Received : 27/04/2021

Accepted: 20/06/2021

Published : 30/06/2021

Pengaruh Jenis Material Pipa Pendingin Terhadap Distribusi Temperatur di Dalam Beton Yang Didinginkan dengan Sistem *Post Cooling*

Ratnawati

Program Studi Teknik Mesin Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang.

Jl. Bridgjen Katamso No. 40 Bontang - Indonesia 75311

(Email: azahabr@gmail.com)

Abstract

Mass concrete is a concrete casting with a large enough volume, usually used for foundations, bridges, dams and so on. The heat of hydration in the mass concrete causes a temperature difference between the inside and the outside of the concrete surface. This can cause cracks in the concrete, where the temperature inside the concrete has a higher temperature rise than the outer surface which is in contact with the environment. One way to control the temperature of the concrete is to use a post cooling system. Post cooling system design requires knowledge of temperature distribution in concrete. The research was conducted by varying the cooling pipe materials used, namely steel, PVC, and PEX where the cooling water discharge and temperature were constant. The result of the research that have been carried out show that with the same cooling water discharge and temperature, concrete with PVC cooling has a higher temperature than PEX cooling pipe or steel.

Keywords: *Mass concrete, Postcooling, PEX, PVC*

Abstrak

*Mass concrete merupakan pengecoran beton dengan volume yang cukup besar, biasanya digunakan untuk pondasi, jembatan, bendungan dan sebagainya. Adanya panas hidrasi pada mass concrete menyebabkan perbedaan temperatur bagian dalam dan bagian luar permukaan beton. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya keretakan pada beton, dimana temperatur di dalam beton memiliki kenaikan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian permukaan luar yang mengalami kontak dengan lingkungan. Salah satu cara untuk mengendalikan temperatur beton adalah dengan menggunakan sistem *post cooling*. Perancangan sistem *post cooling* membutuhkan pengetahuan tentang distribusi temperatur di dalam beton. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan material pipa pendingin yang digunakan, yaitu baja, PVC, dan PEX dimana debit dan temperatur air pendingin konstan. Hasil Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dengan debit dan temperatur air pendingin yang sama, beton dengan pipa pendingin PVC mempunyai temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan pipa pendingin PEX maupun baja.*

Kata kunci: *Mass concrete, Postcooling, PEX, PVC*

Pendahuluan

Beton merupakan salah satu jenis bahan yang digunakan dalam kebanyakan struktur di seluruh belahan dunia. Beton merupakan material komposit yang terdiri dari medium pengikat (pada umumnya campuran semen hidrolis dan air), agregat halus (pada umumnya pasir) dan agregat kasar (pada umumnya kerikil) dengan atau tanpa bahan tambahan/*additives* [1].

Beton sendiri terdiri dari beberapa jenis. Untuk pembuatan pondasi, jembatan, pilar bangunan, bendungan dan lainnya, umumnya digunakan beton massa. Beton massa (*mass concrete*) merupakan beton yang dituang dalam volume besar, yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaan besar, biasanya dianggap beton massa jika dimensinya lebih dari 60 cm [2].

Ada dua permasalahan yang sering ditemui pada beton massa, yaitu retak karena adanya panas hidrasi dalam beton dan terjadinya DEF (*Delayed Ettringite Formation*). Panas hidrasi sendiri adalah panas yang timbul karena reaksi antara molekul C3A dan C4A dengan air. Karena konduktivitas beton yang rendah, laju perpindahan panas dari dalam beton ke bagian

permukaan luar beton menjadi lambat. Hal ini menyebabkan temperatur bagian dalam beton lebih tinggi dibandingkan temperatur permukaan luar yang kehilangan panas ke lingkungan. Kondisi ini menyebabkan perbedaan laju pemuatan pada bagian beton sehingga timbul retak pada beton [3].

Sedangkan DEF terjadi jika beton mengalami *setting* pada temperatur diatas 70°C. Pada temperatur diatas 70°C tersebut molekul *ettringite* yang terbentuk diawal reaksi semen dengan air mengurai dan bereaksi kembali membentuk *ettringite* setelah beberapa tahun kemudian. Pembentukan kedua kali molekul *ettringite* ini menyebabkan retak didalam beton karena volume molekul *ettringite* lebih besar dari volume molekul pembuatnya [4].

Untuk mencegah permasalahan temperatur tersebut, beton harus didinginkan untuk mengendalikan perbedaan temperaturnya. Salah satu metode yang efektif adalah sistem pendinginan *post cooling*. Sistem pendingin *post cooling* berupa pipa pendingin yang ditanam kedalam beton. Air pendingin dialirkan kedalam pipa dan keluar di ujung pipa yang lain dengan temperatur yang lebih tinggi. Selanjutnya air tersebut didinginkan dan dialirkan lagi kedalam pipa. Beberapa peneliti telah melakukan kajian terhadap sistem pendingin pada *mass concrete* ini, yang pada umumnya bertujuan untuk mengetahui temperatur pada *mass concrete*. Lucia dan Eka [5].

Mempelajari retak termal pada beton dan perubahan volume beton dikarenakan perbedaan suhu antara permukaan dan bagian dalam beton massal, diperoleh kesimpulan bahwa pendinginan dengan memompakan air dingin melalui kisi-kisi pipa yang ditanam dalam beton (*pipe cooling*) dapat mengurangi terjadinya retak termal pada saat perubahan volume beton massa. Kemudian Johannes [6].

Menganalisa perilaku mekanikal pada beton massa akibat pengaruh dimensi dan temperatur menggunakan program ANSYS. Dari hasil analisa diperoleh bahwa pada pengecoran beton massa dengan permukaan tertutup mengakibatkan perbedaan temperatur antara permukaan dan bagian dalam beton dapat diperkecil yaitu kurang dari 20°C dimana temperatur tersebut merupakan syarat tidak terjadinya retak pada beton massa.

Tinjauan Teori

Semen Portland merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dengan menggiling bahan utama yang terdiri dari kalsium silika, digiling dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa asam sulfat dan ditambah dengan bahan lainnya. Bahan utama penyusun semen adalah kapur (CaO), silika (SiO₃), dan alumina (Al₂O₃). [7]

Ditinjau dari penggunaannya, menurut ASTM C-150 semen *portland* dapat dibedakan menjadi lima [7] yaitu:

- a. Tipe I – semen *portland* jenis umum (*normal portland cement*), merupakan jenis semen *portland* untuk penggunaan dalam konstruksi beton secara umum yang tidak memerlukan sifat-sifat khusus.
- b. Tipe II – semen jenis umum dengan perubahan-perubahan (*modified portland cement*), Semen ini memiliki panas hidrasi yang lebih rendah dan keluarnya panas lebih lambat dari pada semen jenis I. Jenis ini digunakan untuk bangunan-bangunan tebal, seperti pilar dengan ukuran besar, tumpuan dan dinding penahan tanah yang tebal. Panas hidrasi yang agak rendah dapat mengurangi terjadinya retak-retak pengerasan. Jenis ini juga digunakan untuk bangunan-bangunan *drainase* di tempat yang memiliki konsentrasi sulfat yang tinggi.
- c. Tipe III – semen *portland* dengan kekuatan awal tinggi (*high early strength portland cement*), Jenis ini memperoleh kekuatan besar dalam waktu singkat, sehingga dapat digunakan untuk perbaikan bangunan beton yang perlu segera digunakan atau yang

acuanannya perlu segera dilepas

- d. Tipe IV – semen *portland* dengan panas hidrasi yang rendah (*Low heat portland cement*), merupakan jenis khusus untuk penggunaan yang memerlukan panas hidrasi serendah-rendahnya
- e. Tipe V – semen *portland* tahan sulfat (*sulfate resisting portland cement*), merupakan jenis khusus yang maksudnya hanya untuk penggunaan pada bangunan-bangunan yang kena sulfat, seperti di tanah atau air yang tinggi kadar alkalinya. Pengerasan berjalan lebih lambat daripada semen *portland* biasa

Saat semen diaduk dengan air maka akan terbentuk pasta semen. Saat pasta semen diaduk dengan pasir maka akan terbentuk mortar semen. Jika ditambahkan kerikil pada mortar semen maka akan menjadi beton. Pada umumnya, beton mengandung rongga udara sekitar 1% - 2%, pasta semen (semen dan air) sekitar 25% - 40% dan agregat (agregat halus dan agregat kasar) sekitar 60% - 75%. Komposisi beton berdasarkan kekuatannya dapat dilihat Tabel 2.3

Tabel 1. Komposisi Beton

Mutu Beton	Semen (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Air (Liter)	w/c ratio
7,4 MPa (K 100)	247	869	999	215	0,87
9,8 MPa (K 125)	276	828	1012	215	0,78
12,2 MPa (K 150)	299	799	1017	215	0,72
14,5 MPa (K 175)	326	760	1029	215	0,66
16,9 MPa (K 200)	352	731	1031	215	0,61
19,3 MPa (K 225)	371	698	1047	215	0,58
21,7 MPa (K 250)	384	692	1039	215	0,56
24,0 MPa (K 275)	406	684	1026	215	0,53
26,4 MPa (K275)	413	681	1021	215	0,52
28,8 MPa (K 325)	439	670	1006	215	0,49
31,2 MPa (K 350)	448	667	1000	215	0,48

Tabel 1 memperlihatkan komposisi dari material penyusun beton, yang menjelaskan semakin banyak kandungan semen, maka mutu beton semakin bagus. Karakteristik paling penting dari beton massa yang membedakannya dari beton struktur lainnya adalah sifat termal. Ukuran yang besar dari beton massa menyebabkan perbedaan temperatur pada bagian dalam dan bagian luar permukaan dari beton massa. Seiring dengan perubahan volume, timbul tegangan dan regangan yang pada akhirnya dapat menimbulkan retakan pada struktur beton.

Faktor yang paling mempengaruhi sifat termal dari beton massa adalah agregat. Kebutuhan akan semen, agregat, pasir, dan air adalah faktor yang dapat dimodifikasi, namun tidak berpengaruh terhadap sifat termal dari beton massa [6]. Bentuk aplikasi beton massa dapat dilihat pada gambar 1

Gambar 1. Beton Massa pada Bendungan [9]

Untuk melihat lebar retak mikro biasanya dipergunakan *crack microscope* yang lebarnya bervariasi antara 0,125-1,0 μm (8 jam pertama setelah pencetakan). Lebar retak minimum yang dapat dilihat oleh mata sebesar 0,13 mm (0,005 in), dikenal dengan retak mikro. Retak mikro apabila diberi beban akan menjadi retak mayor yang lebih besar. Lebar retak maksimum yang diijinkan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Lebar retakan maksimum yang diijinkan

No	Jenis Struktur dan Kondisi	Toleransi (mm)
1	Struktur dalam ruangan, udara kering, pemberian lapisan kedap air	0,41
2	Struktur luar, kelembaban sedang, tidak ada pengaruh korosi	0,3
3	Struktur luar, kelembaban tinggi, pengaruh kimiawi	0,18
4	Struktur dengan kelembaban tinggi dan dipengaruhi oleh korosi	1,15
5	Struktur berkaitan dengan air	0,1

Perbedaan temperatur dalam struktur beton dapat disebabkan oleh bagian dari struktur kehilangan panas hidrasi pada tingkat yang berbeda, kondisi cuaca yang dingin, panas dari suatu bagian struktur yang berubah. Pada Gambar 2.3 terlihat bahwa perbedaan temperatur ini menghasilkan perubahan volume yang berbeda-beda, yang menyebabkan retak. Perubahan temperatur mungkin disebabkan oleh salah satu pusat beton lebih panas dari bagian luar karena pembebasan panas selama hidrasi semen atau pendinginan yang lebih cepat yang relatif antara ekterior ke interior. Kedua kasus mengakibatkan tegangan tarik pada ekterior dan jika kekuatan tarik terlampaui, retak akan terjadi.

Delayed Ettringite Formation (DEF) relatif jarang terjadi dan fenomena kerusakannya dalam beton sangat terkait dengan panas yang terjadi didalam beton tersebut. DEF dapat merusak beton saat temperatur beton lebih tinggi dari 70°C. Pada rentang temperatur ini DEF tidak terbentuk selama tahap awal hidrasi. Penyebab lainnya disebabkan oleh perlakuan panas dan perlakuan kekerasan.

Ettringite ($\text{C}_6\text{A} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) berbentuk kristal *hexagonal-prismatic*. Berdasarkan model struktur pada Gambar 2.6 bentuk kristal *ettringite* memiliki komposisi $\{\text{Ca}_3[\text{Al}(\text{OH})_6] \cdot 12\text{H}_2\text{O}\}^{3+}$. Disini, $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ -octahedra berikatan dengan CaOZ_8 - polyhedra yang berarti masing-

masing aluminium-ion terikat ke kristal dan terkoneksi ke Ca^{2+} -ion, dimana terbagi menjadi ion H_2O . Molekul H_2O berikatan sangat bebas ke susunan *ettringite*. Berdasarkan kondisi ini air sangat berperan untuk memecah molekul pada keadaan kering atau pada temperatur naik.

Gambar 2. Model Struktur *Ettringite* [10]

Pada perpindahan panas konduksi, jika pada suatu benda terdapat perbedaan temperatur maka akan terjadi perpindahan panas dari bagian bertemperatur tinggi ke bagian bertemperatur rendah [9].

Laju perpindahan panas berbanding dengan perbedaan temperatur normal yaitu :

$$q/A = dT/dx \quad (1)$$

Jika disubsitusikan konstanta proporsionalitas, maka persamaan dasar tentang konduksi panas adalah

$$q = kA (-dT/dx) \quad (2)$$

Laju perpindahan panas konveksi mengacu pada Hukum Newton tentang pendinginan (*Newton's Law of Cooling*), dimana:

$$Q_{\text{konv}} = h.A_s. (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

Panas yang diserap fluida yang mengalir didalam pipa sama dengan panas yang hilang dalam pipa, maka dari persamaan konveksi standar didapat (Kern, 1965):

$$q = w c \Delta T = h_i A_i \Delta t_i \quad (4)$$

CFD adalah metode penghitungan, memprediksi, dan pendekatan aliran fluida secara numerik dengan bantuan komputer. Aliran fluida dalam kehidupan nyata memiliki banyak sekali jenis dan karakteristik tertentu yang begitu kompleks, CFD melakukan pendekatan dengan metode numerasi serta menggunakan persamaan- persamaan fluida [10]

Metode Penelitian

Dimana dalam penelitian ini dilakukan dengan 2 langkah :

1. Menghitung distribusi temperatur pada bidang yang dianalisa yaitu bidang tengah pada arah sumbu z dari pipa pendingin sepanjang garis A dan B, seperti pada gambar 3. dengan laju aliran air pendingin yang konstan sebesar 2 gal/min.
2. Menentukan pengaruh material *steel*, *polyvinyl chloride (PVC)*, dan *Cross-linked Polyethylene (PEX)* pada pipa pendingin terhadap distribusi temperatur pada penampang beton

Sebelum perhitungan temperatur dengan *software fluent*, tahapan awal yang dilakukan

adalah membentuk geometri beton dengan menggunakan *software gambit*. Pembuatan geometri dilakukan dengan bentuk seperti pada gambar 3.

Gambar 3. Geometri Beton Dan Pipa Pendingin

Keterangan gambar 3: 1. Pipa Pendingin 2. Beton Massa 3. Lantai Kerja 4. Tanah

Beton massa yang disimulasikan mempunyai dimensi 4,8 m x 40 m x 0,8 m. Lantai Kerja mempunyai dimensi 5,6 m x 40,8 m x 0,3 m dan Tanah berdimensi 6,4 m x 41,6 m x 2 m.

Gambar 4. Dimensi Beton yang Disimulasikan

A

B

Gambar 5. Geometri dan *Mesh* (A) Dimensi pipa (B) *Meshing* tampak depan pipa

Dimana bahan material yang digunakan adalah :
Concrete

$$\begin{aligned}\rho &= 2420 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 1400 \text{ J/Kg.K} \\ K &= 2,6 \text{ W/m.K}\end{aligned}$$

Tanah

$$\begin{aligned}\rho &= 2655 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 800 \text{ J/Kg.K} \\ K &= 1 \text{ W/m.K}\end{aligned}$$

Steel

$$\begin{aligned}\rho &= 7800 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 669 \text{ J/Kg.K} \\ K &= 69 \text{ W/m.K}\end{aligned}$$

Cross-linked Polyethylene (PEX)

$$\begin{aligned}\rho &= 910 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 1930 \text{ J/Kg.K} \\ K &= 0,375 \text{ W/m.K}\end{aligned}$$

Polyvinyl Chloride (PVC)

$$\begin{aligned}\rho &= 1400 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 900 \text{ J/Kg.K} \\ K &= 0,147 \text{ W/m.K}\end{aligned}$$

Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian analisis. Semakin kecil ukuran *mesh* pada suatu objek, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan objek yang memiliki ukuran *mesh* yang besar [15].

Software Fluent 6.3.26 digunakan untuk melakukan simulasi pada kasus ini. Proses simulasi dengan fluent secara umum dilakukan dengan langkah :

1. Pemilihan persamaan dengan menggunakan *energy equation*, yang berfungsi agar Fluent dapat mensimulasikan perpindahan panas.
2. Menggunakan program tambahan yaitu *User Defined Function (UDF)* yang terlampir pada lampiran.
3. Menggunakan parameter *controls solution* dengan metoda interpolasi (*diskritisasi*) *Second-Order Upwind Scheme*. Metoda interpolasi (*diskritisasi*) *Second-Order Upwind Scheme* berfungsi untuk meningkatkan akurasi pada hasil simulasi akan tetapi proses iterasi atau perhitungannya akan membutuhkan waktu yang lebih lama.
4. Proses Iterasi (*Time Step*) dilakukan dengan sejumlah *time step* yang dilakukan untuk mendapatkan nilai temperatur pada beton. Dimana proses simulasi dilakukan secara bertahap mulai dari 1 jam pertama sampai 168 jam.
5. Setelah proses iterasi selesai maka data akan di *plot* dan selanjutnya diolah menggunakan *excel*.

Hasil dan Pembahasan

Simulasi dilakukan dengan melakukan variasi material pipa pendingin yang digunakan. Terdapat 3 jenis material yang digunakan yaitu *Steel* (baja), PVC, dan PEX.

Simulasi dilakukan pada temperatur air pendingin dan laju aliran air pendingin yang konstan. Temperatur air pendingin yang digunakan sebesar 30°C dan laju aliran sebesar 2 gal/min. Dari hasil simulasi yang dilakukan untuk material pipa *Steel*, PEX dan PVC didapatkan bahwa titik kritis mencapai temperatur puncak pada selang waktu 54 jam setelah peletakan beton.

1. Pengaruh Jenis Material Pipa Pendingin terhadap Perubahan Temperatur pada Titik Tengah Beton . Setelah dilakukan simulasi untuk variasi material pipa pendingin yang digunakan ,didapatkan grafik seperti pada gambar 6.

Gambar 4.1 Temperatur Beton terhadap Lama Waktu Peletakan

2. Temperatur beton dilihat sepanjang garis tengah beton pada saat temperatur mencapai titik maksimal (jam ke-54). Dapat dilihat pada gambar 6, terjadi perbedaan temperatur oleh variasi material yang digunakan pada pipa pendingin, dimana debit dan temperatur air pendingin yang digunakan adalah sama. Berikut kontur temperatur di bidang tengah beton untuk masing-masing variasi jenis pipa. Berikut grafik temperatur bidang tengah beton pada variasi material pipa pendingin :

Gambar 7. Temperatur Beton Sepanjang Garis Tenga

Pada gambar 7. dilihat bahwa makin jauh posisi beton dari pipa pendingin, maka temperatur beton itu akan makin naik. Selanjutnya temperatur beton akan menurun dikarenakan adanya pengaruh dari pipa pendingin, dan mencapai titik terendah saat beton menyentuh permukaan luar dari pipa pendingin. Dikarenakan sepanjang garis tengah beton terdapat 6 buah pipa pendingin, terjadi pula 6 kali penurunan temperatur secara drastis.

3. Pengaruh jenis material pendingin terhadap distribusi temperatur air di sepanjang pipa

pendingin .Dari hasil simulasi, temperatur air diambil pada saat beton mencapai temperatur puncak, yaitu saat selang waktu 54 jam. Air pendingin pada awalnya dimasukkan dengan temperatur 30 °C, dikarenakan adanya perpindahan panas dari beton ke air, maka temperatur air akan meningkat seiring waktu dan jarak pipa.

Gambar 8. Temperatur Air terhadap Panjang Pipa saat Jam ke-54

Kesimpulan

Posisi temperatur tertinggi pada beton terletak di tengah beton (titik kritis) . Temperatur Beton mencapai titik puncak saat posisi waktu 54 jam dari awal peletakan. Temperatur akhir yang dicapai pada titik kritis beton dengan pipa pendingin steel sebesar 40,73⁰ C, pipa pendingin PEX sebesar 41,13⁰C, dan pipa pendingin PVC sebesar 41,51⁰C.

Distribusi temperatur beton sepanjang garis tengah beton di sekitar pipa masuk air pendingin mempunyai perbedaan temperatur hingga 4⁰C untuk variasi material. Temperatur sepanjang garis tengah beton cenderung naik, namun mengalami penurunan jika mendekati pipa pendingin . Pada beton disekitar pipa keluar air pendingin, tidak terlihat perbedaan temperatur untuk variasi material pipa pendingin.

Distribusi temperatur air di sepanjang pipa pendingin mempunyai perbedaan temperatur sebesar 2⁰C. Temperatur akhir air pendingin dengan pipa pendingin steel sebesar 51,05⁰C, pipa pendingin PEX sebesar 50,91⁰C dan pipa pendingin PVC sebesar 49,37⁰C.

Referensi

- [1] Bahar, S. 2004. Pedoman Pekerjaan Beton, Biro Enjiniring PT Wijaya karya Jakarta
- [2] Tjokrodinuljo. 2007. *Teknologi Beton*. Nafiri. Yogyakarta
- [3] Mindess, S, et all. 2003. *Concrete*. 2nd ed. Upper Saddle River NJ: Pearson Education
- [4] T.G. Myers, N.D. Fowkes, Y. Ballim. 2009. *Modeling The Cooling Of Concrete By Piped Water*. Journal of Engineering Mechanics, 135(12), 1375- 1383.
- [5] American Concrete Institute. 1996. *207.1R-96 : Mass Concrete*. ACI Committee 207. Detroit
- [6] Rhodes, J. A. 1978. *Thermal Properties Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*. STP-169B. ASTM International. West Conshohocken, Pa., pp. 242-266.
- [7] Wuryati, S. & Candra, R. 2001. *Teknologi Beton*. Kansius. Yogyakarta
- [8] Jochen, S. 2004. *Delayed Ettringite Formation in Concrete*. Bauhaus-University Weimar. Germany
- [9] Cengel, Y.A., & Boles, M.A. 2002. *Heat and Mass Transfer A Practical Approach*, 3rd

Edition. McGraw-Hill. New York

[10] Taukia, F. 2008. *Dasar-dasar CFD Menggunakan Fluent*. Informatika Bandung. Bandung

Profil Penulis:

Ratnwawati, Kelahiran Maros, 05 Agustus 1988. Penulis merupakan staf pengajar Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang dengan bidang keahlian Konstruksi Mesin.. Email: azahabr@gmail.com