



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH TEMPERATUR BETON MASSA
DENGAN KETEBALAN 4 METER
(Studi Kasus : *Raft Foundation* Rasuna Tower)**

SKRIPSI

**Melky Suryawijaya
0806329445**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH TEMPERATUR BETON MASSA
DENGAN KETEBALAN 4 METER
(Studi Kasus : *Raft Foundation Rasuna Tower*)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**Melky Suryawijaya
0806329445**

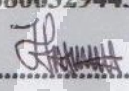
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Melky Suryawijaya

NPM : 0806329445

Tanda Tangan : 

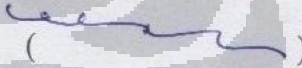
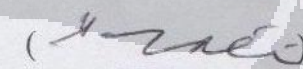
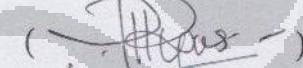
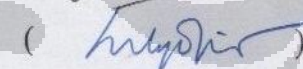
Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Melky Suryawijaya
Npm : 0806329445
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Tesis : Studi Pengaruh Temperatur Beton Massa Dengan
Ketebalan 4 Meter (Studi Kasus : *Raft Foundation*
Rasuna Tower)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Madsuri, M.T ()
Pembimbing : Ir. Sjahril A. Rahim, M. Eng ()
Penguji : Ir. Essy Ariyuni, M.Sc, Ph. D ()
Penguji : Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

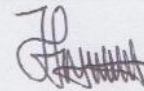
Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari awal perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Madsuri, M.T dan Ir. Sjahril A. Rahim, M. Eng, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA., Ir. Essy Ariyuni, M.Sc, Ph.D, dan Catharina Niken, selaku dosen yang telah memabantu dan menyediakan waktu untuk berdiskusi dalam penyusunan skripsi ini;
3. Bapak Steffie Tumilar, Bapak Iwan Supriyanto, Bapak Tri, Bapak Kenny, Bapak Mulyana, Bapak Hafidz, Bapak Reddy, Bapak Arda, dan Bapak Aries yang telah membantu dalam diskusi dan studi kasus *raft foundation* Rasuna Tower;
4. Sella Adinda Sesar dan Krisman Sinaga, selaku sahabat, rekan kerja, dan teman seperjuangan dalam menyelesaikan skripsi.
5. Kedua orang tua dan keluarga saya, yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
6. Listya Dharani, sahabat yang telah memberikan semangat dalam menyelesaikan skripsi;
7. Maisarah Rizky, Martina S.D Manurung, dan Yushak Moningka selaku sabahat yang telah bersama-sama dalam menyelesaikan skripsi;
8. Pak Apri dan karyawan laboratorium struktur dan material FTUI yang telah memberikan saran dan nasihat dalam menyelesaikan skripsi ini;
9. Teman-teman teknik sipil dan lingkungan 2008 yang telah memberikan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini;

10. Teman-teman KMBUI yang telah memberikan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini;
11. Seluruh sahabat di Departemen Teknik Sipil FTUI.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 4 Juli 2012



Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Melky Suryawijaya

NPM : 0806329445

Program Studi : Teknik Sipil

Departemen : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Studi Pengaruh Temperatur Beton Massa Dengan Ketebalan 4 Meter (Studi Kasus : Raft Foundation Rasuna Tower)

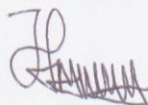
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 4 Juli 2012

Yang menyatakan



(Melky Suryawijaya)

ABSTRAK

Nama : Melky Suryawijaya
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Studi Pengaruh Temperatur Beton Massa Dengan Ketebalan 4 Meter (Studi Kasus : *Raft Foundation* Rasuna Tower)

Skripsi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur beton massa pada kedalaman 4 meter. Pengaruh temperatur yang diamati adalah temperatur puncak, perbedaan temperatur, dan tegangan. Pada umumnya, syarat batas temperatur puncak adalah $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan perbedaan temperatur $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kondisi tersebut diterapkan untuk kondisi kelembapan dan temperatur di Eropa. Perbedaan temperatur yang terjadi tergantung dari pengendalian temperatur yang dilakukan. Temperatur puncak yang terjadi $\pm 77.75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatur puncak yang terjadi tergantung dari *initial temperature* dan *mix design*. Tegangan yang terjadi dipengaruhi oleh perubahan temperatur pada nodal. Perubahan temperatur yang ekstrim dapat menimbulkan tegangan tarik yang melebihi kuat tarik *raft foundation*. Oleh karena itu diperlukan pengendalian temperatur permukaan dan bagian yang terkena udara. Pengendalian dapat dilakukan dengan lapisan insulasi.

Kata Kunci:

beton massa, perbedaan temperatur, *raft foundation*, temperatur puncak

ABSTRACT

Name : Melky Suryawijaya
Study Program : Civil Engineering
Title : Study of Temperature Influence of 4 Meters Thickness
Mass Concrete (Case Study : Raft Foundation Rasuna
Tower)

This final report aims to investigate the effect of 4 meter thickness mass concrete temperature. The observed temperature influence is peak temperature, temperature difference, and stress. In general, the peak temperature boundary condition is 70 °C and temperature difference is higher than 20 °C. These situations apply to the conditions of humidity and temperature in Europe. Temperature difference that occurs depends on the temperature control that is done. Peak temperature occurs in average 77.75 °C. Peak temperature depends on the initial temperature and mix design of concrete. Stress that occurs is influenced by the changes in the nodal temperatures. Extreme temperature changes can cause maximum tension that exceeds the tensile strength of the raft foundation. Therefore, there is the need to control the surface temperature and the air exposed side. Temperature control can be done with a layer of insulation.

Keyword:

mass concrete, peak temperature, raft foundation, temperature difference

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Penelitian	2
1.5 Hipotesis	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
2. DASAR TEORI.....	4
2.1 Beton Massa	4
2.2 Panas Hidrasi	4
2.2.1 Konduksi.....	6
2.2.2 Konveksi.....	6
2.2.3 Sifat – Sifat Beton Pada Panas Hidrasi	7
2.2.3.1 Rangkak.....	7
2.2.3.2 Susut	8
2.2.3.3 Elastisitas	8
2.3 Kenaikan Temperatur.....	8
2.4 <i>Thermal Cracking</i>	12
2.5 Metode Isolasi.....	16
2.6 <i>Precooling</i>	19
2.7 <i>Pipecooling (Embedded Pipe)</i>	20
2.8 Metode Prediksi Temperatur Beton Massa	20
2.8.1 Metode Portland Cement Association.....	21
2.8.1.1 Prediksi <i>Initial Temperature</i>	21
2.8.1.2 Penurunan <i>Initial Temperature</i>	21
2.8.1.3 Prediksi Temperatur Puncak.....	22
2.8.2 Metode U.S BUREAU OF RECLAMATION	22
2.8.2.1 Temperatur Maksimum Beton Massa (T_{max}).....	22
2.8.2.2 Kehilangan Temperatur (T_L)	24
2.8.2.3 Temperatur Akhir Beton (T_f).....	31
2.8.2.4 Perubahan temperatur (ΔT)	31
2.8.3 MIDAS GEN 2011.....	32
2.9 Penelitian Beton Massa	32

3. METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Studi Beton Massa (<i>Raft Foundation</i>).....	35
3.2 <i>Raft Foundation</i> Rasuna Tower.....	37
3.3 MIDAS GEN 2011.....	38
3.4 Penjadwalan Monitoring <i>Raft Foundation</i>	39
4. HASIL DAN ANALISA.....	41
4.1 Pendahuluan.....	41
4.2 Perhitungan Temperatur Beton Massa	41
4.2.1 Metode PCA	42
4.2.1.1 Penurunan <i>Initial Temperature</i>	43
4.2.2 Metode U.S Bureau of Reclamation	44
4.2.2.1 Temperatur maksimum.....	44
4.2.2.2 Temperatur Akhir Beton (T_f).....	55
4.2.3 Pemodelan MIDAS GEN 2011.....	56
4.2.3.1 Data Material	57
4.2.3.2 Pemodelan struktur.....	58
4.2.3.3 Hasil Temperatur Pemodelan Midas Gen 2011	60
4.3 Kenaikan Temperatur, Temperatur Puncak, dan Perbedaan Temperatur ..	62
4.3.2 Temperatur Puncak dan Kenaikan Temperatur	64
4.3.3 Perbedaan Temperatur.....	66
4.3.3.1 Perbedaan Temperatur Metode U.S Bureau of Reclamation ..	66
4.3.3.2 Pengukuran Lapangan dan Midas Gen 2011	68
4.4 Tegangan Tarik	74
4.5 Perbandingan Temperatur Ketebalan 4 meter dan 3 meter <i>Raft Foundation</i> Rasuna Tower	80
4.5.1 Kenaikan dan Perilaku Temperatur.....	82
4.5.2 Temperatur Puncak (Temperatur Tengah)	85
4.5.3 Tegangan <i>Raft Foundation</i> 3 dan 4 meter	87
4.6 Pengaruh Lapisan Insulasi	88
4.7 Perbandingan Temperatur Pengecoran <i>Raft</i> Dengan Mutu Beton $F_c' 35$ MPa Fly Ash Type F 30 % dan 15 %	92
5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	97
5.1 Kesimpulan.....	97
5.2 Saran.....	98
DAFTAR PUSTAKA.....	99
Lampiran A. Hasil Pengukuran Lapangan	100
Lampiran B. Hasil MIDAS GEN 2011	105
Lampiran C. Hasil Pengukuran dan MIDAS GEN 2011	110
Lampiran D. Tutorial Pemodelan <i>Raft Foundation</i> Rasuna Tower Dengan MIDAS GEN 2011.....	112
Lampiran E. Foto-foto <i>Raft Foundation</i> Rasuna Tower.....	126

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Effect of aggregate size and cement content on compressive strength at one year</i>	9
Gambar 2.2. Pengaruh pemakaian pozzolan terhadap temperatur	10
Gambar 2.3. <i>Temperature rise of concrete members containing 375 lbs of cement per cubic yard for different placing temperature</i>	11
Gambar 2.4. Alur <i>thermal cracking</i>	12
Gambar 2.5. Grafik hubungan $\varepsilon_s/\varepsilon_r$ untuk beton sebelum berumur 30 hari	15
Gambar 2.6. Grafik hubungan R dan $\varepsilon_s/\varepsilon_r$ untuk beton setelah berumur 30 hari	16
Gambar 2.7. Lapisan insulasi	17
Gambar 2.8. Diagram tegangan pengaruh lapisan insulasi	18
Gambar 2.9. Kenaikan temperatur setelah penutupan lapisan insulasi	19
Gambar 2.10. Pendinginan air pencampur	22
Gambar 2.11. Pemodelan kehilangan temperatur karena penguapan (T_{L1})	24
Gambar 2.12. Grafik hubungan $\eta = \frac{q}{c\rho DT_0}$ dengan harga $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$	26
Gambar 2.13. Pemodelan kehilangan temperatur karena udara luar	28
Gambar 2.14. Grafik hubungan $\frac{I}{\frac{D}{2h^2}}$ dengan harga $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$	30
Gambar 3.1. Skema dan prosedur penelitian	36
Gambar 3.2. Tahapan Analisa MIDAS GEN 2011	38
Gambar 3.3. Probe	39
Gambar 3.4. Temperatur indicator sumber AC	39
Gambar 3.5. Tabel monitoring temperatur	40
Gambar 4.1. Grafik panas hidrasi semen OPC	47
Gambar 4.2. Temperatur <i>raft foundation</i> metode U.S Bureau of Reclamation	56
Gambar 4.3. Struktur 6.2 x 6.2 x 6.2 m ³	58
Gambar 4.4. Struktur 4 m ³ + B tanah	59
Gambar 4.5. Pemodelan Raft Foundation	60
Gambar 4.6. Hasil Midas Gen 2011 TC 5 (6.2 x 6.2 x 6.2 m ³)	60
Gambar 4.7. Hasil MIDAS GEN 2011 TC 5 (Struktur 4 m ³ + B tanah)	61
Gambar 4.8. Hasil Midas Gen 2011 TC 5 (<i>raft foundation</i>)	61
Gambar 4.9. Lokasi TC 5, TC 6, TC 7, TC 8	62
Gambar 4.10. Instalasi thermocouple 3 dan 4 probe	63
Gambar 4.11. Hasil pengukuran lapangan dan MIDAS GEN 2011 (TC 5)	64
Gambar 4.12. Waktu metode buka tutup dapat dilakukan	65
Gambar 4.13. Perbedaan temperatur (ΔT) metode U.S Bureau of Reclamation	66
Gambar 4.14. Perbedaan temperatur Tengah – T_f TC 5	67
Gambar 4.15. Tahapan metode U.S Bureau of Reclamation	67
Gambar 4.16. Daerah diarsir (TC 5, 6, 7, dan 8) mengalami keterlamabatan pemasangan lapisan insulasi	68
Gambar 4.17. Pengaruh perbedaan temperatur	69
Gambar 4.18. Perbedaan temperatur TC 5	69
Gambar 4.19. Perbedaan temperatur TC 6	70
Gambar 4.20. Perbedaan Temperatur TC 8	70

Gambar 4.21. Perbedaan Temperatur TC 8	71
Gambar 4.22. Perbedaan temperatur TC 5 MIDAS GEN 2011	71
Gambar 4.23. Grafik pengukuran temperatur permukaan hasil pengukuran dan MIDAS GEN 2011	72
Gambar 4.24. Pengaruh temperatur udara terhadap temperatur permukaan.....	73
Gambar 4.25. Isobar tekanan vertikal yang didasarkan persamaan Boussinesq ...	74
Gambar 4.26. <i>Stress and allowable tensile stress</i> 4 m ³ + B.....	75
Gambar 4.27. <i>Stress and allowable tensile stress</i> TC 5.....	75
Gambar 4.28. <i>Stress and allowable tensile stress</i> TC 6.....	76
Gambar 4.29. <i>Prescribe condition</i> dan <i>thermal expansion coefficient concrete</i> dan <i>frame</i>	77
Gambar 4.30. Hasil temperatur dan tegangan simulasi beton massa dengan frame invar ($\alpha_c > \alpha_{invar}$).....	77
Gambar 4.31. Hasil temperatur dan tegangan simulasi beton massa dengan frame zinc ($\alpha_c < \alpha_{zinc}$)	77
Gambar 4.32. <i>Subsoil boundaries</i> (DX, DY, DZ).....	78
Gambar 4.33. <i>Symmetric boundary conditions</i> (DY)	79
Gambar 4.34. <i>Symmetric boundary conditions</i> (DX)	79
Gambar 4.35. <i>Symmetric boundary conditions</i> (DX, DY).....	80
Gambar 4.36. Gambar area 3 dan 4 meter	81
Gambar 4.37. Lokasi Thermocouple	81
Gambar 4.38. Temperatur permukaan TC 2, TC 3, TC 5, TC 12	82
Gambar 4.39. Temperatur tengah TC 2, TC 3, TC 5, TC 12	83
Gambar 4.40. Temperatur dasar TC 2, TC 3, TC 5, TC 12	83
Gambar 4.41. Lokasi TC 3 dan Skema aliran pelepasan panas TC 3.....	84
Gambar 4.42. Temperatur tengah TC 2, TC 3, TC 5, TC 7	85
Gambar 4.43. Temperatur tengah TC 11, TC 12, TC 5, TC 7	85
Gambar 4.44. Temperatur TC 5 (Tengah, Tambahan 1, Tambahan 2)	86
Gambar 4.45. <i>Stress and Allowable Tensile Stress Partial</i> 3 meter tepi	87
Gambar 4.46. Pemodelan TC 2 <i>Partial</i>	88
Gambar 4.47. Temperatur penutupan insulasi sesaat setelah pengecoran	90
Gambar 4.48. Temperatur penutupan lapisan insulasi 48 Jam setelah pengecoran	90
Gambar 4.49. Temperatur tanpa lapisan insulasi	91
Gambar 4.50. Perbandingan Temperatur Rasuna Tower Menteng Residence Ketebalan 4 meter	95
Gambar 4.51. Temperatur beton massa	96

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Standard requirements for portland cement</i>	5
Tabel 2.2. <i>Specific heat of hydration of individual compound of portland cement</i> .6	
Tabel 2.3. Pengaruh pemakaian Silika Fume dan GGBS terhadap panas hidrasi. 11	
Tabel 2.4. <i>Tensile strain capacity of concrete with different aggregates (ϵ_t)</i>	14
Tabel 2.5. <i>Recorded value of restraint (ϵ_r)</i>	14
Tabel 2.6. <i>Thermal expansion coefficient (α_c)</i>	14
Tabel 2.7. <i>Minimum periods of insulation to avoid excessive temperature differentials</i>	17
Tabel 3.1. Properti material <i>mix design</i>	37
Tabel 4.1. Temperatur dan jumlah material	42
Tabel 4.2. Temperatur, jumlah material, dan <i>crushed ice</i>	43
Tabel 4.3. Jumlah material dan <i>crushed ice</i>	45
Tabel 4.4. Perhitungan temperatur awal pembuatan beton (setelah pemakaian <i>crushed ice</i>)	46
Tabel 4.5. Kenaikan temperatur beton.....	50
Tabel 4.6. Kehilangan temperatur karena penguapan (T_{L1}).....	51
Tabel 4.7. Kehilangan temperatur karena udara luar (T_{L2}).....	53
Tabel 4.8. Kehilangan temperatur karena lapisan dibawahnya (T_{L3}).....	54
Tabel 4.9. Tempertur maksimum beton massa	55
Tabel 4.10. Material dan thermal properties	57
Tabel 4.11. Temperatur puncak PCA, MIDAS GEN 2011, hasil pengukuran lapangan	64
Tabel 4.12. Nomor thermocouple.....	82
Tabel 4.13. Tabel koefisien konveksi	89
Tabel 4.14. Material beton <i>raft</i> Rasuna Tower dan Menteng Residence	93
Tabel 4.15. Prediksi <i>initial temperature</i> , Tmaks Rasuna Tower dan Menteng Residence	94
Tabel 4.16. <i>Peak temperature</i> dan <i>Initial temperature</i> Menteng Residence dengan Rasuna Tower.....	94
Tabel 4.17. Selisih <i>Initial Temperature</i> dan <i>Peak Temperature</i> Menteng Residence dengan Rasuna Tower	95

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan gedung pencakar langit membutuhkan pondasi yang mampu menahan beban yang terjadi dan menyalurkan kedalam tanah. Jenis pondasi yang digunakan tergantung dari jenis tanah dan metode konstruksi. Penggunaan pondasi pada gedung-gedung pencakar langit memperhatikan waktu dan biaya, umumnya digunakan *raft foundation*. *Raft foundation* merupakan salah satu konstruksi dalam *mass concrete*. Penggunaan *raft foundation* dapat menghemat biaya, waktu, dan jumlah *joints*.

Penuangan beton dalam skala besar dapat menimbulkan masalah akibat kenaikan temperatur dan *thermal stress*. Kenaikan temperatur dapat disebabkan oleh beberapa parameter, parameter utama adalah panas hidrasi dari semen, parameter lain seperti waktu penuangan beton, suhu lingkungan, suhu agregat dan *aggregate coefficient of thermal expansion*. Peningkatan temperatur mengakibatkan perubahan volume, *thermal cracking*, dan dapat terjadinya *delay ettringite* yang dapat mengakibatkan kekuatan yang diinginkan tidak tercapai. Perbedaan temperatur memiliki ambang batas sebesar ± 20 °C dan temperatur puncak < 70 °C. Batasan temperatur puncak dan perbedaan temperatur mengacu pada kondisi Eropa sehingga tidak sepenuhnya dapat diterapkan untuk kondisi di Indonesia.

Konstruksi *Raft foundation* diperlukan perhatian khusus terhadap kenaikan temperatur. Semakin besar dan tebal *raft foundation* maka penggunaan semen semakin tinggi sehingga diperlukan pengontrolan terhadap panas hidrasi. Oleh karena itu, penelitian ini meninjau pengaruh dan perilaku temperatur yang terjadi terhadap ketebalan *raft foundation* dengan kondisi di Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Pengontrolan temperatur dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan terhadap beton. Perbedaan temperatur yang diperkenankan di Eropa untuk konstruksi beton massa memiliki ambang batas sebesar 20 °C untuk perbedaan temperatur dan temperatur puncak tidak melebihi 70 °C. Rumusan masalah yang harus dijawab dalam penelitian ini adalah pengaruh dan perilaku temperatur beton massa (*raft foundation*) terhadap kelembapan dan temperatur di Indonesia.

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan akademis dalam kurikulum Program Studi Teknik Sipil S1 Reguler Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Sedangkan tujuan khusus dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dan perilaku temperatur beton massa terhadap ketebalan dengan kondisi kelembapan dan temperatur di Indonesia. Pengaruh dan perilaku beton massa diamati terhadap konstruksi *raft foundation* dengan ketebalan 4 meter.

1.4 Batasan Penelitian

Pembahasan ini dibatasi pada pelaksanaan beton massa di Indonesia, dan hal-hal sebagai berikut :

- a. Struktur beton massa yang ditinjau adalah *raft foundation* dengan ketebalan 4 meter, $f_c' 35$ Mpa slump 14 ± 2 cm.
- b. Pengaruh yang ditinjau adalah kenaikan temperatur, temperatur puncak, perbedaan temperatur, dan tegangan yang terjadi.

1.5 Hipotesis

Temperatur maksimal beton massa pada suatu proyek *raft foundation* dengan mutu beton $F_c' 35$ MPa slump 14 ± 2 cm dengan ketebalan 4 meter tidak melebihi 90 °C dan perbedaan temperatur yang terjadi kurang dari 20 °C.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini dilakukan secara sistematis, adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- **BAB 1 : PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang uraian hal-hal umum mengenai penelitian ini, yaitu latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian, hipotesis, dan sistematika penulisan laporan.

- **BAB 2 : DASAR TEORI**

Bab ini berisi mengenai uraian penjelasan dasar teori, dasar analisis yang digunakan dalam penelitian, dan berbagai hal yang dapat menunjang penelitian ini berhasil.

- **BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang skema penelitian, prosedur penelitian, dan rencana monitoring temperatur *raft foundation*.

- **BAB 4 : HASIL DAN ANALISA**

Bab ini berisi hasil temperatur penelitian, hasil hitungan, dan hasil pemodelan MIDAS GEN 2011. Hasil tersebut dilakukan analisa terhadap pengaruh dan perilaku yang terjadi pada beton massa karena peningkatan temperatur yang dipengaruhi oleh ketebalan 4 meter terhadap kondisi kelembapan dan temperatur di Indonesia.

- **BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran yang didapatkan dari hasil dan analisa pada bab sebelumnya terkait dengan penelitian ini.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Beton Massa

Beton massa adalah beton dengan volume cukup besar sehingga diperlukan langkah-langkah untuk mengatasi peningkatan panas dari proses hidrasi semen dan perubahan volume yang dapat menyebabkan keretakan. Beton dengan ketebalan lebih besar dari 1 meter atau 3 *feet* diperlukan perhatian khusus terhadap perubahan temperatur. Beton massa berkembang dengan pesat pada tahun 1930-1970, perkembangan tersebut tidak lepas dari banyaknya konstruksi *dam* pada periode tersebut. Catatan konstruksi beton massa pada periode tersebut menunjukkan pengaruh hidrasi semen terhadap temperatur internal. Beton massa umumnya diaplikasikan untuk bendungan, tetapi suatu konstruksi dengan massa beton yang besar dapat dikategorikan sebagai beton massa, seperti *raft foundation*, *bridge piers*, *thick slabs*, dll.

Desain beton massa berdasarkan perubahan temperatur, *durability*, dan ekonomis, kekuatan tidak menjadi perhatian utama dalam desain beton massa. Perubahan temperatur menjadi perhatian utama karena perbedaan temperatur yang terlalu besar antara inti dengan permukaan dan dasar dapat menimbulkan tegangan internal beton. Tegangan yang terjadi dikhawatirkan melampaui kuat tarik beton, sehingga dapat menimbulkan retak. Temperatur puncak yang terjadi pada umur awal beton membutuhkan perhatian khusus, dimana temperatur puncak yang terlalu tinggi dapat menimbulkan *delay ettringite formation* (DEF) dan tidak tercapainya kekuatan beton massa.

2.2 Panas Hidrasi

Semen portland yang bercampur dengan air maka akan terjadi reaksi yang disebut proses hidrasi. Pada proses ini akan terjadi pelepasan panas yang disebut panas hidrasi.

Kemampuan suatu benda untuk melepaskan panas tergantung pada besarnya “Thermal Conductivity” dan volume benda tersebut, semakin besar volume semakin besar panas yang dihasilkan tetapi semakin lambat benda

tersebut melepaskan panas. Beton mempunyai sifat “Poor Thermal Conductivity” sehingga beton dengan volume yang besar memerlukan waktu yang relatif lama untuk melepaskan panas yang dikandungnya. Pada proses pelepasan panas, bagian permukaan beton akan lebih mudah melepaskan panas dibandingkan dengan bagian dalam. Hal ini mengakibatkan selalu terjadi perbedaan suhu antara beton bagian dalam dan bagian permukaan selama proses pelepasan panas berlangsung.

Semen portland memiliki komposisi kimia; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 , C_3A , C_3S , C_2S , dan C_3AF . Proporsi komposisi kimia yang tergantung dari jenis semen. Komposisi utama dari semen portland adalah C_3S , C_2S , C_3A dan C_3AF . Setiap komposisi utama kimia dalam semen portland memberikan kontribusi panas yang berbeda.

Tabel 2.1. *Standard requirements for portland cement*

Type of Cement	SiO_2 min	Al_2O_3 max	Fe_2O_3 max	SO_3 $\text{C}_3\text{A} < 8$	SO_3 $\text{C}_3\text{A} > 8$	C_3S max	C_2S min	C_3A max
Type I When Special properties specified for any other type are not required	-	-	-	3	3.5	-	-	-
Type II When moderate sulfate resistance or moderate heat of hydration is desired	20	6	6	3	-	58*	-	8
Type III When high early strength is desired	-	-	-	3.5	4.5	-	-	15
Type IV When low heat of hydration is desired	-	-	6.5	2.3	-	35	40	7
Type V When high sulfate resistance is desired	-	-	-	2.3	-	-	-	5

(Sumber : AASHTO, 2005)

Komposisi kimia setiap tipe semen berbeda-beda sehingga panas yang dihasilkan berbeda untuk setiap tipe semen. Tricalcium Silicate (C_3S) dan Tricalcium Aluminate (C_3A) menghasilkan panas lebih banyak dan lebih cepat terjadi proses hidrasi dibandingkan komposisi kimia yang lain. Jumlah pemakaian semen mempengaruhi panas yang dihasilkan, semakin banyak penggunaan semen semakin tinggi panas yang dihasilkan.

Tabel 2.2. *Specific heat of hydration of individual compound of portland cement*

Compound	Specific Heat of Hydration (cal/gr)
C ₃ S	120
C ₂ S	62
C ₃ A + gypsum	320
C ₃ AF	100

(Sumber : Canon, 1986)

2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas yang terjadi karena perubahan energi. Molekul dan elektron bergerak dari temperatur tinggi ke temperatur rendah, pergerakan tersebut menghasilkan benturan yang menimbulkan energi sehingga terjadinya perpindahan panas.

Menurut hukum Fourier :

$$Q_x = -KA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

dimana:

Q_x = kecepatan perpindahan panas

A = Luas

K = Konduksi termal

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = Gradient suhu kearah perpindahan panas konduksi

Pada umumnya konduksi termal yang diserap oleh beton adalah 1.21 – 3.11 kcal/h.m.°C.

2.2.2 Konveksi

Konveksi merupakan bentuk lain dari perpindahan panas dimana panas yang ditransmisikan antara fluida dan permukaan padat melalui gerak relatif molekul fluida.

$$Q = h_c(T - T_\infty) \quad (2.2)$$

Dari sudut pandang teknik, koefisien perpindahan panas, h_c ($\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$) didefinisikan untuk melambangkan perpindahan panas antara zat padat dan fluida, dimana T merupakan temperatur permukaan dari zat padat dan aliran fluida di permukaan memiliki temperatur T

Koefisien perpindahan panas bervariasi, tergantung dari bentuk geometri, zat cair, temperatur, dan berbagai karakter sistem yang terjadi secara konveksi.

2.2.3 Sifat – Sifat Beton Pada Panas Hidrasi

Setelah beton mulai mengeras, beton akan mengalami pembebanan dari berat sendiri dan beban luar. Pada beton akan terbentuk suatu hubungan tegangan dan regangan yang merupakan suatu fungsi dari waktu pembebanan.

2.2.3.1 Rangkak

Rangkak (*creep*) adalah besarnya regangan tambahan pada suatu struktur beton yang mengalami tegangan konstan, yang diukur dari regangan elastis sampai regangan yang terjadi pada saat tertentu. Jadi regangan rangkak merupakan regangan yang terjadi karena fungsi waktu, sedangkan tegangan yang terjadi pada struktur tersebut adalah konstan. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya deformasi rangkak adalah

- Pilihan bahan dasar seperti susunan dari semen, bahan campuran, ukuran susunan butir, dan isi zat-zat mineral dari agregat
- Proporsi, seperti kadar air dan perbandingan air semen
- Suhu dan derajat kebasahan sewaktu pengeringan beton.
- Kelembapan, selama penyimpanan
- Ukuran dari anggota struktur, khususnya tebal dan perbandingan volume terhadap permukaan
- Umur pada waktu pembebanan
- Nilai slump, dsb.

2.2.3.2 Susut

Pada dasarnya susut dibagi atas dua bagian, yaitu susut plastis dan susut pengeringan. Susut plastis adalah susut yang terjadi beberapa jam setelah beton segera dicor ke dalam acuan. Susut pengeringan adalah susut yang terjadi setelah beton mencapai bentuk akhir dan proses hidrasi semen telah selesai.

Susut biasanya dinyatakan dengan regangan susut (ε_{sh}) yang nilainya sangat bervariasi dan sangat bergantung pada bahan yang digunakan sebagai campuran beton dan perawatan beton itu sendiri.

2.2.3.3 Elastisitas

Beton menunjukkan sifat elastisitas murni pada waktu pembebanan singkat, sedangkan pada pembebanan yang tidak singkat beton akan mengalami regangan dan tegangan sesuai dengan lama pembebanannya. Modulus elastisitas bervariasi terhadap beberapa faktor, diantaranya adalah kekuatan beton, umur beton, sifat-sifat agregat dan semen. Modulus elastisitas juga bervariasi terhadap kecepatan pembebanan dan terhadap beberapa jenis beton.

2.3 Kenaikan Temperatur

Temperatur puncak terjadi pada minggu pertama setelah pengecoran. Faktor yang mempengaruhi kenaikan temperatur beton massa :

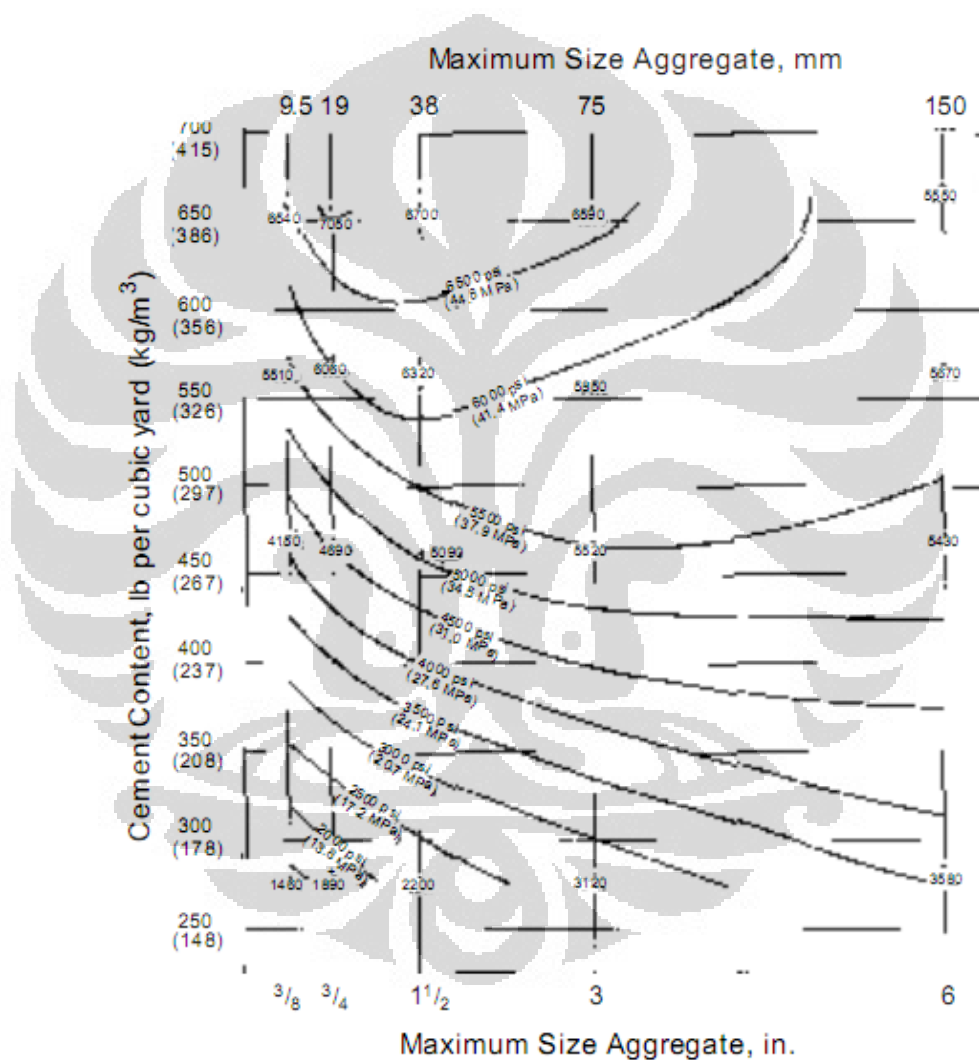
a. Semen

Faktor utama dari meningkatnya panas dari beton adalah semen. Jumlah pemakaian semen dan tipe semen berperan penting dalam peningkatan suhu beton massa. Semen memiliki panas hidrasi dan kecepatan reaksi (*reactive velocity coefficient*) yang berbeda, tergantung jenis semen dan komposisi semen. Jenis semen portland yang digunakan untuk konstruksi beton massa :

b. Gradasi agregat kasar

Secara teoritis, semakin besar ukuran maksimum agregat, semen kurang dibutuhkan dalam penggunaan beton dalam suatu volume tertentu untuk mencapai kualitas yang diinginkan. Namun, untuk mencapai efisiensi semen terbesar ada ukuran maksimum optimal untuk setiap tingkat kekuatan tekan, dapat dilihat dari gambar 2.1. Penggunaan ukuran butiran maksimum

dibatasi dengan penggunaan penulangan, jika suatu struktur *massive* tidak menggunakan penulangan dapat digunakan ukuran maksimum yang tidak terbatas. Penggunaan ukuran maksimum tergantung dari kekuatan desain, *batching plant*, pencampuran, pengangkutan, penempatan, dan mengkonsolidasikan beton. Partikel agregat besar yang bentuknya tidak beraturan cenderung mengakibatkan retak karena perubahan diferensial volume.



Gambar 2.1. *Effect of aggregate size and cement content on compressive strength at one year*

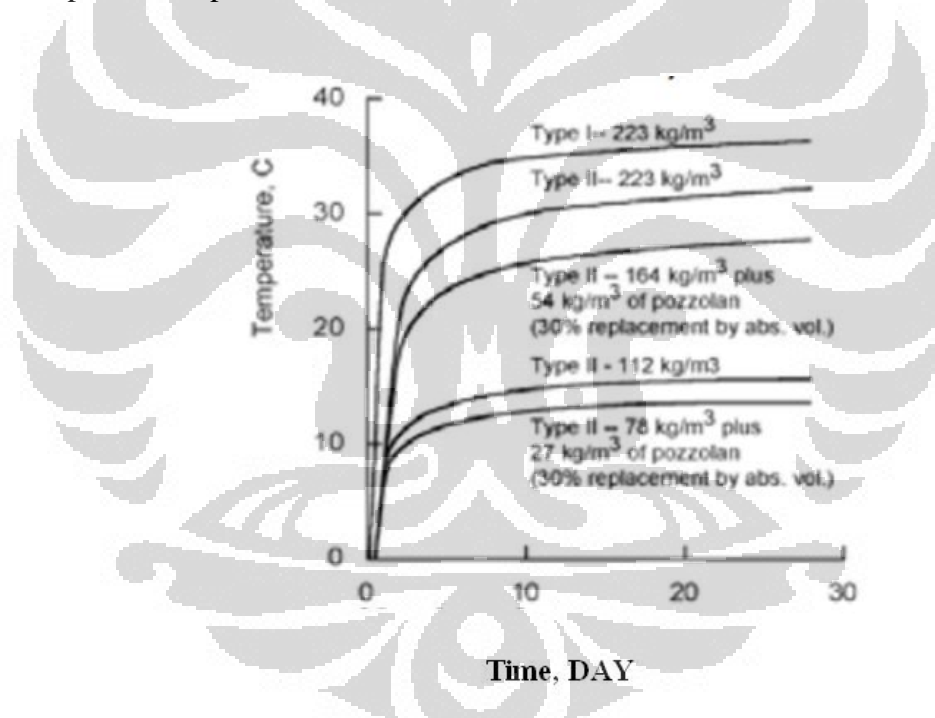
(Sumber : ACI Committee 207, 1996)

c. *Coarse Aggregate Coefficient of Thermal Expansion (CTE)*

Coefficient of Thermal Expansion dari agregat kasar adalah pengaruh utama CTE terhadap beton. Dengan menggunakan agregat kasar dengan CTE yang rendah dapat mengurangi tegangan akibat suhu.

d. *Supplementary Cementitious Materials (SCMs)*

SCMs seperti fly ash dan slag dapat mengurangi panas hidrasi. Fly ash adalah abu atau debu dari pembakaran batubara, fly ash sebagai pozzolan jika memiliki kadar karbon rendah dan kehalusan sama dengan semen. Fly ash tipe F lebih dapat mengurangi panas dari tipe C. Fly ash dan slag menghasilkan 15-50 % panas yang dihasilkan *Portland Cement* dengan jumlah yang sama. SCMs sejenis Silica Fume tidak berpengaruh terhadap penurunan panas hidrasi.



Gambar 2.2. Pengaruh pemakaian pozzolan terhadap temperatur

(Sumber : ACI Committee 207, 2002)

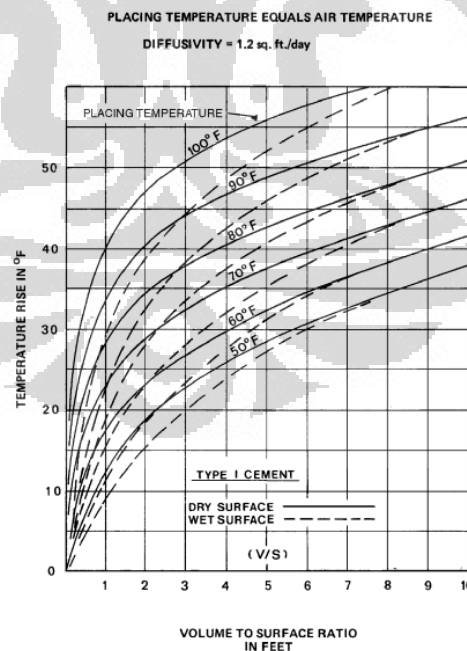
Tabel 2.3. Pengaruh pemakaian Silika Fume dan GGBS terhadap panas hidrasi

	Plain NPC	NPC/ microsilica	NPC/ microsilica/ggbs	Mortar mix
Time to reach peak temperature (minutes)	660	589	721	525
Peak temperature (°C)	91.7	89.2	81.9	59.1
Max. temperature rise (°C)*	69.6	63.2	54.9	31.4

(Sumber : ACI Committee 207, 2002)

e. Suhu Pengecoran (*initial temperature*)

Suhu beton pada saat pengecoran dipengaruhi suhu bahan untuk pembuatan beton. Pengecoran pada suhu rendah mengurangi tegangan yang terjadi akibat perubahan temperatur karena suhu pengecoran yang rendah mempengaruhi peningkatan suhu beton menjadi lebih lambat. Apabila suhu beton pada waktu pengecoran sudah tinggi, maka kenaikan suhu beton menjadi cepat dan *peak temperature* yang dicapai menjadi tinggi.



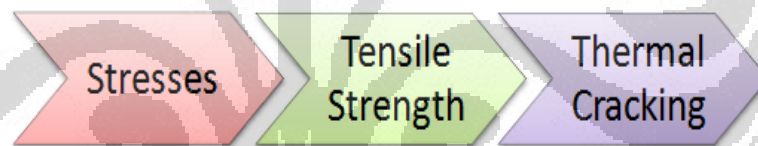
Gambar 2.3. Temperature rise of concrete members containing 375 lbs of cement per cubic yard for different placing temperature

(Sumber : ACI Committee 207, 2002)

2.4 Thermal Cracking

Beton menghasilkan panas dari proses hidrasi. Panas yang dihasilkan merambat keluar menuju ambient. Struktur dengan ketebalan kecil seperti perkerasan jalan, panas yang hilang hampir sama dengan panas yang dihasilkan sehingga temperatur pada beton dapat terkontrol. Sebaliknya, untuk struktur *massive* panas yang hilang relatif lambat dibandingkan panas yang dihasilkan sehingga terjadi peningkatan temperatur beton. Pengendalian suhu dalam beton sangat penting untuk mencegah terjadinya retak, *delay ettringite formations*, dan kerusakan lainnya.

Kenaikan suhu internal menyebar keseluruhan permukaan beton dan melepas panas ke lingkungan. Suhu pada permukaan beton massa lebih kecil dibandingkan dengan suhu inti karena berhubungan dengan suhu lingkungan. Perbedaan suhu yang besar menginduksi tekanan ke permukaan, jika tekanan yang terjadi melampaui kuat tarik beton maka dapat menimbulkan retak.



Gambar 2.4. Alur *thermal cracking*

(Sumber : Olahan sendiri)

Restraint yang terjadi ada 2 jenis : *internal restraint* dan *external restraint*. *Internal restraint* terjadi karena perbedaan temperatur inti (interior) dengan permukaan (eksterior) beton. Jika *tensile strength* permukaan beton yang terjadi karena ekspansi inti beton melebihi kuat tarik beton, kemungkinan retak semakin besar. *Internal restraint* juga dapat terjadi karena pengecoran terhadap beton lama, lapisan tanah, dll yang memiliki perbedaan temperatur.

External restraint dari perubahan temperatur dapat menyebabkan retak pada beton bertulang. Untuk mengurangi lebar dan kedalaman retakan yang terjadi pada beton massa dapat dikurangi dengan pendetailan tulangan pada beton massa.

Kondisi batas *thermal cracking* :

- Maksimum temperatur di setiap titik 70 °C
- Maksimum perbedaan temperatur 20 °C

Kondisi batas *thermal cracking* tersebut berdasarkan temperatur dan kondisi di Eropa, sehingga tidak dapat diterapkan secara penuh untuk temperatur dan kondisi di Indonesia. Batasan tersebut dapat menjadi pedoman untuk pembuatan beton massa di Indonesia.

Pendekatan sederhana untuk menentukan batas dari *thermal strain* yang dapat menyebabkan retak, berdasarkan pendekatan terhadap suhu dengan *thermal expansion* dari beton dan *restraint*, dimana :

Retak tidak terjadi pada kondisi

$$\varepsilon_r < \varepsilon_t$$

ε_r = *Thermal Strain*

ε_t = *Tensile Strain Capacity*

Tegangan tarik yang terjadi dapat diturunkan dari hukum *Hooke*:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon_r \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_r = K \alpha_c \Delta T R \quad (2.4)$$

dimana :

K = *modification factor* (0,8)

α_c = Koefisien *thermal expansion* beton

ΔT = Perubahan temperatur

R = *Restraint factor* (0 = *unrestrained*; 1 = *full restraint*)

Tabel 2.4. *Tensile strain capacity of concrete with different aggregates (ϵ_t)*

Aggregate type	Tensile strain capacity ($\times 10^{-6}$)
Gravel	70
Granite/crushed stone	80
Limestone	90
Lightweight aggregate	110

(Sumber : P.B Bamforth, 1984)

Tabel 2.5. *Recorded value of restraint (ϵ_r)*

Pour Configuration	Restraint, R
Thin wall cast onto massive concrete base	0,6 – 0,8 at base
	0,1 – 0,2 at top
Massive pour cast onto blinding	0,1 – 0,2
Massive deep pour cast onto existing mass concrete	0,3 – 0,4 at base
	0,1 – 0,2 at top
Suspended slabs	0,2 – 0,4
Infill bays i.e rigid restraint	0,8 – 1,0

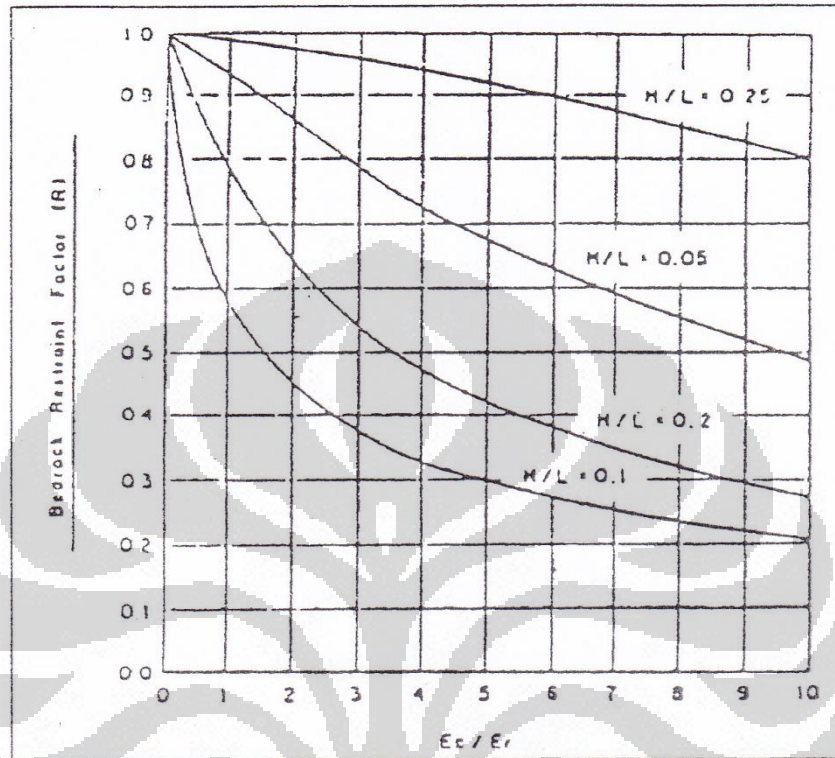
(Sumber : P.B Bamforth, 1984)

Tabel 2.6. *Thermal expansion coefficient (α_c)*

Aggregate Type	Thermal Expansion Coefficient (α_c) ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Gravel	12,0
Granite/crushed stone	10,0
Limestone	8,0
Lightweight aggregate	7,0

(Sumber : P.B Bamforth, 1984)

Restraint factor (R) merupakan derajat kelekatan.. Harga R dapat juga dicari dengan grafik dibawah ini :



Gambar 2.5. Grafik hubungan $\varepsilon_c/\varepsilon_r$ untuk beton sebelum berumur 30 hari
(Sumber : Madsuri, 2000)

Tegangan tarik yang terjadi dipengaruhi oleh:

- Tingkatan penahanan, dipengaruhi oleh derajat kelekatan sambungan antara beton dengan lantai pondasi atau beton dengan beton lain
- Elastisitas modulus beton dan elastisitas modulus lekatan lain
- Koefisien pengembangan panas (α_c)

Nilai E_e diberikan dengan persamaan dibawah:

$$E_e = \frac{E_c}{1 + 0.4 \frac{E_c}{E_r}} \quad (2.5)$$

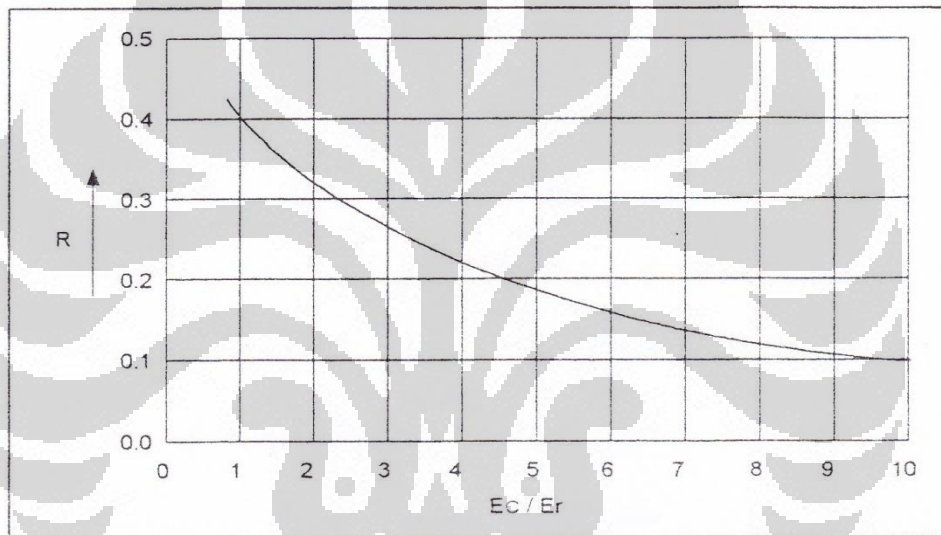
dimana :

E_c = Elastis modulus beton

E_r = Elastis modulus lantai kerja

E_e = Effektif elastis modulus antara beton massa dengan lekatan lain

Tegangan tarik yang paling besar terjadi pada beton massa yang berhubungan dengan lantai kerja. Hal ini dikarenakan perbedaan elastis modulus beton massa dan lantai kerja. Oleh karena itu pada permukaan pondasi yang berhubungan dengan lantai kerja harga derajat kelekatan (R) diambil sama dengan 1 (satu).



Gambar 2.6. Grafik hubungan R dan ϵ_c/ϵ_r untuk beton setelah berumur 30 hari

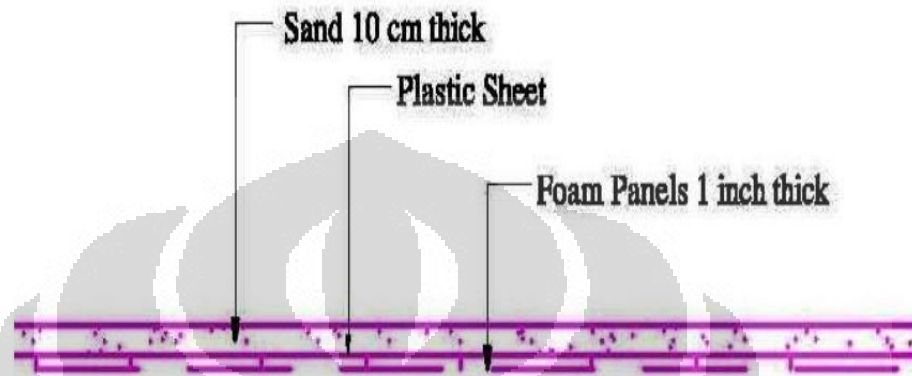
(Sumber : Madsuri, 2000)

2.5 Metode Isolasi

Beton massa dalam bekisting mengalami peningkatan suhu sebagai reaksi dari panas hidrasi semen. Umur awal beton massa mengalami peningkatan suhu yang tinggi. Beton massa dengan ketebalan $\geq 1,5$ meter mengalami kenaikan suhu mendekati kondisi adiabatik pada bagian inti. Lapisan Insulasi digunakan untuk meminimalkan perbedaan temperatur, perbedaan temperatur yang besar dapat menyebabkan keretakan.

Beberapa lapisan insulasi:

- Bekisting kayu dan baja
- Lapisan busa, styrofoam, dan sejenisnya
- Triplek, multiplek, dan sejenisnya



Gambar 2.7. Lapisan insulasi

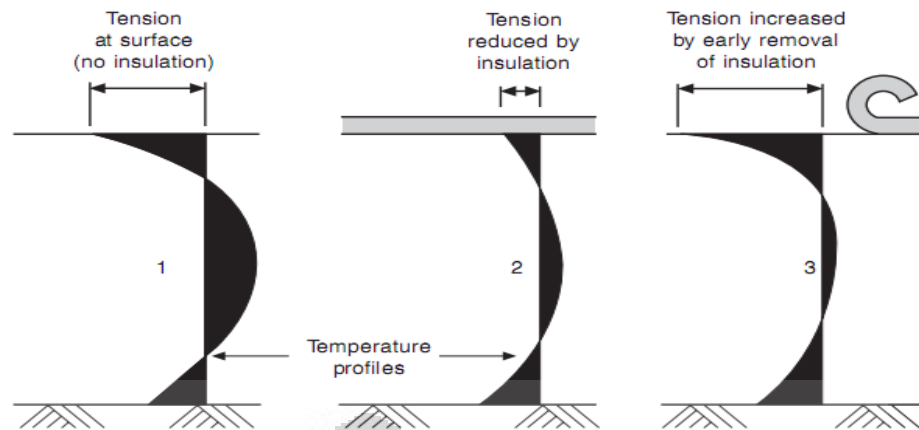
(Sumber : Pioneer Beton)

Metode isolasi dapat digunakan dengan penggabungan beberapa jenis bahan isolasi. Pelepasan terhadap lapisan insulasi permukaan perlu diperhatikan karena perbedaan suhu permukaan beton dengan ambient terlalu besar maka dapat dengan mudah mengalami keretakan.

Tabel 2.7. *Minimum periods of insulation to avoid excessive temperature differentials*

Minimum pour dimension (m)	Minimum period of insulation
0.5	3
1.0	5
1.5	7
2.0	9
2.5	11
4.5	21

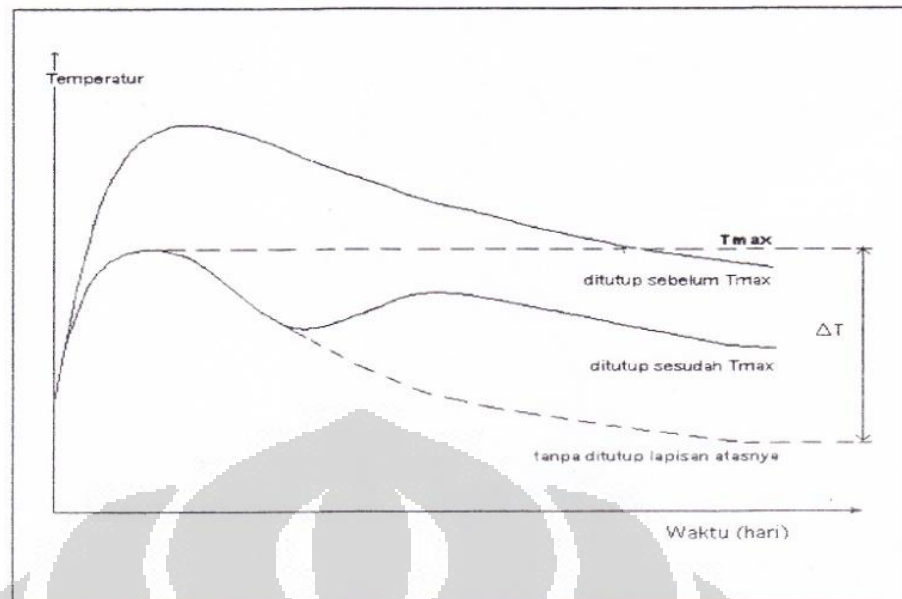
(Sumber : Newman, John; Ban Seng Choo, 2003)



Gambar 2.8. Diagram tegangan pengaruh lapisan insulasi

(Sumber : Newman, John; Ban Seng Choo, 2003)

Tegangan pada permukaan tanpa lapisan insulasi jauh lebih besar daripada tegangan dengan lapisan insulasi keadaan tersebut dapat menyebabkan *thermal cracking*. Tegangan yang besar pada permukaan tanpa lapisan insulasi terjadi karena perbedaan temperatur yang besar. Penggunaan lapisan insulasi mengurangi perbedaan temperatur antara inti terhadap permukaan atas dan dasar beton. Pelepasan lapisan insulasi diawal dapat menyebabkan “*thermal shock*” sehingga meningkatkan perbedaan temperatur yang besar antara permukaan dengan ambient dan dapat mengakibatkan tegangan menjadi besar sehingga dapat terjadi *thermal cracking*. Penggunaan lapisan insulasi dapat meningkatkan temperatur beton, dan apabila beton telah ditutup sebelum mencapai temperatur maksimal, maka temperatur yang terjadi jauh lebih besar dari temperatur maksimal.



Gambar 2.9. Kenaikan temperatur setelah penutupan lapisan insulasi
(Sumber : Madsuri, 2000)

2.6 Precooling

Salah satu yang berpengaruh dalam retak termal adalah pengontrolan suhu awal (*initial temperature*). *Initial temperature* semakin kecil maka terjadi penurunan *peak temperature*. Tujuan dari *precooling* adalah untuk mengontrol retak akibat perubahan temperatur. Dalam konstruksi beton massa perlu diketahui batas *peak temperature* sehingga dapat dikontrol *initial temperature* dalam mengendalikan *peak temperature*. Beberapa metode *precooling* yang diterapkan dalam konstruksi beton massa :

a. Air dingin

1 kg air dingin menyerap 4.18 kJ dimana temperatur meningkat 1 °C. Perubahan suhu air memberikan pengaruh terhadap suhu agregat. Air dingin ditambahkan dalam campuran beton sehingga mereduksi suhu awal beton.

b. Es (*Crushed ice*)

1 kg es dapat menyerap 334 kJ ketika es berubah menjadi air. Penggunaan es menjadi metode dasar yang efisien dalam menurunkan *placing temperature*. Penambahan es dalam air untuk pencampuran beton dapat mengurangi suhu air 3-4 °C/m³.

c. Pendinginan agregat

Agregat kasar dan halus memiliki komposisi terbesar dalam beton massa. Suhu agregat memiliki pengaruh terbesar pada suhu beton. Untuk mencapai *initial temperature* rencana diperlukan penurunan suhu agregat. Penyemprotan air secara berkala setiap 30 menit pada agregat kasar, 2 jam sebelum pengecoran.

d. Liquid nitrogen

Penurunan *initial temperature* lebih dari 20 °F, metode efektif adalah dengan menggunakan Liquid Nitrogen (LN₂). *Precooling* dengan Liquid Nitrogen dilakukan dengan cara injeksi kedalam *truck mixer*.

2.7 Pipecooling (Embedded Pipe)

Pipecooling merupakan pengendalian suhu yang efektif dengan sirkulasi cairan dingin melalui pipa berdinding tipis yang tertanam dalam beton. *Pipecooling* dilakukan beberapa hari atau sebulan. Setelah pelepasan *pipecooling* belum diijinkan untuk dilakukan *grouting* karena suhu beton kemungkinan dapat meningkat kembali. Jika suhu beton meningkat kembali, penggunaan *pipecooling* kembali perlu dilakukan sampai suhu beton massa relatif stabil. Setelah metode *pipecooling* selesai, beton massa diinjeksi (*grouting*). *Pipecooling* terbuat dari aluminium atau pipa tipis sejenis aluminium dengan diameter luar 25.4 mm dan ketebalan 1.5 mm. Pipa plastik dan PVC tidak dapat digunakan sebagai *embedded pipe* karena suhu beton yang tinggi dapat merusak jenis pipa tersebut.

2.8 Metode Prediksi Temperatur Beton Massa

Selama bertahun-tahun, banyak dikembangkan metode-metode sederhana untuk memprediksi temperatur pada beton massa. Dengan kemajuan teknologi, prediksi temperatur beton massa dapat menggunakan pemrograman computer, seperti MIDAS CIVIL, MIDAS GEN, dll Dalam konstruksi beton massa kontraktor wajib menyerahkan prediksi suhu beton massa dan rencana dalam mengontrol suhu beton massa.

2.8.1 Metode Portland Cement Association

Metode PCA dapat digunakan apabila :

- Temperatur pengecoran diatas 12 °C untuk setiap 100 kg semen
- Metode PCA sesuai untuk beton yang mengandung 300 – 600 kg/m³
- Metode PCA cocok untuk semua semen portland (ASTM C150)

Kelemahan metode PCA :

- Metode PCA tidak dapat memprediksi waktu temperatur puncak terjadi
- Metode PCA tidak dapat memprediksi perbedaan temperatur dan kehilangan panas yang terjadi

2.8.1.2 Prediksi *Initial Temperature*

$$T_i = \frac{0.22 (T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c + T_{fa} \cdot W_{fa}) + T_w \cdot W_w + T_{wa} \cdot W_{wa}}{0.22 (W_a + W_c + W_{fa}) + W_w + W_{wa}} \quad (2.6)$$

dimana :

T_i : *Initial Concrete Temperature*

T_a : *Aggregate Temperature*

T_c : *Cement Temperature*

T_{fa} : *Fly Ash Temperature*

T_w : *Water Temperature*

T_{wa} : *Water in Aggregate Temperature*

W_a : *Mass of Aggregate*

W_c : *Mass of Cement*

W_{fa} : *Mass of Fly Ash*

W_w : *Mass of Water*

W_{wa} : *Mass of Water in Aggregate* (kandungan air yang diserap agregat)

2.8.1.3 Penurunan *Initial Temperature*

a. Penggunaan ES (*Crushed ice*)

$$T_i = \frac{0.22 (T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c + T_{fa} \cdot W_{fa}) + T_w \cdot W_w + T_{wa} \cdot W_{wa} - 112W_i}{0.22 (W_a + W_c + W_{fa}) + W_w + W_{wa} + W_i} \quad (2.7)$$

dimana :

W_i = *mass of ice*

b. Penurunan temperatur air dan agregat

Temperatur air pencampur diturunkan dengan memasukkan balok es kedalam *batch water*. dan menyiram agregat kasar dan halus dengan air dingin.



Gambar 2.10. Pendinginan air pencampur

(Sumber : Pioneer Beton)

2.8.1.4 Prediksi Temperatur Puncak

Prediksi temperatur puncak dengan menggunakan formula dari *Portland Cement Association*.

$$T_{max} = T_i + 12 \left(\frac{W_c}{100} \right) + 6 \left(\frac{W_{scm}}{100} \right) \quad (2.8)$$

dimana :

T_i = Temperatur awal beton ($^{\circ}\text{C}$)

W_c = Kandungan semen (kg)

W_{fa} = Kandungan fly ash (kg)

2.8.2 Metode U.S BUREAU OF RECLAMATION

Perubahan temperatur pada beton massa dipengaruhi oleh 2 hal, yaitu :

- a. Temperatur maksimum beton massa (T_{max})
- b. Kehilangan temperatur (*Temperature Loss*)

2.8.2.2 Temperatur Maksimum Beton Massa (T_{max})

Temperature maximum yang dapat dicapai oleh beton massa dipengaruhi oleh 3 (tiga) hal yaitu:

- a. Temperatur beton pada waktu pembuatan (T_p)

$$T_p = \frac{\sum(H_i \times T_i)}{\sum H_i} \quad (2.9)$$

$$H_i = W_i \times C_i \quad (2.10)$$

dimana :

T_p = Temperatur pembuatan beton ($^{\circ}\text{C}$)

H_i = Kapasitas panas dari material-material beton ($\text{Kcal}/\text{m}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

W_i = Berat material beton (kg/m^3)

C_i = Panas Spesifik ($\text{Kcal}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$)

T_i = Temperatur material beton sebelum pencampuran ($^{\circ}\text{C}$)

- b. Kenaikan temperatur beton yang disebabkan panas hidrasi semen (T_t)

$$T_t = T_o (1 - e^{-mt}) \quad (2.11)$$

$$T_o = \frac{W_c \times Q_u}{C \times \rho} \quad (2.12)$$

$$Q_t = Q_u (1 - e^{-mt}) \quad (2.13)$$

dimana:

T_t = Kenaikan temperatur beton yang terjadi karena panas hidrasi semen

T_o = Total kenaikan temperatur beton yang terjadi selama proses pengerasan beton

m = konstanta

t = umur beton setelah pengecoran

W_c = Berat kandungan semen per- m^3 beton (kg/m^3)

C = panas spesifik beton ($\text{Kcal}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$)

ρ = kerapatan beton (kg/m^2)

Q_t = Panas yang ditimbulkan oleh panas hidrasi semen pada umur t hari (Kcal/kg)

c. Pengangkutan dan Pematatan ($T_{transport}$)

Didalam cuaca yang sangat panas $\pm 30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$, disebabkan karena penyinaran matahari, selama pengangkutan temperatur beton akan bertambah ($2 - 4^{\circ}\text{C}/\text{jam}$)

Jadi temperatur maximum (T_{max}) beton massa :

$$T_{max} = T_p + T_t + (T_{transport}) \quad (2.14)$$

$$T_{max} = T_i + T_t \quad (2.15)$$

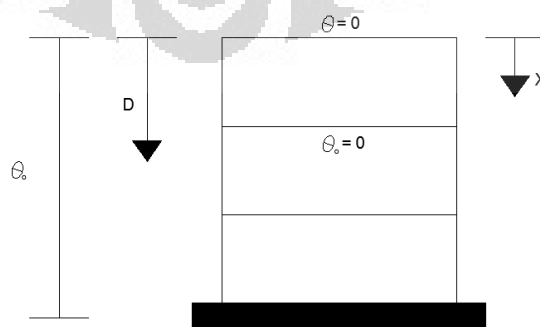
2.8.2.3 Kehilangan Temperatur (T_L)

Selama pengerasan beton massa, sebagian panas yang ditimbulkan oleh panas hidrasi semen akan hilang. Kehilangan temperatur beton massa dapat digolongkan dalam 3 (tiga) macam, yaitu kehilangan temperatur karena penguapan (T_{L1}), kehilangan temperatur karena udara luar (T_{L2}), dan kehilangan temperatur karena lapisan dibawahnya (T_{L3}).

$$T_L = T_{L1} + T_{L2} + T_{L3} \quad (2.16)$$

a. Kehilangan temperatur karena penguapan (T_{L1})

Kehilangan temperatur karena penguapan terjadi selama proses pengerasan dari beton massa. Sebagai idealisasi dari problem diatas adalah menganggap sebuah lapisan dengan ketebalan D mempunyai temperatur awal (θ_0), ditambah dengan panas hidrasi semen, dan mempunyai temperatur permukaan atas nol ($\theta = 0$). Jika pengecoran untuk keseluruhan tinggi berawal pada temperatur nol ($\theta_0 = 0$)



Gambar 2.11. Pemodelan kehilangan temperatur karena penguapan (T_{L1})

(Sumber : Olahan sendiri)

dimana:

θ_o = Temperatur awal

D = Ketebalan lapisan

x = jarak dari permukaan ke kedalaman titik yang ditinjau

t = Waktu

h = Diffusivity

Panas yang timbul karena panas hidrasi semen mengikuti persamaan :

$$T_t = T_o(1 - e^{-mt}) \quad (2.17)$$

Untuk pertambahan temperatur sebesar (d_{Tt}) dengan penambahan waktu sebesar (d_t), persamaan diatas dapat diturunkan menjadi :

$$d_{Tt} = T_o m e^{-mt} dt \quad (2.18)$$

Sehingga dengan demikian temperatur menjadi :

$$T_t = \int T_o m e^{-mt} dt \quad (2.19)$$

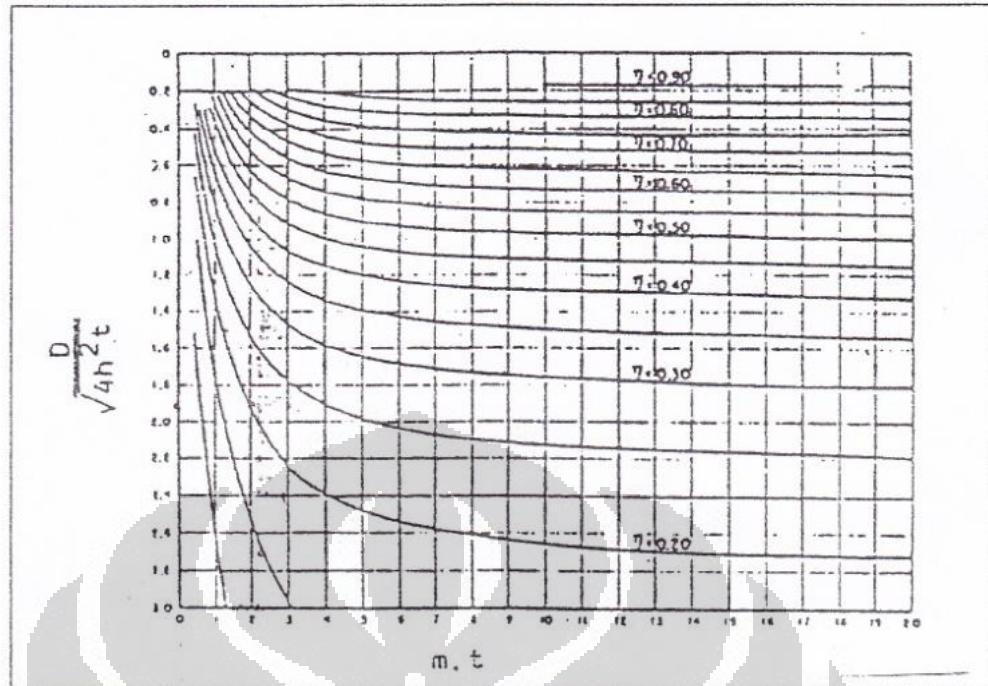
Kehilangan temperatur karena penguapan pada prinsipnya sama dengan kehilangan temperatur karena udara luar dengan tambahan pengaruh dari panas hidrasi semen, sehingga persamaan diatas dapat disubstitusikan ke dalam persamaan dibawah, sehingga :

$$q_1 = \frac{2KT_o m}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left[\sqrt{\frac{t}{h^2}} - I \right] e^{-mt} dt \quad (2.20)$$

Grafik kenaikan temperatur dan kehilangan temperatur tidak terjadi secara bersamaan, untuk membedakan kedua grafik tersebut diperkenalkan satu variabel waktu yaitu variasi λ . Dengan demikian integrasi berada dalam batas $\lambda = 0$ ke $\lambda = t$ dan kehilangan temperatur mulai diperhitungkan setelah $t-\lambda$, sehingga persamaan diatas menjadi:

$$q_1 = \frac{2KT_o m}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left[\sqrt{\frac{t-\lambda}{h^2}} - I \right] e^{-mt} dt \quad (2.21)$$

Persamaan diatas tidak dapat diselesaikan dengan mudah, sehingga untuk mempermudah penyelesaian persamaan tersebut dipergunakan integrasi numerik dengan aturan Simpsom dengan menggunakan grafik dibawah :



Gambar 2.12. Grafik hubungan $\eta = \frac{q}{c\rho DT_o}$ dengan harga $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$

(Sumber : U.S. Bureau of Reclamation, 1951)

Dengan demikian dapat ditentukan besarnya kehilangan temperatur karena penguapan :

$$T_{L1} = \frac{q_1}{c \cdot \rho \cdot D} \quad (2.22)$$

atau

$$T_{L1} = \eta T_o \quad (2.23)$$

dimana

T_{L1} = Kehilangan temperatur karena penguapan

η = Ratio of heat loss ($\eta = \frac{q_1}{c\rho DT_o}$, didapat dari grafik diatas)

b. Kehilangan temperatur karena udara luar (T_{L2})

Kehilangan temperatur yang terjadi karena panas yang hilang (q_2) disebabkan perbedaan antara temperatur beton massa dengan temperatur udara rata-rata. Kehilangan panas dapat diselesaikan dengan integral dasar untuk konduktivitas panas dengan syarat awal dan syarat batas :

$$\begin{aligned}\theta &= 0 & \text{untuk } 0 < x < D & & \text{ketika } t = 0 \\ \theta &= \theta_0 & \text{untuk } 0 > D & & \text{ketika } t = 0 \\ \theta &= 0 & \text{untuk } x = 0 & & \text{ketika } t > 0\end{aligned}$$

Solusi yang memenuhi syarat awal dan syarat batas :

$$\theta = \frac{2\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta + \frac{\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{D-x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta - \frac{\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{D+x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta \quad (2.24)$$

Temperatur permukaan ($x = 0$) dengan waktu (t), didapat dengan menurunkan persamaan diatas terhadap x sehingga didapat gradient temperatur pada permukaan :

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{2\theta_0}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{-D^2}{\sqrt{4h^2t}} \right] \quad (2.25)$$

Total panas yang hilang (q_2) per-satuan luas permukaan untuk waktu (t) adalah :

$$q_2 = \int_0^t K \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} dt = \frac{2K\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left[\frac{-D^2}{\sqrt{4h^2t}} \right] dt \quad (2.26)$$

Hasil integrasi q_2

$$q_2 = \frac{2K\theta_0}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{\frac{t}{h^2}} - I \right] \quad (2.27)$$

dengan I berdasarkan grafik sebelumnya, sehingga dapat ditentukan besarnya kehilangan temperatur karena udara luar adalah sebagai berikut:

$$T_{L2} = \frac{q_2}{c \cdot \rho \cdot D} \quad (2.28)$$

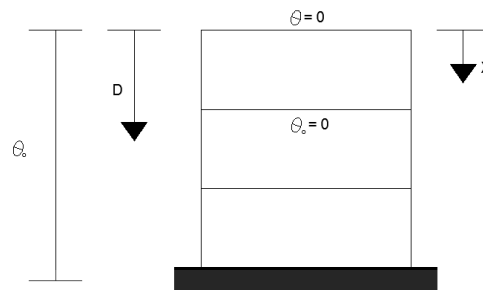
- c. Kehilangan temperatur karena lapisan dibawahnya (T_{L3})

Kehilangan temperatur yang terjadi karena panas yang hilang disebabkan perbedaan temperatur antara temperatur pengecoran beton massa dengan temperatur beton (*lean concrete*) dibawahnya dirumuskan dari persamaan differential dasar untuk hantaran panas dalam satu dimensi.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2.29)$$

Sebagai idealisasi dari problem ini adalah diasumsikan keseluruhan tebal lapisan yang telah dicor mempunyai temperatur awal yang seragam (θ_0),

kemudian menganggap temperatur awal lapisan yang paling atas nol ($\theta_o = 0$), dan temperatur permukaan paling atas nol ($\theta = 0$).



Gambar 2.13. Pemodelan kehilangan temperatur karena udara luar

(Sumber : Olahan sendiri)

dimana:

θ_o = Temperatur awal

D = Ketebalan lapisan

x = jarak dari permukaan ke kedalaman titik yang ditinjau

t = Waktu

h = Diffusivity

Syarat awal dan syarat batas yang memenuhi idealisasi tersebut adalah :

$$\theta = 0 \quad \text{untuk} \quad 0 < x < D \quad \text{ketika} \quad t = 0$$

$$\theta = \theta_o \quad \text{untuk} \quad 0 > D \quad \text{ketika} \quad t = 0$$

$$\theta = 0 \quad \text{untuk} \quad x = 0 \quad \text{ketika} \quad t > 0$$

solusi persamaan yang memenuhi syarat awal dan syarat batas :

$$\theta = \frac{\theta_o}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{D+x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta - \frac{\theta_o}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{D-x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta \quad (2.30)$$

Temperatur permukaan ($x = 0$) dengan waktu (t), didapat dengan menurunkan persamaan diatas terhadap x sehingga didapat gradient temperatur pada permukaan :

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{2\theta_o}{\sqrt{\pi}} \frac{-D^2}{\sqrt{4h^2t}} \quad (2.31)$$

Total panas yang hilang (q_1) per-satuan luas permukaan untuk waktu (t) adalah :

$$q_3 = \int_0^t K \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} dt = \frac{2K\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{D^2}{4h^2 t}}}{\sqrt{4h^2 t}} dt \quad (2.32)$$

dimana K = Konduktivitas beton

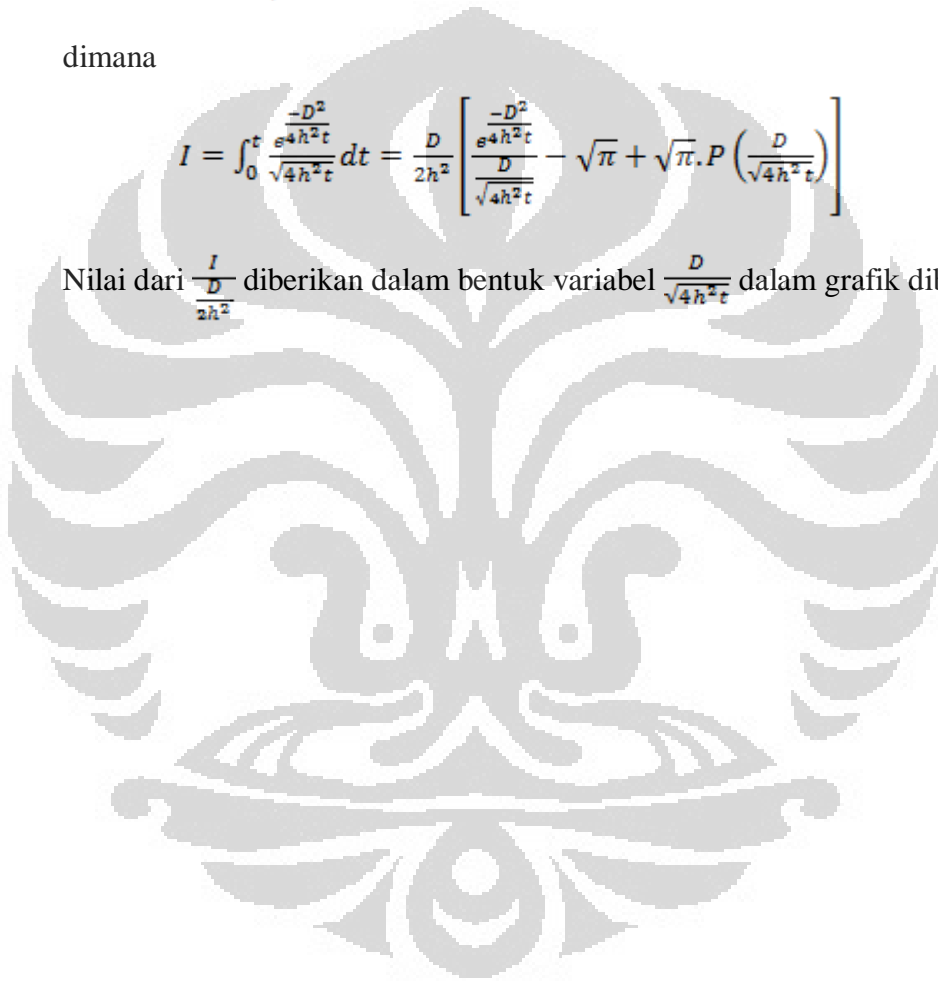
Persamaan diatas dapat ditulis sebagai

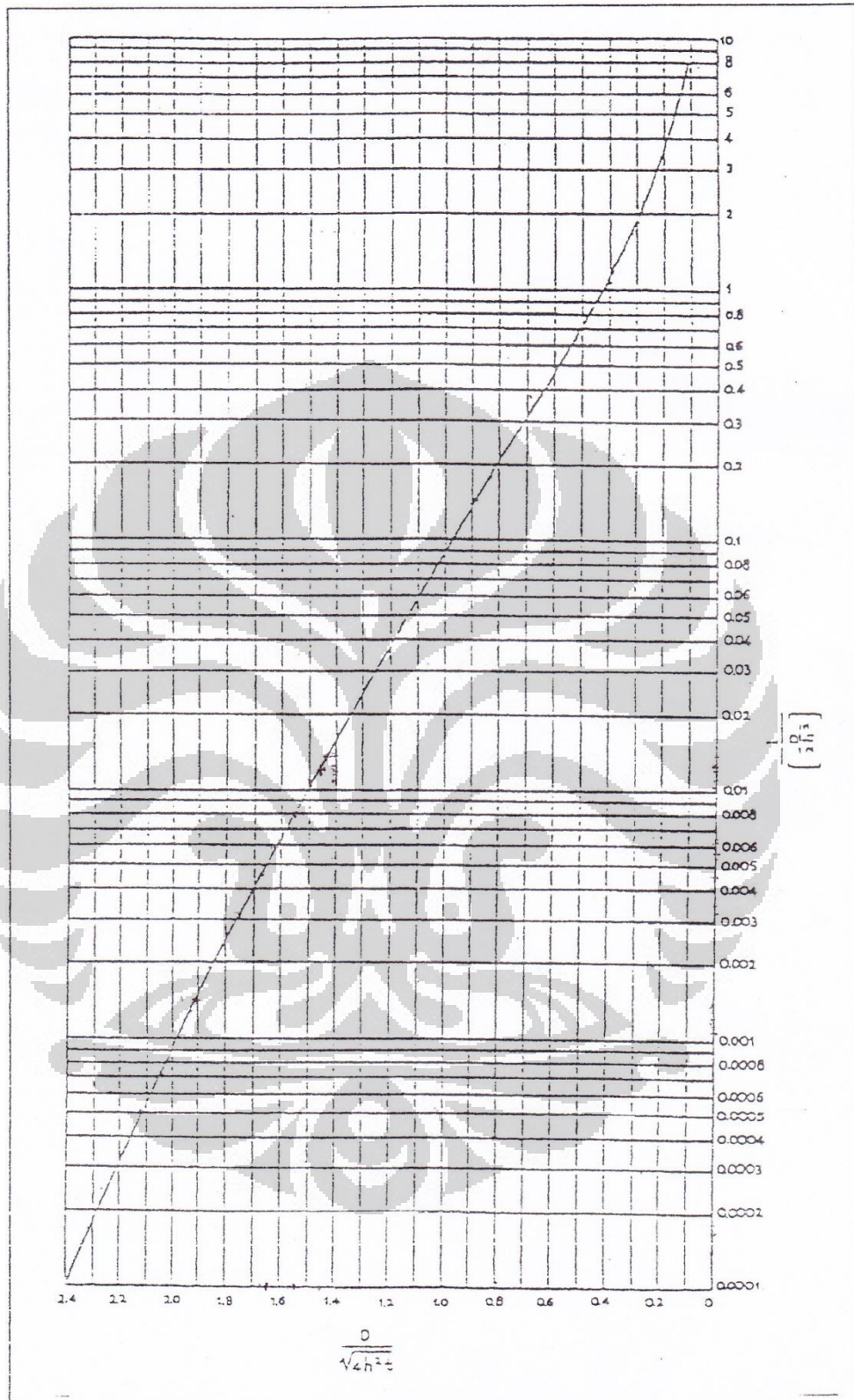
$$q_3 = \frac{2K\theta_0}{\sqrt{\pi}} I \quad (2.33)$$

dimana

$$I = \int_0^t \frac{e^{-\frac{D^2}{4h^2 t}}}{\sqrt{4h^2 t}} dt = \frac{D}{2h^2} \left[\frac{e^{-\frac{D^2}{4h^2 t}}}{\frac{D}{\sqrt{4h^2 t}}} - \sqrt{\pi} + \sqrt{\pi} \cdot P \left(\frac{D}{\sqrt{4h^2 t}} \right) \right] \quad (2.34)$$

Nilai dari $\frac{I}{\frac{D}{2h^2}}$ diberikan dalam bentuk variabel $\frac{D}{\sqrt{4h^2 t}}$ dalam grafik dibawah





Gambar 2.14. Grafik hubungan $\frac{I}{D}$ dengan harga $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$

(Sumber : U.S. Bureau of Reclamation, 1951)

Sehingga didapatkan:

$$T_{L3} = \frac{q_3}{c \cdot \rho \cdot D} \quad (2.35)$$

dimana :

T_{L3} = Kehilangan temperatur karena lapisan dibawah

q_3 = Banyaknya panas yang hilang karena perbedaan temperatur antara temperatur pengecoran beton massa dengan beton/lapisan dibawahnya.

ρ = Kerapatan beton

D = Tebal lapisan dari blok beton

2.8.2.4 Temperatur Akhir Beton (T_f)

Temperatur akhir beton massa yang dicapai sama dengan setengah dari jumlah temperatur udara rata-rata dengan temperatur air yang digenangi beton tersebut.

$$T_f = \frac{T_d + T_a}{2} \quad (2.36)$$

dimana :

T_f = Temperatur akhir beton

T_d = Temperatur udara rata-rata

T_a = Temperatur air

2.8.2.5 Perubahan temperatur (ΔT)

Perubahan temperatur yang terjadi merupakan selisih perbedaan temperatur maximum dengan temperatur akhir beton dan total kehilangan temperatur.

$$\Delta T = T_{max} - T_f - \sum T_L \quad (2.37)$$

dimana :

T_{max} = Temperatur maximum

$\sum T_L$ = Total kehilangan temperatur

T_f = Temperatur akhir beton

2.8.3 MIDAS GEN 2011

Program MIDAS adalah program pada aplikasi computer bidang teknik sipil. Program ini memiliki beberapa jenis aplikasi, yaitu MIDAS CIVIL, MIDAS GEN, dan MIDAS GTS. Berbagai jenis tersebut memiliki karakteristik dan fungsi spesifik untuk analisa struktur dan berbagai bidang ilmu teknik sipil.

Analisa panas hidrasi beton dapat dilakukan di MIDAS CIVIL dan MIDAS GEN. Analisa *mass concrete* dengan MIDAS GEN 2011 dilakukan melalui *heat transfer analysis* dan *thermal stress analysis*.

Heat transfer analysis menganalisa perubahan temperatur pada nodal berdasarkan waktu yang terjadi karena konduksi, konveksi, dan sumber panas dari panas hidrasi semen. *Thermal stress analysis* menganalisa tegangan dalam beton massa untuk setiap waktu dan tahapan konstruksi berdasarkan hasil dari *heat transfer analysis* seperti distribusi temperatur pada nodal, perubahan properti dari material karena waktu dan temperatur, waktu susut dan rangkai beton, dsb.

2.9 Penelitian Beton Massa

Penelitian dan studi beton massa telah dilakukan beberapa peneliti di dunia. Hasil, analisa dan kesimpulan penelitian mereka dapat menjadi informasi dan sumber untuk studi selanjutnya. Berikut beberapa hasil studi dan penelitian :

- a. **Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members** (Kyle, Riding A.; Poole, Jonathan L; Schindler, Anton K; Juenger, Maria C.G.; Folliard, Kevin J, 2006)
 - Kesalahan dalam memprediksi temperatur maksimum dengan metode PCA dibandingkan dengan pengukuran temperatur dalam beton adalah 12%. Metode PCA tidak dapat memberikan informasi waktu temperatur dicapai.
 - Metode Schmidt menggunakan asumsi untuk konveksi dan solar radiasi. Temperatur puncak dalam *mass concrete* sensitif dengan kondisi batas yang digunakan, jauh lebih baik jika konveksi dan solar radiasi diperhitungkan daripada diasumsikan. Prediksi temperatur puncak dengan kurva adiabatik lebih akurat dibandingkan dengan menggunakan grafik. Kelemahan metode Schmidt dalam memprediksi

waktu untuk mencapai temperatur puncak, apabila dibandingkan dengan pengukuran sebenarnya, hasil prediksi memiliki kesalahan mencapai 165%.

b. **Adiabatic Temperature Rise of Mass Concrete in Florida** (Sr. Rinker M.E., 2005)

- Penggunaan fly ash dan slag sebagai pengganti semen AASHTO tipe II dapat menurunkan temperatur puncak.
- Penggunaan fly ash dan slag tidak efektif dalam menurunkan temperatur puncak jika *placing temperature* tinggi.
- *Higher placing temperature* mempercepat akselerasi hidrasi semen, sehingga beton dapat mencapai temperatur puncak dengan cepat.

c. **Mass Concrete and Controlling Temperatures in the Mass Concrete** (ITC Concrete Batching Plant)

Tiga prosedur dalam *cooling* :

- Precooling beton di *batching plant* untuk mengatur temperatur pelepasan dari *batching plant*.
- Meminimalkan waktu perjalanan atau pengiriman beton. Selama perjalanan dengan durasi 1 jam temperatur beton dapat meningkat 2-4 °C.
- Postcooling setelah pengecoran beton massa selesai.

Precooling

- Menggunakan es sebagai bagian dari *mixing water*. Es dapat mencair sendiri dan menyerap panas dengan efektif. Penambahan es dalam *mixing water* tergantung dari temperatur ambient dan temperature awal yang ingin dicapai.
- *Concrete delivery* : Pengiriman beton dengan durasi perjalanan yang panjang dapat meningkatkan temperature beton secara signifikan karena selama perjalanan dengan durasi 1 jam temperatur beton dapat meningkat 2-4 °C. Untuk mengatasi kendala tersebut dapat

digunakan *low heat cement*, pengontrolan temperatur selama perjalanan, dan pengaturan akses menuju lokasi pengecoran.

d. Evaluasi Kenaikan Temperatur Pada Struktur Beton Massa (Ir. Nono Drito, 1994)

Panas hidrasi pada beton massa sangat dipengaruhi oleh kandungan unsur-unsur kimia dalam semen. Dalam pemodelan beton massa diasumsikan sebagai suatu batang atau kolom satu dimensi, dengan pertimbangan bahwa pengukuran temperatur beton massa di lapangan hanya dalam arah vertikal di 3 tingkat ketinggian atas, tengah, dan bawah.



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi Beton Massa (*Raft Foundation*)

Penelitian beton massa yang dilakukan berupa studi kasus *raft foundation* Rasuna Tower, Kuningan, Jakarta Pusat dengan dikaji dan dianalisa berdasarkan bidang ilmu teknik sipil. Oleh karena itu penelitian ini bersifat analitis.

Kegiatan penelitian dilaksanakan melalui :

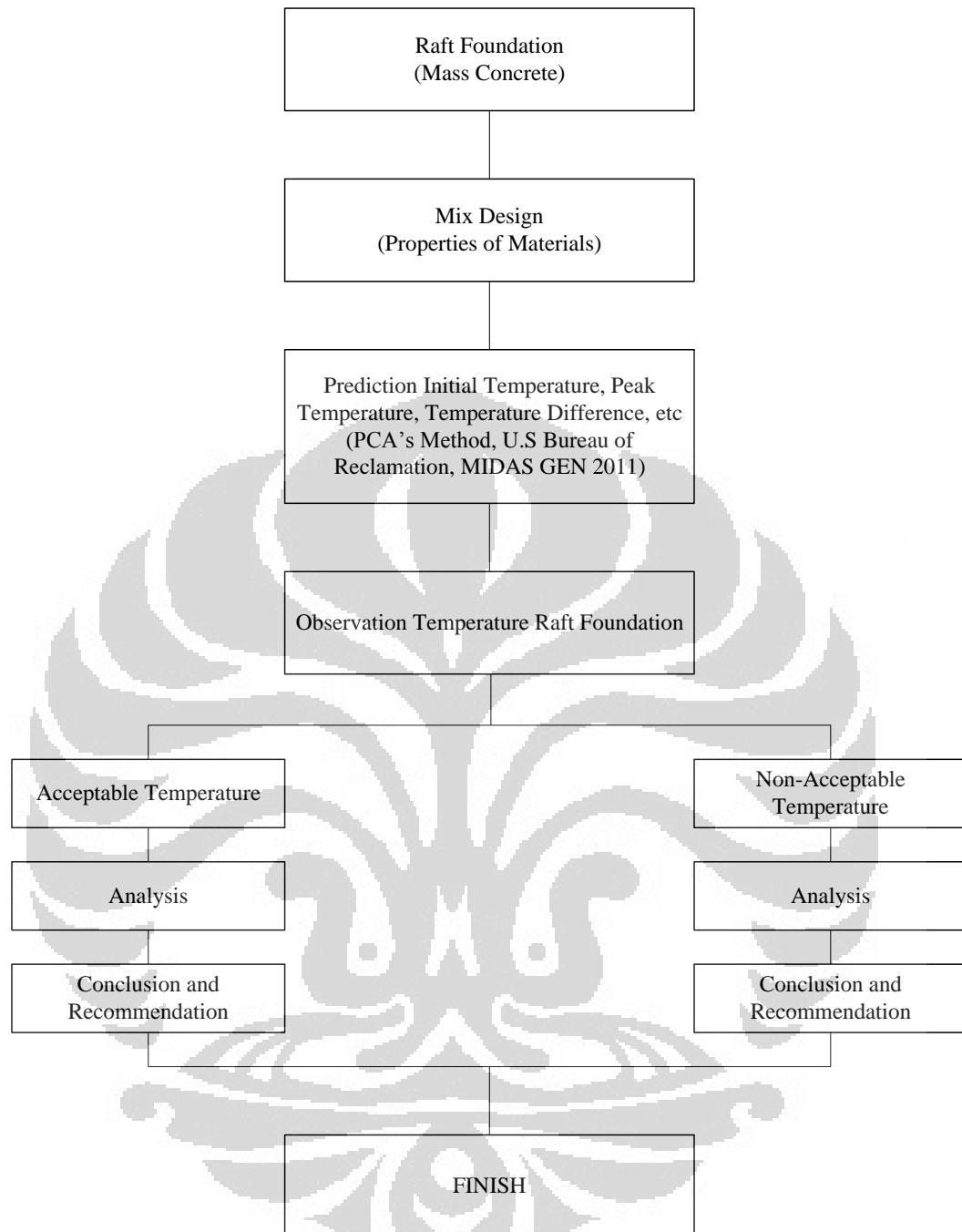
a. Studi Lapangan

Studi lapangan untuk memperoleh data primer. Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung dari sumber data, baik melalui pengamatan, wawancara, maupun hasil pengukuran langsung.

b. Studi Kepustakaan

Studi kepustakaan untuk memperoleh teori-teori dan data sekunder yang relevan dengan permasalahan yang diteliti. Data sekunder adalah data yang diperoleh dengan memanfaatkan data yang terlebih dahulu dikumpulkan dan dilaporkan pihak lain, dalam bentuk publikasi ilmiah, jurnal, buku, dan sebagainya.

Adapun skema dalam penelitian ini :



Gambar 3.1 Skema dan prosedur penelitian

(Sumber : Olahan sendiri)

3.2 Raft Foundation Rasuna Tower

Beton massa yang ditinjau adalah *raft foundation* sebuah proyek bangunan tinggi, Rasuna Tower, Kuningan, Jakarta Pusat. Pengecoran *raft foundation* Rasuna Tower menggunakan Beton *ready mix* $f_c' 35$ MPa, fly ash tipe F 30%, slump 14 ± 2 cm, dengan design *initial concrete temperature* (T_f) = ± 32 °C.

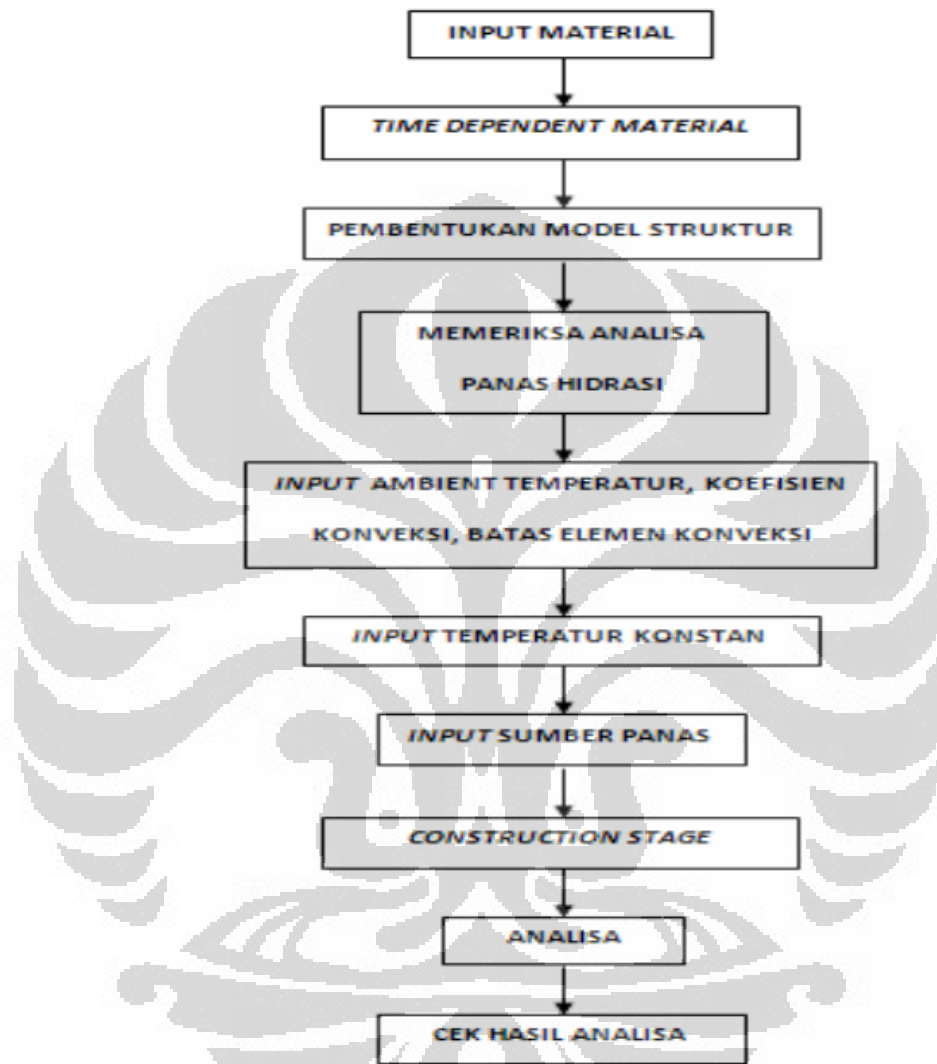
Tabel 3.1. Properti material *mix design*

DESCRIPTION	REMARK
Type of Concrete	F'c 35
Slump	14 ± 2
Specified Strength	35
Target Strength at 28 days (Cylinder / Mpa)	35
Cement Content (kg)	320
Fly ash content (kg)	138
Free Water Content (kg)	165
Coarse agg. Max 25 mm (kg)	1.05
Fine agg. (kg)	420
M.sand (kg)	220
Admixture : Retarder (lt)	0.78
Admixture : super plasticizer (lt)	2
Fly Ash Content (%)	30%
W/C ratio	0.36
On site temperature	± 32
Peak temperature	80°C - 85°C
Ice block	50 kg/m ³

(Sumber: Pioneer Beton)

3.3 MIDAS GEN 2011

Analisa dengan MIDAS GEN 2011 menggunakan data-data sumber panas dari semen, material properti, dll, dengan tahapan sebagai berikut:



Gambar 3.2. Tahapan Analisa MIDAS GEN 2011

(Sumber : Ardiaz Kanil Nuryadin, 2007)

Analisa yang dilakukan berdasarkan *heat transfer analysis* dan *thermal stress analysis*.

3.4 Penjadwalan Monitoring *Raft Foundation*

Temperatur puncak beton massa terjadi pada 1-3 hari awal setelah pengecoran. Sifat beton yang “Poor Thermal Conductivity” menyebabkan panas hidrasi yang terlepas berlangsung lambat sehingga diperlukan monitoring selama waktu tertentu hingga perbedaan temperatur dibawah dari standar yang disyaratkan dalam konstruksi. *Monitoring* yang dilakukan dalam proyek beton massa *raft foundation* Rasuna Tower dilakukan dengan :

- a. Alat pembacaan sensor temperatur (*Thermocouple*)

Pembacaan suhu beton secara manual dilakukan intensif untuk 1-3 hari awal dikarenakan *peak temperature* terjadi pada 1-3 hari awal. Selanjutnya waktu *monitoring* dapat dikurangi. Dalam konstruksi beton massa di Indonesia, *monitoring* suhu selama 7-28 hari.



Gambar 3.3. Probe
(Sumber : Ultrachem)




Gambar 3.4. Temperatur indikator sumber AC
(Sumber : Ultrachem)

b. Jadwal pengamatan temperatur

Pengamatan temperatur *raft foundation* Rasuna Tower dilakukan sampai perbedaan temperatur antara inti dan permukaan ≤ 20 °C. berikut jadwal monitoring :

- Setiap 2 jam sekali selama 6 hari
- Setiap 4 jam sekali selama 13 hari
- Setiap 8 jam sekali sampai perbedaan temperatur inti dan permukaan ≤ 20 °C.

								
TABEL MONITORING SUHU THERMOCOUPLES								
Proyek		: Rasuna Tower Kuningan Jakarta						
Tanggal		: 30 April 2012						
LOKASI		: RAFT FOUNDATION						
Titik	Waktu	2:00	4:00	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00
	TC 2 (3 m)							
	Atas (1)							
	Tengah (2)							
	Bawah (3)							
	Tambahan 1							
	Tambahan 2							
	Suhu udara							
TC 5 (4 m)								
	Atas (1)							
	Tengah (2)							
	Bawah (3)							
	Tambahan 1							
	Tambahan 2							
	Suhu udara							
TC								
	Tengah							
	Suhu Udara							
TC								
	Tengah							
	Suhu Udara							
TC								
	Tengah							
	Suhu Udara							

Gambar 3.5. Tabel monitoring temperatur

(Sumber : Olahan sendiri)

BAB 4

HASIL DAN ANALISA

4.1 Pendahuluan

Studi kasus beton massa dilakukan pada konstruksi *raft foundation* Rasuna Tower, Kuningan, Jakarta Pusat, dengan ketebalan (D) 4 meter dan volume pengecoran $\pm 3486 \text{ m}^3$.

Analisa dan hasil yang dibahas adalah sebagai berikut:

- a. Perhitungan temperatur puncak dan perbedaan temperatur yang diakibatkan oleh temperatur pembuatan, panas hidrasi semen, sifat-sifat panas material beton, dan kehilangan temperatur.
- b. Perbandingan temperatur antara hasil perhitungan, pengukuran lapangan, dan MIDAS GEN 2011.
- c. Perbandingan tegangan yang terjadi dengan tegangan tarik beton massa.
- d. Perbandingan *initial temperature*, temperatur puncak, perbedaan temperatur, dan tegangan *raft foundation* Rasuna Tower untuk ketebalan 3 dan 4 meter.
- e. Pengaruh lapisan insulasi terhadap temperatur puncak, dan perbedaan temperatur *raft foundation* Rasuna Tower.
- f. Perbandingan *initial temperature*, temperatur puncak, dan perbedaan temperatur *raft foundation* Rasuna Tower dengan *raft foundation* Menteng Residence untuk ketebalan 4 meter dan $f_c' 35 \text{ MPa}$.

4.2 Perhitungan Temperatur Beton Massa

Perhitungan temperatur beton massa untuk mengetahui temperatur puncak, *initial temperature*, waktu temperatur puncak, kehilangan temperatur, dan tegangan dalam beton massa wajib dilakukan perencana, dalam hal ini kontraktor sebelum dilakukan pengecoran *raft foundation*. Dalam perencanaan banyak terdapat perhitungan sederhana untuk memperkirakan temperatur yang terjadi berdasarkan *mix design*. Dalam memprediksi temperatur *raft foundation* Rasuna Tower digunakan metode PCA, U.S Bureau of Reclamation, dan MIDAS GEN 2011.

4.2.1 Metode PCA

Metode PCA merupakan metode sederhana yang umumnya digunakan kontraktor dan *supplier* beton dalam memprediksi temperatur pada pengerjaan *raft foundation* di Indonesia. Metode ini dapat memprediksi *intial temperature* dan temperatur puncak.

Tabel 4.1. Temperatur dan jumlah material

T_a : <i>Aggregate Temperature</i>	32 °C
T_c : <i>Cement Temperature</i>	80 °C
T_{fa} : <i>Fly Ash Temperature</i>	45 °C
T_w : <i>Water Temperature</i>	30 °C
T_{wa} : <i>Water in Aggregate Temperature</i>	31 °C
W_a : <i>Mass of Aggregate</i>	1690 kg
W_c : <i>Mass of Cement</i>	320 kg
W_{fa} : <i>Mass of Fly Ash</i>	138 kg
W_w : <i>Mass of Water</i>	165 kg
W_{wa} : <i>Mass of Water in Aggregate</i>	16 kg

(Sumber : Pioneer Beton)

Dari tabel diatas didapatkan temperatur awal :

$$T_i = \frac{0.22 (T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c + T_{fa} \cdot W_{fa}) + T_w \cdot W_w + T_{wa} \cdot W_{wa}}{0.22 (W_a + W_c + W_{fa}) + W_w + W_{wa}} \quad (2.6)$$

$$T_i = \frac{0.22 (32 \times 1690 + 80 \times 320 + 45 \times 138) + 30 \times 165 + 31 \times 16}{0.22 (1690 + 320 + 138) + 165 + 16}$$

$$T_i = \pm 38^\circ C$$

Metode PCA dapat memperkirakan temperatur puncak berdasarkan *initial temperature*, kandungan semen, dan fly ash. Temperatur puncak yang terjadi:

$$T_{max} = T_i + 12 \left(\frac{W_c}{100} \right) + 6 \left(\frac{W_{scm}}{100} \right) \quad (2.8)$$

$$T_{max} = 38 + 12 \left(\frac{320}{100} \right) + 6 \left(\frac{138}{100} \right) = \pm 85^\circ \text{C}$$

Dengan kondisi temperatur puncak tersebut dapat dilakukan pengecoran *raft foundation*, tetapi untuk meminimalkan resiko yang terjadi akibat temperatur puncak, maka dilakukan pengendalian *initial temperature*.

4.2.1.1 Penurunan *Initial Temperature*

Penurunan *initial temperature* bertujuan menghindari kenaikan suhu yang tinggi sehingga dapat menurunkan temperatur puncak ($\pm 85^\circ \text{C}$). Metode yang digunakan dalam penurunan *initial temperature* beton dengan mencampurkan *crushed ice* dalam *wet mix*, memasukan balok es ke dalam *batch water* dan menyiram agregat kasar dan halus dengan air. Penambahan 50 kg/m^3 es dalam proses *wet mix* dapat mengurangi jumlah pemakaian air sebesar 50 kg.

Tabel 4.2. Temperatur, jumlah material, dan *crushed ice*

T_a : <i>Aggregate Temperature</i>	32 °C
T_c : <i>Cement Temperature</i>	80 °C
T_{fa} : <i>Fly Ash Temperature</i>	45 °C
T_w : <i>Water Temperature</i>	30 °C
T_{wa} : <i>Water in Aggregate Temperature</i>	31 °C
W_a : <i>Mass of Aggregate</i>	1690 kg
W_c : <i>Mass of Cement</i>	320 kg
W_{fa} : <i>Mass of Fly Ash</i>	138 kg
W_w : <i>Mass of Water</i>	115 kg
W_{wa} : <i>Mass of Water in Aggregate</i>	16 kg
W_i : <i>Mass of Ice</i>	50 kg

(Sumber : Pioneer Beton)

$$T_i = \frac{0.22 (T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c + T_{fa} \cdot W_{fa}) + T_w \cdot W_w + T_{wa} \cdot W_{wa} - 112 W_i}{0.22 (W_a + W_c + W_{fa}) + W_w + W_{wa} + W_i} \quad (2.7)$$

$$T_i = \frac{0.22 [(32(1690) + 80(320) + 45(138)] + 30(115) + 31(16) - 112(50)}{0.22 (1690 + 320 + 115) + 115 + 16 + 50}$$

$$T_i = \pm 27^\circ C$$

$$T_{max} = T_i + 12 \left(\frac{W_c}{100} \right) + 6 \left(\frac{W_{scm}}{100} \right)$$

$$T_{max} = 27 + 12 \left(\frac{320}{100} \right) + 6 \left(\frac{138}{100} \right)$$

$$T_{max} = \pm 74^\circ C$$

4.2.2 Metode U.S Bureau of Reclamation

Metode ini umumnya digunakan dalam pengecoran bendungan. Metode ini dapat memperkirakan *initial temperatur*, temperatur puncak, waktu temperatur puncak, kehilangan temperatur, dan perbedaan temperatur.

4.2.2.1 Temperatur maksimum

$$T_{max} = T_p + T_t + (T_{transport}) \quad (2.14)$$

$$T_{max} = T_i + T_t \quad (2.15)$$

a. *Initial Temperature*

- Temperatur udara

Temperatur udara rata-rata di Rasuna Tower adalah 26.27 °C

- Temperatur air Tanah

Temperatur air rata-rata di Rasuna Tower adalah 27.3 °C

- Temperatur Semen, Agregat, dan Air Adukan

Pengukuran temperatur dilakukan di *Batching Plant* :

Temperatur semen rata-rata : 80 °C

Temperatur pasir rata-rata : 31 °C

Temperatur agregat kasar rata-rata : 33 °C

Temperatur air adukan : 30 °C

Tabel 4.3. Jumlah material dan *crushed ice*

Type of Concrete	Fc' 35
Slump (cm)	14 ± 2
Required Strength (MPa) in 28 days	35
Cement (kg/m ³) OPC (Indocement)	320
FlyAsh (kg/m ³) Suralaya	138
Free Watres (ltres/m ³)	165
Coarse Agg. Max 25 mm (kg/m ³) Rumpin	1050
Fine Agg (kg/m ³) Lampung	640
Admixture, Retarder (lt/m ³) Plastiment VZ	0.78
Admixture : super plasticizer (lt/m ³)	2
Fly Ash Content (%)	30
W/C Ratio	0.36
Ice Block (kg/m ³)	50

(Sumber : Pioneer Beton)

Temperatur pembuatan beton terjadi saat beton diproduksi di *Batching Plant*:

$$T_p = \frac{\sum(H_i \times T_i)}{\sum H_i} \quad (2.9)$$

$$H_i = W_i \times C_i \quad (2.10)$$

Tabel 4.4. Perhitungan temperatur awal pembuatan beton (setelah pemakaian *crushed ice*)

Material Beton	W (kg/m ³)	C (Kcal/kg °C)	H = W x C (Kcal/m ³ °C)	T (°C)	H x T
Semen	320	0.315	100.8	80	8064
Pasir	640	0.19	121.6	31	3769.6
Agg. Kasar	1050	0,2	210	33	6930
Air	115	1	115	30	3450
Fly Ash Type F	138	0.19	26.22	45	1179.9
Es	50	0.5	25	-5	-125
Jumlah	2313		598.62		23268.5

(Sumber : Olahan sendiri)

$$T_p = \frac{23268.5}{598.62} = \pm 39^\circ C$$

Initial temperature dalam perencanaan dengan metode U.S Bureau of Reclamation memperhatikan $T_{transport}$. Pengecoran *raft foundation* Rasuna Tower menggunakan *batching plant* terjauh di Jati Asih dengan perkiraan waktu tempuh ± 2 jam. Berdasarkan data histori supplier beton, selama 1 jam temperatur beton mengalami kenaikan 2 – 4 °C/jam. Diambil $T_{transportasi} = 6$ °C, sehingga *intial temperature*:

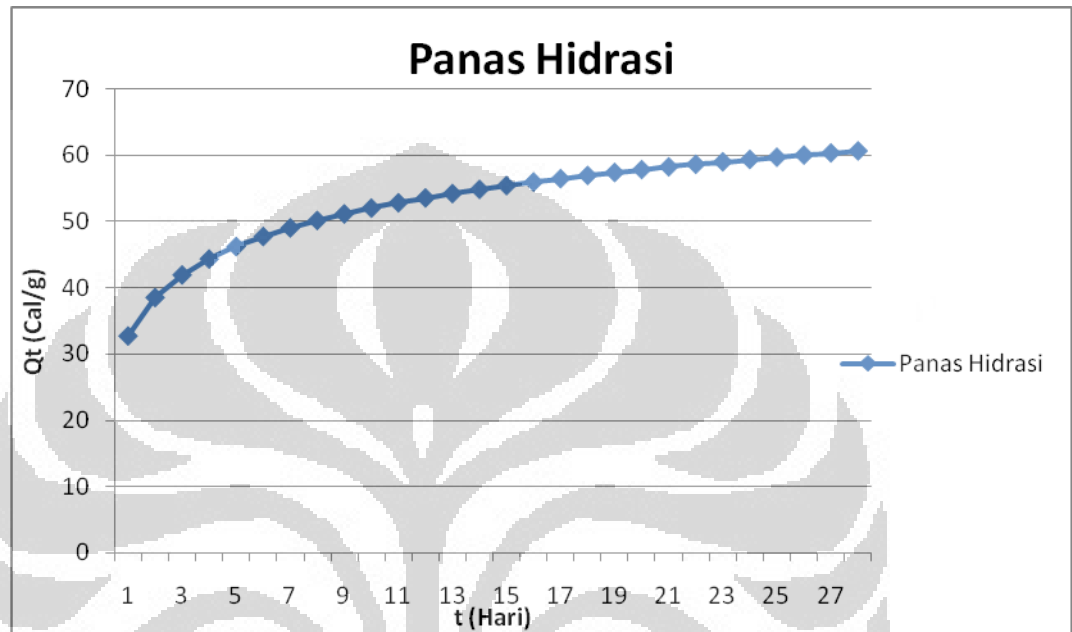
$$T_i = T_p + T_{transport} = 39^\circ C + 6^\circ C = 45^\circ C$$

- b. Kenaikan temperatur beton yang disebabkan panas hidrasi semen (T_i)

Sifat-sifat panas untuk mutu beton $f_c' 35$ MPa, yaitu

- Panas Spesifik (C) = $\frac{\sum H}{\sum W} = \frac{598.62}{2313} = 0.2588$ (Kcal/kg°C)
- Kerapatan (ρ) = $\frac{Berat}{Volume} = 2313$ (Kg/m³)
- Konduktivitas (K) = 40.08 (Kcal/m hari) (Evrialdy, 2000)
- Diffusivitas (h^2) = $\frac{K}{C \times \rho} = 0.067$ m²/hari

Semen yang digunakan dalam pengecoran *raft foundation* Rasuna Tower adalah *ordinary portland cement* (OPC) dengan merek Indocement Tiga Roda. Dari data panas hidrasi diatas dapat dibuat pendekatan dengan grafik hingga umur 28 hari.



Gambar 4.1. Grafik panas hidrasi semen OPC

(Sumber : Pioneer Beton)

Dari harga-harga (Q_t) dan (t) ini dapat dicari harga-harga (Q_u) dan (m) yang bersangkutan dengan rumus:

$$Q_t = Q_u (1 - e^{-mt}) \quad (2.13)$$

Perhitungan mencari (Q_u) dan (m) adalah sebagai berikut:

- Untuk $t = 1$ hari, yaitu

$$t = 1 \text{ hari, } Q_t = 32.82 \text{ maka } 32.82 = Q_u (1 - e^{-m}) \quad (a)$$

$$t = 2 \text{ hari, } Q_t = 38.6 \text{ maka } 38.6 = Q_u (1 - e^{-2m}) \quad (b)$$

missal : $e^{-m} = X$

maka persamaan (a) dan (b) menjadi:

$$32.82 = Q_u (1 - X)$$

maka

$$Q_u = \frac{32.82}{(1-X)} \quad (d)$$

$$38.6 = Q_u (1 - X^2) \quad (e)$$

substitusikan persamaan (d) kedalam (e) :

$$38.6 = \frac{32.82}{(1-X)} (1 - X^2) = 32.82(1 + X)$$

$$\frac{38.6}{32.82} = (1 + X)$$

$$X = \frac{5.78}{32.82}$$

$$e^{-m} = \frac{5.78}{32.82}$$

Ambil harga logaritma dari kedua ruasnya:

$$\ln e^{-m} = \ln \frac{5.78}{32.82}$$

$$-m \log e = -1.737$$

$$m = 1.737$$

Sehingga didapat

$$Q_u = \frac{32.82}{(1 - e^{-1.737})} = 39.83$$

- Untuk $t = 2$ hari, yaitu
 $t = 2$ hari, $Q_t = 38.6$ maka $38.6 = Q_u (1 - e^{-2m})$ (e)
 $t = 4$ hari, $Q_t = 44.387$ maka $38.6 = Q_u (1 - e^{-4m})$ (f)

missal : $e^{-2m} = X$

maka persamaan (e) dan (f) menjadi:

$$38.6 = Q_u (1 - X)$$

maka

$$Q_u = \frac{38.6}{(1-X)} \quad (g)$$

$$44.387 = Q_u (1 - X^2) \quad (h)$$

substitusikan persamaan (g) kedalam (h) :

$$44.387 = \frac{38.6}{(1-X)}(1-X^2) = 38.6(1+X)$$

$$\frac{44.387}{38.6} = (1+X)$$

$$X = \frac{5.787}{38.6}$$

$$e^{-m} = \frac{5.787}{38.6}$$

Ambil harga logaritma dari kedua ruasnya:

$$\ln e^{-2m} = \ln \frac{5.787}{38.6}$$

$$2m = 1.9$$

$$m = 0.95$$

Sehingga didapat

$$Q_u = \frac{38.6}{(1 - e^{-1.9})} = 45.39$$

Selanjutnya untuk umur t dapat diselesaikan dengan persamaan seperti diatas.

Dari data-data (Q_u), (m), (t) tersebut dapat dicari kenaikan temperatur beton dengan menggunakan rumus:

$$T_t = T_0(1 - e^{-mt}) \quad (2.11)$$

dimana

$$T_0 = \frac{w_c Q_u}{c.p} \quad (2.12)$$

$$T_0 = 0.544Q_u$$

$$T_t = 0.544Q_u(1 - e^{-mt})$$

Selanjutnya dapat dibuat grafik kenaikan temperatur akibat panas hidrasi semen.

Tabel 4.5. Kenaikan temperatur beton

t (hari)	Panas Hidrasi (Q_t)	m	Q_u	T_t
1	32.82	1.737	39.8324055	17.54435201
2	38.60362007	0.95	45.3929864	20.63606031
3	41.98682094	0.661	48.6891587	22.44459373
4	44.38724015	0.51	51.0215	23.72776861
5	46.24914994	0.416	52.851956	24.72307638
6	47.77044101	0.352	54.3460854	25.53630203
7	49.05667428	0.306	55.5832462	26.22387453
8	50.17086022	0.27	56.7110714	26.81947692
9	51.15364187	0.242	57.6878162	27.34483545
10	52.03277002	0.22	58.5165934	27.81478468
11	52.82803816	0.201	59.3300813	28.23990547
12	53.55406109	0.185	60.0792106	28.62801034
13	54.22193744	0.172	60.7110496	28.98503221
14	54.84029436	0.161	61.2725979	29.31558283
15	55.41597088	0.151	61.8364518	29.6233181
16	55.9544803	0.142	62.3869325	29.91118522
17	56.46033214	0.134	62.9076756	30.18159481
18	56.93726195	0.127	63.3813968	30.43654376
19	57.38839884	0.121	63.8202198	30.67770477
20	57.81639009	0.115	64.2428793	30.90649298
21	58.22349522	0.110	64.6449936	31.12411625
22	58.61165823	0.105	65.0284697	31.33161377
23	58.98256374	0.101	65.3949606	31.52988606
24	59.33768116	0.097	65.7459086	31.71971864
25	59.67829988	0.093	66.0825798	31.90180075
26	60.00555751	0.090	66.4060914	32.07674051
27	60.32046281	0.087	66.7174345	32.24507718
28	60.62391443	0.084	67.0174922	32.40729113

(Sumber : Olahan sendiri)

Beton massa yang telah dicor akan mengalami kehilangan temperatur karena penguapan, pengaruh udara luar, dan lapisan dibawahnya.

c. Kehilangan temperatur karena penguapan (T_{LI})

Kehilangan temperatur karena penguapan panas hidrasi beton dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.32):

$$T_{LI} = \eta T_o \quad (2.23)$$

dimana

T_{L1} = Kehilangan temperatur karena penguapan

η = Ratio of heat loss ($\eta = \frac{q_1}{c\rho DT_o}$, didapat dari gambar 2.18)

Untuk $t = 1$ hari; $D = 4$ meter; $h^2 = 0.067$; $T_o = 0.544$; $Q_u = 21.66883$ °C

Dengan $(m.t) = 1.737$ dan $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}} = 7.726674$, didapat $\eta = 0.05$

$$T_{L1} = 0.05 \times 21.66883 = 1.08^\circ\text{C}$$

Tabel 4.6. Kehilangan temperatur karena penguapan (T_{L1})

t	m	m.t	$\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$	Q_u	T_o	n	T_{L1}
1	1.737	1.737	7.726674	39.83240546	21.2705	0.05	1.063525
2	0.95	1.9	5.463584	45.39298637	24.23985	0.075	1.817989
3	0.661	1.983	4.460997	48.68915875	26.00001	0.085	2.210001
4	0.51	2.04	3.863337	51.02150002	27.24548	0.1	2.724548
5	0.416	2.08	3.455474	52.85195602	28.22294	0.108	3.048078
6	0.352	2.112	3.154401	54.34608545	29.02081	0.1125	3.264841
7	0.306	2.142	2.920408	55.58324618	29.68145	0.13	3.858589
8	0.27	2.16	2.731792	56.7110714	30.28371	0.14	4.23972
9	0.242	2.178	2.575558	57.68781621	30.80529	0.15	4.620794
10	0.22	2.2	2.443389	58.51659338	31.24786	0.158	4.937162
11	0.201	2.211	2.32968	59.33008125	31.68226	0.165	5.227573
12	0.185	2.22	2.230499	60.07921061	32.0823	0.175	5.614402
13	0.172	2.236	2.142994	60.71104958	32.4197	0.188	6.094904
14	0.161	2.254	2.065041	61.27259793	32.71957	0.195	6.380316
15	0.151	2.265	1.995019	61.8364518	33.02067	0.2	6.604133
16	0.142	2.272	1.931669	62.38693253	33.31462	0.205	6.829498
17	0.134	2.278	1.873994	62.90767564	33.5927	0.21	7.054467
18	0.127	2.286	1.821195	63.3813968	33.84567	0.22	7.446046
19	0.12078	2.294812375	1.772621	63.82021976	34.08	0.225	7.667999
20	0.115112	2.302242504	1.727737	64.24287929	34.3057	0.235	8.061839
21	0.109965	2.309259174	1.686099	64.64499365	34.52043	0.24	8.284902
22	0.105268	2.315903826	1.647332	65.02846974	34.7252	0.245	8.507675
23	0.100966	2.322212073	1.611123	65.3949606	34.92091	0.25	8.730227
24	0.097009	2.32821474	1.577201	65.7459086	35.10832	0.26	9.128162
25	0.093358	2.333938671	1.545335	66.08257976	35.2881	0.263	9.28077
26	0.089977	2.339407386	1.515325	66.40609138	35.46085	0.27	9.57443
27	0.086839	2.344641599	1.486999	66.71743451	35.62711	0.278	9.904337
28	0.083916	2.349659646	1.460204	67.01749223	35.78734	0.285	10.19939

(Sumber : Olahan sendiri)

d. Kehilangan temperatur karena udara luar (T_{L2})

Kehilangan temperatur karena pengaruh udara luar dapat dihitung dengan persamaan (2.25) , yaitu:

$$T_{L2} = \frac{q_2}{c \cdot \rho \cdot D} \quad (2.28)$$

$$q_2 = \frac{2K\theta_o}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{\frac{t}{h^2}} - I \right] \quad (2.27)$$

$$\theta_o = T_p - T_d = 39^\circ C - 28.06^\circ C$$

$$\theta_o = 10.94^\circ C$$

dimana :

T_p = Temperatur pembuatan beton = 39 °C

T_d = Temperatur udara harian rata-rata = 28.06 °C

Untuk $t = 1$ hari :

$$q_2 = \frac{2 \times 40.08 \times 10.94}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{\frac{1}{0.067}} - 0 \right]$$

$$T_{L2} = \frac{1912.38}{0.2588 \times 2313 \times 4} = 0.8^\circ C$$

Perhitungan untuk berbagai umur dapat dilihat di tabel dibawah

Tabel 4.7. Kehilangan temperatur karena udara luar (T_{L2})

t (hari)	q_2	T_{L2} ($^{\circ}\text{C}$)
1	1912.376	0.798680871
2	2704.507	1.12950532
3	3312.332	1.383355847
4	3824.751	1.597361742
5	4276.202	1.78590472
6	4684.344	1.956360601
7	5059.67	2.113110961
8	5409.015	2.259010639
9	5737.127	2.396042613
10	6047.462	2.525650676
11	6340.046	2.647844825
12	6620.23	2.764860351
13	6887.78	2.876599259
14	7145.111	2.984070377
15	7389.606	3.086180893
16	7627.338	3.185466763
17	7856.851	3.281320413
18	8078.059	3.373705206
19	8287.829	3.461312977
20	8494.776	3.547741967
21	8695.635	3.631628272
22	8887.089	3.711586922
23	9079.079	3.79176923
24	9250.478	3.863352028
25	9428.891	3.937864033
26	9596.089	4.007692304
27	9752.291	4.072928207
28	9912.472	4.139825867

(Sumber : Olahan sendiri)

e. Kehilangan temperatur karena Lapisan Dibawahnya (T_{L3})

Kehilangan temperatur karena perbedaan suhu dan kondisi dengan lapisan dibawahnya, yaitu lantai kerja (leanconcrete) dengan ketebalan 10 cm, dapat dihitung dengan persamaan (2.20) :

$$T_{L3} = \frac{q_3}{c \cdot \rho \cdot D} \quad (2.35)$$

$$q_3 = \frac{2K\theta_o}{\sqrt{\pi}} I \quad (2.33)$$

$$\theta_o = T_p + T_o - T_{L1} - T_{L2} - T_d \quad (4.1)$$

Untuk t = 1 hari

$$\theta_o = 39 + 21.67 - 1.08 - 0.8 - 28.06 = 30.73^\circ C$$

$$q_3 = \frac{2 \times 40.08 \times 30.73}{\sqrt{3.14}} \times 0 \quad ; \quad T_{L3} = \frac{0}{0.2588 \times 2313 \times 4} = 0^\circ C$$

Tabel 4.8. Kehilangan temperatur karena lapisan dibawahnya (T_{L3})

t (hari)	q_3	T_{L3}
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	8.328771	0.003429519
12	14.23594	0.005861612
13	23.5527	0.009697494
14	32.88611	0.013539772
15	53.99086	0.022227807
16	70.3633	0.028966827
17	89.01972	0.036645511
18	111.6889	0.045976411
19	150.9163	0.062121837
20	179.7423	0.073986296
21	211.4299	0.087026648
22	256.6497	0.105636126
23	285.5318	0.117520212
24	362.3905	0.149153076
25	407.1203	0.167556944
26	472.2372	0.194353657
27	558.2719	0.229759877
28	621.4033	0.255738375

(Sumber : Olahan sendiri)

Tabel 4.9. Tempertur maksimum beton massa

t (hari)	ΣT_L	T_{maks}	T_f	T	ΔT
1	1.862206	62.72431	26.785	60.862109	34.07711
2	2.947494	65.8706	26.785	62.92311	36.13811
3	3.593357	67.71107	26.785	64.117708	37.33271
4	4.32191	69.01689	26.785	64.694984	37.90998
5	4.833983	70.02977	26.785	65.195789	38.41079
6	5.221202	70.85735	26.785	65.636153	38.85115
7	5.9717	71.55707	26.785	65.585366	38.80037
8	6.49873	72.16318	26.785	65.664453	38.87945
9	7.016837	72.69782	26.785	65.680979	38.89598
10	7.462813	73.17606	26.785	65.713249	38.92825
11	7.878848	73.60869	26.785	65.72984	38.94484
12	8.385124	74.00364	26.785	65.61852	38.83352
13	8.9812	74.36697	26.785	65.385769	38.60077
14	9.377926	74.70336	26.785	65.325429	38.54043
15	9.712542	75.01652	26.785	65.303981	38.51898
16	10.04393	75.30947	26.785	65.265542	38.48054
17	10.37243	75.58466	26.785	65.212226	38.42723
18	10.86573	75.84411	26.785	64.978375	38.19338
19	11.19143	76.08952	26.785	64.898094	38.11309
20	11.68357	76.32235	26.785	64.638781	37.85378
21	12.00356	76.54382	26.785	64.540256	37.75526
22	12.3249	76.75498	26.785	64.430077	37.64508
23	12.63952	76.95675	26.785	64.31723	37.53223
24	13.14067	77.14993	26.785	64.009263	37.22426
25	13.38619	77.33523	26.785	63.94904	37.16404
26	13.77648	77.51326	26.785	63.736778	36.95178
27	14.20702	77.68457	26.785	63.477547	36.69255
28	14.59496	77.84964	26.785	63.254684	36.46968

(Sumber : Olahan sendiri)

4.2.2.2 Temperatur Akhir Beton (T_f)

Selama pengamatan *raft foundation* Rasuna Tower dapat ditentukan waktu temperatur akhir beton massa berdasarkan temperatur udara rata-rata dan temperatur air tanah. Temperatur akhir beton dapat ditentukan dengan persamaan 2.35.

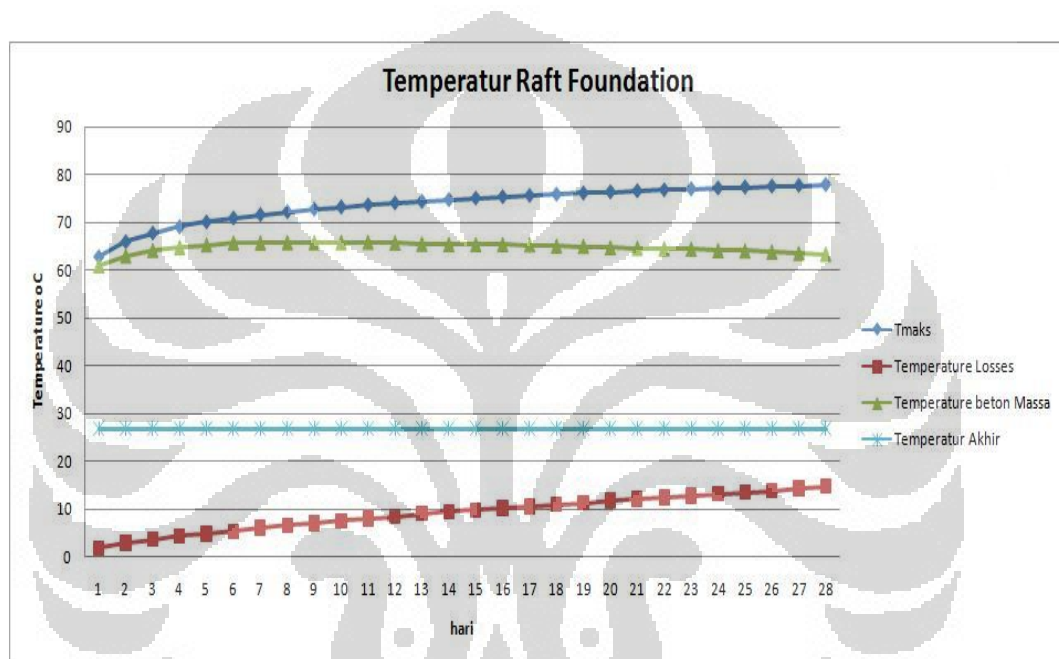
$$T_f = \frac{T_d + T_a}{2} \quad (2.36)$$

dimana,

Temperatur udara rata-rata (T_d) = 26.27 °C

Temperatur air tanah (T_a) = 27.3 °C

$$T_f = \frac{26.27^\circ C + 27.3^\circ C}{2} = 26.785^\circ C$$



Gambar 4.2. Temperatur *raft foundation* metode U.S Bureau of Reclamation
(Sumber : Olahan sendiri)

4.2.3 Pemodelan MIDAS GEN 2011

Pemodelan *raft foundation* Rasuna Tower dengan MIDAS GEN 2011 bertujuan untuk menganalisa temperatur yang terjadi dan pengaruh perubahan temperatur pada *raft foundation*.

4.2.3.1 Data Material

Tabel 4.10. Material dan thermal properties

Data Material	Beton Massa	Subsoil	Styrofoam	Multiplek	Lean Concrete	Eksisting Raft
Specific heat (kcal/kg°C)	0.25	0.2	0.29	0.29	0.25	0.25
Density (kgf/m ³)	2403	1800	29	545	2403	2403
Rate of Heat Conduction (kcal/mhr°C)	2.3	1.7	0.028	0.129	2.3	2.3
Convection Coefficient (kcal/m ² hr°C)	12	12	1.33	7	12	12
Compressive strength (28 days) (MPa)	35				35	35
Thermal expansion Coefficient	1.00E-05	1.00E-05	7.00E-05	5.00E-06	1.00E-05	1.00E-05
Poisson's ratio	0.2	0.2	0.34	0.35	0.2	0.2
Cement content (kg/m ³)	320					
Modulus elastisitas (MPa)	28645	1000	15	11000	28645	28645
Slump (cm)	14±2					
W/C	0.36					

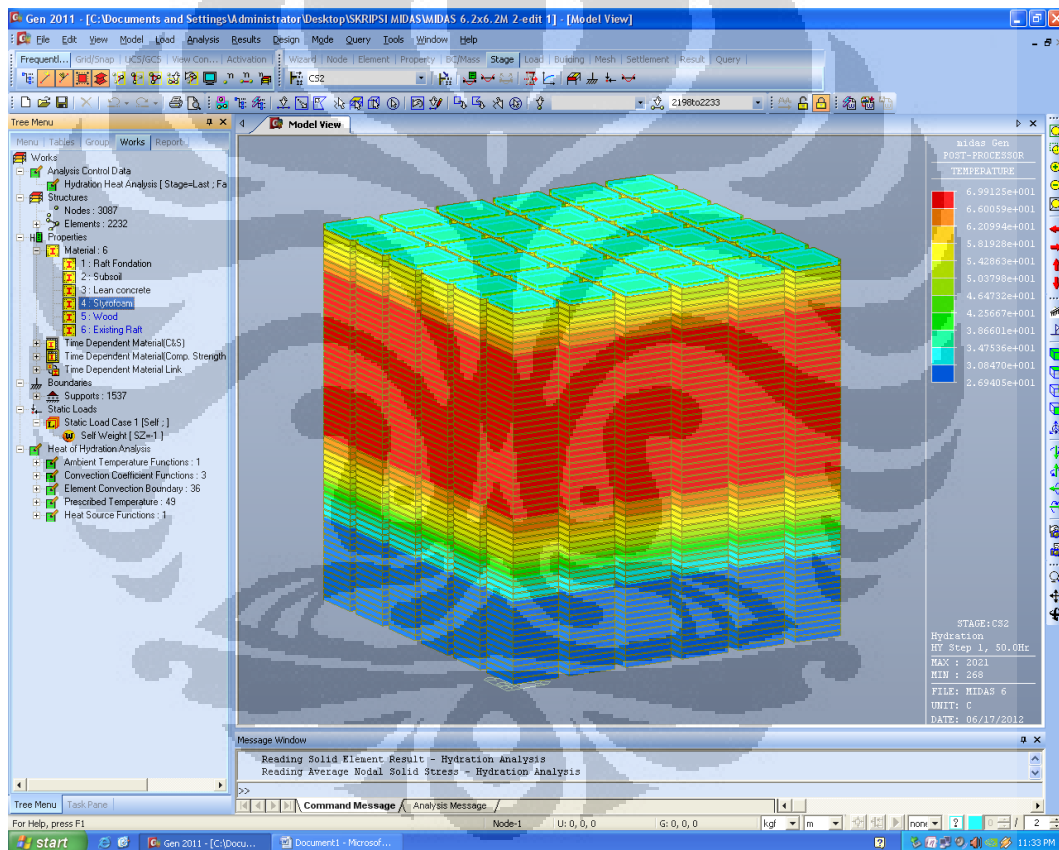
(Sumber : Jurnal PCA, Heat Transfer (A Practical Approach), Midas Gen 2011, Material Science and Engineering, telah diolah kembali.)

4.2.3.2 Pemodelan struktur

Pemodelan struktur dengan 4 modelisasi, yaitu:

a. Struktur $6.2 \times 6.2 \times 6.2 \text{ m}^3$

Pemodelan ini dengan membagi area *raft* dengan luasan $6.2 \times 6.2 \text{ m}^2$ dan kedalaman *raft* 4 meter dengan kedalaman tanah 2 m. Pemodelan ini memperhatikan isolator berupa *Styrofoam* + *Plastic sheet* setebal 10 cm di permukaan beton dan lantai kerja setebal 10 cm. Pengaruh beton massa simetris di sisi-sisi tepi diperhitungkan dengan memberikan *boundary conditions*.

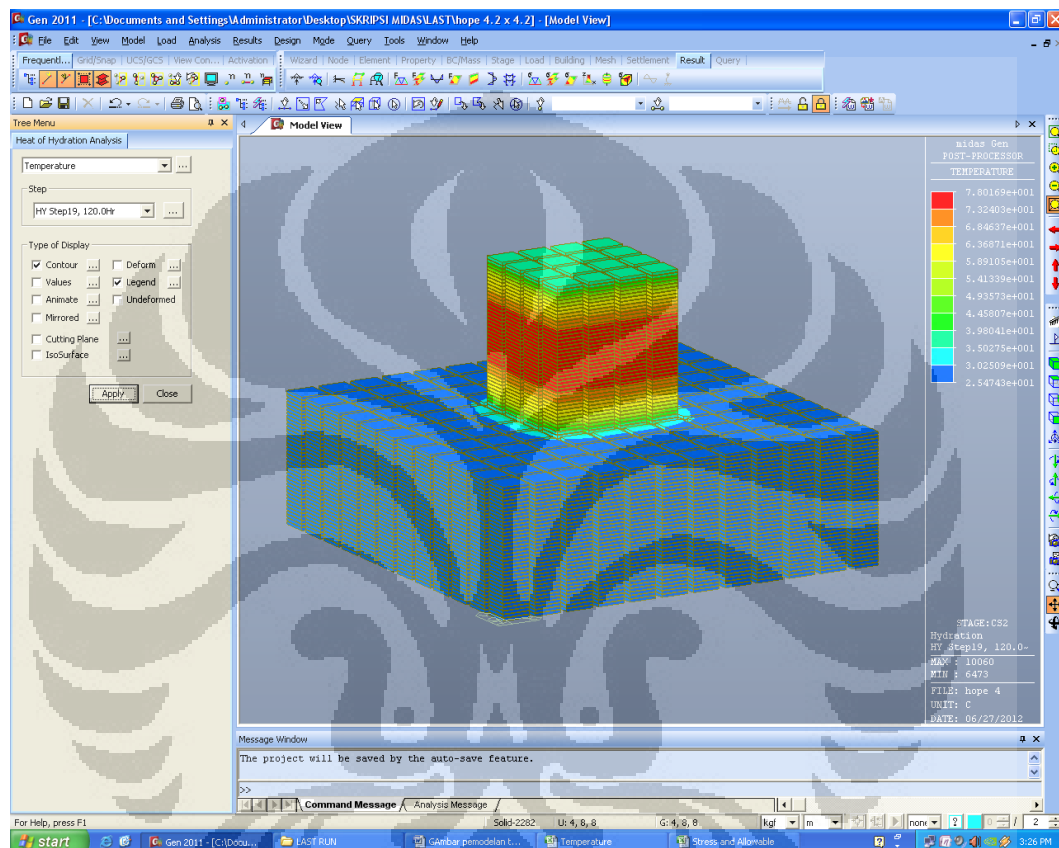


Gambar 4.3. Struktur $6.2 \times 6.2 \times 6.2 \text{ m}^3$

(Sumber : Olahan sendiri)

b. Struktur $4 \text{ m}^3 + \text{B tanah}$

Untuk pemodelan partial 4 m^3 untuk kedalaman 4 meter, diperhatikan pengaruh penyebaran tegangan vertikal terhadap tanah, dimana dimensi tanah yang diambil adalah B (B = 4 meter kedalaman pondasi). Selanjutnya pemodelan sama dengan struktur $6.2 \times 6.2 \times 6.2 \text{ m}^3$.

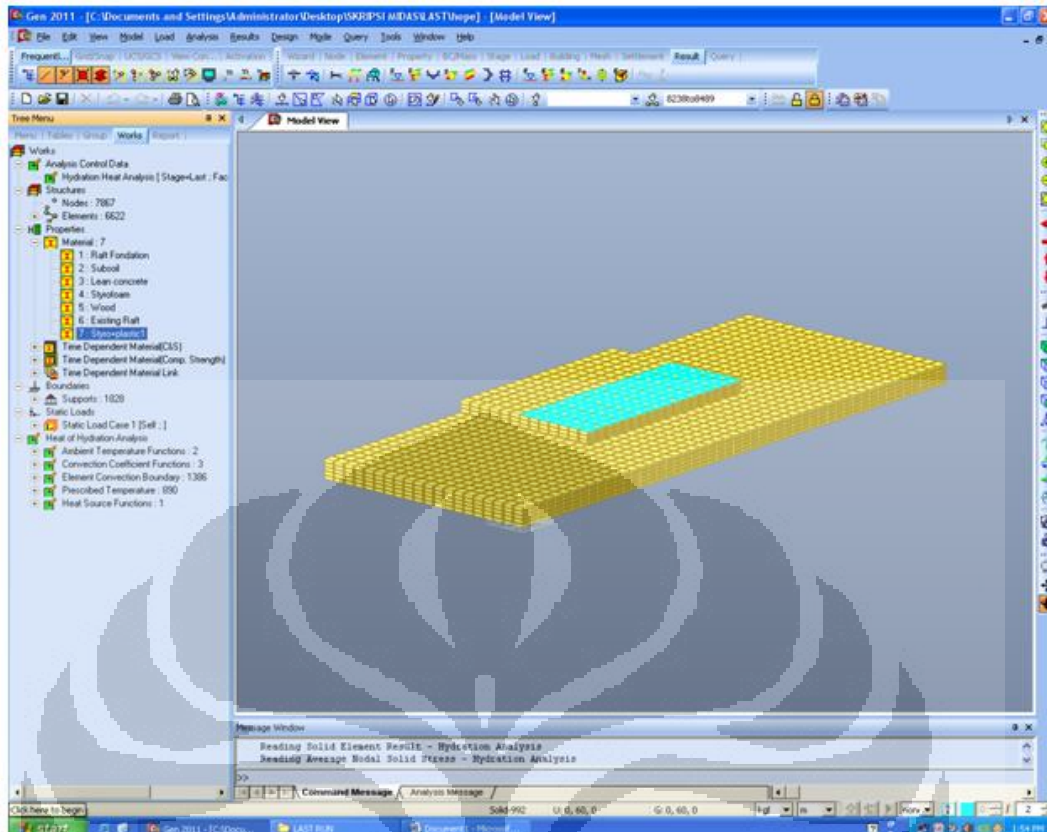


Gambar 4.4. Struktur $4 \text{ m}^3 + \text{B tanah}$

(Sumber : Olahan sendiri)

c. Struktur area *raft*

Pemodelan dilakukan secara menyeluruh terhadap area *raft* dengan memperhatikan sisi-sisi batas seperti *formwork*, subsoil, eksisting raft, lean concrete, dan isolator.

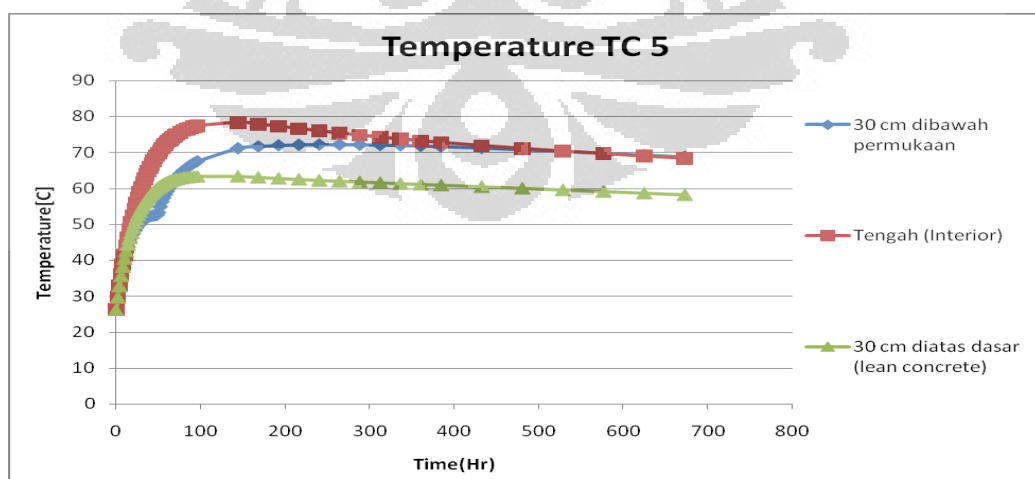


Gambar 4.5. Pemodelan Raft Foundation

(Sumber : Olahan sendiri)

4.2.3.3 Hasil Temperatur Pemodelan Midas Gen 2011

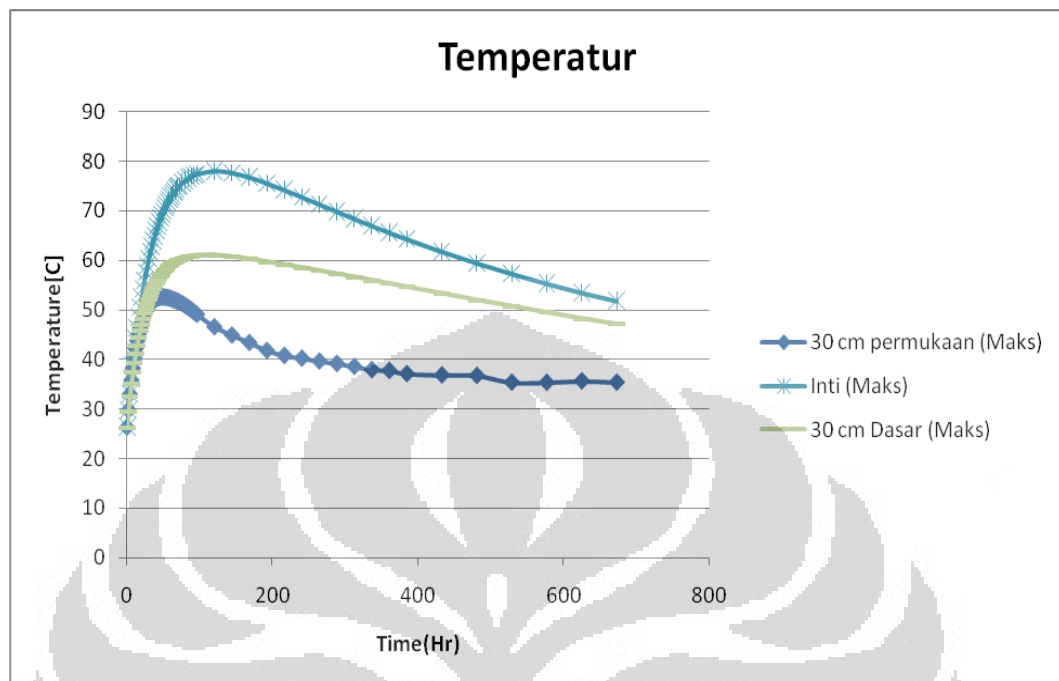
a. Struktur $6.2 \times 6.2 \times 6.2 \text{ m}^3$



Gambar 4.6. Hasil Midas Gen 2011 TC 5 ($6.2 \times 6.2 \times 6.2 \text{ m}^3$)

(Sumber : Olahan sendiri)

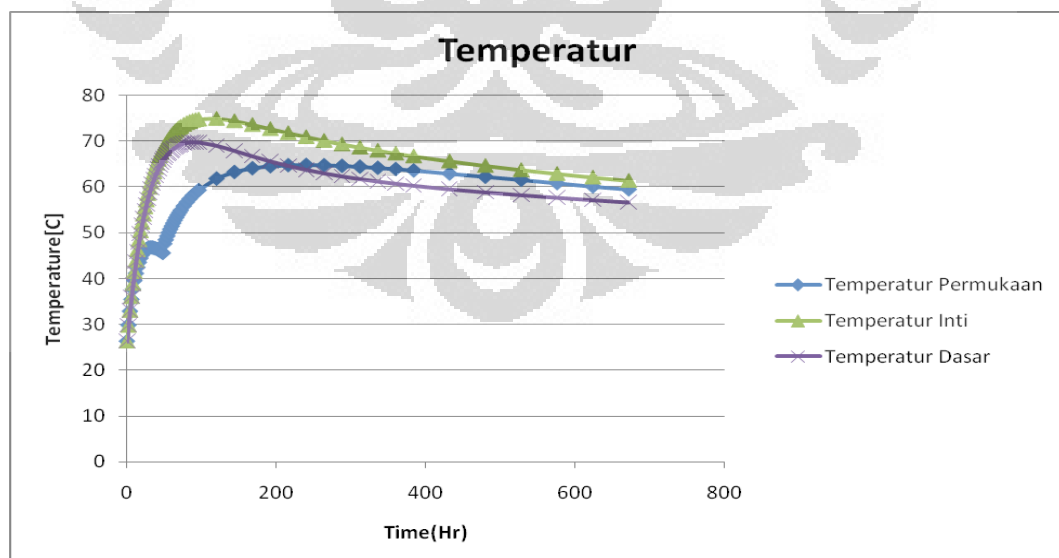
b. Struktur 4 m³ + B tanah



Gambar 4.7. Hasil MIDAS GEN 2011 TC 5 (Struktur 4 m³ + B tanah)

(Sumber : Olahan sendiri)

c. Struktur raft



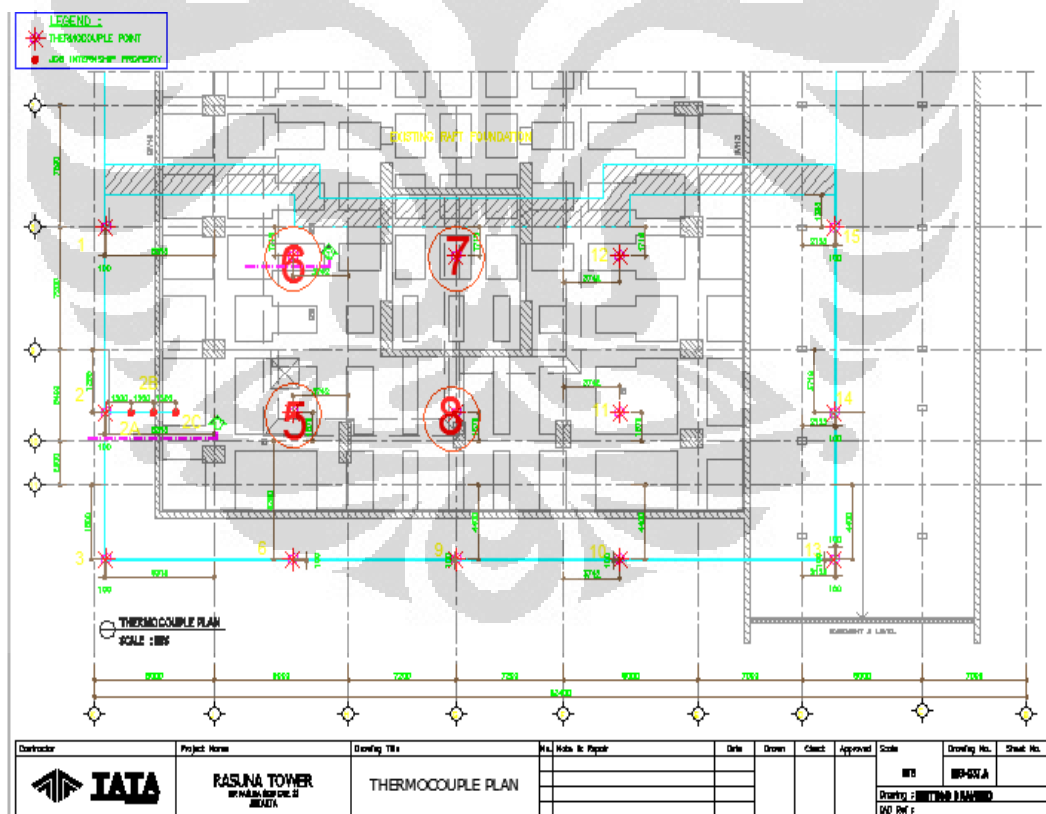
Gambar 4.8. Hasil Midas Gen 2011 TC 5 (raft foundation)

(Sumber : Olahan sendiri)

4.3 Kenaikan Temperatur, Temperatur Puncak, dan Perbedaan Temperatur

Pengecoran *raft foundation* Rasuna Tower dilaksanakan pada tanggal 27 April pukul 22.00 WIB – 29 April pukul 14.00 WIB dengan volume $\pm 3486 \text{ m}^3$. *Initial temperature* (T_i) rata-rata sebesar $26.27 \text{ }^\circ\text{C}$. Pengecoran dilakukan secara menerus tanpa dilakukannya *pour delay* sehingga pengendalian temperatur tidak dilakukan berdasarkan perbedaan temperatur inti dengan *final temperature*, tetapi pengendalian dilakukan terhadap temperatur permukaan beton. Pengendalian dilakukan dengan tidak diizinkan permukaan beton kontak langsung dengan ambient. Pengendalian ini dengan menggunakan lapisan insulasi.

Hasil pengukuran dan prediksi menggambarkan perilaku kenaikan temperatur, temperatur puncak, dan perbedaan temperatur antara permukaan, tengah dan dasar *raft foundation*. Pengukuran terhadap kedalaman 4 meter di lokasi titik TC 5, 6, 7, 8.

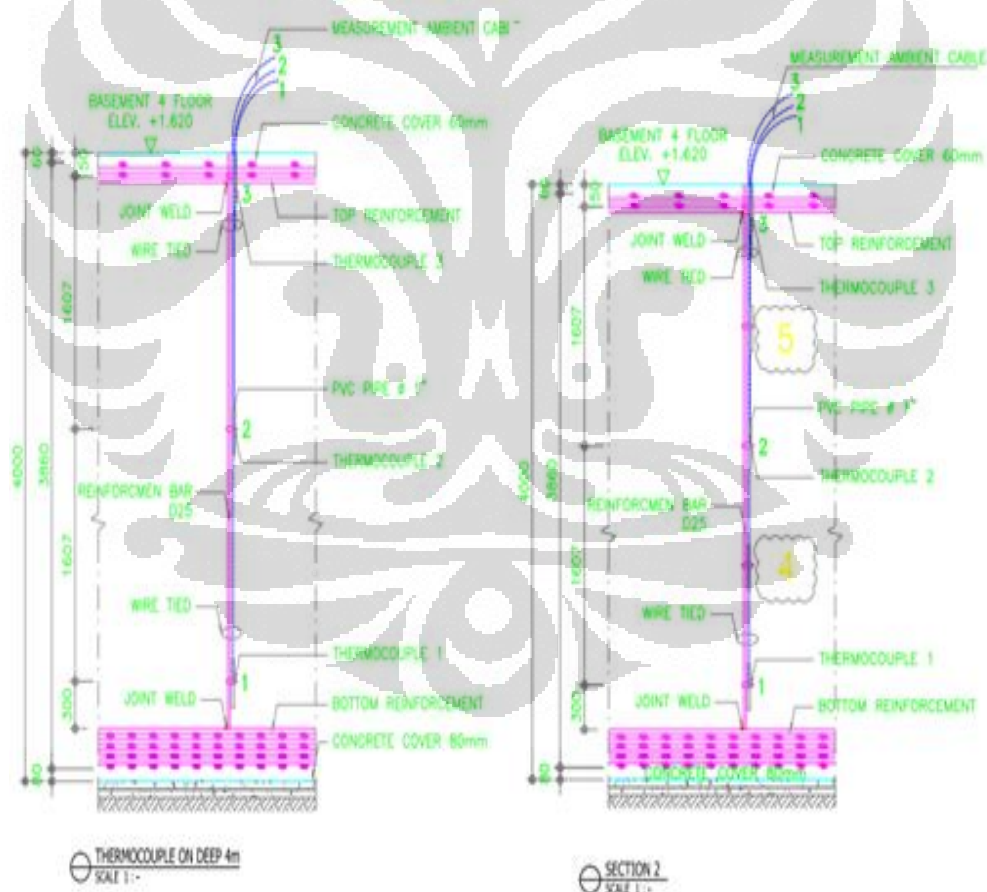


Gambar 4.9. Lokasi TC 5, TC 6, TC 7, TC 8

(Sumber : TATA, telah diolah kembali)

Pengontrolan temperatur permukaan dengan pemasangan 3 titik probe thermocouple pada ketebalan 4 meter. Untuk mengetahui perilaku pengaruh ketebalan terhadap perbedaan temperatur, maka TC 5 yang memiliki ketebalan 4 meter ditambah 2 titik probe.

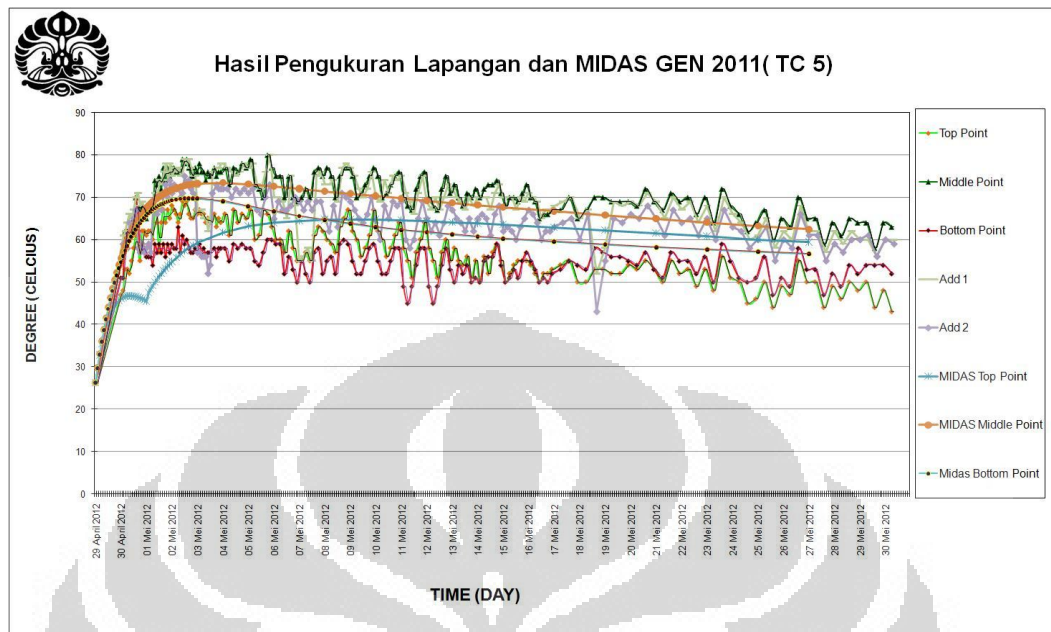
- TC 5 Jarak probe atas – permukaan = 15 cm, probe atas – tambahan 1 = 80.4 cm, tambahan 1 – tengah = 80.4 cm, tengah-tambahan 2 = 80.4 cm, dan tambahan 2 – dasar = 80.4 cm, dasar – lean concrete = 63.4 cm.
- TC 6, 7, 8 Jarak probe atas – permukaan = 15 cm, probe atas – tengah = 160.7 cm dan probe tengah – bawah = 160.7 cm, probe bawah – lean concrete = 63.6 cm.



Gambar 4.10. Instalasi thermocouple 3 dan 4 probe

(Sumber : TATA, telah diolah kembali)

4.3.2 Temperatur Puncak dan Kenaikan Temperatur



Gambar 4.11. Hasil pengukuran lapangan dan MIDAS GEN 2011 (TC 5)

(Sumber : Olahan sendiri)

Tabel 4.11. Temperatur puncak PCA, MIDAS GEN 2011, hasil pengukuran lapangan

Metode	PCA	Midas Gen 2011					Hasil Pengukuran Raft Foundation			
		TC 5	TC 6	TC 7	TC 8	TC 5	TC 6	TC 7	TC 8	
		6 M (CS2)	Raft (CS2)	Raft (CS2)	Raft (CS2)					Raft (CS2)
T_i	27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	
T_{maks} (Peak Temperature)	74	78.4	74.9	75.9	76.3	74.9	79	76	76	80
Waktu Peak hari ke-n		6	5	5	5	5	3	3	4	4
% perbedaan Peak Temperature dengan hasil pengukuran lapangan	4.8232		5.18987342	0.131578947	0.39473684	6.375				

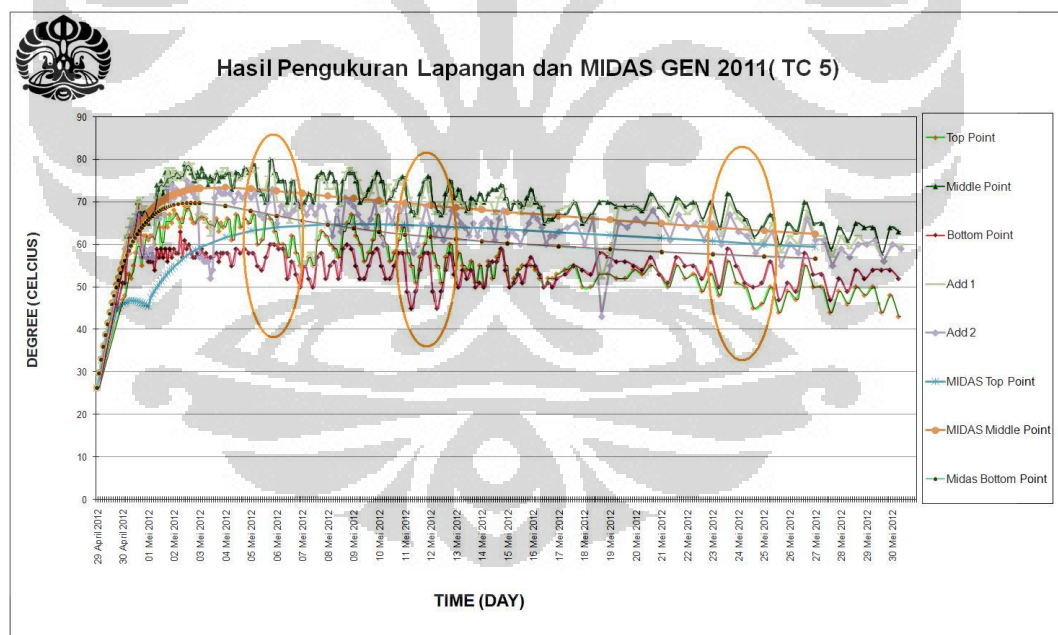
(Sumber : Olahan sendiri)

Dari tabel diatas perbedaan temperatur puncak yang terjadi antara hasil prediksi PCA, MIDAS GEN 2011 dan pengukuran lapangan pada ketebalan 4 meter tidak jauh berbeda.

Kenaikan temperatur mulai terjadi saat beton di tuang sampai hari ke 3 atau 4 karena proses hidrasi terjadi secara besar pada umur-umur awal beton (1-3

hari), maka pada proses ini beton tidak boleh diganggu. Gambar 4.11 menunjukkan temperatur bersifat fluktuatif setelah mencapai temperatur puncak. Keadaan fluktuatif ini mengindikasikan panas yang terlepas terhambat akibat ketebalan beton dan penggunaan lapisan insulasi di permukaan berupa 3 lapis styrofoam + 3 lapis plastik dengan ketebalan 10 cm dan pasir setebal 10 cm pada area kolom dan *rip beam*.

Temperatur yang fluktuatif ini dapat teratasi dengan metode buka tutup lapisan insulasi. Penggunaan metode ini perlu diperhatikan selisih temperatur setelah pembukaan lapisan insulasi, jika temperatur terlalu cepat turun pada pengukuran setelah pembukaan insulasi, maka lapisan insulasi harus dipasang kembali karena dapat menimbulkan *thermal shock* (gambar 2.8). Pengukuran selanjutnya dapat dilakukan 1-2 jam setelah lapisan insulasi dilepas. Metode ini dapat digunakan setelah temperatur beton mengalami penurunan selama ± 3 hari setelah beton mengalami temperatur puncak.



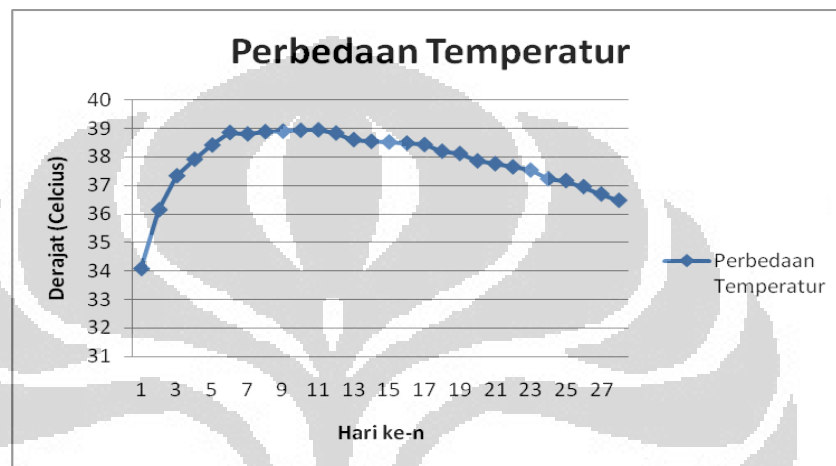
Gambar 4.12. Waktu metode buka tutup dapat dilakukan

(Sumber : Olahan sendiri)

4.3.3 Perbedaan Temperatur

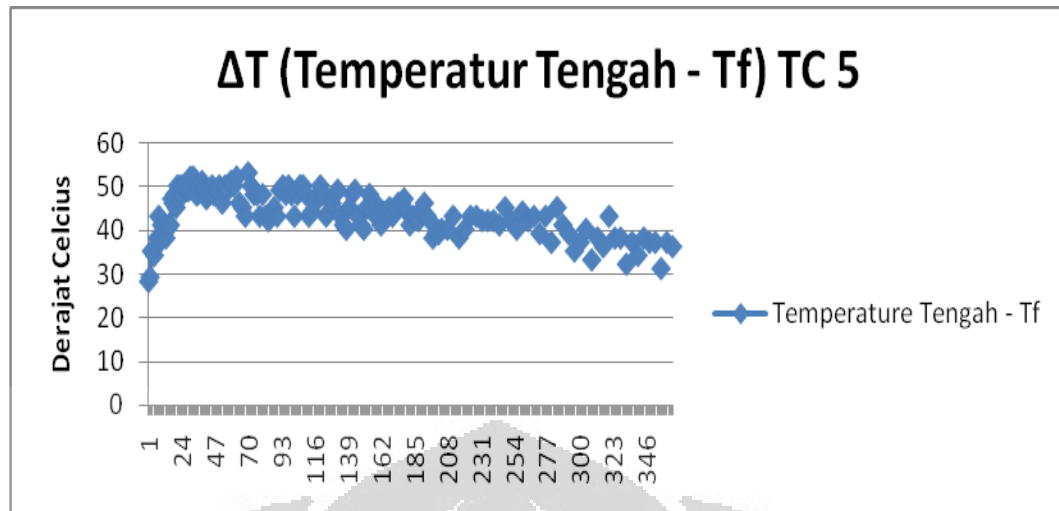
Perbedaan temperatur perlu dikendalikan untuk mencegah terjadinya perbedaan yang melebihi 20 °C karena dapat menimbulkan retak termal pada beton.

4.3.3.1 Perbedaan Temperatur Metode U.S Bureau of Reclamation



Gambar 4.13. Perbedaan temperatur (ΔT) metode U.S Bureau of Reclamation
(Sumber : Olahan sendiri)

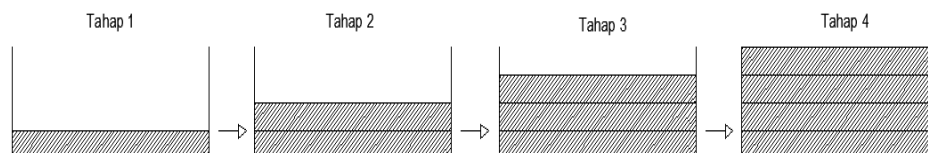
Hasil prediksi diatas dengan menggunakan metode U.S. Bureau of Reclamation, adalah $\Delta T > 20$ °C, sehingga beton massa potensial retak termal. Dengan tebal 4 meter, temperatur maksimum dihasilkan tinggi karena besarnya penggunaan semen. Perbedaan temperatur dari hasil metode tersebut merupakan pengukuran dari inti beton massa dengan selisih *final temperature* (stable temperature). Hasil tersebut tidak jauh berbeda apabila hasil pengukuran perbedaan temperatur *raft foundation* Rasuna Tower ketebalan 4 meter dilakukan dari selisih temperatur inti dengan *final temperature*.



Gambar 4.14. Perbedaan temperatur Tengah – T_f TC 5

(Sumber : Olahan sendiri)

Metode U.S Bureau of Reclamation kurang efektif digunakan untuk pengecoran *raft foundation* Rasuna Tower karena dilakukan menerus dengan ketebalan 4 meter dan berbeda metode pengendalian temperatur. Penggunaan metode U.S Bureau of Reclamation efektif digunakan jika pengecoran *raft foundation* Rasuna Tower setebal 4 meter dilakukan bertahap (*pour delay*) dan dilakukan pengendalian temperatur terhadap temperatur puncak (inti beton). Untuk menjaga perbedaan temperatur, pada umumnya temperatur inti diturunkan dengan mengalirkan air dingin melalui pipa (*embedded pipe*) dan menurunkan *initial temperature*. Tahapan dan pengendalian tersebut digunakan untuk mengontrol perubahan temperatur sehingga retak termal dapat dikendalikan. Metode ini tidak memperhatikan penggunaan lapisan insulasi pada permukaan beton. Metode U.S Bureau of Reclamation pada umumnya dilakukan pada bendungan.



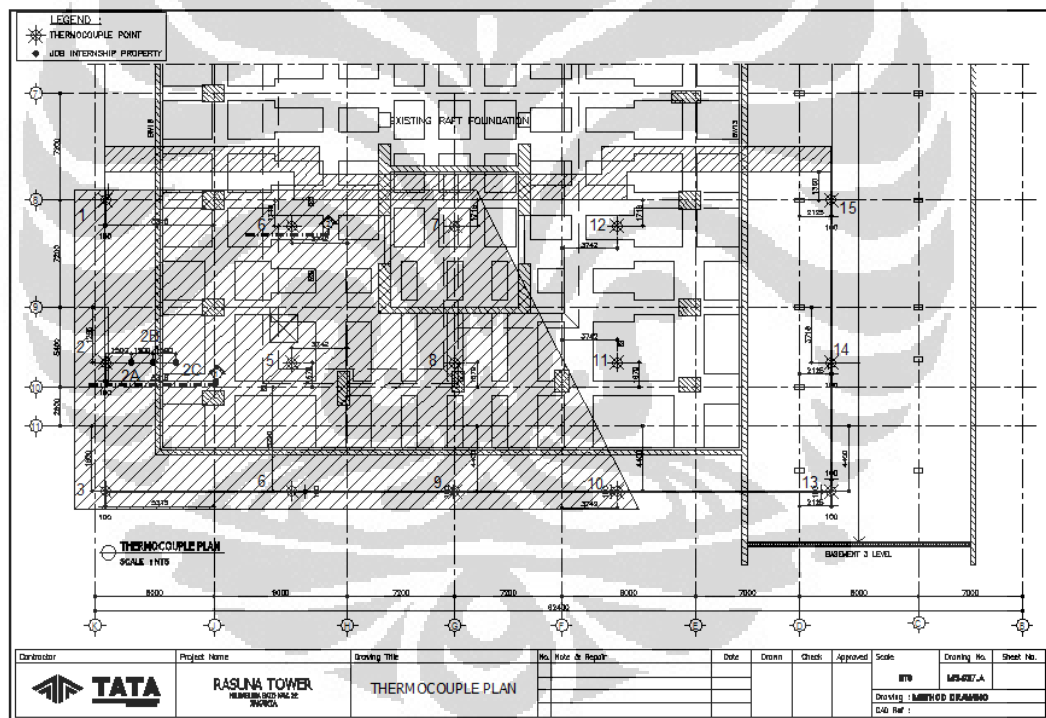
Gambar 4.15. Tahapan metode U.S Bureau of Reclamation

(Sumber : Olahan sendiri)

Metode U.S Bureau of Reclamaion jarang dipakai pada pengecoran *raft* karena pengendalian temperatur dengan menggunakan *embedded pipe* memerlukan biaya lebih.

4.3.3.2 Pengukuran Lapangan dan Midas Gen 2011

Pengendalian temperatur dilapangan dengan mengendalikan temperatur permukaan. Temperatur permukaan ditutup dengan lapisan insulasi setelah beton mengalami *initial setting* (± 8 jam setelah pengecoran), sehingga pelepasan panas pada permukaan terhambat dan tidak terdapat kontak dengan ambient. Penggunaan lapisan insulasi dilakukan setelah 48 jam pengecoran, dimana terjadi keterlambatan pemasangan lapisan insulasi.

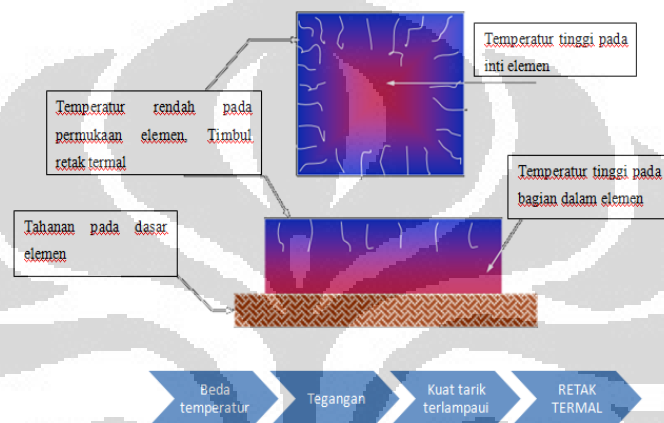


Gambar 4.16. Daerah diarsir (TC 5, 6, 7, dan 8) mengalami keterlamabatan pemasangan lapisan insulasi

Sumber : (Sella Adinda C, 2012)

Pemodelan dengan MIDAS GEN 2011 diambil berdasarkan pengecoran dan pengendalian temperatur yang dilakukan di lapangan. Lapisan styrofoam dan plastik dipasang setelah 48 jam pengecoran.

Pengendalian temperatur permukaan dilakukan karena beton dituang secara menerus untuk ketebalan 4 meter, sehingga menghasilkan panas yang tinggi, tetapi terhambat dalam pelepasannya. Penuangan dalam volume besar secara langsung dapat menimbulkan temperatur inti yang tinggi. Oleh karena itu diberikan lapisan insulasi untuk pengontrolan temperatur permukaan, sehingga selisih temperatur dapat dikendalikan dan terhindar dari potensi retak termal, seperti terlihat pada gambar 4.17 dibawah.

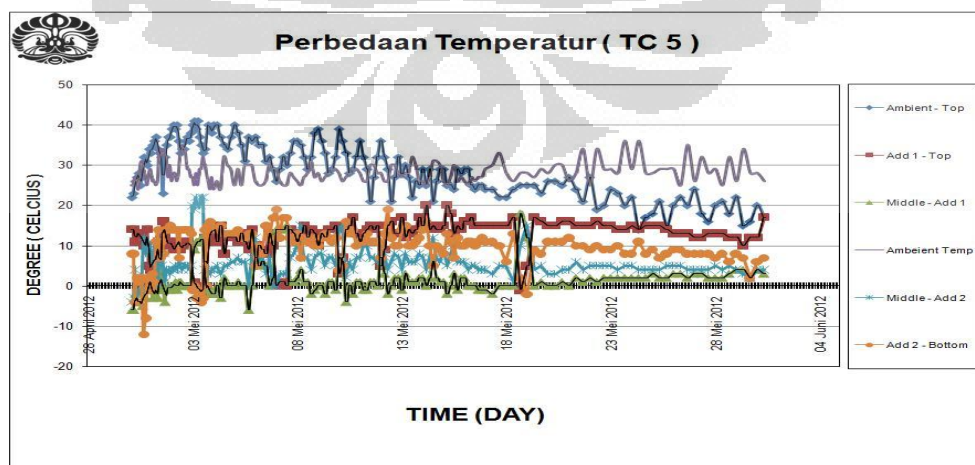


Gambar 4.17. Pengaruh perbedaan temperatur

(Sumber : Tumilar, 2011)

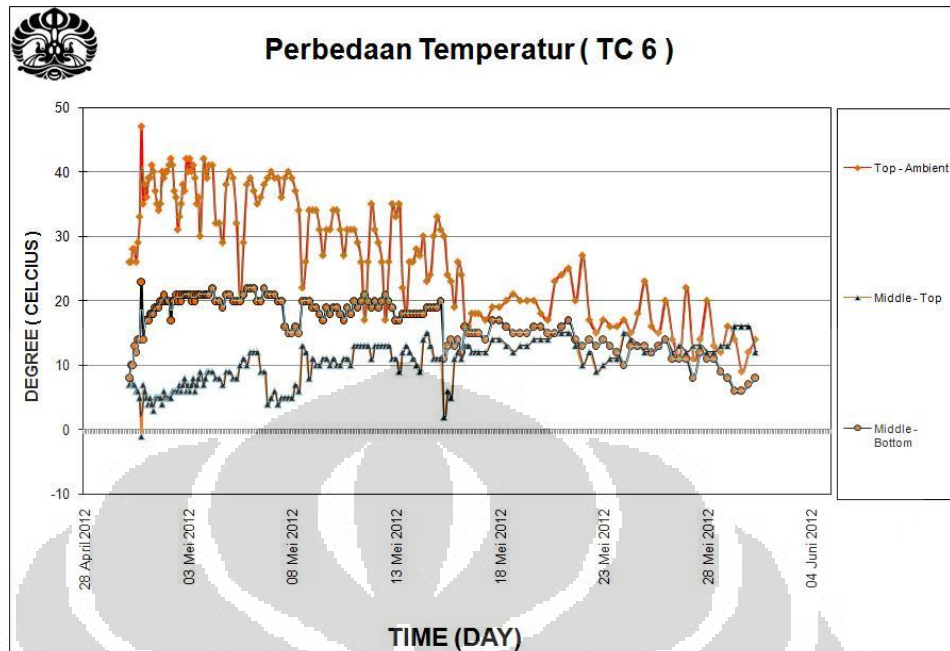
Berikut hasil perbedaan temperatur inti dan permukaan

a. Perbedaan temperatur hasil pengukuran lapangan



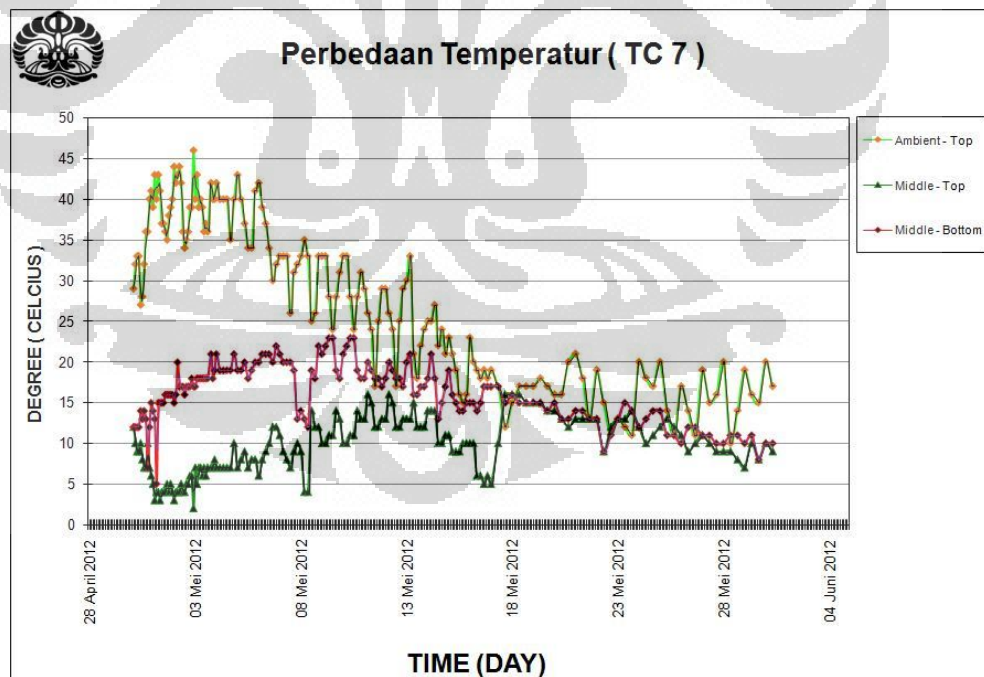
Gambar 4.18. Perbedaan temperatur TC 5

(Sumber : Olahan sendiri)



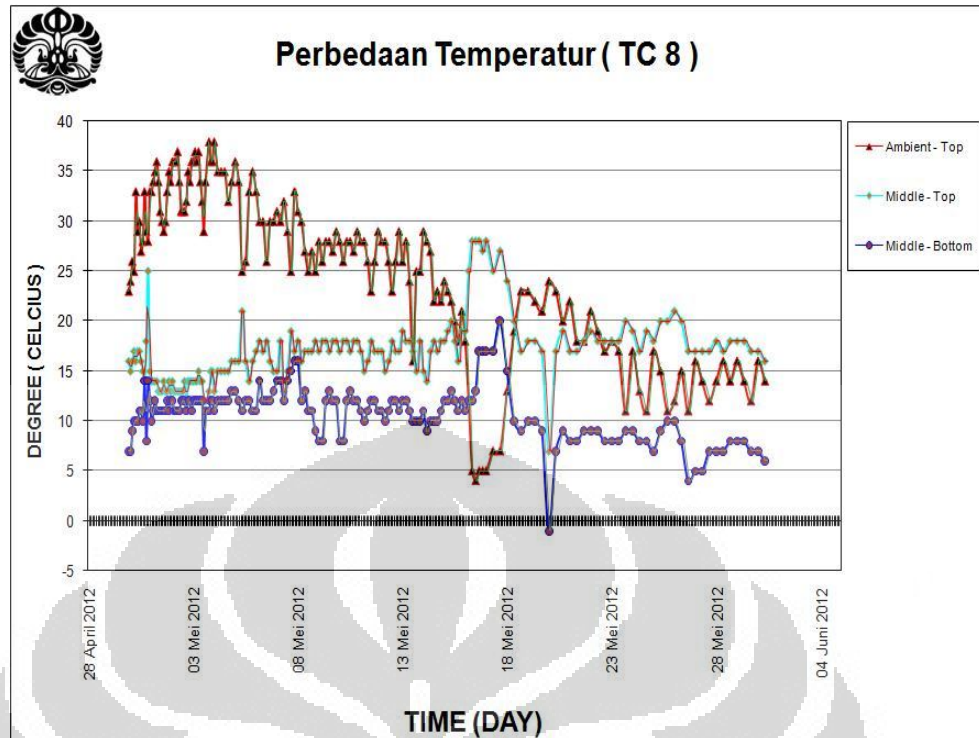
Gambar 4.19. Perbedaan temperatur TC 6

(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.20. Perbedaan Temperatur TC 8

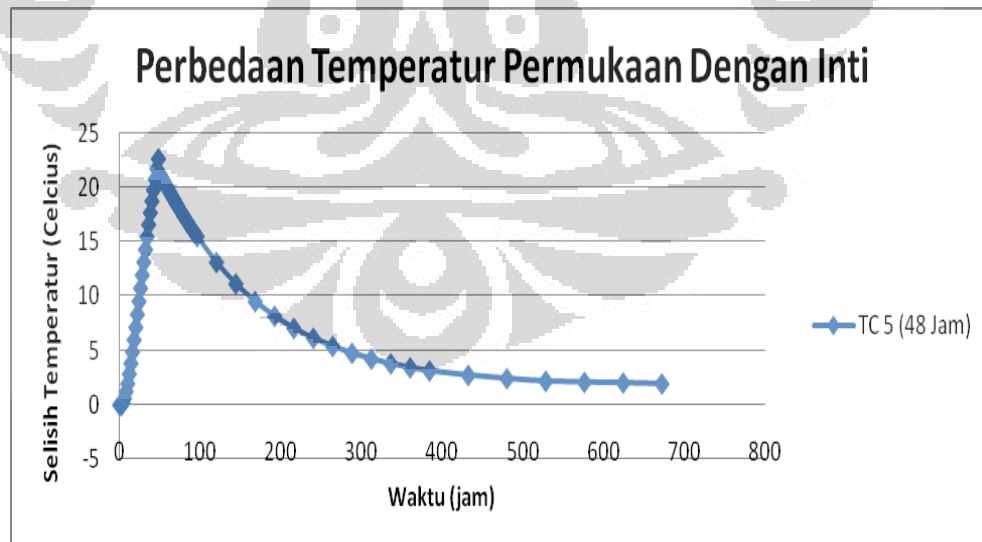
(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.21. Perbedaan Temperatur TC 8

(Sumber : Olahan sendiri)

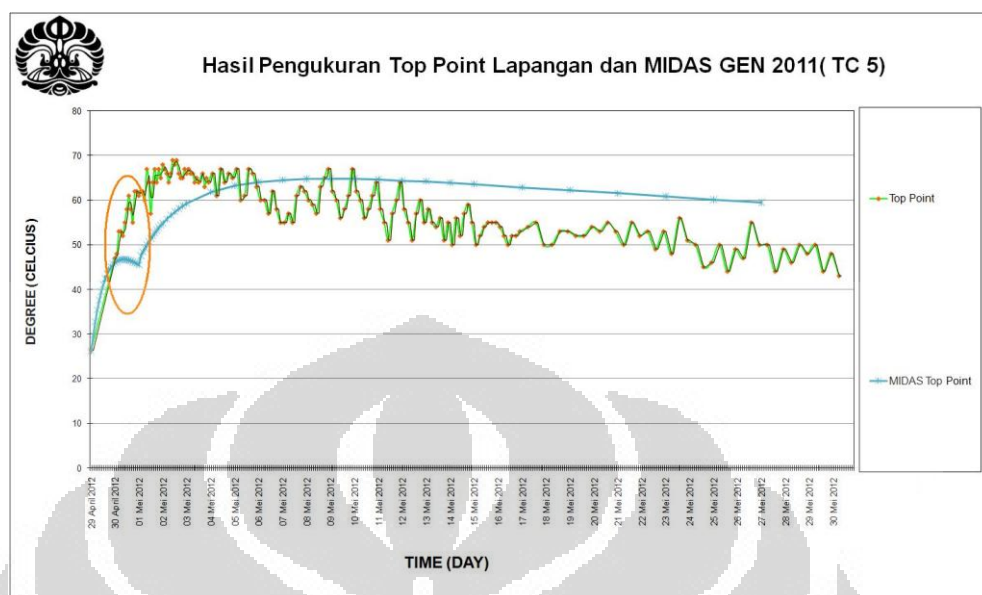
b. Perbedaan temperatur MIDAS GEN 2011



Gambar 4.22. Perbedaan temperatur TC 5 MIDAS GEN 2011

(Sumber : MIDAS GEN 2011, telah diolah kembali)

c. Temperatur permukaan TC 5 hasil pengukuran dan MIDAS GEN 2011



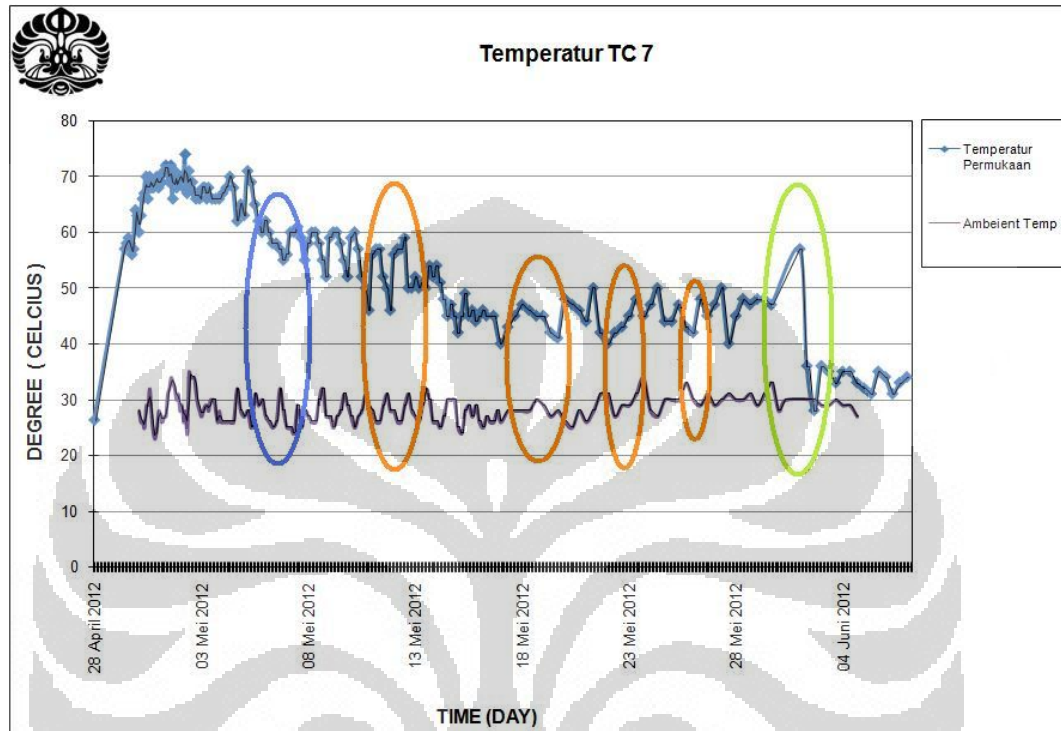
Gambar 4.23. Grafik pengukuran temperatur permukaan hasil pengukuran dan MIDAS GEN 2011

(Sumber : Olahan sendiri)

Pengukuran lapangan dilakukan setelah ± 24 jam pengecoran dan penutupan lapisan insulasi setelah ± 48 jam pengecoran (TC 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Pemodelan MIDAS GEN 2011 dimulai dari pengecoran sampai dilakukan penutupan lapisan insulasi 48 jam setelah pengecoran dan dianalisa selama 28 hari. Dari hasil pengukuran dan MIDAS GEN 2011, temperatur permukaan rendah pada saat belum dilakukan penutupan lapisan insulasi karena panas yang terlepas lebih banyak dan adanya pengaruh dari ambient. Dari grafik perbedaan temperatur tengah dan inti terjadi peningkatan yang cepat pada 48 jam pertama sampai $\Delta T \geq 20$ °C. Perbedaan ini dapat terlihat jelas pada pemodelan MIDAS GEN 2011, sedangkan pada hasil pengukuran perbedaan temperatur fluktuatif tetapi menunjukkan kecenderungan menurun berdasarkan waktu. Perbedaan temperatur yang melebihi 20 °C karena keterlambatan pemasangan lapisan insulasi, sehingga panas permukaan lebih cepat lepas daripada temperatur inti.

Perbedaan temperatur permukaan dengan ambient (temperatur udara) diperhatikan untuk menentukan pemberhentian monitoring. Sedangkan temperatur

udara memiliki pengaruh terhadap temperatur permukaan *raft foundation*, meskipun terdapat beberapa titik yang memiliki perilaku temperatur aneh pada waktu tertentu.

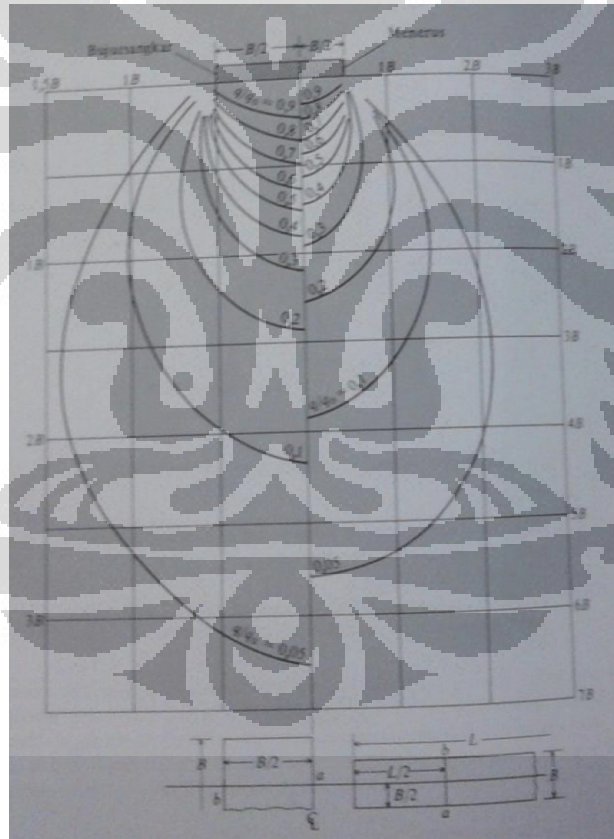


Gambar 4.24. Pengaruh temperatur udara terhadap temperatur permukaan
(Sumber : Olahan sendiri)

Pada gambar 4.24, lingkaran jingga memberikan gambaran temperatur udara rendah berpengaruh terhadap penurunan temperatur permukaan dan temperatur udara tinggi berpengaruh terhadap kenaikan temperatur permukaan. Terdapat beberapa waktu pengamatan yang berperilaku aneh, lingkaran biru pada waktu tersebut temperatur udara fluktuatif tetapi temperatur permukaan turun, gejala tersebut dapat terjadi karena terbukanya lapisan insulasi dan tidak tertutup rapat. Lingkaran hijau menunjukkan kenaikan temperatur permukaan, dimana seharusnya temperatur permukaan sudah cenderung menurun, gejala tersebut dapat terjadi karena proses hidrasi yang kurang sempurna.

4.4 Tegangan Tarik

Tegangan yang terjadi dianalisa dengan menggunakan MIDAS GEN 2011. Tegangan yang terjadi merupakan hasil dari *heat transfer analysis* seperti distribusi temperatur pada nodal yang ditinjau, dan perubahan material karena temperatur, rangkai, susut dsb. Pemodelan dilakukan dengan *construction stage* dimana penutupan lapisan insulasi dilakukan setelah 2 jam pengecoran. Pemodelan dilakukan dengan ukuran $4 \text{ m}^3 + B$ (gambar 4.4) dan struktur *raft* (4.5). Pemodelan dilakukan dengan memperhatikan transfer tegangan vertikal ke tanah dan membagi elemen dengan tujuan didapatkan analisa lebih mendetail terhadap perubahan temperatur dan tegangan pada nodal. Transfer tegangan vertikal diambil sebesar $B =$ ketebalan pondasi.

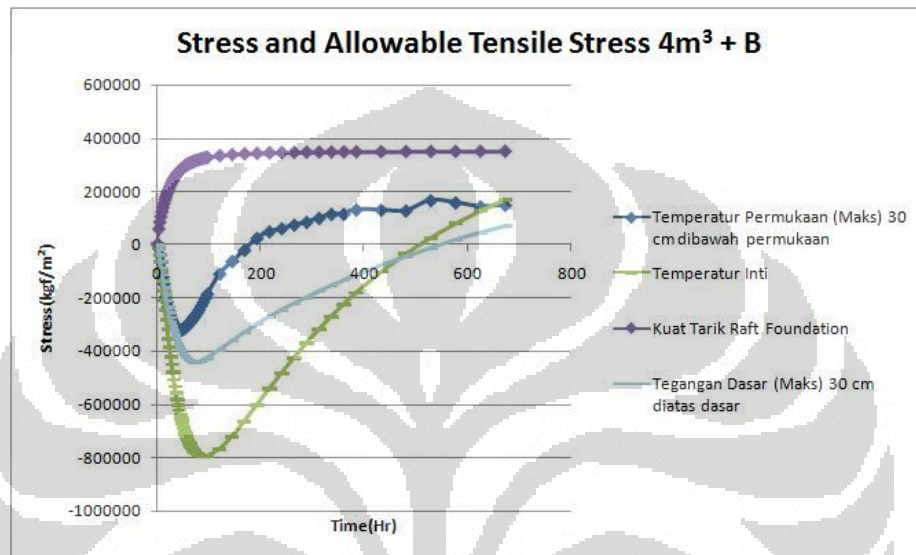


Gambar 4.25. Isobar tekanan vertikal yang didasarkan persamaan Boussinesq

(Sumber : Bowles, 1991)

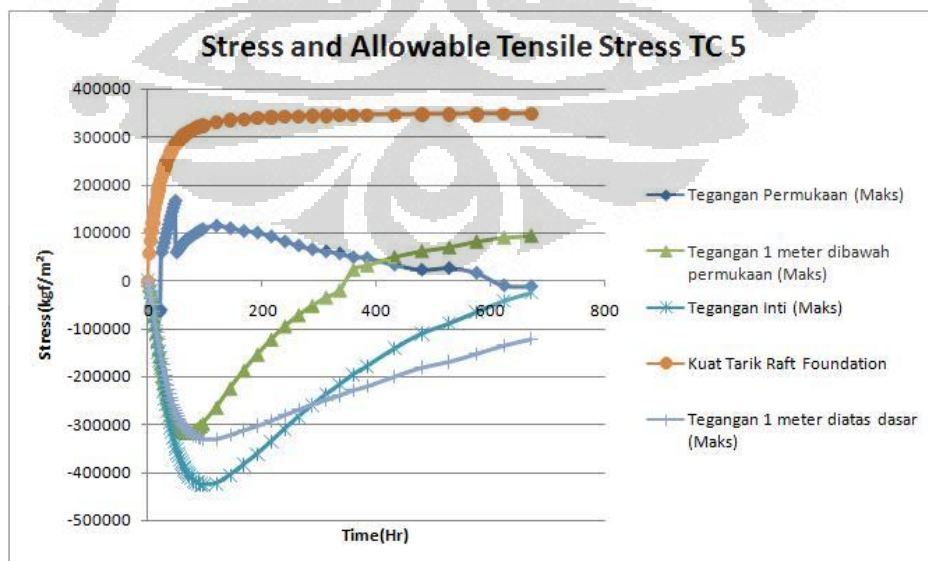
Gambar 4.25 persamaan Boussinesq diambil untuk mendapatkan pertambahan tegangan buat muatan ponasi akibat tanah. Tegangan yang diambil merupakan tegangan maksimum pada nodal arah X, Y, dan Z. Berikut *stress and allowable tensile stress* hasil modelisasi MIDAS GEN 2011 :

a. *Stress and allowable tensile stress* $4 \text{ m}^3 + B$

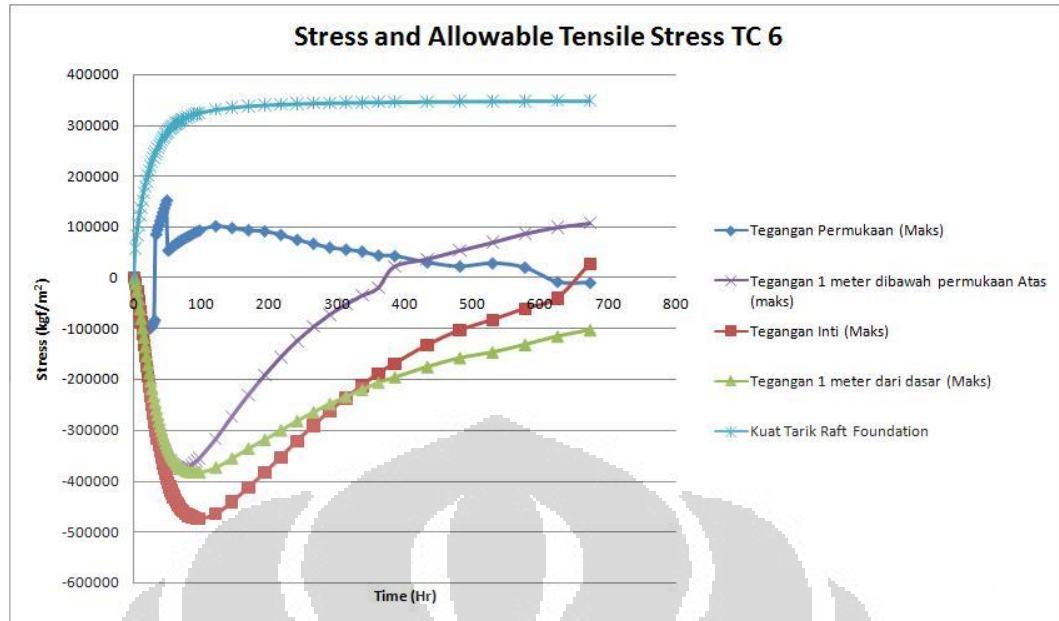


Gambar 4.26. *Stress and allowable tensile stress* $4 \text{ m}^3 + B$
(Sumber : Olahan sendiri)

b. *Stress and allowable tensile stress* struktur raft foundation



Gambar 4.27. *Stress and allowable tensile stress* TC 5
(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.28. *Stress and allowable tensile stress TC 6*

(Sumber : Olahan sendiri)

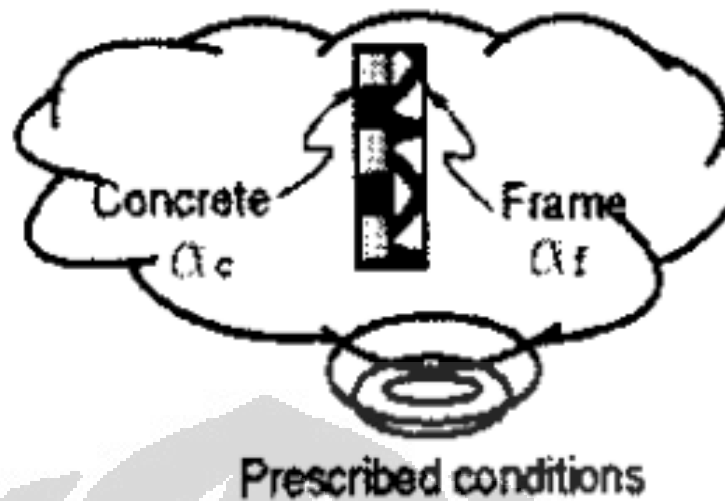
Dari grafik diatas terlihat tegangan yang terjadi pada TC 5 dan TC 6 sesaat setelah pengecoran adalah tegangan tekan. Tegangan tekan membesar dan mencapai puncak seiring dengan terjadinya temperatur puncak, TC 5 96 – 120 jam, TC 6 96 – 120 jam. Tegangan tekan menurun setelah terjadinya temperatur puncak, pada waktu tertentu terjadi tegangan tarik pada *raft foundation*.

Tegangan tekan pada permukaan struktur *raft* ketebalan 4 meter untuk TC 5 dan 6 terjadi setelah 32 -34 jam pengecoran, dan setelah itu terjadi tegangan tarik pada permukaan. Tegangan tarik yang terjadi tidak melebihi *allowable tensile strength*.

Perilaku tegangan dan temperatur diatas dapat dikarenakan:

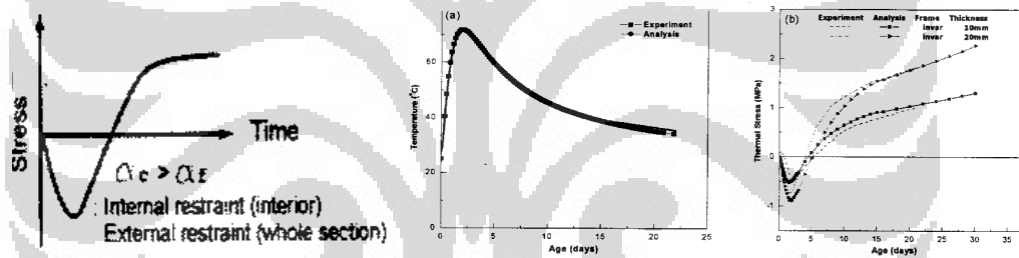
- Pengaruh *Thermal Expansion Coefficient* dari *frame* (α_f)

Berdasarkan penelitian Muhammad Nasir Amin dan Kim Jin Keun “Thermal Stress Simulation of Mass Concrete Using Thermal Stress Device” Penggunaan lapisan insulasi dan formwork yang memiliki *thermal expansion coefficient* kurang dari *thermal expansion coefficient* beton maka tegangan yang terjadi adalah tekan terlebih dahulu pada umur awal beton.



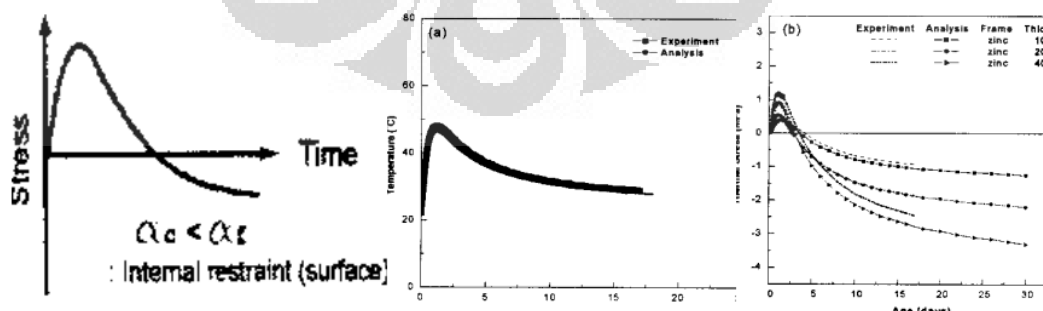
Gambar 4.29. *Prescribe condition dan thermal expansion coefficient concrete dan frame*

(Sumber : Amin, Kim, & Jeong, 2007)



Gambar 4.30. Hasil temperatur dan tegangan simulasi beton massa dengan frame invar ($\alpha_c > \alpha_{invar}$)

(Sumber : Amin, Kim, & Jeong, 2007)



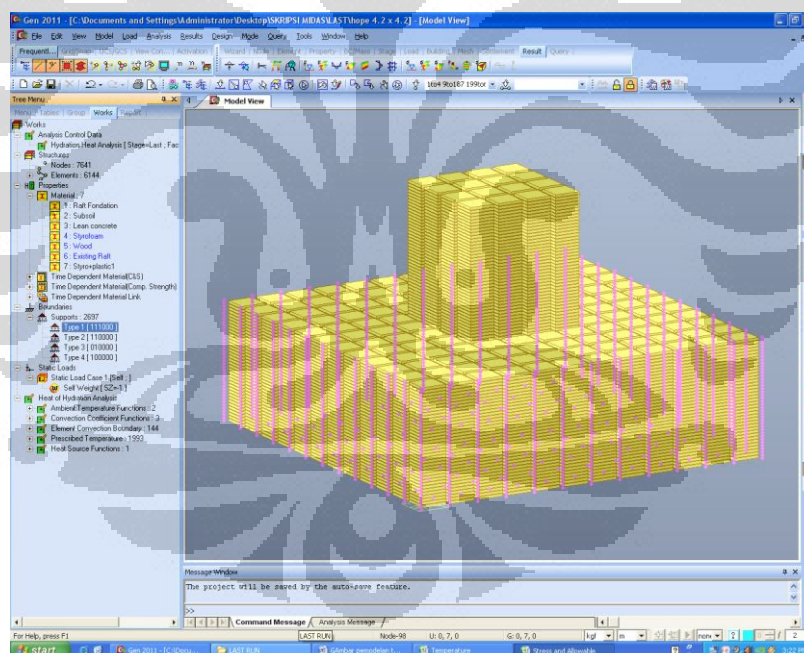
Gambar 4.31. Hasil temperatur dan tegangan simulasi beton massa dengan frame zinc ($\alpha_c < \alpha_{zinc}$)

(Sumber : Amin, Kim, & Jeong, 2007)

Dari hasil modelisasi beton massa dengan MIDAS GEN 2011, menggunakan lapisan insulasi styrofoam+plastic (10 cm) di permukaan dan *formwork* berupa wood (2.5 cm) + styrofoam (10 cm) dengan *Thermal Expansion Coefficient* dari *frame* (α_f) < *Thermal Expansion Coefficient* beton ($\alpha_c = 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$) beton. Sehingga tegangan yang terjadi di umur awal beton adalah tekan.

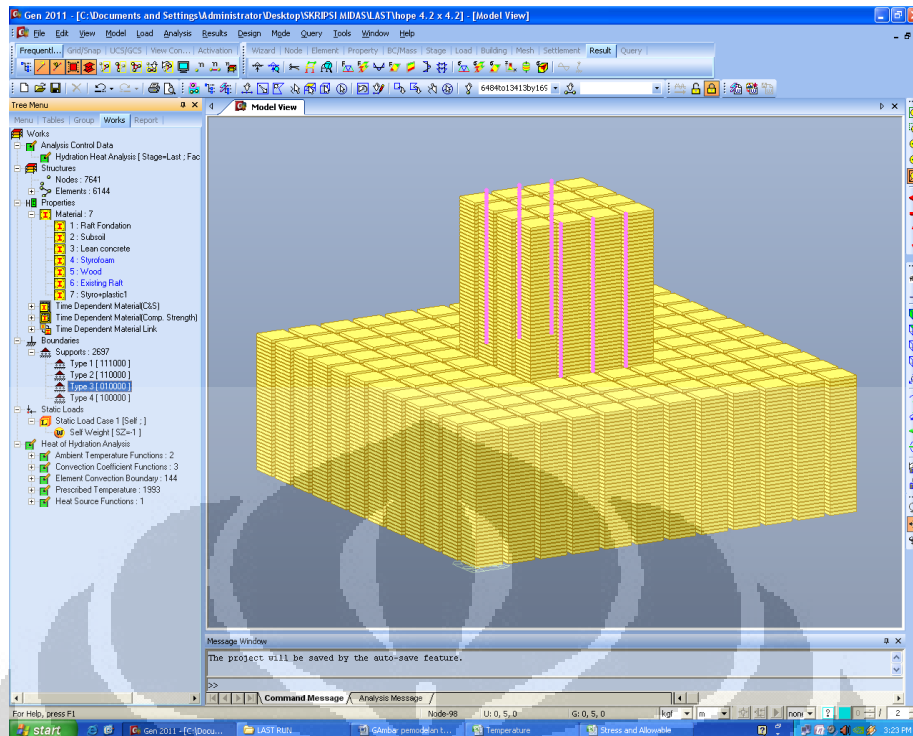
b. Boundary Condition

Analisa struktur 4 m³ + B dan raft dibatasi terhadap boundary yang diberikan terhadap struktur. Boundary condition yang diberikan meliputi *heat analysis* dan *thermal analysis*. Untuk pemodelan 4 m³ + B dilakukan boundary terhadap subsoil dan kondisi simetri. Pemodelan struktur *raft* dilakukan boundary terhadap subsoil dan *eksisting raft*.



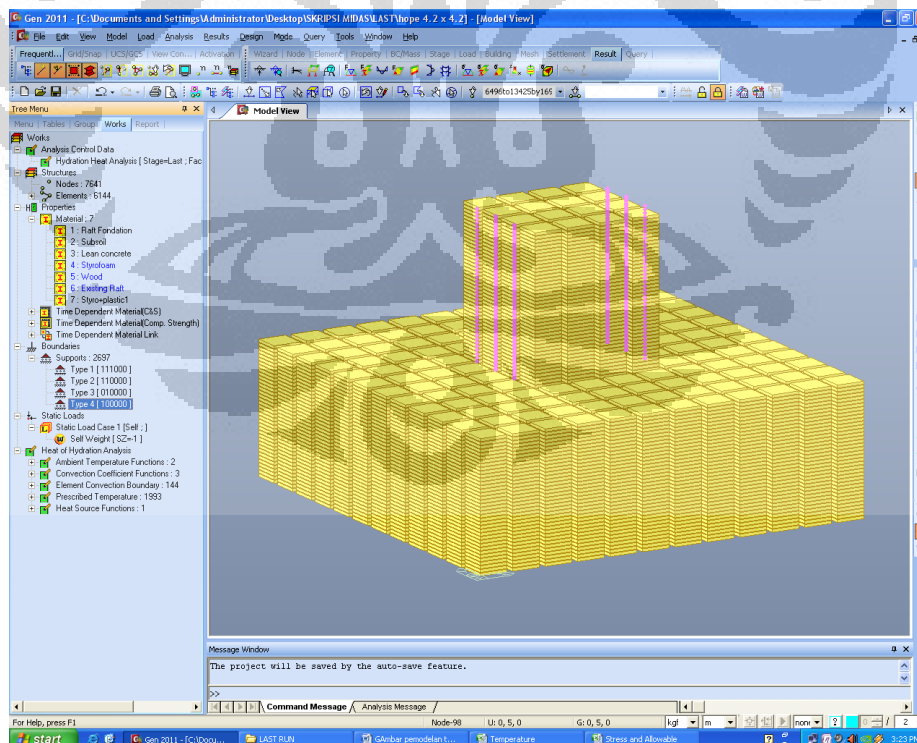
Gambar 4.32. Subsoil boundaries (DX, DY, DZ)

(Sumber : Olahan sendiri)



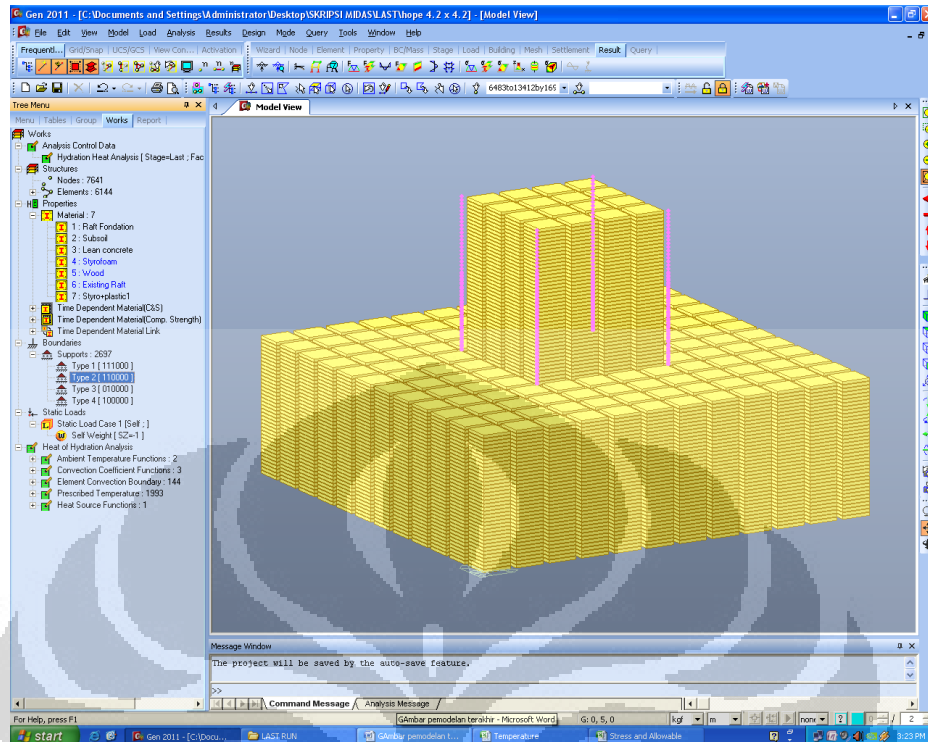
Gambar 4.33. *Symmetric boundary conditions (DY)*

(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.34. *Symmetric boundary conditions (DX)*

(Sumber : Olahan sendiri)



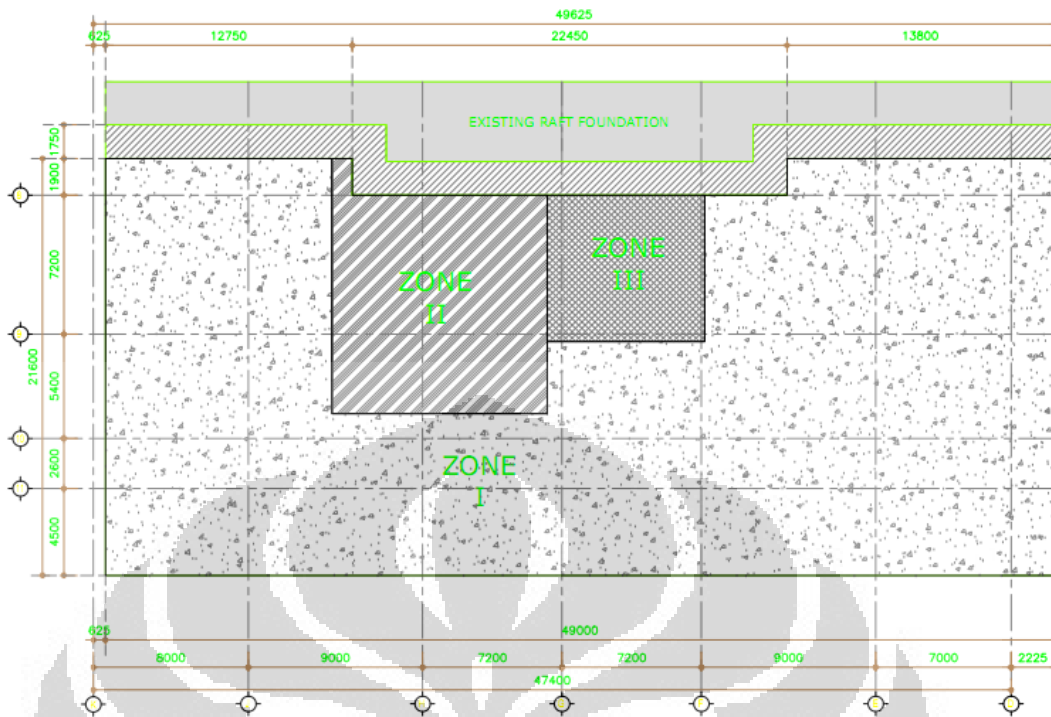
Gambar 4.35. *Symmetric boundary conditions (DX, DY)*

(Sumber : Olahan sendiri)

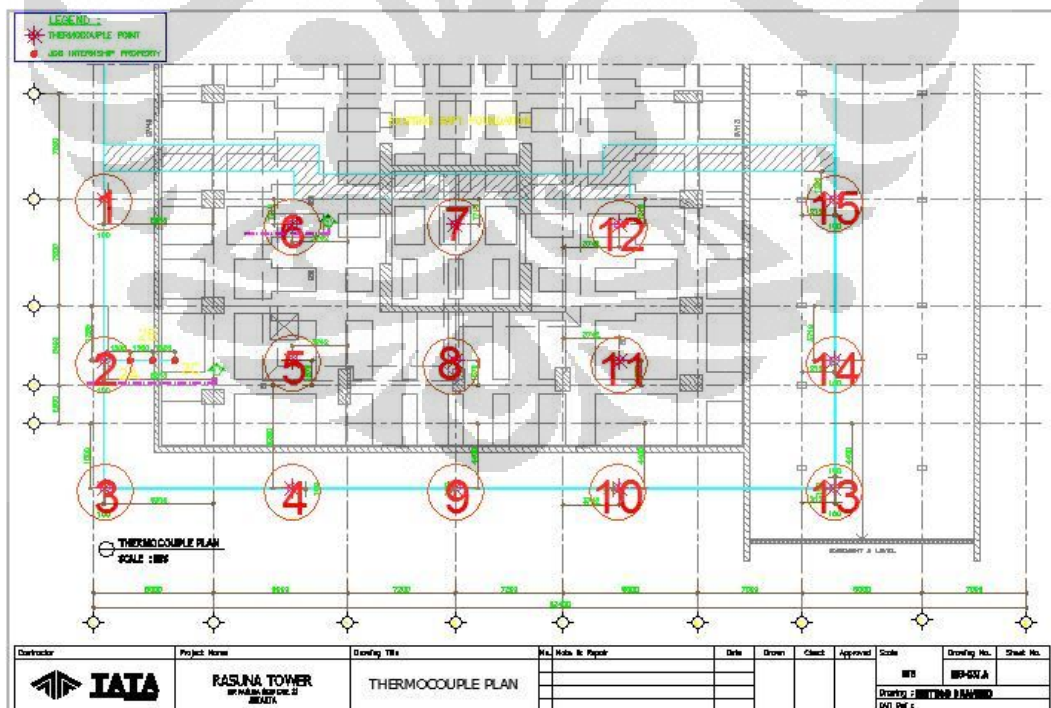
Boundary memberikan pengekangan terhadap nodal, sehingga nodal mengalami kondisi tekan pada umur awal. Tegangan tekan yang terjadi dapat dipengaruhi oleh kondisi boundary yang diberikan terhadap struktur.

4.5 Perbandingan Temperatur Ketebalan 4 meter dan 3 meter *Raft Foundation Rasuna Tower*

Raft foundation Rasuna Tower memiliki 2 beda kedalaman, kedalaman pertama 3 meter dan kedua adalah 4 meter pada area *core*. Gambar 4.36 zona I adalah area *raft* dengan ketebalan 3 meter, zona II dan III adalah area *raft* dengan ketebalan 4 meter. Pada kedua zona ini diamati 15 titik dengan pembagian 4 titik pada area *raft* dengan ketebalan 4 meter dan 11 titik pada area *raft* dengan ketebalan 3 meter. TC 2 dan TC 5 diberikan 2 tambahan thermocouple, seperti gambar 4.10.



Gambar 4.36. Gambar area 3 dan 4 meter
(Sumber : TATA, telah diolah kembali)



Gambar 4.37. Lokasi Thermocouple
(Sumber : TATA)

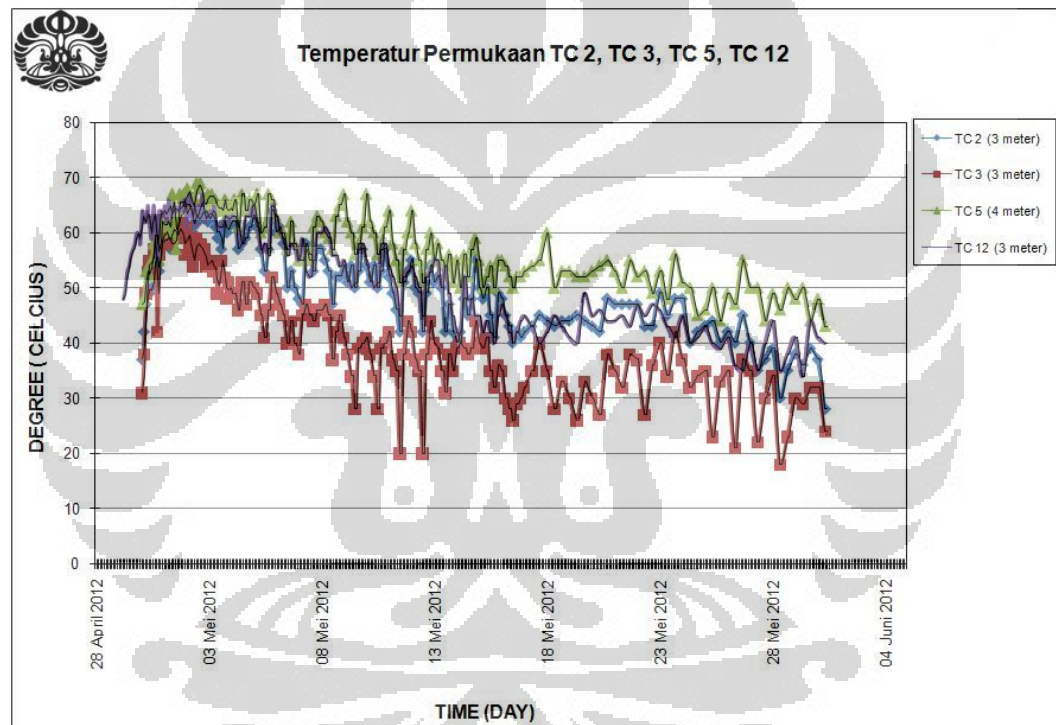
Tabel 4.12. Nomor thermocouple

Lokasi	
3 meter	4 meter
TC 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	TC 5, 6, 7, 8

(Sumber : Olahan sendiri)

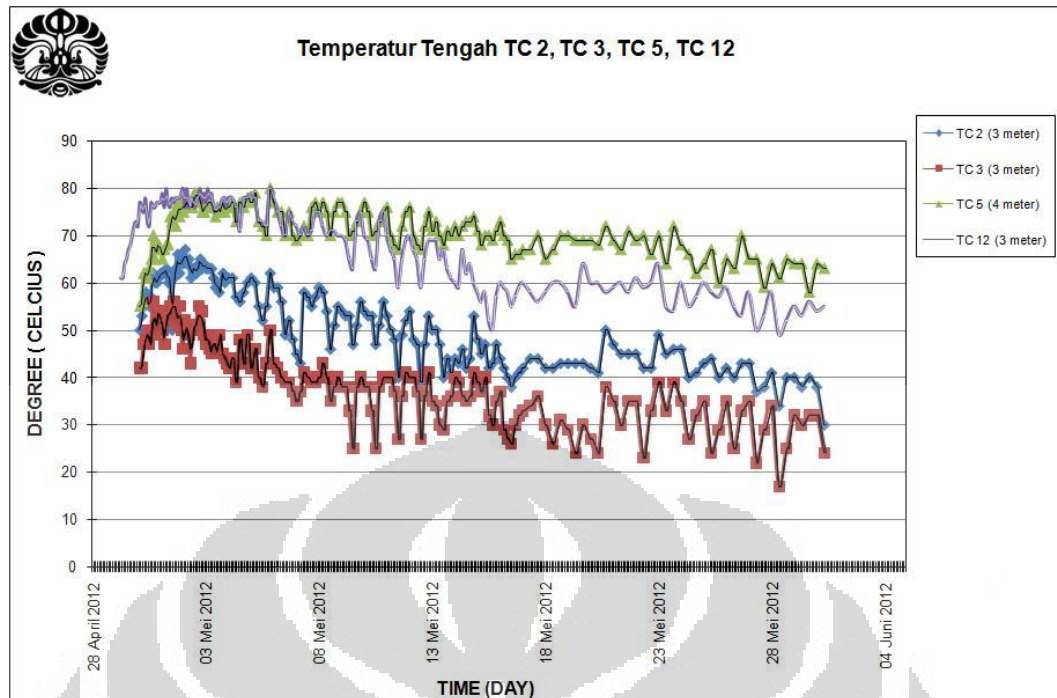
Dari lokasi *raft foundation* terdapat penempatan posisi TC hanya berjarak 10 cm dari *formwork*, yaitu TC 1, 2, 3, 4, 9, 10, 13, 14, 15.

4.5.1 Kenaikan dan Perilaku Temperatur



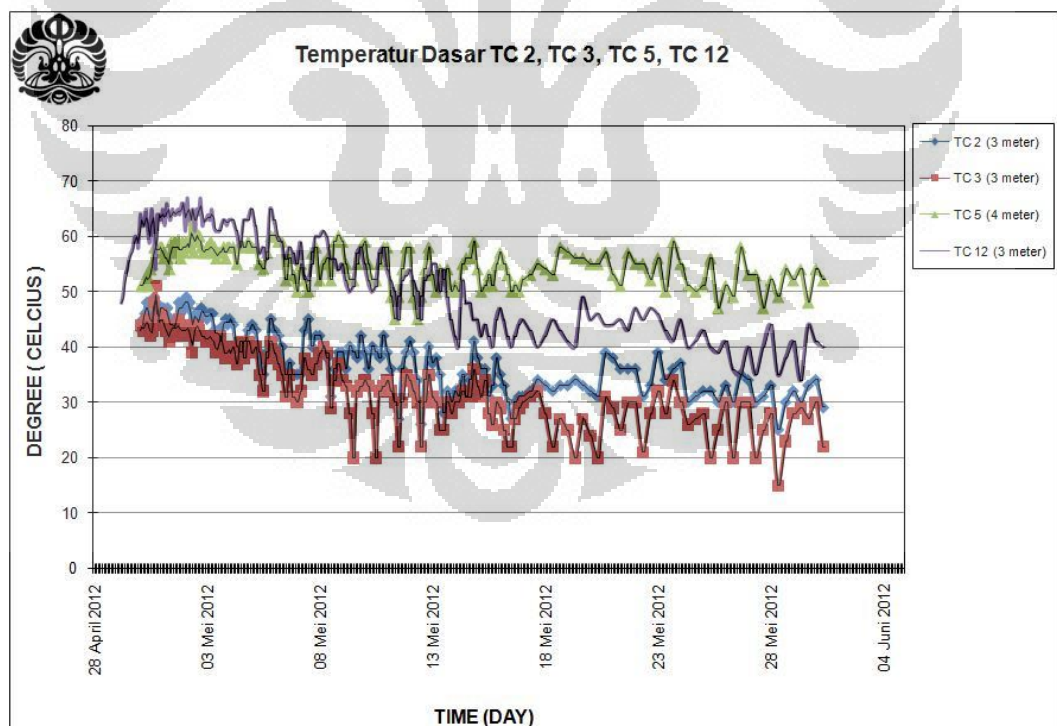
Gambar 4.38. Temperatur permukaan TC 2, TC 3, TC 5, TC 12

(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.39. Temperatur tengah TC 2, TC 3, TC 5, TC 12

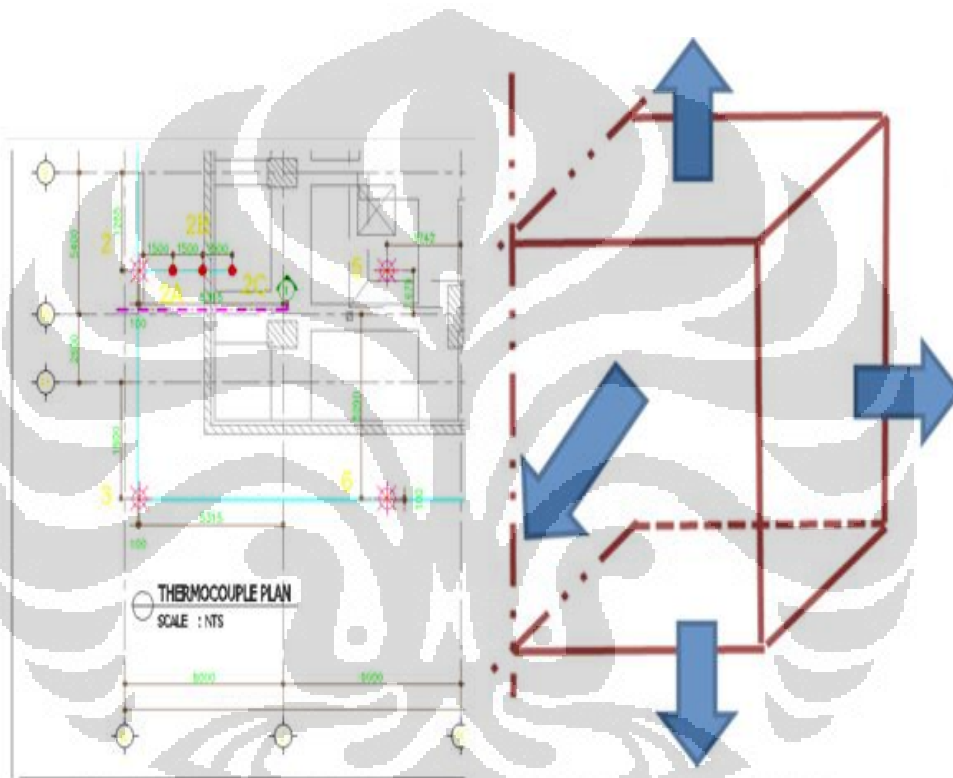
(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.40. Temperatur dasar TC 2, TC 3, TC 5, TC 12

(Sumber : Olahan sendiri)

Dari gambar 4.38, gambar 4.39, dan gambar 4.40, temperatur permukaan, tengah, dan dasar untuk TC 2 dan 3 meter lebih rendah daripada TC 12 (3 meter) dan TC 5 (4 meter). TC 2 dan 3 (3 meter) terletak 10 cm dari *formwork* sehingga terjadi pelepasan panas ke arah sisi *formwork*. Lokasi TC 3 terletak disudut tepi dengan jarak 10 cm ke setiap tepi (gambar 4.41) sehingga memiliki temperatur yang lebih rendah, karena pelepasan panas yang besar. Pelepasan panas yang terjadi kesegala arah dan tergantung dari jarak ke permukaan (ambient).

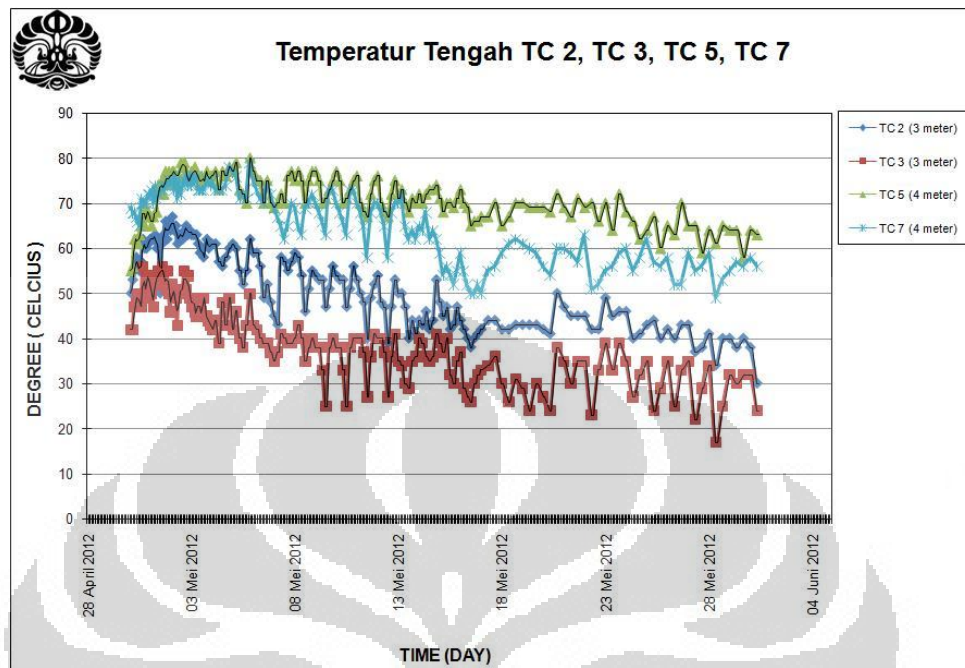


Gambar 4.41. Lokasi TC 3 dan Skema aliran pelepasan panas TC 3

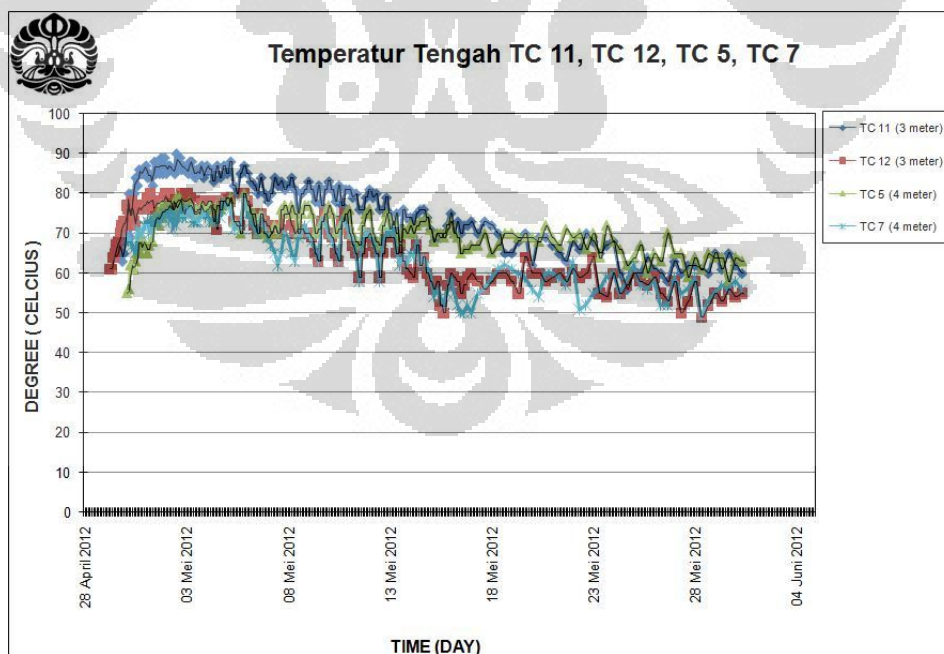
(Sumber : TATA dan Ultrachem, telah diolah kembali)

Temperatur permukaan, tengah, dan dasar TC 12 (3 meter) dan TC 5 (4 meter) mengalami temperatur puncak dengan besar yang hampir sama, perbedaan yang terjadi adalah pelepasan panas pada TC 12 lebih cepat dari TC 5. Perbedaan kecepatan pelepasan panas ini terjadi karena TC 12 (3 meter) memiliki ketebalan yang jauh lebih kecil dari TC 5 (4 meter).

4.5.2 Temperatur Puncak (Temperatur Tengah)



Gambar 4.42. Temperatur tengah TC 2, TC 3, TC 5, TC 7
(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.43. Temperatur tengah TC 11, TC 12, TC 5, TC 7
(Sumber : Olahan sendiri)

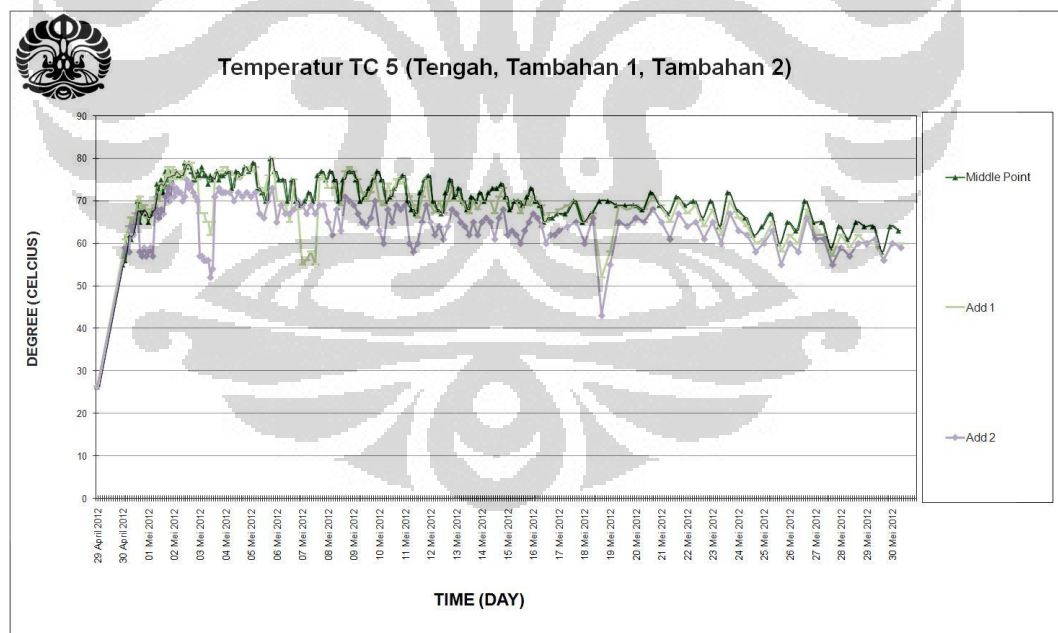
Dari gambar 4.42 dan gambar 4.43, temperatur tengah lokasi 3 meter dibandingkan dengan 4 meter, terdapat 2 perbandingan temperatur puncak yang terjadi pada lapisan tengah:

a. Gambar 4.42

Temperatur puncak TC 5 dan 7 (4 meter) lebih besar daripada TC 2 dan 3 (3 meter). TC 3 memiliki temperatur terendah. Seperti gambar 4.43, lokasi TC 3 dan 2 yang berjarak 10 cm meter mempengaruhi pelepasan panas yang besar ke sisi *formwork*.

b. Gambar 4.43

Temperatur puncak yang terjadi untuk TC 11, 12, 5, dan 7 hampir sama, hal ini terjadi karena temperatur beton massa pada titik tengah memiliki sifat mendekati adiabatik temperatur. Ketebalan beton ± 1 meter, perilaku temperatur tengah mendekati adiabatik temperatur dengan lambatnya pelepasan panas. Perilaku mendekati adiabatik dapat dilihat gambar dibawah untuk TC 5 dengan penambahan probe yang berjarak ± 80.4 cm.



Gambar 4.44. Temperatur TC 5 (Tengah, Tambahan 1, Tambahan 2)

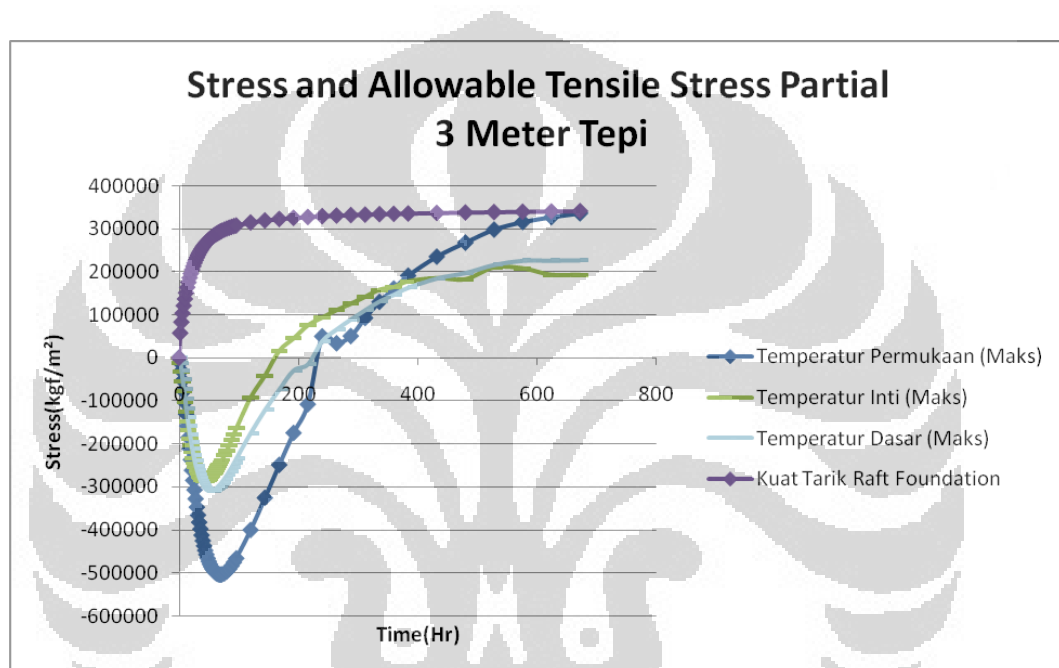
(Sumber : Olahan sendiri)

Dari gambar 4.44, Tambahan 1, 2 dan Tengah memiliki temperatur puncak, kenaikan temperatur, dan kehilangan temperatur yang tidak jauh berbeda.

Perilaku ini terjadi karena beton massa dengan ketebalan ± 1 meter memiliki perilaku mendekati adiabatik temperatur.

4.5.3 Tegangan *Raft Foundation* 3 dan 4 meter

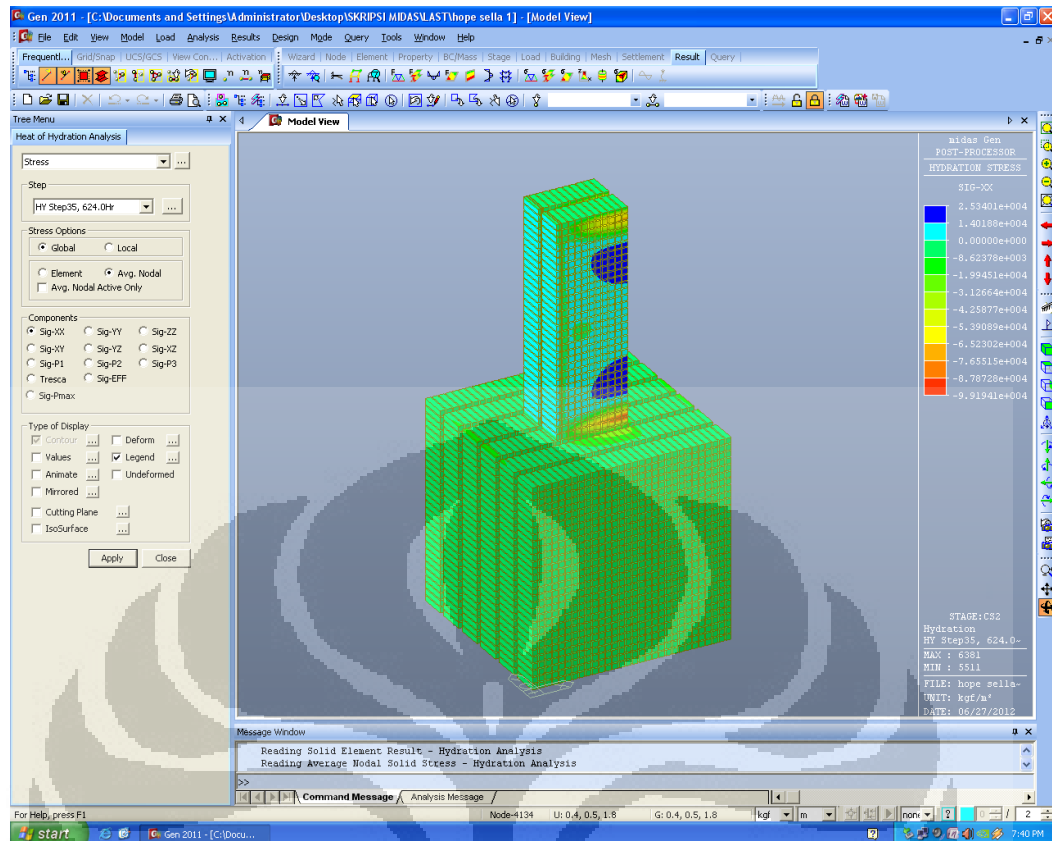
Untuk mengetahui pengaruh ketebalan terhadap kondisi tegangan *Raft Foundation*, maka digunakan perbandingan struktur partial 4 m³ dan 3 m³ (lokasi TC 2).



Gambar 4.45. *Stress and Allowable Tensile Stress Partial* 3 meter tepi

(Sumber : Sella Adinda C, 2012)

Lokasi TC 2 yang berjarak 10 cm dari bekisting dimodelkan *partial* (sebagian) dengan membagi elemen sebesar 10 cm terhadap arah X.



Gambar 4.46. Pemodelan TC 2 *Partial*

(Sumber : Sella Adinda C, 2012)

Tegangan yang terjadi adalah tekan pada umur awal dengan kuat tekan yang lebih rendah dari pemodelan $4 \text{ m}^3 + \text{B}$ (gambar 4.26). Perubahan tegangan dan *tensile* yang terjadi pada *partial TC 2* lebih besar daripada $4 \text{ m}^3 + \text{B}$. Pemodelan *partial TC 2* untuk umur 28 hari (672 jam) tegangan tarik yang terjadi di permukaan sebesar 3.35 MPa dengan kuat tarik *raft* 3.45 MPa, kondisi ini perlu diperhatikan karena terjadinya perubahan temperatur yang besar pada nodal.

4.6 Pengaruh Lapisan Insulasi

Salah satu pengendalian temperatur untuk *raft foundation* Rasuna Tower dilakukan dengan penggunaan lapisan insulasi. Lapisan ini berupa:

- 3 lapis styrofoam (5 cm, 2 x 2.5 cm) dan *plastic sheet* pada permukaan atas *raft foundation*.
- Pasir setebal 10 cm pada kolom dan *rip beam*.
- *Formwork* (muplek 2.5 cm dan styrofoam 5 cm)

Lapisan insulasi sebaiknya memiliki nilai *coefficient convention* yang kecil sehingga aliran panas dari dalam beton ke udara dapat terhambat.

$$Q = h_c(T - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

dimana h_c adalah koefisien konveksi, dan berbanding lurus dengan perpindahan panas (Q), oleh karena itu penggunaan koefisien konveksi yang lebih kecil pada area yang bersentuhan dengan beton dapat lebih efektif dalam mengurangi perpindahan panas.

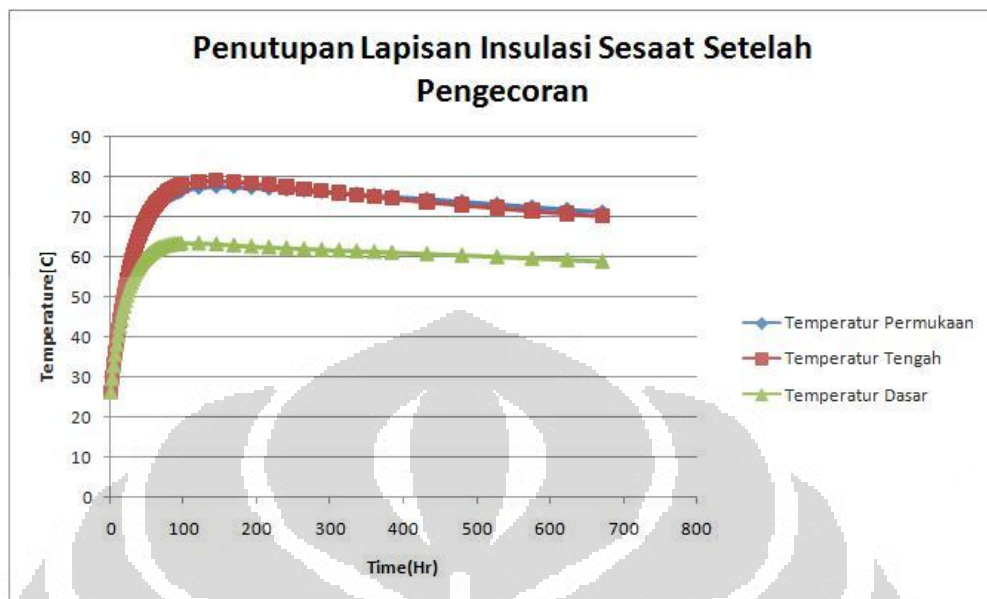
Tabel 4.13. Tabel koefisien konveksi

No.	Curing method	Average value (kcal/m ² h°C)
1	Metallic form (Steel)	12
	Watering (Watering depth below 1 cm)	
2	Watering (Watering depth 1 cm to 5 cm)	7
	Straw bag curing	
3	Watering (Watering depth 5 cm to 10 cm)	7
4	Plywood	7
5	Sheet	5
6	Curing mattress	4.5
	Watering + Curing mattress	
	Watering + Sheet	
7	Forming polystyrene (thickness 5 cm) + sheet	1.5

(Sumber : Concrete Standard Specification, 1996)

Untuk mengetahui pengaruh lapisan insulasi, dilakukan pemodelan dengan MIDAS GEN 2011, dengan batasan insulasi yang digunakan berupa lapisan styrofoam + plastik sheet dengan ketebalan 10 cm. Pemodelan dilakukan terhadap struktur 6.2 x 6.2 x 6.2 m³ seperti gambar 4.3. Berikut hasil pemodelan *raft foundation* dengan perbedaan kondisi:

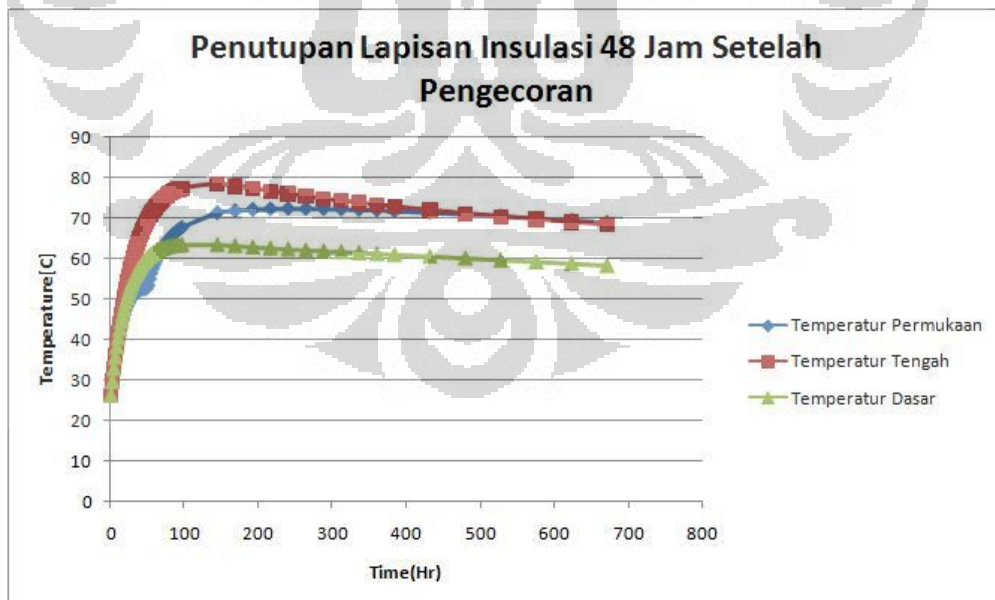
- a. Penutupan lapisan insulasi sesaat setelah pengecoran



Gambar 4.47. Temperatur penutupan insulasi sesaat setelah pengecoran

(Sumber : Olahan sendiri)

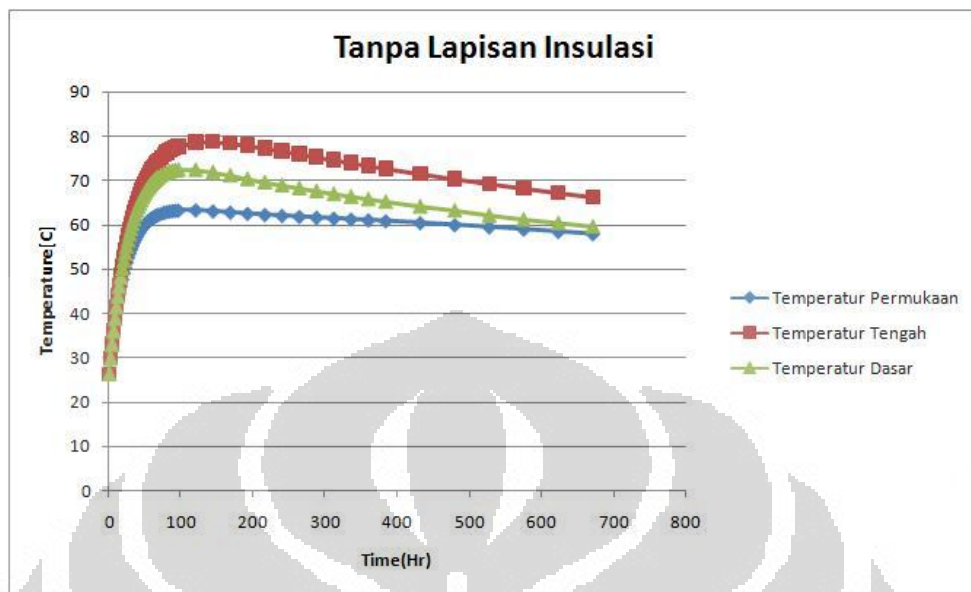
- b. Penutupan lapisan insulasi 48 jam setelah pengecoran



Gambar 4.48. Temperatur penutupan lapisan insulasi 48 Jam setelah pengecoran

(Sumber : Olahan sendiri)

c. Tanpa penutupan lapisan insulasi



Gambar 4.49. Temperatur tanpa lapisan insulasi

(Sumber : Olahan sendiri)

Kondisi penutupan lapisan insulasi sesaat setelah pengecoran (a) memberikan pengaruh terhadap temperatur permukaan yang tinggi dan perbedaan temperatur yang dihasilkan dengan tengah/inti $\Delta T < 10$ °C.

Kondisi penutupan lapisan insulasi 48 jam setelah pengecoran (b) memberikan gambaran perilaku temperatur permukaan. Temperatur permukaan sebelum dilakukan penutupan lapisan insulasi ($t < 48$ jam) terjadi pelepasan panas yang besar sehingga terjadi perbedaan temperatur dengan temperatur inti sebesar 22.65 °C pada $t = 48$ jam. Setelah mulai dilakukan penutupan ($t = 50$ jam), temperatur permukaan perlahan meningkat karena pelepasan panas hidrasi ke permukaan dan pengaruh udara luar berkurang. Jika telat dilakukan penutupan perilaku perbedaan temperatur dapat > 20 °C sehingga berpotensi retak termal.

Kondisi tanpa lapisan insulasi setelah pengecoran (c), beton massa dibiarkan kontak langsung dengan udara, maka temperatur permukaan yang terjadi lebih rendah dari dua kondisi sebelumnya. Temperatur permukaan yang rendah karena pelepasan panas yang besar dan kontak langsung dengan ambient.

Keadaan ini memberikan perbedaan temperatur yang besar ($\Delta T > 20 \text{ }^\circ\text{C}$) dengan temperatur inti.

Dari ketiga kondisi penggunaan lapisan insulasi, kurang memberikan pengaruh terhadap temperatur inti karena massivenya struktur dengan ketebalan 4 meter sehingga temperatur pada inti berperilaku mendekati adiabatik. Lapisan insulasi berpengaruh terhadap temperatur permukaan, dimana untuk mengontrol pelepasan panas dengan tujuan perbedaan temperatur inti dan permukaan kurang dari $20 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatur permukaan harus dikendalikan sehingga tidak terjadi pelepasan panas yang besar.

4.7 Perbandingan Temperatur Pengecoran *Raft* Dengan Mutu Beton Fc' 35 MPa Fly Ash Type F 30 % dan 15 %

Perbandingan temperatur yang diambil dari 2 proyek pengecoran *raft foundation* bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari kandungan semen dan fly ash tipe F terhadap *initial temperature* dan temperature puncak. Perbandingan ini dilakukan dengan kesamaan dan batasan sebagai berikut:

- Mutu beton sama, yaitu Fc'35 MPa
- Memakai jenis semen OPC dan Fly ash tipe F dari Suralaya
- Supplier beton sama
- Ketebalan *raft foundation* yang ditinjau adalah 4 meter
- Tinjauan perbandingan terhadap kandungan semen dan fly ash menggunakan metode PCA

Tabel 4.14. Material beton *raft* Rasuna Tower dan Menteng Residence

Description	REMARK	
	Rasuna Tower	Menteng Residence
Type of Concrete	F'c 35	F'c 35
Supplier	Pionirbeton	Pionirbeton
Slump	14. ± 2	13. ± 1
	OPC + FA	OPC + FA
Specified Strength (MPa)	35	35
Target Strength at 28 days (Cylinder) (MPa)	35	35
Cement content (kg) Indocement	320	374
Fly Ash content (kg) Suralaya (Type F)	138	66
Free Water content (kg)	165	185
Coarse Agg. Max 25mm (kg) Rumpin	1,050	1,050
Coarse Agg. Max 12.5mm (kg) Rumpin	0	0
Fine Aggregate (kg) Lampung	420	390
M. Sand (kg)	220	250
Admixture: Retarder (lt) Plastiment VZ	0,78	1.01
Admixture: Super Plasticizer (lt) LN	2,0	
Fly Ash Content (%)	30%	15%
W/C Ratio	0.36	0.42
On site temperature	± 32°C	± 38°C
Peak temperature	80°C - 85°C	80°C - 85°C
Ice block	50 kg / m3	50 kg / m3

(Sumber : Pioneer Beton)

Dari data material diatas, dilakukan prediksi temperatur yang terjadi dengan metode PCA.

Tabel 4.15. Prediksi *initial temperature*, Tmaks Rasuna Tower dan Menteng Residence

Prediksi Metode PCA		Rasuna Tower	Menteng Residence
Sebelum Precooling (Crushed Ice)	Ti	$\pm 38^{\circ}\text{C}$	$\pm 38^{\circ}\text{C}$
	Tmaks	$\pm 85^{\circ}\text{C}$	$\pm 87^{\circ}\text{C}$
Setelah Precooling (Crushed Ice)	Ti	$\pm 27^{\circ}\text{C}$	$\pm 27^{\circ}\text{C}$
	Tmaks	$\pm 74^{\circ}\text{C}$	$\pm 76^{\circ}\text{C}$

(Sumber : Olahan sendiri)

Prediksi temperatur maksimum PCA dipengaruhi oleh *initial temperature*, kandungan semen, dan fly ash. Dari tabel diatas terlihat, Rasuna Tower dan Menteng Residence memiliki *initial temperature* yang sama, tetapi temperatur maksimum yang terjadi berbeda. Perbedaan temperatur maksimum terjadi karena jumlah penggunaan semen dan fly ash yang berbeda. Temperatur maksimum berbeda sebesar 2°C .

Dari hasil pengukuran lapangan Rasuna Tower dan Menteng Residence:

Tabel 4.16. *Peak temperature* dan *Initial temperature* Menteng Residence dengan Rasuna Tower

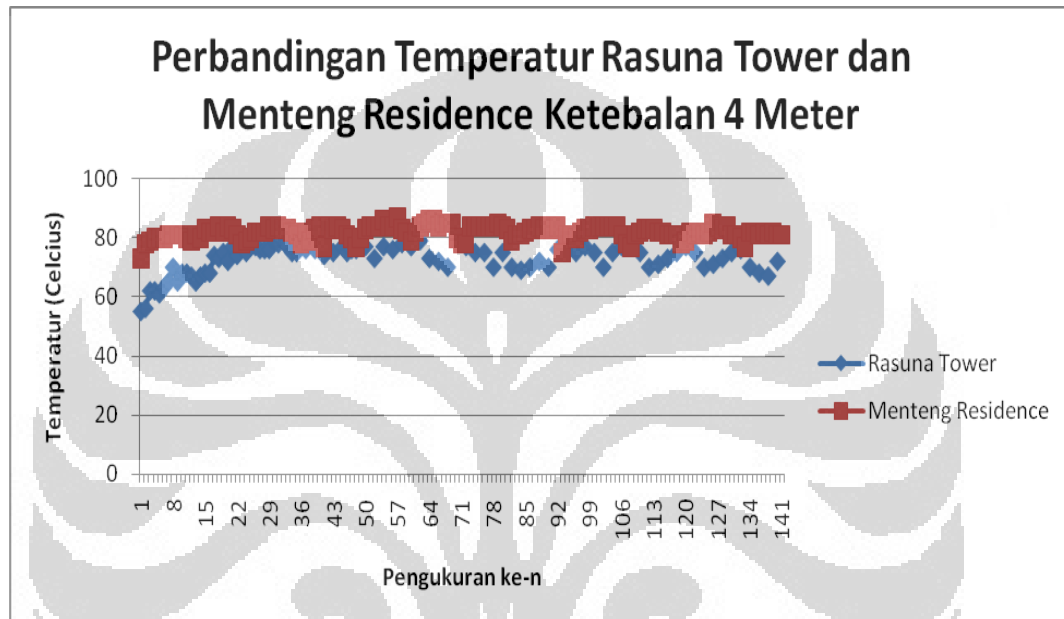
Menteng Residence	TC 2
<i>Peak Temperature</i>	79
<i>Initial Temperature</i>	33.5
Rasuna Tower	TC 5
<i>Peak Temperature</i>	84
<i>Initial Temperature</i>	26.27

(Sumber : Olahan sendiri)

Tabel 4.17. Selisih *Initial Temperature* dan *Peak Temperature* Menteng Residence dengan Rasuna Tower

Selisih Menteng Residence dan Rasuna Tower	
<i>Initial Temperature</i>	<i>Peak Temperature</i>
7.23	6

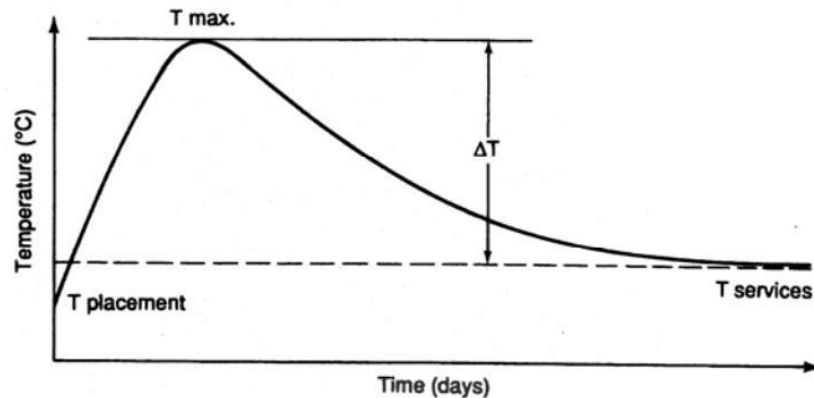
(Sumber : Olahan sendiri)



Gambar 4.50. Perbandingan Temperatur Rasuna Tower Menteng Residence Ketebalan 4 meter

(Sumber : TATA, telah diolah kembali)

Dari tabel 4.16, 4.17, dan gambar 4.50, terlihat perbedaan *initial temperature* sebesar 7.23 °C dan perbedaan *peak temperature* 6 °C.



Gambar 4.51. Temperatur beton massa

(Sumber : Madsuri, 2000)

Dari gambar 4.51, salah satu pengendalian temperatur puncak dengan mengendalikan *initial temperature* ($T_i = T_{\text{placement}}$). Semakin tinggi $T_{\text{placement}}$ maka semakin tinggi temperatur puncak. Selisih perbedaan temperatur puncak dan *initial temperature* Rasuna Tower dengan Menteng Residence memiliki nilai sama, sehingga pengaruh dari *fly ash* kurang terlihat hal ini dapat disebabkan karena faktor lain yang lebih berpengaruh terhadap temperatur beton massa.

Pengaruh kandungan *flyash* dalam mereduksi panas hidrasi semen dalam 2 tipe proyek ini kurang terlihat. Perbedaan *initial temperature*, W/C, metode kerja, penggunaan lapisan insulasi, berpengaruh terhadap temperatur yang terjadi. Meskipun hasil lapangan kurang menunjukkan pengaruh *flyash*, analisa dengan metode PCA memperlihatkan kandungan PCA dapat mereduksi panas hidrasi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil dan analisa mengenai studi pengaruh dan perilaku temperatur beton massa yang terjadi dengan ketebalan 4 meter, kesimpulan yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

- a. Hasil pengukuran *raft foundation*, temperatur puncak yang terjadi untuk ketebalan 4 meter dengan mutu beton $F_c' 35$ MPa slump 14 ± 2 cm adalah 79°C (TC 5), 76°C (TC 6 dan TC 7) dan 80°C (TC 8) dengan rata-rata 77.75°C . Temperatur puncak terjadi pada hari 3-4 setelah pengecoran.
- b. Temperatur puncak yang terjadi tergantung dari *intial temperature*, kandungan semen, dan fly ash. *Initial temperature* yang tinggi menghasilkan temperatur puncak yang tinggi. Semakin tinggi kandungan semen dan rendahnya fly ash maka temperatur yang dihasilkan lebih tinggi daripada penggunaan kandungan semen yang rendah dan fly ash yang tinggi.
- c. Perbedaan tempertur terjadi adalah perubahan temperatur pada nodal berdasarkan waktu, perubahan yang ekstrim dalam rentang waktu singkat dapat menimbulkan peningkatan tegangan yang besar.
- d. Tegangan yang terjadi dalam beton merupakan hasil dari *heat transfer analysis* seperti distribusi temperatur pada nodal yang ditinjau, dan perubahan material karena temperatur, rangkak, susut dsb.
- e. Temperatur puncak yang terjadi pada bagian inti beton massa tidak tergantung terhadap kedalaman, TC 12 (3 meter) 80°C dan TC 8 (4 meter) 80°C . Pengaruh kedalaman terjadi pada proses pelepasan panas, kedalaman 3 meter melepas panas lebih cepat dari kedalaman 4 meter.
- f. Tegangan pada sisi dekat dengan *formwork* memiliki tegangan tarik yang lebih besar daripada lokasi tengah *raft foundation*.
- g. Lapisan insulasi memberikan pengaruh terhadap pengendalian temperatur permukaan dan tegangan yang terjadi. Lapisan insulasi menghambat panas yang terlepas dari permukaan dan pengaruh ambient. Lapisan insulasi

dengan *thermal expansion coefficient* lebih kecil dari *thermal expansion coefficient* beton, maka tegangan yang terjadi tekan pada umur awal.

- h. *Fly ash* dapat menurunkan temperatur puncak karena menghasilkan panas hidrasi yang lebih kecil dari semen.

5.2 Saran

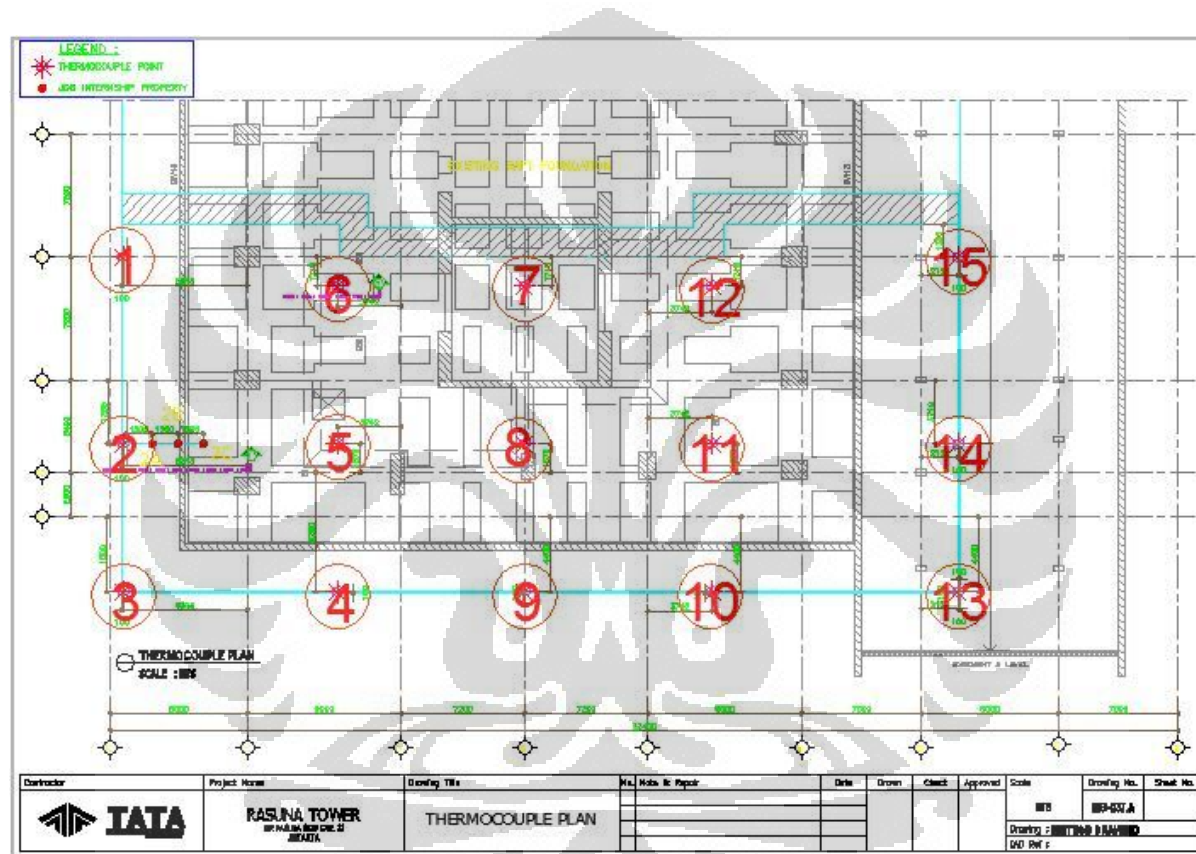
Dari hasil dan analisa mengenai studi pengaruh dan perilaku temperatur beton massa yang terjadi dengan ketebalan 4 meter, maka dapat dikemukakan beberapa saran, sebagai berikut:

- a. Sebelum dilakukan pengecoran beton massa, terlebih dahulu harus ditentukan metode pengerjaan, metode pengendalian dan pengontrolan temperatur, komposisi *mix design*, design rencana *intial temperature* dan temperatur puncak, dan metode isolasi yang akan diterapkan.
- b. Sebaiknya sebelum pengecoran dilakukan uji coba dengan membuat mock up, sehingga dapat diketahui efektifitas dari metode dan hasil design, sehingga dapat dievaluasi dan dilakukan perbaikan.
- c. Pengendalian dan kontrol temperatur harus diperhatikan dan dievaluasi untuk menghindari terjadinya perbedaan temperatur yang besar, sehingga dapat dilakukan usaha pencegahan.
- d. Untuk pengukuran temperatur *raft foundation* dengan waktu yang lebih detail dapat digunakan *thermocouple* dengan komputerisasi.
- e. Untuk mengetahui tegangan yang terjadi dalam beton massa, pengukuran suhu dapat disertai dengan pengukuran *strain* dengan menggunakan *Thermocouple Type Vibrating Wire Strain Gage*.
- f. Pemodelan dengan MIDAS GEN harus memperhatikan data material dan *boundary* yang dilakukan untuk *heat transfer analysis* dan *thermal stress analysis*.
- g. Skripsi ini dapat dilanjutkan dengan pemodelan lebih mendalam dengan MIDAS GEN dengan berbagai variable.

DAFTAR PUSTAKA

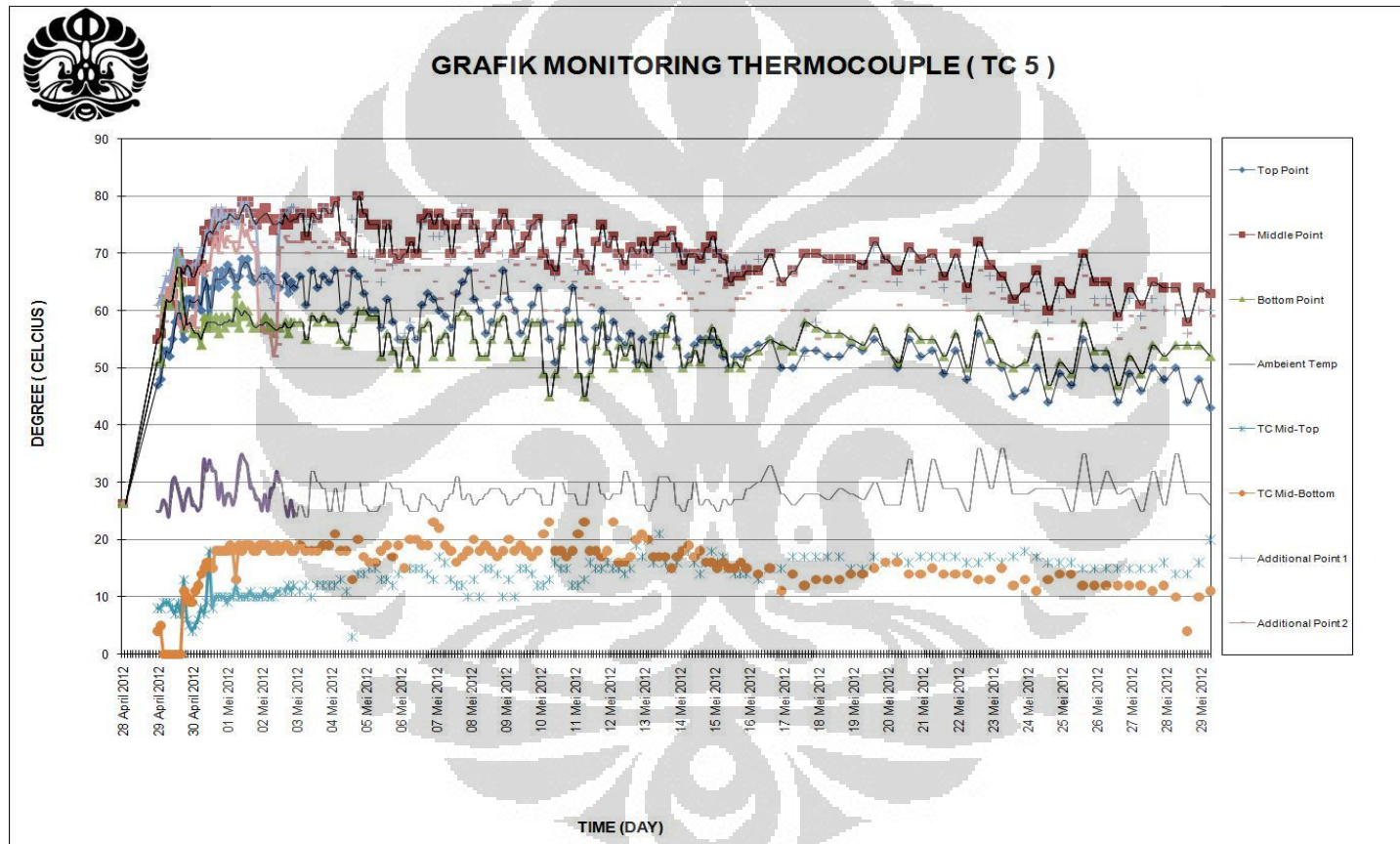
- ACI Committee 207. (2002). Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete. *ACI 207.2R-95* .
- ACI Committee 207. (1996). Mass Concrete. *ACI 207.1R-96* .
- Amin, M. N., Kim, J.-K., & Jeong, S. K. (2007). Thermal Stress Simulation of Mass Concrete Using Thermal Stress Device. *Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)* .
- Bowles, J. E. (1991). *ANALISIS DAN DESAIN PONDASI*. Illinois: Erlangga.
- Evrialdy. (2000). Pengaruh Perubahan Temperatur Terhadap Pengecoran Mass Concrete Raft Foundation.
- Ir. Nono Dritanto. (1994). Evaluasi Kenaikan Temperatur Pada Struktur Beton Massa. *FTUI* .
- Kyle, Riding A.; Poole, Jonathan L; Schindler, Anton K; Juenger, Maria C.G.; Folliard, Kevin J. (2006). Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members. *ACI MATERIALS JOURNAL TECHNICAL PAPER* .
- Madsuri. (2000). *Pengaruh kenaikan temperatur terhadap pengecoran beton massa raft foundation*. UI-Laporan Penelitian.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete*. Longman.
- Newman, John; Ban Seng Choo. (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*. ELSEVIER.
- Nuryadin, A. K. (2007). Analisa Panas Hidrasi Pada Pondasi Bored Pile Di Laut Menggunakan Software MIDAS Pada Proyek Jembatan Suramadu.
- Sesar, S. A. (2012). Studi Pengaruh Temperatur Beton Massa Yang Terjadi Pada Kedalaman 3 Meter.
- Sr. Rinker M.E. (2005). Adiabatic Temperature Rise of Mass Concrete in Florida. *Final Report Submitted to Florida Department of Transportation* .
- Tumilar, S. (2011). *Pengendalian Temperatur Dalam Pelaksanaan Mass Concreting Pada Pondasi*.
- U.S. Bureau of Reclamation. (1951). *Mass Concrete*. Denver: U.S. Department of the Interior.

Lampiran A. Hasil Pengukuran Lapangan



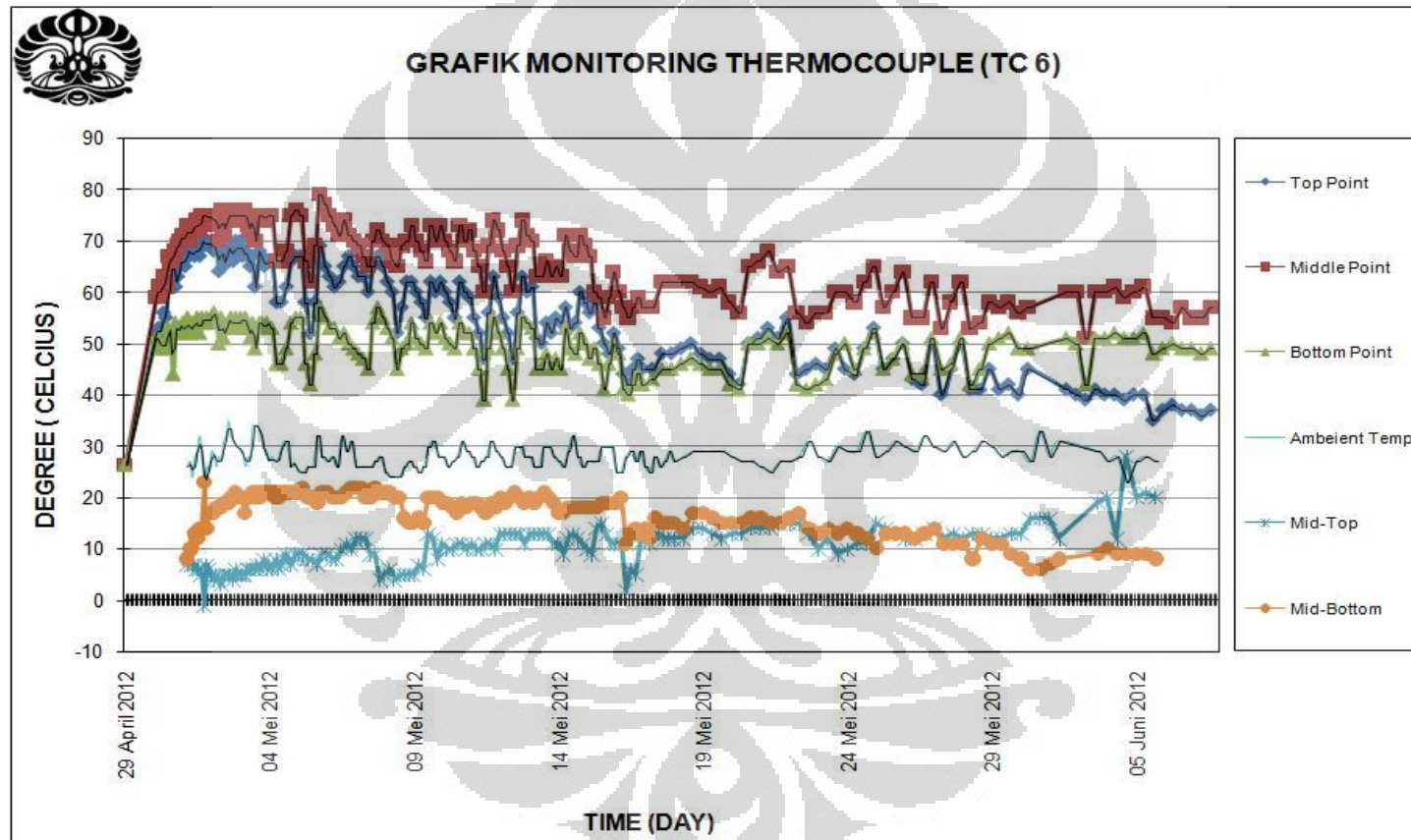
(Lanjutan)

- Grafik Monitoring TC 5



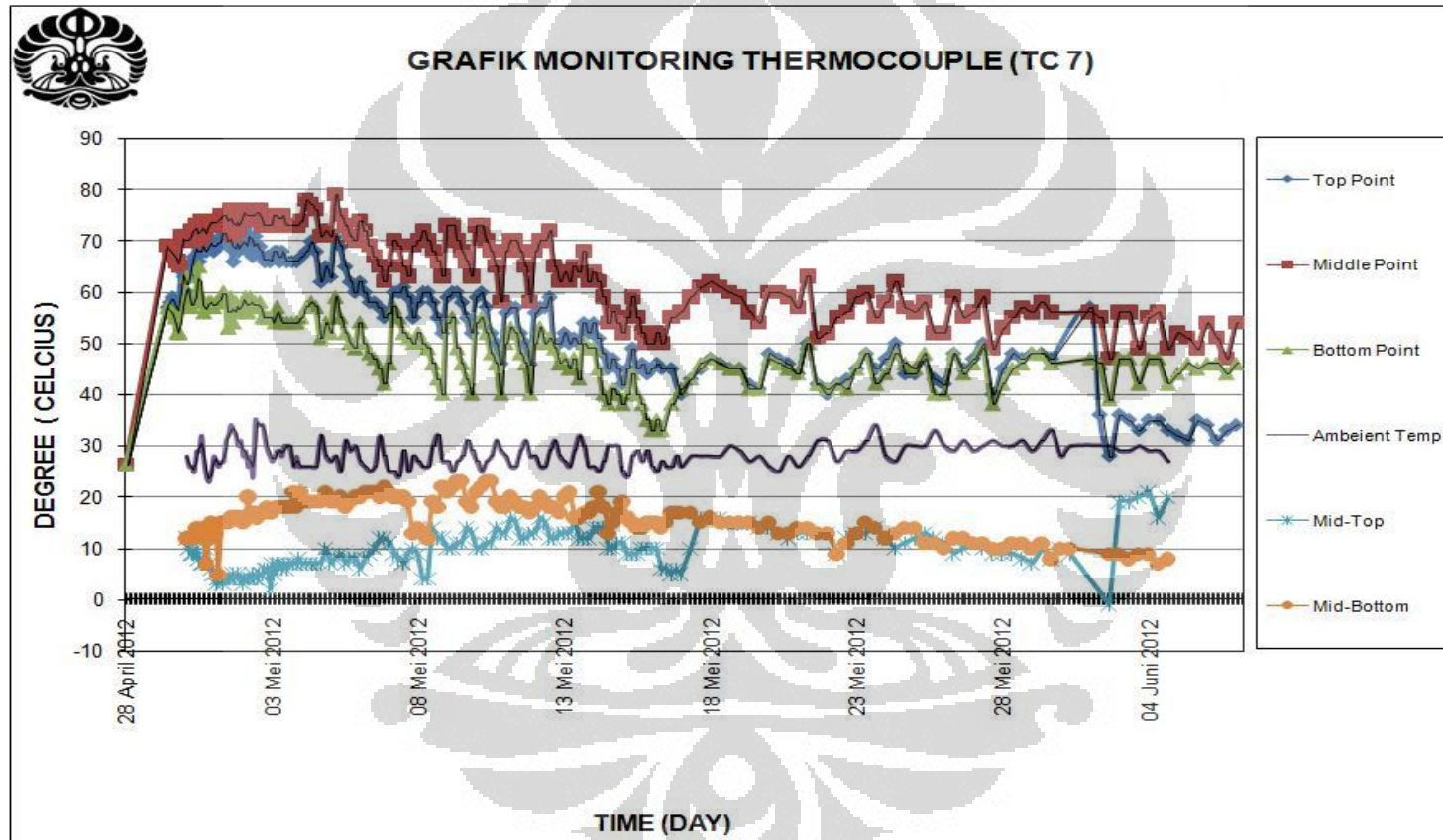
(Lanjutan)

- Grafik Monitoring TC 6



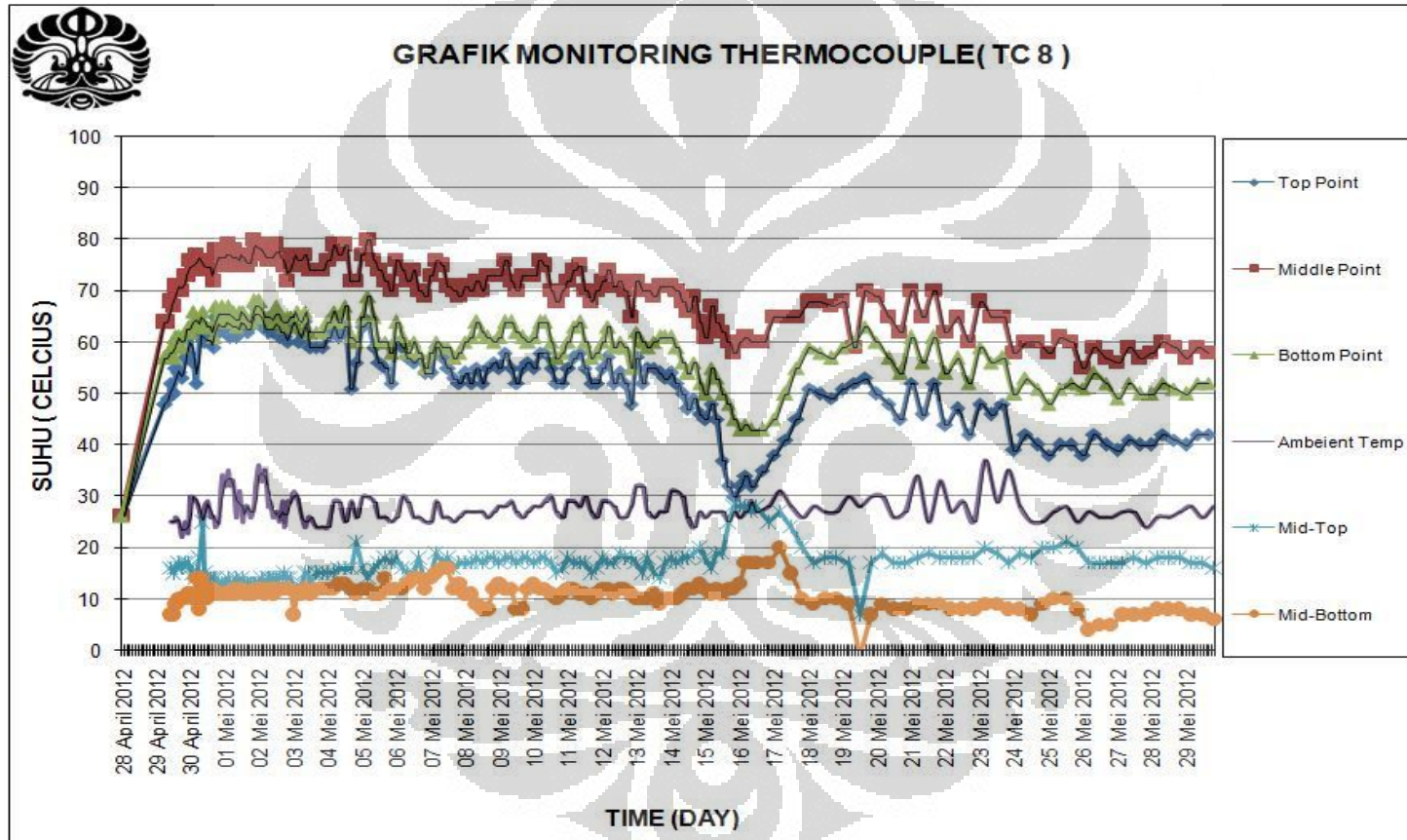
(Lanjutan)

- Grafik Monitoring TC 7



(Lanjutan)

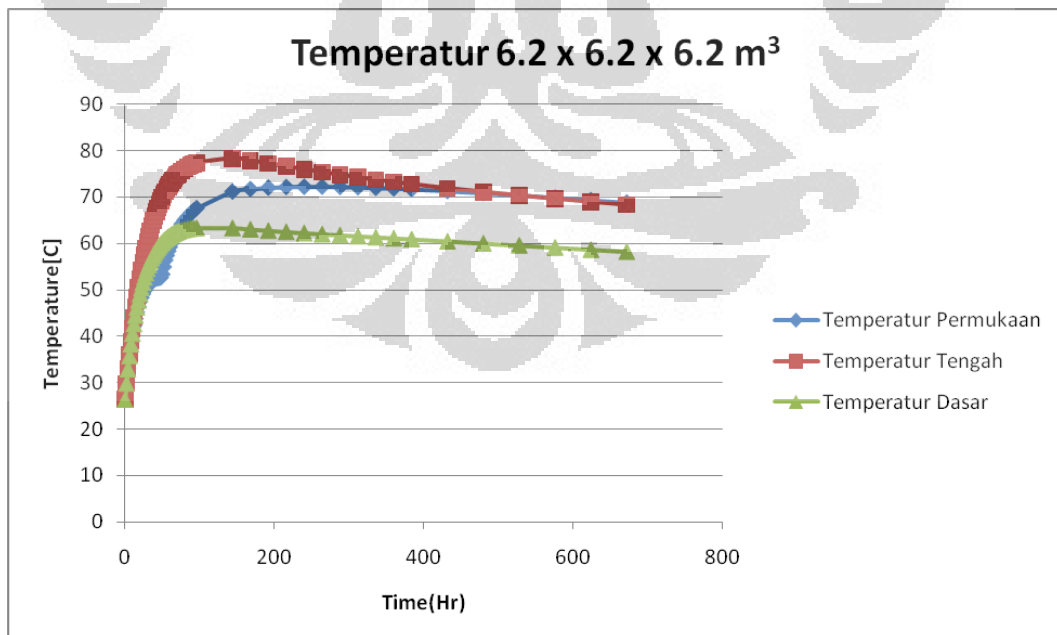
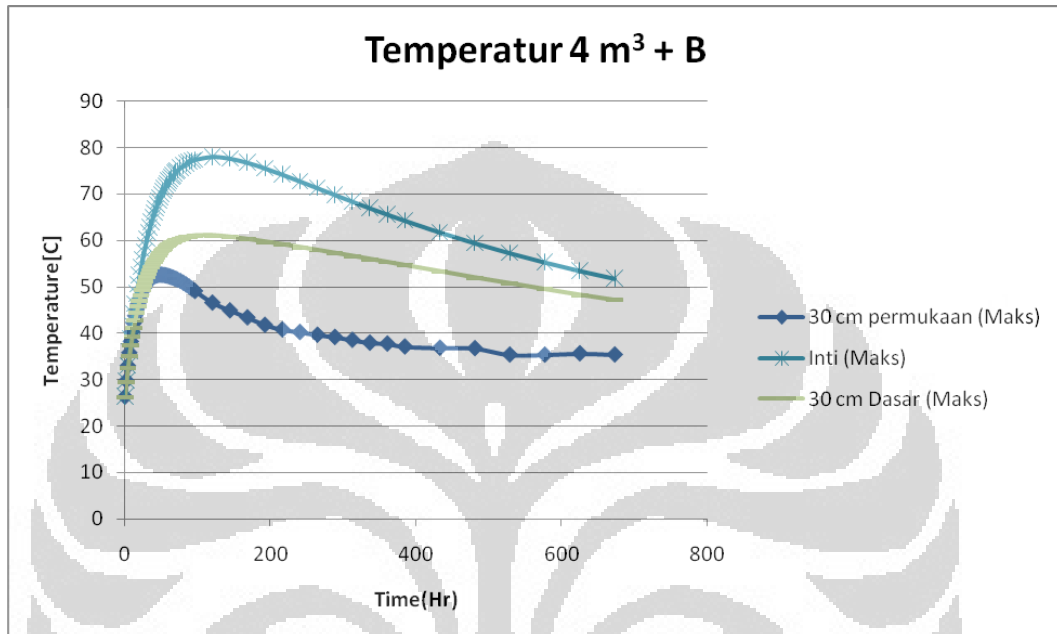
- Grafik Monitoring TC 8



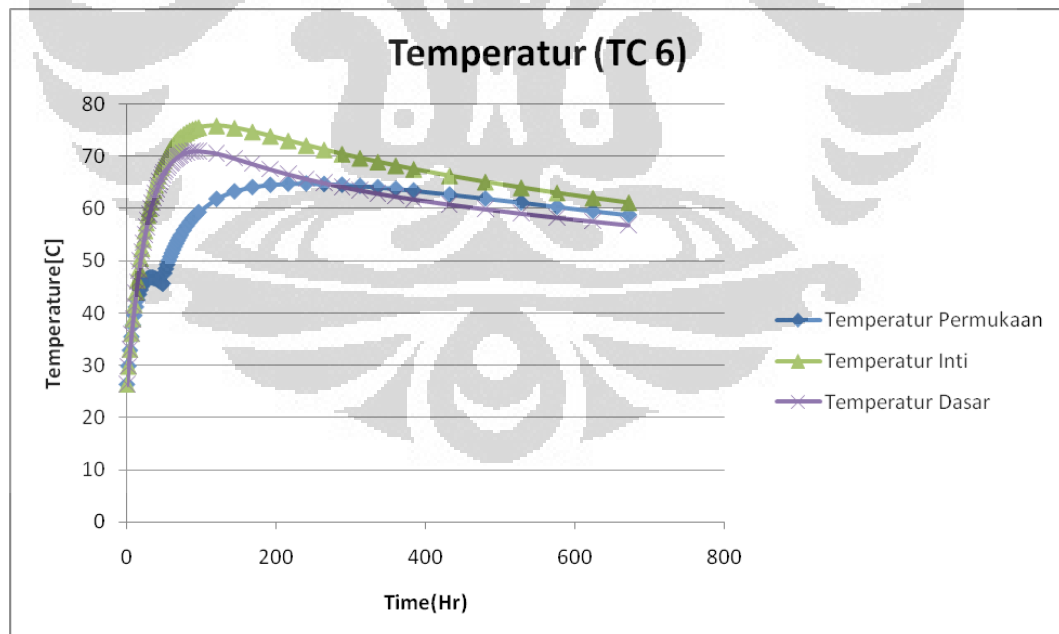
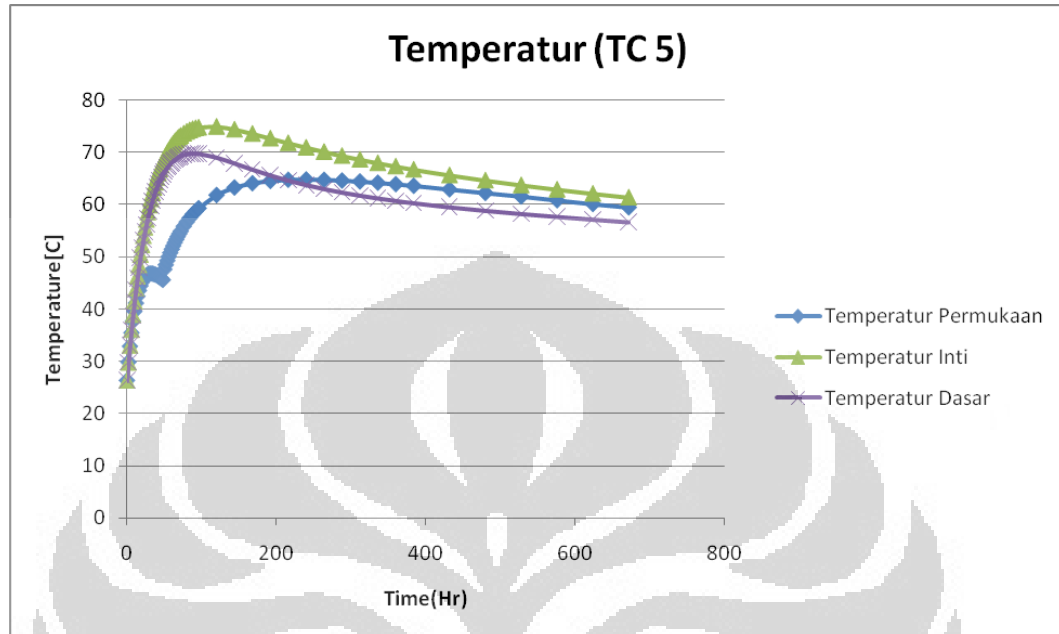
Lampiran B. Hasil MIDAS GEN 2011

Pemodelan dengan penggunaan lapisan insulasi 48 jam setelah pengecoran

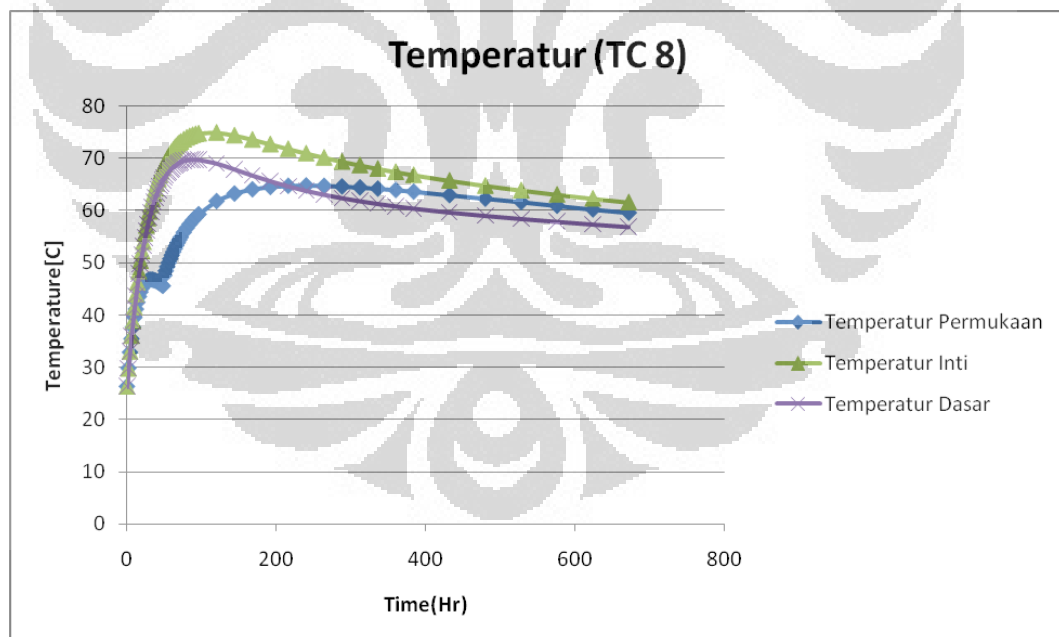
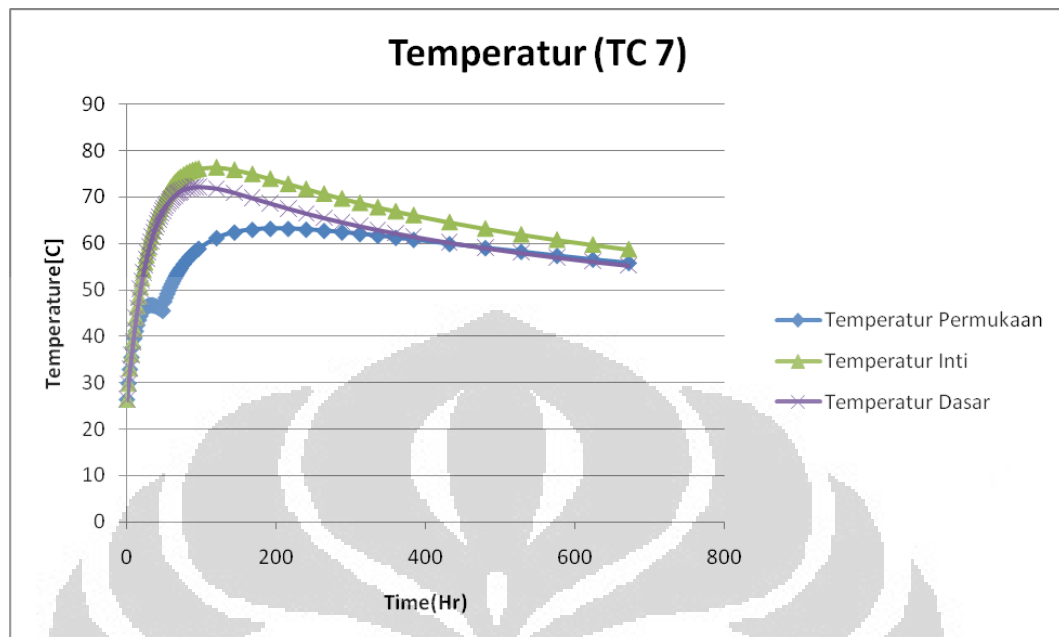
Temperatur



(Lanjutan)

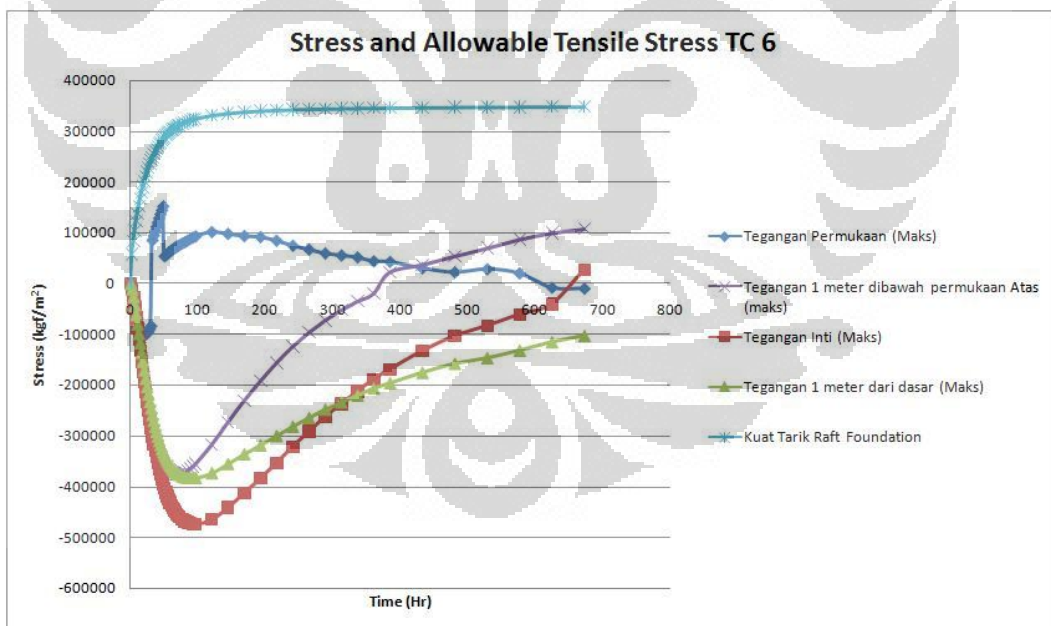
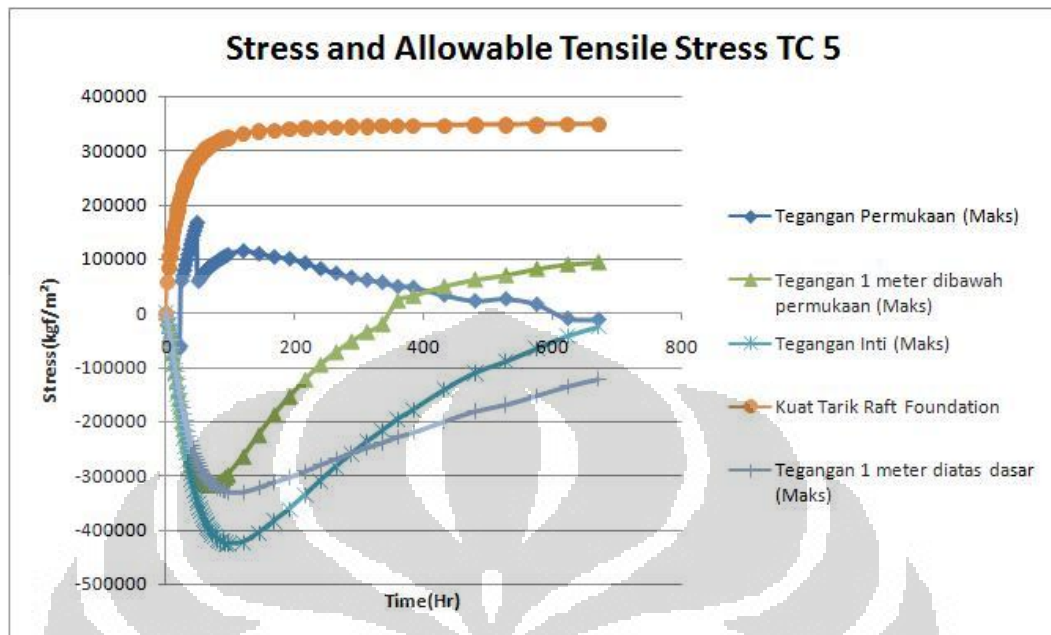
Raft Foundation

(Lanjutan)

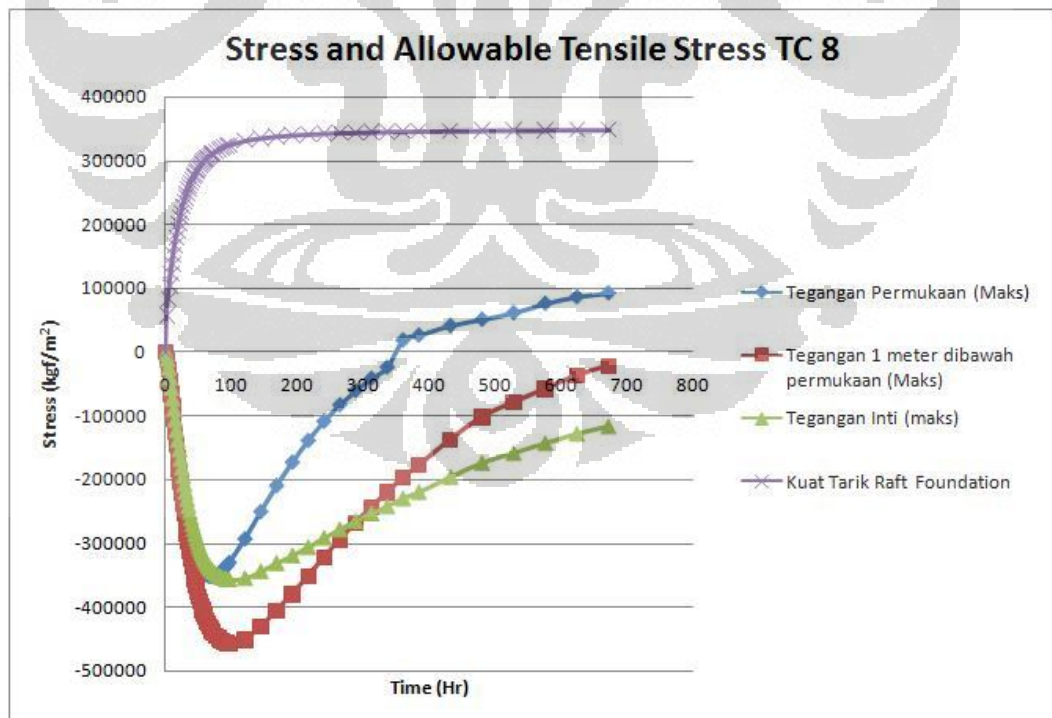
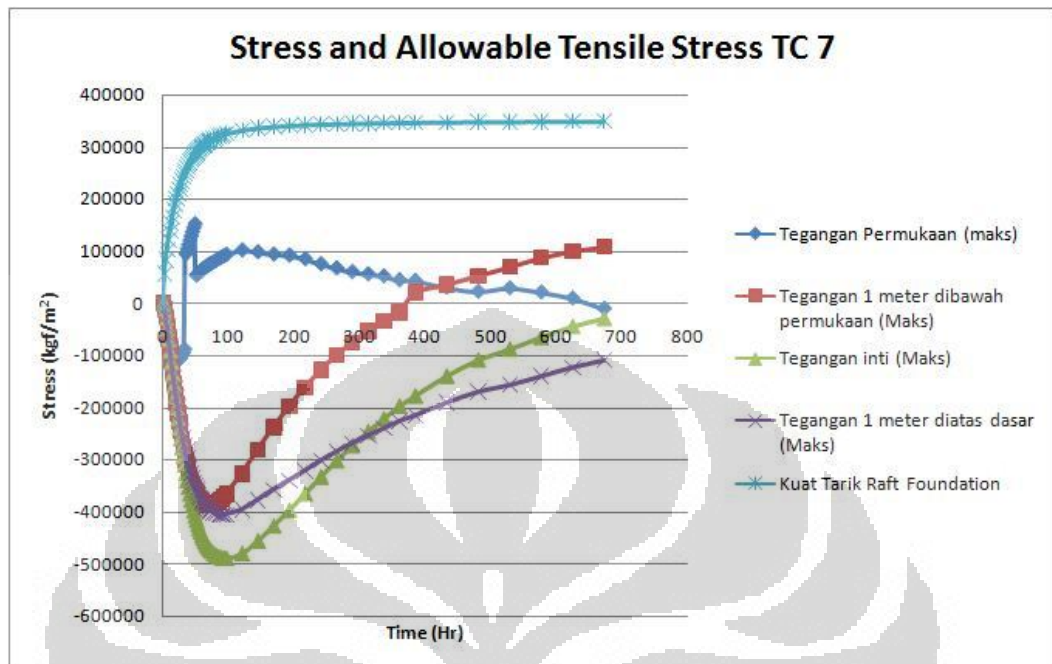


(Lanjutan)

Tegangan

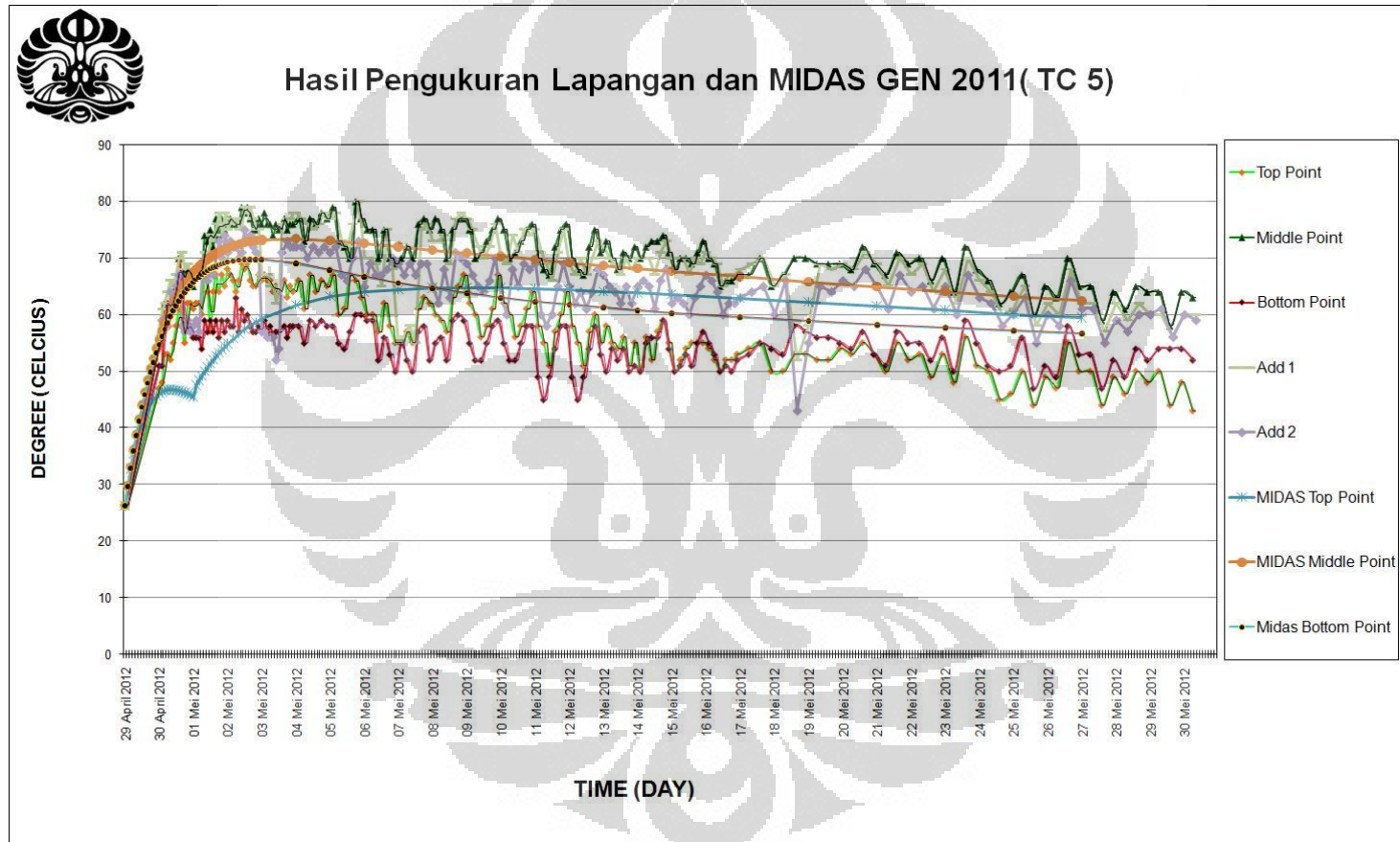


(Lanjutan)



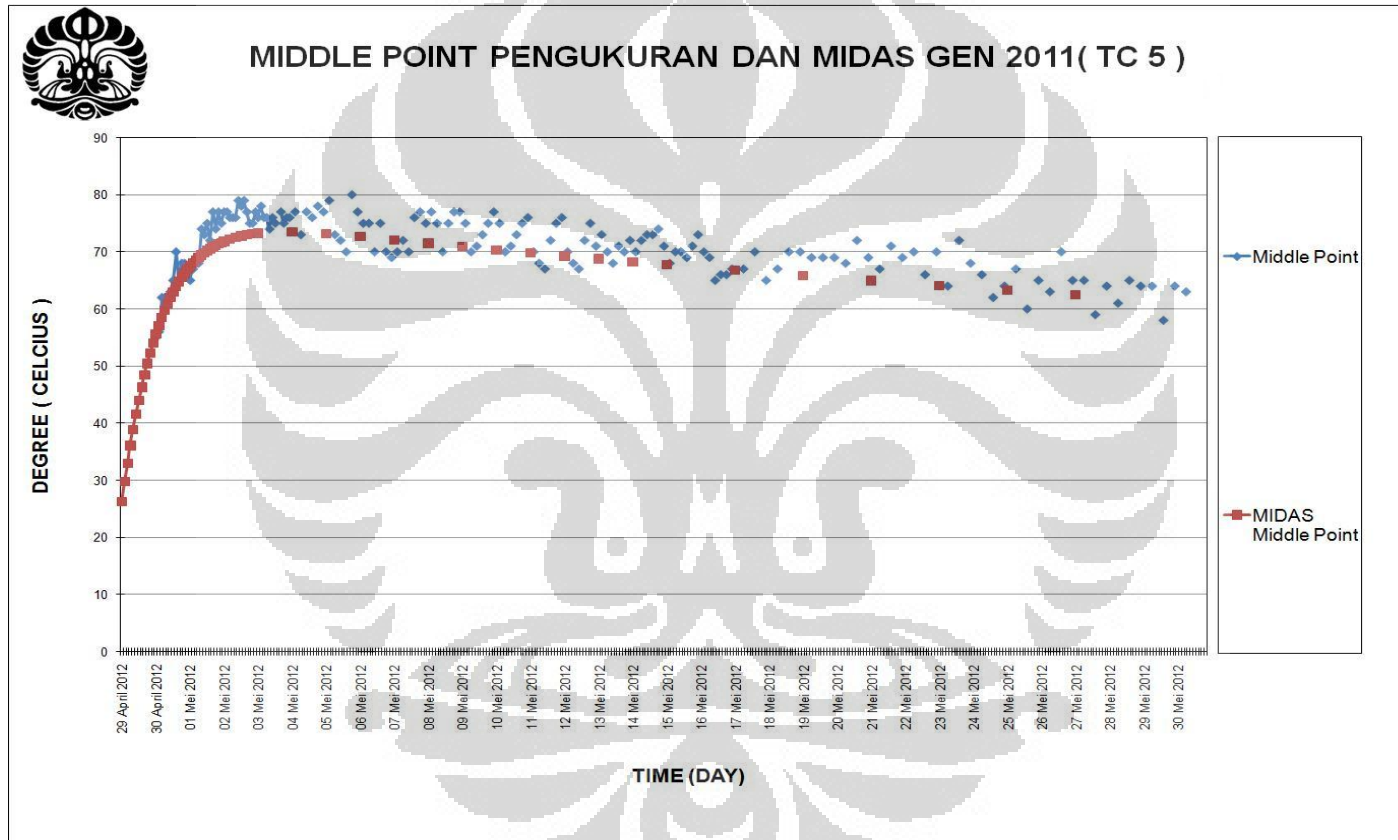
Lampiran C. Hasil Pengukuran dan MIDAS GEN 2011

- Hasil Pengukuran TC 5 dan MIDAS GEN 2011



(Lanjutan)

- Middle Point Hasil Pengukuran TC 5 dan MIDAS GEN 2011



Lampiran D. Tutorial Pemodelan *Raft Foundation* Rasuna Tower Dengan MIDAS
GEN 2011

- Menentukan Properti Material

Model > Properti > Material

General > Material Number > 1; Name > Raft Foundation; Type > Concrete;

Concrete > Standard > ASTM(RC) > DB

Thermal Transfer > Specific Heat > Heat Conduction

Material Data

General
Material ID: 1 Name: Raft Foundation

Elasticity Data
Type of Design: Concrete
Steel Standard: DB
Concrete Standard: ASTM(RC) Code: DB Grade C5000

Type of Material
 Isotropic Orthotropic

Steel
Modulus of Elasticity: 0.0000e+000 kgf/m²
Poisson's Ratio: 0
Thermal Coefficient: 0.0000e+000 1/[C]
Weight Density: 0 kgf/m³
 Use Mass Density: 0 kgf/m³/g

Concrete
Modulus of Elasticity: 2.8645e+009 kgf/m²
Poisson's Ratio: 0.2
Thermal Coefficient: 9.0000e-006 1/[C]
Weight Density: 2403 kgf/m³
 Use Mass Density: 245 kgf/m³/g

Plasticity Data
Plastic Material Name: NONE

Thermal Transfer
Specific Heat: 0.25 kcal/kgf·[C]
Heat Conduction: 2.3 kcal/m·hr·[C]

Damping Ratio: 0.05

OK Cancel Apply

(Lanjutan)

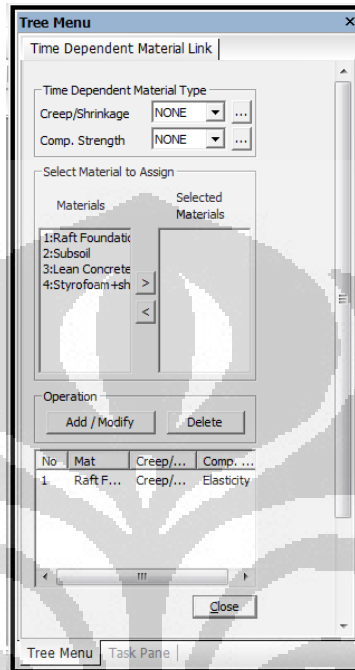
- Menentukan Time Dependent Material Properties

Model > Properties > Time Dependent Material (Creep/Shrinkage)

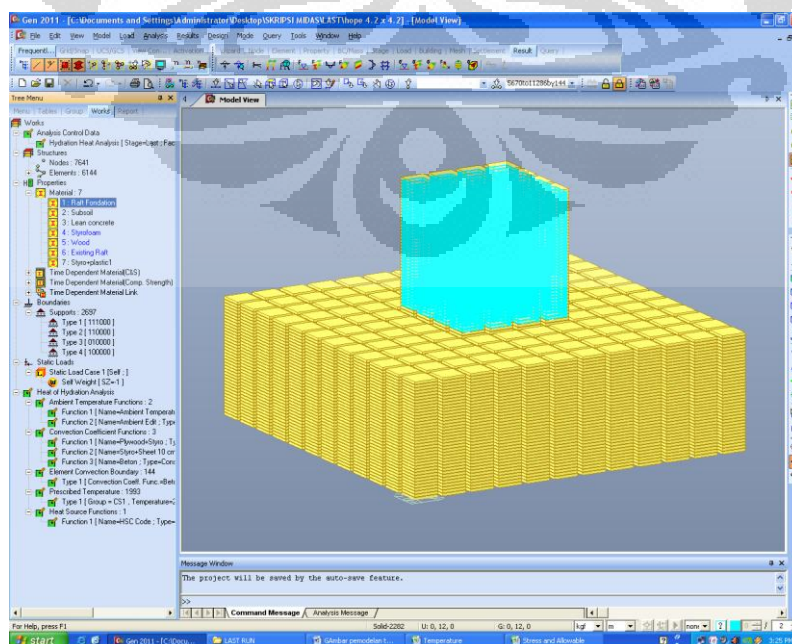
Model > Properties > Time Dependent Material (Comp. Strength)

(Lanjutan)

- Linking General and Time Dependent Material Properties
Model > Properties > Time Dependent Material Link

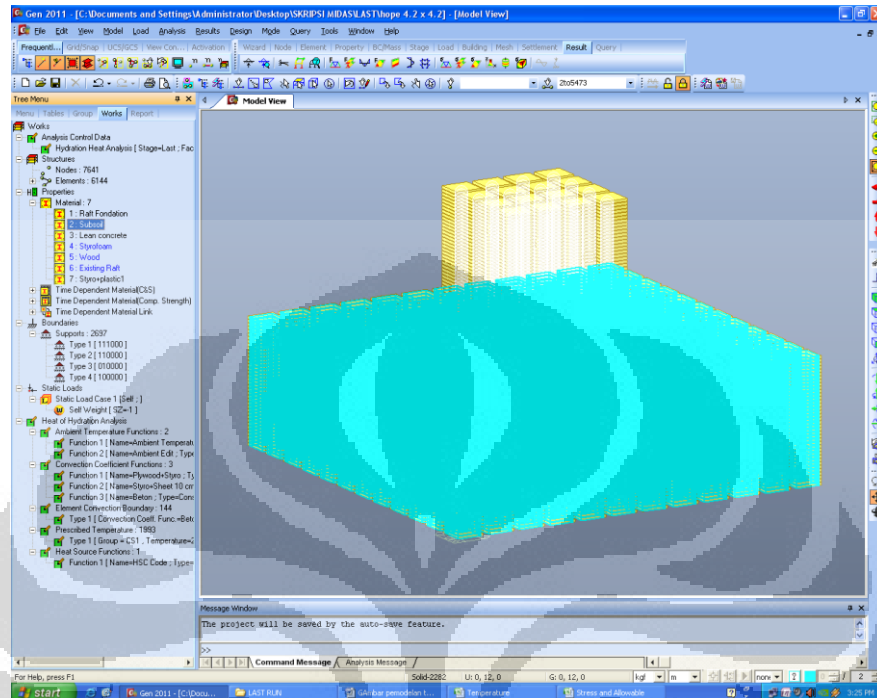


- Pemodelan Struktur
Raft Foundation

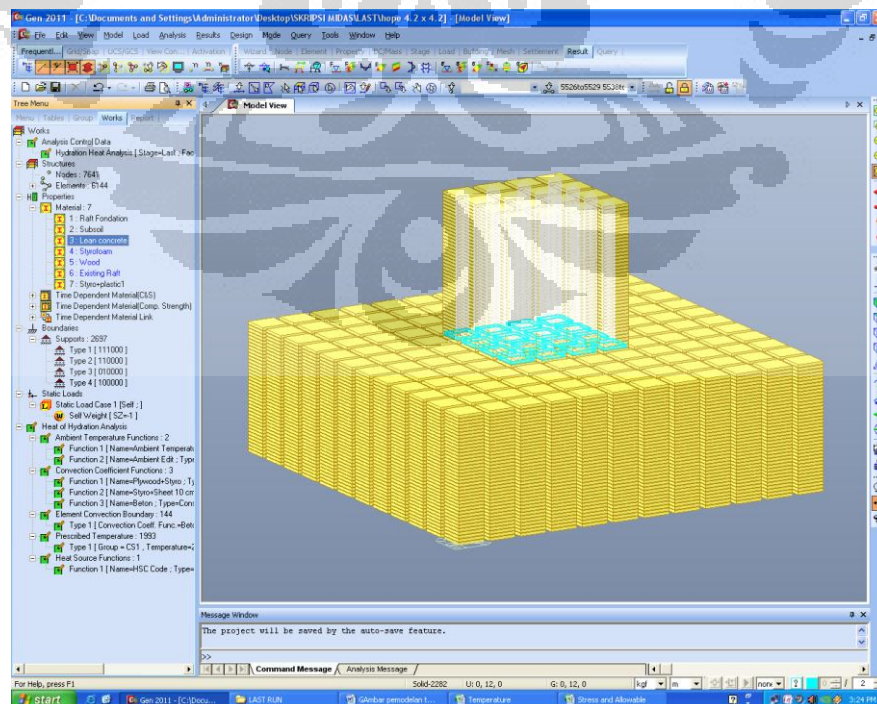


(Lanjutan)

Subsoil

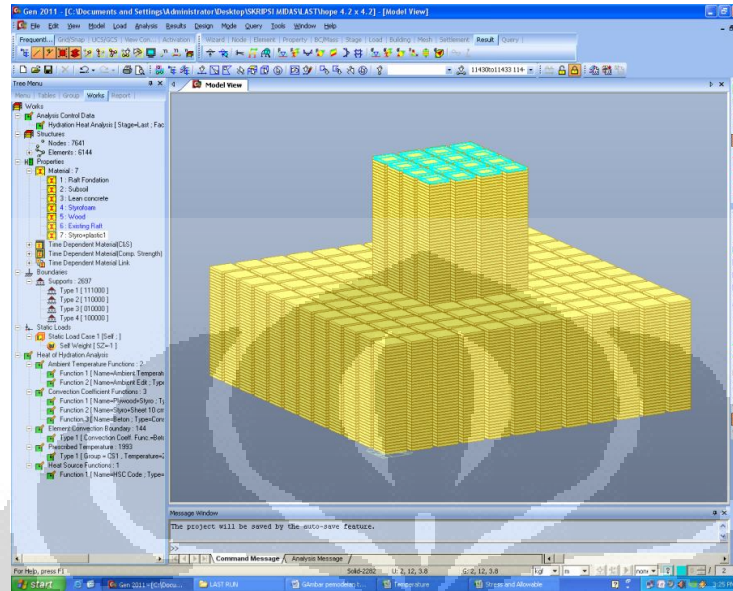


Lean Concrete

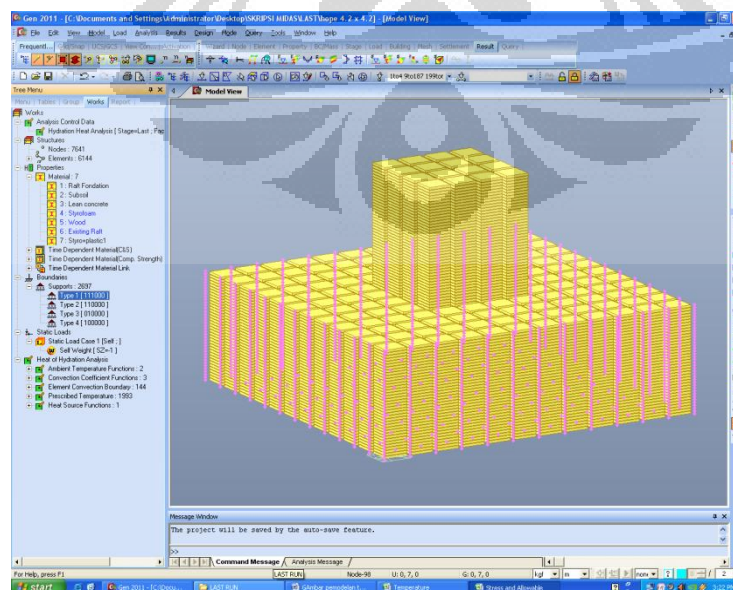


(Lanjutan)

Styrofoam + plastic



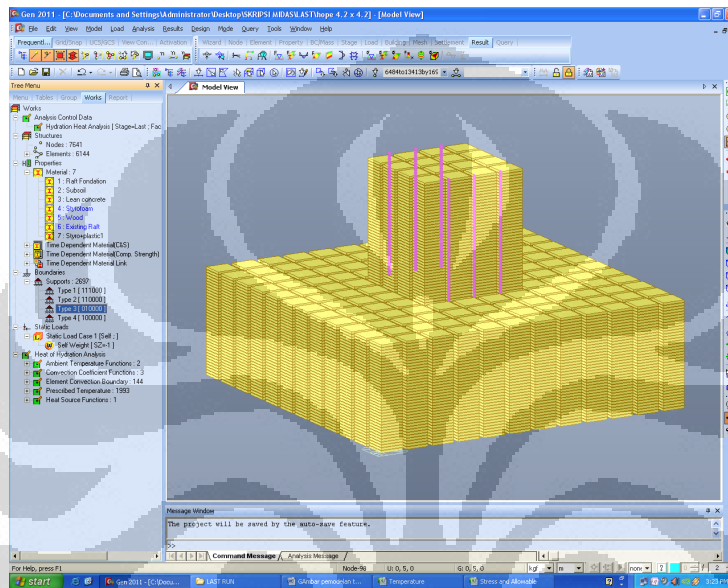
- Menentukan Boundary Model > Boundary > Supports Defining Subsoil Boundaries Pada struktur tanah diberi perletakan terhadap gaya aksial arah X, Y, dan Z (Begitupun dengan eksisting raft)



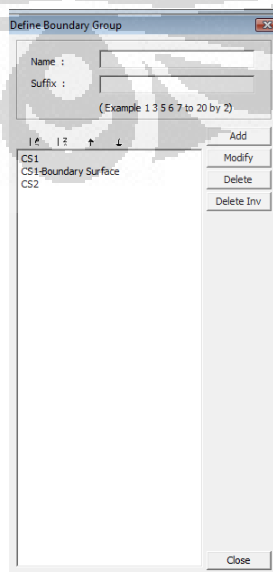
(Lanjutan)

Symmetric Boundary Condition

Struktur *raft foundation* diberikan boundary berdasarkan potongan simetris. Untuk struktur potongan arah X diberi perletakan terhadap gaya aksial arah Y, potongan arah Y diberi perletakan terhadap gaya aksial arah X. Untuk struktur raft penuh tidak diberikan boundary.



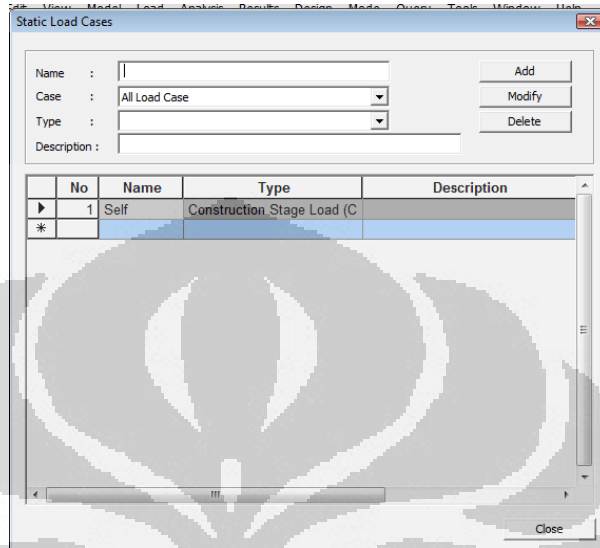
- Menentukan Load Group
Group > Boundary Group > New...



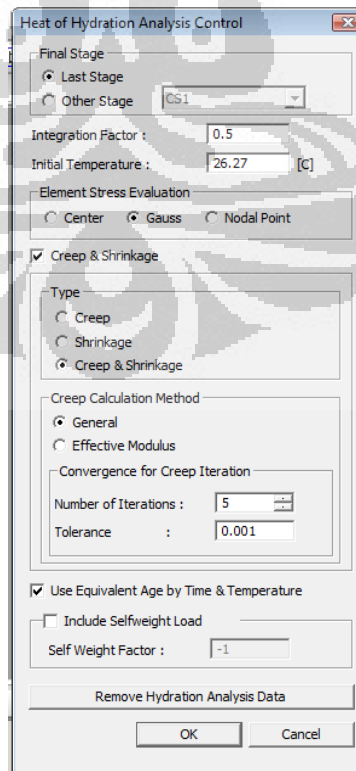
(Lanjutan)

Load > Static Load Cases

Load > Self Wight



- Heat of Hydration Analysis Control
Analysis > Heat of Hydration Analysis Control

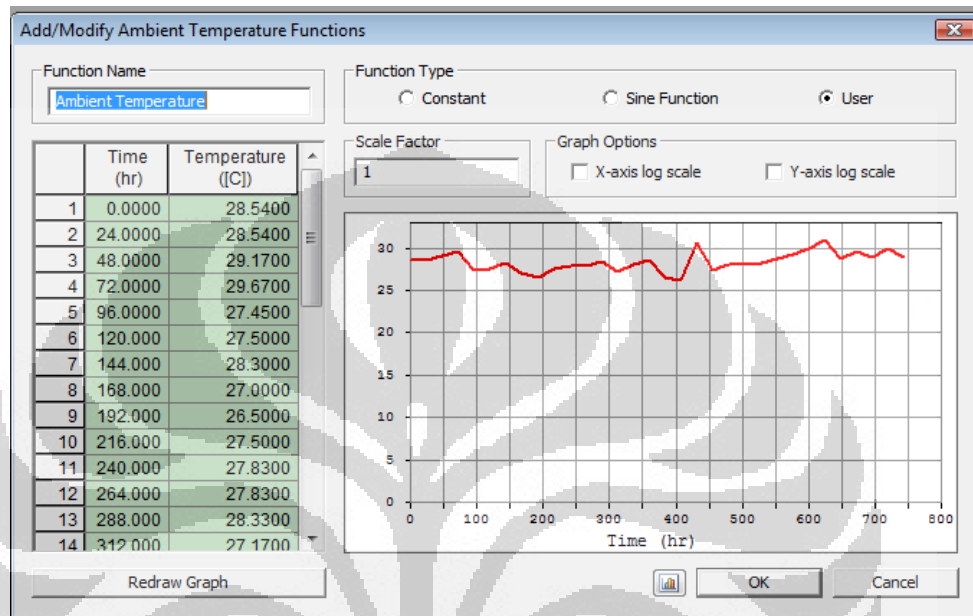


(Lanjutan)

- Inputting Ambient Temperature

Load > Heat of Hydration Analysis Data > Ambient Temperature Functions

Temperatur udara rata-rata per hari di atas permukaan *raft foundation*



- Inputting Convection Coefficient

Load > Heat of Hydration Analysis Data > Convection Coefficient Functions

Koefisien konveksi yang digunakan berdasarkan tabel 4.13, dimana untuk penggunaan berlapis :

$$h_c = \frac{1}{\frac{L_1}{h_{c1}} + \frac{L_2}{h_{c2}}}$$

dimana:

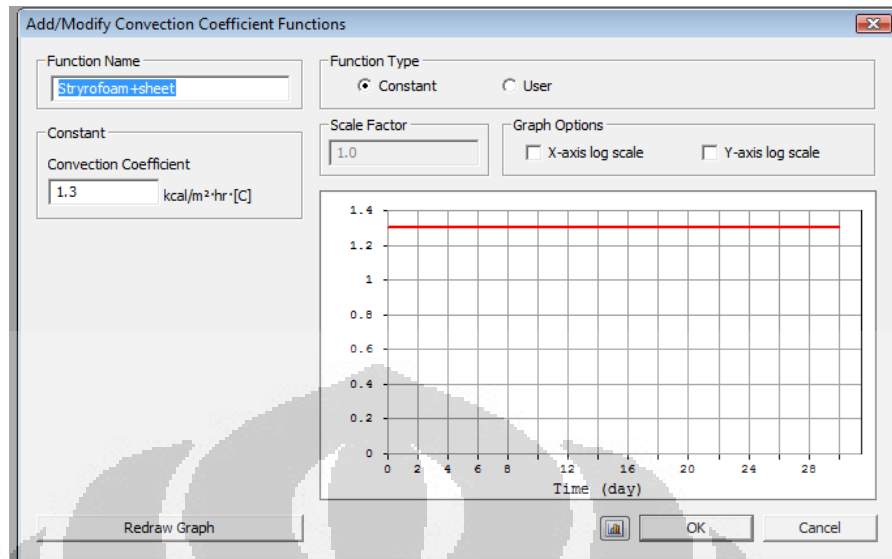
L_1 = tebal bahan 1

L_2 = tebal bahan 2

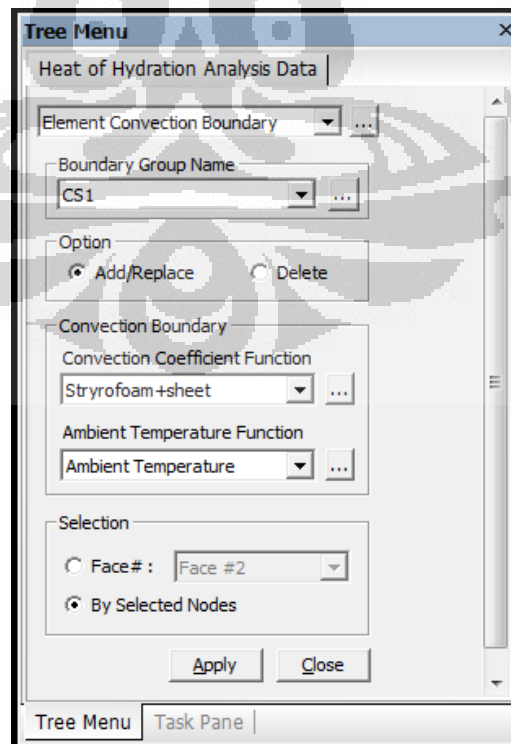
h_{c1} = koefisien konveksi bahan 1

h_{c2} = koefisien konveksi bahan 2

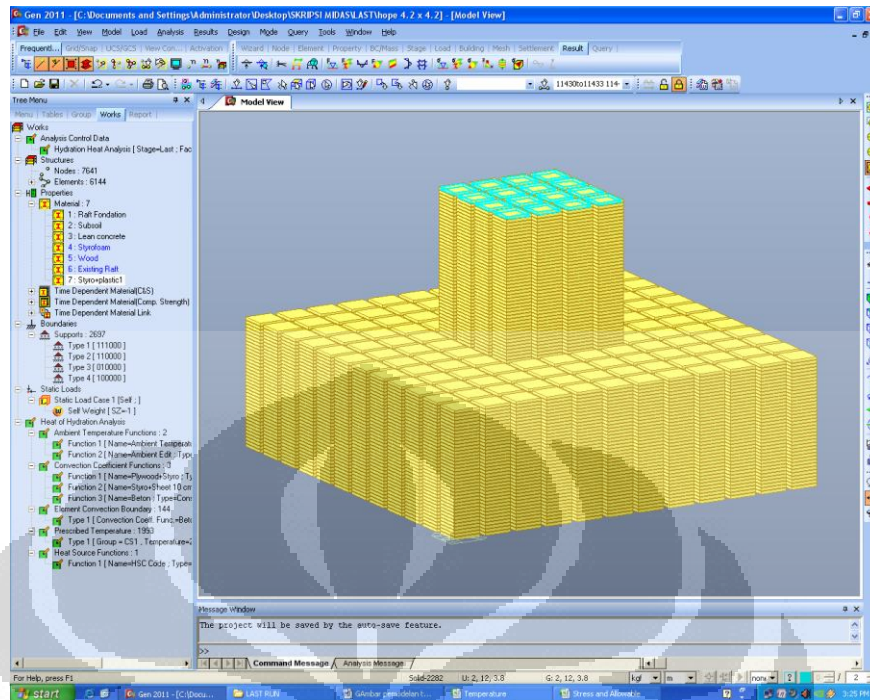
(Lanjutan)



- Menentukan Element Convection Boundary
Load > Heat of Hydration Analysis Data > Element Convection Boundary
Memberikan batas koefisien konveksi terhadap area yang kontak dengan udara, yang pertama adalah permukaan beton untuk 48 jam, kedua adalah lapisan insulasi untuk *construction stage 2*.



(Lanjutan)

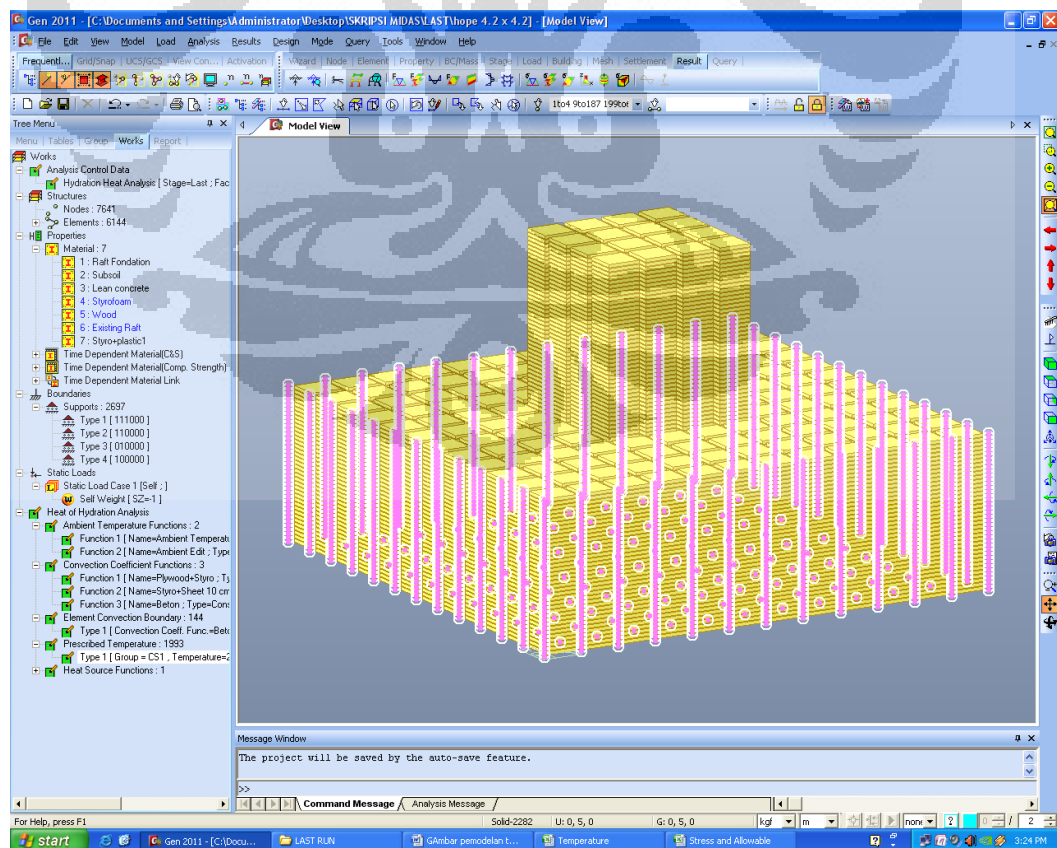
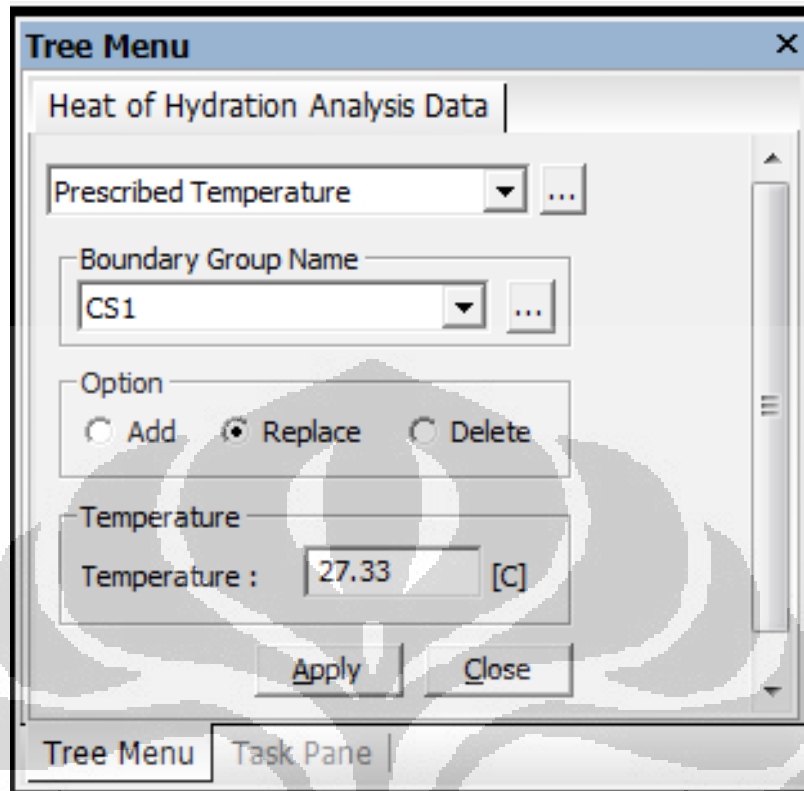


- Menentukan Constant Temperature Condition
Load > Heat of Hydration Analysis Data > Prescribed Temperature
Sekeliling tanah diberikan temperatur konstan 27.33 °C, yang diambil dari



Pengukuran temperatur air tanah

(Lanjutan)



(Lanjutan)

- Menentukan Heat Source Functions

Load > Heat of Hydration Analysis Data > Heat Source Functions

Maksimum adiabatic temperatur diambil dari persamaan:

Total Heat of Hydration

$$\begin{aligned} H_u &= (500 \cdot C_{3S} + 260 \cdot C_{2S} + 866 \cdot C_{3A} + 420 \cdot C_{4AF} + 850 \cdot MgO + \\ & 624 \cdot SO_3 + 1186 \cdot FCaO) \\ &= 489367 \text{ J/Kg} \end{aligned}$$

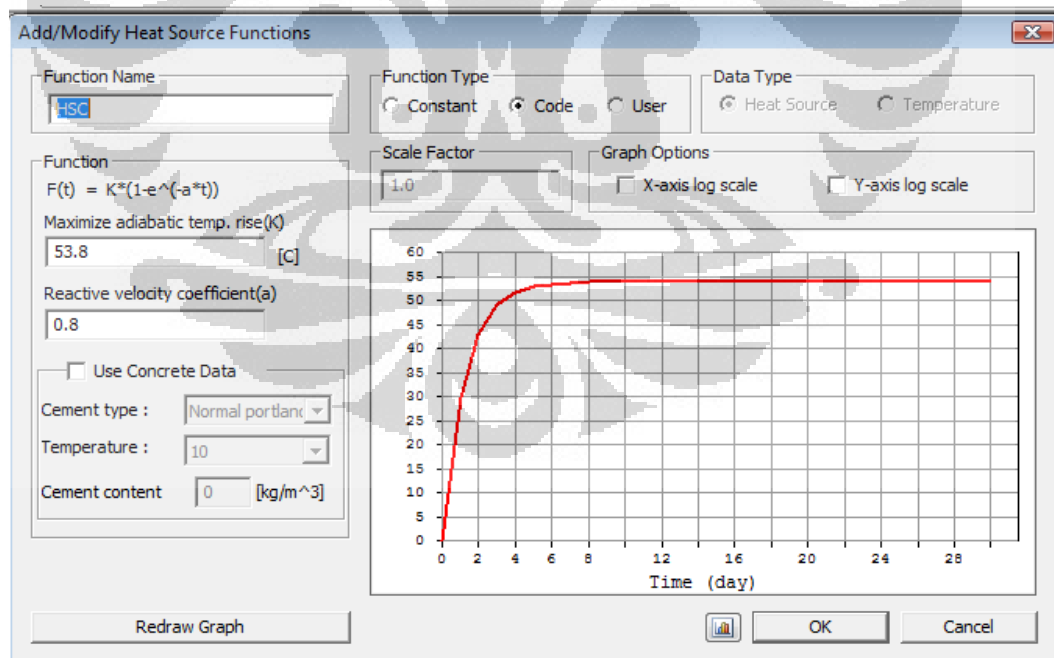
Heat Capacity of Curing Concrete

$$\begin{aligned} \Psi &= (4.19w + 0.86c + 0.82A) \cdot 1000 \\ &= 2505200 \text{ J/m}^3/\Delta C \end{aligned}$$

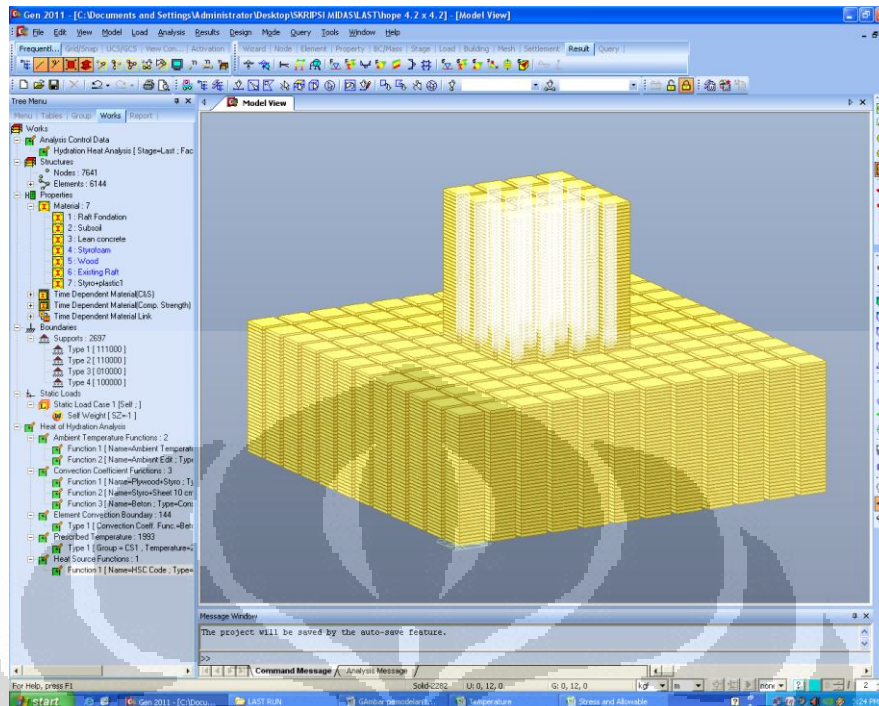
Prediction of Adiabatic Temperature Rise

$$\begin{aligned} \Delta T_2 &= \frac{1.235 \times H_u}{0.326 \Psi} \Delta C \\ &= 53.8^\circ C \end{aligned}$$

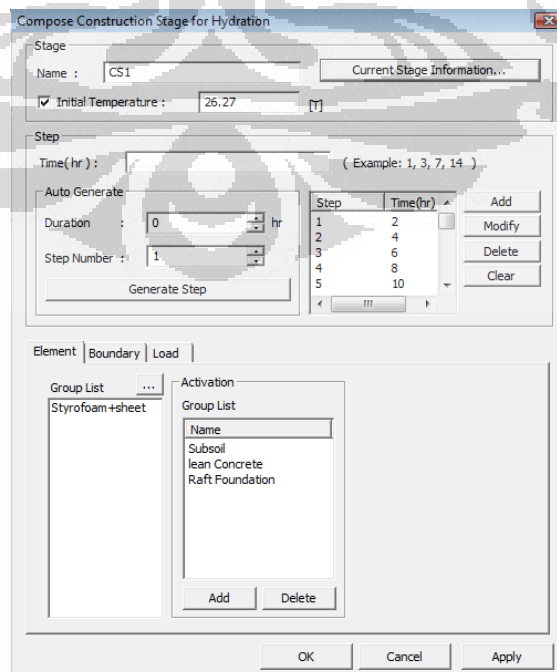
Reactive velocity coefficient didapat dari pendekan temperatur adiabatik perhari dari U.S Bureau of Reclamation (Tabel 4.5)



(Lanjutan)

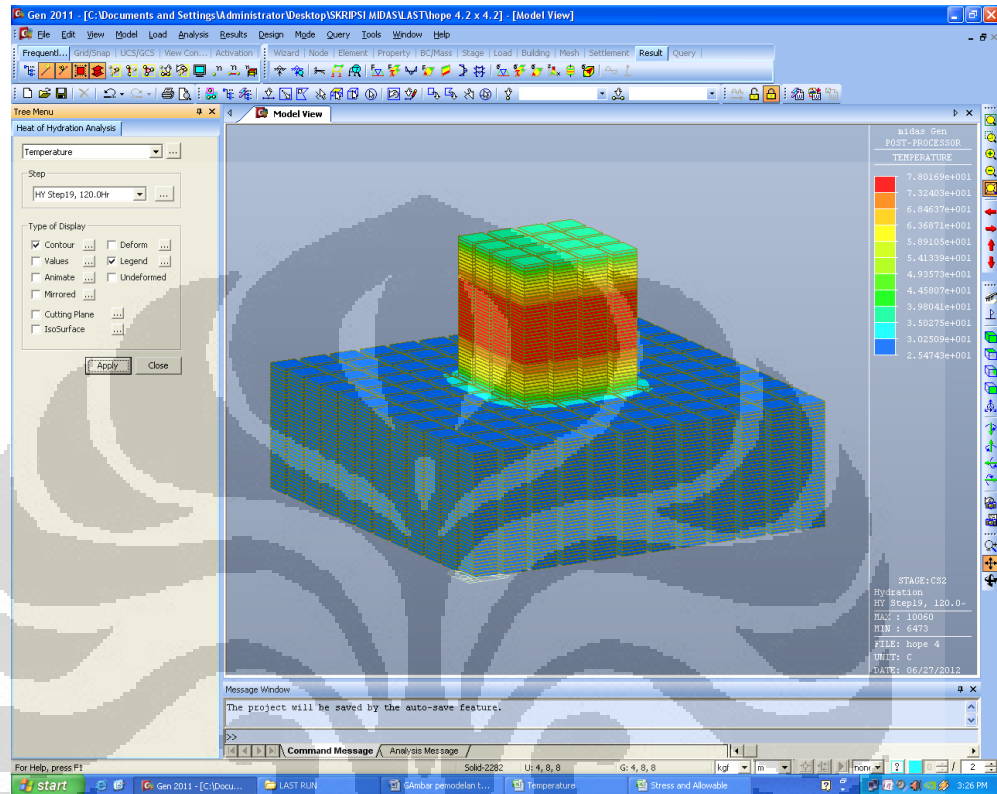


- Menentukan Construction Stages
 Load > Heat of Hydration Data > Define Constructions Stage for Hydration
 CS1 = 48 jam sebelum penggunaan lapisan insulasi
 CS2 = jam ke 50 – 672 (28 hari) penggunaan lapisan insulasi



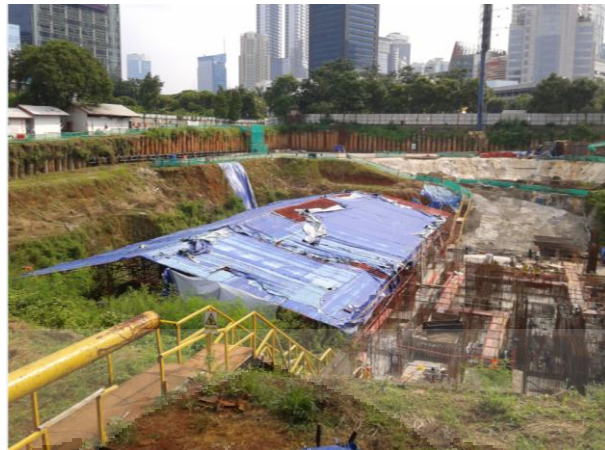
(Lanjutan)

- Structural Analysis
Analysis > Perform Analysis



Lampiran E. Foto-foto *Raft Foundation* Rasuna TowerPengecoran *raft foundation*Tes slump dan *initial temperature*Pengecoran menerus (tanpa *pour delay*)

(Lanjutan)



Instalasi Atap

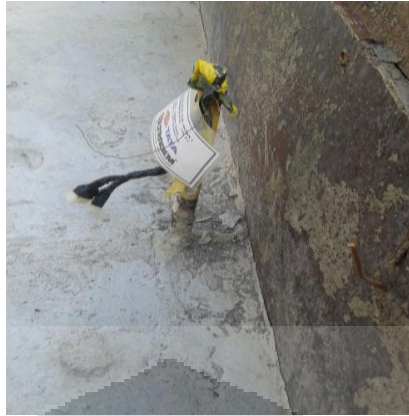


Lapisan Insulasi (3 lapis Styrofoam + plastik)



Pengukuran temperatur *raft foundation*

(Lanjutan)

TC 2, 10 cm dari *formwork*

Pasir setebal 10 cm di area kolom dan rip beam



Pelepasan lapisan insulasi hari ke-26