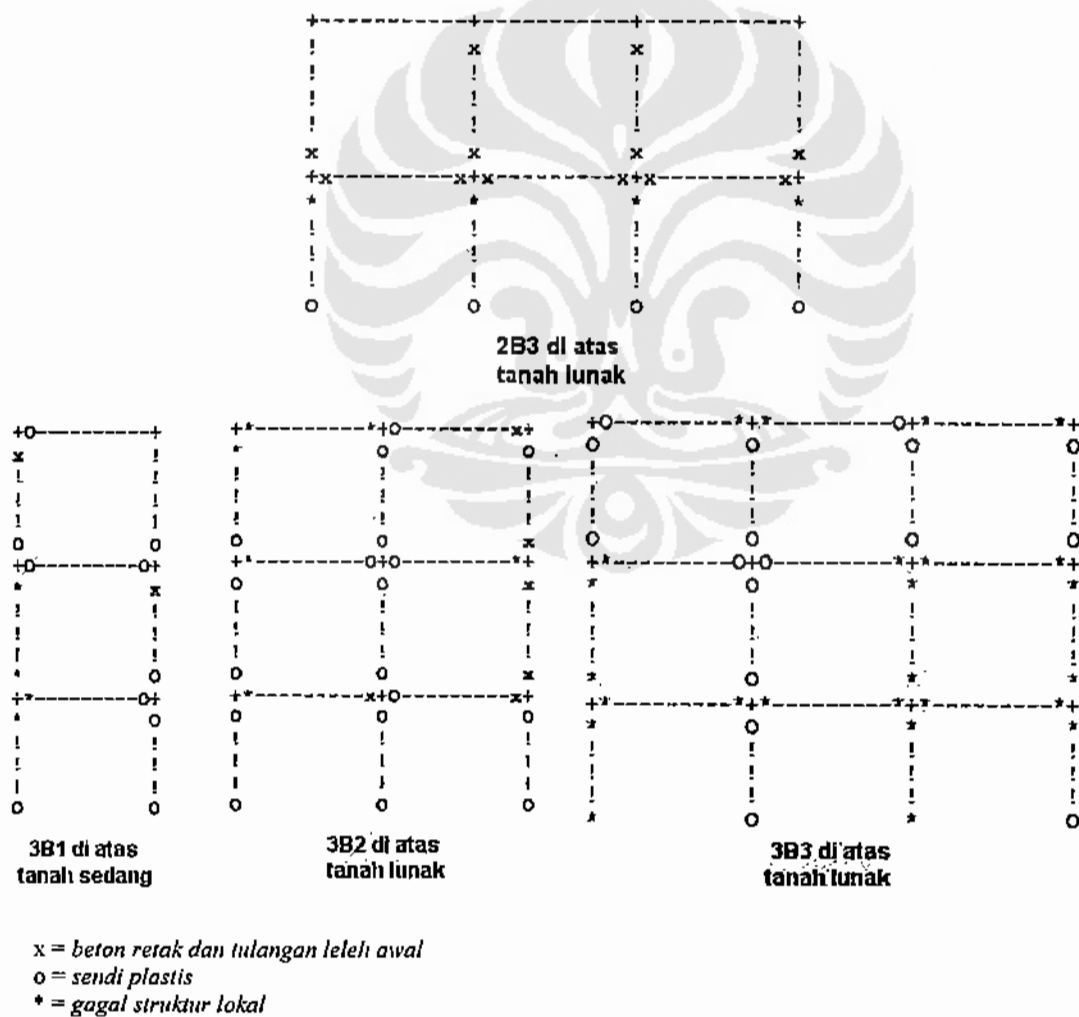


Gambar 3.

Respon Ruko di atas Tanah Lunak, Sedang dan Keras Dalam Bentuk Kurva Kapasitas, Akibat Skenario Terburuk Gempa Subduksi Nias $M_w=9,3$ Berjarak 195 km dari Kota Medan. Nilai Pertama Adalah Kolom Pertama Kali Retak, Nilai Kedua Adalah Balok Pertama Kali Retak Serta Nilai Ketiga dan Keempat adalah Balok/kolom Pertama Kali Leleh.



Gambar 4. Indeks Kehancuran dan Kinerja Ruko Akibat Skenario Terburuk Gempa Subduksi Nias.



Gambar 5. Mekanisme Kehancuran Bangunan Ruko Model 2B3, 3B1, 3B2 dan 3B3 Akibat Skenario Terburuk Gempa Subduksi Nias.

Dari semua model ada 4 bangunan ruko yaitu 2B3, 3B1, 3B2, dan 3B3 (di atas tanah sedang dan lunak) yang menunjukkan kehancuran yang sangat parah. Pada saat rasio Δ_{alap}/H baru mencapai rentang 0,0033-0,0050 telah terjadi pelelehan pada kolom dan balok dengan sendi plastis terjadi hampir di semua ujung elemen. Kerusakan ini menyebabkan gagal struktur pada kolom dasar dan balok (Gambar 5). Sementara itu bangunan lainnya umumnya mengalami banyak retak dan sendi plastis.

FEMA 274 menyebutkan bahwa rentang *damage control* bisa saja lebih kecil dari yang disebutkan oleh ATC-40 [21,22]. Berdasarkan ini dapat diperkirakan bahwa batasan kinerja menurut ATC-40 tidak sepenuhnya berlaku pada bangunan ruko dalam studi ini, khususnya model 2B3, 3B1, 3B2 dan 3B3, dikarenakan ketergantungan simpangan maksimum kepada nilai percepatan tanah dan jenis beban riwayat waktu gempa yang diberikan.

4. Kesimpulan

Pencampuran beton secara manual masih banyak ditemukan, khususnya campuran 1:2:3. Hasil uji terhadap campuran ini menunjukkan nilai sedikit lebih rendah dari yang diharapkan untuk mutu K175. Besi batangan yang dipakai sebagai tulangan dalam pembangunan ruko umumnya memiliki hasil yang sangat baik. Hasil ini kemudian digunakan ke dalam simulasi non elastik terhadap 9 jenis model struktur bangunan ruko di atas tanah lunak, sedang dan keras, memakai gempa subduksi Nias $M_w=9,3$ berjarak 195 km dari Kota Medan. Hasil simulasi 54 buah model dengan program IDARC2D menunjukkan bahwa 4 bangunan ruko diperkirakan mengalami gagal struktur pada kolom dasar dan balok lantai 2 yang tidak dapat diperbaiki. Sendi plastis terjadi hampir di semua ujung elemen struktur. Sedangkan bangunan ruko lainnya umumnya mengalami retak-retak dan sendi plastis dalam batas yang bisa diperbaiki. Namun demikian tidak sedikit pula yang mengalami sendi plastis pada bagian-bagian ujung elemen kolom dasar.

Ucapan Terima Kasih

Tulisan ini hasil dari proyek penelitian hibah TPSDP Batch-III ADB Loan 1792-INO nomor kontrak 010/C/RG/SPMU-TPSDP-UMSU/08.04 di Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan [23]. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak pendana dan pengelola. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Julham Efendi ST., Risdianto ST. dan Zikra Win Arija ST.; yang terlibat pada proyek penelitian tersebut untuk tugas akhir sarjana mereka.

Daftar Acuan

- [1]. BMG, *Daftar Gempa Merusak di Sumatera*. Badan Meteorologi dan Geofisika, Medan, 2005.
- [2]. Farzad Naeim (ed), *The Seismic Design Handbook*. Van Nostrand Reinhold, New York, 2001, Ch. 7, pp. 327-372.
- [3]. A. Kappos, K. Antoniadis, dan D. Kostantinides, Seismic Behaviour Evaluation of RC Buildings Designed to the Eurocode 8, Di dalam *Earthquake Resistant Construction and Design*. (S.A. Savidis, ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, 1994.
- [4]. P. Negro, A.V. Pinto, G. Verzeletti, dan G.E. Magonette, PsD test on Four-Story R/C Building Designed According to Eurocode. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 122, 12 (1996) 1409-1417.
- [5]. C. Dymiotis, A. J. Kappos, dan M. K. Chryssanthopoulos, Seismic Reliability of RC Frames With Uncertain Drift and Member Capacity, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 125, 9 (1999) 1038-1047.
- [6]. T. Balendra, N.T.K. Lam, J.L. Wilson, & K.H. Kong, Analysis of Long-Distance Earthquake Tremors and Base Shear Demand for Buildings in Singapore, *Journal of Engineering Structure*, 24 (2002) 99-108.
- [7]. A.Faisal, *Response Spectrum Acceleration in Kuala Lumpur and Pulau Pinang due to Sumatran*

- Earthquakes and Its Effect on a Tall Reinforced Concrete Building*, M.Sc. Theses, Universiti Sains Malaysia, 2003.
- [8]. Y.J. Park, A.H.-S. Ang, dan Y.K. Wen, Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings. *ASCE Journal of Structural Engineering* 111, 4 (1985) 740-757.
- [9]. E. DiPasquale, dan A.S. Cakmak, *Identification of the Serviceability Limit State and Detection of Seismic Structural Damage*, Technical Report NCEER-88-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Princeton University (1988).
- [10]. S.K. Kunnath, A.M. Reinhorn, dan Y.J. Park, Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116, 4 (1990) 996-1017.
- [11]. S.K. Kunnath, A.M. Reinhorn, dan R.F. Lobo, IDARC Version 3.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures, Report No. NCEER-92-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo (1992).
- [12]. A.M. Reinhorn, dan R.E. Valles, *Damage Evaluation in Inelastic Response of Structures: A Deterministic Approach*, Report No. NCEER-95-xxxx, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, 1995.
- [13]. D.P.U., *Tata Cara Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung SNI 1727-18F*, Yayasan Badan Penerbit PU, Jakarta, 1987.
- [14]. M.H. Gultom dan A. Faisal, *Skenario Terburuk Gempa Jauh Sumatera dan Pengaruhnya Terhadap Tanah di Kota Medan*. Laporan Akhir Research Grant TPSDP Batch III, UMSU, Medan, 2005.
- [15]. Ade Faisal, *Estimasi Respon Tanah Sedang di Beberapa Lokasi di Kota Medan Akibat Skenario Terburuk Gempa Sumatera*, *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 14, 1 (2007) 15-25.
- [16]. R.R. Youngs, S.J. Chiou, W.J. Silva dan J.R. Humprey, Strong Ground Motion Attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquakes, *Seismological Research Letters*, 68, 1 (1997) 85-73.
- [17]. M.D. Petersen, J. Dewey, S. Hartzell, C. Mueller, S. Harmsen, A.D. Frankel dan K. Rukstales, Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula, *Tectonophysics*, 390 (2004) 141-158.
- [18]. S.N.I.03-1726-2003, *Peraturan Perencanaan Gempa Untuk Bangunan Gedung SNI 03-1726-2003*, Departemen Kimpraswil, Jakarta, 2003.
- [19]. R.E. Valles, A.M. Reinhorn, S.K. Kunnath, C. Li, dan A. Madan, *IDARC2D Version 4.0: Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings*. National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-96-0010, The State University of New York, Buffalo, 1996.
- [20]. J.J. Bommer dan A.B. Acevedo, The Use of Real Earthquake Accelerograms as Input to Dynamic Analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 1 (2004) 43-91.
- [21]. ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings—Volume 1 (ATC-40)*. Report No. SSC 96-01. Applied Technology Council, Redwood City, 1996.
- [22]. FEMA 274, *NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA publication 272)*. Building Seismic Safety Council, Washington (DC), 1997.
- [23]. S. M. Sari dan A. Faisal, *Tingkat Kehancuran dan Kinerja Bangunan Rumah Toko di Kota Medan Akibat Gempa Jauh*, Laporan Akhir Research Grant TPSDP Batch III, UMSU, Medan, 2005.