

REPUBLIC INDONESIA  
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

# SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC00202370221, 22 Agustus 2023

## Pencipta

Nama : **Alfonsius Kenny Kusuma, Andy Prabowo Pho dkk**  
Alamat : Jl. KH. Hasyim Ashari, Perumahan Green Village Blok B RT 002/RW  
007, Kel. Neroktog, Kec. Pinang,  
Pinang (penang), Tangerang, Banten, 15145  
Kewarganegaraan : Indonesia

## Pemegang Hak Cipta

Nama : **Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas  
Tarumanagara**  
Alamat : 0215671747 Ext 215, Jakarta Barat, DKI JAKARTA 11440  
Kewarganegaraan : Indonesia  
Jenis Ciptaan : **Poster**  
Judul Ciptaan : **Kekuatan Lentur Balok Baja Canai Dingin Mutu Tinggi Berlubang  
Pada Temperatur Ekstrim**  
Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali : 8 Agustus 2023, di Jakarta Barat  
di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia  
Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh  
puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1  
Januari tahun berikutnya.  
Nomor pencatatan : 000503174

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.  
Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.

a.n. MENTERI HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA  
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri



Anggoro Dasananto  
NIP. 196412081991031002

## Disclaimer:

Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.

## LAMPIRAN PENCIPTA

No	Nama	Alamat
1	Alfonsius Kenny Kusuma	Jl. KH. Hasyim Ashari, Perumahan Green Village Blok B RT 002/RW 007, Kel. Neroktog, Kec. Pinang
2	Andy Prabowo Pho	RT 05/RW 01, Kelurahan Gowongan, Kecamatan Jetis
3	Shaq Qorull'Ali Mahmud	KP. Mangga RT 004/RW 003, Kel. Tugu Selatan, Kecamatan Koja
4	Louis Jordan Divani	Jl. Taman Dahlia I Blok GG-4/39, RT 001/RW 017, Kel. Pegadungan Kec. Kalideres



**PENDAHULUAN**

Salah satu jenis profil baja yang sering dijumpai pada konstruksi adalah profil baja canai-dingin. Profil ini dibentuk pada suhu kamar atau suhu rendah, sehingga menghasilkan kekuatan dan kecerahan yang lebih tinggi daripada baja glas panas akibat dari perubahan nilai tegangan sisa dari proses canai-dingin. Selain itu profil baja canai-dingin tahan terhadap karat, memiliki kemudahan dalam pemasangan dan harga yang relatif lebih murah [1].

Profil baja canai-dingin sering digunakan sebagai balok penumpu lantai dan penutup atap dari bahan metal. Dari berbagai profil yang ada, profil kotak berongga (rectangular hollow sections/ RHS) sangat baik untuk dipakai karena kestabilan penampang terhadap torsi. Dalam penerapannya sebagai balok penumpu, baja profil RHS sering memiliki lubang untuk dilewati oleh kabel, pipa utilitas, dan atau keperluan arsitektural/mekanikal lainnya. Adanya lubang tersebut mengakibatkan penurunan kekuatan, terlebih saat terjadi kebakaran.

Meskipun kekuatan material baja relatif tinggi, kekakuan dan kekuatan struktur baja dapat berkurang dalam kebakaran. Nilai properti material baja pada temperatur tinggi disediakan dalam spesifikasi internasional untuk yang terbuat dari unsur utama karbon, seperti European Code (EC3), American Specification (AISC Specification) dan Australian Standard (AS 4100). Namun, penyelidikan tentang sifat baja canai-dingin dengan tegangan leleh di atas 500 MPa (mutu tinggi) pada suhu tinggi masih terbatas [3].

Penggunaan baja mutu tinggi sebagai komponen struktur perlu memperhitungkan desain tahan api. Selama kebakaran, suhu disamping komponen struktur meningkat dan material properties-nya akan berubah. Sifat mekanis seperti modulus elastisitas, tegangan leleh dan tegangan ultimate menurun seiring terjadinya peningkatan suhu sehingga baja akan kehilangan kekuatan dan kekakuannya [4].

Hingga saat ini penelitian mengenai baja mutu tinggi terbuat dari unsur utama karbon masih terbatas pada kondisi temperatur ruangan dan belum meninjau perilaku balok dengan lubang di tengah bentang. Namun demikian, beberapa peraturan asing sudah mengusulkan persamaan-persamaan yang dipakai untuk menghitung kekuatan balok baja canai-dingin berlubang walaupun penggunaannya terbatas pada baja dengan tegangan leleh sampai dengan 500 MPa.

Penelitian ini menyajikan hasil investigasi dari perilaku dan kekuatan baja canai-dingin mutu tinggi dengan variasi ukuran lubang di tengah bentang khususnya pada penampang *Rectangular Hollow Section (RHS)*. Perilaku yang ditinjau yaitu pada kondisi temperatur normal hingga temperatur tinggi, berasal dari 400 spesimen numerik yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga (*finite element*). Kemudian, hasil analisis elemen hingga digunakan untuk mengevaluasi perhitungan kekuatan menggunakan persamaan DSM yang diusulkan oleh AISI [6] dan Li dan Young

**PEMODELAN NUMERIK**

Data yang akan digunakan pada penelitian ini berasal dari hasil analisis model numerik sebagai pengganti hasil eksperimen. Pemodelan numerik dilakukan pada program komputer berbasis elemen hingga 3 dimensi (3D), yaitu ABAQUS [7]. Perlu dicatat, model numerik yang telah dibuat pada penelitian ini sesuai dengan yang model numerik pada penelitian Chen et al [1]. Properti material pada model numerik di penelitian ini diperoleh dari penjelasan berikut ini.

**Material Properties**

Pengujian tarik dari material baja canai-dingin dengan mutu baja nominal 700 dan 900 MPa pada suhu ruangan hingga pada suhu tinggi dilakukan oleh Li dan Young [5]. Pemodelan properti material yang berupa nilai *engineering stress-strain curve* diperoleh dari persamaan-persamaan dari hasil penelitian dan, yang dituliskan pada persamaan (1) - (7). Nilai parameter yang diperlukan untuk menghitung nilai tegangan-regangan dituliskan di Tabel 1

Tabel 1. Properti Material

Kelas	T (°C)	E <sub>T</sub> (MPa)	f <sub>y,T</sub> (MPa)	f <sub>u,T</sub> (MPa)	ε <sub>u,T</sub> (%)
700 MPa	21	209,4	727	849	3,2
	400	188,8	642	761	4,8
	600	130,8	354	388	1
	800	64,1	81	85	0,7
	1000	15,7	22	26	3,4
900 MPa	21	207,4	1024	1181	2,4
	400	179,3	839	984	2,4
	600	113,9	368	417	1,2
	800	32,7	38	47	5,3
	1000	30,1	21	27	7,4

$$\frac{f}{f_T} + 0.002 \left( \frac{f}{f_{0,2,T}} \right)^{n_T} \quad (f_T \leq f_{0,2,T}) \quad (1)$$

$$\frac{f-f_{0,2,T}}{f_{u,2,T}} + \left( \frac{f-f_{0,2,T}}{f_{u,2,T}} - \frac{f_{u,T}-f_{0,2,T}}{f_{u,2,T}} \right) \left( \frac{f-f_{0,2,T}}{f_{u,2,T}-f_{0,2,T}} \right)^{m_T} + 0.002 + \frac{f_{0,2,T}}{f_T} \quad (f_T > f_{0,2,T}) \quad (2)$$

$$E_{0,2,T} = \frac{E_T}{1 + 0.002 n_T E_T / f_{0,2,T}} \quad (3)$$

$$n_T = 5 \quad (4)$$

$$m_T = 1 + 4.5 \frac{f_{0,2,T}}{f_{u,T}} \quad (5)$$

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (6)$$

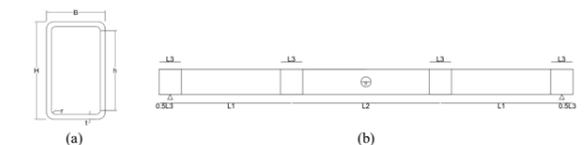
$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (7)$$

**Model Numerik**

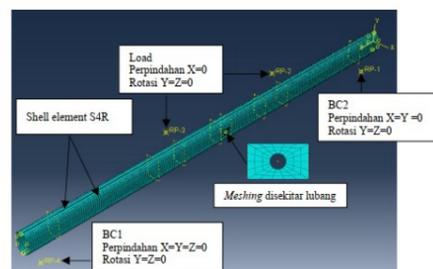
Sebanyak 400 model numerik dibuat dalam penelitian ini. Model penampang diberi nama seperti H/V60x120x4D0T21 dengan keterangan H/V adalah variasi tegangan leleh penampang dimana H = 700 MPa dan V = 900 MPa. 60x120x4 adalah ukuran penampang (BxHxt), D0 adalah variasi persentase ukuran lubang 0% dari tinggi bersih badan penampang, dan T21 adalah variasi temperatur yang akan disimulasikan 21°C. Bentuk penampang RHS dan notasi dimensinya ditunjukkan pada Gambar 1(a)

Kekuatan lentur dari analisis *finite element* diperoleh menggunakan simulasi numerik *four-point bending* untuk mendapatkan kekuatan lentur murni. Perilaku lentur dari simulasi *four-point bending* menghasilkan momen tekuk yang seragam dengan mean kurvatur konstan diantara zona geser di kedua ujungnya. Kelebihan lainnya dari metode ini adalah hanya terdapat lentur murni dan tidak ada gaya geser yang terjadi diantara daerah retak.

Penampang RHS dimodelkan dengan bantuan program ABAQUS. Perletakan dimodelkan seperti Gambar 2, pada BC1 dibuat sendi, pada BC2 dibuat rol dan pada titik *load* dibuat rol. *Meshing* semua penampang dibuat 6 pada bagian *corner*, dan B/10 pada bagian *flat*, ukuran *mesh* tersebut dibuat agar sebanding dengan ukuran penampang



Gambar 1. Detail Ukuran Penampang, (a) Tampak Samping Penampang dan (b) Tampak Depan Penampang



Gambar 2. Model numerik tipikal pada ABAQUS

Detail variasi pada pemodelan numerik yang meliputi ukuran penampang serta panjang spesimen dapat dilihat pada Gambar 1(b) dan Tabel 2. Nilai L1 dan L2 berurutan-turut dipakai sebagai nilai *shear span* dan *moment span*. Perkuatan di daerah tumpuan diberikan sejauh nilai L3 dengan tujuan menghindarkan terjadinya tekuk lokal pada daerah tumpuan. Variasi tegangan leleh yang digunakan untuk simulasi yaitu 700 MPa (H-series) dan 900 MPa (V-series). Variasi temperatur yang digunakan untuk simulasi, yaitu 21 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, dan 1000 °C, dan Variasi lubang yang digunakan untuk simulasi yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%.

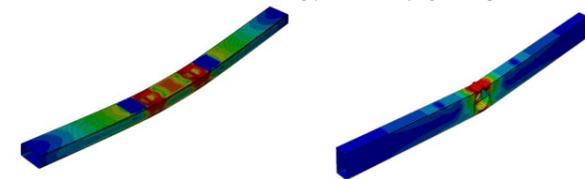
Tabel 2. Detail Penampang RHS

H (mm)	B (mm)	t (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)
60	120	4	480	480	90
80	80	3	320	320	90
150	100	3	600	600	90
200	200	4	800	800	90
200	300	3	1200	1200	90
250	100	6	1000	1000	90
250	250	3	1000	1000	90
400	200	4	1600	1600	90

**HASIL ANALISIS ABAQUS**

**Model Keruntuhan Ultimit**

Model keruntuhan ultimit tipikal yang terjadi pada baja canai-dingin dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Kedua gambar menunjukkan pelelehan maksimal terjadi pada bagian sayap atas penampang di sekitar tengah bentang akibat terjadinya tekuk lokal dari gaya tekan lentur yang dialami profil.

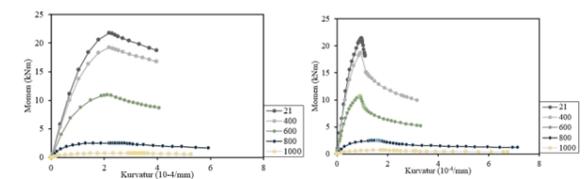


Gambar 3. Model Keruntuhan H60x120x4D0T21  
Gambar 4. Model Keruntuhan H400x200x4D80T21

Pada bagian tumpuan di kedua ujung dan kedua titik pembebanan tidak terjadi deformasi karena diaktifikannya fitur *constraint nodes* sebelum analisis perhitungan dijalankan. Keruntuhan akibat gaya geser tidak ditemukan pada keseluruhan hasil ABAQUS.

**Grafik Momen-Kurvatur**

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan grafik momen terhadap kurvatur dari penampang 60x120x4 untuk perbedaan besar lubang pada setiap variasi temperatur. Nilai kurvatur menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada balok dengan kegagalan lentur murni. Besarnya nilai kurvatur diperoleh dari persamaan yang dituliskan pada jurnal [10]



Gambar 5. Momen Vs Kurvatur H60x120x4D0  
Gambar 6. Momen Vs Kurvatur H60x120x4D80

**KESIMPULAN**

Tulisan ini menyajikan hasil simulasi numerik balok baja canai-dingin mutu tinggi profil RHS yang mengalami kegagalan lentur murni. Sebanyak 400 model numerik telah dibuat untuk dianalisis pada program ABAQUS dengan properti material yang berbeda dan ukuran lubang bervariasi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa rata-rata nilai kekuatan lentur yang diperoleh dari persamaan DSM berdasarkan spesifikasi AISI dan, hasil penelitian Li dan Young [5] lebih kecil dari hasil ABAQUS secara umum, dengan nilai terkecil dihasilkan dari AISI. Evaluasi keamanan tambahan menggunakan metode Kruppa menunjukkan hanya persamaan kekuatan lentur DSM dari peraturan AISI menjadi yang paling aman untuk digunakan untuk menghitung kekuatan lentur balok RHS pada suhu antara 21 dan 1000°C karena memenuhi seluruh kriteria yang diterapkan

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] Z. Chen, Y. Huang dan B. Young, "Design of cold-formed ferritic stainless steel RHS perforated beams," *Engineering Structures*, pp. 1-12, 2022

[2] H. Ban dan G. Shi, "A review of research on high-strength steel structures," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, pp. 1-17, 2017.

[3] H.-T. Li dan B. Young, "Thin-Walled Structures," *Material properties of cold-formed high strength steel at elevated temperatures*, pp. 289-299, 2017.

[4] J. C. B. Abreu, L. M. C. Vieira Jr, M. H. Abu-Hamd dan B. W. Schafer, "Review: development of performance-based fire design for cold-formed steel," *Fire Science Reviews*, pp. 1-15, 2014.

[5] H.-T. Li dan B. Young, "Cold-formed high strength steel SHS and RHS beams at elevated temperatures," *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 475-485, 2019a.

[6] AISI, "North American Specification For The Design Of Cold-Formed Steel Structural Members," *AISI S100-16*, 2016.

[7] ABAQUS, *User's manual and theory manual*: Dassault Systèmes Simulia Corp., : Dassault Systèmes Simulia Corp, 2023.

[8] J. Kruppa, "Eurocode fire parts: proposal for a methodology to check the accuracy of assessment methods," dalam *CEN TC 250, Horizontal Group Fire*, 1999, pp. 99-130.

[9] Y. Huang, J. Chen, Y. He dan B. Young, "Design of Cold-formed Stainless Steel RHS and SHS Beam-columns at Elevated Temperatures," *Thin-Walled Structures*, pp. 1-22, 2021 .

[10] T. M. Chan dan L. Gardner, "Bending Strength of Hot-Rolled Elliptical Hollow Sections," *Journal of Construction Steel Research* 64, pp. 971-986, 2008

[11] B. W. Schafer dan S. Adány, "Buckling Analysis Of Cold-Formed Steel Members Using CUF5M: conventional and constrained finite strip methods," *Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel*

[12] C. D. Moen, "'Direct Strength Design of Cold-Formed Steel Members with Perforations", Ph.D. Thesis," Johns Hopkins University, Baltimore, 2008

**EVALUASI DESAIN**

Kekuatan lentur nominal penampang menurut ( $M_n$ ), yang persamaannya ditulis pada persamaan (8) untuk nilai  $\lambda_i \leq 0,776$  dan persamaan (9) untuk  $\lambda_i > 0,776$ . Nilai  $M_n$  hanya ditentukan oleh kapasitas momen tekuk lokal ( $M_{cr}$ )

$$M_{nl} = M_y \quad (8)$$

$$M_{nl} = \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{M_{cr1}}{M_y} \right)^{0.4} \right] \left( \frac{M_{cr1}}{M_y} \right)^{0.4} M_y \quad (9)$$

$$M_{DSM\#} = \left( 1.5 - 0.46 \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr1}}} \right) M_y \quad (10)$$

$$M_{DSM\#} = \left[ 1 - 0.08 \left( \frac{M_{cr1}}{M_y} \right)^{0.35} \right] \left( \frac{M_{cr1}}{M_y} \right)^{0.35} M_y \quad (11)$$

Persamaan kekuatan lentur menggunakan prinsip DSM dari Li dan Young, mengacu pada peraturan. Hasil perhitungannya ditulis menggunakan simbol  $M_{DSM\#}$  yang nilainya diperoleh dari persamaan (10) untuk  $\lambda_i \leq 0,665$  dan persamaan (11) untuk  $\lambda_i > 0,665$ .

Keseluruhan nilai  $M_n$  dibandingkan dengan nilai  $M_{n\#}$  dan  $M_{DSM\#}$  untuk diperoleh rasio perbandingan nilai momen untuk masing-masing kelas material.

Tabel 3 dan Tabel 4 menyajikan ringkasan dari hasil perbandingan tersebut. Nilai *mean* merupakan rata-rata perbandingan nilai kekuatan lentur dan COV menunjukan variasi nilai perbandingan

Tabel 3. Hasil Analisis Keandalan  $M_{AISI}$  dan  $M_{DSM\#}$  Untuk Penampang H-Series

f <sub>0,2 nominal</sub> = 700 MPa	M <sub>n</sub> /M <sub>AISI</sub>						M <sub>n</sub> /M <sub>DSM#</sub>						
	D0	D20-D80	D0-D80	D0	D20-D80	D0-D80	D0	D20-D80	D0-D80	D0	D20-D80	D0-D80	
Mean	1.17	1.15	1.15	1.12	1.1	1.17	Mean	1.2	1.16	1.11	1.14	1.11	1.12
COV	0.093	0.109	0.106	0.12	0.137	0.113	COV	0.108	0.114	0.134	0.133	0.142	0.14
f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	f	3.53	3.4	2.95	3.2	3.07	2.64
β	3.03	2.89	2.92	2.73	2.61	2.64	β	3.53	3.4	2.95	3.2	3.07	2.64
% ratio < 1	0%	11%	9%	18%	26%	25%	% ratio < 1	3%	11%	9%	18%	26%	24%
ratio terkecil	0	0.85	0.85	0.92	0.77	0.77	ratio terkecil	0.97	0.87	0.87	0.89	0.80	0.8

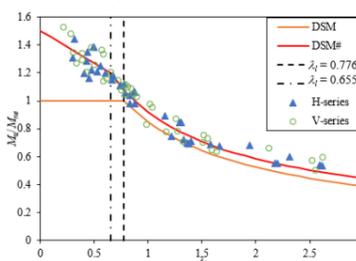
Tabel 4. Hasil Analisis Keandalan  $M_{AISI}$  dan  $M_{DSM\#}$  Untuk Penampang V-Series

f <sub>0,2 nominal</sub> = 900 MPa	M <sub>n</sub> /M <sub>AISI</sub>						M <sub>n</sub> /M <sub>DSM#</sub>						
	D0	D20-D80	D0-D80	D0	D20-D80	D0-D80	D0	D20-D80	D0-D80	D0	D20-D80	D0-D80	
Mean	1.2	1.16	1.11	1.14	1.11	1.12	Mean	1.2	1.16	1.11	1.14	1.11	1.12
COV	0.108	0.114	0.134	0.133	0.142	0.14	COV	0.108	0.114	0.134	0.133	0.142	0.14
f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	f	3.53	3.4	2.95	3.2	3.07	2.64
β	3.53	3.4	2.95	3.2	3.07	2.64	β	3.53	3.4	2.95	3.2	3.07	2.64
% ratio < 1	3%	11%	9%	18%	26%	24%	% ratio < 1	3%	11%	9%	18%	26%	24%
ratio terkecil	0.97	0.87	0.87	0.89	0.80	0.8	ratio terkecil	0.97	0.87	0.87	0.89	0.80	0.8

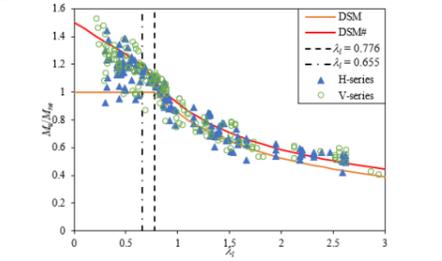
Nilai rata-rata (mean) dan koefisien variasi (COV) terbesar dihasilkan dari perbandingan  $M_n$  dan  $M_{AISI}$ . Ini menunjukkan persamaan DSM AISI menghasilkan nilai kekuatan lentur yang paling konservatif sekaligus memiliki ketidakefektifan paling tinggi terhadap hasil ABAQUS. Sementara persamaan DSM lainnya ( $M_{DSM\#}$ ) memiliki hasil yang lebih dekat dengan hasil ABAQUS dengan tingkat variasi yang lebih kecil dari persamaan DSM AISI.

Tabel 3 dan Tabel 4 juga menunjukkan seluruh nilai  $\phi$  (indeks keandalan) dari kedua persamaan DSM yang keseluruhan nilainya lebih besar dari 2,5 dengan nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) sebesar 0.9. Selain itu, evaluasi dengan metode Kruppa mengkonfirmasi hanya persamaan DSM.

Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukan hubungan antara data perbandingan nilai  $M_n/M_{n\#}$  terhadap kurva DSM yang diperoleh dari persamaan untuk mencari  $M_{AISI}$  dan  $M_{DSM\#}$ . Nilai  $M_{n\#}$  diperoleh dari nilai  $M_n$  karena tekuk torsi tidak terjadi sebelum mencapai  $M_n$ . Gambar 8 dan Gambar 9 juga menunjukkan kurva DSM dari persamaan  $M_{DSM\#}$  paling dekat dengan hasil analisis ABAQUS. Persamaan  $M_{DSM\#}$  mengakomodir keseluruhan variasi  $\lambda_i$ , mulai dari paling



Gambar 7. Perbandingan hasil ABAQUS dan hasil persamaan yang ditampilkan pada kurva DSM



Gambar 8. Perbandingan hasil ABAQUS dan hasil persamaan yang ditampilkan pada kurva DSM