

**“MONITORING PERUBAHAN SUHU DAN TEGANGAN PADA BETON MASSA
YANG MENGANDUNG SEMEN TIPE I DENGAN VOLUME TINGGI”**

**SYATIR
D012231063**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**“MONITORING OF CHANGES IN TEMPERATURE AND STRESS IN MASS
CONCRETE CONTAINING TYPE I CEMENT WITH HIGH VOLUME”**

**SYATIR
D012231063**



**CIVIL ENGINEERING MASTER STUDY PROGRAM
FACULTY OF ENGINEERING
HASANUDDIN UNIVERSITY
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

**MONITORING PERUBAHAN SUHU DAN TEGANGAN PADA BETON MASSA
YANG MENGANDUNG SEMEN TIPE I DENGAN VOLUME TINGGI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**SYATIR
D012231063**

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2024**

TESIS

MONITORING PERUBAHAN SUHU DAN TEGANGAN PADA BETON MASSA YANG MENGANDUNG SEMEN TIPE I DENGAN VOLUME TINGGI

SYATIR
D012231063

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

pada tanggal 14 November 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr.Eng.M.Akbar Caronge ST.,M.Eng
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping



Prof.Dr.Ir.H.Muh.Wihardi Tjaronge ST.,M.Eng
NIP. 196805292002121002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., AER
NIP. 19730926 200012 1002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M. Eng.PM.IPM
NIP.19730306 199802 1001

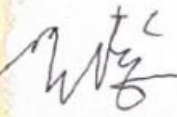
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "Monitoring Perubahan Suhu dan Tegangan Pada Beton Massa yang Mengandung Volume Semen Tinggi dan Silica Fume" adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing (Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.Eng dan Prof. Dr. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding Konferensi Internasional (The 5th International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2024)) sebagai artikel dengan judul "Thermal Properties of Mass Concrete Containing a High Volume of Ordinary Portland Cement". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 12-November-2024




SYATIR
D012231063

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian yang saya lakukan dapat terlaksana dengan sukses dan disertasi ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.Eng sebagai pembimbing utama, dan Prof. Dr. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng sebagai pembimbing pendamping. Saya mengucapkan berlimpah terima kasih kepada mereka. Penghargaan yang tinggi juga saya sampaikan kepada Bapak Ali Syamsu Wairooy selaku Chief Operating Officer Kalla Beton atas motivasi dan dukungan yang telah diberikan selama ini, Bapak Heru Kushardianto selaku Project Manager Proyek Pembangunan Rumah Sakit UPT Vertikal Makassar yang telah mengizinkan kami untuk melaksanakan penelitian di lapangan, dan kepada Maulidyah Muhammad beserta team atas bantuannya dan kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Kalla Beton serta Team Laboratorium Riset Eco-Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Kepada Management Holding Kalla Group dan terkhusus kepada Bapak H. Kamaluddin selaku DIC Kalla Construction, saya mengucapkan terima kasih atas beasiswa yang telah diberikan selama menempuh program pendidikan magister. Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada pimpinan Universitas Hasanuddin dan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.

Akhirnya, kepada Ibu tercinta dan Almarhum Bapak saya mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri tercinta, kedua anak saya dan seluruh keluarga atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis,



Syatir

ABSTRAK

SYATIR. Monitoring Perubahan Suhu dan Tegangan pada Beton Massa yang Mengandung Semen Tipe I dengan Volume Tinggi (dibimbing oleh Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Tujuan dari penyelidikan ini adalah untuk mengevaluasi sifat termal beton massa yang dibuat dengan semen Portland biasa dalam jumlah besar. Penyelidikan ini difokuskan pada pembangunan dinding beton bertulang setebal 1,6 meter. Semen Portland biasa terdapat dalam campuran beton dengan konsentrasi 560 kg per meter kubik. Setelah berumur 28 hari, benda uji beton berbentuk silinder mencapai kuat tekan 45 MPa. Pengecoran dinding beton bertulang dilakukan tanpa prosedur pendinginan apa pun. Suhu maksimal yang tercatat di lapisan atas, tengah, dan bawah masing-masing adalah 102, 106,5, dan 101,6°C. Temperatur ini melebihi ambang batas 80% yang disyaratkan oleh standar massa beton. Meskipun perbedaan suhu antara strata tersebut kira-kira 4,5°C, namun tidak melampaui ambang batas 20 derajat. Tegangan pengembangan termal maksimum yang diukur adalah 0,83 MPa, dan tegangan susut termal maksimum yang tercatat juga sebesar 0,55 MPa. Kedua nilai ini ditentukan lebih kecil dari perkiraan tegangan tarik elastis sebesar 1,36 MPa. Tidak adanya retak permukaan diamati selama inspeksi visual, yang menunjukkan bahwa proses hidrasi berjalan dengan sangat baik.

Kata Kunci: Beton Massa, Tegangan Ekspansi Termal, Tegangan Susut Termal, Regangan Ekspansi Termal, Regangan Susut Termal

ABSTRACT

SYATIR. Thermal Properties of Mass Concrete Containing a High Volume of Ordinary Portland Cement (guided by Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

The objective of this investigation was to evaluate the thermal properties of mass concrete made with large quantities of ordinary Portland cement. The investigation focused on the construction of a 1.6-meter-thick reinforced concrete wall. Ordinary Portland cement was present in the concrete mixture at a concentration of 560 kg per cubic meter. After 28 days, cylindrical concrete test specimens reached a compressive strength of 45 MPa. The casting of the reinforced wall was carried out without any cooling procedures. The maximum temperatures recorded at the top, middle, and bottom layers were 102°C, 106.5°C, and 101.6°C, respectively. These temperatures exceeded the 80% threshold required by mass concrete standards. Although the temperature difference between the strata was approximately 4.5°C, it did not exceed the 20-degree threshold. The maximum thermal swelling stress measured was 0.83 MPa, and the maximum thermal shrinkage stress recorded was 0.55 MPa. Both values were determined to be lower than the estimated elastic tensile stress of 1.36 MPa. No surface cracks were observed during visual inspection, indicating that the hydration process proceeded satisfactorily.

Keywords: Mass Concrete, Thermal Swelling Stress, Thermal Shrinkage Stress, Thermal Swelling Strain, Thermal Shrinkage Strain

DAFTAR ISI

Halaman Judul	ii
PENGAJUAN TESIS	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN, DAN LAMBANG	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Teori	8
1.2.1 Semen	8
1.2.2 Semen Portland berdasarkan Standar Indonesia	10
1.2.3 Campuran Kimia	13
1.2.4 Agregat	15
1.2.5 Kekuatan	17
1.2.6 Sifat Elastis	21
1.2.7 Susut	26
1.2.8 Sifat Termal Beton	26
1.2.8.1 Sifat Termal Beton	29
1.2.8.2 Kalor Jenis	29
1.2.8.3 Konduktivitas Termal	29
1.2.8.4 Difusivitas Termal	30
1.2.9 Kapasitas Regangan	30
1.2.10 Desain Konseptual	31
BAB II METODE	33
2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	33
2.2. Prosedur Penelitian	33
2.2.1 Bagan Alir Penelitian	33
2.3. Bahan dan Metode	34
2.3.1. Komposisi Bahan dan Campuran	34
2.4. Prosedur Eksperimental	34
2.4.1. Metode Pengecoran	34
2.4.2. Metode Pemeriksaan Suhu	35
2.5. Analisis dan Perhitungan	35
2.5.1. Perhitungan Stres Termal	35
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN	37
3.1 Karakteristik Material	37
3.2 Suhu	38

3.3 Tegangan termal	41
BAB IV KESIMPULAN	45
4.1 Kesimpulan	45
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN.....	Er

ror! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Syarat Kimia Utama	10
Tabel 2 Syarat Kimia Tambahan	12
Tabel 3 Syarat Fisika Utama.....	12
Tabel 4 Syarat Fisika Tambahan	13
Tabel 5 Persentase maksimum yang diizinkan dari zat-zat berbahaya dalam agregat halus (berdasarkan berat).....	16
Tabel 6 Agregat halus untuk beton massa.....	17
Tabel 7 Persentase maksimum yang diizinkan dari zat-zat berbahaya dalam agregat kasar (berdasarkan berat).....	17
Tabel 8 Hubungan w/cm dan kuat tekan	18
Tabel 9 Data Bendungan.....	23
Tabel 10 Sifat elastis beton massa	24
Tabel 11 Sifat termal beton	27
Tabel 12 Koefisien ekspansi termal	29
Tabel 13 Konduktivitas termal.....	29
Tabel 14 Difusivitas termal beton.....	30
Tabel 15 Komposisi campuran beton massa 1 m ³	34
Tabel 16 Karakteristik Fisik Semen Portland Biasa (OPC)	37
Tabel 17 Karakteristik fisik bahan	37
Tabel 18 Senyawa Kimia Semen Portland Biasa (OPC).....	37
Tabel 19 Data perubahan temperatur dan tegangan	38
Tabel 20 Ringkasan data pemeriksaan beton massa	41
Tabel 21 Data ringkasan tegangan-regangan muai termal (<i>swelling</i>).....	43
Tabel 22 Data ringkasan tegangan-regangan susut termal (<i>shrinkage</i>)	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Desain konseptual	32
Gambar 2 Bagan Alir Penelitian	33
Gambar 3 Tampak dinding	35
Gambar 4 Pemeriksaan suhu menggunakan alat termokopel	35
Gambar 5 Pemeriksaan suhu beton massa	41
Gambar 6 Hubungan suhu dan waktu setting akhir.....	41
Gambar 7 Tegangan termal lapisan atas dari massa beton	42
Gambar 8 Tegangan termal lapisan tengah beton massa	42
Gambar 9 Tegangan termal lapisan bawah dari massa beton	42

DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN, DAN LAMBANG

Lambang/singkatan		Arti dan keterangan
ASTM	=	American Society for Testing and Material
ACI	=	American Concrete Institute
SNI	=	Standar Nasional Indonesia
OPC	=	Ordinary Portland Cement
w/c	=	Rasio air/semen
C	=	CaO
S	=	SiO ₂
A	=	Al ₂ O ₃
F	=	Fe ₂ O ₃
CaO	=	Kalsium oksida
SiO ₂	=	Silikon dioksida
Al ₂ O ₃	=	Aluminium oksida
Fe ₂ O ₃	=	Besi (III) oksida
TiO ₂	=	Titanium dioksida
P ₂ O ₅	=	Difosfor pentaoksida
f _c	=	Kuat tekan (MPa)
f _t	=	Kuat tarik (MPa)
E	=	Modulus elastisitas (MPa)
μ	=	Poisson's ratio
h ²	=	Difusivitas (m ² /h)
K	=	Konduktivitas (kJ/m.h.°C)
C _h	=	Kalor jenis (kJ/kg.°C)
ρ	=	Massa jenis beton (kg/m ³)
σ	=	Tegangan termal (MPa)
ε	=	Regangan termal
R	=	Koefisien pengeangan
K _p	=	Koefisien relaksasi tegangan
α	=	Koefisien ekspansi (10 ⁻⁶ /°C)
ΔT	=	Perbedaan suhu (°C)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Ilmuwan dan ahli teknologi bahan bangunan yang terlibat dalam penggunaan beton dalam jumlah besar untuk konstruksi skala besar telah memberikan perhatian khusus pada tekanan termal yang ditimbulkan oleh proses hidrasi. Tegangan inilah yang kemudian berperan besar terhadap munculnya retakan pada usia awal struktur. Badan bendungan masif merupakan contoh beton massa, yang sebagian besar dibangun dari beton tanpa tulangan. Untuk mencegah panas hidrasi yang berlebihan, beton yang digunakan dibatasi maksimal 250 kilogram semen per meter kubik beton segar. Hal ini menghasilkan kuat tekan sekitar 21 MPa setelah 28 hari (pengukuran massa beton ACI) (Tatro, 2006). Standar ini memberikan seperangkat pedoman dan batasan yang berguna untuk penerapan beton massa.

Namun pada beberapa tahun terakhir, perkembangan kebutuhan bangunan menyebabkan adanya kebutuhan terhadap bangunan-bangunan tertentu yang mempunyai ukuran massa yang besar harus mempunyai kepadatan yang tinggi. Untuk mencapai tujuan ini, beton harus mempunyai kandungan semen yang tinggi dan intensitas yang berada di antara kekuatan sedang-tinggi. Investigasi kali ini terfokus pada konstruksi dinding beton bertulang setebal 1,6 meter. Campuran beton tersebut mengandung semen Portland biasa dengan konsentrasi 560 kilogram per meter kubik. Setelah berumur 28 hari, benda uji beton berbentuk silinder mencapai kuat tekan 45 MPa.

Penelitian ini membahas hubungan suhu dan waktu pada massa beton lapisan atas, tengah, dan bawah. Selanjutnya suhu yang terjadi digunakan untuk menghitung tegangan pengembangan termal dan tegangan penyusutan termal untuk mendeteksi kemampuan beton massa yang mengandung semen OPC dalam jumlah besar untuk berkontraksi di bawah beban termal.

Beton massa didefinisikan dalam ACI 116R sebagai “setiap volume beton dengan dimensi yang cukup besar sehingga memerlukan tindakan yang diambil untuk mengatasi timbulnya panas dari hidrasi semen dan perubahan volume yang menyertainya untuk meminimalkan retak.” Perancangan struktur beton massa umumnya didasarkan pada daya tahan, ekonomi, dan aksi termal, dengan kekuatan sering kali menjadi perhatian sekunder, bukan perhatian utama. Salah satu ciri yang membedakan beton massa dengan pekerjaan beton lainnya adalah perilaku termal. Karena reaksi semen-air bersifat eksotermik, kenaikan suhu dalam massa beton yang besar, dimana panas tidak cepat hilang, bisa sangat tinggi. Tegangan dan regangan tarik yang signifikan dapat diakibatkan oleh perubahan volume yang tertahan akibat penurunan suhu seiring dengan hilangnya panas hidrasi. Tindakan harus diambil jika retak akibat perilaku termal dapat menyebabkan hilangnya integritas struktural dan tindakan monolitik, rembesan berlebihan dan memperpendek masa pakai struktur, atau tidak menyenangkan secara estetika.

Banyak prinsip dalam praktik beton massa juga dapat diterapkan pada pekerjaan beton umum, sehingga manfaat ekonomi dan manfaat lainnya dapat terwujud.

Praktek beton massa sebagian besar dikembangkan dari konstruksi bendungan beton, dimana keretakan akibat suhu pertama kali diidentifikasi. Retakan yang berhubungan dengan suhu juga telah dialami pada struktur beton berpenampang tebal lainnya, termasuk pondasi matras, penutup tiang pancang, tiang jembatan, dinding tebal, dan lapisan terowongan.

Kekuatan tekan yang tinggi biasanya tidak diperlukan pada struktur beton massa; namun, bendungan lengkung tipis merupakan pengecualian. Struktur besar, seperti bendungan gravitasi, menahan beban terutama karena bentuk dan massanya, dan kedua karena kekuatannya. Yang lebih penting adalah daya tahan dan sifat yang berhubungan dengan perilaku suhu dan kecenderungan retak.

Ketika beton pertama kali digunakan untuk bendungan, ukuran bendungan relatif kecil dan betonnya masih dicampur dengan tangan. Semen portland biasanya harus berumur untuk memenuhi uji tingkat kekuatan saat mendidih, agregatnya adalah pasir dan kerikil yang ditimbun, dan perbandingannya dilakukan dengan sekop (Davis 1963). Kemajuan luar biasa telah dicapai sejak awal tahun 1900-an, seni serta ilmu pembuatan bendungan yang dipraktikkan saat ini telah mencapai tingkat yang sangat maju. Saat ini, pemilihan dan proporsi bahan beton untuk menghasilkan kekuatan, daya tahan, dan kedap air yang sesuai pada produk jadi kini dapat diprediksi dan dikontrol dengan akurat.

Pembahasan utama di sini adalah langkah-langkah utama dari awal yang sangat kecil hingga pesat seperti ini. Dalam konstruksi bendungan besar, kini terdapat proporsi dan pencampuran material yang tepat dan otomatis. Beton dalam ember berukuran 9 m³ dapat ditempatkan dengan metode konvensional dengan kecepatan 10.000 yd³/hari (7650 m³/hari) pada suhu kurang dari 50 °F (10 °C) seperti yang ditempatkan, bahkan dalam cuaca yang sangat panas. Bendungan Grand Coulee masih memegang rekor pengecoran bulanan sepanjang masa sebesar 536.250 yd³ (410.020 m³), diikuti oleh pencapaian terbaru pada Bendungan Itaipu di daerah perbatasan antara Brasil-Paraguay sebesar 440.550 yd³ (336.840 m³) (Itaipu Binacional 1981). Rekor tingkat pengecoran bulanan beton sebesar 328.500 yd³ (250.200 m³) untuk beton yang dipadatkan dengan roller dicapai di Bendungan Tarbela di Pakistan. Campuran ramping sekarang dapat dikerjakan dengan menggunakan udara entrainment dan campuran kimia lainnya serta penggunaan bahan pozzolan yang digiling halus. Bahan tambah kimia pengurang air, penambah kekuatan, dan pengontrol pengerasan, efektif dalam mengurangi kandungan semen yang diperlukan hingga minimum dan dalam mengontrol waktu pengerasan. Penetapan tarif untuk beton tanpa kemerosotan, dengan menggunakan peralatan pemindah tanah yang besar untuk transportasi dan roller getar yang besar untuk konsolidasi, tampaknya hanya dibatasi oleh ukuran proyek dan kemampuan pabriknya untuk memproduksi beton.

Sebelum tahun 1900—Sebelum awal abad kedua puluh, sebagian besar semen portland yang digunakan di Amerika Serikat diimpor dari Eropa. Semua semen sangat kasar menurut standar saat ini, dan umumnya semen tersebut

mengalami pembakaran yang kurang dan mempunyai kandungan kapur bebas yang tinggi. Untuk bendungan-bendungan pada masa itu, pasir dan kerikil yang dikelola oleh bank digunakan tanpa melalui proses pencucian untuk menghilangkan kotoran dan butiran halus yang tidak diinginkan. Campuran beton sangat bervariasi dalam kandungan semen dan rasio pasir-agregat kasar. Pencampuran biasanya dilakukan dengan tangan dan perbandingannya menggunakan sekop, gerobak dorong, kotak, atau gerobak. Pengaruh rasio air-semen (w/c) tidak diketahui, dan umumnya tidak ada upaya yang dilakukan untuk mengontrol volume air pencampur. Tidak ada ukuran konsistensi kecuali dengan pengamatan visual terhadap beton yang baru dicampur.

Beberapa bendungan terbuat dari pasangan bata cyclopean yang mana "plum" (batu-batu besar) sebagian tertanam dalam beton yang sangat basah. Ruang di antara buah plum kemudian diisi dengan beton, juga sangat basah. Beberapa bendungan awal dibangun tanpa sambungan kontraksi dan tanpa pengangkatan rutin. Namun, ada pengecualian ketika beton dicetak dalam bentuk balok; ketinggian pengangkatan diatur, dan beton dengan konsistensi yang sangat kering ditempatkan dalam lapisan tipis dan dikonsolidasikan dengan pemadatan tangan yang ketat.

Umumnya beton campuran diangkut ke cetakan dengan gerobak dorong. Jika plum digunakan pada pasangan bata cyclopean, derek berkaki kaku yang beroperasi di dalam area kerja memindahkan beton basah dan plum. Tingkat penempatan paling banyak beberapa ratus yard kubik (meter kubik) sehari. Secara umum, tidak ada upaya untuk menyembuhkan secara lembab.

Pengecualian untuk praktik umum ini adalah Bendungan Lower Crystal Springs, yang selesai dibangun pada tahun 1890. Bendungan ini terletak di dekat San Mateo, California, sekitar 20 mil (30 km) selatan San Francisco. Menurut informasi yang tersedia, ini adalah bendungan pertama di Amerika Serikat yang menentukan jumlah maksimum air pencampur yang diizinkan. Beton untuk struktur setinggi 154 kaki (47 m) ini dicetak dalam sistem balok-balok yang saling bertautan dengan bentuk dan dimensi tertentu. Sebuah foto lama menunjukkan bahwa tamper tangan digunakan untuk mengkonsolidasikan beton kering (beton dengan kadar air rendah dan kemungkinan kemampuan kerja sangat rendah). Beton segar ditutup dengan papan sebagai pelindung dari sinar matahari, dan beton dibiarkan basah hingga terjadi pengerasan.

1900 hingga 1930—Setelah pergantian abad, pembangunan semua jenis bendungan beton dipercepat. Bendungan yang lebih banyak dan lebih tinggi untuk irigasi, listrik, dan pasokan air dibangun. Penempatan beton melalui menara dan saluran menjadi hal yang umum. Di Amerika Serikat, industri semen portland menjadi mapan, dan semen jarang diimpor dari Eropa. Spesifikasi ASTM untuk semen portland mengalami sedikit perubahan selama 30 tahun pertama abad ini, selain dari peningkatan sederhana dalam persyaratan kehalusan yang ditentukan oleh analisis saringan. Kecuali untuk batasan magnesia dan kehilangan akibat penyalaan, tidak ada persyaratan kimia. Karakter dan gradasi agregat lebih diperhatikan selama periode ini. Kemajuan yang sangat substansial telah dicapai dalam pengembangan metode proporsi beton. Hubungan kekuatan air-semen ditetapkan oleh Abrams dan

rekan-rekannya dari penyelidikan sebelum tahun 1918, ketika Portland Cement Association (PCA) Bulletin 1 muncul (Abrams 1918). Meskipun demikian, sedikit perhatian diberikan pada kuantitas air pencampur. Metode penempatan menggunakan menara dan saluran air dengan kemiringan datar mendominasi, mengakibatkan penggunaan campuran yang sangat basah selama setidaknya 12 tahun setelah pentingnya w/c ditetapkan.

Umumnya semen portland digunakan tanpa bahan tambahan. Terdapat pengecualian, misalnya pasir-semen yang digunakan oleh Dinas Reklamasi AS (sekarang Biro Reklamasi AS [USBR]) dalam pembangunan Bendungan Elephant Butte di New Mexico dan Bendungan Arrowrock di Idaho. Pada saat selesai dibangun pada tahun 1915, Bendungan Arrowrock, bendungan lengkung gravitasi, merupakan bendungan tertinggi di dunia dengan ketinggian 350 kaki (107 m). Bendungan ini dibangun dengan beton interior ramping dan beton permukaan eksterior yang lebih kaya. Campuran untuk beton interior mengandung sekitar 376 lb/yd³ (223 kg/m³) kombinasi campuran semen-granit yang dihaluskan. Campuran semen diproduksi di lokasi dengan menggiling semen portland dan granit bubuk dengan perbandingan yang kira-kira sama sehingga tidak kurang dari 90% lolos saringan mesh No. 200 (75 µm). Kombinasi antar permukaan tanah jauh lebih halus dibandingkan semen yang diproduksi pada saat itu.

Pengecualian lain terjadi pada beton salah satu penyangga Bendungan Big Dalton, bendungan multi-lengkungan yang dibangun oleh Distrik Pengendalian Banjir Kabupaten Los Angeles pada akhir tahun 1920-an. Batu apung (pozzolan) dari Friant, California, digunakan sebagai pengganti 20% massa semen portland.

Selama periode ini, beton siklop sudah ketinggalan zaman. Untuk bendungan berpenampang tebal, ukuran maksimum agregat untuk beton massa ditingkatkan hingga sebesar 10 inci (250 mm). Tes kemerosotan mulai digunakan sebagai alat untuk mengukur konsistensi. Pengujian silinder kerja berukuran 6 x 12 inci (150 x 300 mm) dan 8 x 16 inci (200 x 400 mm) menjadi praktik umum di Amerika Serikat. Negara-negara Eropa umumnya mengadopsi kubus berukuran 8 x 8 inci (200 x 200 mm) untuk menguji kekuatan pada berbagai usia. Mixer dengan kapasitas 3 yd³ (2,3 m³) biasanya digunakan menjelang akhir periode ini, dan ada beberapa yang berkapasitas 4 yd³ (3 m³). Hanya semen Tipe I (semen portland biasa) yang tersedia selama periode ini. Di area yang kondisi pembekuan dan pencairannya parah, merupakan praktik umum untuk menggunakan campuran beton yang mengandung semen 564 lb/yd³ (335 kg/m³) untuk keseluruhan massa beton. Praktek konstruksi menggunakan campuran interior yang mengandung 376 lb/yd³ (223 kg/m³) dan campuran permukaan eksterior yang mengandung 564 lb/yd³ (335 kg/m³) dikembangkan selama periode ini untuk membuat permukaan bendungan tahan terhadap iklim yang parah. namun meminimalkan penggunaan semen secara keseluruhan. Di daerah beriklim sedang, satu kelas beton yang mengandung semen serendah 376 lb/yd³ (223 kg/m³) digunakan di beberapa bendungan.

Pengecualian adalah Bendungan Theodore Roosevelt yang dibangun pada tahun 1905 hingga 1911 di Arizona. Bendungan ini terdiri dari struktur batu puing yang dihadapkan pada balok-balok batu kasar yang diletakkan di mortar semen

portland yang dibuat dengan semen yang diproduksi di pabrik dekat lokasi bendungan. Untuk struktur ini, kandungan semen rata-rata telah dihitung sekitar 282 lb/yd³ (167 kg/m³). Untuk bagian dalam massa, batu galian kasar ditanamkan ke dalam mortar 1:2,5 yang mengandung sekitar 846 lb/yd³ (502 kg/m³) semen. Pada setiap lapisan, rongga di antara batu-batu yang jaraknya berdekatan diisi dengan beton yang mengandung semen sebanyak 564 lb/yd³ (335 kg/m³), di mana pecahan batu ditempatkan secara manual. Kondisi ini menyebabkan rata-rata kandungan semen sangat rendah. Pembangunannya lambat, dan Bendungan Roosevelt mungkin merupakan bendungan besar terakhir yang dibangun di Amerika Serikat dengan metode konstruksi ini.

1930 hingga 1970— Era ini merupakan perkembangan pesat konstruksi beton massa untuk bendungan. Penggunaan metode tower dan chute menurun selama periode ini dan hanya digunakan pada proyek-proyek kecil. Beton biasanya ditempatkan menggunakan ember besar dengan derek, jalur kabel, sistem kereta api, atau kombinasi keduanya. Pada proyek konstruksi yang lebih besar dan dikontrol lebih ketat, agregat diproses dengan hati-hati, bahan-bahan diseimbangkan berdasarkan beratnya, dan air pencampur diukur berdasarkan volume. Peningkatan kemampuan kerja disebabkan oleh pengenalan bahan tambahan mineral halus (pozzolan), air entrainment, dan bahan tambahan kimia. Kemerosotan serendah 3 inci (76 mm) digunakan tanpa getaran, meskipun sebagian besar proyek di tahun-tahun berikutnya pada era ini menggunakan vibrator kentang besar untuk konsolidasi.

Sebuah studi terhadap catatan dan pemeriksaan aktual terhadap sejumlah besar bendungan menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kondisi yang tidak dapat dijelaskan. Dari dua struktur yang tampak memiliki kualitas serupa yang berada pada lingkungan yang sama, yang satu mungkin menunjukkan keretakan yang berlebihan sementara yang lain, setelah periode pelayanan yang sama, akan berada dalam kondisi yang hampir sempurna. Sedikit catatan yang tersedia di beberapa bendungan menunjukkan variasi suhu internal yang besar akibat hidrasi semen. Tingkat keretakan dikaitkan dengan kenaikan suhu.

Komite ACI 207, Beton Massa, dibentuk pada tahun 1930 (awalnya sebagai Komite 108) dengan tujuan mengumpulkan informasi tentang sifat-sifat penting beton massa di bendungan dan faktor-faktor yang mempengaruhi sifat-sifat tersebut. Bogue (1949) dan rekan-rekannya, di bawah persekutuan PCA di Biro Standar Nasional, telah mengidentifikasi senyawa utama dalam semen portland. Kemudian, Hubert Woods dan rekan-rekannya melakukan penyelidikan untuk menentukan kontribusi masing-masing senyawa terhadap panas hidrasi dan kekuatan mortar dan beton.

Pada awal tahun 1930, Bendungan Hoover di Nevada sedang dalam tahap awal perencanaan. Karena ukuran Bendungan Hoover yang belum pernah terjadi sebelumnya, penyelidikan yang jauh lebih rumit daripada yang dilakukan sebelumnya dilakukan untuk menentukan pengaruh berbagai faktor, seperti komposisi dan kehalusan semen, faktor semen, suhu pengawetan, dan ukuran

maksimum agregat, pada panas hidrasi semen, kuat tekan, dan sifat mortar dan beton lainnya.

Hasil investigasi tersebut mengarah pada penggunaan semen bersuhu rendah di Bendungan Hoover. Investigasi juga memberikan informasi untuk desain sistem pendingin pipa tertanam yang digunakan untuk pertama kalinya di Bendungan Hoover. Semen bersuhu rendah pertama kali digunakan di Bendungan Morris, dekat Pasadena, California, yang dimulai setahun sebelum Bendungan Hoover. Untuk Bendungan Hoover, pembangunan pabrik memiliki kapasitas yang belum pernah terjadi sebelumnya. Batching dan pencampuran sepenuhnya otomatis. Rekor produksi harian untuk dua pabrik beton, yang dilengkapi dengan mixer 4 yd³ (3 m³), adalah lebih dari 10.000 yd³ (7600 m³). Beton diangkut dalam ember berukuran 8 yd³ (6 m³) melalui jalur kabel, dan pada awalnya dipadatkan dengan cara ditabrak dan dipadatkan. Pada musim semi tahun 1933, vibrator internal besar diperkenalkan dan setelah itu digunakan untuk memadatkan sisa beton. Dalam waktu kurang lebih 2 tahun, beton sebanyak 3.200.000 yd³ (2.440.000 m³) telah dipasang.

Bendungan Hoover menandai dimulainya era perbaikan praktik konstruksi bendungan beton besar. Selesai pada tahun 1935 dengan tingkat pembangunan yang belum pernah terjadi sebelumnya, praktik yang diterapkan di sana, dengan beberapa penyempurnaan, telah digunakan pada sebagian besar bendungan beton besar yang telah dibangun di Amerika Serikat dan di banyak negara lain sejak saat itu.

Penggunaan bahan pozzolan (batu apung) diuji coba di Bendungan Big Dalton oleh Distrik Pengendalian Banjir Kabupaten Los Angeles. Untuk Bendungan Bonneville, yang diselesaikan oleh Korps Insinyur pada tahun 1938 di Oregon, digunakan kombinasi semen portland-pozzolan. Ini diproduksi dengan menggabungkan klinker semen dengan pozzolan yang diproses dengan mengkalsinasi bahan vulkanik yang diubah pada suhu sekitar 1500 °F (820 °C). Proporsi klinker terhadap pozzolan adalah 3:1 menurut beratnya. Semen jenis ini dipilih untuk digunakan di Bonneville berdasarkan hasil pengujian pada beton yang menunjukkan kemampuan memanjang yang besar dan kenaikan suhu yang rendah. Ini adalah bendungan beton paling awal di Amerika Serikat yang menggunakan semen portland-pozzolan antar permukaan tanah. Penggunaan pozzolan sebagai bahan penyemen terpisah yang akan ditambahkan pada mixer, dengan takaran 30% atau lebih dari total bahan penyemen, telah menjadi praktik rutin oleh USBR, Tennessee Valley Authority (TVA), Amerika Serikat Korps Insinyur Angkatan Darat (USACE), dan lain-lain.

Bahan tambahan kimia yang berfungsi untuk mereduksi air dalam campuran beton, mengontrol setting, dan meningkatkan kekuatan beton mulai dikenal secara serius pada tahun 1950-an sebagai bahan yang dapat bermanfaat bagi beton massa. Pada tahun 1960, Wallace dan Ore menerbitkan laporan mereka tentang manfaat material ini terhadap beton masal. Sejak saat ini, bahan tambahan kimia telah digunakan pada sebagian besar beton massa.

Sekitar tahun 1945, menjadi praktik standar untuk menggunakan udara yang sengaja dimasukkan ke dalam beton di sebagian besar struktur yang terkena

kondisi cuaca buruk. Praktek ini diterapkan pada beton permukaan terbuka bendungan serta pada perkerasan beton dan beton bertulang pada umumnya. Campuran pemasukan udara yang diperkenalkan pada mixer telah digunakan untuk beton interior dan eksterior di hampir semua bendungan yang dibangun sejak tahun 1945.

Penempatan beton massa konvensional sebagian besar tetap tidak berubah sejak saat itu. Perkembangan baru yang besar dalam bidang beton massa adalah penggunaan beton yang dipadatkan dengan roller.

1970 hingga sekarang—Selama era ini, beton yang dipadatkan dengan roller dikembangkan dan menjadi metode utama untuk pengecoran beton massa. Karena beton yang dipadatkan dengan roller sekarang sudah umum digunakan, laporan terpisah, ACI 207.5R, menjadi referensi utama untuk topik ini. Metode beton massa tradisional terus digunakan untuk banyak proyek, baik besar maupun kecil, terutama jika beton yang dipadatkan dengan roller tidak praktis atau sulit digunakan. Hal ini sering kali mencakup bendungan lengkung, tembok besar, dan beberapa pekerjaan pondasi, terutama jika diperlukan perkuatan.

Perkembangan berkelanjutan dari bahan tambahan kimia telah memungkinkan penempatan penempatan bawah air yang sangat besar di mana beton mengalir secara lateral hingga 100 kaki. Metode konstruksi terapung di mana elemen struktur dibuat dari pracetak atau prefabrikasi dan kemudian diisi dengan beton bawah air telah dikembangkan. Pembangunan bagian bendungan dan pembangkit tenaga listrik telah dilakukan dengan cara ini.

Kandungan semen—Pada akhir tahun 1920-an dan awal tahun 1930-an, sudah menjadi peraturan tidak tertulis bahwa beton massa untuk bendungan besar tidak boleh mengandung semen kurang dari 376 lb/yd³ (223 kg/m³). Beberapa pihak berwenang pada masa itu percaya bahwa faktor semen tidak boleh kurang dari 564 lb/yd³ (335 kg/m³). Faktor semen untuk beton interior Bendungan Norris (Tennessee Valley Authority 1939) yang dibangun oleh Tennessee Valley Authority (TVA) pada tahun 1936, adalah 376 lb/yd³ (223 kg/m³). Tingkat keretakannya berlebihan. Kekuatan tekan silinder (150 x 300 mm) yang disaring basah pada umur 1 tahun adalah 7000 psi (48,3 MPa). Demikian pula, benda uji inti berukuran 18 x 36 inci (460 x 910 mm) yang dibor dari beton tahap pertama yang mengandung semen 376 lb/yd³ (223 kg/m³) di Bendungan Grand Coulee diuji melebihi 8000 psi (55 MPa) di Bendungan Grand Coulee pada usia 2 tahun. Dilihat dari komposisinya, semen tersebut termasuk dalam jenis panas sedang yang sesuai dengan Tipe II saat ini. Mengingat tegangan yang cukup rendah pada kedua struktur tersebut, jelaslah bahwa kuat tekan yang tinggi tidak diperlukan. Pengurangan kandungan semen pada konstruksi serupa di masa depan diharapkan dapat mengurangi kecenderungan terjadinya keretakan secara signifikan.

Untuk Bendungan Hiwassee, yang diselesaikan oleh TVA pada tahun 1940, penghalang kandungan semen sebesar 376 lb/yd³ (223 kg/m³) telah ditembus. Untuk struktur tersebut, kandungan semen pada massa beton hanya 282 lb/yd³ (167 kg/m³), suatu nilai yang sangat rendah pada saat itu. Bendungan Hiwassee benar-benar bebas dari retakan termal, yang memulai tren penurunan kandungan semen,

dan hal ini masih terus berlanjut. Sejak saat itu, kandungan semen Tipe II pada beton massa interior adalah sekitar 235 lb/yd^3 (140 kg/m^3) dan bahkan serendah 212 lb/yd^3 (126 kg/m^3). Contoh bendungan gravitasi besar yang kandungan semen Tipe II untuk beton massa adalah 235 lb/yd^3 (140 kg/m^3) adalah Bendungan Datar Pinus di California, yang diselesaikan oleh USACE pada tahun 1954. Pada bendungan tinggi tipe lengkung di mana tekanan cukup tinggi, kandungan semen dalam campuran massa biasanya berkisar antara 300 hingga 450 lb/yd^3 (180 hingga 270 kg/m^3), dengan kandungan semen yang lebih tinggi digunakan pada bendungan jenis ini yang lebih tipis dan bertekanan tinggi.

1.2. Teori

1.2.1 Semen

ACI 207.2R dan 207.4R berisi informasi tambahan tentang jenis semen dan pengaruhnya terhadap pembangkitan panas. Jenis semen hidrolik berikut ini cocok digunakan pada konstruksi beton massa:

- Semen Portland—Tipe I, II, IV, dan V, sebagaimana tercakup dalam ASTM C 150;
- Semen campuran—Tipe P, IP, S, IS, I(PM), dan I(SM), sebagaimana tercakup dalam ASTM C 595; Dan
- Semen hidrolik—Tipe GU, MS, HS, MH, dan LH, sebagaimana tercakup dalam ASTM C 1157.

Jika semen portland digunakan dengan pozzolan atau dengan semen lainnya, bahan-bahan tersebut dikumpulkan secara terpisah di pabrik pencampuran. Ekonomi dan kenaikan suhu yang rendah dicapai dengan membatasi kandungan total semen sesedikit mungkin.

Semen tipe I dan GU cocok digunakan pada konstruksi umum. Bahan ini tidak direkomendasikan untuk digunakan sendiri dalam beton massa tanpa tindakan lain yang membantu mengendalikan masalah suhu karena panas hidrasinya jauh lebih tinggi.

Semen tipe II (panas sedang) dan MH cocok untuk konstruksi beton massa karena mempunyai panas hidrasi sedang, yang penting untuk mengendalikan keretakan. Tipe II harus ditentukan dengan opsi panas sedang karena sebagian besar semen Tipe II dan MS dirancang untuk ketahanan sulfat sedang dan tidak memiliki sifat panas sedang. Spesifikasi semen portland Tipe II mengharuskan semen tersebut mengandung tidak lebih dari 8% trikalsium aluminat (C_3A), senyawa yang memberikan kontribusi besar terhadap pengembangan panas awal pada beton. Spesifikasi opsional untuk semen Tipe II memberikan batasan 58% atau kurang pada jumlah C_3A dan C_3S atau batasan panas hidrasi hingga 70 kal/g (290 kJ/kg) pada 7 hari. Jika salah satu persyaratan opsional ditentukan, persyaratan kekuatan 28 hari untuk pasta semen berdasarkan ASTM C 150 berkurang karena tingkat peningkatan kekuatan yang lebih lambat dari semen ini.

Tipe IV dan LH, semen dengan suhu rendah, dapat digunakan jika diinginkan untuk menghasilkan pengembangan panas rendah pada struktur masif.

Bahan-bahan tersebut sudah tidak digunakan dalam beberapa tahun terakhir karena sulit diperoleh dan, yang lebih penting, karena pengalaman menunjukkan bahwa dalam banyak kasus, perkembangan panas dapat dikontrol secara memuaskan dengan cara lain. Spesifikasi Tipe IV membatasi C_3A hingga 7%, C_3S hingga 35%, dan menempatkan minimum pada C_2S sebesar 40%. Sesuai pilihan pembeli, panas hidrasi dapat dibatasi hingga 60 kal /g (250 kJ/kg) pada 7 hari dan 70 kal /g (290 kJ/kg) pada 28 hari. Semen tipe IV umumnya tidak tersedia di Amerika Serikat.

Sulfat Tipe V dan HS tersedia di daerah dengan tanah sulfat tinggi, dan sering kali memiliki karakteristik panas sedang. Bahan-bahan tersebut biasanya tersedia dengan harga yang lebih tinggi daripada Tipe I. Bahan-bahan tersebut biasanya bersifat alkali rendah (kurang dari 0,6 alkali setara) dan panas rendah (kurang dari 70 kal /g dalam 7 hari).

Tipe IP semen portland pozzolan adalah campuran seragam semen portland atau semen terak tanur sembur portland dan pozzolan halus. Tipe P serupa, tetapi persyaratan kekuatan awal lebih rendah. Mereka diproduksi dengan cara intergrinding klinker semen portland dan pozzolan atau dengan mencampurkan semen portland atau semen terak tanur sembur portland dan pozzolan yang digiling halus. Kandungan pozzolan antara 15 dan 40% berat semen portland pozzolan, dengan Tipe P umumnya mempunyai kandungan pozzolan lebih tinggi.

Portland yang dimodifikasi pozzolan Tipe I(PM) mengandung kurang dari 15% pozzolan, dan sifat-sifatnya mendekati sifat semen Tipe I. Batas kalor hidrasi sebesar 70 kal /g (290 kJ/kg) pada 7 hari merupakan persyaratan opsional untuk Tipe IP dan I(PM) dengan menambahkan akhiran (MH). Batasan 60 kal /g (250 kJ/kg) pada 7 hari adalah opsional untuk Tipe P dengan menambahkan akhiran (LH).

Semen terak tanur sembur portland tipe IS adalah campuran seragam semen portland dan terak tanur sembur halus. Itu diproduksi dengan cara intergrinding klinker semen portland dan terak tanur tiup berbutir atau dengan mencampurkan semen portland dan terak tanur tiup berbutir halus. Jumlah terak yang digunakan dapat bervariasi antara 25 dan 70% berat semen terak tanur sembur portland. Semen ini terkadang digunakan dengan pozzolan. Semen terak tipe S adalah bahan yang terbagi halus yang terdiri dari campuran seragam terak tanur sembur berbutir dan kapur terhidrasi yang kandungan teraknya paling sedikit 70% dari berat semen terak. Semen terak umumnya digunakan dalam campuran dengan semen portland untuk pembuatan beton.

Portland termodifikasi terak Tipe I(SM) mengandung kurang dari 25% terak, dan sifat-sifatnya mendekati sifat semen Tipe I. Persyaratan panas hidrasi opsional dapat diterapkan pada Tipe IS dan I(SM), serupa dengan yang diterapkan pada Tipe IP, I(PM), dan P.

Semen alkali rendah didefinisikan oleh ASTM C 150 sebagai semen portland yang mengandung alkali tidak lebih dari 0,60% dihitung sebagai persentase Na_2O ditambah 0,658 kali persentase K_2O . Semen ini dapat ditentukan bila semen tersebut akan digunakan pada beton dengan agregat yang mungkin bersifat reaktif dan merugikan. Penggunaan semen alkali rendah tidak selalu mengendalikan agregat mengandung silika nonkristalin yang sangat reaktif. Mungkin juga disarankan untuk

menggunakan pozzolan yang terbukti untuk memastikan pengendalian reaksi alkali-agregat.

1.2.2 Semen Portland berdasarkan Standar Indonesia

Semen Portland merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

Berdasarkan jenis dan penggunaan, semen Portland dibagi menjadi 5, sebagai berikut:

- Jenis I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
- Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- Jenis III semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
- Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Syarat mutu dari semen Portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut

Tabel 1 Syarat Kimia Utama

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum		20			
2	Al ₂ O ₃ , maksimum		6			
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum		6		6,5	
4	MgO, maksimum	6	6	6	6	6
5	SO ₃ , maksimum Jika C ₃ A ≤ 8,0 Jika C ₃ A > 8,0	3,0 3,5	3	3,5 4,5	2,3	2,3
6	Hilang pijar, maksimum	5	3	3	2,5	3
7	Bagian tak larut, maksimum	3	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum				35	
9	C ₂ S, minimum				40	
10	C ₃ A, maksimum		8	15	7	5

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
11	C ₄ AF + 2C ₃ A atau C ₄ AF + C ₂ F, maksimum					25

CATATAN:

a) Persyaratan pembatasan secara kimia berdasarkan perhitungan untuk senyawa potensial tertentu tidak harus diartikan bahwa oksida dari senyawa potensial tersebut dalam keadaan murni.

C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, Contoh C₃A = 3CaO.Al₂O₃

Titanium dioksida (TiO₂) dan fosfor pentaoksida (P₂O₅) termasuk dalam Al₂O₃.

Nilai yang biasa digunakan untuk Al₂O₃ dalam menghitung senyawa potensial (misal : C₃A) untuk tujuan spesifikasi adalah jumlah endapan yang diperoleh dengan penambahan NH₄OH dikurangi jumlah Fe₂O₃ (R₂O₃ – Fe₂O₃) yang diperoleh dalam analisis kimia basah.

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} \geq 0,64$, maka persentase C₃S, C₂S, C₃A dan C₄AF dihitung sebagai berikut:

$$\text{C}_3\text{S} = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (6,718 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = (2,867 \times \% \text{SiO}_2) - (0,7544 \times \% \text{C}_3\text{S})$$

$$\text{C}_3\text{A} = (2,650 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = (3,043 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat (C₄AF + C₂F) = 4CaO . Al₂O₃.Fe₂O₃

Semen dengan komposisi ini di dalamnya tidak terdapat C₃A. maka (C₄AF + C₂F) dan C₃S dihitung sebagai berikut:

$$(\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}) = (2,100 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) + (1,702 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_3\text{S} = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (4,479 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (2,859 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

C₂S tetap dihitung dengan menggunakan rumus di atas: Perhitungan untuk semua senyawa potensial adalah berdasarkan hasil penentuan oksidanya yang dihitung sampai sedekat mungkin 0,1%. Semua hasil perhitungan dilaporkan sampai sedekat mungkin dengan 1,0%.

b) Apabila yang disyaratkan adalah kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4), maka syarat kimia ini tidak berlaku.

c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuai karena sulfat yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4), maka syarat kimia ini tidak berlaku.

d) Tidak dapat dipergunakan.

Tabel 2 Syarat Kimia Tambahan

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	C ₃ A, maksimum			8		
2	C ₃ A, minimum			5		
3	(C ₃ S + 2C ₃ A), maksimum		58			
4	Alkali, sebagai (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), maksimum	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

CATATAN:

- a) Syarat kimia tambahan ini berlaku hanya secara khusus disyaratkan.
 b) Sama dengan keterangan untuk b) pada syarat kimia utama.
 c) Hanya berlaku bila semen digunakan dalam beton yang agregatnya bersifat reaktif terhadap alkali.

Tabel 3 Syarat Fisika Utama

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m ² /kg dengan alat :					
	- Turbidimeter, min	160	160	160	160	160
	- Blaine,	280	280	280	280	280
2	Kekekalan: Pemuai dengan autoclave, maks %	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
3	Kuat tekan:					
	- Umur 1 hari, kg/cm ² , minimum			120		
	- Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum	135	100; 70	240		80
	- Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum	215	175 120		70	150
	- Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	300			170	210
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat:					
	a) Gillmore					
	- Awal, menit, minimal	60	60	60	60	60
	- Akhir, menit, maksimum	600	600	600	600	600
	b) Vicat					
	- Awal, menit, minimal	45	45	45	45	45
	- Akhir, menit, maksimu	375	375	375	375	375

CATATAN:

a) Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau jika syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan (Tabel 2).

Tabel 4 Syarat Fisika Tambahan

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	Pengikatan semu penetrasi akhir, % minimum	50	50	50	50	50
2	Kalor hidrasi					
	- Umur 7 hari, kal/gram, maks		70 ^{b)}		60	
	- Umur 28 hari, kal/gram, maks				70	
3	Kuat tekan:					
	- Umur 38 hari, kg/cm ² , minimum		280			
4	Pemuaian karena sulfat 14 hari, %, maksimum		220 ^{b)}			0,04
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

CATATAN:

a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.

b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel kimia tambahan (Tabel 2) tidak diperlukan. Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau bila syarat $C_3S + C_3A$ seperti yang tercantum pada tabel syarat kimia tambahan (Tabel 2) disyaratkan.

1.2.3 Campuran Kimia

Campuran kimia dapat memberikan manfaat penting pada beton masal dalam keadaan plastis dengan meningkatkan kemampuan kerja, mengurangi kadar air, atau keduanya. Selain itu, bahan tambahan kimia dapat digunakan untuk memperlambat pengerasan awal, mengubah laju atau kapasitas pendarahan, mengurangi segregasi, dan mengurangi laju hilangnya kemerosotan. Campuran kimia dapat memberikan manfaat penting pada beton masal dalam keadaan mengeras dengan menurunkan pelepasan panas selama pengerasan, meningkatkan kekuatan, menurunkan kandungan semen, meningkatkan daya tahan, menurunkan permeabilitas, dan meningkatkan ketahanan terhadap abrasi atau erosi. Cakupan penuh bahan tambahan terdapat dalam ACI 212.3R. Campuran kimia yang penting untuk beton masal diklasifikasikan sebagai penahan udara, pengurang air, atau pengontrol set.

Campuran pemasukan udara (air-entraining admixtures) adalah bahan yang menghasilkan gelembung-gelembung udara kecil dalam beton selama pencampuran sehingga menghasilkan peningkatan kemampuan kerja, pengurangan segregasi, pengurangan pendarahan, penurunan permeabilitas, dan peningkatan ketahanan terhadap kerusakan akibat siklus pembekuan dan pencairan. Masuknya udara sangat meningkatkan kemampuan kerja beton ramping dan memungkinkan penggunaan agregat yang lebih keras dan bergradasi buruk serta bentuk yang tidak diinginkan. Entrainment udara juga memfasilitasi penempatan dan penanganan beton massa. Setiap 1% udara yang masuk memungkinkan pengurangan pencampuran air dari 2 menjadi 4%, dengan beberapa peningkatan dalam kemampuan kerja dan tidak ada kehilangan kemerosotan. Daya tahan, yang diukur dengan ketahanan beton terhadap kerusakan akibat pembekuan dan pencairan, akan sangat meningkat jika jarak sistem gelembung udara sedemikian rupa sehingga tidak ada titik dalam matriks semen yang lebih dari 0,008 inci (0,20 mm) dari permukaan beton. gelembung udara.

Udara yang masuk umumnya akan mengurangi kekuatan sebagian besar beton. Jika kandungan semen dijaga konstan dan keuntungan diambil dari berkurangnya kebutuhan air, masuknya udara dalam beton massa ramping mempunyai pengaruh yang dapat diabaikan terhadap kekuatan, dan bahkan mungkin sedikit meningkatkannya. Di antara faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah udara yang masuk dalam beton untuk sejumlah bahan tertentu adalah: tingkatan dan bentuk partikel agregat, kekayaan campuran, keberadaan bahan tambahan lainnya, waktu pencampuran, kemerosotan, dan suhu beton. Untuk sejumlah campuran pemasukan udara tertentu, kandungan udara meningkat seiring dengan peningkatan kemerosotan hingga 6 inci (150 mm), dan menurun seiring dengan peningkatan jumlah butiran halus, suhu beton, dan waktu pencampuran. Jika fly ash yang digunakan mengandung karbon, diperlukan peningkatan dosis campuran pemasukan udara. Sebagian besar spesifikasi untuk beton masal mengharuskan jumlah udara yang masuk, sebagaimana ditentukan dari contoh beton yang diayak basah melalui saringan 1-1/2 inci (37,5 mm), kira-kira 5%, meskipun dalam beberapa kasus mencapai 8%. Persyaratan untuk campuran pemasukan udara tercantum dalam ASTM C 260.

Campuran pereduksi air dan pengontrol pengendapan umumnya terdiri dari satu atau lebih bahan berikut: asam lignosulfonat, asam karboksilat terhidroksilasi, karbohidrat polimer, dan jenis pereduksi air rentang tinggi jenis naftalena atau melamin.

Campuran percepatan tidak digunakan dalam beton massa karena kekuatan awal yang tinggi tidak diperlukan dalam pekerjaan tersebut dan karena akselerator berkontribusi terhadap pengembangan panas yang tidak diinginkan dalam massa beton.

Campuran pereduksi air digunakan untuk mengurangi air pencampuran guna meningkatkan kekuatan dan mengurangi penyusutan beton, meningkatkan kemampuan kerja beton, atau menghasilkan kekuatan yang sama dengan semen yang lebih sedikit. Campuran pengontrol set dapat digunakan untuk menjaga plastik

beton lebih lama dalam balok besar sehingga lapisan berturut-turut dapat ditempatkan dan digetarkan sebelum lapisan bawah mengeras. Campuran dari tiga kelompok bahan pertama yang disebutkan di atas umumnya akan mengurangi kebutuhan air hingga sekitar 10%, memperlambat pembentukan awal setidaknya 1 jam (tetapi tidak mengurangi hilangnya kemerosotan), dan meningkatkan kekuatan secara signifikan. Bila menggunakan retarder, kekuatan setelah 12 jam umumnya sebanding dengan beton yang tidak mengandung bahan tambahan. Tergantung pada kekayaan beton, komposisi semen, suhu, dan faktor lainnya, penggunaan bahan tambahan kimia biasanya akan menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan dalam 1, 7, 28 hari, dan selanjutnya. Peningkatan kekuatan ini tidak dapat dijelaskan dengan besarnya pengurangan air atau dengan derajat perubahan w/c; bahan kimia memiliki efek menguntungkan pada hidrasi semen. Campuran dari keluarga asam karboksilat menambah pendarahan. Bahan tambahan pengurang air dengan kadar tinggi belum digunakan dalam konstruksi beton massa, meskipun bahan tambahan ini digunakan pada beberapa beton massa di Bendungan Guri di Venezuela dan telah digunakan pada pondasi beton massa bertulang. Pengembangan bahan tambahan yang berkelanjutan telah menghasilkan bahan tambahan yang sangat stabil yang mempertahankan kinerja yang konsisten dan jangka panjang. Hal ini menghasilkan berbagai macam bahan tambahan pengurang air yang digunakan pada sebagian besar campuran beton massa saat ini. Persyaratan bahan tambahan kimia terdapat dalam ASTM C 494.

1.2.4 Agregat

Agregat kasar dan halus serta istilah-istilah yang berkaitan dengan agregat didefinisikan dalam ASTM C 125. Agregat halus adalah pecahan yang hampir seluruhnya lolos saringan No. 4 (4,75 mm). Ini mungkin terdiri dari butiran alami, butiran buatan yang diperoleh dengan menghancurkan partikel batuan berukuran lebih besar, atau campuran keduanya. Agregat halus harus terdiri dari partikel yang keras, padat, tahan lama, dan tidak dilapisi. Agregat halus tidak boleh mengandung tanah liat, lanau, debu, mika, bahan organik, atau pengotor lainnya dalam jumlah yang berbahaya sedemikian rupa sehingga, baik secara terpisah atau bersama-sama, tidak memungkinkan untuk mencapai sifat beton yang disyaratkan bila menggunakan proporsi normal beton. bahan-bahan. Zat-zat yang merusak biasanya dibatasi pada persentase berat yang diberikan pada Tabel 5. Untuk beton terbuka di zona tuas air yang berfluktuasi untuk tiang jembatan, bendungan, dan struktur hidrolik lainnya, persentase maksimum zat berbahaya yang diijinkan harus 50% lebih rendah dari yang diberikan pada Tabel 5 untuk beton muka di zona fluktuasi ketinggian air. Angka ini bisa 50% lebih tinggi untuk beton yang terus-menerus direndam dalam air dan untuk beton yang berada di bagian dalam bendungan besar.

Gradasi agregat halus sangat mempengaruhi kemampuan kerja beton. Kadar pasir yang baik untuk beton massa harus berada dalam batas yang ditunjukkan pada Tabel 6. Namun, penyelidikan laboratorium mungkin menunjukkan

penilaian lain yang memuaskan. Hal ini memungkinkan adanya kebebasan yang cukup luas dalam penilaian agregat halus.

Meskipun persyaratan perataan itu sendiri mungkin agak fleksibel, penting sekali ketika proporsi telah ditetapkan, perataan pasir dijaga agar tetap konstan untuk menghindari variasi dalam kemampuan kerja beton.

Agregat kasar didefinisikan sebagai kerikil, kerikil pecah, batuan pecah, atau campurannya, yang secara nominal lebih besar dari No. 4 (4,75 mm) dan lebih kecil dari ukuran 6 inci (150 mm) untuk struktur besar. Struktur beton struktural besar, seperti pembangkit tenaga listrik atau unit bertulang berat lainnya yang dianggap termasuk dalam kategori beton massa, telah berhasil menggunakan agregat kasar berukuran lebih kecil, biasanya berukuran maksimum 3 inci (75 mm), tetapi ada juga yang berukuran kecil, sebagai 1-1/2 inci (37,5 mm). Penggunaan agregat yang lebih kecil mungkin ditentukan oleh jarak yang berdekatan antara tulangan atau benda yang tertanam, atau karena tidak tersedianya agregat yang lebih besar. Hal ini menghasilkan kandungan semen yang lebih tinggi dengan dampak buruk terhadap timbulnya panas internal dan potensi retak yang harus diimbangi dengan upaya yang lebih besar untuk mengurangi kebutuhan semen dan suhu pengecoran beton. Ukuran maksimum agregat kasar tidak boleh melebihi 1/4 dimensi terkecil struktur atau 2/3 jarak bersih terkecil antar batang tulangan pada alas horizontal atau bila terdapat lebih dari satu tirai penguat vertikal di samping cetakan. Jika tidak, aturan untuk beton massa adalah menggunakan agregat kasar dengan ukuran praktis terbesar.

Agregat kasar harus terdiri dari partikel yang keras, padat, tahan lama, dan tidak dilapisi. Batuan yang gembur atau cenderung rusak selama pemrosesan, pengangkutan, atau penyimpanan harus dihindari. Batuan yang memiliki daya serap lebih besar dari 3% atau berat jenis kurang dari 2,5 umumnya dianggap tidak cocok untuk beton massa terbuka yang mengalami pembekuan dan pencairan. Sulfat dan sulfida, yang ditentukan melalui analisis kimia dan dihitung sebagai SO_3 , tidak boleh melebihi 0,5% dari berat agregat kasar. Persentase zat berbahaya lainnya seperti tanah liat, lanau, dan debu halus dalam agregat kasar yang dikirim ke alat pencampur pada umumnya tidak boleh melebihi nilai yang diuraikan dalam Tabel 7.

Tabel 5 Persentase maksimum yang diizinkan dari zat-zat berbahaya dalam agregat halus (berdasarkan berat)

Substansi	Persentase Maksimal yang Diizinkan berdasarkan Berat
Gumpalan lempung dan partikel rapuh	3
Material yang lolos ayakan No. 200 (75 μm): Untuk beton yang terpapar abrasi	3*
Material yang lolos ayakan No. 200 (75 μm): Untuk semua jenis beton lainnya	5*
Batu bara dan lignit: Ketika penampilan permukaan beton sangat penting	0,5

Substansi	Persentase Maksimal yang Diizinkan berdasarkan Berat
Batu bara dan lignit: Untuk semua jenis beton lainnya	1

*Terkait pasir buatan, apabila material yang lolos saringan No. 200 (75 μm) terdiri dari debu rekahan, yang pada hakikatnya bebas dari lempung atau serpih, batasan ini dapat ditingkatkan menjadi 5% untuk beton yang rentan abrasi dan 7% untuk semua beton lainnya.

Tabel 6 Agregat halus untuk beton massa

Ukuran saringan	Persentase yang tertahan, (berdasarkan berat)
3/8 in. (9.50 mm)	0
No. 4 (4.75 mm)	0 to 5
No. 8 (2.36 mm)	5 to 15
No. 16 (1.18 mm)	10 to 25
No. 30 (600 μm)	10 to 30
No. 50 (300 μm)	15 to 35
No. 100 (150 μm)	12 to 20
Pan	3 to 7

Tabel 7 Persentase maksimum yang diizinkan dari zat-zat berbahaya dalam agregat kasar (berdasarkan berat)

Substansi	Persentase Maksimal yang Diizinkan berdasarkan Berat
Material yang lolos ayakan No. 200 (75 μm)	0,5
Material ringan	2
Lempung	0,3
Bahan berbahaya lainnya	2

1.2.5 Kekuatan

Faktor w/cm menentukan kualitas pengikat semen Portland yang mengeras. Kekuatan, permeabilitas, dan sebagian besar sifat beton lainnya yang diinginkan ditingkatkan dengan menurunkan w/cm. Studi mengenai data kuat tekan yang diberikan pada Tabel 8 menunjukkan variasi yang cukup besar dari hubungan langsung antara w/cm dan kuat tekan. Faktor-faktor yang tidak tergantung pada w/cm, yang mempengaruhi kekuatan adalah: komposisi dan kehalusan semen, jumlah dan jenis pozzolan, tekstur permukaan dan bentuk agregat, susunan mineralogi dan kekuatan agregat, penilaian agregat, dan peningkatan kekuatan dengan bahan tambahan yang disebutkan di atas yang disebabkan oleh pengurangan w/cm.

Tabel 8 Hubungan w/cm dan kuat tekan

Bendungan	Negara	Semen atau semen pozzolan, lb/yd³ (kg/m³)	Air, lb/yd³ (kg/m³)	Jenis agregat dominan	Ukuran maksimum agregat, in. (mm)	w/c	Kekuatan umur 90-hari, psi (MPa)	Efisiensi semen umur 90 hari, psi/lb/yd³ (MPa/kg/m³)
La Palisse	France	506 (300)	250 (148)	Granite	4.7 (120)	0.49	4790 (33.0)	9.5 (0.111)
Chastang	France	379 (225)	169 (100)	Granite	9.8 (250)	0.56	3800 (26.2)	9.9 (0.115)
L'Aigle	France	370 (220)	211 (125)	Granite	9.8 (250)	0.56	3200 (22.1)	8.6 (0.099)
Pieve di Cadore	Italy	337 (200)	213 (126)	Dolomite	4.0 (100)	0.63	6400 (44.1)	19.0 (0.220)
Forte Baso	Italy	404 (240)	238 (141)	Pophyry	3.9 (98)	0.59	5400 (37.2)	12.2 (0.141)
Cabril	Portugal	370 (220)	195 (116)	Granite	7.9 (200)	0.54	4250 (29.3)	11.3 (0.138)
Salamonde	Portugal	420 (249)	225 (133)	Granite	7.9 (200)	0.54	4180 (28.8)	10.2 (0.125)
Castelo Bode	Portugal	370 (220)	220 (131)	Quartzite	9.0 (230)	0.49	3800 (26.2)	10.3 (0.119)
Rossens	Switzerland	420 (249)	225 (133)	Glacial mixture	2.5 (64)	0.34	5990 (41.3)	14.3 (0.166)
Mauvoisin	Switzerland	319 (189)	162 (96)	Gneiss	3.8 (96)	0.51	4900 (34.0)	15.4 (0.181)
Zervreila	Switzerland	336 (199)	162 (96)	Gneiss	3.8 (96)	0.51	3850 (26.5)	10.5 (0.137)
Hungry Horse	U.S.	188-90 (111-53)	147 (87)	Sandstone	6.0 (150)	0.47	3100 (21.4)	11.2 (0.133)
Glen Canyon	U.S.	118-94 (141-70)	138 (82)	Limestone	6.0 (150)	0.50	4200 (29.0)	8.8 (0.105)
Lower Granite	U.S.	145-49 (86-89)	133 (79)	Basalt	6.0 (150)	0.50	2070 (14.3)	5.6 (0.067)
Libby	U.S.	148-49 (88-89)	134 (79)	Quartzite	6.0 (150)	0.62	2460 (17.0)	8.4 (0.098)
Dworshak	U.S.	211-71 (125-42)	164 (97)	Granite	6.0 (150)	0.58	3050 (21.0)	10.8 (0.126)
Dworshak	U.S.	198-67 (117-40)	164 (97)	Granite	6.0 (150)	0.58	2180 (15.0)	9.5 (0.111)

Bendungan	Negara	Semen atau semen pozzolan, lb/yd ³ (kg/m ³)	Air, lb/yd ³ (kg/m ³)	Jenis agregat dominan	Ukuran maksimum agregat, in. (mm)	w/c	Kekuatan umur 90-hari, psi (MPa)	Efisiensi semen umur 90 hari, psi/lb/yd ³ (MPa/kg/m ³)
Dworshak	U.S.	182-72 (108-43)	166 (98)	Gneiss	6.0 (150)	0.62	2030 (14.0)	8.7 (0.098)
Dworshak	U.S.	174-46 (130-27)	165 (98)	Gneiss	6.0 (150)	0.58	1920 (13.2)	8.7 (0.098)
Pueblo	U.S.	226-75 (134-44)	168 (100)	Granite, limestone, dolomite	3.5 (89)	0.56	3000* (20.7)	10.0 (0.116)
Crystal	U.S.	390 (231)	183 (108)	Shist and altered volcanics	3.0 (75)	0.47	4000† (27.6)	10.3 (0.119)
Flaming Gorge	U.S.	188-94 (111-56)	149 (88)	Limestone and sandstone	6.0 (150)	0.53	3500 (24.1)	12.4 (0.144)
Krasnoriarsk	U.S.S.R.	388 (230)	213 (126)	Granite	3.9 (100)	0.55	3280 (22.6)	8.5 (0.098)
Ilha Solteira	Brazil	138-46 (82-27)	75 (45)	Quartzite gravel, crushed basalt	6.0 (150)	0.75	3045 (21.0)	16.5 (0.193)
Itaipu	Brazil	182-22 (108-13)	143 (85)	Crushed basalt	6.0 (150)	0.70	2610 (18.0)	12.8 (0.149)
Theodore Roosevelt modification	U.S.	270 (160)	144 (85)	Granite	4.0 (100)	0.53	4500 (31.0)	16.7 (0.194)

*Kekuatan umur 80 hari.

†Kekuatan umur 1 tahun.

Beton dengan kuat tekan tinggi (lebih besar dari 5000 psi [34,5 MPa]) biasanya tidak diperlukan pada beton massa, kecuali pada bendungan lengkung tipis. Proporsi beton harus menentukan kandungan semen minimum yang diperlukan untuk memenuhi kuat tekan rata-rata, seperti yang ditentukan oleh ACI 116R, untuk memberikan penghematan terbesar dan kenaikan suhu minimum. Persyaratan semen untuk kemampuan kerja dan daya tahan yang memadai, bukan kekuatan, sering kali menentukan kandungan semen Portland.

Beton massa jarang diperlukan untuk menahan tekanan besar pada usia dini. Oleh karena itu, untuk memanfaatkan sepenuhnya sifat kekuatan bahan tersebut, kekuatan desain biasanya didasarkan pada kekuatan pada umur 90 hari

hingga 1 tahun, dan terkadang hingga 2 tahun. Silinder kontrol pekerjaan harus diuji pada usia yang lebih dini agar berguna dalam melakukan kontrol dan menjaga konsistensi selama konstruksi. Benda uji kontrol pekerjaan biasanya berbentuk silinder berukuran 6 x 12 inci (150 x 300 mm) yang berisi beton yang telah disaring secara basah untuk menghilangkan agregat yang lebih besar dari ukuran maksimum 1-1/2 inci (37,5 mm). Uji korelasi harus dilakukan jauh sebelum konstruksi dimulai untuk membandingkan kekuatan beton penyaring basah yang diuji pada umur kontrol dengan benda uji berukuran sesuai yang mengandung beton bermassa penuh yang diuji pada umur uji desain. Kekuatan benda uji berukuran besar hingga 36 x 72 inci (900 x 1800 mm) biasanya akan mencapai 80 hingga 90% dari kekuatan silinder berukuran 6 x 12 inci (150 x 300 mm) yang diuji pada umur yang sama (USBR 2001). Dengan mempertimbangkan perkembangan kekuatan yang berkelanjutan setelah 28 hari, khususnya jika pozzolan digunakan, faktor korelasi pada 1 tahun dapat berkisar antara 1,15 hingga 3,0 kali kekuatan spesimen kontrol yang disaring secara basah yang diuji pada 28 hari.

Prosedur pengawetan dipercepat yang diatur dalam ASTM C 684 menghasilkan hasil uji tekan dalam waktu 24 hingga 48 jam yang dapat memberikan indikasi potensi kekuatan beton. Namun, penggunaan prosedur-prosedur ini harus dibatasi untuk mendeteksi variasi kualitas beton dan menilai efektivitas tindakan pengendalian pekerjaan. Indikator kekuatan dipercepat sangat membantu jika korelasi yang memuaskan telah ditentukan dengan nilai jangka panjang dengan menggunakan spesimen pendamping dari beton yang sama. Meskipun indikator ini mungkin memiliki hubungan yang meragukan dengan kekuatan aktual struktur beton di masa depan, indikator ini dapat membantu selama konstruksi.

Ada beberapa faktor kompleks yang terlibat dalam menghubungkan hasil uji kekuatan pada sampel kecil dengan kemungkinan kekuatan struktur beton massa yang pada dasarnya masih belum terselesaikan. Karena kompleksitas ini, kebutuhan kekuatan beton biasanya beberapa kali lipat dari tegangan rencana maksimum yang dihitung untuk struktur beton massa. Misalnya, kriteria desain bendungan gravitasi yang umum digunakan oleh USBR, dan USACE menetapkan tegangan tekan maksimum yang diijinkan untuk kombinasi pembebanan biasa sebesar 1/3 dari kuat beton yang ditentukan. Pemilihan tegangan ijin dan faktor keamanan bergantung pada tipe struktur, kondisi pembebanan yang dianalisis, dan lokasi struktur (USBR 1976; USACE 1990).

Beton yang kuat terhadap tekan juga kuat terhadap tarik, namun hubungan kekuatan ini tidak linier. Kuat tarik dapat diukur dengan beberapa pengujian, terutama pengujian tarik langsung, pengujian tarik belah, dan pengujian modulus pecah (lentur). Masing-masing pengujian tersebut mempunyai hubungan yang berbeda-beda terhadap kuat tekan. Ekspresi yang menghubungkan kekuatan tarik f_t dengan kekuatan tekan f_c diberikan dalam ACI 318: untuk f_t dan f_c dalam MPa

$$f_t = 0,6f_c^{1/2}$$

Raphael (1984) membahas hubungan kekuatan tarik-tekan dan penggunaannya dalam desain. Hubungan jenis-jenis ini untuk bahan tertentu dapat sangat bervariasi dari formula yang disebutkan di atas, berdasarkan kualitas agregat dan faktor lainnya. Jika memungkinkan dan diperlukan, pengujian harus dilakukan untuk mengkonfirmasi hubungan ini.

Kekuatan beton juga dipengaruhi oleh kecepatan pembebanan. Nilai yang biasanya dilaporkan adalah untuk beban statis yang memerlukan waktu cukup lama untuk berkembang, seperti beban mati atau beban air. Namun, selama gempa bumi, tekanan dapat berkembang sepenuhnya dalam waktu sepersekian detik. Ketika dibebani pada kecepatan ini, kuat tekan beton untuk benda uji lembab dapat ditingkatkan hingga 30%, dan kuat tarik dapat ditingkatkan hingga 50%, jika dibandingkan dengan nilai yang diperoleh pada laju pembebanan standar (Saucier 1977; Graham 1978; Raphael 1984; Harris dkk).

1.2.6 Sifat Elastis

Beton bukanlah bahan yang benar-benar elastis, dan grafik hubungan tegangan-regangan untuk beban yang terus meningkat umumnya berbentuk garis lengkung. Modulus elastisitas, bagaimanapun, untuk tujuan praktis, dianggap konstan dalam rentang tegangan yang biasanya dialami oleh beton massa.

Modulus elastisitas beton yang mewakili berbagai bendungan disajikan pada Tabel 9. Nilai-nilai ini berkisar dari 2,8 hingga $5,5 \times 10^6$ psi (1,9 hingga $3,8 \times 10^4$ MPa) pada 28 hari dan dari 3,8 hingga $6,8 \times 10^6$ psi (2,6 hingga $4,7 \times 10^4$ MPa) pada 1 tahun. Biasanya, beton dengan kekuatan lebih tinggi mempunyai nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi dan menunjukkan korelasi umum peningkatan modulus dengan kekuatan. Modulus elastisitas tidak berbanding lurus dengan kekuatan; Namun hal ini dipengaruhi oleh modulus elastisitas agregat. Di masa lalu, data dari uji modulus elastisitas beton menunjukkan koefisien variasi yang relatif tinggi yang dihasilkan dari upaya mengukur regangan kecil pada campuran heterogen yang mengandung agregat berukuran besar. Perangkat elektronik modern seperti transformator diferensial variabel linier (LVDT) dapat mengukur perubahan panjang kecil dengan akurasi tinggi. Modulus elastisitas tarik umumnya diasumsikan identik dengan modulus elastisitas tekan.

Data rasio Poisson yang diberikan pada Tabel 9 cenderung berkisar antara nilai 0,16 dan 0,20, dengan peningkatan kecil seiring bertambahnya waktu penyembuhan. Nilai ekstrem dapat bervariasi dari 0,11 hingga 0,27. Rasio Poisson, seperti modulus elastisitas, dipengaruhi oleh agregat, pasta semen, dan proporsi relatif keduanya.

Pertumbuhan retakan mikro internal pada beton di bawah pembebanan dimulai pada tegangan tekan yang setara dengan sekitar 35 hingga 50% dari kuat tekan nominal pada pembebanan jangka pendek. Di atas tekanan ini, regangan volumetrik keseluruhan mencerminkan volume yang ditempati oleh celah internal ini, dan rasio Poisson serta modulus elastis tidak lagi konstan.

Hasil beberapa penyelidikan menunjukkan bahwa modulus elastisitas tampaknya relatif tidak berubah baik diuji pada tingkat pembebanan normal atau

dinamis (Hess 1992). Rasio Poisson dapat dianggap sama untuk laju pembebanan normal atau dinamis (Hess 1992).

Tabel 9 Data Bendungan

No.	Bendungan	Kuat tekan, psi (MPa)				Sifat Elastisitas							
						Modulus elastisitas, E x 10 ⁶ , psi (E x 10 ⁴ , MPa)				Poisson's ratio			
		Umur, hari				Umur, hari				Umur, hari			
		28	90	180	365	28	90	180	365	28	90	180	365
1	Hoover	3030 (20.9)	3300 (22.8)		4290 (29.6)	5.5 (3.8)	6.2 (4.3)		6.8 (4.7)	0.18	0.20		0.21
2	Grand Coulee	4780 (33.0)	5160 (35.5)		5990 (41.3)	4.7 (3.2)	6.1 (4.2)		6.0 (4.1)	0.17	0.20		0.23
3	Glen Canyon	2550 (17.6)	3810 (26.3)	3950 (27.2)		5.4 (3.7)		5.8 (4.0)		0.11		0.14	
4	Glen Canyon*	5000 (24.1)	4990 (33.8)	6560 (45.2)	6820 (47.3)	5.3 (3.7)	6.3 (4.3)	6.7 (4.6)		0.15	0.15	0.19	
5	Flaming Gorge	2950 (20.3)	3500 (24.1)	3870 (26.7)	4680 (32.3)	3.5 (2.4)	4.3 (3.0)	4.6 (3.2)		0.13	0.25	0.20	
6	Yellowtail		4580 (31.6)	5420 (37.4)	5640 (38.9)		6.1 (4.2)	5.4 (3.7)	6.2 (4.3)		0.24	0.26	0.27
7	Morrow Point	4770 (32.9)	5960 (41.1)	6440 (44.3)	6680 (46.1)	4.4 (3.0)	4.9 (3.4)	5.3 (3.7)	4.6 (3.2)	0.22	0.22	0.23	0.20
8	Lower Granite*	1270 (8.8)	2070 (14.3)	2420 (16.7)	2730 (18.8)	2.8 (1.9)	3.9 (2.7)	3.8 (2.6)	3.9 (2.7)	0.19	0.20		
9	Libby	1450 (10.0)	2460 (17.0)		3190 (22.0)	3.2 (2.2)	4.0 (2.8)		5.5 (3.8)	0.14	0.18		
10	Dworshak*	1200 (8.3)	2030 (14.0)		3110 (21.4)		3.7 (2.6)		3.8 (2.6)				

No.	Bendungan	Kuat tekan, psi (MPa)				Sifat Elastisitas							
						Modulus elastisitas, $E \times 10^6$, psi ($E \times 10^4$, MPa)				Poisson's ratio			
		Umur, hari				Umur, hari				Umur, hari			
		28	90	180	365	28	90	180	365	28	90	180	365
11	Ilha Solteira	2320 (16.0)	2755 (19.0)	3045 (21.0)	3190 (22.0)	5.1 (3.5)	5.9 (4.1)			0.15	0.16		
12	Itaipu	1885 (13.0)	2610 (18.0)	2610 (18.00)	2755 (19.0)	5.5 (3.8)	6.2 (4.3)	6.2 (4.3)	6.5 (4.5)	0.18	0.21	0.22	0.20
13	Peace site*	3060 (21.1)	3939 (27.2)	4506 (31.1)	4666 (32.2)								
14	Theodore Roosevelt modification	2400 (16.5)	4500 (31.0)	5430 (37.4)	5800 (40.0)	4.5 (3.1)	5.4 (3.7)		6.2 (4.3)	0.20	0.21		0.21

Tabel 10 Sifat elastis beton massa

Waktu di bawah pembebanan	Modulus elastisitas sesaat dan berkelanjutan,* psi $\times 10^6$ (MPa $\times 10^4$)														
	Grand Coulee E	Grand Coulee E1	Grand Coulee E2	Shasta E	Shasta E1	Shasta E2	Hungry Horse E	Hungry Horse E1	Hungry Horse E2	Dworsha E	Dworsha E1	Dworsha E2	Libby E	Libby E1	Libby E2
2 hari	1.7 (1.2)	0.83 (0.57)	0.76 (0.52)	1.4 (0.97)	0.54 (0.37)	0.49 (0.34)	2.8 (1.9)	1.5 (1)	1.4 (0.97)	1.4 (0.97)	0.75 (0.52)	0.7 (0.48)	1.6 (1.1)	1 (0.69)	0.9 (0.62)

1.2.7 Susut

Susut beton adalah deformasi yang bergantung pada waktu akibat adanya beban yang berkelanjutan. Susut terutama terkait dengan modulus elastisitas beton. Beton dengan nilai modulus elastisitas yang tinggi umumnya mempunyai nilai deformasi yang rendah. Pasta semen sangat bertanggung jawab atas susut beton. Pada beton yang mengandung jenis agregat yang sama, besarnya rangkai berkaitan erat dengan kandungan pasta (Polivka dkk. 1963) dan berat beton. ACI 209R membahas tentang prediksi pengaruh rangkai, penyusutan, dan suhu pada struktur beton.

Salah satu cara untuk menyatakan efek rangkai adalah dengan modulus elastisitas berkelanjutan beton dimana tegangan dibagi dengan deformasi total selama waktu di bawah beban. Nilai modulus elastisitas sesaat dan berkelanjutan yang diperoleh pada silinder berdiameter 6 inci (150 mm) yang dibuat dengan beton massa yang disaring basah untuk menghilangkan ukuran maksimum 1-1/2 inci (37,5 mm). Modulus sesaat diukur segera setelah beton diberi pembebanan. Modulus berkelanjutan mewakili nilai setelah 365 dan 1000 hari dalam pemuatan. Nilai modulus elastisitas berkelanjutan kira-kira 1/2 dari modulus sesaat ketika beban diterapkan pada usia dini, dan merupakan persentase yang sedikit lebih tinggi dari modulus elastisitas sesaat ketika usia pemuatan adalah 90 hari atau lebih besar. Rangkai beton nampaknya kira-kira berbanding lurus dengan rasio tegangan-kekuatan yang diterapkan, hingga kira-kira 40% dari kekuatan ultimat beton.

1.2.8 Sifat Termal Beton

Sifat termal beton adalah koefisien muai, konduktivitas, panas spesifik, dan difusivitas. Hubungan difusivitas, konduktivitas, dan panas spesifik ditentukan oleh (ASTM 2006)

$$h^2 = K / C_h \times \rho$$

Di mana:

h^2 = difusivitas, ft²/jam (m²/h);

K = konduktivitas, Btu/ ft · h · °F (kJ/ m·h ·°C);

C_h = kalor jenis, Btu/lb · °F (kJ/kg°C); dan

ρ = massa jenis beton, lb/ft³ (kg/m³);

Persamaan ini memberikan model bagaimana panas dihantarkan melalui benda padat—khususnya beton. Sifat termal ini mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap suhu yang pada gilirannya mengakibatkan perubahan volume beton. Sifat-sifat tersebut harus ditentukan di laboratorium dengan menggunakan bahan kerja sebelum desain, jika memungkinkan. Tabel 11 menyajikan berbagai sifat termal.

Tabel 11 Sifat termal beton

Jenis agregat kasar	Temperatur °F (°C)	Koefisien ekspansi, $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		Konduktivitas termal (Btu/ft·h·°F) (kJ/m·h·°C)	Kalor jenis (Btu/lb·°F) (kJ/kg·°C)	Difusivitas (ft²/h) ([m²/h] × 10⁻³)
		1-1/4 in. (37,5 mm) maks	4-1/2 in. (114 mm) maks			
Limestone dan granit	50 (10)			1.70 (10.6)	0.212 (0.887)	0.051 (4.7)
	100 (38)	5.3 (9.5)	4.8 (8.6)	1.67 (10.4)	0.225 (0.941)	0.047 (4.4)
	150 (66)			1.65 (10.3)	0.251 (1.050)	0.042 (3.9)
Basalt	50 (10)			1.08 (6.74)	0.219 (0.916)	0.031 (2.9)
	100 (38)	4.4 (7.9)	4.6 (8.3)	1.08 (6.74)	0.231 (0.967)	0.029 (2.7)
	150 (66)			1.09 (6.78)	0.257 (1.075)	0.027 (2.5)
Quartzite granite dan rhyolite	50 (10)			1.23 (7.66)	0.216 (0.904)	0.037 (3.4)
	100 (38)			1.23 (7.66)	0.230 (0.962)	0.035 (3.2)
	150 (66)			1.24 (7.70)	0.243 (1.017)	0.033 (3.1)
Andesite dan slate	50 (10)			1.32 (8.20)	0.219 (0.916)	0.039 (3.6)
	100 (38)		4.8 (8.6)	1.31 (8.16)	0.233 (0.975)	0.036 (3.3)
	150 (66)			1.31 (8.16)	0.247 (1.033)	0.034 (3.2)
Limestone	50 (10)			1.49 (9.29)	0.221 (0.925)	0.045 (4.2)
	100 (38)	4.0 (7.2)		1.48 (9.20)	0.237 (0.992)	0.041 (3.8)
	150 (66)			1.46 (9.08)	0.252 (1.054)	0.038 (3.5)
Granite gabbros dan quartz	50 (10)			1.61 (10.0)	0.208 (0.870)	0.050 (4.6)
	100 (38)	5.2 (9.4)	4.5 (8.1)	1.60 (9.96)	0.221 (0.925)	0.047 (4.4)
	150 (66)			1.59 (9.87)	0.234 (0.979)	0.044 (4.1)
Sandstone	50 (10)			1.72 (10.1)	0.217 (0.895)	0.053 (4.6)
	100 (38)	6.2 (9.7)	5.7 (4.)	1.71 (10.0)	0.232 (0.937)	0.049 (4.4)
	150 (66)			1.69 (9.87)	0.247 (0.983)	0.046 (4.2)

Sandstone, metasiltstone, quartzite, dan rhyolite	50 (10)	5.2 (9.4)		1.57 (9.79)	0.225 (0.941)	0.046 (4.3)
	100 (38)			1.55 (9.67)	0.237 (0.992)	0.043 (4.0)
	150 (66)			1.53 (9.54)	0.250 (1.046)	0.040 (3.7)
Andesite, latite, dan limestone	50 (10)	5.6 (10.1)	4.5 (8.1)	1.14 (7.11)	0.227 (0.950)	0.034 (3.2)
	100 (38)			1.14 (7.11)	0.242 (1.013)	0.032 (3.0)
	150 (66)			1.15 (7.15)	0.258 (1.079)	0.030 (2.8)
Limestone, chert, dan sandstone	50 (10)			2.13 (13.3)	0.217 (0.908)	0.065 (6.0)
	100 (38)			2.05 (12.8)	0.232 (0.971)	0.059 (5.5)
	150 (66)			1.97 (12.3)	0.247 (1.033)	0.053 (4.9)
Limestone dan sandstone	50 (10)			1.78 (11.1)	0.221 (0.925)	0.054 (5.0)
	100 (38)			1.75 (10.9)	0.234 (0.979)	0.050 (4.6)
	150 (66)			1.73 (10.8)	0.248 (1.038)	0.046 (4.3)
Limestone dan andesite	50 (10)		4.3 (7.7)	1.55 (9.67)	0.226 (0.946)	0.045 (4.2)
	100 (38)			1.52 (9.46)	0.239 (1.000)	0.042 (3.9)
	150 (66)			1.48 (9.20)	0.252 (1.054)	0.039 (3.6)
Granite gneiss	100 (38)		5.5 (9.9)	1.35 (8.41)	0.220 (0.920)	0.040 (3.9)
Quartzite dan basalt	100 (38)		6.9 (12.5)	1.73 (10.8)	0.220 (0.920)	0.049 (4.9)
Basalt	100 (38)		4.3 (7.8)	1.06 (6.61)	0.233 (0.975)	0.029 (2.7)
Granite	50 (10)	4.3 (7.7)		1.71 (10.7)	0.234 (0.979)	0.049 (4.6)
	100 (38)			1.73 (10.9)	0.248 (1.037)	0.047 (4.4)
	150 (66)			1.70 (10.6)	0.260 (1.088)	0.044 (4.1)
Granodiorite	100 (38)	5.4 (9.7)		0.94 (5.86)	0.210 (0.880)	0.030 (2.8)

1.2.8.1 Sifat Termal Beton

Jika pengujian laboratorium tidak tersedia, koefisien ekspansi (CTE) harus diasumsikan sebesar 5×10^{-6} in./in./°F (9×10^{-6} mm/mm/°C) untuk agregat berkapur, 6×10^{-6} in./in./°F (11×10^{-6} mm/mm/°C) untuk beton mengandung silika, dan 7×10^{-6} in./in./°F (13×10^{-6} mm/mm/°C) untuk agregat kuarsit. Tabel 12 memperlihatkan nilai koefisien ekspansi beton dan agregat.

Tabel 12 Koefisien ekspansi termal	
Agregat	Koefisien ekspansi termal $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Granite	4 to 5 (7 to 9)
Basalt	3.3 to 4.4 (6 to 8)
Limestone	3.3 (6)
Dolomite	4 to 5.5 (7 to 10)
Sandstone	6.1 to 6.7 (11 to 12)
Quartzite	6.1 to 7.2 (11 to 13)
Marble	2.2 to 4 (4 to 7)
Concrete	4.1 to 7.3 (7.4 to 13)

1.2.8.2 Kalor Jenis

Kapasitas kalor per satuan suhu, atau kalor jenis, beton normal dan karakteristik agregat, suhu, dan parameter lainnya. Nilai dari 0,20 hingga 0,25 Btu/lb·°F (KJ/kg·°C) mewakili berbagai kondisi dan bahan.

1.2.8.3 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal adalah kemampuan beton untuk menghantarkan panas dan dapat didefinisikan sebagai laju aliran panas per satuan suhu yang menyebabkan perpindahan panas tersebut. Karakteristik mineralogi agregat dan kadar air, kepadatan, dan suhu beton, mempengaruhi konduktivitas. Dalam temperatur beton normal yang dialami dalam konstruksi beton massa, dan untuk kadar air tinggi yang terdapat pada beton pada usia dini, nilai konduktivitas termal harus menyerupai yang ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13 Konduktivitas termal	
Agregat	Konduktivitas termal, $\text{Btu}\cdot\text{in.}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ (KJ/kg·°C)
Quartzite	24 (4.5)
Dolomite	22 (4.2)
Limestone	18 to 23 (2.6 to 3.3)
Granite	18 to 19 (2.6 to 2.7)
Rhyolite	15 (2.2)

Agregat	Konduktivitas termal, Btu·in./h·ft²·°F (KJ/kg·°C)
Basalt	13 to 15 (1.9 to 2.2)

1.2.8.4 Difusivitas Termal

Difusivitas termal adalah indeks kemudahan atau kesulitan beton mengalami perubahan suhu dan, secara numerik, adalah konduktivitas termal dibagi dengan produk kepadatan dan panas spesifik. Nilai difusivitas sangat dipengaruhi oleh jenis batuan yang digunakan dalam beton. Tabel 14 menunjukkan difusivitas beton yang dibuat dengan jenis batuan berbeda. Semakin tinggi nilai difusivitas maka semakin mudah panas berpindah melalui beton. Untuk beton dengan berat normal, dimana nilai densitas dan panas spesifik bervariasi dalam rentang yang relatif sempit, difusivitas termal mencerminkan nilai konduktivitas. Konduktivitas yang tinggi menunjukkan kemudahan yang lebih besar dalam memperoleh atau kehilangan panas. Nilai beton yang mengandung agregat kuarsit telah dilaporkan hingga 0,065 ft²/h (0,0060 m²/h).

Tabel 14 Difusivitas termal beton

Agregat	Difusivitas beton, ft²/day (m²/day)	Difusivitas beton, ft²/h (m²/h × 10⁻³)
Quartzite	1.39 (0.129)	0.058 (5.4)
Limestone	1.22 (0.113)	0.051 (4.7)
Dolomite	1.20 (0.111)	0.050 (4.6)
Granite	1.03 (0.096)	0.043 (4.0)
Rhyolite	0.84 (0.078)	0.035 (4.2)
Basalt	0.77 (0.072)	0.032 (4.0)

1.2.9 Kapasitas Regangan

Pembuatan beton massa berdasarkan kapasitas regangan tarik daripada kekuatan tarik lebih mudah dan sederhana jika kriteria dinyatakan dalam perubahan linier atau volumetrik. Contohnya termasuk suhu dan fenomena penyusutan pengeringan. Idealnya, kapasitas regangan tarik ditentukan untuk setiap beton dengan pengujian balok atau prisma bermassa besar yang dilengkapi pengukur regangan internal, dan diuji dalam tegangan lentur atau tarik langsung. Regangan tarik yang diukur dengan alat pengukur yang tertanam dalam balok besar akan mendekati kapasitas regangan tarik langsung. Namun, pengukur permukaan pada permukaan tarik balok lentur akan memperkirakan kapasitas regangan secara berlebihan dan sebaiknya tidak digunakan. Karena kemudahannya, pengujian kuat tarik tidak langsung atau belah biasanya digunakan untuk mendapatkan sifat kuat tarik beton, dan kemudian mengubahnya menjadi kapasitas regangan tarik dengan membaginya dengan modulus elastisitas. Akan tetapi, kekuatan tarik tidak langsung pertama-tama harus diubah menjadi kekuatan tarik langsung yang mungkin. Balok uji regangan tarik

normal berukuran 12 x 12 x 64 inci (300 x 300 x 1600 mm), tidak diperkuat, dan diuji hingga gagal pada pembebanan titik ketiga (US Army Corps of Engineers 1980).

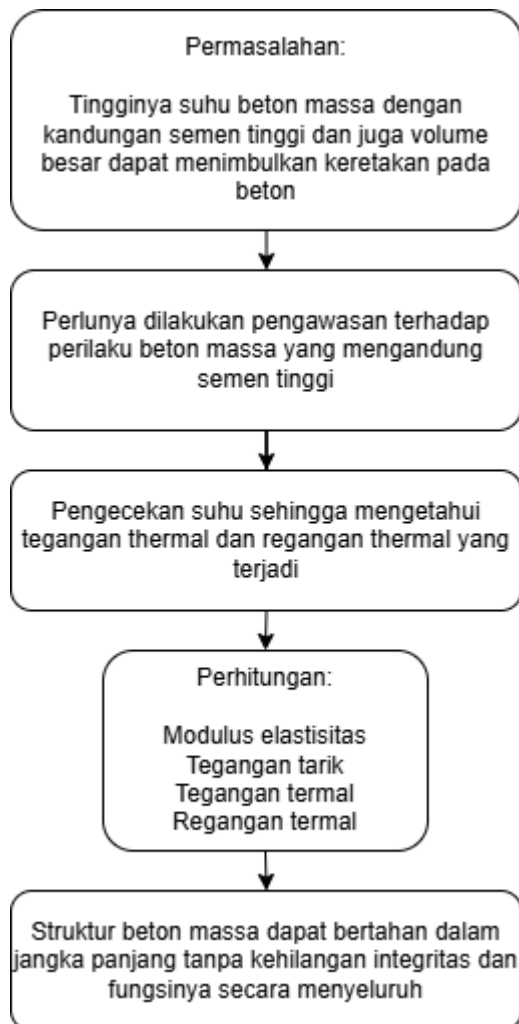
Regangan serat terluar dalam tegangan diukur langsung pada benda uji. Pada umur pemuatan awal 7 hari, satu benda uji dibebani hingga rusak selama beberapa menit (uji cepat). Secara bersamaan, pembebanan balok uji pendamping dimulai, dengan penambahan pembebanan mingguan, 25 psi/minggu (0,17 MPa/minggu), dengan besaran yang akan mengakibatkan kegagalan balok pada sekitar 90 hari (uji lambat). Jika balok uji lambat mengalami kegagalan, spesimen ketiga kadang-kadang dibebani hingga rusak melalui prosedur uji cepat untuk mengukur perubahan sifat elastis selama periode pengujian. Hasil kapasitas regangan tarik membantu dalam menetapkan prosedur pengendalian retak beton. Misalnya, asumsikan bahwa beton mempunyai koefisien muai panas sebesar $5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ (9,9 persepjuta/ $^{\circ}\text{C}$) regangan tarik beban cepat selama 7 dan 90 hari masing-masing sebesar 64 dan 88 persepjuta, dan 7 dan 90 persepjuta. -hari regangan tarik beban lambat sebesar 118 persepjuta. Insulasi yang memadai harus digunakan untuk menghindari penurunan suhu permukaan secara tiba-tiba yang lebih besar dari $64/5,5 = 11,6^{\circ}\text{F}$ ($6,4^{\circ}\text{C}$) pada usia dini, dan $88/5,5 = 16^{\circ}\text{F}$ ($8,9^{\circ}\text{C}$) pada usia 3 bulan atau lebih. Jika pendingin pipa tertanam digunakan; penurunan suhu total tidak boleh melebihi $118/5,5 = 21^{\circ}\text{F}$ (12°C) selama periode 3 bulan awal.

1.2.10 Desain Konseptual

Desain konseptual merupakan cara berpikir peneliti dalam mengambil suatu masalah dan membuat alur untuk menyelesaikan masalah tersebut. Penelitian ini berfokus pada pemantauan perubahan suhu dan tegangan yang dihasilkan dalam proses hidrasi semen pada beton massa dengan kandungan semen tinggi, yaitu 560 kg/m^3 . Proses hidrasi semen yang bersifat eksotermik mempengaruhi perubahan suhu internal beton, yang dapat menghasilkan tegangan termal. Tegangan ini berpotensi menimbulkan retakan pada struktur, sehingga penting untuk memonitor perubahan suhu dan tegangan secara teliti untuk memastikan integritas struktural beton massa yang digunakan dalam konstruksi besar seperti dinding beton bertulang.

Beton massa yang mengandung semen tipe I dengan volume tinggi memerlukan pendekatan khusus karena suhu yang dihasilkan dapat melebihi ambang batas yang diizinkan, seperti yang teramati dalam penelitian ini, dengan suhu maksimum yang tercatat di lapisan tengah mencapai $106,5^{\circ}\text{C}$. Selain itu, penting untuk mengukur tegangan pengembangan termal dan penyusutan termal yang terjadi akibat perbedaan suhu antar lapisan beton. Tegangan termal yang dihasilkan dalam penelitian ini sebesar 0,83 MPa untuk tegangan pengembangan termal dan 0,55 MPa untuk tegangan penyusutan termal, di bawah tegangan tarik elastis yang diharapkan, menunjukkan bahwa tidak terjadi kerusakan signifikan seperti retak pada permukaan beton.

Faktor-faktor ini sangat penting dalam desain dan implementasi beton massa untuk menghindari keretakan dan kerusakan struktur. Pengawasan suhu dan tegangan selama proses hidrasi dapat membantu memastikan bahwa struktur beton dapat bertahan dalam jangka panjang tanpa kehilangan integritas dan juga fungsi.



Gambar 1 Desain konseptual

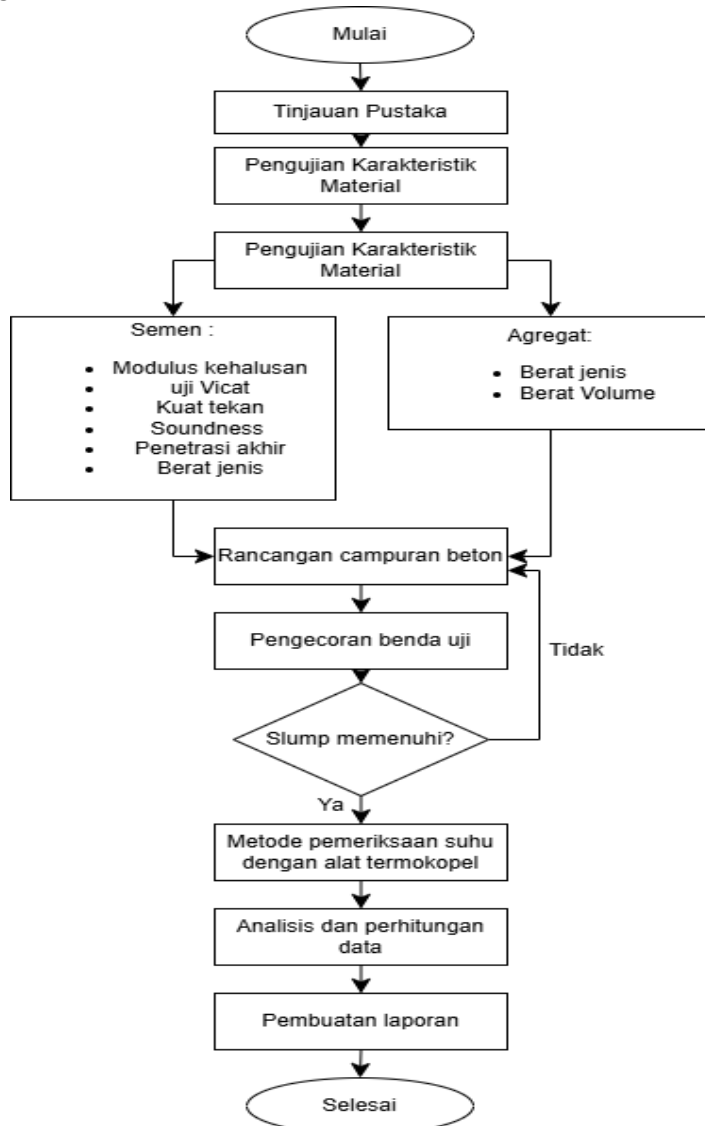
BAB II METODE

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Lokasi Proyek Pembangunan Rumah Sakit Vertikal. Material beton disediakan oleh PT. Bumi Sarana Beton. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Februari 2024 – Maret 2024.

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1 Bagan Alir Penelitian



Gambar 2 Bagan Alir Penelitian

2.3. Bahan dan Metode

2.3.1. Komposisi Bahan dan Campuran

Komposisi campuran massa beton yang digunakan dijelaskan pada Tabel 15.

Tabel 15 Komposisi campuran beton massa 1 m³

W/C	Slump (cm)	Berat (kg)						
		Air	OPC	SF	FA	CA 1-2	CA 2-3	SP*
0,287	8 ± 2	190	560	29	665	551	465	1,78

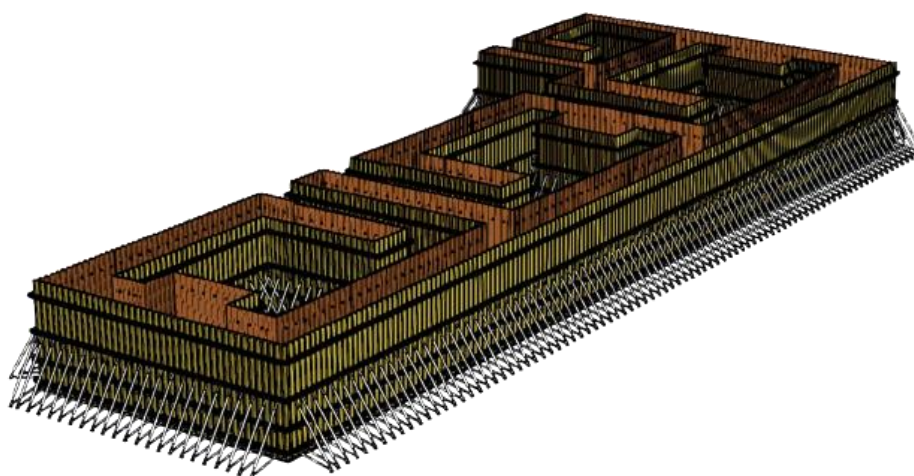
*Superplasticizer: Retarder Nexco-S

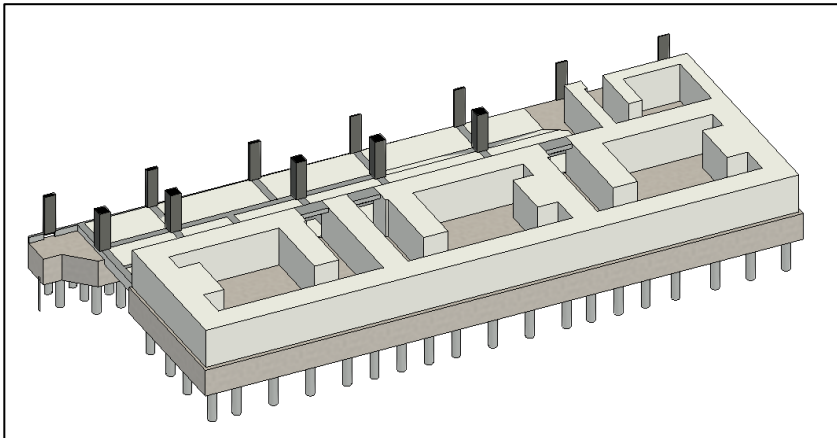
2.4. Prosedur Eksperimental

2.4.1. Metode Pengecoran

Penelitian ini menggunakan beton segar siap pakai yang disiapkan di Batching Plant dan dipindahkan ke lokasi pengecoran dengan truk pengaduk. Persyaratan yang ditentukan dalam SNI 2847:2019 (SNI-2847-2019) mengatur bahwa nilai slump nominal tidak boleh melebihi 100 mm dan kuat tekan beton minimal harus 25 MPa. Material yang digunakan terdiri dari batu pecah dengan ukuran agregat maksimal 35 mm. Terdiri dari 39,56% agregat halus dan 60,44% agregat kasar. Ketentuan ini ditentukan berdasarkan hasil rancangan komposisi campuran, sesuai dengan parameter yang ditentukan dalam SNI 2847:2019 (SNI-2847-2019).

Beton massa yang ditinjau adalah dinding dengan ketebalan dinding primer 2 m, dan dinding lainnya 1,8 m serta ketinggian bangunan bunker 6,8 m, dengan volume 1180,19 m³.

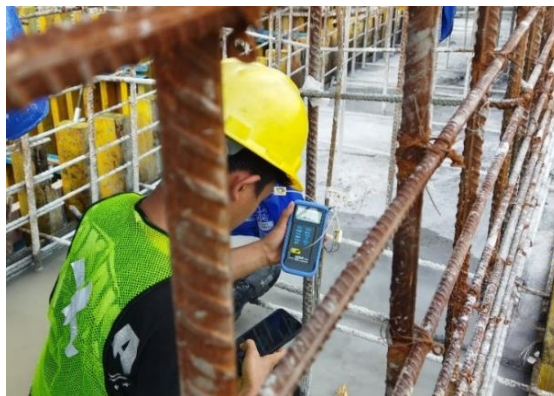




Gambar 3 Tampak dinding

2.4.2. Metode Pemeriksaan Suhu

Gambar 1 menunjukkan alat yang digunakan dalam memeriksa suhu beton massa. Alat yang digunakan sudah diakui mempunyai keandalan dalam pemeriksaan suhu yaitu termokopel. Pemeriksaan suhu beton masal dilakukan setiap 2 jam selama 24 jam pertama. Setelah 24 jam dilakukan pemeriksaan suhu setiap 3 jam sampai dengan 72 jam, dan terakhir dilakukan pemeriksaan suhu setiap 4 jam.



Gambar 4 Pemeriksaan suhu menggunakan alat termokopel

2.5. Analisis dan Perhitungan

2.5.1. Perhitungan Stres Termal

Persamaan yang digunakan untuk menganalisis modulus elastisitas pada umur dini (JSCE, 2002; Henry *et al.*, 2011), estimasi kuat tarik, tegangan termal, dan regangan akibat tegangan termal masing-masing ditunjukkan pada Persamaan 1, 2, 3, dan 4 sebagai berikut:

1. Modulus elastisitas

$$E = 0.73 \times 4700 \sqrt{f'c} \quad (1)$$

Dimana E adalah modulus elastisitas umur awal (MPa), dan $f'c$ adalah kuat tekan umur 28 hari (MPa), dan w_c adalah berat volume beton (kg/m^3).

2. Tegangan tarik

Penelitian ini menggunakan persamaan berikut yang diberikan oleh ACI 207.1R-016 (Tatro, 2006) untuk memperkirakan tegangan tarik yang terjadi pada massa beton.

$$f_t = 0.6 \sqrt{f'c} \quad (3)$$

Dimana f_t adalah nilai taksiran tegangan tarik (MPa), dan $f'c$ adalah kuat tekan pada umur 28 hari (MPa)

3. Tegangan termal

Penelitian ini menggunakan persamaan berikut yang diberikan oleh Bofang (2014) (Bofang, 2014) untuk menghitung tegangan termal yang terjadi pada massa beton.

$$\sigma = RK_p E \alpha \Delta T \quad (4)$$

Dimana σ adalah tegangan termal (MPa), R adalah koefisien pengekanan = 1,0, K_p adalah koefisien relaksasi tegangan = 1,0, E adalah modulus elastisitas beton yang dihitung pada Persamaan 1, α adalah koefisien ekspansi beton ($10^{-6}/^\circ\text{C}$), dan ΔT adalah perbedaan suhu beton ($^\circ\text{C}$).

Nilai koefisien muai panas beton diperoleh dari ACI 207.2R-7 (Tatro, 2007) yang berkisar antara $7,4 - 13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ untuk beton. Nilai koefisien muai panas beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

4. Regangan termal

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

Dimana ε adalah regangan termal, σ adalah tegangan termal yang dihitung pada Persamaan 3, dan E adalah elastisitas beton yang dihitung pada Persamaan 1.