

# PENGARUH JENIS BAJA TULANGAN TERHADAP PERILAKU PLASTIFIKASI ELEMEN STRUKTUR SRPMK

Iswandi Imran<sup>[1]</sup>, Ronald Simatupang<sup>[2]</sup>

## ABSTRAK

Berdasarkan peraturan perencanaan beton bertulang untuk bangunan gedung (SNI 03-2847-02 Pasal 23), penulangan komponen struktur beton yang merupakan bagian dari sistem pemikul beban gempa sebaiknya menggunakan baja tulangan yang memiliki sifat-sifat mekanik yang nilai-nilainya tertentu. Jenis sifat mekanik yang dimaksud diantaranya adalah kuat leleh, kuat tarik, daktilitas, faktor kuat lebih (*overstrength*) dan rasio kuat tarik terhadap kuat leleh. Dikaitkan dengan sifat mekaniknya, baja tulangan yang beredar di Indonesia saat ini pada dasarnya dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu baja tulangan yang memenuhi persyaratan sifat mekanik berdasarkan SNI 03-2847-02 Pasa 23 untuk struktur tahan gempa (baja tulangan *compliance*) dan baja tulangan yang tidak memenuhi persyaratan tersebut (baja tulangan *non-compliance*). Makalah ini menyajikan hasil studi eksperimental dan analitikal yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh jenis baja tulangan yang digunakan terhadap perilaku plastifikasi elemen struktur beton bertulang SRPMK yang dihasilkan. Dua jenis baja tulangan dikaji dalam studi ini, yaitu baja tulangan *compliance* dan baja tulangan *non-compliance*. Empat buah sampel balok kantilever diuji dalam studi ini terhadap beban monotonik dan siklik, yang mensimulasikan pengaruh beban gempa. Dua buah benda uji pertama diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *compliance* dan dua buah benda uji sisanya diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *non-compliance*. Perilaku elemen struktur yang dievaluasi meliputi perilaku histeresis yang dihasilkan oleh pembebanan siklik, tingkat daktilitas yang dimiliki, dan pola keruntuhan yang diperoleh. Hasil studi ini memperlihatkan bahwa penggunaan jenis baja tulangan yang *compliance*, yaitu baja tulangan yang sesuai dengan persyaratan SNI 03-2847-02 Pasal 23, pada komponen struktur beton bertulang SRPMK dapat menghasilkan perilaku plastifikasi struktur yang baik, khususnya terhadap pembebanan siklik yang mensimulasikan beban gempa. Sebaliknya, elemen struktur beton bertulang SRPMK yang diberi baja tulangan yang *non-compliance*, memperlihatkan perilaku plastifikasi struktur yang kurang baik.

**Kata kunci:** Baja tulangan *compliance*, baja tulangan *non-compliance*, elemen struktur SRPMK, faktor kuat lebih, rasio kuat tarik terhadap kuat leleh, daktilitas, histeresis.

## 1. PENDAHULUAN

Berdasarkan SNI beton yang berlaku, struktur beton bertulang tahan gempa pada umumnya direncanakan dengan mengaplikasikan konsep daktilitas. Dengan konsep ini, gaya gempa elastik dapat direduksi dengan suatu faktor modifikasi response struktur (faktor  $R$ ), yang merupakan representasi tingkat daktilitas yang dimiliki struktur. Dengan penerapan konsep ini, pada saat gempa kuat terjadi, hanya elemen–elemen struktur bangunan tertentu saja yang diperbolehkan mengalami plastifikasi sebagai sarana untuk pendisipasian energi gempa yang diterima struktur. Elemen–elemen struktur lain yang tidak diharapkan mengalami plastifikasi haruslah tetap berperilaku elastis selama gempa kuat terjadi. Selain itu, hirarki atau urutan keruntuhan yang terjadi haruslah sesuai dengan yang direncanakan. Sifat material baja tulangan yang digunakan pada dasarnya dapat

mempengaruhi tercapai tidaknya hirarki atau urutan keruntuhan yang direncanakan. Untuk struktur beton tahan gempa, khususnya untuk sistem rangka penahan momen khusus (SRPMK), sifat mekanik dasar material baja tulangan yang penting diperhatikan agar hirarki keruntuhan rencana dapat terealisasi diantaranya adalah kuat leleh, kuat tarik, daktilitas, faktor kuat lebih (*overstrength*) dan rasio kuat tarik terhadap kuat leleh. Dikaitkan dengan sifat mekaniknya, baja tulangan yang beredar di Indonesia saat ini pada dasarnya dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu baja tulangan yang memenuhi persyaratan sifat mekanik berdasarkan SNI 03-2847-02 Pasa 23 untuk struktur tahan gempa (baja tulangan *compliance*) dan baja tulangan yang tidak memenuhi persyaratan tersebut (baja tulangan *non-compliance*).

Makalah ini menyajikan hasil studi eksperimental dan analitikal terhadap penggunaan baja tulangan *compliance* dan *non-compliance* pada elemen struktur beton bertulang SRPMK. Tujuannya adalah untuk membuktikan signifikansi nilai parameter kuat lebih dan nilai rasio kuat ultimit yang dimiliki oleh baja tulangan dalam menghasilkan perilaku plastifikasi yang baik serta urutan keruntuhan elemen struktur yang sesuai dengan yang direncanakan dengan menggunakan prosedur desain kapasitas. Evaluasi dilakukan baik terhadap perilaku material baja tulangan jenis *compliance* dan *non-compliance* tersebut maupun terhadap perilaku elemen struktural yang diberi baja-baja tulangan jenis ini. Perilaku elemen struktur yang dievaluasi meliputi perilaku histeresis, daktilitas, dan pola keruntuhan yang diperoleh.

## **2. SPESIFIKASI BAJA TULANGAN**

Berdasarkan SNI (BSN, 2002), parameter baja tulangan yang penting diperhatikan dalam penerapannya pada struktur beton yang diharapkan memikul beban gempa adalah daktilitas, nilai kuat lebih (*overstrength*), yaitu rasio nilai kuat tarik aktual terhadap kuat leleh aktual dan nilai rasio kuat ultimit, yaitu rasio kuat tarik aktual terhadap kuat leleh aktual. Nilai kuat lebih diperlukan untuk perencanaan struktur yang berbasis pada konsep desain kapasitas dan digunakan untuk merencanakan elemen struktur yang diharapkan tetap elastik pada saat sendi plastis terbentuk di elemen struktur yang langsung berhubungan dengannya. Prinsip ini sebagai contoh digunakan pada perencanaan geser di lokasi yang berpotensi membentuk sendi plastis, seperti di daerah hubungan balok-kolom dan di daerah ujung-ujung balok atau kolom. Berdasarkan SNI-03-2847-02 (BSN, 2002), gaya geser rencana pada lokasi sendi plastis harus dihitung berdasarkan nilai kuat momen

ujung terbesar yang mungkin terjadi di lokasi tersebut. Dalam penerapannya, momen-momen ujung tersebut, yaitu  $M_{pr}$ , dihitung dengan menggunakan nilai kuat leleh baja tulangan yang diperbesar 1,25 kali nya. Perbesaran ini dimaksudkan untuk mengantisipasi kuat lebih yang dimiliki oleh tulangan lentur yang digunakan.

Prinsip yang sama juga diterapkan pada perencanaan daerah pertemuan balok kolom, yang berdasarkan peraturan yang berlaku harus memenuhi persyaratan "kolom kuat balok lemah". Dalam memenuhi persyaratan ini, kolom-kolom yang merangka pada suatu hubungan balok-kolom harus memiliki kuat lentur yang 1,2 kali lebih besar dibandingkan dengan kuat lentur balok-balok yang merangka pada hubungan balok-kolom tersebut. Nilai perbesaran 1,2 tersebut pada dasarnya digunakan untuk mengakomodasi nilai overstrength yang dimiliki oleh baja tulangan lentur balok.

Panjang sendi plastis yang terbentuk pada ujung-ujung elemen struktur yang diharapkan mendisipasi energi gempa pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh nilai rasio kuat ultimit, yaitu nilai rasio kuat tarik terhadap kuat leleh material baja tulangan yang digunakan. Panjang pendeknya daerah sendi plastis tersebut pada akhirnya akan mempengaruhi kapasitas rotasi inelastis yang dapat diberikan elemen struktur sehingga daktilitas struktur juga akan dipengaruhi. Jika baja tulangan yang digunakan memiliki nilai rasio kuat ultimit yang rendah, maka daktilitas struktur yang dihasilkan juga akan rendah. Dengan rendahnya tingkat daktilitas struktur, kemampuan struktur dalam memikul gaya gempa akan menjadi berkurang.

Berdasarkan SNI 03-2847-2002 Pasal 23 (BSN, 2002), untuk desain elemen struktur yang diharapkan memikul beban gempa, baja tulangan yang digunakan harus memenuhi ketentuan-ketentuan baja tulangan dengan mutu maksimum yang dispesifikasikan adalah 400 MPa (BJTD40), sesuai ASTM A 706M-1993 atau ASTM A 615M-1993. Berdasarkan persyaratan ini, nilai kuat leleh aktual maksimum untuk baja BJTD40 dibatasi 540 MPa. Dengan kata lain, nilai kuat lebih individu baja tulangan, yaitu rasio antara kuat leleh aktual terhadap kuat leleh spesifikasi, dibatasi maksimum sebesar  $540/400 = 1,35$ . Selain itu, rasio kuat tarik terhadap kuat leleh tulangan dipersyaratkan tidak boleh lebih kecil daripada 1,25.

Tidak semua baja tulangan yang tersedia di pasaran memenuhi persyaratan spesifikasi di atas. Berdasarkan hasil kajian I.Imran et al. (2005), baja tulangan yang tersedia di pasaran pada kenyataannya lebih banyak yang bersifat *non-compliance*.

### 3. PROGRAM EKSPERIMENTAL

#### 3.1. Pengujian Material Baja Tulangan

Kuat leleh aktual yang terlalu tinggi pada dasarnya sangat berbahaya bagi rancangan struktur tahan gempa. Oleh karena itu, spesifikasi produksi baja tulangan harus mencantumkan nilai batas atas kuat leleh yang diijinkan. Sebagai contoh, SNI menetapkan batas atas kuat leleh hasil tes individu baja tulangan sebesar 540 MPa untuk baja tulangan mutu 400 MPa (BSN, 2002). Dalam SNI yang sama, untuk perencanaan elemen struktur SRPMK, kuat lebih  $\alpha f_y$  - nya ditetapkan rata-rata sebesar  $(1,25 \times 400) = 500$  MPa. Perbedaan ini bisa diterima dari sudut pandang statistik, karena nilai yang pertama merupakan batasan nilai individu sedangkan nilai yang kedua adalah batasan nilai rata-rata.

**Tabel 1** dan **2** memperlihatkan hasil uji tarik dua jenis baja tulangan. Nilai-nilai tegangan yang ditampilkan pada tabel-tabel tersebut adalah nilai-nilai nominal. Baja tulangan jenis pertama adalah baja tulangan yang dapat dikelompokkan sebagai baja tulangan compliance (**Tabel 1**), sedangkan baja tulangan jenis kedua termasuk dalam kelompok baja tulangan *non-compliance* (**Tabel 2**). Berdasarkan batasan-batasan ASTM A706 dan ASTM A615M, kedua jenis baja tulangan tersebut masuk dalam kelompok mutu BJTD40. Data lengkap hasil uji dapat ditemukan dalam studi Simatupang (2006). **Tabel 1** memperlihatkan bahwa semua parameter hasil uji baja tulangan yang dikelompokkan sebagai baja tulangan *compliance* pada dasarnya memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 Pasal 23 (BSN, 2002). Nilai kuat leleh individu maksimum yang dihasilkan pada umumnya masih berada di bawah nilai maksimum yang diijinkan, yaitu 540 MPa (atau ekuivalen dengan nilai kuat lebih individu yang lebih kecil daripada nilai maksimum yang diijinkan, yaitu 1,35). Selain itu, nilai rata-rata kuat lebih baja tulangan yang dihasilkan tidak ada yang melewati nilai batas atas yang diijinkan, yaitu 1,25. Sedangkan nilai rata-rata rasio tegangan ultimit terhadap tegangan lelehnya pada umumnya lebih besar daripada nilai rata-rata minimum yang diijinkan, yaitu 1,25.

**Tabel 1. Rangkuman Hasil Uji Tarik Baja Tulangan BJTD40 (Compliance)**

No	Jumlah Sampel	Ukuran (mm)	Elongasi (%)	Kuat Leleh Individu Maks (MPa)	Kuat Leleh Rata rata (MPa)	Kuat Tarik Rata rata (MPa)	$\frac{f_{yu}}{f_y}$	$\frac{f_{yu}}{f_{ya}}$
1	29	D16	18.98	533,03	500.02	654.09	1.25	1.31
2	15	D19	19.07	483,28	466.72	637.62	1.17	1.37
3	15	D22	19.7	511.49	480.47	637.74	1.20	1.33

**Tabel 2. Rangkuman Hasil Uji Tarik Baja Tulangan BJTD40 (Non-Compliance)**

No	Jumlah Sampel	Ukuran (mm)	Elongasi (%)	Kuat Leleh Individu Maks (MPa)	Kuat Leleh Rata rata (MPa)	Kuat Tarik Rata rata (MPa)	$\frac{f_{yu}}{f_y}$	$\frac{f_{yu}}{f_{ya}}$
1	44	D16	14.01	631.68	613.16	703.34	1.53	1.15
2	44	D19	15.43	617.85	583.52	662.32	1.46	1.14
3	38	D22	17.3	616.80	572.64	670.81	1.43	1.17

Hasil uji yang ditampilkan pada **Tabel 2** pada umumnya memperlihatkan nilai-nilai parameter baja tulangan yang tidak memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 (BSN, 2002). Nilai kuat leleh individu maksimum yang dihasilkan dapat mencapai nilai hingga di atas 600 MPa untuk berbagai diameter baja tulangan yang diuji. Selain itu, nilai kuat lebih rata-rata yang dihasilkan melewati batasan maksimum yang diijinkan, yaitu sebesar 1,25 dan sebaliknya nilai rasio kuat ultimitnya lebih kecil daripada nilai minimum yang diijinkan, yaitu 1,25.

Untuk mengkaji sejauh mana perbedaan sifat mekanis yang dimiliki oleh kedua jenis baja tulangan tersebut di atas akan dapat mempengaruhi perilaku plastifikasi elemen struktur SRPMK yang dihasilkan, maka pada studi ini juga dilakukan kajian perilaku struktural elemen-elemen struktur beton bertulang yang dipasang baja tulangan yang berbeda jenis tersebut.

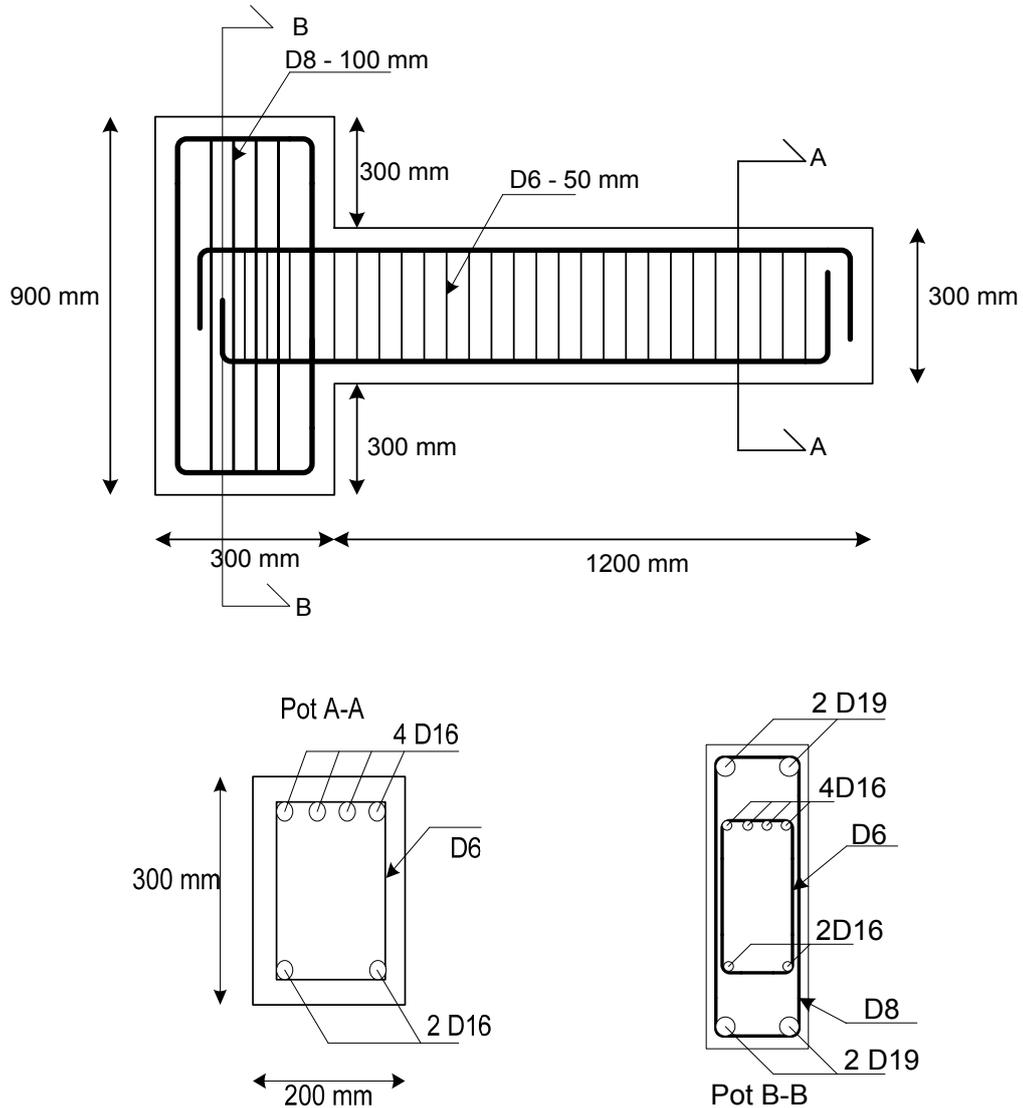
### 3.2. Pengujian Elemen Struktur

Untuk mempelajari pengaruhnya terhadap perilaku elemen struktur SRPMK yang dihasilkan, kedua baja tulangan yang dikaji (yaitu baja tulangan *compliance* dan baja tulangan *non-compliance*) diaplikasikan sebagai baja tulangan pada elemen struktur beton bertulang SRPMK. Elemen struktur yang digunakan untuk tujuan ini adalah balok kantilever sederhana (**Gambar 1**). Penulangan balok kantilever tersebut didesain dengan asumsi bahwa baja tulangan yang digunakan memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 Pasa 23 (BSN, 2002). Dengan demikian, faktor kuat lebih tulangan lentur yang digunakan untuk perencanaan geser mengikuti rekomendasi SNI untuk elemen struktur SRPMK, yaitu  $\alpha=1,25$ .

Dalam program eksperimental ini, dibuat 4 (empat) buah benda uji kantilever. Dua buah benda uji pertama diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *compliance* dan dua buah benda uji sisanya diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *non-compliance*. Penulangan geser untuk semua benda uji menggunakan baja tulangan yang sama, dengan kuat leleh 240 MPa. Mutu beton rencana

yang digunakan adalah 30 MPa. Elemen struktur dirancang sebagai elemen SRPMK, sehingga memiliki kuat geser yang lebih tinggi dibandingkan kuat lenturnya.

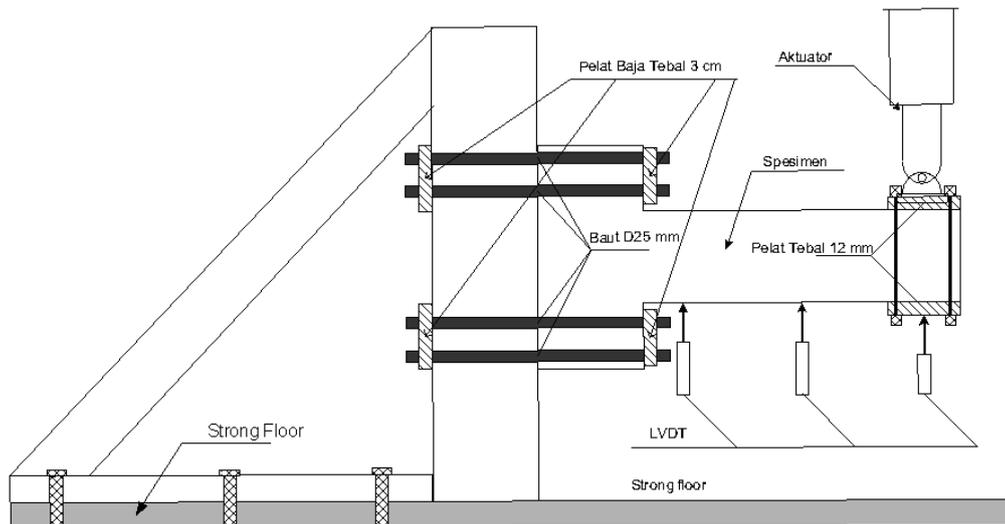
Dua jenis pengujian dilakukan pada masing-masing kelompok benda uji dengan jenis penulangan yang berbeda, yaitu uji beban monotonik dan uji beban siklik. Setup pengujian dapat dilihat pada **Gambar 2**. Beban siklik yang diaplikasikan mengikuti rekomendasi ACI Innovation Task Group 1 (2001a, 2001b), padamana pembebanan siklik ditingkatkan secara bertahap, dari  $0,25 \Delta_y$  hingga maksimum  $5 \Delta_y$  (**Gambar 3**).



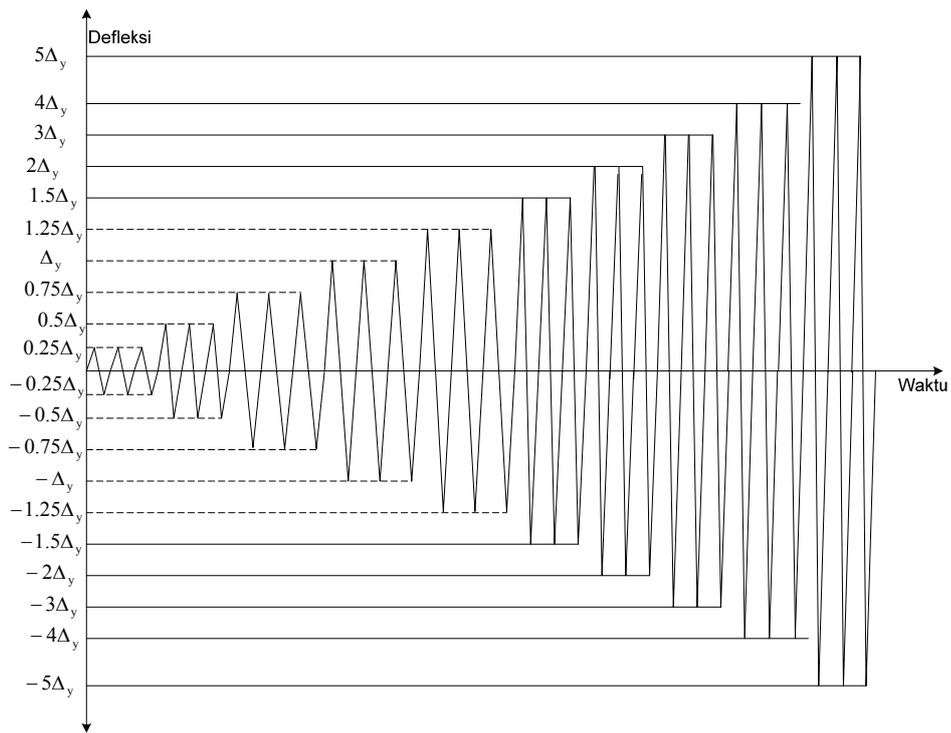
**Gambar 1. Detail Geometri dan Penulangan Benda Uji**

**Gambar 4** dan **5** memperlihatkan hubungan beban-perpindahan pada benda uji monotonik, masing untuk benda uji dengan baja tulangan *compliance* dan *non-*

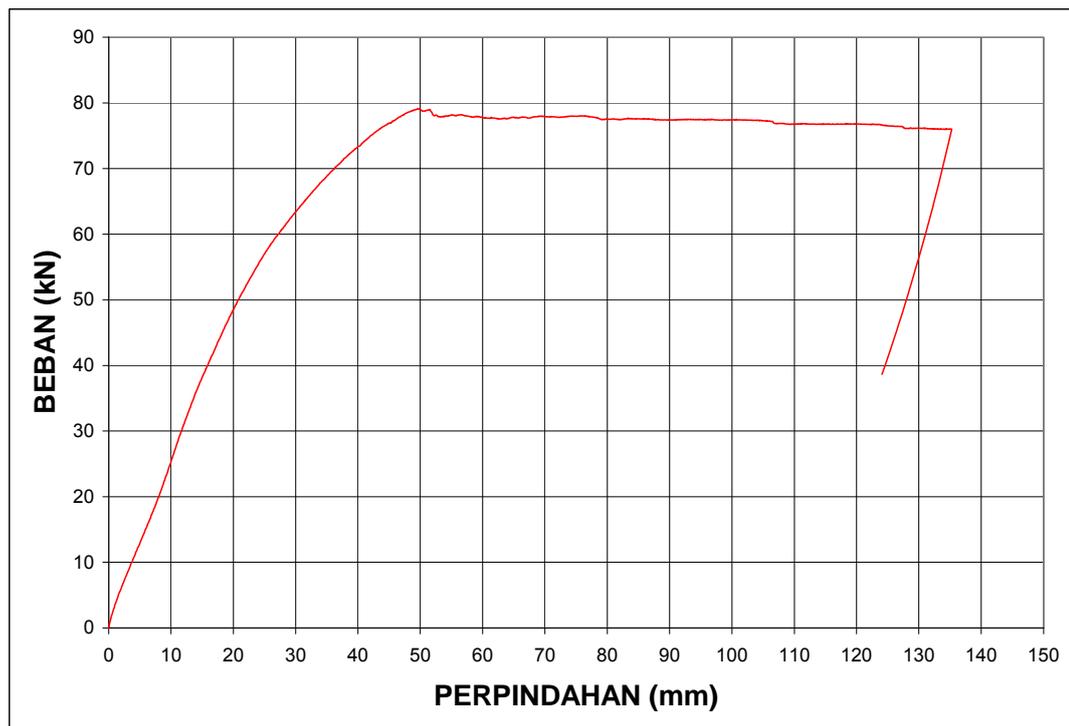
*compliance*. Berdasarkan gambar-gambar tersebut dapat dilihat bahwa benda uji dengan tulangan *non-compliance* memiliki kekuatan lentur yang lebih tinggi dibandingkan benda uji dengan tulangan *compliance*. Hal ini disebabkan karena kuat leleh baja tulangan *non-compliance* pada dasarnya lebih tinggi dibandingkan kuat leleh baja tulangan *compliance*. Namun, benda uji dengan tulangan *non-compliance* menghasilkan perilaku yang lebih getas dibandingkan benda uji dengan tulangan *compliance*. Benda uji dengan tulangan *non-compliance* mengalami penurunan kekuatan yang signifikan pada perpindahan 80 mm. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh terlalu berlebihannya tegangan yang terjadi pada baja tulangan lentur. Nilai tegangan yang berlebihan pada baja tulangan lentur dapat menyebabkan terjadinya penurunan tegangan lekatan (*bond losses*) pada bidang antarmuka antara baja tulangan dan beton. Hal ini pada akhirnya menyebabkan keruntuhan prematur pada benda uji.



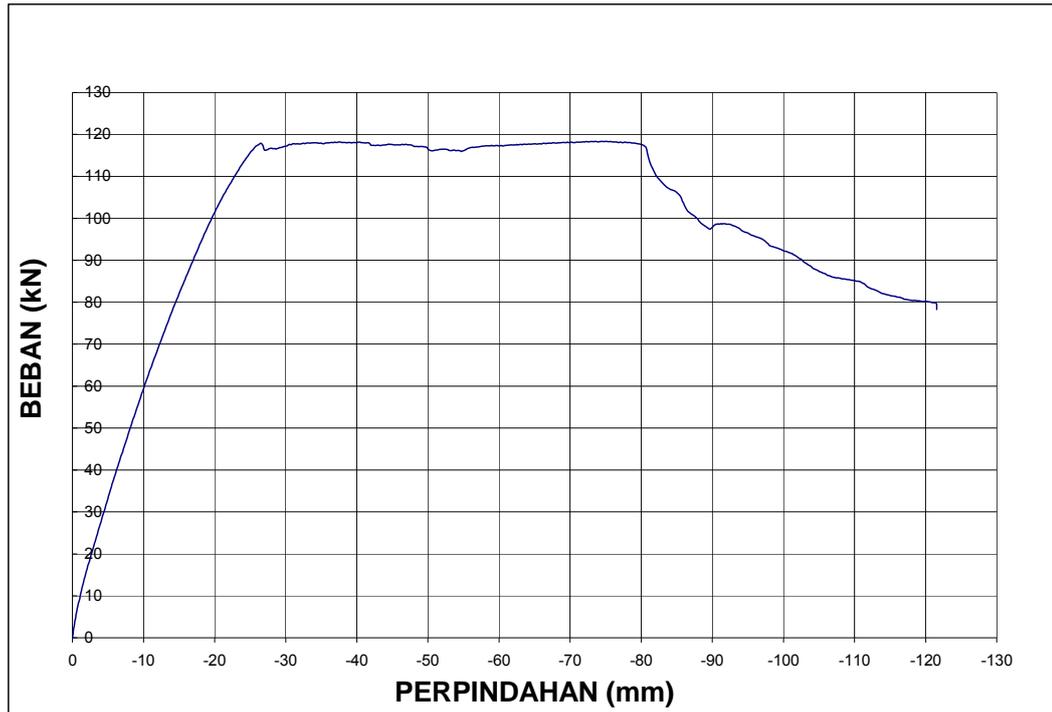
**Gambar 2. Setup Pengujian Benda Uji**



**Gambar 3. Pola Pembebanan Siklik yang Diaplikasikan pada Benda Uji**



**Gambar 4. Hubungan Beban-Perpindahan pada Sampel Monotonik dengan Tulangan Compliance**

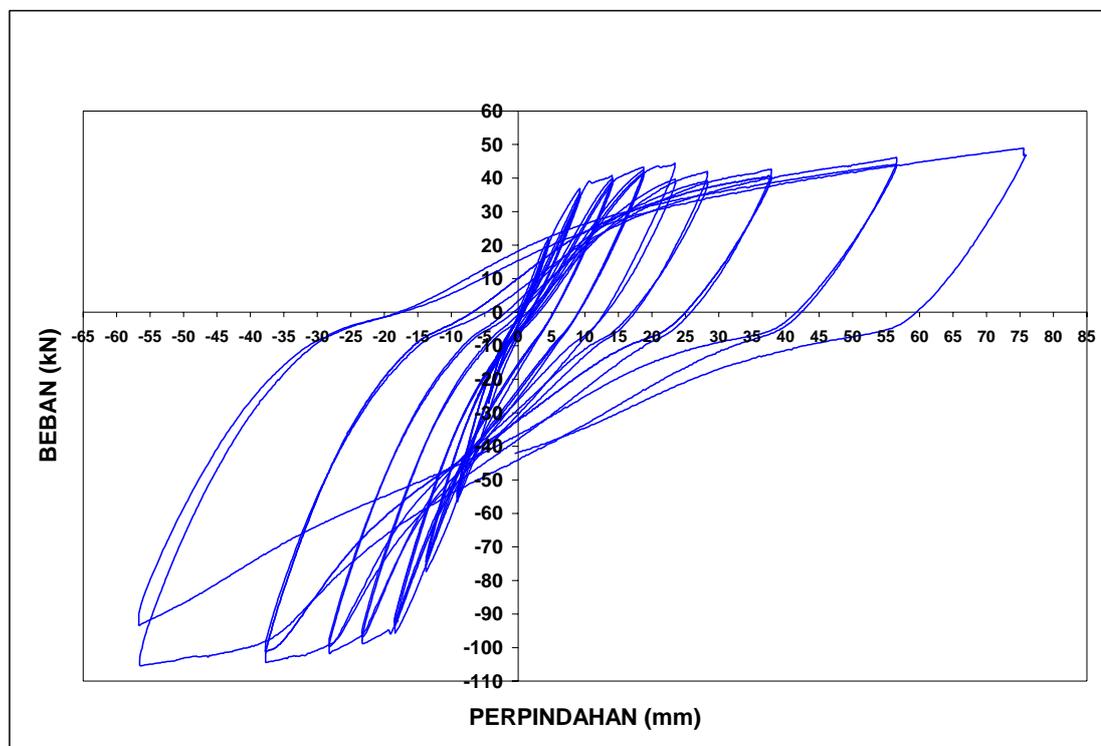


**Gambar 5. Hubungan Beban-Perpindahan pada Sampel Monotonik dengan Tulangan *Non-Compliance***

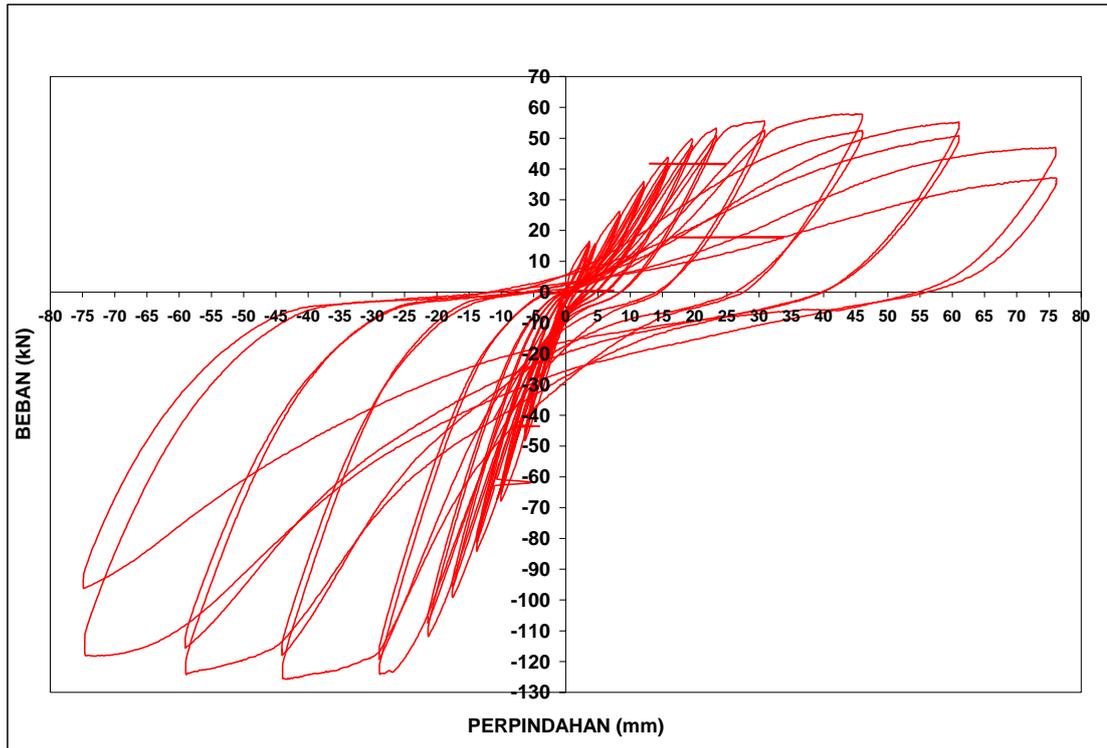
**Gambar 6** dan **7** memperlihatkan perilaku histeresis masing-masing pada benda uji dengan baja tulangan *compliance* dan baja tulangan *non-compliance*. Berdasarkan gambar-gambar tersebut terlihat bahwa benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* menghasilkan kurva histeresis yang tidak stabil dan memperlihatkan fenomena *pinching*. Selain itu, tingkat daktilitas yang dihasilkan pada dasarnya lebih rendah daripada yang dihasilkan benda uji dengan baja tulangan *compliance*. Benda uji tersebut mengalami penurunan kekuatan yang lebih awal dibandingkan benda uji dengan baja tulangan *compliance*. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Nilai kuat lebih baja tulangan *non-compliance* yang terlalu besar menyebabkan timbulnya tegangan yang berlebihan pada baja tulangan lentur longitudinal. Hal ini dapat menyebabkan timbulnya tegangan geser dan lekatan yang tinggi pada saat tercapainya momen leleh pada penampang. Kondisi ini dapat memicu terjadinya *bond losses* dan pada akhirnya keruntuhan prematur pada elemen struktur. Selain itu, dengan tingginya nilai kuat lebih yang dimiliki tulangan lentur, keruntuhan balok yang semula direncanakan didominasi oleh keruntuhan lentur pada akhirnya dipengaruhi oleh keruntuhan geser. Hal ini terjadi akibat penulangan geser terpasang tidak mampu mengakomodasi peningkatan gaya geser yang terjadi dengan adanya peningkatan kuat lentur penampang. Perlu diingat bahwa balok kantilever ini

direncanakan dengan asumsi baja tulangan yang digunakan memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 Pasal 23. Fenomena pinching yang terlihat jelas pada kurva histeresis benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* merupakan indikasi adanya pengaruh geser yang dominan pada keruntuhan elemen struktur.

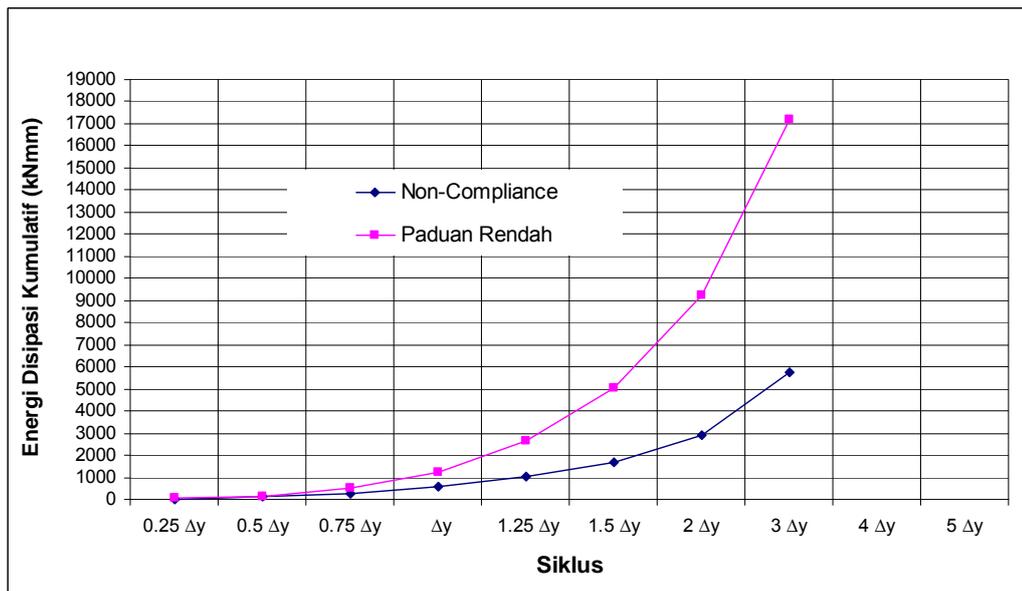
**Gambar 8** memperlihatkan perbandingan disipasi energi yang dihasilkan masing-masing benda uji. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa benda uji dengan baja tulangan *compliance* memberikan disipasi energi yang lebih tinggi dibandingkan benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* di setiap siklus beban yang diaplikasikan. Rendahnya disipasi energi yang dihasilkan benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* ini merupakan refleksi adanya fenomena pinching pada kurva histeresisnya.



**Gambar 6.** Kurva Histeresis Benda Uji dengan Baja Tulangan *Compliance*



Gambar 7. Kurva Histeresis Benda Uji dengan Baja Tulangan *Non-Compliance*



Gambar 8. Perbandingan Energi Disipasi Kumulatif

Untuk mengevaluasi pengaruh rendahnya nilai rasio kuat ultimit baja tulangan terhadap perilaku elemen struktur yang dihasilkan, dilakukan simulasi numerik terhadap elemen balok kantilever yang diberi baja tulangan dengan variasi nilai rasio kuat ultimit dari 1,0 hingga 1,5. Penampang yang dianalisis memiliki rasio tulangan tekan terhadap tulangan tarik sebesar 0,5. Sedangkan rasio tulangan tarik (dengan asumsi baja tulangan

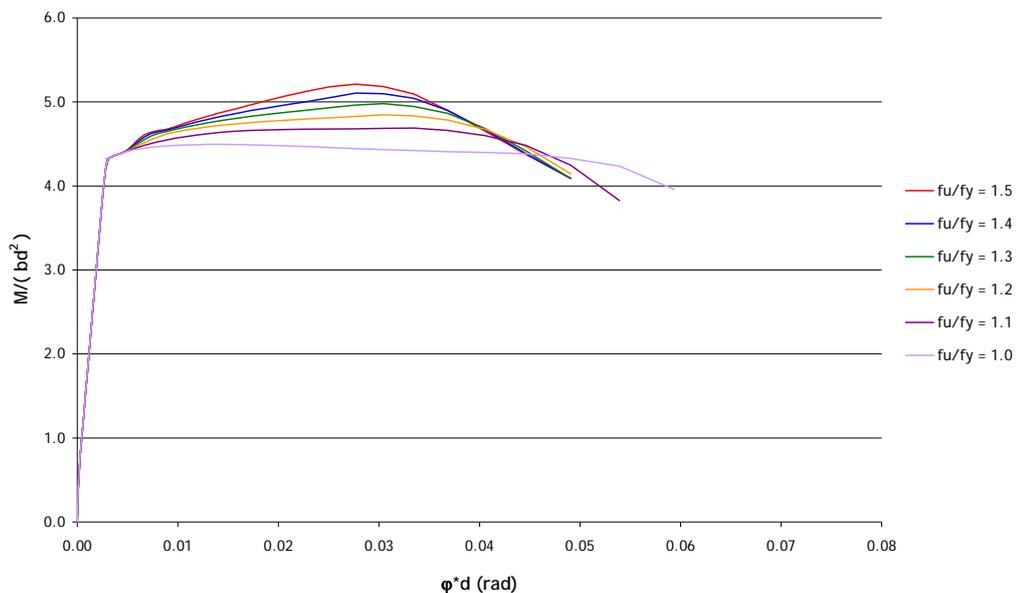
pada penampang hanya satu lapis) ditetapkan sama dengan 0,5 rasio tulangan maksimum yang diijinkan. Hasil simulasi ini dapat dilihat pada **Gambar 9** berupa kurva hubungan momen-kelengkungan penampang. Berdasarkan grafik simulasi pada **Gambar 9** tersebut dapat dilihat bahwa penampang beton bertulang dengan baja tulangan yang memiliki nilai rasio kuat ultimit yang kurang dari 1,20 memperlihatkan peningkatan kekuatan (*hardening*) yang lebih rendah setelah tercapainya momen leleh dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh elemen beton bertulang yang nilai rasio kuat ultimitnya lebih besar daripada 1,20. Fenomena *hardening* ini diperlukan agar dapat terjadi perambatan kelelahan (redistribusi) ke arah tengah bentang setelah tercapainya momen leleh pada penampang didekat muka tumpuan. Dengan terjadinya perambatan kelelahan ke arah tengah bentang, panjang sendi plastis yang dihasilkan akan bertambah panjang dan tingkat daktilitas perpindahan elemen struktur yang dihasilkan juga akan meningkat.

#### 4. PENUTUP

Makalah ini membahas hasil evaluasi terhadap penerapan baja tulangan *compliance* dan *non-compliance* pada elemen struktur SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus). Aspek yang dievaluasi meliputi perilaku material baja tulangan dan perilaku elemen struktur beton bertulang SRPMK yang diberi baja tulangan tersebut. Baja tulangan *compliance* yang dikaji pada umumnya memenuhi semua persyaratan SNI 03-2847-2002 Pasal 23, khususnya terkait dengan persyaratan baja tulangan untuk bangunan tahan gempa. Sedangkan baja tulangan *non-compliance* yang dikaji memiliki nilai kuat lebih yang berlebihan (yaitu  $\alpha > 1,50$ ) dan nilai rasio kuat ultimit yang rendah, yaitu maksimum 1,20. Sebagai verifikasi, telah dilakukan pengujian elemen struktur SRPMK sederhana untuk membuktikan signifikansi nilai parameter-parameter mekanik baja tulangan tersebut dalam menghasilkan urutan keruntuhan yang sesuai dengan yang direncanakan dengan menggunakan prosedur desain kapasitas.

Berdasarkan evaluasi terhadap aspek struktural, penggunaan baja tulangan *compliance*, yang sesuai dengan spesifikasi SNI 03-2847-02 Pasal 23, pada komponen struktur SRPMK menghasilkan perilaku plastifikasi struktur yang lebih baik, khususnya terhadap pembebanan siklik yang mensimulasikan beban gempa. Sebaliknya, elemen struktur beton yang diberi tulangan yang *non-compliance*, memperlihatkan perilaku plastifikasi struktur yang kurang baik.

Berdasarkan hasil kajian ini, secara umum dapat disimpulkan bahwa karakteristik baja tulangan yang digunakan pada struktur beton bertulang SRPMK akan sangat mempengaruhi perilaku plastifikasi struktur yang dihasilkan. Parameter baja tulangan yang paling berpengaruh terhadap perilaku disipasi yang dihasilkan pada elemen struktur adalah nilai rasio kuat lebih dan nilai rasio kuat ultimit. Nilai-nilai rasio kuat lebih serta kuat ultimit baja tulangan yang digunakan sebaiknya selalu berada dalam batas-batas yang diijinkan peraturan yang berlaku untuk mencegah terjadinya keruntuhan prematur pada sistem struktur yang direncanakan.



**Gambar 9. Kurva Hubungan Momen-Kelengkungan untuk Berbagai Nilai Rasio Kuat Ultimit**

## DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Innovation Task Group 1 (2001a). "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing." *ACI T1.1-01*, American Concrete Institute, pp. T1.1-1-3.
2. ACI Innovation Task Group 1 (2001b). "Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing." *ACI T1.1-R01*, American Concrete Institute, pp. T1.1R-1-7.
3. ASTM A 615M (1993a). "Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement." *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 01.04, pp. 303 - 308.

4. ASTM A 706M (1993b). "Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement." *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 01.04, pp. 353 - 357.
5. BSN (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung* (SNI 03-2847-2002).
6. Gamble, W. L. (2003). "Thermex-Processed Reinforcing Bars – Heat Treatment Increases Ductility and Weldability of Steel." *Concrete International*, Juli, pp. 85 – 88.
7. Imran, I., Hoedajanto, D., dan Kusumastuti, D. (2005). "Baja Tulangan Vanadium Vs Baja Tulangan Tempcore: Perbandingan Karakteristik Mekanik." *Prosiding HAKI 2005, Seminar Teknik Tradisi dan Inovasi*, Jakarta 23-24 Agustus.
8. Pamujie, E. dan Gunawan, M. (2006). "Perilaku Plastifikasi Elemen Struktur Beton Bertulang dengan Tulangan yang Tidak Memenuhi Persyaratan SNI 03-2847-2002 Pasal 23." *Tugas Akhir S1*, Prodi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung.

[1] **Iswandi Imran** adalah dosen Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung

[2] **Ronald Simatupang** adalah dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Bandung