

BAB 2

Tinjauan Pustaka

2.1 *Mass Concrete*

Mass concrete berdasarkan definisi ACI 207.1996 adalah “any volume of concrete with dimensions large enough to require that measures be taken to cope with generation of heat from hydration of the cement and attendant volume change to minimize cracking.” yang jika di bahasa indonesiakan mass concrete mempunyai arti kurang lebih seperti ini “semua volume beton dengan dimensi yang cukup besar yang membutuhkan langkah-langkah untuk mengatasi panas hidrasi yang dihasilkan oleh semen dan membantu pergantian volume untuk meminimalisir keretakan.

Mass concrete berkembang pesat pada tahun 1930-1970, karena dalam rentang waktu itu banyak dibangun konstruksi dam atau bendungan di amerika, Catatan kontruksi *mass concrete* pada rentang waktu tersebut menunjukkan adanya efek panas hidrasi semen terhadap suhu internal. *Mass concrete* biasanya di gunakan untuk bendungan, tetapi suatu kontruksi dengan volume beton yang besar dapat dikategorikan sebagai *mass concrete*, seperti *raft foundation, bridge piers, thick slabs, pile cap*, dll.

Desain *mass concrete* direncanakan berdasarkan perubahan suhu, lokasi, ketahanan dan biaya yang ditimbulkan, perubahan suhu menjadi perhatian utama karena jika ada perbedaan suhu yang terlalu besar antara titik pusat beton dengan permukaan dan dasar beton dapat menimbulkan tegangan internal beton.

Tegangan yang terjadi dikhawatirkan dapat melampaui kuat tarik beton, sehingga dapat menimbulkan retak thermal. Suhu puncak biasanya terjadi pada umur awal beton sehingga membutuhkan perhatian yang ekstra, dan jika suhu puncak yang terlalu tinggi dapat menimbulkan *delay ettringite formation* (DEF), DEF menurut (Ghorab, 2002) adalah bentuk dari serangan sulfat internal yang dihasilkan oleh tingginya panas hidrasi yang bergabung dengan sulfat didalam pasta semen dan secara relatif tingginya kandungan C_3A dalam semen dapat menyebabkan terjadinya panas hidrasi yang tidak stabil, keretakan dalam beton dan tidak tercapainya kekuatan mass concrete.

2.2 Penelitian Mass Concrete Terdahulu

Penelitian, riset dan studi *mass concrete* telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti di dunia ini. Hasil, analisa dan juga kesimpulan penelitian mereka dapat menjadi informasi dan sumber untuk riset-riset selanjutnya. Berikut beberapa hasil studi dan penelitian *mass concrete* :

- a. Menurut ITC *Concrete Batching Plant* dalam studinya berjudul ***Mass Concrete and Controlling Temperatures in the Mass Concrete***, ada tiga prosedur dalam proses *cooling* yaitu pertama *precooling* beton di *batching plant* untuk mengatur suhu beton dalam pelepasan dari *batching plant*, yang kedua adalah meminimalkan waktu perjalanan untuk pengiriman beton. Karena selama perjalanan dengan durasi 1 jam, suhu beton dapat meningkat 2 – 4 °C. Yang ketiga adalah *postcooling* setelah pengecoran *mass concrete* selesai.

- b. Dalam studi Sr. Rinker M.E yang berjudul *Adiabatic Temperature Rise of Mass Concrete in Florida* terdapat hasil penelitian baru yaitu penggunaan *fly ash* dan *slag* sebagai pengganti semen AASHTO tipe II dapat menurunkan suhu puncak akan tetapi penggunaan *fly ash* dan *slag* tidak efektif dalam menurunkan suhu puncak jika *placing temperature* terlalu tinggi. Dan juga *Higher placing temperature* dapat mempercepat akselerasi hidrasi semen, sehingga beton dapat mencapai suhu puncak dengan cepat (Melky Suryawijaya, 2012).
- c. Menurut studi Ir. Nono Dritanto yang berjudul **Evaluasi Kenaikan Temperatur Pada Struktur Beton Massa** didapat suatu kesimpulan bahwa panas hidrasi pada *mass concrete* sangat dipengaruhi oleh kandungan unsur-unsur kimia dalam semen. Dalam pemodelannya, *mass concrete* diasumsikan dalam suatu batang atau kolom satu dimensi, dengan pertimbangan bahwa pengukuran suhu *mass concrete* dilapangan hanya dalam arah vertikal di 3 tingkat ketinggian atas, tengah, dan bawah (Melky Suryawijaya, 2012).

2.3 Panas Hidrasi

Setiap benda mempunyai kemampuan untuk melepaskan panas atau kalor tergantung pada besarnya *thermal conductivity* yang dimiliki dan volume benda tersebut, semakin besar volume maka semakin besar juga panas hidrasi yang dihasilkan akan tetapi semakin lambat juga benda tersebut untuk melepaskan panasnya, dan juga beton mempunyai sifat "*poor thermal conductivity*" yaitu lemah dalam melepaskan panas, sehingga beton dengan volume yang besar

menghabiskan waktu yang relatif lebih lama untuk melepaskan panasnya sendiri daripada material jenis lain (Rochaeti etall, 2014). Pada proses pelepasan panas. bagian permukaan beton akan lebih mudah dalam melepaskan panas dibandingkan dengan bagian dalam. Hal ini selalu mengakibatkan terjadinya perbedaan suhu antara beton yang lapisan permukaan, beton lapisan dalam, dan beton lapisan dasar.

Material yang mempunyai panas hidrasi yang besar adalah semen portland, semen portland yang bercampur dengan air akan menimbulkan reaksi yang biasa disebut panas hidrasi.

Komposisi kimia yang membentuk sement portland adalah : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 , C_3A , C_3S , C_2S , dan C_3AF . Susunan komposisi kimia tergantung juga dari jenis semen. Namun komposisi utama dari semen portland adalah C_3A , C_3S , C_2S dan C_3AF . Setiap komposisi utama kimia dalam semen portland dapat memberikan efek panas yang berbeda-beda.

Tabel 2.1. *Standard requirements for portland cement* (Melky Suryawijaya, 2012)

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

Setiap tipe semen mempunyai komposisi kimia yang berbeda-beda oleh karena itu panas yang dihasilkan juga berbeda-beda untuk setiap tipe semen. Komposisi kimia yang menghasilkan panas lebih banyak dan lebih cepat terjadi proses hidrasi adalah Tricalcium Silicate (C_3S) dan Tricalcium Aluminate (C_3A) dibandingkan komposisi kimia yang lain. Pemakaian jumlah semen juga sangat mempengaruhi panas yang dihasilkan, semakin banyak semen semakin besar pula panas yang dihasilkan.

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

(Sella Adinda Sesar, 2012)

Compound	Specific Heat of Hydration (cal/gr)
C_3S	120
C_2S	62
C_3A + gypsum	320
C_3AF	100

Ada dua (2) jenis penyaluran panas yang diakibatkan oleh panas hidrasi yaitu :

- a. Konduksi
- b. Konveksi

2.3.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas atau kalor yang terjadi karena perubahan energi. Molekul dan elektron bergerak dari suhu tinggi ke suhu rendah, dan pergerakan tersebut menghasilkan benturan yang menimbulkan energi sehingga dapat terjadi perpindahan panas (Melky Suryawijaya, 2012).

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.

2.3.2 Konveksi

Konveksi merupakan bentuk lain dari perpindahan panas atau kalor dimana panas yang ditransmisikan melalui gerak relative molekul fluida terjadi diantara fluida dan permukaan padat (Melky Suryawijaya, 2012).

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

Dari sudut pandang orang teknik, koefisien perpindahan panas, h_c (Kcal/m².h.°C) didefinisikan untuk melambangkan perpindahan panas antara zat padat dan fluida, dimana T merupakan temperatur atau suhu permukaan dari zat padat dan aliran fluida di permukaan memiliki temperature T.

Koefisien perpindahan panas bervariasi, tergantung dari bentuk geometrinya, sifat zatnya, suhunya, dan berbagai karakter zat yang terjadi secara konveksi.

2.4 Reaksi Beton ketika Panas Hidrasi

Setelah beton mulai kering dan mengeras, beton akan menerima pembebanan dari berat sendiri dan beban dari luar. Sehingga pada beton akan terbentuk suatu korelasi atau hubungan antara tegangan dan regangan yang dapat menimbulkan retak jika terlampau besar nilainya. Dan reaksi yang ditimbulkan oleh beton akibat panas hidrasi antara lain :

1. Rangkak
2. Susut
3. Elastisitas (Sifat elastis)

2.4.1 Rangkak

Rangkak atau *creep* atau *lateral material flow* adalah penambahan regangan terhadap waktu akibat adanya beban yang bekerja. Deformasi awal akibat pembebanan disebut regangan elastis, sedangkan regangan tambahan akibat beban yang sama disebut regangan rangkak (Nawy, Edward G. , 2008). Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya deformasi rangkak antara lain adalah kadar air, perbandingan semen, umur beton pada waktu pembebanan, suhu dan derajat kebasahan sewaktu pengeringan beton.

2.4.2 Susut

Susut atau *shrinkage* pada dasarnya dibagi atas dua tipe, yaitu susut plastis dan susut pengeringan. susut plastis adalah susut yang terjadi beberapa jam setelah beton segar dicor kedalam acuan. sedangkan susut pengeringan adalah susut yang terjadi setelah beton mencapai bentuk akhir dan proses reaksi hidrasi didalam semen telah selesai (Nawy, Edward G. , 2008). 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.

2.4.3 Elastisitas

Elastisitas beton atau *elasticity of concrete* adalah sifat elastisitas beton yang dapat dilihat dengan pembebanan pada beton, beton akan menunjukkan sifat elastisitas yang murni pada waktu pembebanan yang singkat yaitu regangan akan muncul dan menghilang segera setelah pengaplikasian dan penghilangan tekanan pada beton (Neville A. M., 2010), sedangkan pada pembebanan yang tidak singkat beton akan mengalami regangan dan tegangan sesuai lama pembebanannya. Modulus elastisitas beton bervariasi terhadap beberapa faktor, diantaranya adalah kekuatan beton, umur beton, sifat-sifat agregat dan semen. Modulus elastisitas beton juga dapat bervariasi terhadap kecepatan pembebanan dan terhadap beberapa jenis beton.

2.5 Kenaikan Suhu

Suhu puncak biasanya terjadi pada minggu pertama setelah pengecoran.

Faktor yang mempengaruhi kenaikan suhu *mass concrete* antara lain :

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

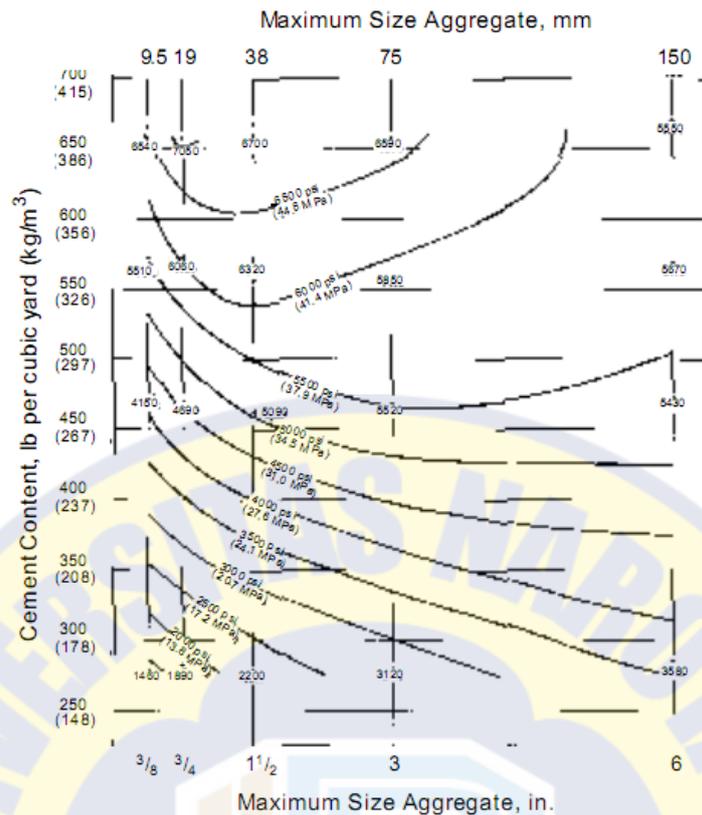
komposisi semen. Jenis semen portland biasanya yang digunakan untuk membangun konstruksi *mass concrete*.

b) Gradasi Agregat Kasar

Secara teoritis, semakin besar ukuran maksimum agregat, komposisi semen kurang dibutuhkan dalam penggunaan beton dalam suatu volume tertentu untuk mencapai mutu beton yang diinginkan. Akan tetapi, untuk mencapai efisiensi semen terbesar ada ukuran maksimum optimal untuk setiap tingkat kekuatan tekan, dapat dilihat pada gambar 2.1. Penggunaan ukuran butiran maksimum dibatasi dengan penggunaan jarak dan ukuran tulangan yang dipakai dalam konstruksinya, jika struktur *mass concrete* tidak menggunakan penulangan dapat digunakan ukuran maksimum yang tidak terbatas. Penggunaan ukuran maksimum tergantung dari desain kekuatan, *batching plant*, pencampuran, pengangkutan, penempatan material, dan pengkonsolidasian beton. Partikel agregat besar yang bentuknya tidak beraturan cenderung mengakibatkan retak karena perubahan difrensial volume.

Tabel 2.3. *Fine Aggregate for mass concrete* (U.S Bureau of Reclamation)

Sieve designation	Percentage retained, individual by weight
$\frac{3}{8}$ in. (9.5 mm)	0
No. 4 (4.75 mm)	0-5
No. 8 (2.36 mm)	5-15
No. 16 (1.18 mm)	10-25
No. 30 (600 μ m)	10-30
No. 50 (300 μ m)	15-35
No. 100 (150 μ m)	12-20
Pan fraction	3-7



Gambar 2.1. Effect of aggregate size and cement content on compressive strength at one year (ACI Committee 207,1996)

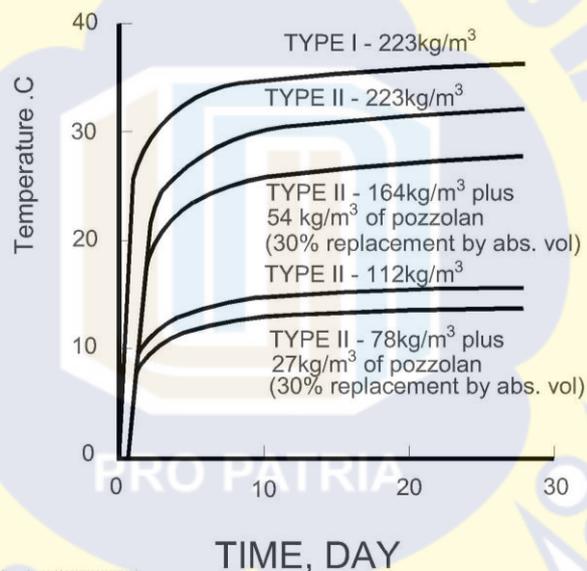
c) *Coarse Aggeragate Coefficient of Thermal Expansion (CTE)*

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

d) *Supplementary Cementitious Materials (SCMs)*

SCMs fungsinya mirip seperti fly ash dan slag yaitu dapat mengurangi panas hidrasi. Fly ash adalah abu atau debu dari pembakaran batu bara, fly ash dapat juga 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 terpengaruh terhadap penurunan panas hidrasi. Silica fume atau juga dikenal dengan micro silica merupakan zat yang terdiri dari partikel vitrous yang sangat halus dengan luas permukaan yang diisyaratkan sebesar 215.280 ft² /lb (20.000 m²/kg) yang jika dibandingkan dengan partikel semen ukurannya 100 kali lebih kecil dari ukuran semen.



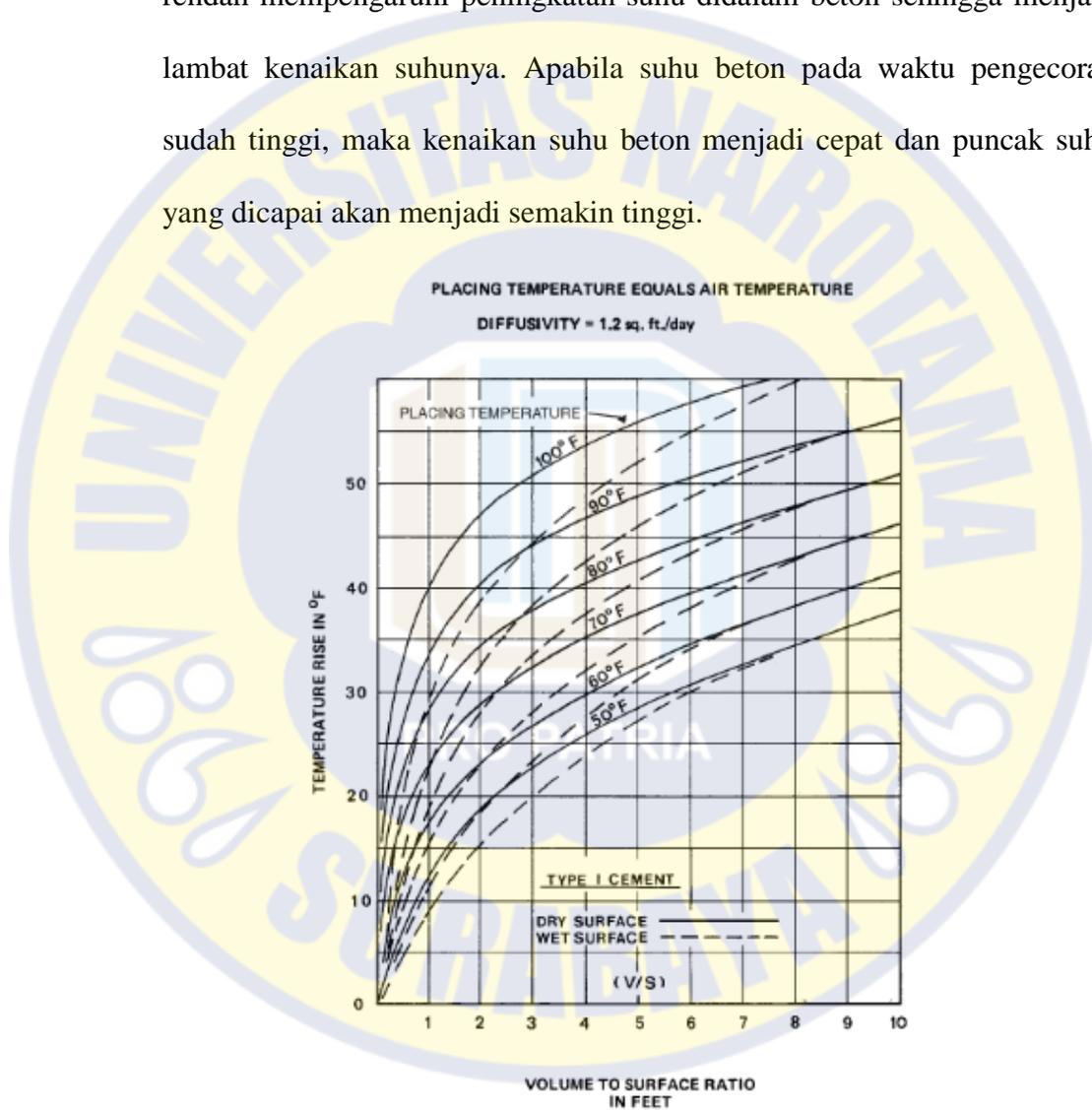
Gambar 2.2. Pengaruh pemakaian pozzolan terhadap suhu (ACI Committee 207, 2002)

Tabel 2.4 Pengaruh pemakaian Silika Fume terhadap panas hidrasi (ACI Committee 207, 2002)

	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

e) Suhu Beton pada Pengecoran (*initial temperature*)

Suhu beton pada saat pengecoran sangat dipengaruhi suhu bahan untuk pembuatan beton. Pengecoran pada suhu rendah dapat mengurangi tegangan yang terjadi akibat perubahan suhu karena suhu pengecoran yang rendah mempengaruhi peningkatan suhu didalam beton sehingga menjadi lambat kenaikan suhunya. Apabila suhu beton pada waktu pengecoran sudah tinggi, maka kenaikan suhu beton menjadi cepat dan puncak suhu yang dicapai akan menjadi semakin tinggi.



Gambar 2.3. *Temperature rise of concrete members containing 375 cement per cubic yard for different placing temperature (ACI Committee 207, 2002)*

2.6 Thermal Cracking

Material beton biasanya menghasilkan panas dari proses hidrasi. Panas yang dihasilkan merambat keluar menuju lingkungan sekitarnya. Struktur dengan ketebalan kecil seperti perkerasan jalan, panas yang dilepaskan hampir sama dengan panas yang dihasilkan, sehingga suhu pada beton dapat terkontrol. Sebaliknya untuk pekerjaan *mass concrete* panas yang dilepaskan relative lebih lambat dibandingkan panas yang dihasilkan. Sehingga terjadi peningkatan suhu beton. Pengendalian suhu dalam beton sangat penting untuk mencegah terjadinya retak thermal, *delay ettringite formations*, dan kerusakan-kerusakan lainnya.

Kenaikan temperatur dalam menyebar keseluruh permukaan beton dan melepaskan panas ke lingkungan. Temperatur pada permukaan beton *mass concrete* lebih kecil dibandingkan temperatur bagian dalam karena berhubungan dengan suhu lingkungan. Perbedaan temperatur yang besar dapat menginduksi tekanan ke permukaan, dan jika tekanan yang terjadi melampaui kuat tarik beton, maka dapat menimbulkan retak thermal.



Gambar 2.4. Alur *thermal cracking*

Restraint atau hambatan yang terjadi ada 2 jenis : yaitu *internal restraint* dan *external restraint*. *Internal restraint* terjadi karena perbedaan suhu dalam (interior) dengan permukaan (ekterior) beton. Jika *tensile strength* permukaan beton terjadi karena ekspansi inti beton lebih besar dari kuat tarik beton, maka

peluang retak semakin akan semakin besar. *Internal restraint* juga dapat terjadi karena pengecoran terhadap beton lama, lapisan tanah, dll yang memiliki perbedaan suhu.

External restraint dari perubahan suhu dapat menyebabkan retak pada beton bertulang. Untuk mengurangi lebar dan kedalaman retakan yang terjadi pada *mass concrete* dapat dikurangi dengan pendetailan tulangan pada beton *mass concrete*.

Kondisi batas *thermal cracking* adalah suhu maksimum berada di titik suhu 70°C dan maksimum perbedaannya adalah 20°C. Kondisi batas *thermal cracking* tersebut berdasarkan temperatur dan kondisi alam di Amerika yang berdasarkan (ACI Committee 207,1996), sehingga tidak dapat diterapkan secara utuh untuk temperatur dan kondisi alam yang ada di Indonesia. Akan tetapi keterbatasan tersebut dapat menjadi pedoman untuk melaksanakan pekerjaan *mass concrete* di Indonesia.

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

Retak terjadi tidak 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 temperature

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

Tabel 2.5. *Tensile strain capacity of concrete with different aggregates (ε_t)*

(Melky Suryawijaya , 2012)

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

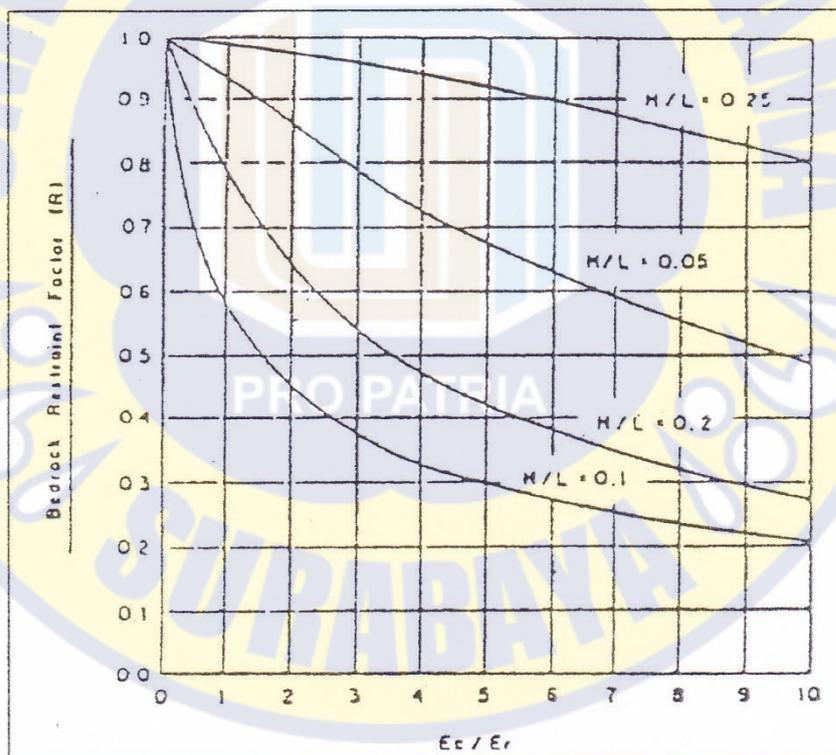
Tabel 2.6. *Recorded value of restraint (ε_r)* (Melky Suryawijaya , 2012)

<i>Pour Configuration</i>	<i>Restraint, R</i>
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

Tabel 2.7. *Thermal expansion coefficient (α_c)* (Melky Suryawijaya , 2012)

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

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



Gambar 2.5. Grafik hubungan e_c/e_r untuk beton sebelum berumur 30 hari

(Melky Suryawijaya , 2012)

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 modulus lekatan lain
- Koefisien pengembangan panas (ϵ_c)

Nilai E_c diberikan dengan persamaan dibawah ini :

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

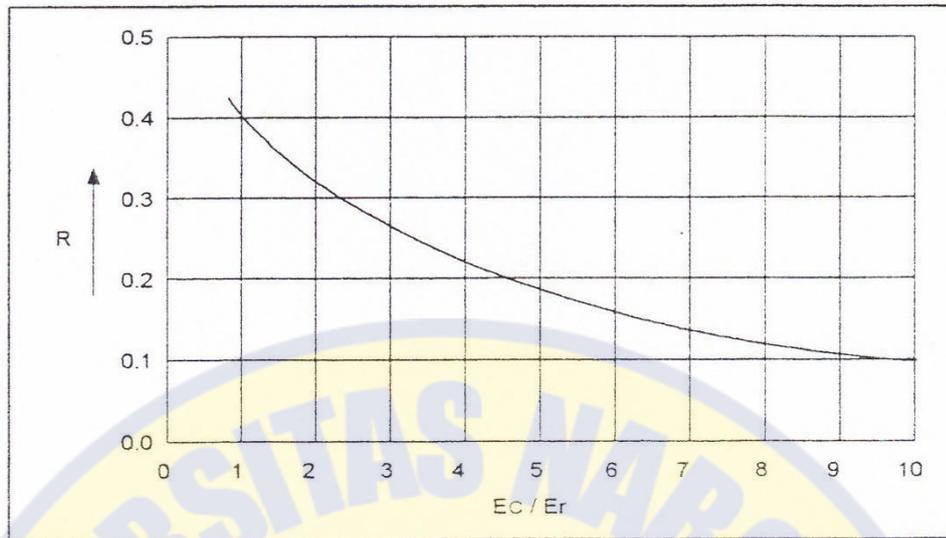
Dimana :

E_c = Elastisitas modulus beton

E_r = Elastisitas modulus lantai kerja

E_e = Elastisitas efektif modulus antara *mass concrete* dengan lekatan lain

Tegangan tarik yang paling besar biasanya terjadi pada *mass concrete* yang berhubungan dengan lantai kerja. Hal ini disebabkan perbedaan elastisitas modulus *mass concrete* dengan 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

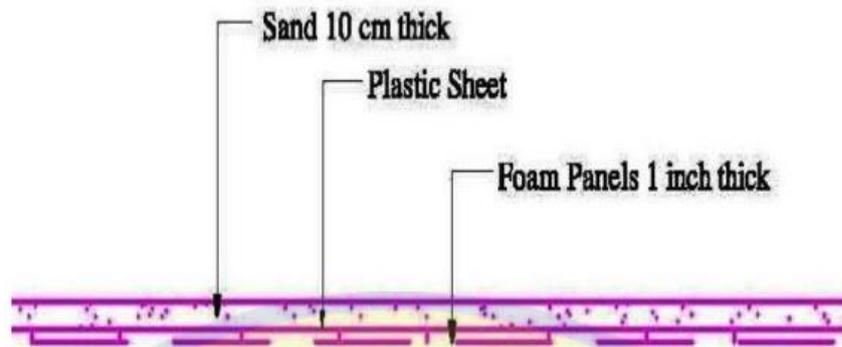
(Melky Suryawijaya , 2012)

2.7 Metode Insulasi

Mass concrete didalam bekisting mengalami peningkatan suhu sebagai reaksi dari panas hidrasi semen. Umur awal *mass concrete* mengalami peningkatan suhu yang tinggi. *Mass concrete* dengan ketebalan $\geq 1,5$ meter mengalami peningkatan suhu yang mendekati kondisi adiabatik pada bagian inti. Lapisan Insulasi digunakan untuk meminimalkan perbedaan suhu yang besar yang dapat menyebabkan retak thermal.

Beberapa lapisan insulasi antara lain :

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

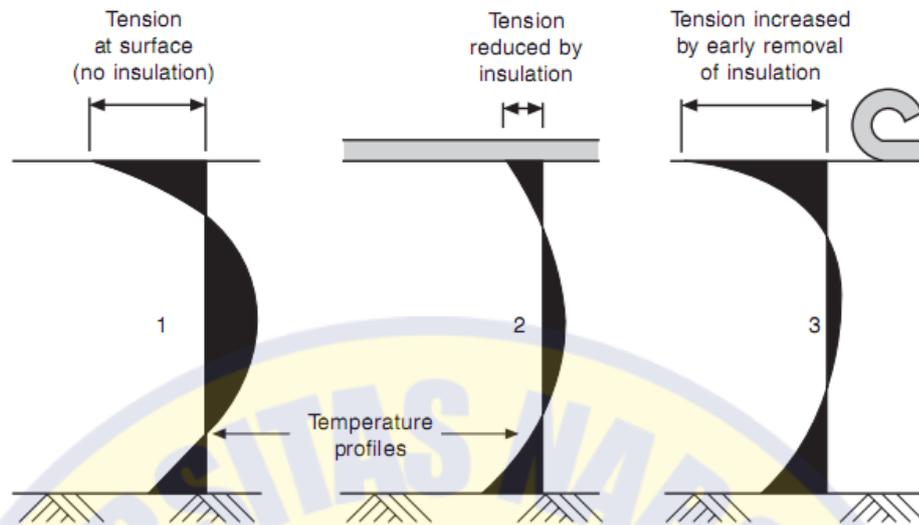


Gambar 2.7. Lapisan insulasi

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

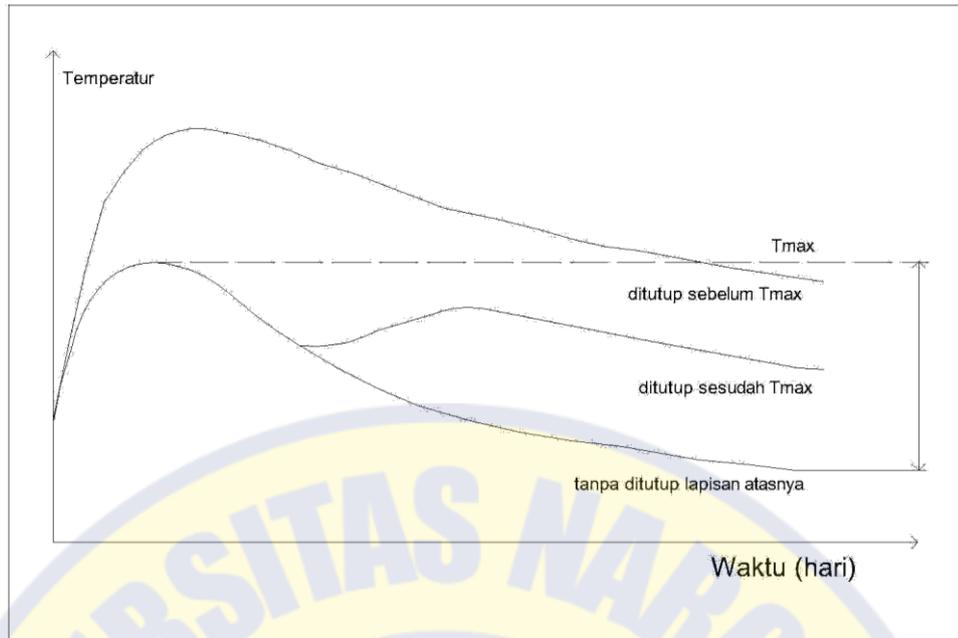
Tabel 2.8. *Minimum periods of insulation to avoid excessive temperature differentials* (Melky Suryawijaya , 2012)

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



Gambar 2.8. Diagram tegangan pengaruh lapisan insulasi (Melky Suryawijaya , 2012)

Tegangan pada permukaan beton 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 suhu yang besar. Penggunaan lapisan insulasi dapat mengurangi perbedaan suhu antara beton bagian dalam terhadap permukaan atas dan dasar beton. Pelepasan lapisan insulasi diawal dapat menyebabkan “*thermal shock*” sehingga meningkatkan perbedaan suhu yang besar antara permukaan dengan lingkungan dan dapat mengakibatkan tegangan menjadi besar sehingga dapat terjadi *thermal cracking*. Penggunaan lapisan insulasi dapat menaikkan suhu beton, dan apabila beton telah ditutup sebelum mencapai suhu puncak, maka suhu yang terjadi akan jauh lebih besar dari suhu puncak.



Gambar 2.9. Kenaikan suhu setelah penutupan insulasi (Melky Suryawijaya , 2012)

2.8 Precooling

Dalam retak *thermal* salah satu hal yang paling berpengaruh adalah pengontrolan suhu awal (*initial temperature*). Jika *initial temperature* semakin kecil maka akan terjadi penurunan *peak temperature*. Tujuan dari *precooling* adalah untuk mengontrol retak akibat perubahan suhu. Dalam pekerjaan *mass concrete* perlu diketahui batas *peak temperature* sehingga dapat dikontrol *initial temperature* dalam mengendalikan *peak temperature*. Beberapa metode *precooling* yang diterapkan dalam konstruksi *mass concrete* antara lain :

- Air dingin

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

- Es (*Crushed ice*)

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

- Pendinginan agregat

Agregat kasar dan halus memiliki komposisi terbesar dalam konstruksi *mass concrete*. 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.

- 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.

Tabel 2.9. *The Cooling Effect of Precooling the Various Raw Materials*

(Zhu Bofang, 2014)

Raw Material	The Weight (W) in One Cubic Meter of Concrete (kg)	Specific Heat [kJ/(kg°C)]	The Heat Dissipated by Precooling Raw Materials When Precooling Temperature is 1°C (kJ)	The Temperature Drop of Concrete (°C)
Stone	1600	0.84	1344	0.57
Sand	570	0.84	479	0.20
Water	100	4.19	419	0.18
Cement	150	0.84	126	0.05
Concrete	2420	1.005	2368	1.00

2.9 *Pipecooling*

Pipecooling merupakan metode pengendalian suhu yang efektif dengan sirkulasi cairan dingin melalui pipa berdinding tipis yang tertanam didalam beton. *Pipecooling* biasanya dilakukan beberapa hari atau bulan. Setelah pelepasan *pipecooling*, *mass concrete* belum diijinkan untuk untuk dilakukan *grouting* karena suhu beton dapat berpeluang untuk meningkat kembali. Jika suhu beton meningkat kembali, penggunaan *pipecooling* kembali perlu dilakukan sampai suhu didalam *mass concrete* relatif stabil. Setelah metodhe *pipecooling* selesai, barulah *mass concrete* boleh dilakukan pekerjaan *grouting*. *Pipecooling* terbuat dari baja galvanis atau aluminium atau pipa tipis sejenis aluminium dengan diameter luar 25.4 mm dengan ketebalan 1.5 mm. Pipa plastic dan PVC tidak dapat digunakan sebagai *embedded pipe* karena suhu beton yang tinggi dapat merusak jenis pipa tersebut.

2.10 Metode Prediksi Temperatur *Mass Concrete*

Selama bertahun-tahun, banyak dikembangkan metode-metode sederhana untuk memprediksi suhu pada *mass concrete*. Seiring perkembangan teknologi, prediksi suhu *mass concrete* sekarang dapat menggunakan program computer, seperti MIDAS CIVIL, MIDAS GEN, Bentley Staad Pro, dll. Dalam konstruksi *mass concrete* kontraktor wajib menyerahkan prediksi suhu dan rencana pengontrolan suhu *mass concrete*.

2.10.1 Metode *Portland Cement Association (PCA)*

Metode PCA dapat digunakan apabila :

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

Kelemahan metode PCA

- Metode PCA tidak dapat memprediksi kapan waktu suhu puncak terjadi
- Metode PCA tidak dapat memprediksi perbedaan suhu dan pelepasan panas yang terjadi.

2.10.1.1 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)

2.10.1.2 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 suhu air dan agregat

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

2.10.1.3 Prediksi Suhu Puncak

Prediksi suhu puncak dapat diketahui menggunakan formula *Portland Cement Association* yaitu :

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

dimana :

T_{max} = Suhu maximum beton ($^{\circ}\text{C}$)

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

W_c = Kandungan Semen (kg)

W_{scm} = Kandungan *fly ash* (kg)

2.10.2 Metode *U.S BUREAU OF RECLAMATION*

Perubahan suhu *mass concrete* dipengaruhi oleh 2 hal, yaitu :

- a. Suhu maksimum *mass concrete* (T_{max})
- b. Kehilangan suhu (*Temperatur Loss*)

2.10.2.1 Suhu Maksimum *Mass Concrete* (T_{max})

Suhu maksimum yang dapat dicapai oleh beton *mass concrete* dipengaruhi oleh 3(tiga) hal yaitu:

- a. Suhu pembuatan beton (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 = Suhu pembuatan beton ($^{\circ}\text{C}$)

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

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

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

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

b. Kenaikan suhu beton karena 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 suhu beton yang terjadi karena panas hidrasi semen

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

m = Konstanta

t = Umur beton setelah pengecoran

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

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

ρ = Kerapatan beton (kg/m^2)

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

c. Transportasi dan pematatan

Didalam cuaca yang sangat panas $\pm 30 \text{ } ^\circ C - 50 \text{ } ^\circ C$, disebabkan karena sinar matahari, selama pengangkutan atau didalam perjalanan, suhu beton akan bertambah ($2 - 4 \text{ } ^\circ C/jam$), oleh karena itu sangat diperlukan sekali untuk melakukan quality control pada suhu beton terhadap beton yang sudah datang.

Jadi suhu maximum (T_{max}) *mass concrete* :

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

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

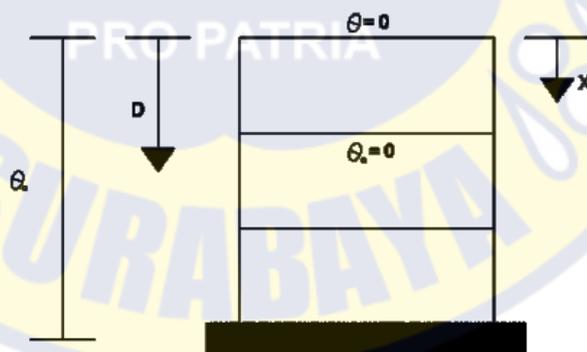
2.10.2.2 Kehilangan Suhu (T_L)

Selama pengerasan *mass concrete*, sebagian panas yang diakibatkan oleh panas hidrasi semen akan hilang. Kehilangan suhu beton *mass concrete* dapat digolongkan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu kehilangan suhu karena penguapan (T_{L1}), kehilangan suhu karena udara luar (T_{L2}), dan kehilangan suhu karena lapisan dibawahnya (T_{L3}).

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

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

Kehilangan suhu karena penguapan terjadi selama proses pengerasan dari *mass concrete*. Sebagai idealisasi dari masalah diatas adalah mengasumsikan sebuah lapisan dengan ketebalan D mempunyai suhu awal (Θ_0), ditambah dengan panas hidrasi semen, dan mempunyai suhu permukaan atas nol ($\Theta = 0$).



Gambar 2.10. Permodelan kehilangan temperature karena penguapan (T_{L1}) (Suryawijaya,

Melky, 2012)

dimana :

Θ_0 = Suhu 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 suhu sebesar (d_T) dengan penambahan waktu sebesar (d_t), persamaan diatas diturunkan lagi menjadi :

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

Sehingga dengan demikian suhu menjadi :

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

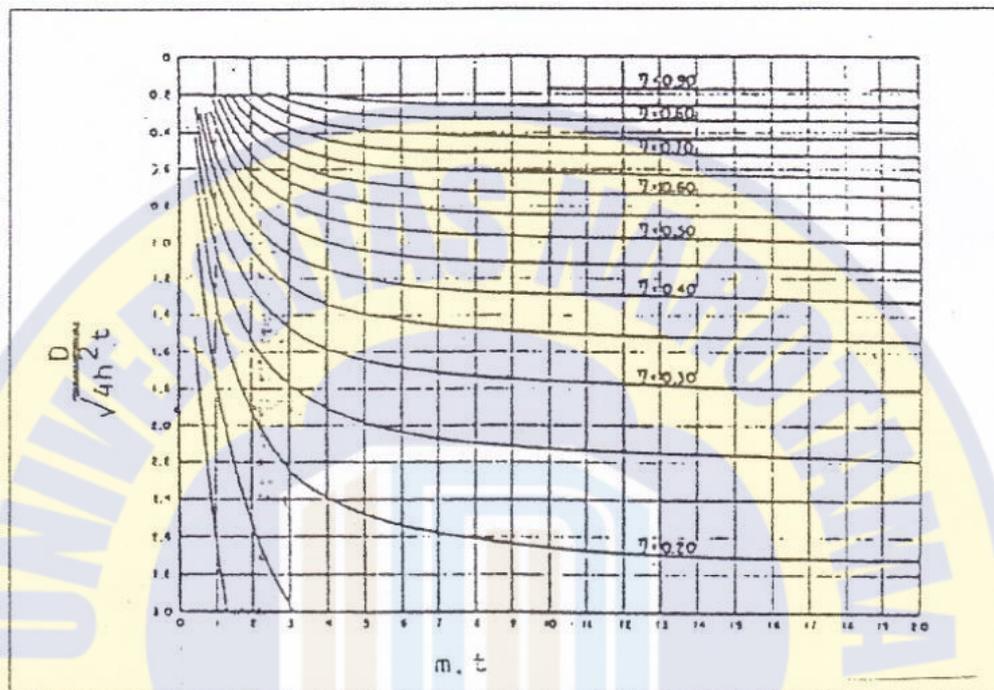
Kehilangan suhu karena penguapan pada prinsipnya sama dengan kehilangan suhu karena udara luar dengan tambahan pengaruh dari panas hidrasi semen, sehingga persamaan diatas dapat disubstitusikan ke dalam persamaan dibawah ini, sehingga :

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

Grafik kenaikan suhu dan kehilangan suhu tidak terjadi secara bersamaan, untuk membedakan kedua grafik tersebut diperkenalkan satu variable waktu yaitu variasi λ . Dengan demikian integrase berada dalam batas $\lambda = 0$ ke $\lambda = t$ dan kehilangan suhu 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 2.11. Grafik hubungan $\eta = \frac{q}{c\rho DT_o}$ dengan harga $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$ (U.S Bureau of Reclamation, 1981)

Dengan demikian dapat ditentukan besarnya kehilangan suhu 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 suhu karena penguapan

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

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

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

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

$$\Theta = \Theta_0 \text{ untuk } 0 > D \quad \text{ketika } t = 0$$

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

Solusi yang memenuhi syarat awal dan syarat batas :

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

Suhu permukaan ($x = 0$) dengan waktu (t), didapat dengan menurunkan persamaan diatas terhadap x sehingga didapat gradient suhu 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 suhu karena udara luar adalah sebagai berikut :

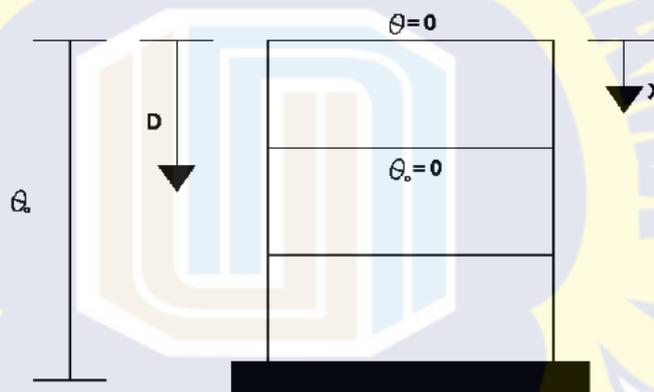
$$T_{L2} = \frac{q_2}{c \cdot \rho \cdot D} \quad (2.28)$$

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

Kehilangan suhu yang terjadi karena panas yang hilang disebabkan perbedaan suhu antara suhu pengecoran *mass concrete* dengan suhu beton (*lean concrete*) dibawahnya dirumuskan dari persamaan differensial dasar untuk hantaran panas dalam satu dimensi

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

Sebagai idealisasi dari masalah ini adalah dengan mengasumsikan keseluruhan tebal lapisan yang telah dicor mempunyai suhu awal yang seragam (Θ_0), kemudian menganggap suhu awal lapisan yang paling atas nol ($\Theta_0 = 0$), dan suhu permukaan paling atas adalah nol ($\Theta = 0$).



Gambar 2.12. Pemodelan kehilangan temperatur karena udara luar (Suryawijaya, Melky, 2012)

dimana :

Θ_0 = Suhu 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 :

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

$$\Theta = \Theta_0 \text{ untuk } 0 > D \quad \text{ketika } t = 0$$

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

Solusi persamaan yang memenuhi syarat awal dan syarat batas :

$$\theta = \frac{\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{D+x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta - \frac{\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{D-x}{\sqrt{4h^2t}}} e^{-\beta^2} d\beta \quad (2.30)$$

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

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{2\theta_0}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\frac{D^2}{4h^2t}}}{\sqrt{4h^2t}} \quad (2.31)$$

Total panas yang hilang (q_3) per-satuan luas permukaan untuk waktu (t) adalah :

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

dimana K = Konduktivitas beton

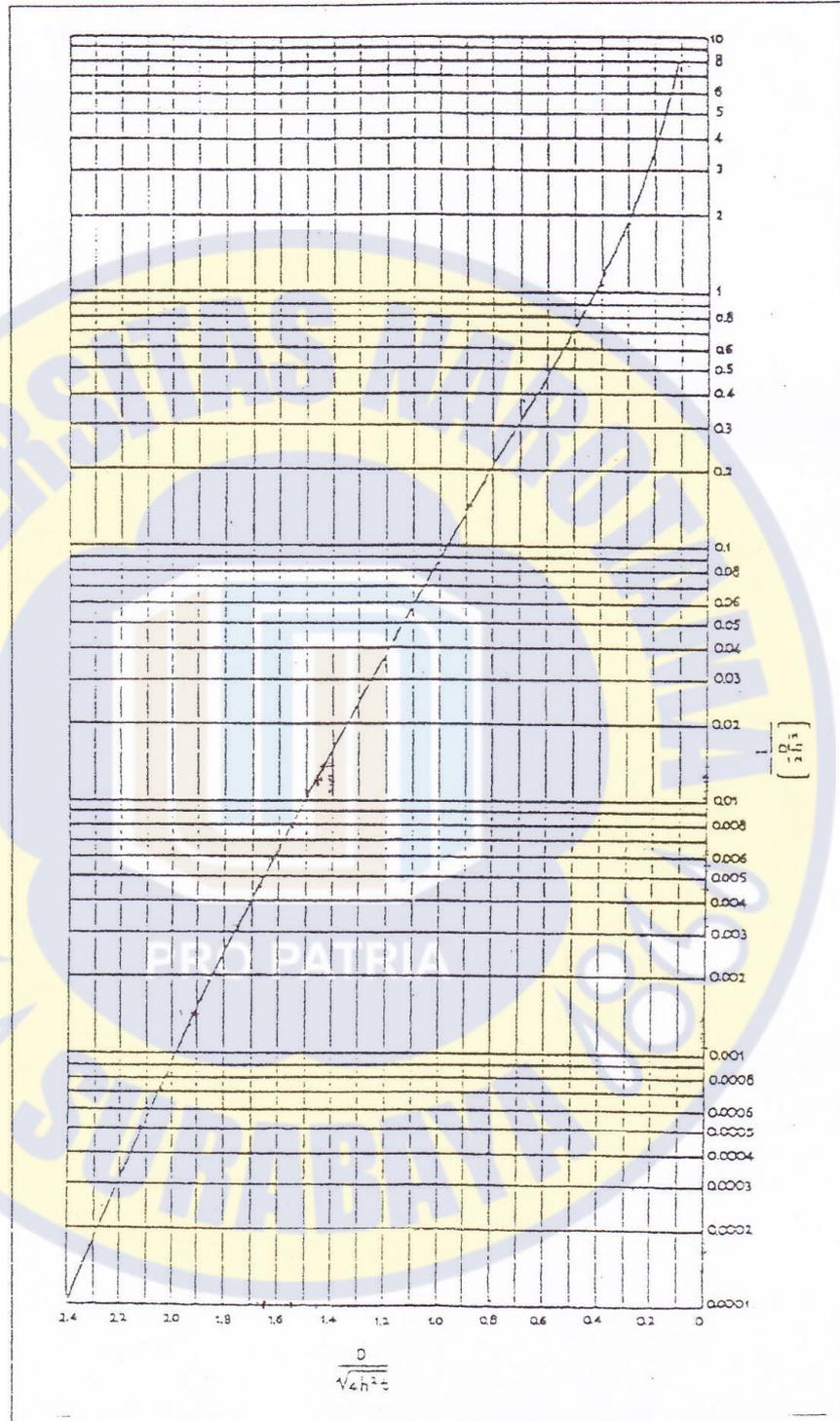
Persamaan diatas dapat ditulis juga menjadi :

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

dimana :

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

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



Gambar 2.13. grafik hubungan $\frac{I}{D}$ dengan harga $\frac{D}{\sqrt{4h^2t}}$ Sumber : U.S Bureau of Reclamation, 1981)

Sehingga didapatkan :

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

dimana :

T_{L3} = Kehilangan suhu karena lapisan bawah

q_3 = Banyaknya panas yang hilang karena perbedaan suhu antara suhu pengecoran *mass concrete* dengan beton atau lapisan bawahnya

ρ = Kerapatan beton

D = Tebal lapisan dari blok beton

2.10.2.3 Suhu Akhir Beton (T_f)

Suhu akhir *mass concrete* yang dicapai sama dengan setengah dari jumlah suhu udara rata-rata dengan suhu air yang digenangi beton tersebut.

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

dimana :

T_f = Suhu akhir beton

T_d = Suhu udara rata-rata

T_a = Suhu air

2.10.2.4 Perubahan suhu (ΔT)

Perubahan suhu yang terjadi merupakan selisih perbedaan suhu maksimum dengan suhu akhir beton dan total kehilangan suhu.

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

dimana :

T_{max} = Suhu maksimum

ΣT_L = Total kehilangan suhu

T_f = Suhu akhir beton

