

## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISA

#### 4.1. HASIL SIMULASI

##### 4.1.1. Umum

Sebelum membahas lebih lanjut mengenai hasil simulasi yang diperoleh, perlu diketahui beberapa hal yang berkaitan dengan pembacaan hasil tersebut. Hal tersebut yaitu penomoran nodal dan elemen yang membentuk struktur Jembatan Krasak (baik 2 Dimensi ataupun 3 Dimensi) pada program ANSYS v8.0. Penomoran tersebut dapat dilihat pada Lampiran C. Selain itu, perlu diketahui bahwa simulasi baru dapat berjalan setelah sambungan yang bertipe *pin joint* pada memang didefinisikan seperti keadaan sebenarnya pada program simulasi.

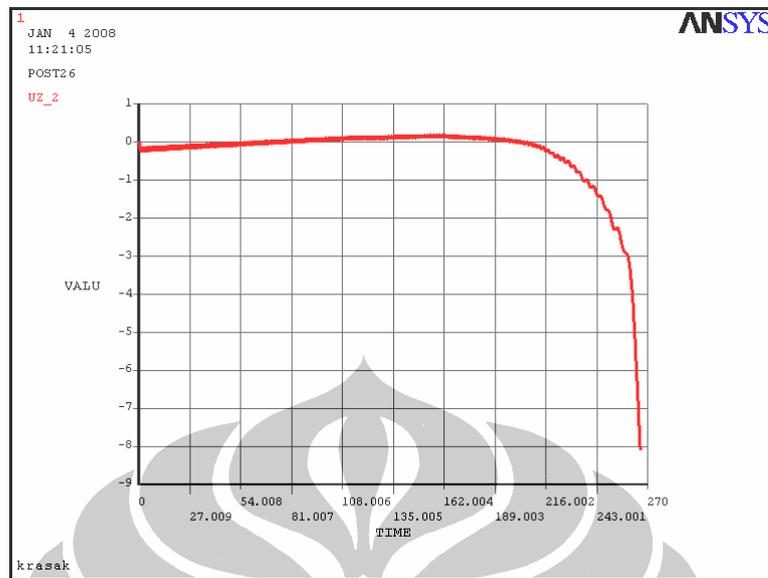
##### 4.1.2. Deformasi

Untuk deformasi, akan ditinjau besar perpindahan terhadap arah z ( $U_z$ ) dari satu nodal dalam tiap jenis modelisasi struktur yang dilakukan. Nodal tersebut terletak pada bagian tengah dari segmen yang mengalami kebakaran.

##### 4.1.2.1. Model 2 Dimensi

Pada model ini, simulasi terhenti pada angka menit ke-266, atau tepatnya pada suhu berkisar antara 1200 °C. Pada menit tersebut solusi yang dihitung melalui simulasi sudah tidak bersifat konvergen. Hal ini dikarenakan bentuk struktur dan kondisi material yang sudah tidak memungkinkan untuk dianalisa lebih lanjut. Dengan kata lain, struktur Jembatan Krasak dalam simulasi ini sudah mengalami keruntuhan.

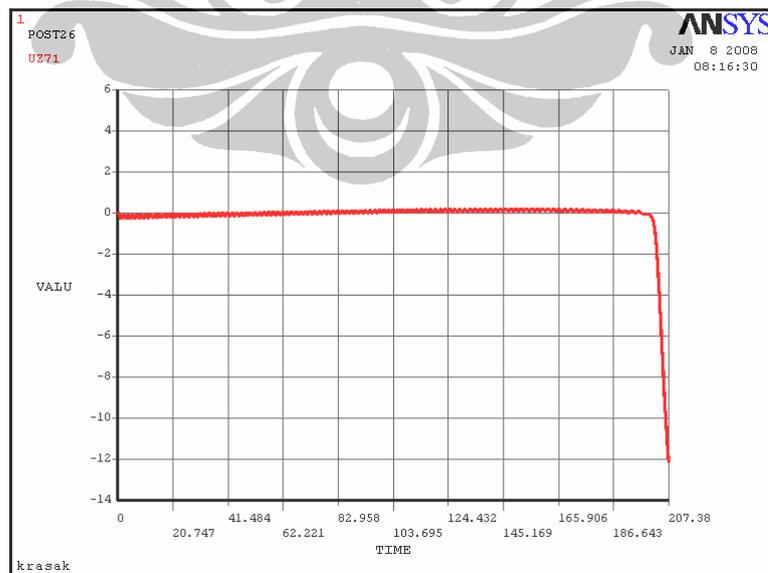
Data nodal yang akan ditampilkan dari model ini adalah pada nodal 8. Grafik perpindahannya dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1. Perpindahan Nodal 8 arah Z (2Dimensi-1)**

#### 4.1.2.2. Model 3 Dimensi-1

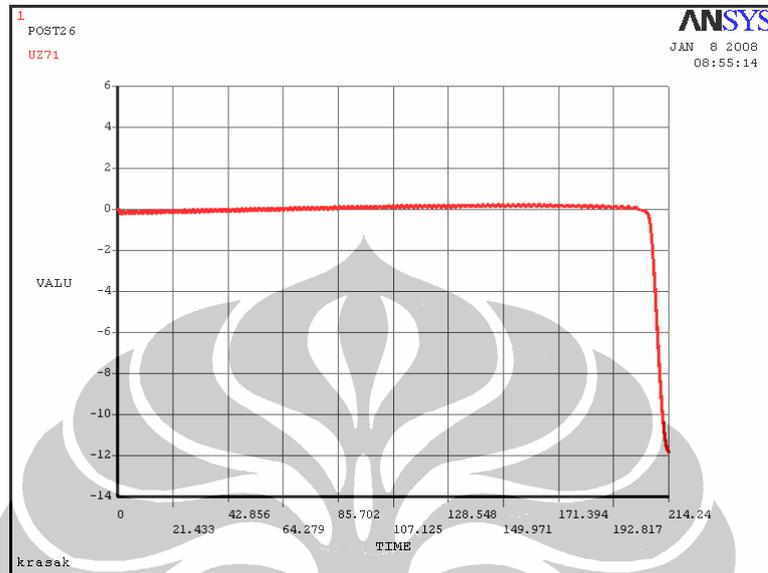
Pada model ini, simulasi terhenti pada angka menit ke-207,38, atau tepatnya pada suhu berkisar antara 1103,5 °C. Data nodal yang diamati pada model ini adalah pada nodal 71, karena dianggap mengalami beban gravitasi terbesar. Grafik perpindahannya pada arah Z dapat dilihat sebagai berikut:



**Gambar 4.2. Perpindahan Nodal 71 arah Z (3Dimensi-1)**

#### 4.1.2.3. Model 3 Dimensi-2

Serupa dengan model 3 Dimensi-1, simulasi pada model ini pun terhenti pada menit ke-207,38. Sebagai pembandingan, maka data nodal yang diambil pun juga sama, yaitu nodal 71.



Gambar 4.3. Perpindahan Nodal 71 arah Z (3Dimensi-2)

#### 4.1.2.4. Model 3 Dimensi-3

Berbeda dengan kedua model 3 dimensi sebelumnya, simulasi pada Model 3 Dimensi-3 terhenti pada menit ke-220,07. Grafik perpindahan Nodal 71 dapat dilihat pada Gambar 4.4.

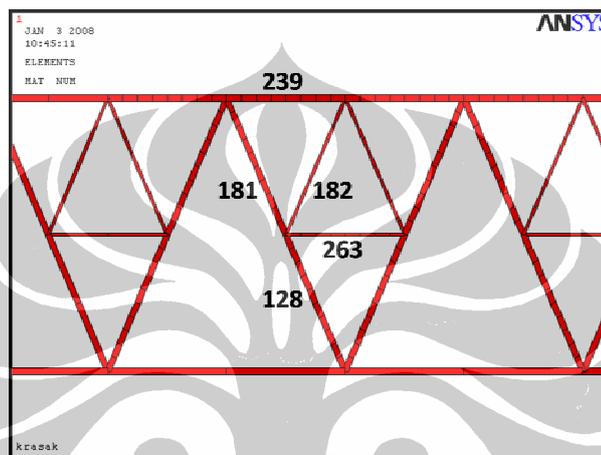


Gambar 4.4. Perpindahan Nodal 71 arah Z (3Dimensi-3)

### 4.1.3. Hubungan Tegangan-Regangan

#### 4.1.3.1. Model 2 Dimensi

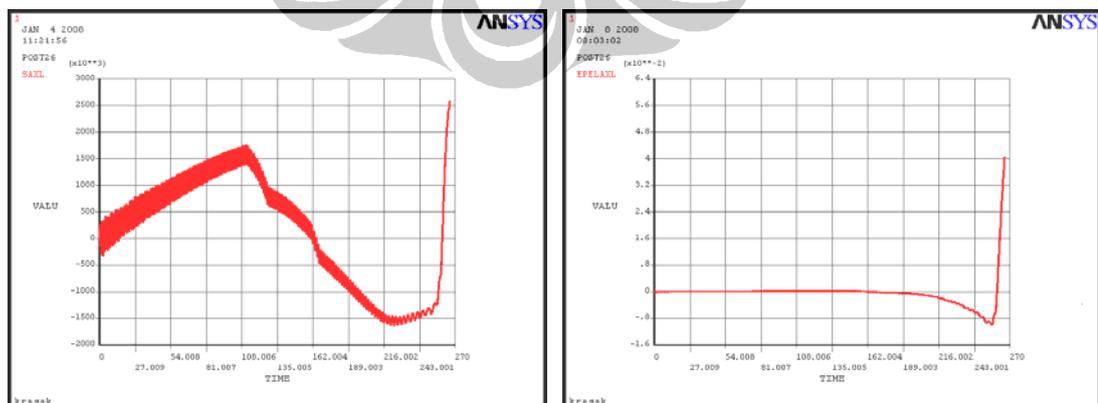
Pada model ini akan ditampilkan hubungan tegangan-regangan dari elemen-elemen yang mewakili setiap jenis batang yang mengalami kebakaran, nomor dari elemen-elemen tersebut, yaitu: 128; 181; 182; 239; dan 263. Letak elemen-elemen tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.5. Letak Elemen yang Ditinjau (2Dimensi)

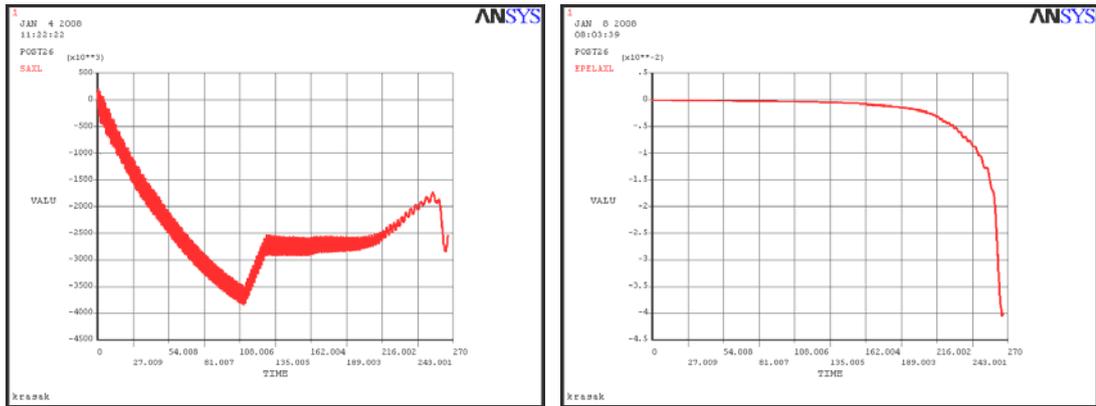
Untuk hasil dari hubungan tegangan-regangan pada elemen-elemen tersebut, dapat dilihat pada Gambar 4.6 hingga Gambar 4.10 di bawah ini.

Pada elemen 128:



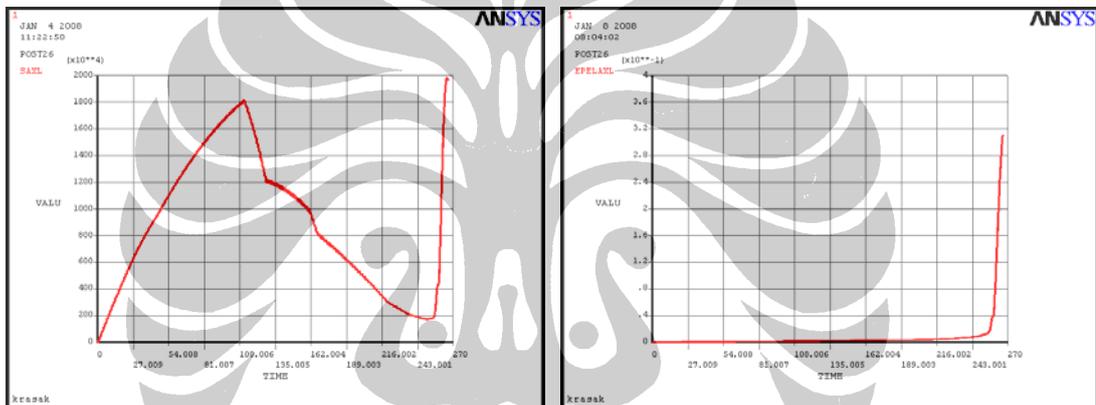
Gambar 4.6. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 128 (2Dimensi)

Pada elemen 181:



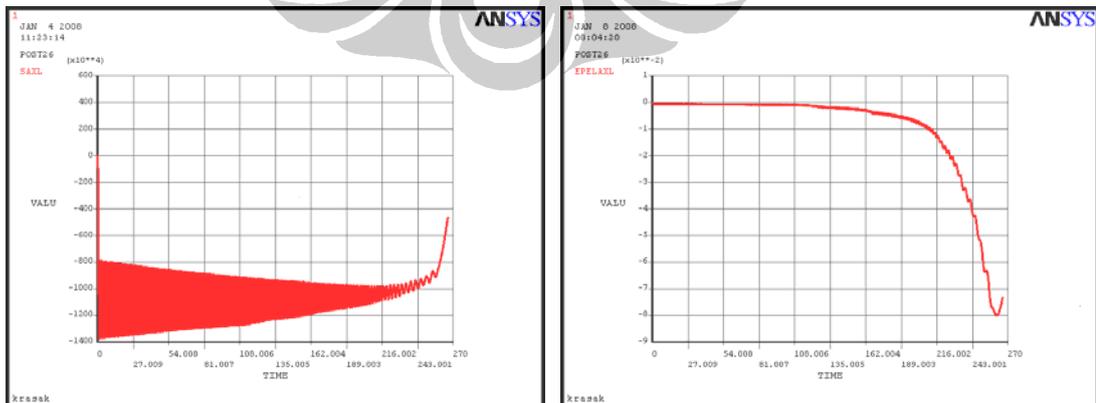
Gambar 4.7. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 181 (2Dimensi)

Pada elemen 182:



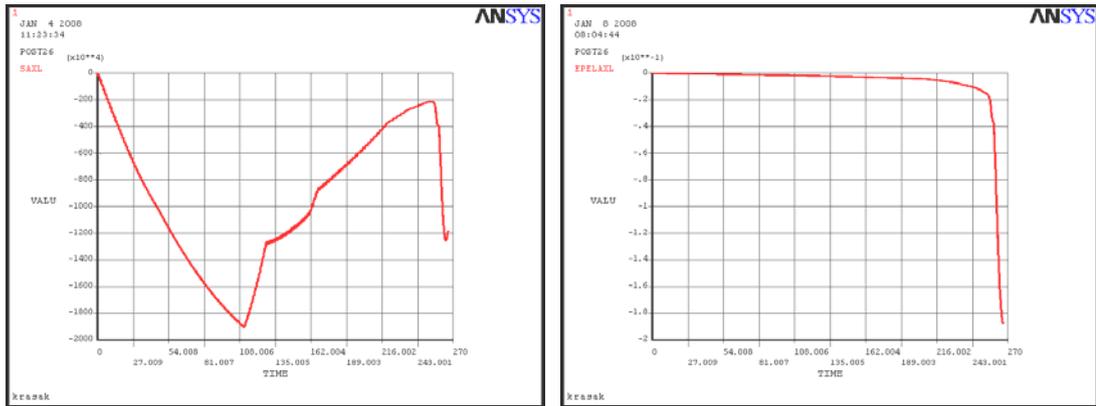
Gambar 4.8. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 182 (2Dimensi)

Pada elemen 239:



Gambar 4.9. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 239 (2Dimensi)

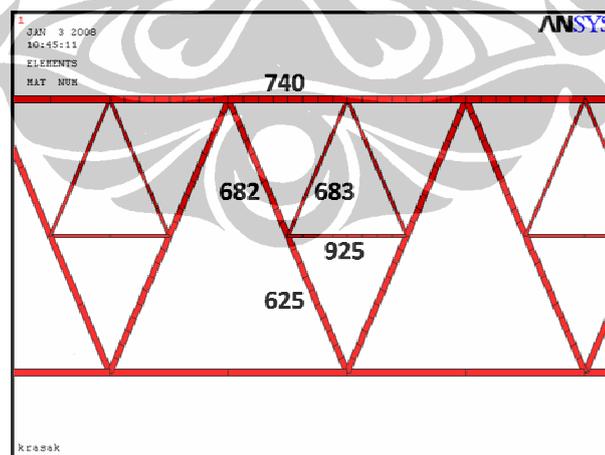
Pada elemen 263:



Gambar 4.10. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 263 (2Dimensi)

#### 4.1.3.2. Model 3 Dimensi-1

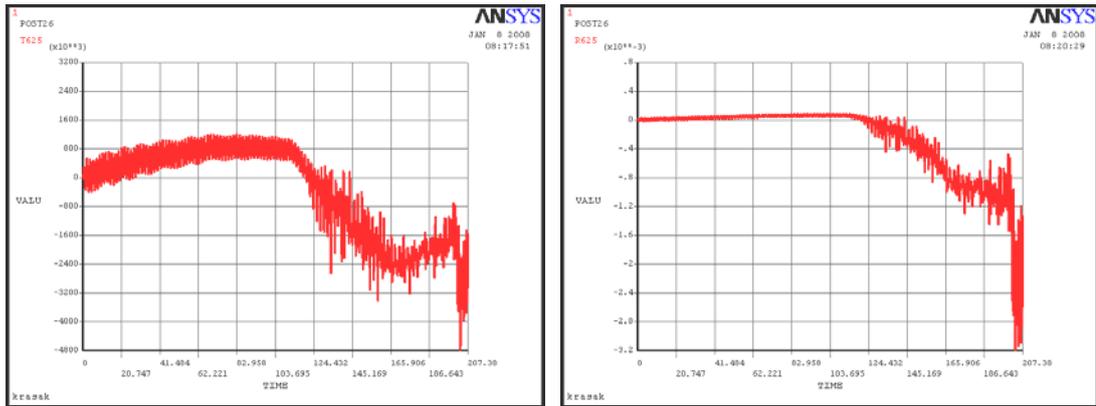
Pada model ini akan ditampilkan hubungan tegangan-regangan dari elemen-elemen yang mewakili setiap jenis batang yang mengalami kebakaran, nomor dari elemen-elemen tersebut, yaitu: 625; 682; 683; 740; dan 925 (sesuai urutannya, kelima elemen tersebut setara dengan elemen 128, 181, 182, 239, dan 263). Letak dari kelima elemen tersebut apabila diperlihatkan dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4.11. Letak Elemen yang Ditinjau (3Dimensi)

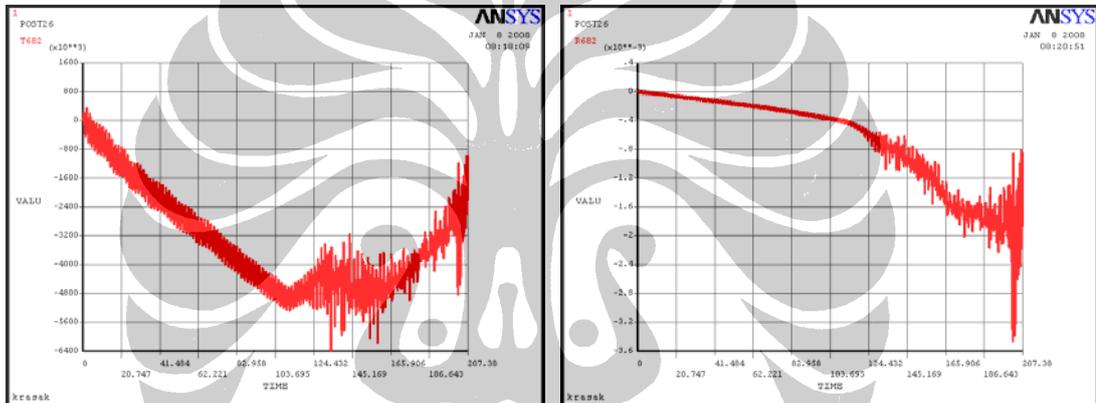
Untuk hasil dari hubungan tegangan-regangan pada elemen-elemen tersebut, dapat dilihat pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.16 di bawah ini.

Pada elemen 625:



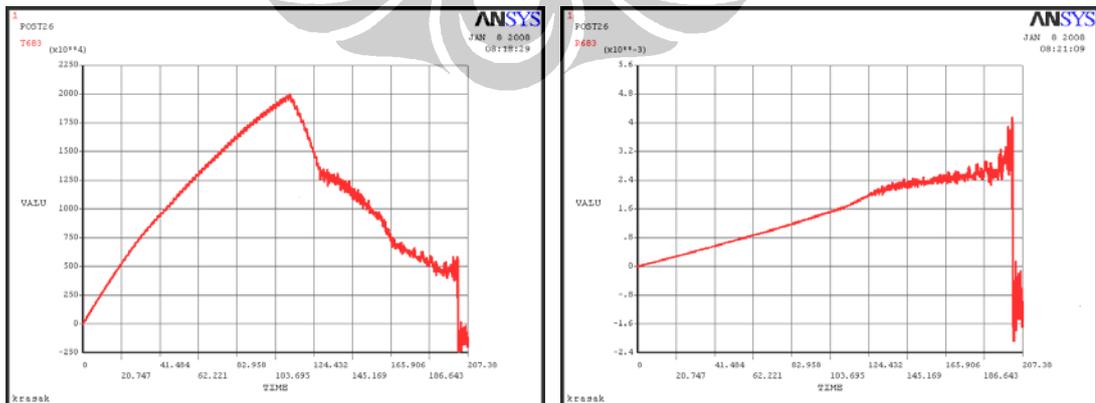
Gambar 4.12. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 625 (3Dimensi-1)

Pada elemen 682:



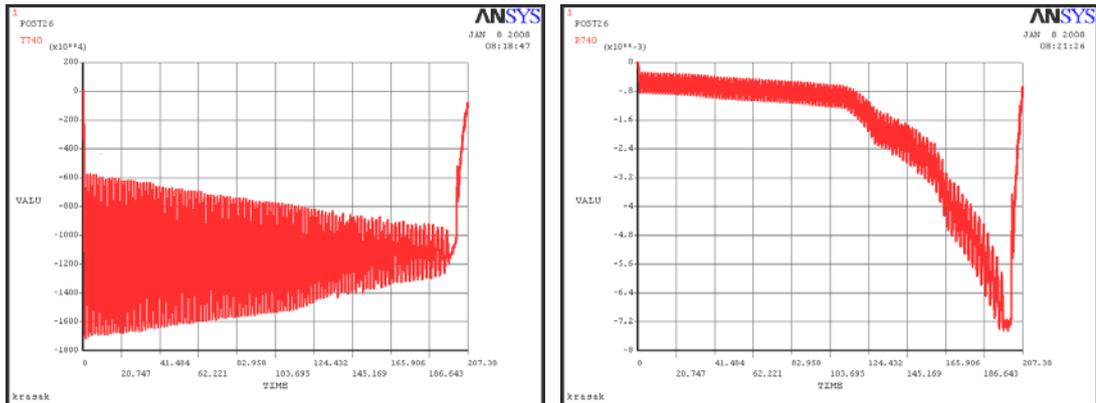
Gambar 4.13. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 682 (3Dimensi-1)

Pada elemen 683:



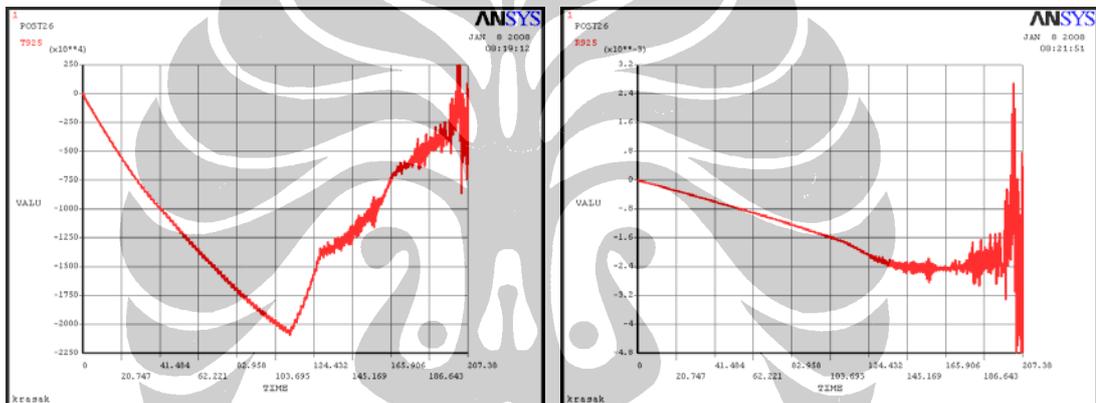
Gambar 4.14. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 683 (3Dimensi-1)

Pada elemen 740:



Gambar 4.15. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 740 (3Dimensi-1)

Pada elemen 925:

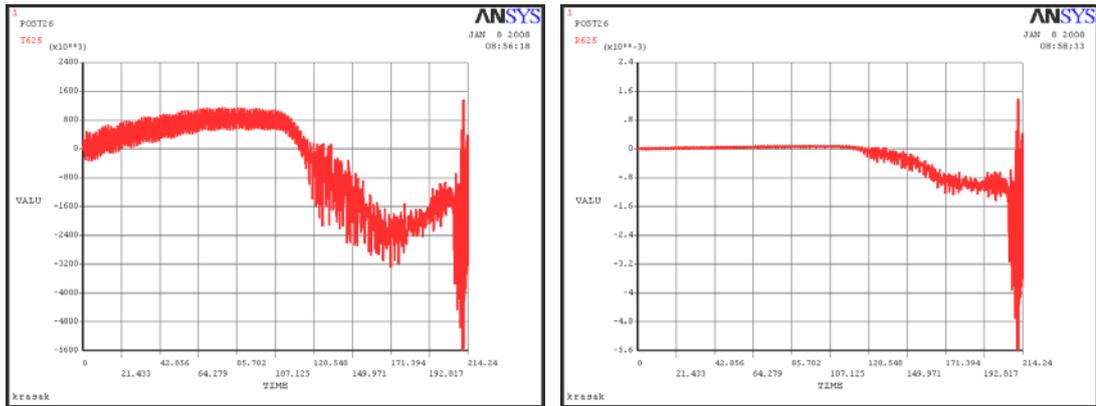


Gambar 4.16. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 925 (3Dimensi-1)

#### 4.1.3.3. Model 3 Dimensi-2

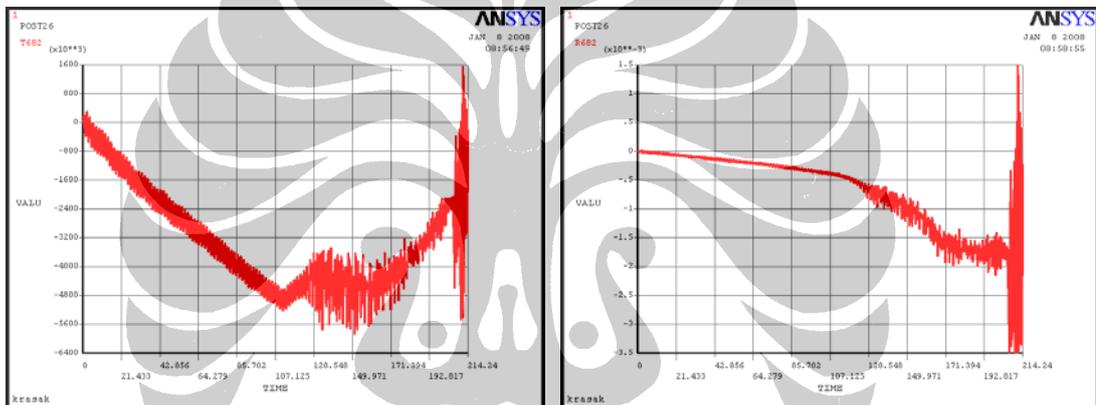
Sebagai pembandingan dari hasil pada model 3 Dimensi-1, maka data elemen yang ditinjau pun sama dengan model 3 Dimensi-1. Elemen tersebut yaitu 625, 682, 683, 740, dan 925 (sesuai urutannya, kelima elemen tersebut setara dengan elemen 128, 181, 182, 239, dan 263). Letak dari kelima elemen tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.10. Untuk hasil dari hubungan tegangan-regangan pada elemen-elemen tersebut, dapat dilihat pada Gambar 4.17 hingga Gambar 4.21 di bawah ini.

Pada elemen 625:



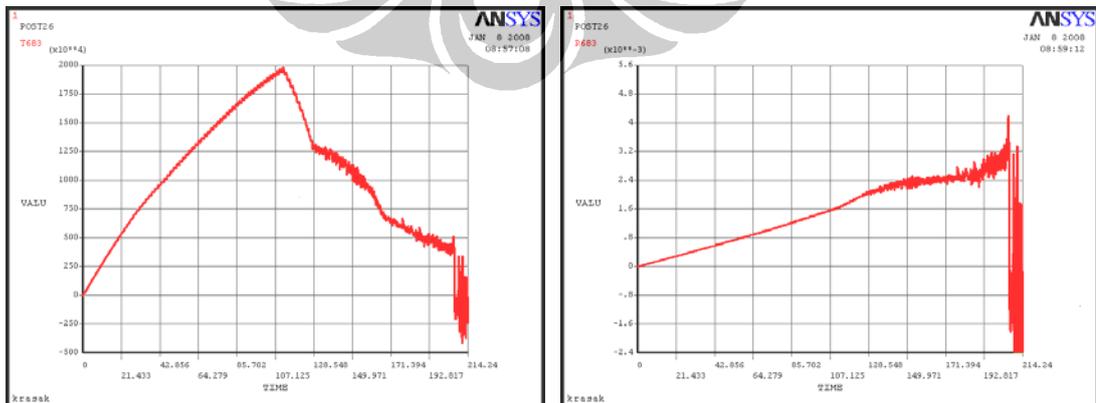
Gambar 4.17. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 625 (3Dimensi-2)

Pada elemen 682:



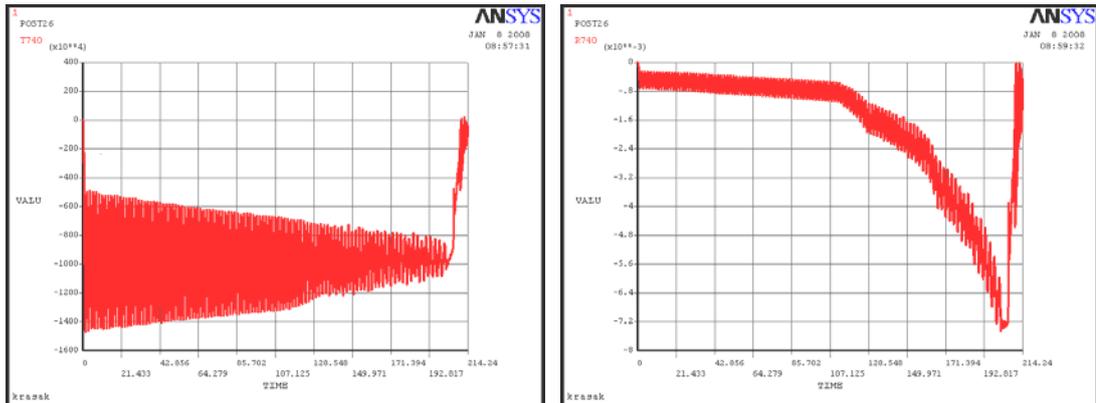
Gambar 4.18. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 682 (3Dimensi-2)

Pada elemen 683:



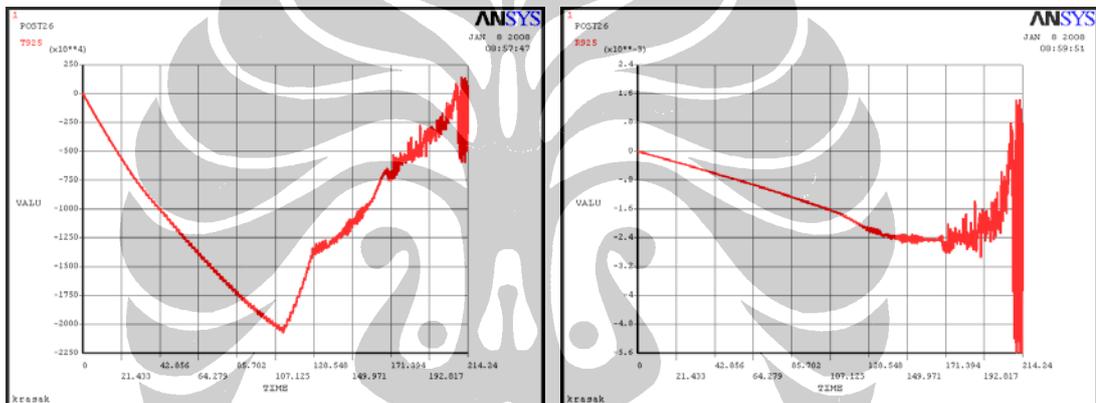
Gambar 4.19. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 683 (3Dimensi-2)

Pada elemen 740:



Gambar 4.20. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 740 (3Dimensi-2)

Pada elemen 925:

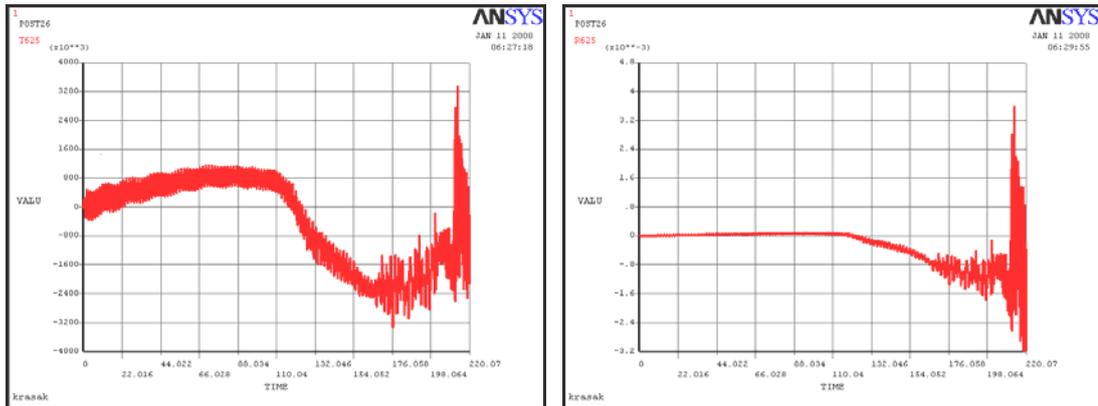


Gambar 4.21. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 925 (3Dimensi-2)

#### 4.1.3.4. Model 3 Dimensi-3

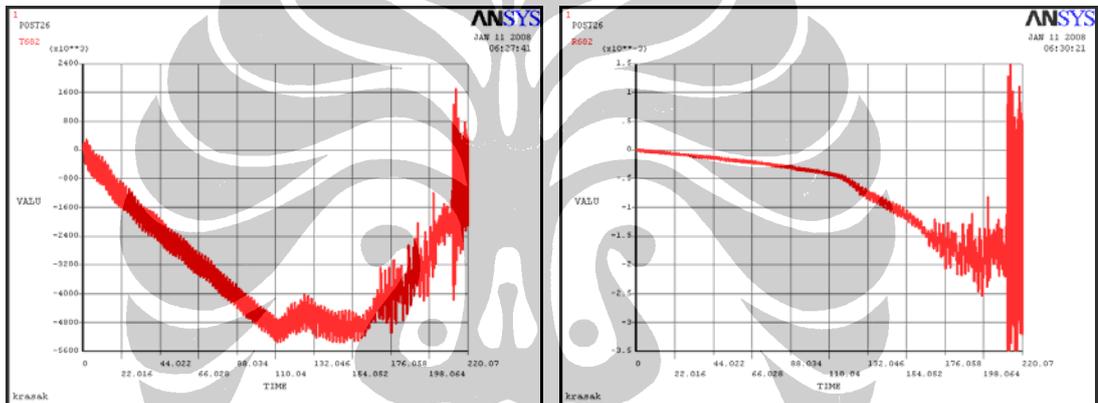
Sebagai pembandingan dari hasil pada model 3 Dimensi-1, maka data elemen yang ditinjau pun sama dengan model 3 Dimensi-1. Elemen tersebut yaitu 625, 682, 683, 740, dan 925 (sesuai urutannya, kelima elemen tersebut setara dengan elemen 128, 181, 182, 239, dan 263). Letak dari kelima elemen tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.10. Untuk hasil dari hubungan tegangan-regangan pada elemen-elemen tersebut, dapat dilihat pada Gambar 4.22 hingga Gambar 4.26 di bawah ini.

Pada elemen 625:



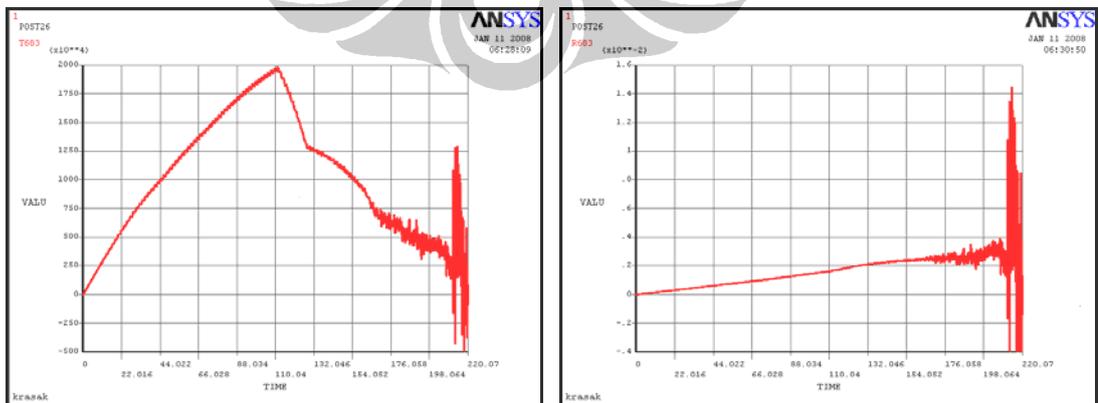
Gambar 4.22. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 625 (3Dimensi-3)

Pada elemen 682:



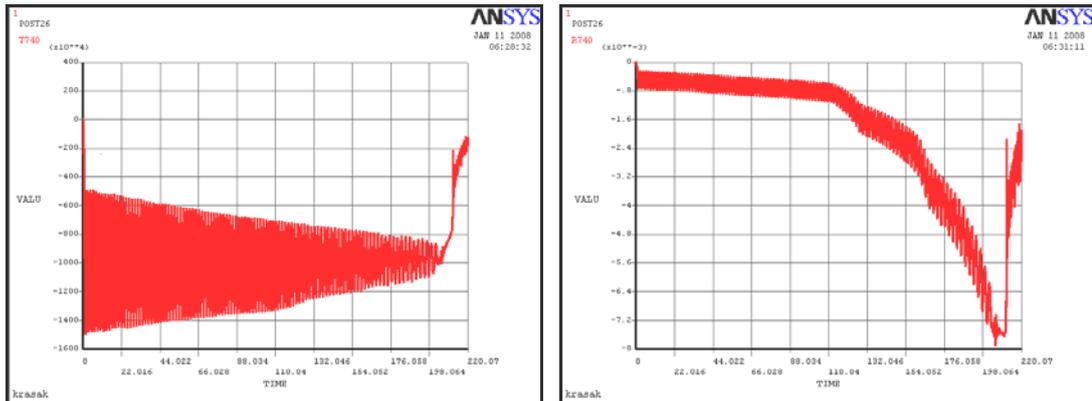
Gambar 4.23. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 682 (3Dimensi-3)

Pada elemen 683:



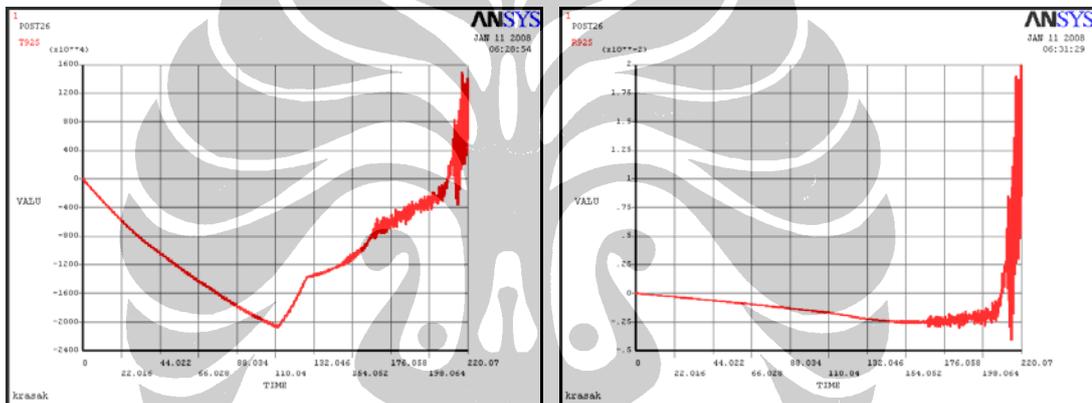
Gambar 4.24. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 683 (3Dimensi-3)

Pada elemen 740:



Gambar 4.25. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 740 (3Dimensi-3)

Pada elemen 925:



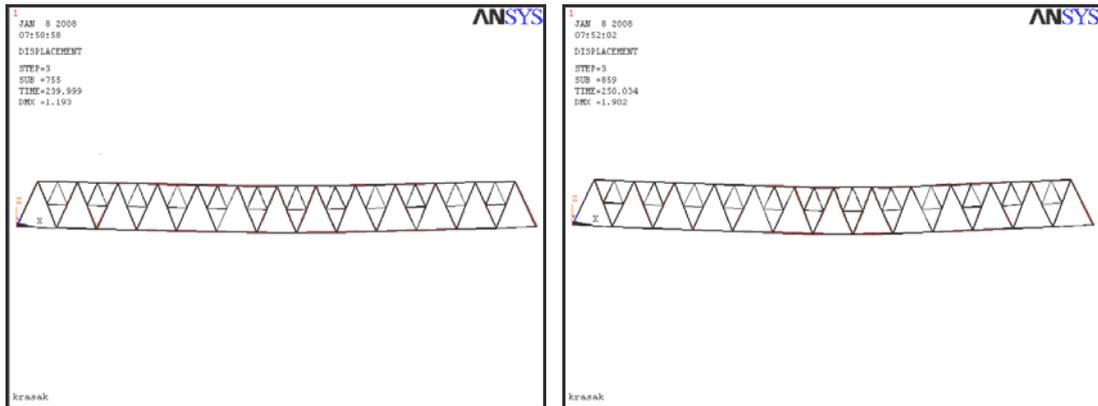
Gambar 4.26. Hubungan Tegangan-Regangan Elemen 925 (3Dimensi-3)

#### 4.1.4. Saat-Saat Keruntuhan Jembatan Krasak

##### 4.1.4.1. Model 2 Dimensi

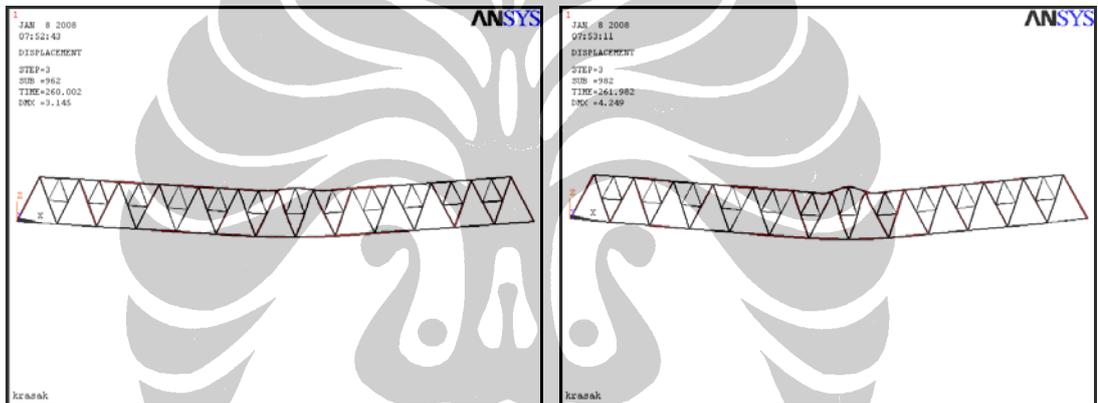
Pada model ini, saat-saat keruntuhan Jembatan Krasak dapat dilihat dengan jelas semenjak perhitungan menit ke-240 hingga menit ke-266. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.27 hingga Gambar 4.29 berikut ini:

Pada menit ke-240 ( $T = 1157,16 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-250 ( $T = 1173,62 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



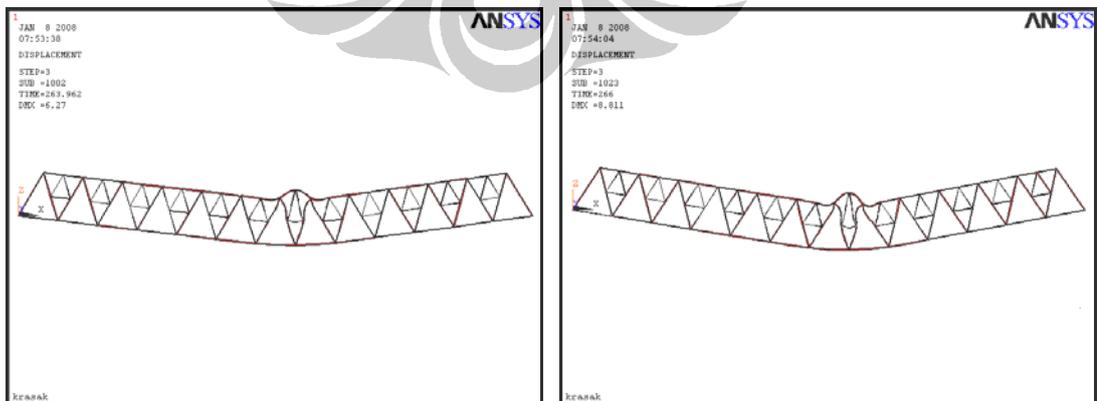
**Gambar 4.27. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-240 dan Menit ke-250 (2Dimensi)**

Pada menit ke-260 ( $T = 1190,08 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-262 ( $T = 1193,37 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



**Gambar 4.28. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-260 dan Menit ke-262 (2Dimensi)**

Pada menit ke-264 ( $T = 1196,66 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-266 ( $T = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

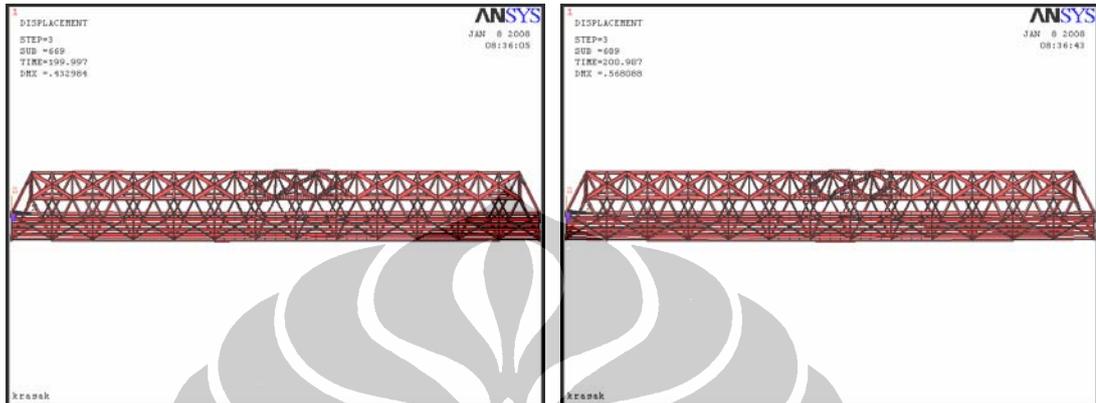


**Gambar 4.29. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-264 dan Menit ke-266 (2Dimensi)**

4.1.4.2. Model 3 Dimensi-1

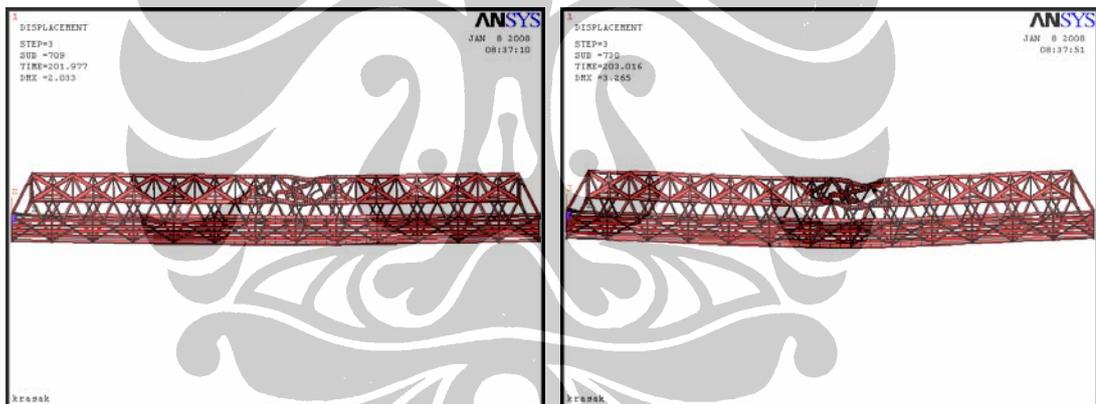
Pada model ini, saat-saat keruntuhan Jembatan Krasak dapat dilihat dengan jelas semenjak perhitungan menit ke-200 hingga menit ke-207. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.30 hingga Gambar 4.33 berikut ini:

Pada menit ke-200 ( $T = 1091,32 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-201 ( $T = 1092,96 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



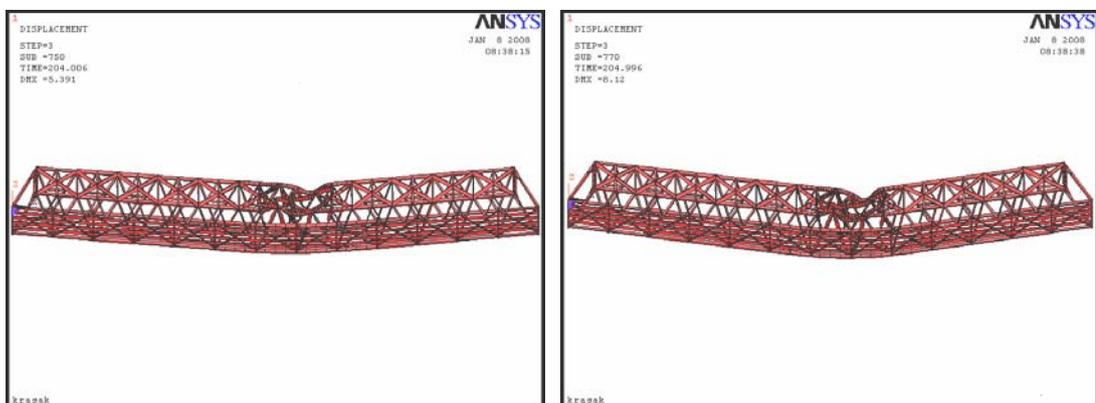
Gambar 4.30. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-200 dan Menit ke-201 (3Dimensi-1)

Pada menit ke-202 ( $T = 1094,61 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-203 ( $T = 1096,256 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



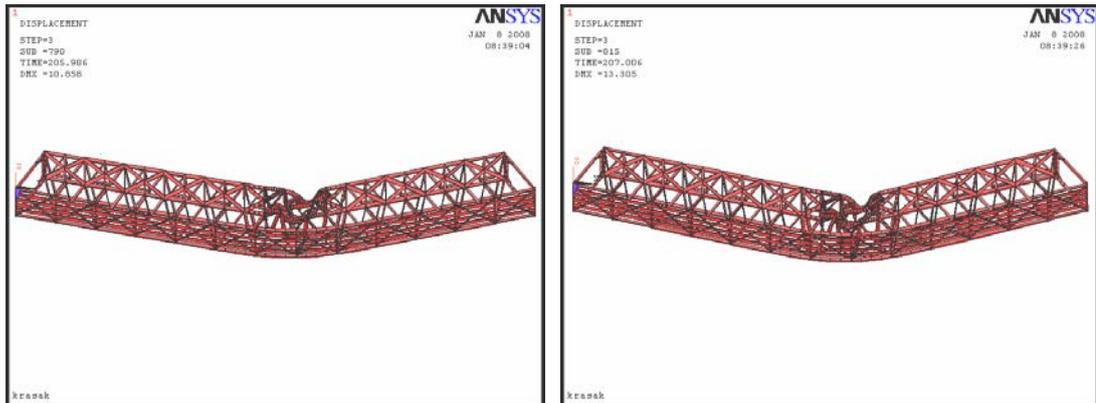
Gambar 4.31. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-202 dan Menit ke-203 (3Dimensi-1)

Pada menit ke-204 ( $T = 1097,902 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-205 ( $T = 1099,55 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



Gambar 4.32. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-204 dan Menit ke-205 (3Dimensi-1)

Pada menit ke-206 ( $T = 1101,194 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-207 ( $T = 1102,84 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

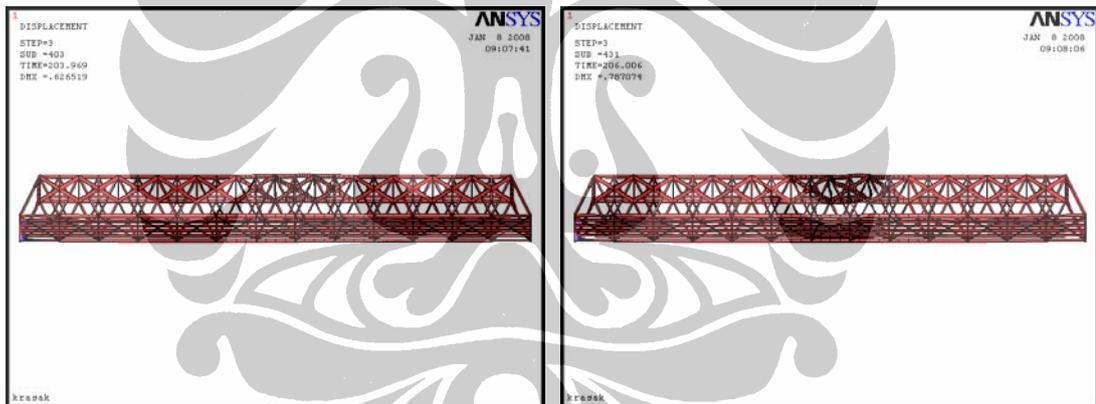


**Gambar 4.33. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-206 dan Menit ke-207 (3Dimensi-1)**

4.1.4.3. Model 3 Dimensi-2

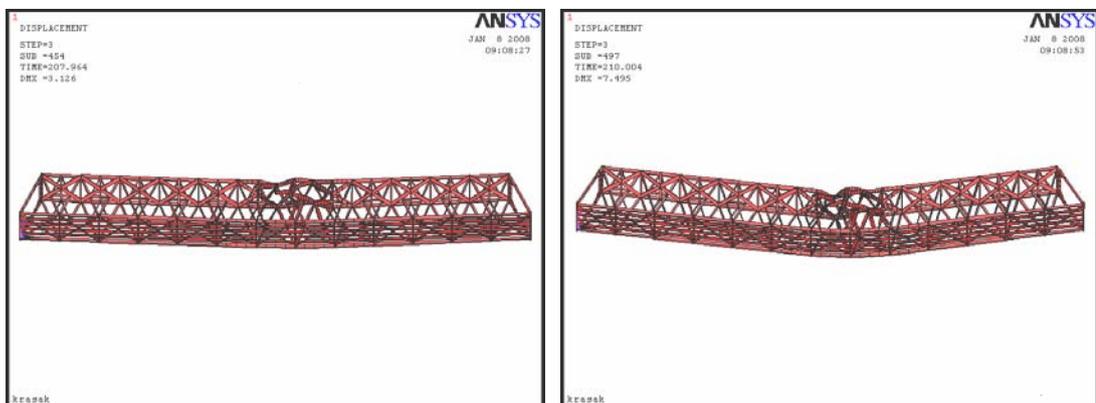
Seperti pada model sebelumnya pada model ini pun saat-saat keruntuhan Jembatan Krasak dapat dilihat dengan jelas semenjak perhitungan menit ke-204 hingga menit ke-214. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.34 – 4.37:

Pada menit ke-204 ( $T = 1097,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-206 ( $T = 1101,19 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



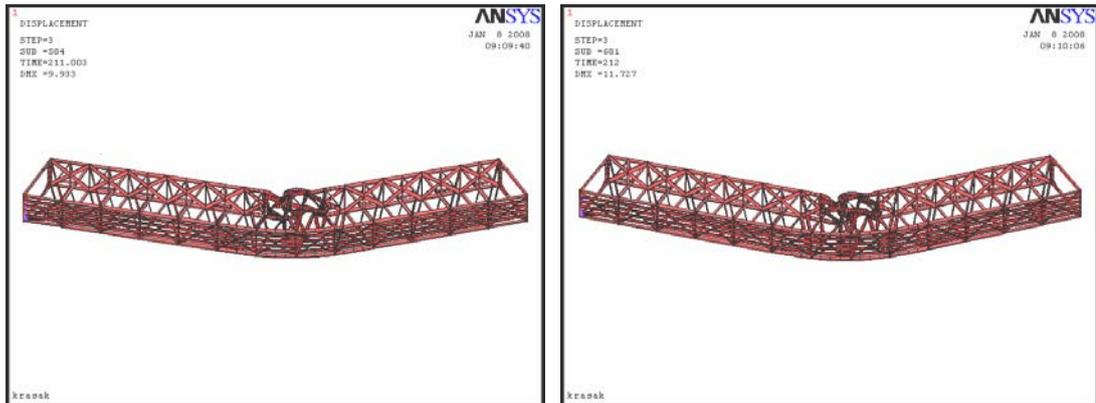
**Gambar 4.34. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-204 dan Menit ke-206 (3Dimensi-2)**

Pada menit ke-208 ( $T = 1104,48 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-210 ( $T = 1107,78 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



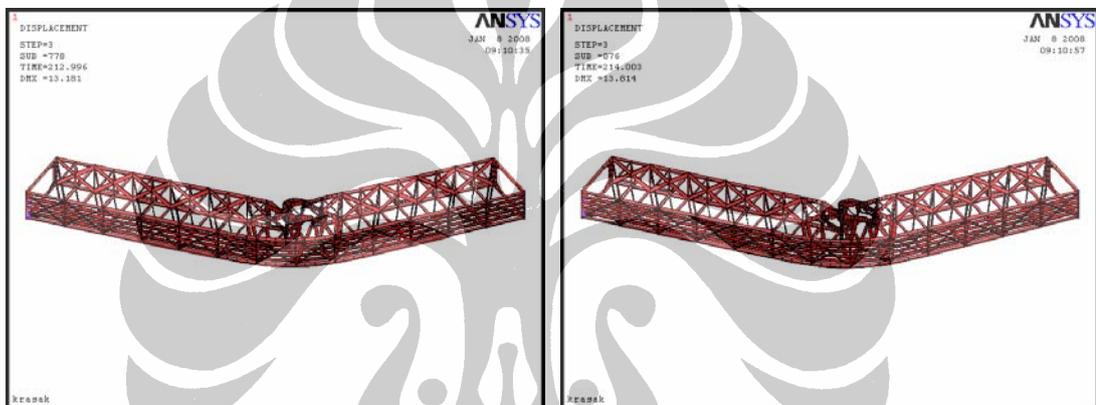
**Gambar 4.35. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-208 dan Menit ke-210 (3Dimensi-2)**

Pada menit ke-211 ( $T = 1109,42 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-212 ( $T = 1111,07 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



Gambar 4.36. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-211 dan Menit ke-212 (3Dimensi-2)

Pada menit ke-213 ( $T = 1112,72 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-214 ( $T = 1114,36 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

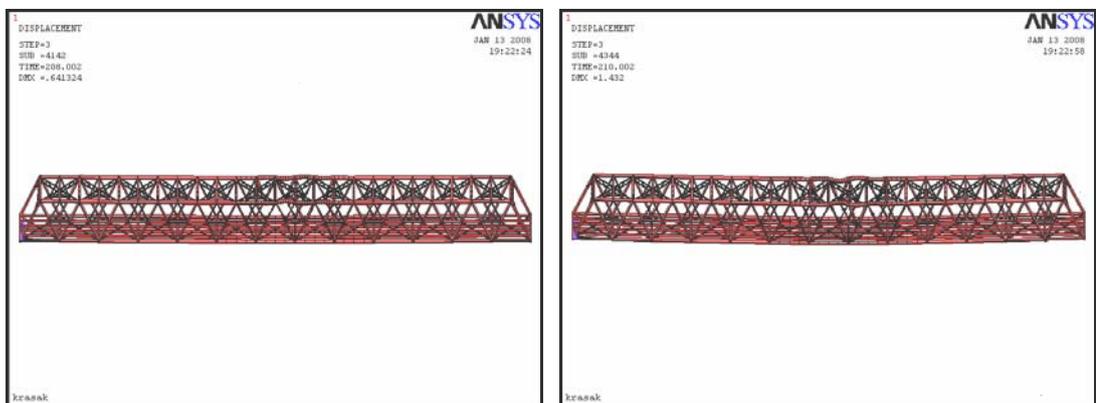


Gambar 4.37. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-213 dan Menit ke-214 (3Dimensi-2)

#### 4.1.4.4. Model 3 Dimensi-3

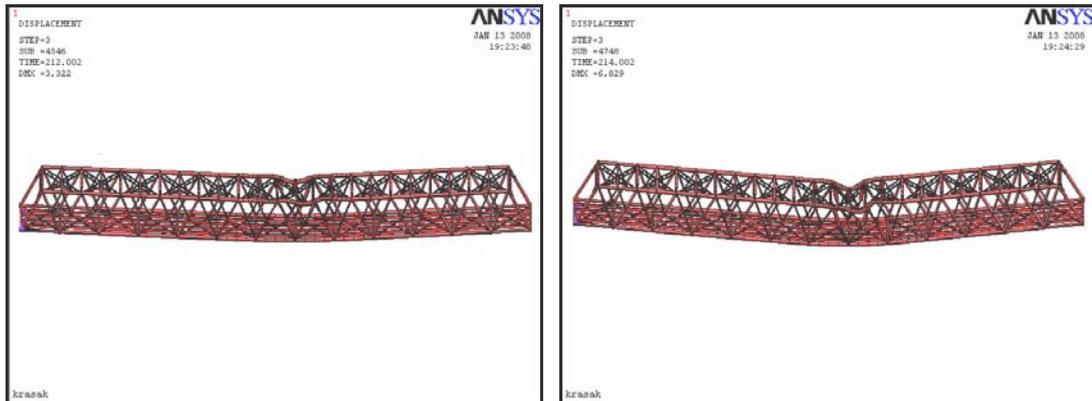
Seperti pada model sebelumnya pada model ini pun saat-saat keruntuhan Jembatan Krasak dapat dilihat dengan jelas semenjak perhitungan menit ke-208 hingga menit ke-220. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.38 – 4.41:

Pada menit ke-208 ( $T = 1104,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-210 ( $T = 1107,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



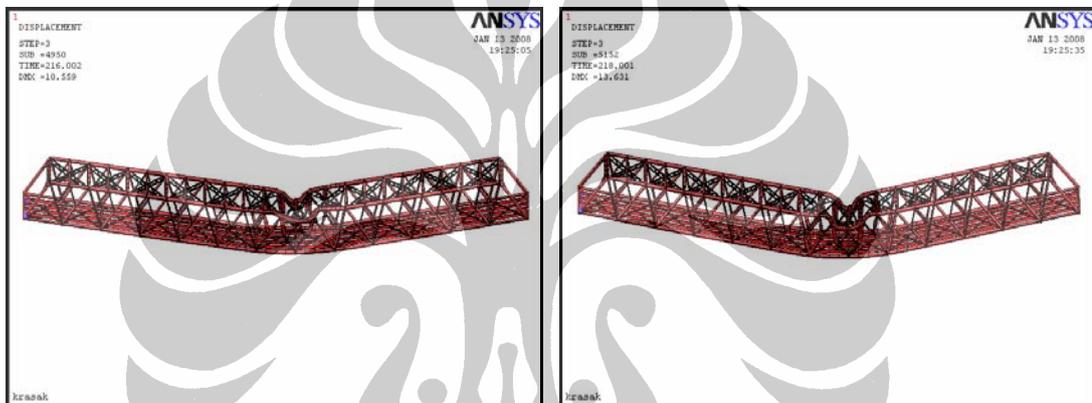
Gambar 4.38. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-208 dan Menit ke-210 (3Dimensi-3)

Pada menit ke-212 ( $T = 1111,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-214 ( $T = 1114,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



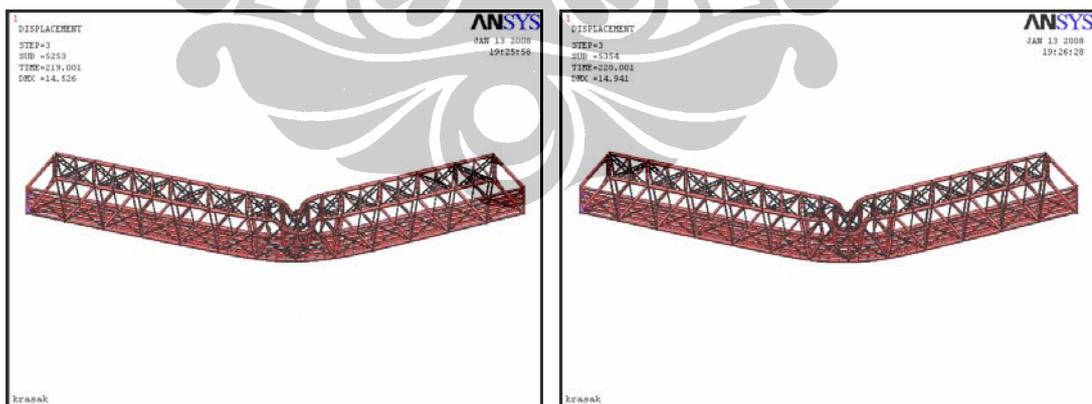
**Gambar 4.39. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-212 dan Menit ke-214 (3Dimensi-3)**

Pada menit ke-216 ( $T = 1117,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-218 ( $T = 1120,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



**Gambar 4.40. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-216 dan Menit ke-218 (3Dimensi-3)**

Pada menit ke-219 ( $T = 1122,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) dan menit ke-220 ( $T = 1124,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

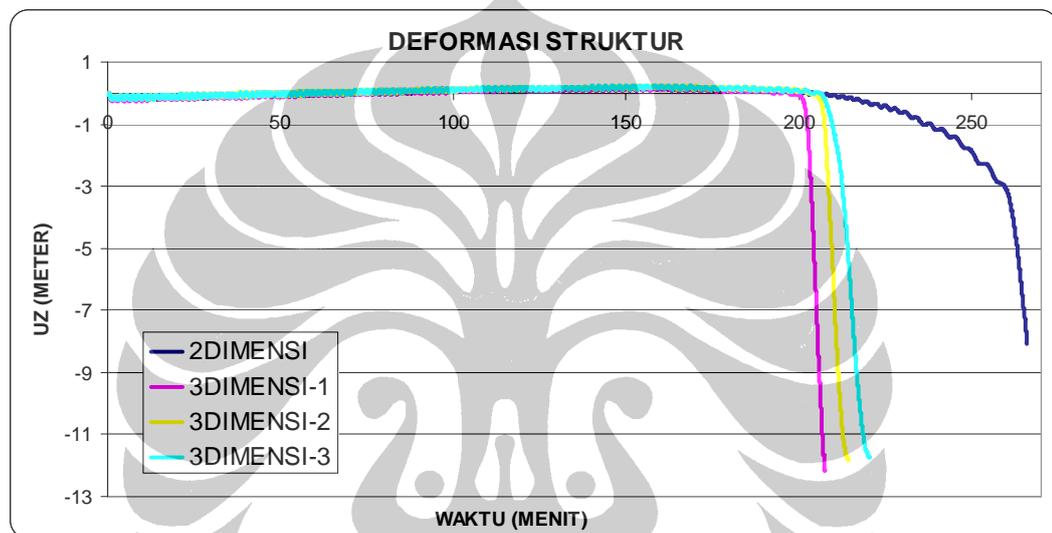


**Gambar 4.41. Kondisi Jembatan Krasak pada Menit ke-219 dan Menit ke-220 (3Dimensi-3)**

## 4.2. ANALISA HASIL SIMULASI

### 4.2.1.1. Analisa Deformasi

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, dalam analisa hasil simulasi ini akan dibandingkan hasil simulasi dari setiap model. Dalam subbab ini, pembahasan akan difokuskan pada deformasi hasil simulasi. Perbandingan deformasi struktur yang terjadi terhadap ketiga model (2D, 3D1, 3D2, dan 3D3) dapat dilihat pada Gambar 4.42.



Gambar 4.42. Perbandingan Deformasi 2D, 3D1, 3D2, dan 3D3

Dalam grafik tersebut, dapat dilihat secara langsung bahwa Model 2D lebih stabil dari Model 3D. Hal ini terlihat dari deformasi yang terjadi pada Model 2D terjadi lebih lama dari Model 3D. Dalam grafik juga terlihat bahwa deformasi yang terjadi tidak langsung berupa penurunan struktur. Hal ini dapat dipastikan dari garis pada grafik yang melebihi nilai nol.

Apabila Gambar 4.42 tersebut ditabulasikan seperti terlihat pada Tabel 4.1, maka akan terlihat jelas bahwa kenaikan tersebut terjadi sampai pada sekitar menit ke-160, atau kira-kira pada suhu 990 °C. Pada waktu tersebut, tercatat kenaikan yang terjadi mencapai nilai 0,195 m (2D); 0,218 m (3D1), 0,247 m (3D2), dan 0,246 m (3D3). Apabila dibandingkan dengan deformasi awal struktur yang terjadi pada suhu 30 °C, maka total perpindahan yang terjadi mencapai 0,42 m untuk Model 2D, dan 0,43 m untuk Model 3D. Hal ini dapat dikatakan cukup

besar, mengingat nilai tersebut setara dengan 0,42 % bentang keseluruhan struktur jembatan (104 m). Kecepatan dari kenaikan struktur tersebut mencapai nilai 0,0026 m/menit atau 0,00042 m/°C. Pada suhu 990 °C ini modulus elastisitas baja bernilai sekitar ±37234 MPa. Nilai modulus elastisitas tersebut setara dengan 18,61% dari modulus elastisitas awal baja.

Tabel 4.1. Perbandingan Deformasi 2D, 3D1, 3D2, dan 3D3 (meter)

| Suhu | Waktu | 2D       | 3D1      | 3D2      | 3D3      |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 30   | 1     | -0.22484 | -0.20893 | -0.17946 | -0.1758  |
| 100  | 16    | -0.15114 | -0.07556 | -0.05255 | -0.03963 |
| 200  | 32    | -0.09007 | -0.17972 | -0.14181 | -0.09416 |
| 300  | 48    | -0.03933 | -0.01008 | 0.01099  | -0.09885 |
| 400  | 64    | -0.008   | 0.0236   | 0.03932  | -0.03263 |
| 500  | 80    | 0.00754  | 0.00952  | 0.00178  | 0.07508  |
| 600  | 96    | 0.03383  | 0.00371  | 0.06379  | 0.13445  |
| 700  | 112   | 0.08285  | 0.10485  | 0.15497  | 0.19436  |
| 800  | 128   | 0.14246  | 0.05903  | -0.11249 | 0.13313  |
| 850  | 136   | 0.11612  | 0.14681  | 0.20542  | 0.20077  |
| 900  | 144   | 0.15295  | 0.2024   | 0.23299  | 0.22756  |
| 950  | 152   | 0.18615  | 0.20827  | 0.23465  | 0.23462  |
| 1000 | 160   | 0.195    | 0.218    | 0.247    | 0.246    |
| 1025 | 164   | 0.15035  | 0.20198  | 0.24348  | 0.20071  |
| 1050 | 175   | 0.11508  | 0.17818  | 0.21158  | 0.19861  |
| 1075 | 190   | 0.09076  | 0.01406  | 0.07866  | 0.09991  |
| 1100 | 205   | -0.05133 | -6.96267 | -0.07555 | 0.02329  |
| 1125 | 220   | -0.30223 | -12.1602 | -11.8224 | -11.7165 |
| 1150 | 236   | -1.02351 | -12.1602 | -11.8224 | -11.7294 |
| 1175 | 251   | -2.08991 | -12.1602 | -11.8224 | -11.7294 |
| 1200 | 266   | -8.09677 | -12.1602 | -11.8224 | -11.7294 |

Pada Gambar 4.32, dapat terlihat bahwa penurunan struktur secara cepat mulai terjadi pada sekitar menit ke-190, atau ±1075 °C. Pada suhu tersebut, besar modulus elastisitas baja ( $E_s$ ) adalah ±18616 MPa. Nilai tersebut setara dengan 9,3% dari nilai modulus elastisitas awal. Sedangkan pada deformasi maksimum, nilai modulus elastisitas dari Model 2D adalah 60,56 MPa (0,31%  $E_s$  awal), sedangkan pada Model 3D yaitu ±6205,64 MPa (3,1%  $E_s$  awal). Turunnya nilai modulus elastisitas ini akan mengakibatkan turunnya tegangan kritis tekuk dari batang profil baja yang mengalami kenaikan suhu. Dilihat dari prosentase penurunan modulus elastisitas, maka nilai tegangan tekuk kritis pun akan turun sebesar 99,68% untuk Model 2D, dan 96,9% untuk Model 3D. Angka-angka

tersebut mengindikasikan bahwa Model 2D lebih stabil karena tidak adanya pengaku arah transversal seperti pada Model 3D.

Kestabilan Model 2D juga terlihat dari waktu keruntuhannya. Waktu yang dibutuhkan oleh Model 2D untuk mencapai deformasi maksimumnya yaitu sebesar 76 menit, sedangkan Model 3D membutuhkan waktu sekitar 17 menit (3D1), 24 menit (3D2) dan 30 menit (3D3). Selain itu, dapat disimpulkan bahwa waktu keruntuhan yang mendekati nilai yang disebutkan oleh saksi mata adalah pada Model 3D. Sehingga Model 3D lebih merepresentasikan kondisi asli dari keruntuhan struktur Jembatan Krasak, terutama pada Model 3D3, dimana selain *slab* jalan beton, seluruh dimensi dan bentuk struktur jembatan dimodelkan mendekati kondisi aslinya.

Apabila melihat hasil data pada Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa pada deformasi awal Model 3D memiliki penurunan yang paling rendah dibandingkan dengan Model 2D. Dengan besar efek pengangkatan akibat penambahan temperatur yang hampir serupa, maka Model 2D yang memiliki deformasi awal lebih rendah akan menghasilkan nilai efek pengangkatan yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan Model 3D. Selain itu, dapat juga dilihat bahwa Model 2D dapat mencapai suhu maksimum, yaitu 1200 °C. Pada suhu tersebut, Model 2D memiliki nilai penurunan yang lebih rendah, yaitu 8,0968 m, dari Model 3D yang rata-rata hanya dapat mencapai suhu 1113,8 °C dengan penurunan rata-rata sebesar 11,9 m. Perbedaan suhu sebesar 86,2 °C (7,18 % dari suhu Model 2D) dan penurunan sebesar 3,803 m (47% dari penurunan Model 2D) tersebut mengindikasikan bahwa Model 2D lebih stabil dibandingkan dengan Model 3D. Jumlah batang profil yang lebih sedikit mengalami kenaikan temperatur akan membuat Model 2D tersebut lebih lama dalam mengalami keruntuhan. Analisa mengenai hal ini akan dibahas lebih lanjut dalam pembahasan berikutnya mengenai Analisa Keruntuhan Jembatan Krasak.

Selanjutnya apabila membandingkan hasil dari keseluruhan model 3 dimensi dari awal hingga suhu rata-rata 1113,8 °C, yang pada Tabel 4.1 tercatat pada suhu 1125 °C (Total ada 18 titik), maka dapat dilihat bahwa Model 3D1 memiliki 4 (22,2%) titik deformasi terbesar, Model 3D2 memiliki 7 (38,9%) titik, dan Model 3D3 memiliki 7 titik. Pada Model 3D1, titik tersebut terletak pada

suhu 30, 100, 200, dan 1125 °C. Sedangkan pada Model 3D2, titik tersebut terletak pada suhu 400, 850, 900, 950, 1000, 1025, dan 1050 °C. Untuk Model 3D3, titik pengamatan tersebut terletak pada suhu 300, 500, 600, 700, 800, 1075 dan 1100 °C. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa Model 3D1 memiliki kekakuan yang paling kecil diantara ketiga model 3 dimensi, hal ini ditandai dengan titik deformasi terbesarnya yang terletak pada deformasi awal dan deformasi akhir. Perbandingan deformasi Model 2D, 3D1, dan 3D2 dengan kondisi yang paling mendekati keadaan sebenarnya, yaitu 3D3, dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Perbandingan Deformasi 2D, 3D1, dan 3D2 terhadap 3D3

| Suhu (°C)        | Waktu (menit) | Prosentase |           |         |
|------------------|---------------|------------|-----------|---------|
|                  |               | 2D         | 3D1       | 3D2     |
| 30               | 1             | 127.89%    | 118.85%   | 102.08% |
| 100              | 16            | 381.35%    | 190.65%   | 132.58% |
| 200              | 32            | 95.66%     | 190.87%   | 150.61% |
| 300              | 48            | 39.79%     | 10.20%    | 11.12%  |
| 400              | 64            | 24.51%     | 72.34%    | 120.50% |
| 500              | 80            | 10.05%     | 12.69%    | 2.38%   |
| 600              | 96            | 25.16%     | 2.76%     | 47.44%  |
| 700              | 112           | 42.63%     | 53.95%    | 79.74%  |
| 800              | 128           | 107.01%    | 44.34%    | 84.50%  |
| 850              | 136           | 57.84%     | 73.12%    | 102.32% |
| 900              | 144           | 67.21%     | 88.94%    | 102.38% |
| 950              | 152           | 79.34%     | 88.77%    | 100.01% |
| 1000             | 160           | 72.16%     | 93.44%    | 101.66% |
| 1025             | 164           | 74.91%     | 100.63%   | 121.31% |
| 1050             | 175           | 57.94%     | 89.71%    | 106.53% |
| 1075             | 190           | 90.84%     | 14.07%    | 78.73%  |
| 1100             | 205           | 220.44%    | 29900.16% | 324.42% |
| 1125             | 220           | 2.58%      | 103.79%   | 100.90% |
| 1150             | 236           | 8.73%      | 103.67%   | 100.79% |
| 1175             | 251           | 17.82%     | 103.67%   | 100.79% |
| 1200             | 266           | 69.03%     | 103.67%   | 100.79% |
| <b>Rata-rata</b> |               | 79.66%     | 1502.87%  | 103.41% |

Tabel 4.2 diatas dan pola deformasi yang terjadi pada Model 2D mengindikasikan bahwa model tersebut dapat digunakan untuk menganalisa keruntuhan struktur Jembatan Krasak secara konservatif. Hal ini dapat dilihat dari perilaku strukturalnya yang menyerupai hasil pada Model 3D3. Akan tetapi hasil pada Model 2D kurang akurat apabila dibandingkan dengan Model 3D3. Untuk

itu, sebaiknya digunakan analisa secara 3 dimensi dengan kondisi semirip mungkin dengan kenyataannya.

#### 4.2.1.2. Analisa Hubungan Tegangan-Regangan

Kenaikan temperatur pada elemen yang ditinjau awalnya akan menyebabkan kenaikan tegangan, namun masih dengan tipe yang sama. Perilaku ini dapat dilihat pada Tabel 4.3, yaitu dengan membandingkan tegangan yang terjadi pada elemen 181 untuk Model 2D, yang setara dengan elemen 682 pada Model 3D.

Tabel 4.3. Perbandingan Tegangan 2D, 3D1, 3D2 dan 3D3 dengan Tegangan Tekuk

| Suhu (°C) | Waktu (menit) | Tegangan ( $kg/m^2$ ) |                 |                 |                 |            |
|-----------|---------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
|           |               | 2D                    | 3D1             | 3D2             | 3D3             | Tekuk      |
| 30        | 1             | -192043               | -228383         | -185233         | -189913         | -29770666  |
| 100       | 16            | -903882               | -700340         | -693512         | -609394         | -29770666  |
| 200       | 32            | -1502860              | -2114590        | -2021560        | -1812230        | -26510947  |
| 300       | 48            | -1999670              | -2166830        | -2174080        | -2802650        | -23532189  |
| 400       | 64            | -2591240              | -2865590        | -2902900        | -3291860        | -22042810  |
| 500       | 80            | -3157650              | -3865030        | -3966470        | -3637080        | -20553431  |
| 600       | 96            | -3592430              | -4753450        | -4543320        | -4247290        | -19064052  |
| 700       | 112           | -3793480              | -5008870        | -4824970        | -4711090        | -17574673  |
| 800       | 128           | -2606470              | -5150620        | -5086190        | -4511550        | -9234150.1 |
| 850       | 136           | -2829440              | -4208440        | -4313570        | -4324370        | -8310735.1 |
| 900       | 144           | -2710430              | -4128230        | -4104560        | -4590900        | -7387320   |
| 950       | 152           | -2592090              | -4137790        | -4171220        | -4563150        | -6463905   |
| 1000      | 160           | -2735730              | -4385430        | -3988320        | -4716590        | -5540490   |
| 1025      | 164           | -2750060              | -4439230        | -3957580        | -4555140        | -4617075   |
| 1050      | 175           | -2757990              | <b>-3771120</b> | <b>-3854790</b> | -3322210        | -3693660   |
| 1075      | 190           | -2663050              | -2608790        | -3108660        | -2471040        | -2770245   |
| 1100      | 205           | <b>-2771940</b>       | -1528240        | -2310480        | <b>-2348770</b> | -1846830   |
| 1125      | 220           | -2429090              | -1304640        | -1269850        | -1437560        | -923415.01 |
| 1150      | 236           | -2198240              | -1304640        | -1269850        | -283311         | -461707.5  |
| 1175      | 251           | -1863750              | -1304640        | -1269850        | -283311         | -230853.75 |
| 1200      | 266           | -2548500              | -1304640        | -1269850        | -283311         | -92341.501 |

Dari Tabel 4.3, dapat dilihat bahwa kenaikan tegangan terjadi sampai dengan menit ke-112, atau pada suhu berkisar antara 700 °C. Kenaikan tegangan yang terjadi mencapai 1975% untuk Model 2D, 2193% untuk Model 3D1, 2605% untuk Model 3D2 serta 2481% untuk Model 3D3. Apabila diambil nilai rata-rata, maka kenaikan tegangan tersebut mencapai 20,66%/menit ( $\pm 0,403 MPa/menit$ ), atau sama dengan 3,31%/°C ( $\pm 0,065 MPa/°C$ ).

Setelah mengalami kenaikan sekitar 23 kali lipat, tegangan tersebut terlihat mulai menurun kembali, yaitu mencapai nilai sekitar 13 kali lipat (2D), 5,7 kali lipat (3D1), 6,8 kali lipat (3D2) dan 7,6 kali lipat (3D3) apabila dibandingkan dengan tegangan awalnya. Nilai-nilai tersebut terjadi pada saat struktur mengalami deformasi maksimumnya.

Apabila tegangan yang terjadi pada elemen tersebut dibandingkan dengan tegangan kritis tekuk yang dihitung dengan Persamaan 2.8, maka dapat diambil beberapa kesimpulan. Pertama-tama, pada Tabel 4.3, dapat dilihat bahwa tegangan kritis tekuk ini dilampaui pada suhu 1100 °C untuk Model 2D dan 3D3, serta pada suhu 1050 °C untuk Model 3D1 dan 3D2. Peristiwa tekuk ini terjadi pada saat modulus elastisitas elemen tersebut bernilai 6,20%  $E_s$  awal untuk Model 2D dan 3D3, serta 12,41%  $E_s$  awal untuk Model 3D1 dan 3D2. Penurunan modulus elastisitas ini disertai dengan bertambahnya tegangan elemen yang mencapai rata-rata 1340% untuk Model 2D dan 3D3, serta 1866% untuk Model 3D1 dan 3D2. Apabila diambil rata-rata total, maka dapat disimpulkan bahwa kegagalan batang profil baja karena efek tekuk terjadi karena kenaikan tegangan sebesar 16,03 kali lipat, sedangkan modulus elastisitas turun hingga 90,7%.

Efek selanjutnya yang terjadi akibat tegangan pada elemen adalah regangan struktur. Efek regangan yang terjadi pada setiap model akan dibandingkan dan dianalisa. Perbandingan regangan elemen tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada Tabel 4.4 tersebut dapat dilihat bahwa regangan yang terjadi akan naik hingga mencapai rata-rata 40 kali lipat pada menit ke-112, atau pada suhu berkisar antara 700 °C. Kecepatan kenaikan regangan ini mencapai 35,7%/menit (0,017 mm/menit), atau 5,7%/°C (0,003 mm/°C). Kenaikan regangan ini kemudian semakin besar hingga mencapai rata-rata 147 kali lipat pada menit ke-198. Kecepatan kenaikan regangan pun akan naik hingga mencapai 124,4%/menit (0,059 mm/menit), atau 15,3%/°C (0,008 mm/°C). Apabila diperhatikan, penambahan kecepatan kenaikan tegangan hingga mendekati 3,5 kali lipat ini terjadi pada saat tegangan dari elemen tersebut mengalami penurunan.

Tabel 4.4. Perbandingan Regangan 2D, 3D1, 3D2 dan 3D3

| Suhu (°C) | Waktu (menit) | Regangan     |              |              |              |
|-----------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|           |               | 2D           | 3D1          | 3D2          | 3D3          |
| 30        | 1             | -9.47428E-06 | -1.12671E-05 | -9.1383E-06  | -9.3692E-06  |
| 100       | 16            | -4.72201E-05 | -3.65834E-05 | -3.62229E-05 | -3.18312E-05 |
| 200       | 32            | -0.000084429 | -0.000118792 | -0.000113607 | -0.00010183  |
| 300       | 48            | -0.000125225 | -0.000135671 | -0.000136122 | -0.000175526 |
| 400       | 64            | -0.000173028 | -0.000191346 | -0.000193832 | -0.000219714 |
| 500       | 80            | -0.000225725 | -0.000276203 | -0.000283539 | -0.000260053 |
| 600       | 96            | -0.000276346 | -0.000365605 | -0.000349529 | -0.000326692 |
| 700       | 112           | -0.00032009  | -0.000422718 | -0.000406114 | -0.000397607 |
| 800       | 128           | -0.000412232 | -0.000814607 | -0.000803981 | -0.000713637 |
| 850       | 136           | -0.00049548  | -0.000737411 | -0.00075588  | -0.000757815 |
| 900       | 144           | -0.000532088 | -0.000810489 | -0.000805802 | -0.000901208 |
| 950       | 152           | -0.000578281 | -0.000923487 | -0.000930252 | -0.00101752  |
| 1000      | 160           | -0.000706906 | -0.00113464  | -0.00103206  | -0.00121907  |
| 1025      | 164           | -0.000825531 | -0.00133126  | -0.00119064  | -0.0013672   |
| 1050      | 175           | -0.00109099  | -0.00149293  | -0.0015256   | -0.00131514  |
| 1075      | 190           | -0.00139978  | -0.00137224  | -0.00163399  | -0.00129997  |
| 1100      | 205           | -0.00216598  | -0.00119735  | -0.00181002  | -0.00184063  |
| 1125      | 220           | -0.00372973  | -0.00110855  | -0.000345713 | -0.0022076   |
| 1150      | 236           | -0.00702586  | -0.00110855  | -0.000345713 | -0.000437007 |
| 1175      | 251           | -0.0118355   | -0.00110855  | -0.000345713 | -0.000437007 |
| 1200      | 266           | -0.0402874   | -0.00110855  | -0.000345713 | -0.000437007 |

Hal lain yang terlihat dalam Tabel 4.4 adalah bahwa kenaikan suhu tidak menyebabkan elemen dari batang profil ini mengalami perpanjangan, melainkan mengalami perpendekan yang besar. Pada deformasi akhir (saat terjadi keruntuhan), regangan yang terjadi mencapai  $-0,0402$  ( $-203 \text{ mm}$ ) untuk Model 2D,  $-0,0011$  ( $-5,56 \text{ mm}$ ) untuk Model 3D1,  $-0,0018$  ( $-9,11 \text{ mm}$ ) untuk Model 3D2, dan  $-0,0022$  ( $-11,14 \text{ mm}$ ) untuk Model 3D3. Apabila diambil nilai rata-rata, maka regangan yang terjadi mencapai  $-0,0402$  untuk Model 2D dan  $-0,0017$  untuk Model 3D. Dapat dilihat bahwa regangan yang terjadi pada Model 2D lebih besar 24 kali lipat apabila dibandingkan dengan regangan rata-rata pada Model 3D. Hal ini diperkirakan disebabkan karena tidak tersedianya batang pengaku transversal atas pada Model 2D.

Perbandingan tegangan dan regangan pada Model 2D, 3D1, dan 3D2 dengan kondisi yang paling mendekati keadaan sebenarnya, yaitu 3D3, dapat dilihat pada Tabel 4.5. Pada Tabel 4.5 tersebut, dapat disimpulkan pula bahwa model tersebut dapat digunakan untuk menganalisa keruntuhan struktur Jembatan Krasak secara konservatif. Hal ini dapat dilihat dari perilaku strukturalnya yang

menyerupai hasil pada Model 3D3. Akan tetapi hasil pada Model 2D kurang akurat apabila dibandingkan dengan Model 3D3. Untuk itu, sebaiknya digunakan analisa secara 3 dimensi dengan kondisi semirip mungkin dengan kenyataannya.

**Tabel 4.5. Perbandingan Tegangan dan Regangan 2D, 3D1, dan 3D2 terhadap 3D3**

| Suhu (°C)        | Waktu (menit) | Prosentase Tegangan |                |                | Prosentase Regangan |                |               |
|------------------|---------------|---------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|---------------|
|                  |               | 2D                  | 3D1            | 3D2            | 2D                  | 3D1            | 3D2           |
| 30               | 1             | 101.12%             | 120.26%        | 97.54%         | 101.12%             | 120.26%        | 97.54%        |
| 100              | 16            | 148.32%             | 114.92%        | 113.80%        | 148.35%             | 114.93%        | 113.80%       |
| 200              | 32            | 82.93%              | 116.68%        | 111.55%        | 82.91%              | 116.66%        | 111.57%       |
| 300              | 48            | 71.35%              | 77.31%         | 77.57%         | 71.34%              | 77.29%         | 77.55%        |
| 400              | 64            | 78.72%              | 87.05%         | 88.18%         | 78.75%              | 87.09%         | 88.22%        |
| 500              | 80            | 86.82%              | 106.27%        | 109.06%        | 86.80%              | 106.21%        | 109.03%       |
| 600              | 96            | 84.58%              | 111.92%        | 106.97%        | 84.59%              | 111.91%        | 106.99%       |
| 700              | 112           | 80.52%              | 106.32%        | 102.42%        | 80.50%              | 106.32%        | 102.14%       |
| 800              | 128           | 57.77%              | 114.17%        | 112.74%        | 57.76%              | 114.15%        | 112.66%       |
| 850              | 136           | 65.43%              | 97.32%         | 99.75%         | 65.38%              | 97.31%         | 99.74%        |
| 900              | 144           | 59.04%              | 89.92%         | 89.41%         | 59.04%              | 89.93%         | 89.41%        |
| 950              | 152           | 56.80%              | 90.68%         | 91.41%         | 56.83%              | 90.76%         | 91.42%        |
| 1000             | 160           | 58.00%              | 92.98%         | 84.56%         | 57.99%              | 93.07%         | 84.66%        |
| 1025             | 164           | 60.37%              | 97.46%         | 86.88%         | 60.38%              | 97.37%         | 87.09%        |
| 1050             | 175           | 83.02%              | 113.51%        | 116.03%        | 82.96%              | 113.52%        | 116.00%       |
| 1075             | 190           | 107.77%             | 105.57%        | 125.80%        | 107.68%             | 105.56%        | 125.69%       |
| 1100             | 205           | 118.02%             | 65.07%         | 98.37%         | 117.68%             | 65.05%         | 98.34%        |
| 1125             | 220           | 168.97%             | 90.75%         | 88.33%         | 168.95%             | 50.22%         | 15.66%        |
| 1150             | 236           | 775.91%             | 460.50%        | 448.22%        | 1607.72%            | 253.67%        | 79.11%        |
| 1175             | 251           | 657.85%             | 460.50%        | 448.22%        | 2708.31%            | 253.67%        | 79.11%        |
| 1200             | 266           | 899.54%             | 460.50%        | 448.22%        | 9218.94%            | 253.67%        | 79.11%        |
| <b>Rata-rata</b> |               | <b>185.85%</b>      | <b>151.41%</b> | <b>149.76%</b> | <b>719.24%</b>      | <b>119.93%</b> | <b>93.56%</b> |

#### 4.2.1.3. Analisa Keruntuhan Jembatan Krasak

Pada Model 2D, dapat terlihat dengan jelas bahwa keruntuhan yang terjadi diawali dengan kegagalan profil atas struktur jembatan dalam menahan besaran gaya yang terjadi, baik akibat beban gravitasi, ataupun akibat beban termal. Beban termal tersebut akan menyebabkan bertambahnya tegangan profil akibat efek perpanjangan elemen yang terkekang, sehingga tegangan akan meningkat dengan drastis seperti yang sudah dianalisa pada pembahasan sebelumnya. Bertambahnya tegangan pada profil tersebut disertai dengan berkurangnya kekuatan profil akan mempercepat proses keruntuhan.

Efek tekuk yang mulai terjadi pada batang tersebut mengakibatkan kemampuannya dalam menahan beban semakin menurun, hal ini mengakibatkan

berpindahannya beban yang seharusnya ditahan oleh profil tersebut kepada batang-batang profil di sekitarnya. Karena batang profil di sekitarnya juga mengalami hal yang sama, maka keseluruhan profil yang mengalami kenaikan temperatur seakan-akan menghilang, mengakibatkan fungsi utama batang-batang profil lain dalam membentuk satu kesatuan struktur jembatan rangka baja menghilang.

Seperti halnya pada analisa 2 dimensi, analisa dengan menggunakan model struktur secara 3 dimensi mengeluarkan output hasil yang berbeda jauh. Perbedaan dilihat terjadi pada batang pengaku transversal atas yang lebih dahulu mengalami efek tekuk, alih-alih batang rangka atas pada 2 dimensi. Keberadaan dari profil balok pembagi dan balok *stringer* tidak dapat berperan banyak dalam mengurangi efek keruntuhan Jembatan Krasak. Pada hasil antara 3D1, 3D2, dan 3D3 tidak terdapat proses yang berbeda jauh, bahkan terlihat cukup serupa. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua profil tersebut hanya berfungsi utama sebagai penahan struktur pelat jalan beton dan mentransfer beban pada struktur rangka yang terdapat di tiap sisinya.

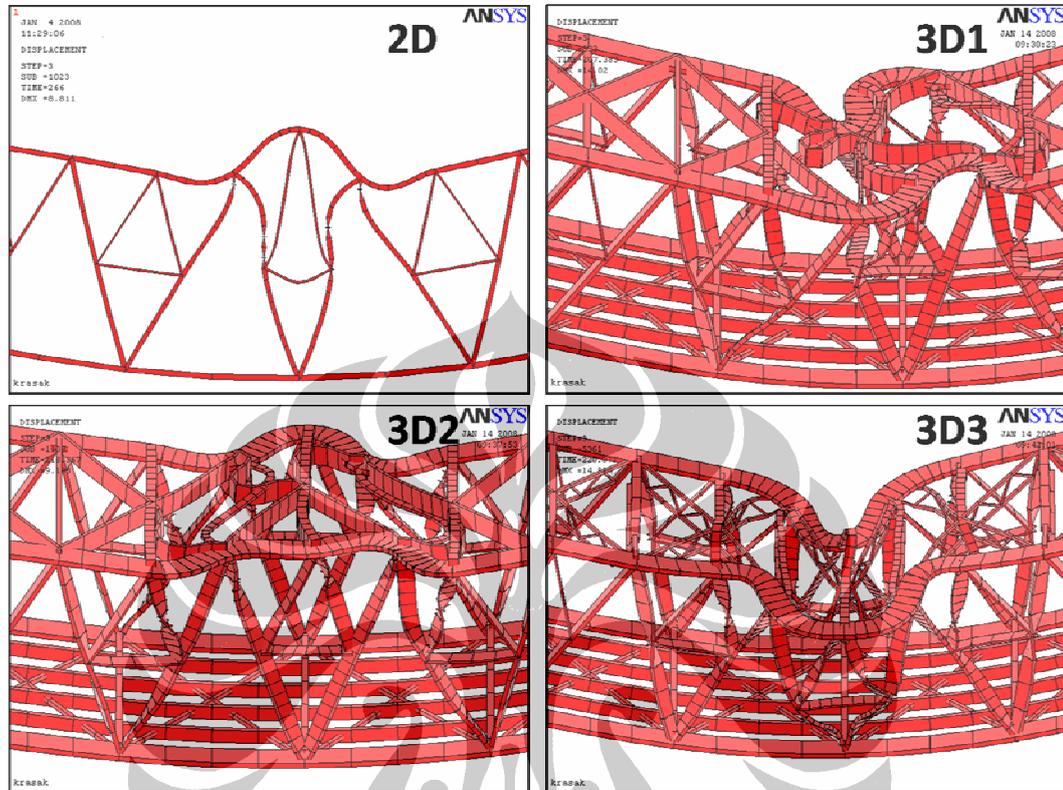
Hal lain yang terlihat dalam proses keruntuhan adalah efek rotasi yang terjadi pada batang profil diagonal yang mengalami kenaikan suhu. Hal ini diperkirakan terjadi akibat kombinasi antara efek tekuk dengan pengekangan pertambahan panjang dari batang profil tersebut

Selanjutnya, apabila melihat kondisi akhir sebenarnya dari Jembatan Krasak pada Gambar 4.43 berikut ini:



Gambar 4.43. Kondisi Jembatan Krasak Sebenarnya Pasca Kebakaran

Apabila kondisi sebenarnya tersebut dibandingkan dengan hasil pada keempat model yang disimulasikan, seperti terlihat pada Gambar 4.44 berikut ini:



Gambar 4.44. Perbandingan Kondisi Jembatan Krasak Hasil Simulasi

maka dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi pada Model 3D menyerupai kondisi sebenarnya, hal ini dapat dilihat dari posisi batang tegak diagonal yang mengalami tekuk, serupa dengan yang terjadi pada simulasi. Selain itu kondisi pengaku transversal atas pun serupa dengan keadaan sebenarnya. Kalaupun ada beberapa bentuk akhir yang berbeda dengan keadaan sebenarnya, hal ini diperkirakan terjadi karena pengaruh kekakuan sambungan yang tidak diperhitungkan atau didefinisikan dalam *input*. Karena itu, hal-hal yang dihasilkan oleh simulasi ini, baik langkah-langkah keruntuhan dan hubungan tegangan-regangan tiap batang profil struktur Jembatan Krasak, dapat dianggap sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan Model 2D untuk menganalisa perilaku struktur akibat kenaikan suhu kurang tepat untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan perilaku struktur yang terjadi pada Model 2D hanya

mendekati keadaan sebenarnya, baik nilai ataupun pola keruntuhannya, sampai pada keadaan sebelum runtuh, lebih tepatnya sampai sekitar menit ke-190, atau  $\pm 1075$  °C. Proses keruntuhan yang terjadi berbeda jauh dengan kondisi pada Model 3D. Hal ini diperkirakan disebabkan hilangnya sejumlah elemen yang mengalami kenaikan suhu pada Model 2D, yaitu pada pengaku transversal atas. Karena itu, penulis menyarankan bahwa analisa perilaku struktur terhadap kenaikan suhu sebaiknya dilakukan dengan Model 3D yang paling mendekati keadaan sebenarnya, atau apabila dibandingkan dengan simulasi ini, minimal menggunakan Model 3D2.

