

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1. Material Penyusun Beton

2.1.1. Agregat

a. Klasifikasi Agregat

Agregat dapat secara luas diklasifikasikan sebagai alami atau buatan, baik berkenaan dengan sumber dan metode produksi. Pasir dan kerikil alami adalah produk dari pelapukan dan aksi angin atau air, sementara produksi pemecahan agregat halus dan kasar batu pecah diproduksi dengan pemecahan batu alam. Menghancurkan, menyaring, dan pencucian dapat digunakan untuk memproses endapan kedua agregat pasir dan kerikil atau tambang batu. Agregat dapat diproduksi dari batuan beku, sedimen, atau batu metamorf, tetapi tipe geologis tidak dengan sendirinya membuat agregat sesuai atau tidak sesuai digunakan dalam beton. Penerimaan agregat untuk digunakan dalam beton pada pekerjaan tertentu atau dalam memenuhi spesifikasi tertentu harus didasarkan pada informasi spesifik yang diperoleh dari tes yang digunakan untuk mengukur kualitas agregat, atau yang lebih penting, catatan layanannya, atau keduanya. Metode tes kinerja digunakan untuk menguji agregat untuk beton. Serta spesifikasi konsensus tipikal untuk agregat halus dan kasar untuk beton adalah ASTM C 33 (ACI Committee E-701, 2007).

Klasifikasi agregat juga didasarkan pada besaran kepadatan, sebelumnya disebut satuan berat (ASTM C 33, C 330, dan C 637), komposisi mineralogi (ASTM C 294), dan bentuk partikel. Klasifikasi tersebut lebih kepada fungsi terutama sebagai alat bantu dalam menggambarkan agregat. Untuk memahami pengaruh agregat dalam kinerja beton, perlu untuk menentukan sifat agregat tertentu dan menunjukkan efeknya pada sifat beton (ACI Committee E-701, 2007).

b. Propertis Agregat

1). Gradasi Agregat

Gradasi agregat mengacu pada distribusi ukuran partikel dalam agregat. Gradasi agregat ditentukan sesuai dengan ASTM C 136, yakni analisa saringan dari agregat halus dan kasar. Propertis fisika dari agregat normal, dengan nilai rentang tipikal, ditunjukkan pada Tabel 2.1.

ASTM C 33 (spesifikasi standar untuk agregat beton) merupakan daftar beberapa kelompok ukuran agregat yang direkomendasikan secara praktis dan sederhana. Nomor dan ukuran ayakan yang dipilih untuk analisis ayakan tergantung pada ukuran partikel dalam sampel dan persyaratan gradasi yang ditentukan.

Tabel 2.1. Sifat - sifat fisika dari agregat normal yang digunakan sebagai agregat beton (ASTM C 33 - ACI Committee E-701, 2007)

No	Sifat fisika	Nilai rentang tipikal
1	Modulus kehalusan butir agregat halus	2,0 – 3,3
2	Ukuran maksimum nominal agregat kasar	9,5 – 37,5 mm
3	Serapan air	0.5 - 4%
4	Berat jenis	2,30 - 2,90
5	Berat isi agregat kasar	1280 - 1920 kg/m ³
6	Kadar air permukaan agregat kasar	0 - 2%
7	Kadar air permukaan agregat halus	0 - 10%

2). Zat Berbahaya (*Harmful*) dalam Agregat

Jenis zat berbahaya yang mungkin ada dalam agregat antara lain organik, lumpur dan partikel ringan dan lunak tertentu. Kandungan ini mungkin terjadi secara alami dalam agregat, atau mungkin tercemar ketika agregat diangkut dalam mobil, tongkang, atau truk yang sebelumnya digunakan untuk mengangkut zat yang mencemari tersebut. Agregat dapat terkontaminasi oleh minyak selama penanganan. Efek zat berbahaya berupa organik seperti gambut, humus, lempung organik terkadang menyebabkan kerusakan.

Lumpur, tanah liat, atau bahan lain yang melewati saringan 75 μm (No. 200) dapat berupa partikel atau debu membentuk lapisan pada permukaan agregat, Jumlah berlebihan dari bahan ini mungkin dapat meningkatkan air yang dibutuhkan yang berpengaruh pada besarnya penurunan (*slump*) yang diberikan untuk beton, atau jika jumlah material halus bervariasi dari pencampuran, dapat menyebabkan fluktuasi yang tidak diinginkan pada penurunan, kandungan udara, dan kekuatan. Lapisan tipis debu pada bagian partikel kasar dapat melemahkan ikatan antara pasta semen dan agregat kasar.

Metode pengujian kandungan organik dalam pasir untuk beton (ASTM C 40) adalah untuk mendeteksi keberadaan beberapa organik berbahaya. Larutan natrium hidroksida dituangkan di atas sampel pasir dalam botol kemudian disegel selanjutnya diguncang agar supaya larutan dapat mencuci pasir, selanjutnya proses pengendapan selama 24 jam. Warna cairan di atas sampel kemudian dibandingkan dengan warna standar. Jika warna cairannya adalah lebih gelap dari standar, pasir dianggap mengandung senyawa organik yang mungkin berbahaya dan harus diuji lebih lanjut sebelum disetujui untuk digunakan dalam beton. Bahan organik yang menghasilkan reaksi positif (warna gelap) belum tentu berbahaya. Tes ASTM C 87 biasanya dilakukan untuk mengetahui pengaruh organik pada kekuatan. Kubus mortar dibuat menggunakan pasir yang mengandung organik dari pasir yang sama yang sebelumnya dicuci dengan natrium hidroksida untuk menghilangkan bahan organik. Setelah 7 hari perawatan, kubus diuji dengan uji tekan. Kekuatan kubus dari pasir yang mengandung organik kemudian dibagi dengan kekuatan kubus dari pasir yang dicuci, jika rasio kekuatan setidaknya 0,95 dari pasir yang diperhitungkan dapat dipertimbangkan untuk bisa diterima (ACI Committee E-701, 2007).

ASTM C 33 tentang agregat beton membatasi persentase material yang lebih halus dari 75 μm (saringan No. 200) sebesar 3% untuk agregat halus yang digunakan pada beton yang mengalami abrasi, dan hingga 5% untuk agregat halus yang digunakan pada semua beton lainnya. Untuk produksi agregat halus di mana butiran lolos saringan No. 200 dapat terbukti bebas dari tanah liat atau lumpur, batasnya masing-masing ditingkatkan hingga 5% dan 7%. Demikian pula, untuk agregat kasar, bahan yang melewati saringan 75 μm (No. 200) yang terkandung pada agregat kasar dibatasi pada 1%, atau 1,5% untuk agregat pecah jika debu yang ada pada agregat kasar pada dasarnya bebas dari tanah liat dan lumpur (ACI Committee E-701, 2007).

Persentase partikel ringan dapat ditentukan oleh tes untuk partikel ringan dalam agregat (ASTM C 123). Sampel agregat yang akan diuji ditempatkan pada *heavy liquid* dan mengambang atau mengapung selanjutnya ditimbang. Persentase bagian ringan kemudian dihitung. Tekstur permukaan beton penting, jumlah batubara atau *lignite* dibatasi hingga 0,5% untuk agregat halus dan agregat kasar oleh ASTM C 33, sedangkan untuk semua beton lainnya, maksimal 1%.

c. Karakteristik Agregat dan Stabilitas Dimensi Beton

Phase agregat berhubungan dengan berat satuan, stabilitas dimensi dan modulus elastis dari beton. Sifat beton bergantung sebagian besar pada *bulk density* dan kekuatan agregat yang ditentukan oleh karakteristik fisika dan kimia agregat. Karakteristik kimia berhubungan dengan komposisi kimia atau mineralogi dari phase padat agregat. Karakteristik fisika berhubungan dengan volume, ukuran dan distribusi pori. Selain porositas, bentuk dan tekstur dari agregat kasar dapat mempengaruhi sifat beton (Mehta dan Monteiro, 2006).

Karakteristik tertentu dari agregat antara lain densitas, gradasi dan juga kelembaban (*moistures states*) diperlukan untuk proporsi campuran beton. Porositas atau densitas, gradasi, bentuk, tekstur permukaan menentukan sifat-sifat dari campuran beton plastis. Selain porositas komposisi mineralogi agregat mempengaruhi kekuatan hancur, kekerasan, modulus elastisitas dan *soundness* yang selanjutnya dapat mempengaruhi berbagai sifat beton mengeras dari agregat tersebut.

Secara umum sifat agregat tidak hanya mempengaruhi proporsi campuran beton, tetapi juga perilaku beton segar dan beton mengeras. Untuk lebih spesifik pada kedua sifat tersebut maka lebih tepat untuk mengklasifikasikan agregat dan sifatnya menjadi tiga kategori yang didasarkan pada mikrostruktur dan faktor pemrosesan yakni karakteristik tergantung pada porositas berhubungan dengan densitas, *moisture absorption*, kekuatan, kekerasan, modulus elastisitas dan *soundness*. Karakteristik tergantung pada *prior exposure* dan faktor pemrosesan berhubungan dengan ukuran partikel, bentuk dan tekstur. Karakteristik tergantung pada komposisi kimia dan mineralogi berhubungan dengan kekuatan, kekerasan, modulus elastisitas dan zat yang merusak (*deleterious substances present*)

Beton menunjukkan regangan elastis dan inelastis pada pembebanan dan regangan susut pada pengeringan atau pendinginan. Ketika tertahan (*restrained*) regangan susut menghasilkan pola tegangan kompleks yang sering menyebabkan keretakan. Efek tegangan yang dihasilkan dari regangan susut pengeringan dan viskoelastik tidak sama dalam beton, namun keduanya dengan fenomena penyebab yang mendasarinya dan faktor yang berpengaruh memiliki banyak kesamaan. Penting parameter pengaruh pada susut pengeringan dan rangkai antara lain gradasi agregat,

kekakuan, ukuran maksimum, bentuk, kandungan air, kandungan semen, waktu keterpaparan dan kelembaban relatif.

Agregat yang digunakan untuk membuat beton sifat-sifat fisiknya berkontribusi terhadap propertis beton dari material tersebut. Faktor-faktor yang mempengaruhi susut dan rangkai beton selain kandungan air dalam beton (faktor air semen) adalah agregat. Agregat bertindak untuk menahan penyusutan pasta semen, karenanya beton dengan konten agregat yang lebih tinggi menunjukkan penyusutan yang lebih kecil. Beton dengan modulus elastisitas agregat yang lebih tinggi atau permukaan yang lebih kasar terhadap proses penyusutan dan rangkai kecil, serta agregat beraksi menahan susut pasta semen. Serapan air agregat memiliki hubungan dengan kelembaban lingkungan dimana beton tersebut ditempatkan. Secara umum tingkat absorpsi pada agregat mempengaruhi kelembaban dalam beton, dan dapat berpengaruh pada susut dan rangkai.

2.1.2. Semen

Semen yang tidak hanya mengeras dengan bereaksi dengan air, tetapi juga membentuk produk tahan air (*water resistant*) dikenal sebagai semen hidrolik. ASTM C 150 mendefinisikan semen Portland sebagai semen hidrolik yang pada dasarnya terdiri dari silika kalsium hidrolik dan sebagai tambahan *interground* berupa sulfat kalsium. Komposisi kimia dan analisis oksida semen Portland seperti pada Tabel 2.2

Tabel 2.2. Analisis oksida semen Portland (Mehta dan Monteiro, 2006)

Oksida	Abbreviation	Semen No.1 (%)	Compound	Abbreviation
CaO	C	65.0	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	21.1	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	6.2	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	2.9	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M		4CaO.3Al ₂ O ₃ .SO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₃	S	2.0	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H		CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH ₂
	Rest	2.8		

Komposisi kimia dari senyawa yang ada di industri Portland semen tidak persis seperti yang diungkapkan oleh rumus yang umum digunakan C_3S , C_2S , C_3A , dan C_4AF . Hal ini karena pada suhu tinggi umum selama pembentukan unsur-unsur yang ada dalam sistem klinker, termasuk bahan lain seperti magnesium, natrium, kalium, dan belerang, dapat masuk ke dalam larutan zat padat dengan masing-masing senyawa utama semen dalam klinker. Sangat kecil jumlah bahan lain dalam larutan padat mungkin tidak secara signifikan mengubah struktur kristal dan reaktivitas suatu senyawa, tetapi dapat dilakukan dengan jumlah yang lebih besar.

Selain ukuran partikel dan suhu hidrasi, reaktivitas senyawa semen portland dengan air dipengaruhi oleh struktur kristalnya. Di bawah kondisi semen yang bersuhu tinggi dan tidak seimbang tempat pembakaran, struktur kristal yang terbentuk jauh dari sempurna. Ketidakteraturan struktural yang dihasilkan menjelaskan mengapa senyawa semen tidak stabil dalam lingkungan berair. Sebenarnya perbedaan antara reaktivitas dua senyawa yang memiliki komposisi kimia yang sama hanya dapat dijelaskan dari tingkat ketidakstabilan strukturalnya.

Kalsium silikat merupakan trikalsium silikat (C_3S) dan beta-dikalsium silikat (βC_2S) adalah dua silikat hidrolik yang biasa ditemukan di klinker industri semen Portland. Keduanya selalu mengandung sejumlah kecil magnesium, aluminium, besi, kalium, natrium, dan ion belerang. Bentuk-bentuk tidak murni dari C_3S dan βC_2S adalah dikenal sebagai alite dan belite. Meskipun tiga bentuk kristal utama alite triklinik, monoklinik, dan trigonal telah terdeteksi dalam industri semen, bentuk-bentuk ini sedikit berbeda dari C_3S yang struktur ideal dibangun dari SiO tetrahedra, ion kalsium, dan ion oksigen. Demikian pula, struktur belite pada industri semen tidak teratur, tetapi *holes interstisial* yang terbentuk jauh lebih kecil, dan ini membuat belite jauh lebih sedikit reaktif daripada alite. Sebaliknya, bentuk kristalografi lain dari dikalsium silikat, yaitu γC_2S , memiliki struktur yang teratur sehingga membuat senyawa ini tidak reaktif (Mehta dan Monteiro, 2006).

Kalsium aluminat dan ferroaluminat terdiri dari beberapa aluminat kalsium hidrolik dapat terjadi pada sistem $CaO-Al_2O_3$. Namun, trikalsium aluminat (C_3A) adalah senyawa aluminat utama dalam klinker semen portland. Kalsium ferrite tidak ditemukan dalam klinker semen portland normal, sebagai gantinya kalsium ferroaluminates C_2A-C_2F larutan padat ferrite (F_{ss}) terbentuk, dan senyawa yang paling

umum kira-kira sesuai dengan komposisi ekuimolekuler C_4AF . Sebanding dengan kalsium silikat, dalam industri klinker baik C_4AF mengandung sejumlah besar magnesium, natrium, kalium, dan silika dalam struktur kristal. Struktur kristal C_3A murni dalam kubik. Namun, keduanya C_4AF dan C_3A mengandung sejumlah besar alkali. Struktur kristal sangat kompleks tetapi dicirikan oleh *holes* struktur besar yang menyebabkan reaktivitas tinggi.

Magnesium oksida dan kalsium oksida bagian dari total magnesium oksida dalam klinker semen Portland dapat masuk ke dalam larutan padat dengan berbagai senyawa seperti di atas, namun sisanya terjadi sebagai kristal MgO juga disebut periclase. Hidrasi dari periclase menjadi magnesium hidroksida adalah reaksi yang lambat dan ekspansif yang di bawah kondisi tertentu dapat menyebabkan *unsoundness*. Kalsium oksida yang tidak terikat atau bebas jarang ada dalam jumlah yang signifikan dalam semen portland moderen. Proporsi bahan baku yang tidak tepat, penggilingan dan homogenisasi campuran mentah yang tidak memadai, dan suhu yang tidak memadai waktu di zona pembakaran adalah salah satu faktor utama yang diperhitungkan untuk keberadaan kalsium oksida bebas atau kristal dalam klinker semen portland. Seperti MgO, kristal CaO yang telah terkena suhu tinggi di klinker semen terhidrasi perlahan dan reaksi hidrasi mampu menyebabkan *unsoundness* dalam produk berbasis semen.

Tabel 2.3 Perkiraan kekuatan tekan (MPa) beton dengan faktor air-semen, dan agregat kasar yang biasa dipakai di Indonesia (SNI 03-2834-2002)

Jenis Semen	Jenis Agregat Kasar	Kekuatan Tekan (MPa)				
		Pada Umur (hari)				Bentuk Benda Uji
		3	7	28	29	
Semen Portland Tipe I	Batu tak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen tahan sulfat Tipe II, V	Batu tak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	25	32	45	54	
Semen Portland Tipe III	Batu tak dipecahkan	21	28	38	44	Silinder
	Batu pecah	25	33	44	48	
	Batu tak dipecahkan	25	33	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

Mengacu pada SNI 03-2834-2002 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal, dalam melakukan pemilihan faktor air-semen yang diperlukan untuk mencapai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan didasarkan pada dua hal yaitu dalam keadaan lingkungan normal dan khusus. Berhubungan dengan lingkungan normal hubungan kuat tekan dan faktor air-semen yang diperoleh dari penelitian lapangan sesuai dengan bahan dan kondisi pekerjaan yang diusulkan. Bila tidak tersedia data hasil penelitian sebagai pedoman dapat dipergunakan Tabel 2.3 (SNI 03-2834-2002). Berhubungan dengan lingkungan khusus, faktor air-semen maksimum harus memenuhi SNI 03-1915-1992 tentang spesifikasi beton tahan sulfat dan SNI 03-2914-1994 tentang spesifikasi beton bertulang kedap air, seperti pada Tabel 2.4 (SNI 03-2834-2002)

Tabel 2.4 Persyaratan jumlah semen minimum dan faktor air-semen maksimum untuk berbagai macam pembetonan dalam lingkungan khusus (SNI 03-2834-2002)

Lokasi	Jumlah Semen Minimum per m ³ beton (kg)	Nilai Faktor Air Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan :		
a. Keadaan keliling non-korosif	275	0.60
b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0.52
Beton di luar ruangan bangunan :		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0.60
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0.60
Beton masuk ke dalam tanah		
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0.55
b. Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Tabel 2.5
Beton yang kontinu berhubungan :		
a. Air tawar		Tabel 2.5
b. Air Laut		Tabel 2.5

Mengacu pada SNI-2847-2019 tentang Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, dalam melakukan pemilihan rasio air-semen yang diperlukan untuk mencapai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan berdasarkan persyaratan keawetan beton yang mempertimbangkan faktor pengaruh lingkungan. Beton yang akan mengalami pengaruh lingkungan khusus harus memenuhi rasio air-semen dan persyaratan kuat tekan karakteristik beton seperti pada Tabel 2.5.(SNI-2847-2019)

Tabel 2.5. Persyaratan untuk pengaruh lingkungan khusus (SNI-2847-2019)

Kondisi Lingkungan	Rasio Air-Semen Maksimum	fc' Minimum (MPa)
Beton dengan permeabilitas rendah yang terkena pengaruh lingkungan air	0.50	28
Untuk perlindungan tulangan terhadap korosi pada beton yang terpengaruh lingkungan yang mengandung klorida dan garam , atau air laut	0.40	35
Faktor air-semen maksimum : dihitung terhadap berat dan berlaku untuk beton normal		
Fc' minimum (MPa) : untuk beton berat normal dan beton berat ringan		

2.1.3. Matriks Mortar

Matriks mortar merupakan campuran semen-pasir-air atau semen-tanah-air memiliki sifat komposit yakni sifat-sifat fisika dan kimia (*Physicalchemical Properties of Soil Sand - Cement*). Penggunaan sumber daya alam berupa pasir dan atau tanah sebagai bahan bangunan banyak dikaji oleh para peneliti. Penggunaan tanah untuk fungsi tertentu dicampurkan dengan bahan lainnya dalam rangka peningkatan dan pengembangan kemanfaatannya. Tanah dicampurkan dengan semen yang dikenal sebagai komposit semen-tanah dimaksudkan agar partikel-partikel semen mengisi rongga-rongga pori butiran tanah untuk meningkatkan kepadatan dan kekuatan. Konsep dasar yang dikembangkan dalam komposit semen-tanah adalah pengujian terhadap sifat-sifat fisika, kimia dan mekanik.

Material lokal di Kabupaten Merauke berupa pasir galian pada pemanfaatannya dicampur dengan semen pada komposisi tertentu dan digunakan sebagai bahan bangunan. Campuran semen pasir galian tersebut secara lokal digunakan untuk pekerjaan-pekerjaan sipil antara lain rumah sederhana, perkerasan jalan, bangunan-

bangunan air, bangunan sipil lainnya. Secara umum semen pasir galian dalam rangka peningkatan kemanfaatannya serta pemenuhan persyaratan kekuatannya cenderung penggunaan semen relatif tinggi. Bertujuan untuk peningkatan kemanfaatan juga peningkatan kekuatan penggunaan campuran semen pasir galian sebagai bahan bangunan perlu kajian-kajian pustaka pembandingan dalam rangka mendapatkan strategi pemanfaatannya.

Menurut Neville (2011) dinyatakan bahwa pencampuran tanah dengan semen akan membentuk pozolan. Sifat pozolan adalah sifat yang dimiliki bahan-bahan yang mengandung senyawa silika dan alumina. Apabila bahan- bahan ini dicampur dengan semen dan bereaksi dengan air maka akan membentuk senyawa CSH dan CAH, sehingga menjadi bahan pozolan yang mempunyai sifat seperti semen.

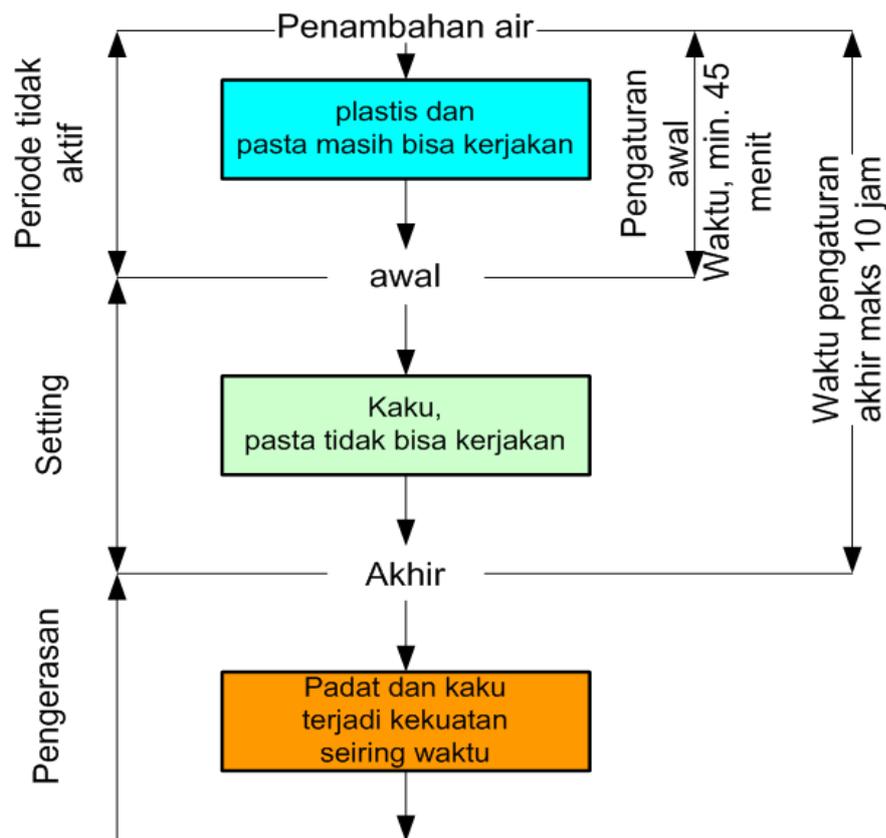
Pengaruh reaksi semen pada peningkatan kekuatan semen campur tanah (*soil cement*) diteliti oleh Suroso, et al (2016). Tujuan penelitian tersebut untuk mengetahui proses hidrasi semen pada campuran semen-tanah dan peningkatan kekuatan semen-tanah. Pengamatan dengan menggunakan difraksi sinar-X (XRD), selain itu juga diamati korelasi peningkatan kekuatannya oleh proses hidrasi semen dengan uji kuat tekan bebas. Semen yang digunakan semen tipe-I dan dicampurkan kedalam tanah dengan variasi 6% dan 10%. Uji kuat tekan bebas (UCS) digunakan spesimen berbentuk silinder pada umur 3, 7, 14, 21 dan 28 hari. Hasil uji menunjukkan bahwa kekuatan *soil cement* meningkat secara signifikan sampai umur 28 hari. Pengamatan difraksi sinar-X (XRD) dilakukan setelah pengujian kuat tekan bebas umur 28 hari. Hasilnya memperlihatkan bahwa peningkatan kekuatan disebabkan oleh hidrasi semen dalam *soil cement*, hal ini juga karena proporsi peningkatan hasil reaksi kalsium silikat hidrat (CSH).

L.S. Ho, et al (2018) melakukan analisa pengembangan kekuatan tanah dengan perbaikan semen pada kondisi perawatan yang berbeda melalui penyelidikan mikrostruktur dan kimia. Studi tersebut melakukan penyelidikan pada perkembangan kekuatan tanah yang diperbaiki dengan semen. Studi tidak hanya mempertimbangkan interaksi antara hidrasi semen dan reaksi pozolan, tetapi juga proses karbonasi. Uji dilakukan pada tiga jenis spesimen tanah yakni tipe *specifically, sand, sand-loam, sand-bentonite mixtures*. Perawatan spesimen dibawah kondisi tertutup dan pengeringan. Kekuatan tekan bebas, sifat mikrostruktur dan kimia diukur dari waktu ke waktu. Hasil

uji dibawah kondisi pengeringan, perilaku bervariasi dengan mineralogi tanah. Kekuatan tekan semua campuran meningkat secara signifikan dengan menurunnya total mikropori yang diinduksi oleh karbonasi dan efek *suction*. Namun pada campuran *sand-clay* di bawah pengeringan jangka panjang, kekuatan tekan konstan atau sedikit menurun setelah 28 hari, berkorelasi dengan peningkatan pori kapiler besar yang disebabkan oleh penyusutan *bentonite* dan karbonasi CSH. Hasil studi tersebut juga mengungkapkan bahwa karbonasi dapat memiliki dampak positif dan negatif pada pengembangan kekuatan tanah yang diperbaiki dengan semen.

2.2. Hidrasi Semen

Mencampur semen dengan air dapat menghasilkan pasta plastis yang *workable*. Berbagai tahapan pengikatan dan pengerasan semen ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Deskripsi skematik dari pengikatan dan pengerasan pasta semen (Soroka, 1979)

Untuk beberapa waktu karakteristik dari pasta hampir tetap tidak berubah, sehingga periode pada waktu tersebut dikenal sebagai periode tidak aktif (*dormant*

period). Namun pada tahap tertentu pasta mulai menjadi kaku sedemikian rupa sehingga meskipun masih lunak sudah tidak dapat dikerjakan (*unworkable*). Tahapan tersebut dikenal sebagai pengikatan awal (*initial set*) dan waktu yang dibutuhkan pasta untuk mencapai tahapan tersebut disebut sebagai waktu pengikatan awal (*initial setting time*).

Periode pengikatan selanjutnya dimana pasta berlanjut menjadi kaku sampai tercapainya suatu tahap ketika pasta dapat dianggap kaku padat (*rigid solid*). Tahapan tersebut dikenal sebagai pengikatan akhir (*final set*) dan waktu yang dibutuhkan pasta untuk mencapai tahapan tersebut disebut sebagai waktu pengikatan akhir (*final setting time*). Padatan yang dihasilkan dikenal sebagai pasta semen yang mengeras atau terkadang disebut sebagai batu semen. Seiring waktu pasta yang mengeras berlanjut mengeras sampai tercapainya kekuatan, proses tersebut dikenal sebagai proses pengerasan (*hardening*) (Soroka, 1979).

Pada proses pengikatan dan pengerasan pasta semen waktu pengikatan awal dan akhir praktis penting. Waktu pengikatan awal menentukan panjang dari waktu semen di dalam campuran (beton) tetap plastis dan bisa dikerjakan, yaitu panjang dari waktu yang bisa digunakan untuk membuat campuran. Minimum 45 menit sebagai waktu spesifik standar untuk *ordinary Portland cement* (BS 12, ASTM C150, DIN 1164). Waktu pengikatan akhir, pada panjang waktu penanganan dari memesan, pekerjaan konstruksi dan waktu setelah pengecoran. Maksimum 10 jam adalah spesifik waktu menurut BS 12, dan delapan jam menurut ASTM C150 (Soroka, 1979)

Semen mempunyai senyawa kalsium silikat dan aluminat bila bercampur dengan air akan membentuk senyawa hidrat dan menghasilkan ikatan yang keras dan kuat menyelimuti butiran pasirnya/tanahnya. Bahan dari tanah yang mengandung senyawa silika (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) setelah adanya campuran semen maka kandungan calsit (CaO) meningkat dan bahan ini merupakan bahan pengikat antar butiran tanah. Hidrasi semen pada campuran tanah dengan semen (*soil cement*) yang membentuk senyawa CSH (kalsium silikat hidrat) yaitu senyawa antara silika (SiO_2) + calcium (Ca(OH)_2) + air (H_2O) . Hasil senyawa ini yang menyebabkan pengerasan pada *soil cement* (Suroso, et al, 2016)

Sedaghat, et al (2014) melakukan pengamatan untuk mengembangkan persamaan empiris untuk memprediksi panas satu hari, tiga hari, dan tujuh hari hidrasi

semen portland pada 23 ° C dan rasio air terhadap semen 0,5. Kalorimetri konduksi isothermal diterapkan untuk mengukur panas hidrasi semen portland hingga tujuh hari. Difraksi sinar-X digunakan untuk mempelajari mineralogi dan juga untuk kuantifikasi komposisi fase semen portland. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa panas satu hari, tiga hari, dan tujuh hari panas hidrasi dari *specific portland cement ground* untuk kehalusan berbeda, berubah secara linier dengan ukuran partikel rata-rata semen. Penelitian ini menunjukkan bahwa ukuran partikel rata-rata adalah ukuran yang sesuai kehalusan semen untuk berkorelasi dengan fase utama semen portland dalam mengembangkan persamaan untuk memprediksi panas hidrasi semen pada satu, tiga, dan tujuh hari

Ingles dan Metcalf (1972) menyatakan bahwa terdapat dua proses reaksi kimia semen dalam menaikkan kekuatan yaitu proses primer dan sekunder. Proses primer reaksi yaitu terjadinya hidrolisa dan hidrasi semen dimana partikel semen membentuk ikatan butiran mineral tanah pada sekeliling butiran. Proses sekunder reaksi adalah proses yang dapat dipengaruhi oleh tingkat kenaikan kekuatan komposit campuran tanah semen dan juga mereduksi plastisitas dan sifat-sifat pengembangannya.

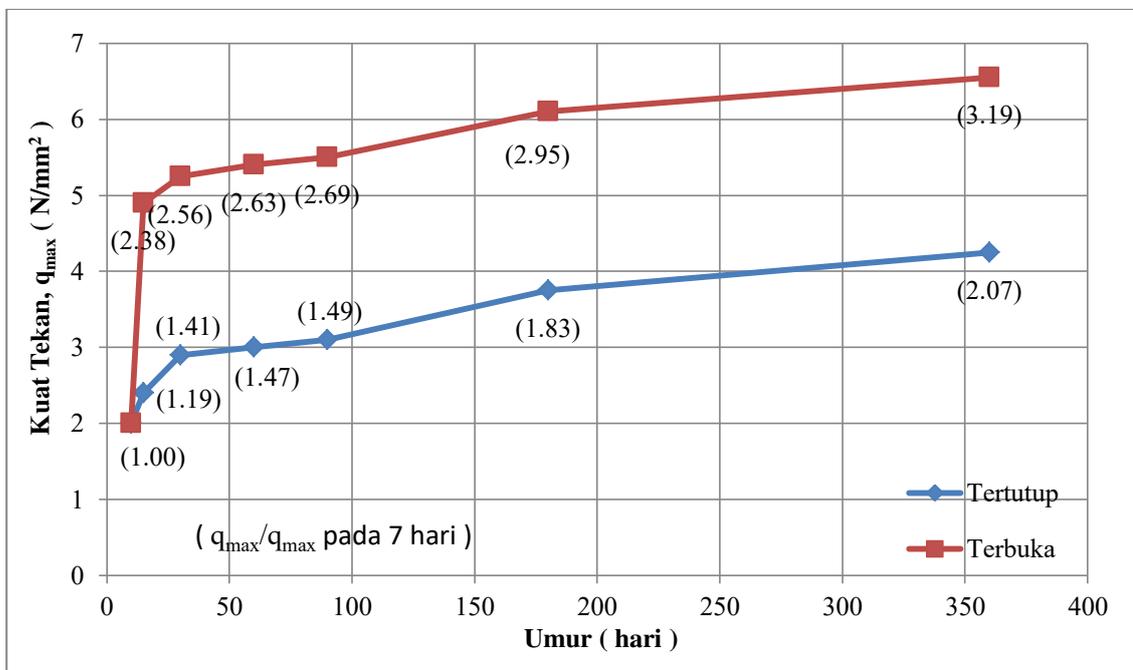
Lambe (1962) menyatakan bahwa terdapat pengaruh dengan adanya reaksi kimia, yakni ketika terjadi hidrasi semen maka tanah menjadi lebih stabil. Dinyatakan juga bahwa semen ditambah oksida lain yang bereaksi dengan silika dalam tanah, maka akan mengikat partikel secara bersama-sama, reaksi tersebut dikenal sebagai pozolan.

Semen cenderung mempunyai sifat adhesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen – fragmen mineral menjadi suatu ikatan massa yang padat (Wang dan Salmon, 1985), dan juga menurut Wahyudi dan Rahim (1999) semen merupakan bahan hidrolis yang dapat bereaksi secara kimiawi dengan air, sehingga membentuk material yang bersifat seperti batu yang padat.

2.3. Sifat-Sifat Fisika dan Kimia Matriks Mortar

Secara umum bahan penyusun matriks mortar terdiri dari pasta semen dan agregat. Penggunaan sumber daya alam berupa pasir dan atau tanah sebagai agregat untuk mortar banyak dikaji oleh para peneliti. Penggunaan tanah untuk fungsi tertentu dicampurkan dengan bahan semen dalam rangka bertujuan untuk peningkatan dan pengembangan kemanfaatannya. Tanah dicampurkan dengan semen yang dikenal

sebagai komposit semen tanah pada proses hidrasi semen dimungkinkan adanya relasi antara komposisi kimia semen dengan komposisi kimia agregat. Sifat fisika agregat juga memiliki relasi dengan sifat mekanis mortar. Konsep dasar yang dikembangkan dalam komposit semen tanah adalah peningkatan sifat mekanisnya, dalam hal ini relasinya dengan sifat kimia dan fisika agregat penyusunnya. Material lokal di Kabupaten Merauke Papua berupa pasir galian dalam penggunaannya ditambahkan semen yang dikenal sebagai mortar. Dalam rangka untuk peningkatan kemanfaatan dan kekuatan penggunaan campuran semen pasir galian tersebut sebagai bahan bangunan perlu kajian-kajian pustaka pembandingan dalam rangka melihat seberapa jauh relasi sifat fisika dan kimia agregat dengan sifat mekanis mortar.

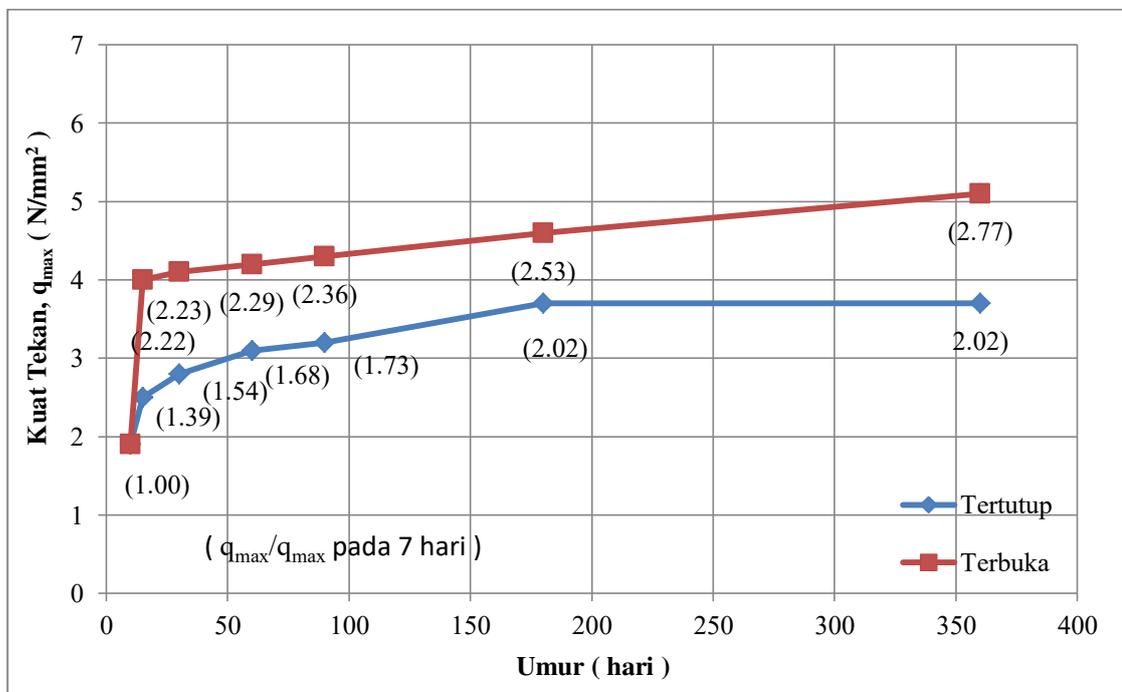


Gambar 2.2.a. Peningkatan kekuatan dari campuran pasir, nilai dalam tanda kurung mengacu pada rasio kekuatan tekan setelah x hari terhadap nilai kuat tekan pada 7 hari (L.S. Ho, et al, 2018).

Analisa tentang pengembangan kekuatan tanah dengan perbaikan semen pada kondisi perawatan yang berbeda yakni kondisi tertutup (*sealed*) dan pengeringan atau terbuka (*drying*) melalui penyelidikan mikrostruktur dan kimia dilakukan oleh L.S. Ho, et al (2018). Observasi dilakukan pada beberapa komposisi campuran untuk spesimen uji yakni campuran pasir (*sand*), campuran pasir lempung (*sand loam*) dan campuran pasir tanah liat (*sand clay*). Hasil observasi tersebut memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme pengembangan kekuatan jangka pendek dan panjang pada

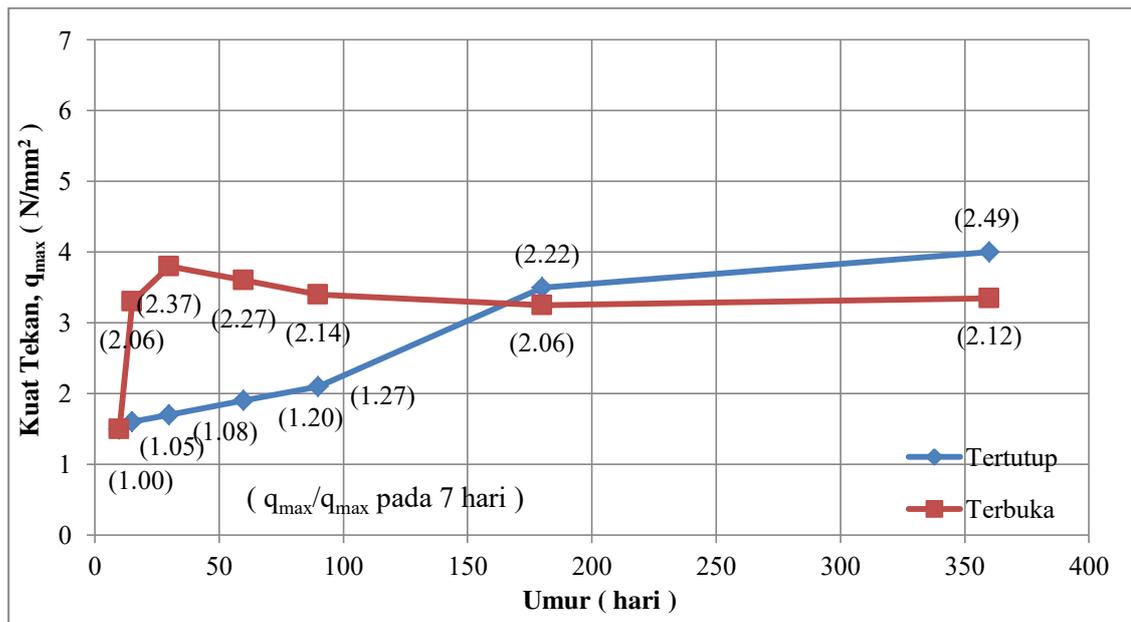
tanah yang diperbaiki dengan semen yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti hidrasi semen, karbonasi, reaksi pozolan, dan *suction* selama pengeringan. Hasil observasi juga untuk memahami daya tahan jangka panjang dari tanah bercampur semen. Dalam rangka mencapai pemahaman umum tentang interaksi antara reaksi pozolan, hidrasi semen dan karbonasi pada semua tanah yang ditemukan di lapangan, perlu untuk memperpanjang waktu untuk mempelajari berbagai mineralogi tanah dengan kandungan tanah liat yang lebih tinggi, berbagai jenis semen dan berbagai kandungan semen (L.S. Ho, et al, 2018)

Hasil observasi pada komposisi campuran semen pasir (*sand mixture*) pada kondisi tertutup dan pengeringan seperti pada Gambar 2.2.a, campuran pasir lempung seperti pada Gambar 2.2.b dan campuran pasir tanah liat seperti pada Gambar 2.2.c. Hasil uji pada kondisi tertutup menunjukkan bahwa kekuatan tekan semua campuran terus meningkat secara bertahap karena hidrasi semen dan reaksi pozolan. Pengembangan kekuatan terlihat pada perubahan porositas yakni menunjukkan peningkatan pori gel dan penurunan pori kapiler, dengan total porositas dari 0,006 μm sampai 10 μm tetap konstan, dan penurunan kandungan portlandit yang disebabkan oleh reaksi pozolan (L.S. Ho, et al, 2018)



Gambar 2.2.b. Peningkatan kekuatan dari campuran pasir lempung, nilai dalam tanda kurung mengacu pada rasio kekuatan tekan setelah x hari terhadap nilai kuat tekan pada 7 hari (L.S. Ho, et al, 2018).

Hasil uji pada kondisi pengeringan menunjukkan bahwa mineralogi dalam campuran memiliki dampak pada pengembangan kekuatan. Peningkatan kekuatan awal meningkat cepat pada semua campuran, kekuatan sedikit meningkat untuk campuran pasir dan pasir-lempung, tetapi sedikit menurun untuk campuran pasir-tanah liat pada hari selanjutnya. Peningkatan cepat jangka pendek terlihat pada efek *suction* dan karbonasi di bawah kondisi pengeringan, sementara sedikit peningkatan jangka panjang terlihat pada *suction* dan reaksi pozolan. Karbonasi di bawah kondisi pengeringan juga terlihat pada meningkatnya penurunan berat di bawah pemanasan dan dalam jumlah kalsit. Kontribusi positif karbonasi portlandit pada awal dan dampak negatif dari karbonasi CSH pada umur selanjutnya disarankan dilakukan pengukuran perubahan porositas pada ketiga campuran. Sedikit penurunan kekuatan tekan jangka panjang dari campuran pasir-tanah liat yang mungkin disebabkan oleh penyusutan bentonite atau dampak negatif yang kuat dari karbonasi CSH (L.S. Ho, et al, 2018)



Gambar 2.2.c. Peningkatan kekuatan dari campuran pasir tanah liat, nilai dalam tanda kurung mengacu pada rasio kekuatan tekan setelah x hari terhadap nilai kuat tekan pada 7 hari (L.S. Ho, et al, 2018).

Peningkatan sifat mekanik tanah laterik *fine grained* diperbaiki dengan semen untuk penggunaan pada konstruksi jalan diteliti oleh Mengue, et al (2017). Pengamatan pada kekuatan mekanik tanah laterik yang bergradasi halus diperbaiki dengan *compound Portland cement* dengan komposisi hingga 9% berat tanah kering, spesimen dibuat dengan tiga perbedaan kadar air. Spesimen diuji dengan uji *california*

bearing ratio, unconfined compressive strength, indirect tensile strength dan *triaxial shear test*. Efek perbaikan dengan semen pada mikrostruktur tanah laterik diuji dengan *scanning electron microscopy* dan *Raman spectroscopy*. Hasil uji menunjukkan bahwa semen meningkatkan kemampuan tanah laterik terutama pada *optimum moisture content* dan *dry side of optimum*, sehingga memberikan kemungkinan menggunakan tanah laterik pada lapisan perkerasan jalan. Juga hasil uji menunjukkan bahwa tanah dengan perbaikan semen pada komposisi 6% hingga 9% memenuhi persyaratan kekuatan sehingga tanah laterik dapat digunakan sebagai *base course in rigid pavements*. Hasil *Triaxial shear test* menunjukkan bahwa pada tanah tanpa semen memiliki perilaku *ductile* dan pada tanah dengan semen memiliki perilaku *brittle*. Dampak positif dari penambahan semen pada tanah dapat menghasilkan terbentuknya *ettringite, calcite, portlandite, dan calcium silicate hydrates* yang berasal terutama dari hidrasi semen.

Fam dan Santamarina (1996) melakukan studi pada campuran *clay-cement* dengan uji mekanik dan gelombang elektromagnetik. Pengerasan semen pada spesimen campuran *cement-bentonite* dan *cement-attapulgit* yang selanjutnya diuji mekanik dan gelombang elektromagnetik. Hasil uji menunjukkan bahwa *clays* dalam campuran *soil cement* memperlambat hidrasi, permitivitas kompleks muncul sebagai indikator dari reaksi yang sedang berlangsung. Permitivitas mencerminkan perubahan dalam mobilitas air, pelepasan dan penyatuan ion dan perubahan permukaan spesifik. Tahap awal hidrasi ditandai dengan perubahan permitivitas tidak berkontribusi terhadap pembentukan kekakuan dan *cemented*. Hasil uji secara umum menunjukkan bahwa pengukuran simultan dari permitivitas dan kecepatan *shear-wave* memberikan informasi mikrolevel yang lengkap pada ketergantungan mendasar antara reaksi kimia, perubahan fisik, dan kekakuan dalam *cementitious materials*.

Efek dari perbaikan semen pada campuran *clay soil* yang terkontaminasi dengan *glycerol* diteliti oleh Estabragh, et al (2016). Studi bertujuan untuk menyelidiki perilaku dari *clay soil* yang diberi perlakuan perbaikan dan terkontaminasi. Spesimen dibuat dengan varian persentase kontaminasi 3%, 6%, dan 9% larutan *glycerol* dengan konsentrasi 40%. Perbaikan dengan semen dilakukan pada spesimen *clay soil* tanpa kontaminasi dan *clay soil* terkontaminasi dengan komposisi kandungan semen 3%, 6% dan 9%, selanjutnya dilakukan uji *atterberg limits* dan uji tekan bebas. Hasil uji menunjukkan bahwa batas-batas Atterberg berkurang dengan menambahkan gliserol

atau semen pada campuran *soil cement*. Kekuatan dan kekakuan dari tanah yang terkontaminasi berkurang dengan meningkatnya tingkat kontaminasi. Hasil perbaikan tanah menunjukkan bahwa penambahan semen untuk tanah yang terkontaminasi meningkatkan kekuatan dan jumlah peningkatan kekuatan tergantung pada persen semen, waktu perawatan dan tingkat kontaminasi. Berdasarkan analisis *scanning electron microscopy*, menunjukkan bahwa keberadaan gliserol mencegah interaksi antara tanah dan semen.

Kajian terhadap parameter fundamental dari campuran tanah-semen diteliti oleh Lorenzo dan Bergado (2004). Kajian tersebut menemukan bahwa parameter fundamental seperti *after-curing void ratio* dan *cement content* dapat merupakan karakteristik dari kekuatan dan kompresibilitas tanah-semen pada kadar air yang tinggi. Hasil uji kuat tekan bebas menunjukkan bahwa *after-curing void ratio* dengan *cement content* terbukti merupakan pengaruh dari kombinasi antara kandungan air tanah, kandungan semen dan waktu perawatan pada kekuatan dari campuran tanah-semen. Nilai dari *after-curing void ratio* merefleksikan terutama kadar air tanah dan kadar semen juga waktu perawatan.

2.4. Beton dan Matriks Mortar dari Agregat dengan Gradasi yang Berbeda

Material lokal Merauke terdiri dari beberapa jenis menurut lokasi galian sebagai sumber material. Material lokal berupa pasir galian yang diambil dari sumber berbeda memiliki sifat fisika yang berbeda. Sifat fisika agregat yakni distribusi ukuran butir memiliki relasi dengan sifat mekanis mortar maupun beton, Gradasi agregat dipengaruhi oleh persentase kandungan butiran-butiran dengan ukuran yang bervariasi. Kandungan butiran halus dalam pasir galian penting diketahui pengaruhnya baik terhadap kebutuhan air bebas dalam campuran beton segar maupun relasinya dengan sifat mekanis matriks mortar maupun beton. Pasir galian ditambahkan semen yang dikenal sebagai matriks mortar. Untuk peningkatan kemanfaatan dan kekuatan penggunaan matriks mortar dan beton dari material lokal sebagai bahan bangunan perlu kajian-kajian pustaka pembandingan dalam rangka melihat seberapa jauh relasi sifat fisika agregat dengan sifat mekanis mortar dan beton.

Pengaruh karakteristik agregat sangat halus pada perilaku beton diteliti oleh Stewart, et al (2007). Studi tersebut melakukan kajian pemanfaatan agregat sangat

halus pada beton dimana oleh ASTM C 33 membatasi jumlah agregat lebih kecil dari 75 mikron atau lolos saringan No. 200 untuk digunakan dalam beton. Studi juga dibuat untuk mengkaji ulang ASTM C 33 yakni kemungkinan adanya peningkatan persentase yang lebih tinggi dari agregat mikro, terutama agregat halus hasil pengolahan dihubungkan dengan efek positif dan efek negatif agregat mikro tersebut pada perilaku beton. Hasil uji menunjukkan bahwa agregat halus mikro dapat dimasukkan ke dalam beton pada tingkat 15% dari volume pasir tanpa berpengaruh negatif pada sifat beton ditinjau dari sifat kekuatan tekan dan lentur, dan ketahanan/keausan. Namun, penggunaan agregat halus mikro berpengaruh pada jumlah kebutuhan air.

Efek *physical filling* dari agregat halus AMF (*aggregate micro fines*) dalam beton semen diteliti oleh Wang, et al (2013). Studi bertujuan untuk menjelaskan secara kuantitatif efek *physical filling* dari agregat halus dengan mengatur jumlah air bebas dalam campuran beton segar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pengaruh pengaturan *limestone* AMF terhadap penurunan (*slump*) dan kekuatan tekan adalah sama dengan variasi pengaturan jumlah air bebas dalam campuran beton segar. Hasil juga menunjukkan bahwa *limestone* AMF mengubah *compactness* campuran beton segar dengan mengubah proporsi partikel, dan sesuai hal tersebut kinerja beton dipengaruhi. Efek *physical filling limestone* AMF memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja beton.

Evaluasi kemampuan mortar dan beton yang dibuat dari agregat halus pasir gurun diteliti oleh Zhang, et al (2006). Penelitian bertujuan untuk membuat standar spesifikasi yang bersifat umum pada pemanfaatan pasir gurun yang mempunyai butiran sangat halus. Bidang Teknik Sipil mensyaratkan uji pasir gurun sehingga bisa dimanfaatkan dalam mortar dan beton. Spesimen mortar dan beton dibuat dari pasir gurun Tenggeli dan Maowusu, pasir yang berasal dari tanah berpasir diuji untuk mengklarifikasi rekayasa karakteristik pasir tersebut. Desain campuran spesimen dilakukan berdasarkan komposisi kimia dan karakteristik fisik pasir gurun. Uji sifat mekanik mortar dan beton yang terbuat dari dua jenis pasir gurun sebagai agregat halus. Hasil uji menunjukkan bahwa pasir gurun dapat digunakan sebagai agregat halus dalam mortar dan beton untuk teknik sipil secara umum.

Penggunaan berbagai jenis agregat halus untuk pembuatan beton mutu tinggi diteliti oleh Al-Ameeri dan Al-Baghdadi (2012). Kajian terhadap pengaruh

penggunaan pasir halus sebagai pasir alam dengan menggunakan faktor air semen rendah dan volume semen dengan perhitungan tertentu. Hasil uji menunjukkan bahwa beton dengan pasir halus membutuhkan peningkatan *super plasticizer* untuk mendapatkan nilai slump yang sama dan kekuatan tekan beton lebih tinggi pada penggunaan pasir alam untuk semua umur benda uji, sedangkan modulus elastisitas beton lebih rendah pada umur 28 hari. Hasil juga menunjukkan adanya peningkatan kekuatan beton seiring dengan peningkatan lekatan yang baik dari pasta semen atau mortar dengan agregat. Pengaruh penggunaan jenis pasir batu kapur, granit dengan gradasi yang sama, dengan campuran yang mengandung 450 dan 485 kg / m³ semen dan faktor air semen rendah, menunjukkan bahwa bentuk dan tekstur agregat berpengaruh pada peningkatan kekuatan beton.

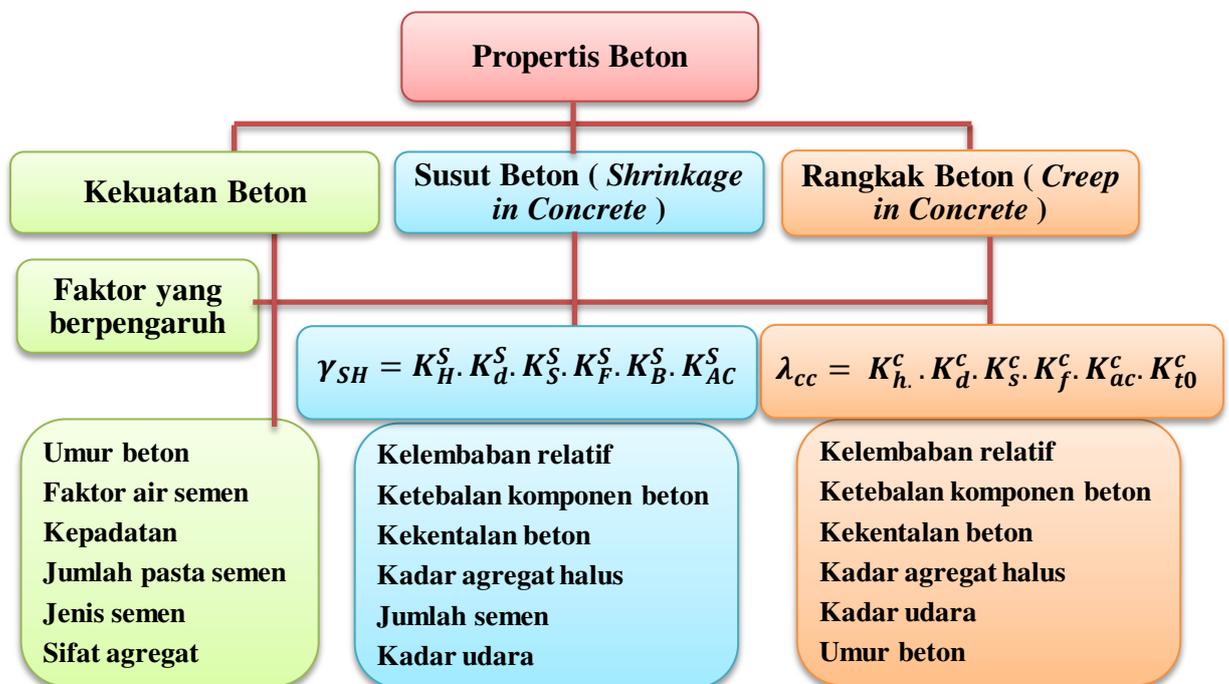
Sifat-sifat mekanik dari beton struktural yang menggunakan agregat halus yang dihasilkan oleh industri penggalian marmer diteliti oleh Silva, et al (2014). Studi bertujuan meneliti perilaku mekanik beton dari agregat halus tersebut dengan persentase penggunaan 0, 20, 50, dan 100% dari total volume agregat, juga pengukuran pada kelacakan beton segar dan kepadatan beton. Hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas dan keausan beton menunjukkan bahwa secara umum beton dari agregat halus bukan standar tersebut memiliki sifat mekanik yang lebih rendah daripada beton konvensional dari bahan standar agregat halus berupa pasir silika, basal dan granit halus. Perilaku menurunnya sifat mekanik beton tersebut lebih terlihat ketika persentase penggunaan bahan yang tidak standar cenderung lebih banyak. Namun menurunnya sifat mekanik beton tersebut masih dapat digolongkan mendekati sama dengan beton normal dan agregat halus tersebut masih dapat digunakan untuk beton struktural.

Butiran halus tanah liat (*clay-blended sludge*) sebagai bahan agregat ringan pada beton diteliti oleh Tay, et al (1991). Kajian terhadap potensi penggunaan lumpur hasil buangan pengerukan serta pengendalian lingkungan. Sampel dibuat dari lumpur yang dikeringkan dicampur dengan tanah liat sebagai agregat kasar ringan setelah proses pembakaran, dan sifat agregat serta beton yang dihasilkan diuji perilakunya. Hasil uji pada penggunaan 10% butiran halus sifat-sifat beton seperti *bulk density*, *specific gravity*, *porosity*, penyerapan air, dan kekuatan tekan, menunjukkan bahwa campuran butiran halus tanah liat dapat digunakan untuk menghasilkan agregat ringan.

2.5. Properties Beton

Beton sebagai bahan bangunan dan konstruksi merupakan salah satu bahan yang sifat-sifatnya dapat diprediksi terlebih dahulu dengan mengadakan perencanaan dan pengawasan yang teliti terhadap bahan-bahan yang dipilih sebagai penyusunnya. Perilaku beton dapat berbeda-beda berdasarkan atas sifat material penyusunnya. Perbedaan tipe semen yang digunakan dalam campuran adukan beton akan menghasilkan karakteristik atau sifat beton yang berbeda satu dengan yang lainnya. Perbedaan terhadap sifat beton tersebut juga dapat terjadi dalam penggunaan jenis agregat yang berbeda baik bersifat agregat kasar maupun agregat halus.

Propertis mekanis beton yang mengeras dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori yakni sifat jangka pendek atau sesaat (*short term or instantaneous properties*) dan sifat jangka panjang (*long term properties*). Sifat jangka pendek antara lain kekuatan tekan, tarik, geser dan kekakuan yang diukur dengan modulus elastisitas. Sifat jangka panjang dapat diklasifikasikan berdasarkan rangkakan dan susut beton (Nawy, 2009). Namun pada penelitian ini direncanakan akan diteliti propertis beton antara lain kekuatan, susut dan rangkakan seperti pada Gambar 2.3.

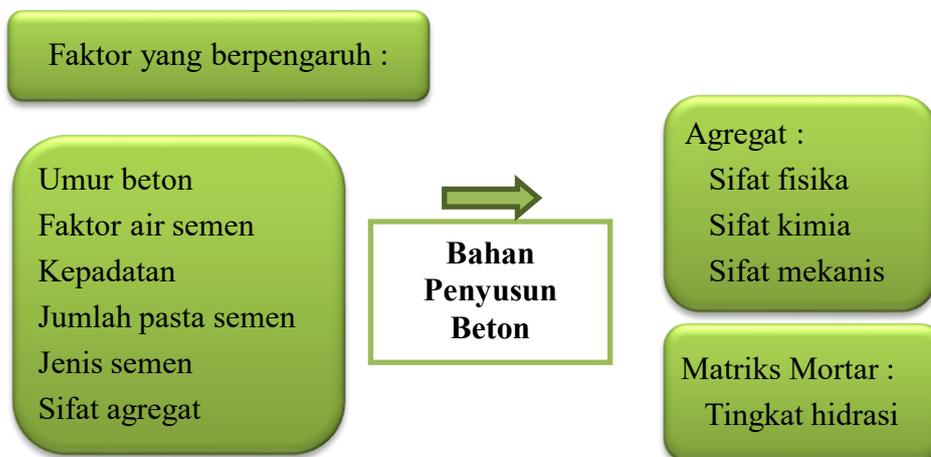


Gambar 2.3. Rencana penelitian untuk propertis beton

2.5.1. Kekuatan Beton

Kekuatan beton ditentukan terutama oleh kekuatan pasta dan kekuatannya dengan agregat. Kekuatan lekatan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang penting untuk dipertimbangkan sebelumnya. Pengaruh dari faktor tersebut pada kekuatan beton juga ditentukan oleh penggunaan agregat yang memiliki sifat yang berbeda. Lekatan antara pasta dan agregat disebabkan oleh efek mekanik dan fisik, dan dalam beberapa kasus juga reaksi kimia antara komposisi kimia agregat dan pasta. Kekuatan lekatan antara pasta dan agregat dipengaruhi oleh sifat pasta dan agregat (Soroka, 1979).

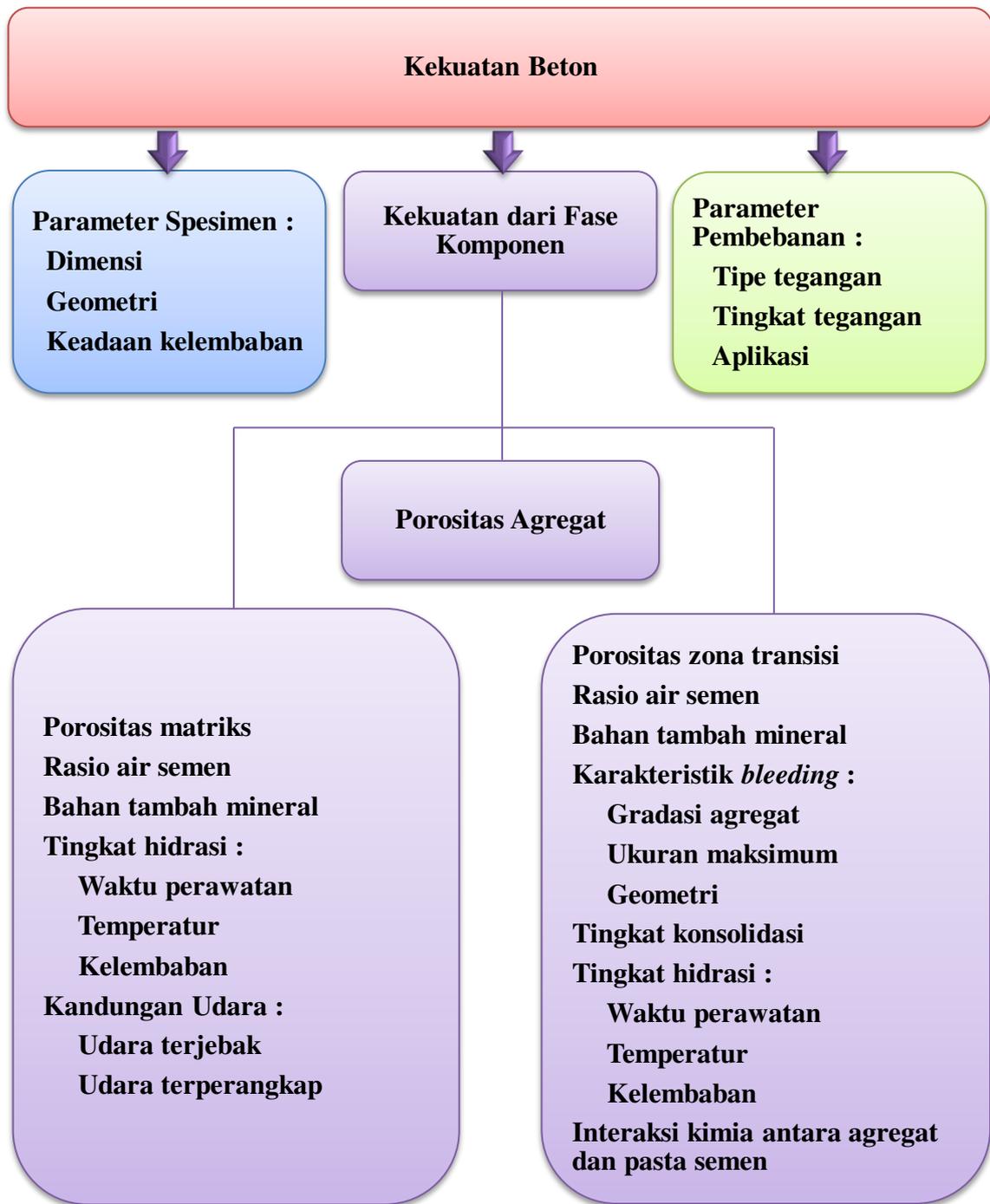
Secara umum kekuatan beton sebagai bahan komposit dipengaruhi oleh agregat, matriks beton dan daerah interfase antara agregat dan mortar. Pengaruh bahan penyusun tersebut yakni kekuatan pasta (air dan semen), daya rekat antara pasta dengan permukaan butir – butir agregat dan sifat – sifat agregat. Dari ketiga unsur tersebut biasanya secara umum diuraikan hubungan bahan penyusun terhadap kekuatan beton seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Hubungan pengaruh bahan penyusun terhadap kekuatan beton

Secara umum efek dari lekatan (*bond*) antara pasta dengan agregat terhadap kekuatan beton merupakan kontribusi dari rasio air semen, kekasaran permukaan agregat dan juga komposisi kimia. Secara spesifik efek dari sifat-sifat agregat pada kekuatan beton antara lain kekuatan, modulus elastisitas, ukuran partikel dan konsentrasi agregat (Soroka, 1979)

Respon beton terhadap tegangan yang diterapkan tidak hanya bergantung pada jenis tegangan tetapi juga tentang bagaimana kombinasi berbagai faktor mempengaruhi porositas dari komponen struktur beton yang berbeda.



Gambar 2.5. Interaksi (*interplay*) faktor - faktor yang mempengaruhi kekuatan beton (Mehta dan Monteiro, 2006)

Faktor-faktor tersebut meliputi propertis dan proporsi bahan penyusun campuran beton, tingkat kepadatan dan kondisi perawatan. Ditinjau dari kekuatan relasi rasio air semen dengan porositas adalah faktor penyebab utama, terlepas dari faktor lain hal tersebut mempengaruhi porositas matriks mortar semen dan zona transisi antarmuka antara

matriks dan agregat kasar. Meskipun sebenarnya respon beton terhadap tegangan yang diterapkan adalah hasil dari interaksi kompleks antara berbagai faktor, secara umum faktor-faktor tersebut dapat dibagi dalam tiga kategori seperti pada Gambar 2.5 yakni karakteristik dan proporsi dari material, kondisi perawatan dan juga parameter pengujian (Mehta dan Monteiro, 2006). Karakteristik dan proporsi dari material antara lain rasio air semen, masuknya udara (*air entrainment*), tipe semen, agregat, air campuran (*mixing water*) dan bahan tambah (*admixtures*). Kondisi perawatan antara lain waktu, kelembaban dan temperatur. Parameter pengujian antara lain parameter spesimen dan kondisi pembebanan,

Studi kelecakan dan kuat tekan beton sebagai fungsi penambahan *superplasticizer*, faktor air semen dan respon waktu pencampuran dilakukan oleh Umam dan Sulistyowati (2021). Komposisi campuran beton penelitian untuk 1 m³ beton terdiri dari semen 427,08 kg, pasir 648,02 kg, split 1104,49 kg dan air 200,4 kg. Studi tersebut melakukan analisa ikatan antar agregat pada beberapa spesimen beton dengan variasi komposisi campuran beton seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Proporsi campuran beton tiap variasi (Umam dan Sulistyowati, 2021)

Variasi	Volume benda uji (m ³)	Semen (Kg)	Pasir (Kg)	Split (Kg)	Air (Kg)	<i>Superplasticizer</i> (Liter)
BC0	0,113	48,09	73,479	124,865	21,012	0
BC20	0,113	48,09	73,479	124,865	16,809	0
BC30	0,113	48,09	73,479	124,865	14,708	0
LN15	0,113	48,09	73,479	124,865	18,326	0,408
LN25	0,113	48,09	73,479	124,865	16,17	0,408

Analisa ikatan antar agregat dilakukan pada spesimen umur 14 hari serta perhitungan luasan menggunakan bantuan kisi . Hasil analisa ikatan antar agregat seperti pada Tabel 2.7 menunjukkan bahwa perilaku runtuhnya beton bervariasi namun didominasi oleh lepasnya ikatan agregat antar mortar. Perilaku tersebut terjadi karena uji tekan beton dilakukan pada usia 14 hari, sehingga ikatan semen relatif belum berkembang secara sempurna dan menyebabkan ikatan mortar belum terlalu kuat. Perilaku keruntuhan lain juga terjadi karena lepasnya ikatan mortar dengan agregat dan lepasnya ikatan antar mortar. Uji tekan yang dilakukan pada spesimen juga menyebabkan pecahnya agregat

kasar penyusun beton, yaitu pada variasi BC20 dan LN 15, hal tersebut dimungkinkan karena agregat kasar yang pecah tersebut kualitas/ketahanan terhadap *impact*-nya kurang baik (Umam dan Sulistyowati, 2021)

Tabel 2.7. Persentase lepasnya ikatan antar agregat beton (Umam dan Sulistyowati, 2021)

Variasi	Kisi ukuran benda uji	Kisi lepasnya agregat kasar	Lepasnya ikatan agregat kasar dengan mortar (%)	Lepasnya ikatan antar mortar (%)
BC0	1206,5	383,0	31,74	68,26
BC20	885,5	271,0	30,60	69,40
BC30	818,0	262,0	32,03	67,97
LN15	2288,0	613,0	26,79	73,21
LN25	558,0	204,0	36,56	63,44

2.5.2. Susut pada Beton

Susut pada beton (*Shrinkage of concrete*) dapat berimplikasi pada perubahan panjang (*length change*), dan atau penurunan dimensi linier beton. Fenomena bangunan yang menunjukkan lendutan (*deflection*) berlebihan yang sudah melampaui batas kepatutan, retak dan kehilangan gaya prategang mungkin disebabkan oleh terlalu rendah dan atau terlalu tinggi efek sekunder susut dalam beton. Susut sebagian besar tergantung pada jenis semen dan bahan yang bersifat semen (*cementitious materials*) yang digunakan, sehingga pilihan bahan yang tepat adalah salah satu masalah penting dalam produksi beton. Banyak peneliti yang melakukan pengamatan dan mengerjakan masalah kompleks ini untuk menemukan campuran beton yang sesuai menggunakan bahan semen alternatif berbeda untuk mengurangi pengaruh susut dan untuk meningkatkan daya tahan dan properti beton lainnya baik pada mekanik maupun pada tingkat mikro.

Susut telah dijelaskan secara berbeda dengan berbagai metode pendekatan dalam literatur. Namun demikian, hampir umum dalam praktik konvensional untuk mengabaikan perbedaan antara *autogenous shrinkage* dan *drying shrinkage*, untuk menemukan susut total kondisi pengeringan. Biasanya, susut total hanya dianggap deformasi tegangan bebas (mis., perubahan volumetrik) dari spesimen beton yaitu jumlah regangan *autogenous* dan regangan pengeringan, hal tersebut sebagian besar datanya telah dikumpulkan dari kondisi pengeringan, dan hal yang sama juga terjadi

digunakan untuk mengembangkan model prediksi susut dan rangkai dari ACI 209.2 R-08 (ACI 2008) seperti pada Tabel 2.8.

Proses penyusutan yang terjadi pada beton didefinisikan bahwa beton bila tidak terbenam dalam air terus menerus (kondisi kelembaban 100%), akan menyebabkan beton dapat kehilangan kebasahannya (*moisture*) dan dapat berpengaruh pada berkurangnya volume beton tersebut. Besarnya penyusutan dapat bervariasi berdasarkan tingkat kelembaban (terbenam dalam air) dan juga menurut dimensi beton antara lain untuk penampang tipis yang terbuat dari agregat dengan penyusutan tinggi dan tidak dilakukan perawatan (*curing*) dengan baik. Besarnya susut dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya :

- 1) Proporsi campuran
- 2) Jenis agregat
- 3) Rasio w/c
- 4) Jenis semen
- 5) Jenis dan waktu *curing*
- 6) Ukuran dan bentuk, atau rasio volume terhadap permukaan (V/S)
- 7) Kondisi lingkungan, kelembaban rata-rata di lokasi beton

Penyusutan adalah penurunan volume beton dengan waktu. Penurunan ini disebabkan oleh perubahan kadar air beton dan perubahan kimia fisik, yang terjadi tanpa tekanan yang disebabkan oleh tindakan di luar beton antara lain tanpa pembebanan. Pembengkakan adalah peningkatan volume beton seiring waktu. Penyusutan dan pembengkakan biasanya dinyatakan sebagai regangan tak berdimensi (in / in atau mm / mm) pada kondisi kelembaban relatif dan suhu tertentu. Penyusutan terutama merupakan fungsi dari pasta, tetapi secara signifikan dipengaruhi oleh kekakuan agregat kasar. Saling ketergantungan banyak faktor menciptakan kesulitan dalam membatasi penyebab dan secara efektif memprediksi penyusutan tanpa pengujian ekstensif. Variabel utama yang mempengaruhi susut dan rangkai dirangkum dalam Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Faktor-faktor yang mempengaruhi rangkai dan susut dan variabel yang dipertimbangkan dalam metode prediksi yang direkomendasikan (ACI 209,2R-08, 2008)

		Faktor	Variabel yang dipertimbangkan	Kondisi Standar
Beton (Rangkai dan Susut)	Komposisi Beton	Kandungan Pasta Semen	Tipe Semen	Tipe I dan II
		Faktor Air Semen	Slump	2.7 in. (70 mm)
		Proporsi Campuran	Kandungan Udara	< 6 persen
		Karakteristik Agregat	Persentase Agregat Halus	50 persen
		<i>Degree of Compaction</i>	Kandungan Semen	470 to 752 lb/cu ₃ yd (279 to 446 kg/m ³)
	Perawatan Awal	Lama Perawatan Awal	Perawatan Basah	7 hari
			Perawatan Penguapan	1 – 3 hari
		Temperatur Perawatan	Perawatan Basah	73.4 ±4°F (23 ± 2°C)
			Perawatan Penguapan	<212°F (<100°C)
		Kelembaban Perawatan	Kelembaban Relatif	> 95 persen
Geometri dan Lingkungan (Rangkai dan Susut)	Lingkungan	Temperatur Beton	Temperatur Beton	73.4 ± 4°F(23 ± 2°C)
		Kandungan Air Beton	<i>Ambient Relative Humidity</i>	40%
	Ukuran Geometri dan Bentuk	Rasio Volume-Permukaan (V/S)		V/S = 1.5 in
		atau		(V/S = 38 mm)
		Ketebalan Minimum		6 in. (150 mm)
Pembebanan (Rangkai)	Riwayat Pembebanan	Umur Beton saat dibebani	Perawatan Basah	7 hari
		Aplikasi	Perawatan Penguapan	1 – 3 hari
		Durasi Periode Pembebanan	Beban Berkelanjutan	Beban Berkelanjutan
		Durasi Periode Tanpa Pembebanan		
		<i>Number of Load Cycles</i>		
	Kondisi Tegangan	Tipe Tegangan dan Penampang Distribusi	Tegangan Tekan	Tekanan Aksial
		Rasio Tegangan/Kekuatan	Rasio Tegangan/kekuatan	>0.5

Mengacu pada ACI Committee 209 (1992), besarnya regangan susut pada kondisi standar dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan berikut :

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t^\beta}{b + t^\beta} (\varepsilon_{SH})_u \quad (2.1)$$

dimana :

$(\varepsilon_{SH})_t$: Regangan susut pada t

$(\varepsilon_{SH})_u$: Regangan ultimit susut

t : Waktu (hari)

b : Kosntanta

β : Konstanta

Nilai regangan ultimit susut pada kondisi standar dapat ditentukan menurut Tabel 2.9 yang besarnya berkisar antara $(\varepsilon_{SH})_u = 415 \cdot 10^{-6}$ (mm/mm) sampai dengan $(\varepsilon_{SH})_u = 1070 \cdot 10^{-6}$ (mm/mm). Pada kondisi perawatan yang berbeda rata-rata nilai regangan ultimit susut yang direkomendasikan oleh ACI Committee 209 (1992) adalah :

Untuk perawatan yang direndam selama 7 hari :

$$(\varepsilon_{SH})_u = 800 \cdot 10^{-6} \text{ (mm/mm)}$$

Untuk perawatan yang dialiri selama 1-3 hari :

$$(\varepsilon_{SH})_u = 730 \cdot 10^{-6} \text{ (mm/mm)}$$

Pada umumnya rata-rata nilai regangan susut ultimit pada kondisi standar dari kedua kondisi perawatan beton yang direndam dan juga dialiri dapat digunakan nilai sebesar

$$(\varepsilon_{SH})_u = 780 \cdot 10^{-6} \text{ (mm/mm)}$$

Penerapan pada beton dengan berat normal, beton pasir ringan dan semua beton ringan dalam kondisi standar ACI Committee 209 (1992) merekomendasikan besarnya konstanta b dapat diambil sebesar :

Untuk perawatan yang direndam (*moist cured*) selama 7 hari, nilai konstanta $b = 35$

Untuk perawatan yang dialiri (*steam cured*) selama 1 – 3 hari, nilai konstanta $b = 55$

Dengan demikian besarnya nilai prediksi regangan susut adalah :

Untuk perawatan yang direndam (*moist cured*) selama 7 hari :

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{35 + t} (\varepsilon_{SH})_u \quad (2.2)$$

Untuk perawatan yang dialiri (*steam cured*) selama 1 – 3 hari :

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{55 + t} (\varepsilon_{SH})_u \quad (2.3)$$

Mengacu pada ACI Committee 209 (1992), besarnya regangan ultimit susut pada kondisi tidak standar, yakni mengalikan regangan ultimit susut pada kondisi standar dengan faktor koreksi (γ_{SH}) yang besarnya tergantung pada komponen struktur susut. Besarnya regangan ultimit susut pada kondisi tidak standar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$(\varepsilon_{SH})_{u,n} = 780 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma_{SH} \quad (2.4)$$

atau

$$(\varepsilon_{SH})_{u,n} = (\varepsilon_{SH})_u \cdot \gamma_{SH} \quad (2.5)$$

dan

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{35 + t} (\varepsilon_{SH})_u \cdot \gamma_{SH} \quad (2.6)$$

dan

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{55 + t} (\varepsilon_{SH})_u \cdot \gamma_{SH} \quad (2.7)$$

dimana :

$(\varepsilon_{SH})_{u,n}$: Rata-rata regangan ultimit susut pada kondisi tidak standar
(mm/mm)

γ_{SH} : Faktor koreksi dari komponen struktur susut yaitu :

$$\gamma_{SH} = K_H^S \cdot K_d^S \cdot K_S^S \cdot K_F^S \cdot K_B^S \cdot K_{AC}^S \quad (2.8)$$

dimana :

γ_{SH} : 1, untuk kondisi standar

K_H^S : Faktor kelembaban relatif

K_d^S : Faktor tebal minimum penampang

K_S^S : Faktor kekentalan beton

K_F^S : Faktor kandungan agregat halus

K_B^S : Faktor kandungan semen

K_{AC}^S : Faktor kandungan udara

Mengacu pada SNI T-12-2004 tentang Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan, Nawy (2008) dan Neville (2011), bahwa bila tidak dilakukan pengukuran atau pengujian secara khusus, nilai regangan susut rencana beton pada umur t (hari), untuk beton yang dirawat basah di lokasi pekerjaan, bisa ditentukan berdasarkan rumusan pada persamaan (2.9) di bawah ini :

$$\varepsilon_{cs,t} = \left(\frac{t}{(35 + t)} \right) \varepsilon_{cs,u} \quad (2.9)$$

dimana :

$\varepsilon_{cs,t}$: Nilai regangan susut beton pada umur t hari

$\varepsilon_{cs,u}$: Nilai susut maksimum pada beton, yang besarnya bisa diambil berdasarkan persamaan (2.10) yakni dengan mengalikan nilai rata-rata regangan susut ultimit dengan faktor koreksi dari komponen struktur susut sebagai berikut :

$$\varepsilon_{cs,u} = 780 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda_{cs} \quad (2.10)$$

Nilai λ_{cs} ditentukan oleh kondisi campuran beton dan lingkungan pekerjaan dapat dihitung berdasarkan persamaan (2.11) sebagai berikut :

$$\lambda_{cs} = K_h^s \cdot K_d^s \cdot K_s^s \cdot K_f^s \cdot K_b^s \cdot K_{ac}^s \quad (2.11)$$

dimana :

t : Umur beton yang dirawat basah di lokasi pekerjaan, terhitung sejak 7 hari setelah pengecoran (hari)

K_h^s : Faktor pengaruh kelembaban relatif udara setempat H (%)

K_d^s : Faktor pengaruh ketebalan komponen beton d (cm)

K_s^s : Faktor pengaruh konsistensi (slump) adukan beton s (cm)

K_f^s : Faktor pengaruh kadar agregat halus dalam beton F (%)

K_b^s : Faktor pengaruh jumlah semen dalam beton C (kg/m^3)

K_{ac}^s : Faktor pengaruh kadar udara dalam beton AC (%)

Untuk komponen beton yang dirawat dengan cara penguapan (*steam cured*) maka nilai regangan susut beton pada t hari $\varepsilon_{cs,t}$ dapat ditentukan berdasarkan persamaan (2.12) dibawah ini :

$$\varepsilon_{cs,t} = \left(\frac{t}{(55 + t)} \right) \varepsilon_{cs,u} \quad (2.12)$$

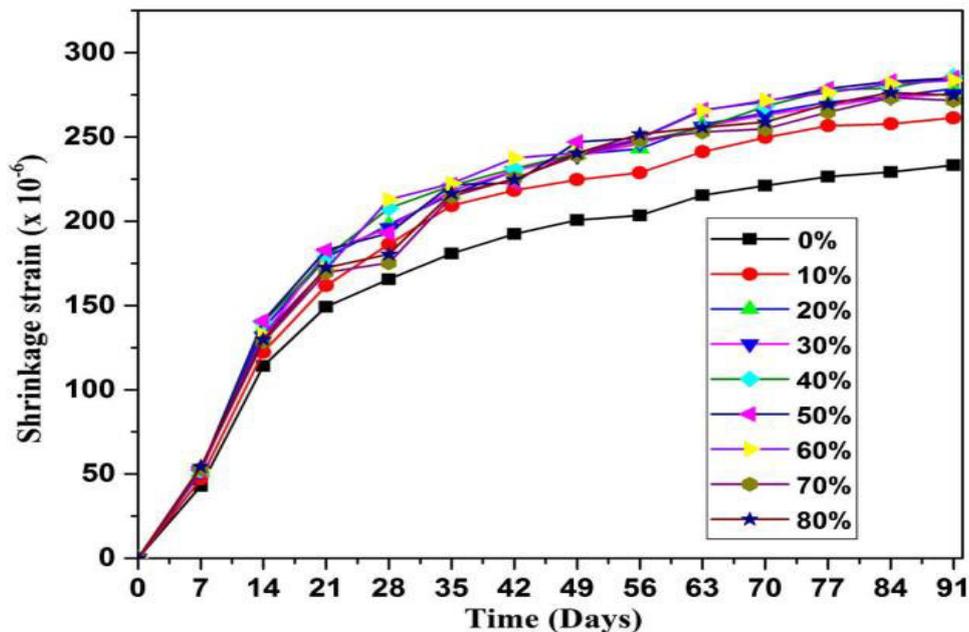
Dimana t (hari) menyatakan umur beton yang dirawat dengan cara penguapan, terhitung sejak 1 sampai 3 hari setelah pengecoran.

Mengacu pada SNI T-12-2004 bila dalam asumsi pada suatu kondisi yang standar, serta tidak dilakukan pengukuran secara khusus dimungkinkan nilai koefisien susut maksimum $\varepsilon_{cs,t}$ bisa diambil secara langsung dengan mengacu besaran nilai seperti pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9. Koefisien standar susut beton sebagai tambahan regangan jangka panjang (SNI T-12-2004)

Kekuatan Karakteristik, f'_c (MPa)	Koefisien susut maksimum, $\epsilon_{cs,t}$
20	0,000174
25	0,000170
30	0,000163
35	0,000161
40 - 60	0,000153

Gupta, et al (2017) meneliti beberapa propertis beton yang dibuat dari pemanfaatan tailing tembaga (*copper-tailing*) antara lain susut beton. Komposisi tailing tembaga dalam beton dibuat pada persentase bervariasi yakni 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80%. Pada tiap jenis variasi persentase digunakan 3 spesimen uji dari balok beton ukuran 75 mm x 75 mm x 300 mm. Perawatan pada spesimen uji adalah perawatan dengan air. Observasi berupa pengukuran penyusutan beton dilakukan setelah perawatan basa yakni pada umur spesimen 28 hari sebagai awal pengukuran.



Gambar 2.6. Susut beton tailing-tembaga (*Shrinkage of copper-tailing concrete*) (Gupta, et al, 2017)

Regangan susut pada beton merupakan efek penyusutan pada spesimen beton yang diobservasi hingga 90 hari. Spesimen uji ditempatkan pada ruangan yang terkontrol dan dipertahankan pada $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban relatif $50\pm 5\%$. Pembacaan penyusutan pertama diambil setelah 6 jam, yang dianggap sebagai penyusutan awal. Ukuran panjang dari spesimen diukur setelah pengukuran awal setiap 7 hari, hingga 3 bulan.

Hasil observasi susut seperti terlihat pada Gambar 2.6 menunjukkan bahwa nilai regangan susut pengeringan beton meningkat seiring dengan peningkatan persentase kandungan tailing tembaga. Pada 7 hari observasi, susut pada beton kontrol (persentase 0%) nilai-nilainya secara bertahap meningkat hingga 90 hari. Penyusutan masing-masing spesimen meningkat mulai pada 28 hari hingga pada 56 hari, dan sampai pada 90 hari. Spesimen beton pada persentase kandungan 40% dan 80% tailing tembaga, nilai susut meningkat masing-masing pada 7, 28, 56, dan 90 hari. Hasil observasi susut juga menunjukkan bahwa nilai regangan susut pada persentase kandungan 10% sampai 80% tailing tembaga pada beton lebih tinggi dibandingkan pada beton persentase kandungan 0% (beton kontrol). Hal ini mungkin dapat disebabkan oleh sifat material dari tailing tembaga.

Tabel 2.10. Komposisi campuran HPC (*Mix Proportions Containing Different Cementitious Materials*) (Gedam, et al, 2016) :

Komposisi Campuran HPC	Unit	Campuran I	Campuran II	Campuran III	Campuran IV
Semen (binder)	Kg/m ³	425	400	420	420
Fly ash	Kg/m ³		40		
Silica fume	Kg/m ³			21	
Granulated Blast-fumace slag	Kg/m ³				42
Agregat Halus	Kg/m ³	709	647	663	675
Agregat Kasar	Kg/m ³	1.150	1.055	1.082	1.102
Air	Kg/m ³	148,75	162	168	151,2
G-51 Super Plasticizer	Kg/m ³	1,7	1,12	4,2	3,36
Water/(binder + cementitious) ratio	w/(b+c)	0,35	0,36	0,38	0,32
Faktor Air Semen	w/c	0,35	0,41	0,40	0,36

Pengamatan eksperimental di laboratorium dilakukan oleh Gedam, et al (2016) untuk mengamati pengaruh dari *supplementary cementitious materials* (SCM) pada susut, rangkai dan durabilitas dari beton berkinerja tinggi (HPC). Komposisi campuran beton dibuat empat variasi yakni satu jenis campuran hanya mengandung semen dan ketiga jenis lainnya mengandung bahan tambah pengganti parsial semen seperti pada Tabel 2.10. Spesimen masing-masing diamati pada pengukuran susut, dan penyusutan spesimen direkam pada interval waktu yang berbeda. Pengamatan pada spesimen susut untuk mengidentifikasi pengaruh jenis bahan yang digunakan untuk membuat beton. Hasil uji menunjukkan bahwa penyusutan dari empat jenis campuran beton kelas M50 sangat berbeda karena dipengaruhi oleh jenis bahan SCM yang digunakan untuk membuat beton. Hasil diobservasi juga secara umum menunjukkan bahwa besarnya deformasi susut tidak hanya tergantung pada semen dan bahan bersifat semen, tetapi juga pada sifat komposit penyusun beton. Perbandingan deformasi susut yang terjadi pada keempat jenis beton cenderung menunjukkan bahwa beton dengan campuran III yang mengandung *silica fume* (SF) dengan rasio $w / (b + c)$ yang tinggi dari 0,38 dan faktor air semen 0,4 menunjukkan aktivitas pozolan tinggi dengan *originary portland cement* (OPC), dan menunjukkan kecenderungan secara signifikan meningkatkan regangan susut, terutama pada penyusutan *autogeneous* dan susut kering. Sehingga campuran III menunjukkan regangan susut lebih tinggi dibanding ketiga jenis beton lainnya. Beton campuran II dengan *fly ash* (FA) dan campuran IV dengan *granulated blast furnace slag* (GGBS) menunjukkan bahwa koefisien penyusutan jangka panjang, untuk 500 hari dan lebih, berkurang secara signifikan dengan mengacu pada campuran I, hal ini karena kecenderungan aktif dan reaktif yang rendah dari pozolan dengan OPC yang memberikan efek berbeda, serta memfasilitasi hidrasi semen menggunakan bahan sementisius, juga mempengaruhi penyusutan pada beton yang menggunakan FA dan GGBS secara berbeda. Sehingga deformasi susut pada beton campuran II dan IV cenderung lebih rendah dibanding dengan beton campuran I.

2.5.3. Rangkai pada Beton

Fenomena bangunan infrastruktur yang dibangun dari konstruksi struktur beton, seiring waktu cenderung menunjukkan deformasi yang signifikan, retak dan kehilangan prategang yang kemungkinan disebabkan oleh rangkai pada beton (Bazant, et al, 2011).

Rangkak menyebabkan deformasi struktur beton yang merupakan fungsi dari waktu akibat beban tetap secara berkelanjutan (ASTM C 512-02). Rangkak merupakan regangan jangka panjang akibat pembebanan berkelanjutan pada keadaan tegangan konstan tergantung waktu, serta berkontribusi pada tambahan regangan elastis beton (SNI T-12-2004).

Hubungan tegangan – regangan beton sangat tergantung pada besarnya pembebanan dan riwayat waktu pembebanan. Deformasi atau regangan pada beton umumnya disebabkan oleh susut, rangkak dan beban itu sendiri. Regangan akibat susut dan rangkak disebut regangan fungsi waktu (*time-dependent*), sedangkan regangan akibat beban disebut regangan seketika atau sesaat (regangan elastis). Komponen regangan susut mulai terjadi sesaat setelah pengeringan dimulai pada waktu t_d (seketika setelah *setting* atau pada akhir *moist-curing*). Regangan susut terus meningkat seiring dengan penambahan waktu. Saat tegangan pertama diaplikasikan pada t_0 , tegangan ini menyebabkan lonjakan regangan secara seketika dalam diagram regangan yang langsung diikuti oleh regangan rangkak.

Berbagai istilah rangkak telah dijelaskan dengan berbagai metode pendekatan dalam literatur, namun umum dalam praktik konvensional untuk mengabaikan perbedaan antara *basic creep* dan *drying creep* untuk menemukan rangkak total kondisi kering (Mehta and Monteiro, 2006). *Basic creep* merupakan peningkatan regangan bergantung waktu akibat beban konstan berkelanjutan pada spesimen beton di mana kelembaban dipertahankan (spesimen tertutup), *drying creep* merupakan creep tambahan terhadap creep dasar pada pembebanan spesimen yang terkena pengeringan lingkungan dan dibiarkan mengering. (ACI 209.2 R-08, 2008). Rangkak dianggap sebagai deformasi spesimen beton di bawah tegangan bebas uniaksial konstan berkelanjutan, tanpa regangan elastis dan penyusutan total pada kondisi pengeringan (Mehta dan Monteiro, 2006), Faktor yang berpengaruh pada rangkak beton serta variabel yang dipertimbangkan dalam rekomendasi metode prediksi yakni komposisi beton, perawatan, lingkungan, ukuran penampang dan riwayat pembebanan dan kondisi tegangan seperti pada Tabel 2.8 (ACI 209.2 R-08, 2008),

Rangkak didefinisikan sebagai peningkatan regangan bergantung waktu pada pengerasan beton yang mengalami tegangan berkelanjutan, yang diperoleh dengan mengurangi regangan total yang diukur pada pembebanan spesimen, jumlah regangan

sesaat awal (elastis) karena tegangan berkelanjutan, susut, dan akhirnya regangan termal dari spesimen identik tanpa beban yang diberi riwayat kondisi kelembaban dan suhu relatif sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa regangan rangkak dan regangan susut sebagai regangan tambahan terhadap regangan sesaat awal (regangan elastis). Pendekatan umum yang praktis untuk persamaan rangkak mengacu pada fakta bahwa belum baku pemisahan antara regangan sesaat (elastis dan inelastis) dan regangan rangkak, juga pemisahan antara *basic creep* dan *drying creep* (ACI 209R-92, 1997)

Rangkak sebagian besar tergantung pada semen dan bahan bersifat semen (*cementitious materials*), serta pilihan bahan penyusun beton yang tepat. Hal tersebut menjadi pertimbangan pembuatan beton untuk meningkatkan kinerjanya. Diperlukan strategi untuk membuat campuran beton yang sesuai serta penggunaan bahan bersifat semen sebagai alternatif untuk mengurangi pengaruh rangkak, dan untuk meningkatkan sifat daya tahan dan kinerja beton baik pada perilaku mekanik maupun pada tingkat mikro.

Propertis fisika agregat yang digunakan dalam beton mempengaruhi rangkak , selain faktor pengaruh persentase agregat. Modulus elastisitas agregat mungkin adalah faktor terpenting. Semakin tinggi modulus semakin besar pengekanan yang dihasilkan oleh agregat terhadap potensial rangkak yang terhidrasi pasta semen. Porositas agregat juga ditemukan mempengaruhi rangkak, tetapi karena agregat dengan porositas yang lebih tinggi umumnya memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah, mungkin itu porositas bukanlah faktor independen dalam rangkak. Porositas agregat, dan terlebih lagi penyerapannya, memainkan peran langsung dalam perpindahan kelembaban di dalam beton, perpindahan ini mungkin terkait dengan rangkak di dalamnya menghasilkan kondisi yang kondusif pada perkembangan rangkak pengeringan. Rangkak awal tinggi terjadi dengan beberapa agregat ringan yang terkumpul kondisi kering (Neville, 2011)

Rangkak adalah merupakan regangan jangka panjang yang tergantung waktu pada suatu kondisi tegangan tetap, dan yang akan mengakibatkan suatu tambahan regangan terhadap regangan elastis beton, bisa dihitung dalam perbandingannya terhadap regangan elastis, melalui suatu koefisien rangkak $\phi_{cc}(t)$ (ACI 209R; SNI T-12-2004; Nawy, 2008; Nawy, 2009; Neville, 2011), dimana :

$$\varepsilon_{cc,t} = \phi_{cc} (t) \varepsilon_e \quad (2.13)$$

Dimana :

ε_e merupakan regangan elastis sesaat, yang diakibatkan oleh bekerjanya suatu tegangan tetap.

Koefisien rangkak $\phi_{cc}(t)$ apabila tidak dilakukan pengukuran atau pengujian secara khusus, dapat dihitung dengan rumusan seperti pada persamaan (2.14) dan (2.15) (ACI 209R; SNI T-12-2004; Nawy, 2008; Nawy, 2009; Neville, 2011) :

$$\phi_{cc}(t) = (t^{0.6} / (10 + t^{0.6})) C_u \quad (2.14)$$

$$C_u = 2,35 \cdot \lambda_{cc} \quad (2.15)$$

Nilai λ_{cc} ditentukan oleh kondisi campuran beton dan lingkungan pekerjaan dapat ditentukan berdasarkan persamaan (2.16) sebagai berikut :

$$\lambda_{cc} = K_h^c \cdot K_d^c \cdot K_s^c \cdot K_f^c \cdot K_{ac}^c \cdot K_{t0}^c \quad (2.16)$$

dimana :

t : Waktu setelah pembebanan (hari)

C_u : Koefisien rangkak maksimum

K_h^c : Faktor pengaruh kelembaban relatif udara setempat H (%)

K_d^c : Faktor pengaruh ketebalan komponen beton d (cm)

K_s^c : Faktor pengaruh konsistensi (slump) adukan beton s (cm)

K_f^c : Faktor pengaruh kadar agregat halus dalam beton F (%)

K_{ac}^c : Faktor pengaruh kadar udara dalam beton AC (%)

K_{t0}^c : Faktor pengaruh umur beton saat dibebani t_0 (hari)

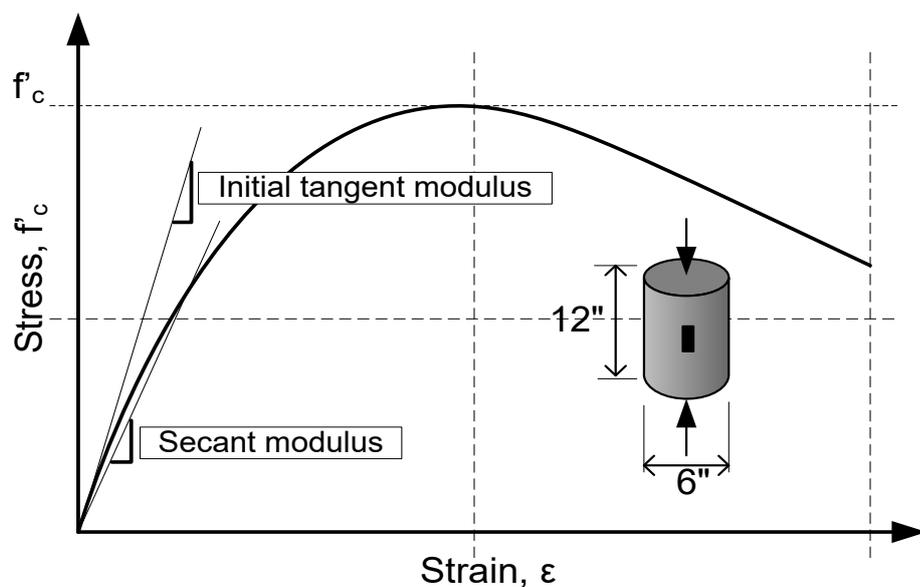
Namun demikian bila tidak dilakukan suatu perhitungan rinci seperti yang dirumuskan dalam persamaan (2.13) sampai (2.16), atau bila dianggap memang tidak dibutuhkan suatu perhitungan rinci yang sebagaimana disebutkan di atas, juga tidak dilakukan pengukuran secara khusus. Maka dalam asumsi pada suatu kondisi yang standar, nilai koefisien rangkak maksimum C_u bisa diambil secara langsung berdasarkan besaran nilai kekuatan beton yang bersesuaian seperti pada Tabel 2.12. Dalam hal besaran koefisien rangkak mengacu pada SNI T-12-2004 yang menyatakan bahwa ketentuan untuk campuran dan lingkungan dapat disebut sebagai suatu kondisi standar adalah besaran nilai dari kondisi tersebut seperti pada Tabel 2.11 sebagai berikut :

Tabel 2.11. Kondisi standar untuk campuran beton dan lingkungan pekerjaan (SNI T-12-2004)

Kondisi campuran beton dan lingkungan pekerjaan	Besaran faktor-faktor pada kondisi standar
Kelembaban relatif udara setempat H (%)	70
Ketebalan minimum komponen beton d (cm)	15
Konsistensi (slump) adukan beton s (cm)	7,5
Kadar agregat halus dalam beton F (%)	50
Kadar udara dalam beton AC (%)	6

Tabel 2.12. Koefisien standar rangkak beton sebagai tambahan regangan jangka panjang (SNI T-12-2004)

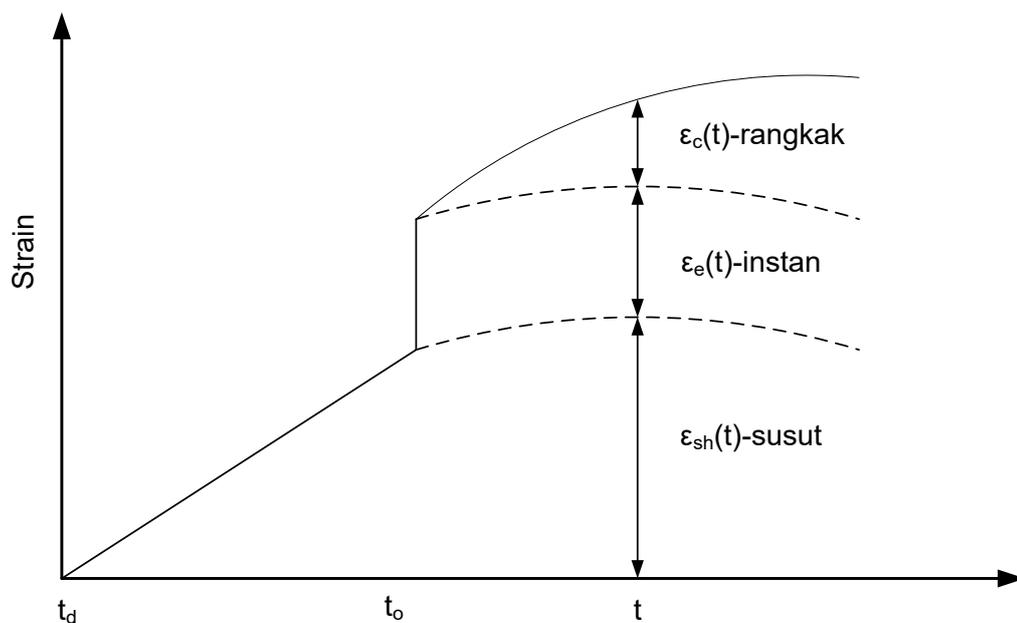
Kekuatan Karakteristik, f'_c (MPa)	Koefisien rangkak maksimum, C_u
20	2,8
25	2,5
30	2,3
35	2,15
40 - 60	2,0



Gambar 2.7. Kurva tegangan-regangan beton (DJBM, 2011)

Kurva hubungan tegangan-regangan yang ditunjukkan menurut Gambar 2.7, dimana kurva tersebut sangat tergantung pada besarnya pembebanan dan *time-history* pembebanan. Bilamana suatu material beton menerima beban tekan uniaksial oleh pembebanan tertentu secara konstan berkelanjutan sehingga regangan beton meningkat, maka peristiwa ini dikenal sebagai fenomena rangkak. Regangan atau deformasi pada beton umumnya disebabkan oleh susut, rangkak dan beban itu sendiri. Deformasi akibat susut dan rangkak disebut regangan fungsi waktu (*time-dependent*), sedangkan regangan akibat beban disebut regangan seketika.

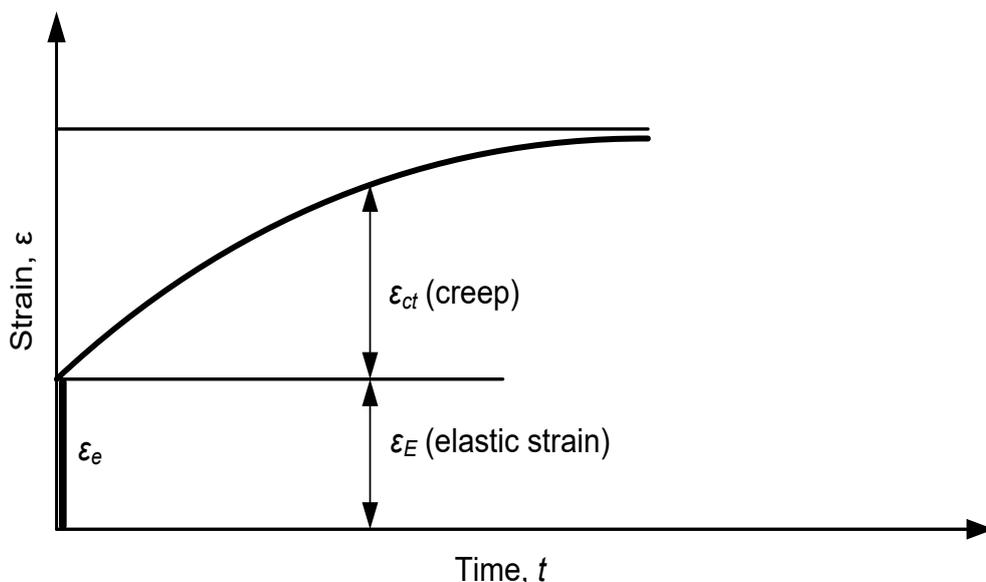
Ketergantungan waktu dari peningkatan regangan pada pengerasan beton yang mengalami tegangan berkelanjutan didefinisikan sebagai rangkak (*creep*), diperoleh dengan mengurangi dari pengukuran regangan total pembebanan spesimen. Regangan awal (elastis) karena tegangan berkelanjutan, susut, dan akhirnya regangan termal tanpa beban identik dalam spesimen sesuai dengan kondisi kelembaban dan suhu yang relatif sama. Rangkak akibat tekanan konstan dalam kondisi kelembaban dan suhu relatif stabil, dengan asumsi regangan saat pembebanan (regangan elastis nominal) sebagai regangan sesaat pada sembarang waktu. Definisi tersebut memperlakukan terhadap regangan sesaat awal, regangan rangkak, dan penyusutan sebagai aditif, meskipun komponen tersebut saling mempengaruhi.



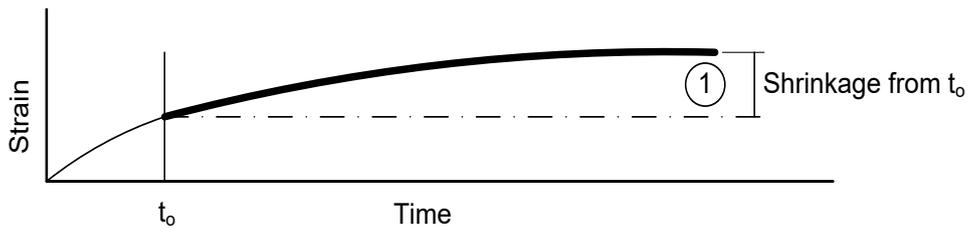
Gambar 2.8. Hubungan regangan dengan waktu untuk spesimen dibawah tegangan konstan (DJBM, 2011)

Persamaan praktis rangkak bermula dari fakta bahwa tidak terpisahkan antara regangan elastis sesaat (regangan elastis awal dan inelastis) dan regangan rangkak. Regangan elastis dan regangan rangkak adalah merupakan regangan pada beton akibat pembebanan. Regangan elastis terjadi pada awal pembebanan dan selanjutnya regangan rangkak terjadi akibat beban yang bekerja secara konstan dan berkelanjutan. Juga defenisi rangkak antara rangkak dasar (*basic creep*) yang terjadi dalam kondisi tanpa perubahan kelembaban ke atau dari lingkungan, dan rangkak pengeringan (*drying creep*) adalah rangkak tambahan yang disebabkan oleh pengeringan yang dipengaruhi oleh adanya perubahan kelembaban.

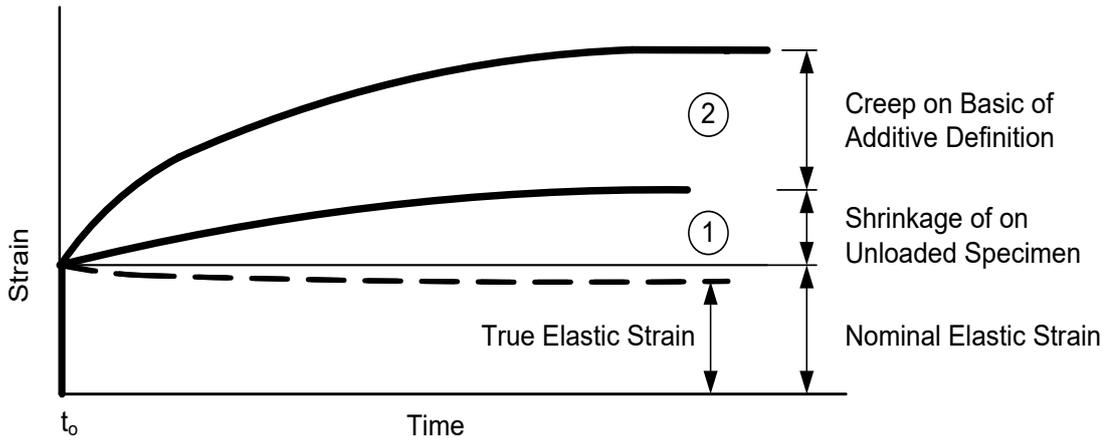
Komponen regangan terdiri dari beberapa komponen yakni regangan susut yang terjadi sejak t_d dan regangan elastis dan regangan rangkak yang terjadi sejak t_0 dapat dilihat hubungannya seperti pada Gambar 2.8. Mengacu pada Gambar 2.8 tersebut menunjukkan bahwa regangan susut mulai terjadi sesaat setelah beton mengalami pengeringan yang dimulai pada waktu t_d (seketika setelah *setting* atau pada akhir *moist-curing*). Fenomena dari regangan susut pada beton terus meningkat seiring dengan penambahan waktu akibat kehilangan kelembaban. Saat pembebanan yakni tegangan pertama diaplikasikan pada beton pada waktu t_0 , tegangan ini menyebabkan lonjakan regangan secara seketika dalam beton seperti pada Gambar 2.8, dan selanjutnya seperti pada diagram regangan yang langsung diikuti oleh regangan rangkak.



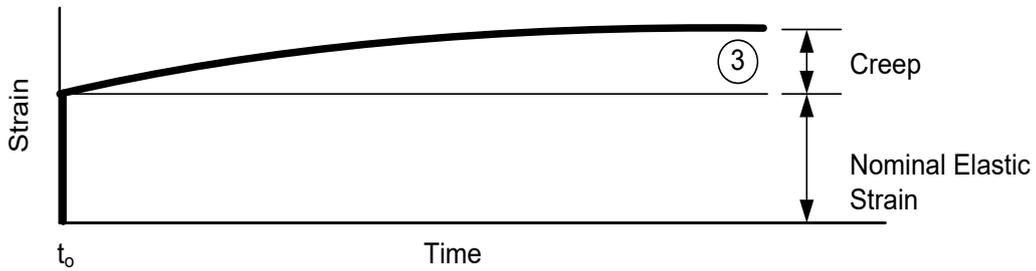
Gambar 2.9. Kurva regangan fungsi waktu (Nawy, 2009)



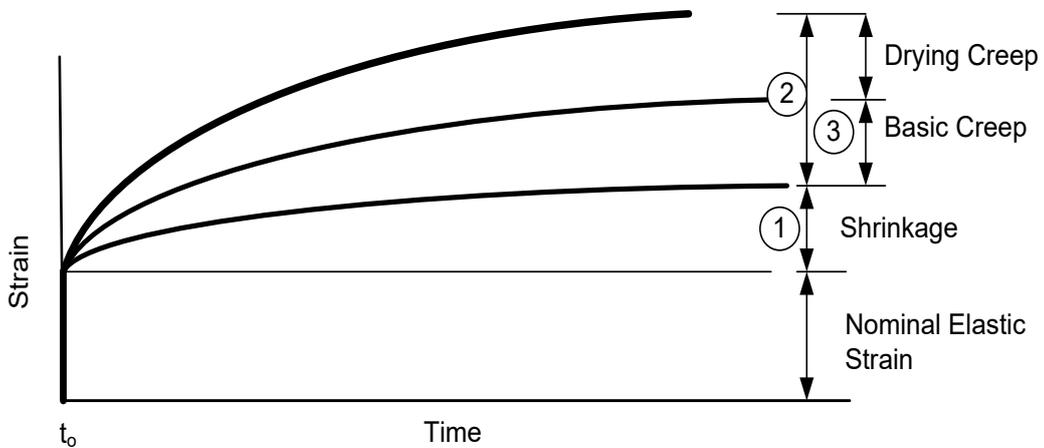
a) Shrinkage of on Unloaded Specimen



b) Change in Strain of Loaded and Drying Specimen



c) Creep of a Loaded Specimen in Hygral Equilibrium with the Ambient Medium

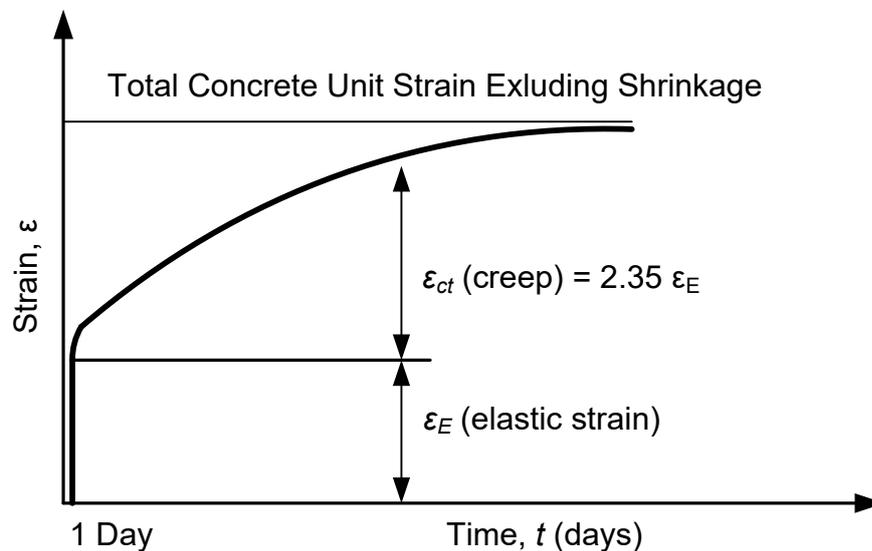


d) Change in Strain of a Loaded and Drying Specimen

Gambar 2.10. Deformasi fungsi waktu dalam beton dibawah beban berkelanjutan (Neville, 2011)

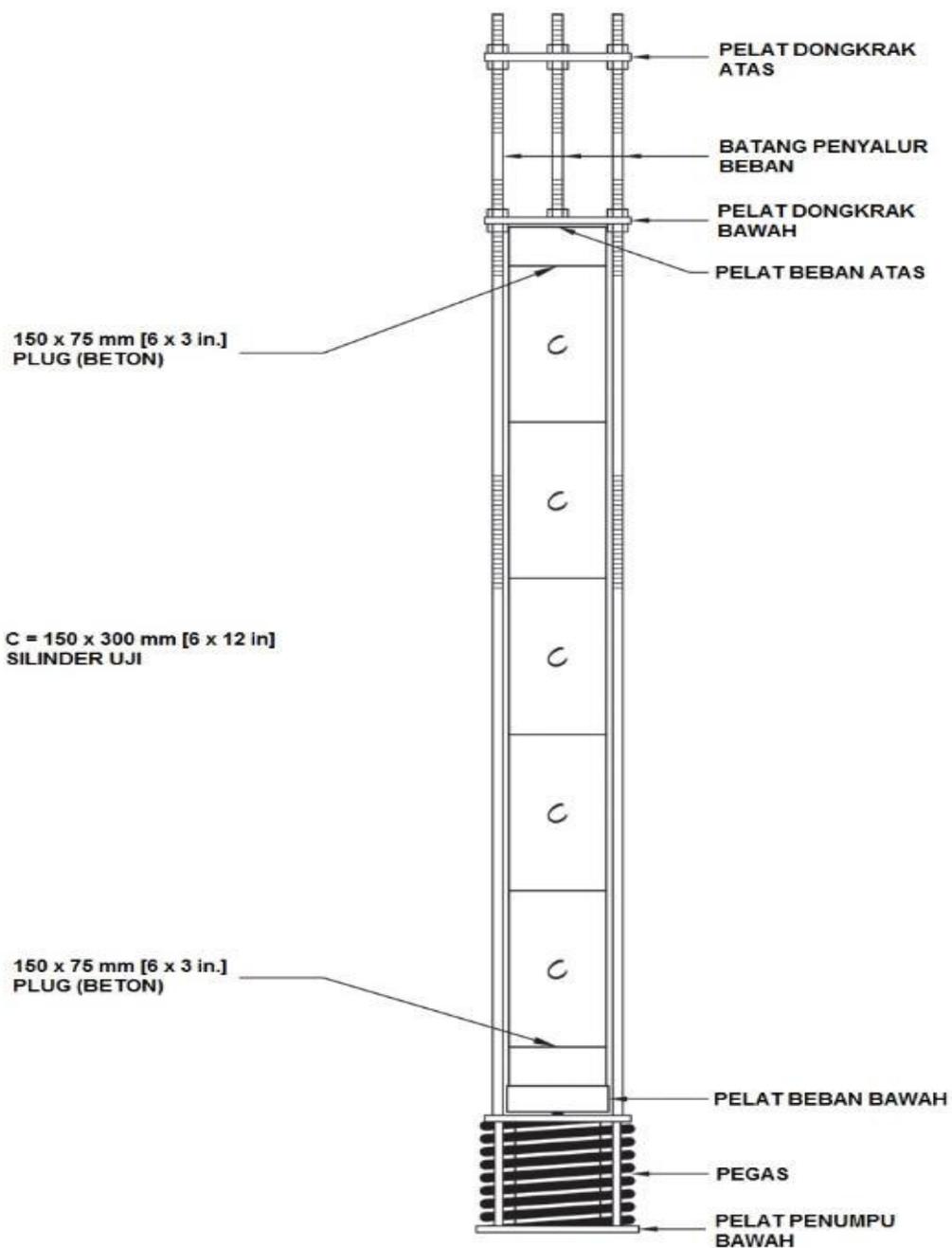
Kurva hubungan regangan dengan waktu seperti pada Gambar 2.9, Gambar 2.10 dan Gambar 2.11. Rangkak tidak dapat diukur secara langsung tetapi hanya ditentukan dengan mengurangi regangan elastis dan regangan susut dari deformasi total. Meskipun penyusutan dan rangkak bukanlah fenomena independen, dapat diasumsikan bahwa superposisi regangan valid yakni regangan total (ϵ_t) merupakan penjumlahan dari regangan elastis (ϵ_e), regangan rangkak (ϵ_c) dan regangan susut (ϵ_{sh}) seperti pada Gambar 2.9, Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 (Nawy, 2008 ; Nawy 2009 : Neville, 2011). Sehingga dari hubungan regangan total dengan regangan elastis, rangkak dan susut dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_{sh} \quad (2.17)$$



Gambar 2.11. Kurva regangan rangkak jangka panjang fungsi waktu (Nawy, 2008)

Metode standar uji untuk *creep of concrete in compression* adalah tata cara untuk mengetahui perubahan bentuk yang merupakan fungsi dari waktu akibat beban tetap yang berlangsung secara terus menerus, pada umumnya mengacu pada peraturan SNI 4811 : 2016 (ASTM C512 /C512M-10) dimana di dalamnya terdapat prosedur-prosedur untuk melakukan pengujian rangkak pada beton. Pengujian dilakukan dengan menggunakan rangka pengujian rangkak dengan pembebanan pegas seperti pada Gambar 2.12. Beberapa benda uji dapat diletakkan secara simultan pada rangka pembebanan, kemudian dilakukan pembebanan seperti pada Gambar 2.12. Nilai rangkak adalah nilai rata-rata dari jumlah benda uji.



Gambar 2.12. Rangka pengujian rangkak dengan pembebanan pegas (SNI 4811 : 2016 - ASTM C512 /C512M-10)

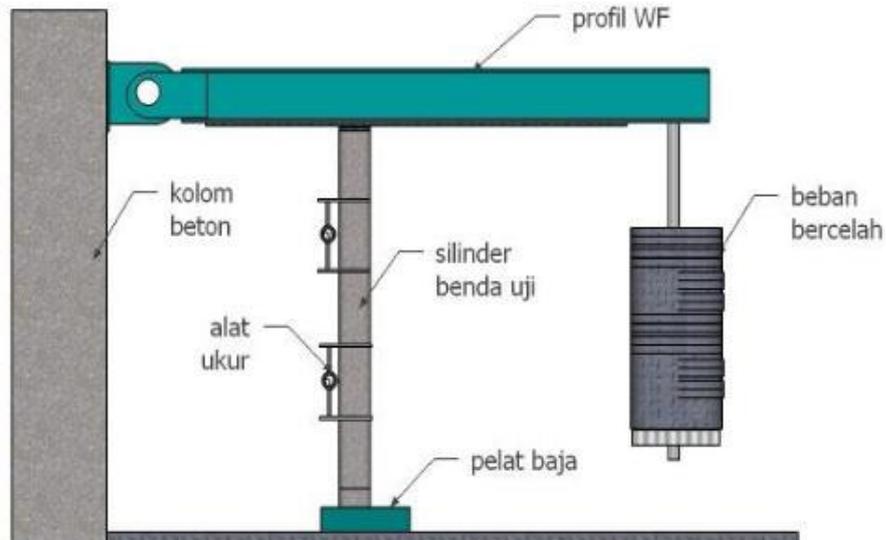
Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa benda uji yang diletakkan pada rangka pembebanan, kemudian dilakukan pembebanan menggunakan alat pegas dan atau hidrolik dalam beberapa waktu tertentu seperti pada Gambar 2.12. Alat uji yang umum dipakai untuk pengujian rangkak beton tertekan menggunakan pembebanan

sistem hidrolik atau pegas. Penggunaan sistem hidrolik atau pegas memiliki beberapa kelemahan, diantaranya beban tetap yang dapat berubah-ubah dalam jangka waktu tertentu, serta adakalanya terjadi perubahan yang melebihi ketentuan karena sistem hidrolik atau pegas yang rentan terhadap guncangan.

Berdasarkan prosedur, intensitas beban yang diberikan harus tidak boleh berselisih lebih dari 2% dengan beban yang sebenarnya. Rangkak adalah perubahan bentuk yang merupakan fungsi dari waktu akibat beban tetap yang berlangsung terus-menerus. Untuk mengetahui rangkak pada beton dapat dilakukan dengan menggunakan alat pengetesan yang terdapat pada peraturan dimana beban tetap berupa tekanan diberikan menggunakan pegas atau hidrolik sebesar $\leq 40 \% f'_c$, tetapi penggunaan pegas atau hidrolik memiliki beberapa kelemahan hubungannya dengan beban konstan yang dihasilkan oleh alat uji.

Pengujian rangkak (*creep of concrete*) membutuhkan waktu yang lama untuk mengetahui besarnya rangkak. Dibutuhkan waktu hingga satu tahun dalam pembacaan regangan yang terjadi. Bacaan regangan sebelum dan sesudah pembebanan harus dicatat, begitu pula pembacaan dua hingga enam jam kemudian, setiap hari selama seminggu, setiap minggu selama satu bulan, dan setiap bulan hingga satu tahun, dan akan sangat merepotkan apabila terjadi kesalahan dalam pembebanan, karena alat tersebut harus diseting kembali dan dilakukan pengukuran ulang mulai dari waktu awal. Pemodelan terhadap alat uji rangkak tersebut penting yaitu dengan mengganti pegas atau hidrolik dengan alat lain yang diharapkan dalam pelaksanaannya beban yang dihasilkan akan bersifat konstan dan tidak mudah berubah.

Juliea, et al (2006) melakukan study alternatif perencanaan alat uji rangkak pada beton berdasarkan ASTM C512-02 seperti pada Gambar 2.13 dan Gedam, et al (2016) melakukan pengamatan pengaruh penambahan parsial bahan yang bersifat semen pada susut, rangkak dan durabilitas dari beton berkinerja tinggi seperti pada Gambar 2.14. Pada alat uji ini mekanisme pembebanan konstan dibuat menggunakan beban pemberat yang bekerja secara terus menerus. Dengan cara ini, maka kelemahan sistem hidrolik atau pegas dapat diatasi. Namun demikian, alat uji rangkak yang dikembangkan oleh Juliea, et al (2006) ini mempunyai kekurangan yaitu alat harus ditanam dan memiliki pondasi yang kuat untuk menjaga kestabilan alat tersebut. Uji rangkak durasi pengujian relatif lama sehingga sumber beban konstan merupakan hal penting untuk dicermati.



Gambar 2.13. Skematik pengujian rangkakan (Juliea, et al, 2006)

Gedam, et al (2016) meneliti pengaruh *supplementary cementitious materials* pada susut, rangkakan dan durabilitas dari beton berkinerja tinggi. Spesimen dibuat pada komposisi campuran HPC (*Mix Proportions Containing Different Cementitious Materials*) seperti pada Tabel 2.10. Pengamatan rangkakan dilakukan pada empat campuran beton kinerja tinggi yang berbeda di bawah tekanan uniaxial yang konstan dan dihitung secara konvensional dalam kondisi pengeringan sebagai perbedaan antara total regangan spesimen dengan pembebanan dan tanpa pembebanan. Spesimen masing-masing diamati pada pengukuran rangkakan dan susut. direkam pada interval waktu tertentu seperti terlihat pada Gambar 2.14.

Hasil uji rangkakan menunjukkan bahwa regangan rangkakan dalam spesimen meningkat sebanding dengan durasi pembebanan berkelanjutan, dan dalam beberapa kasus regangan rangkakan yang diukur, diamati lebih besar dari regangan pembebanan awal (regangan elastis awal). Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa rangkakan awal pembebanan berkelanjutan dengan cepat meningkat untuk semua campuran beton kinerja tinggi, Komposisi kimia dari penggunaan bahan *supplementary cementitious materials* (SCM) seperti *fly ash* (FA), *silica fume* (SF), dan *granulated blast furnace slag* (GGBS) untuk penggantian parsial *ordinary portland cement* (OPC) berpengaruh pada mengurangi rangkakan dalam beton. Namun campuran yang mengandung OPC semen saja memiliki rangkakan jangka panjang yang lebih tinggi dalam beton.



Gambar 2.14. Pengujian susut dan rangkai (*Test setup of shrinkage and creep specimens*) (Gedam, et al, 2016)

2.6. Durability Beton

Durabilitas beton dapat didefinisikan sebagai kemampuannya untuk menolak tindakan pelapukan, serangan kimia, abrasi, atau proses lain dari penurunan kualitas untuk tetap mempertahankan bentuk aslinya, kualitas dan kemudahan layanan ketika terkena dengan lingkungan layanan yang dimaksud (Mehta dan Monteiro, 2006). Masalah durabilitas biasanya muncul sebagai kerusakan bahan di awal. Meskipun kerusakan material tidak memiliki masalah langsung pada keamanan, kerusakan bahan secara progresif akan menyebabkan kerusakan struktural, yang menempatkan potensi bahaya pada struktur. Beton yang berbeda membutuhkan derajat ketahanan yang berbeda tergantung pada lingkungan paparan dan properti yang diinginkan. Misalnya, beton terdampak pasang surut air laut akan memiliki persyaratan berbeda dari lantai beton dalam ruangan.

Ketahanan suatu struktur beton cenderung ditentukan oleh seberapa jauh struktur tersebut dapat dipengaruhi oleh lingkungan sehingga ketahanannya dapat menurun. Klasifikasi penyebab kerusakan beton dapat dikelompokkan menjadi tiga

kategori yakni fisik, kimia, dan mekanik. Tiga kategori tersebut menjadi sumber kajian sampai saat ini terus dipelajari dan dikembangkan penyelesaiannya (Li, 2011). Durabilitas beton merupakan kontribusi dari sifat dan distribusi pori beton (*nature and distribution pores*) seperti terlihat pada Gambar 2.15. Pengaruh internal dan eksternal yang dapat mengurangi sifat ketahanan beton melalui mekanisme transport dalam beton (*transport mechanism in concrete*) dipengaruhi oleh sifat dan distribusi pori beton. Polutan masuk ke dalam beton (*pollutant ingress*) melalui mekanisme transport merupakan faktor penyebab kerusakan pada beton yang berdampak berkurangnya daya tahan beton (*deterioration of concrete*).



Gambar 2.15. Bagan durabilitas beton (Folic, 2009 ; Folic dan Zenunovic, 2010)

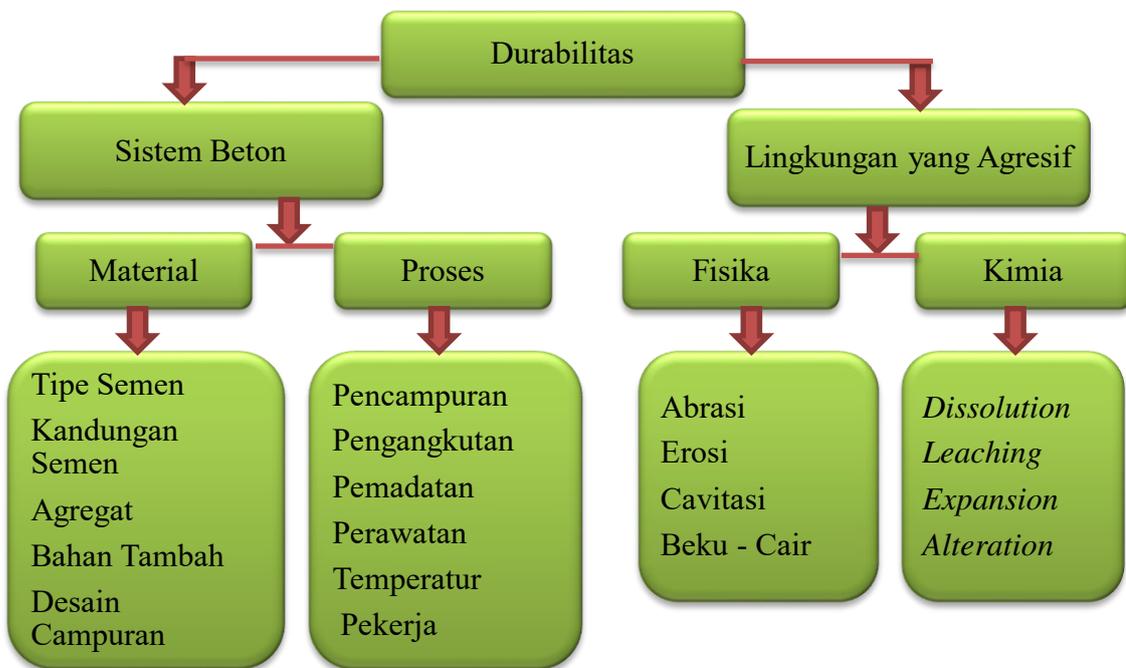
Pori yang terdapat dalam beton mungkin dapat saling terhubung dengan pori lainnya. Mekanisme transport (*transport mechanism*) dalam beton dapat diidentifikasi terhadap dua mekanisme yakni mekanisme permeasi dan pengangkutan (*permeation and transportation*) terdiri dari :

1. Proses kimia dan fisik yang mempengaruhi ketahanan struktur beton, terdapat dua faktor dominan yakni transportasi dalam struktur pori atau retak dan perpindahan air yang sering mengandung garam larut dan atau gas.
2. Permeasi air dan gas dapat dibagi menjadi tiga fenomena berbeda yakni permeabilitas (*permeability*), penyerapan (*absorption*) dan difusi (*diffusion*).

Banyak faktor yang memengaruhi proses kimia atau fisika serta permeasi pada beton, secara umum kedua fenomena tersebut dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal. Material pembangun beton dan proses pembuatan beton adalah dua faktor yang bersama-sama membangun sifat beton durable. Selain faktor tersebut, juga tingkat agresif lingkungan merupakan faktor pembentuk pengaruh ketahanan beton. Faktor- faktor yang mempengaruhi durabilitas beton adalah seperti terlihat pada Gambar 2.16.

Pengecualian kerusakan beton melalui proses mekanis, pengaruh buruk pada daya tahan beton melibatkan pengangkutan cairan atau ion melalui beton. Cairan atau ion tersebut yakni air, oksigen, karbon dioksida dan ion klorida. Cairan atau ion dapat bergerak melalui beton dengan cara yang berbeda :

1. Perpindahan cairan atau ion secara gradien tekanan (*permeation*): *flow under pressure gradient*
2. Perpindahan cairan atau ion secara konsentrasi gradien (*diffusion*): *flow under concentration gradient*
3. Perpindahan cairan atau ion secara pengisapan kapiler (*sorption*): *flow under capillary suction*



Gambar 2.16. Faktor – faktor yang mempengaruhi durabilitas beton (Folic, 2009 ; Folic dan Zenunovic, 2010)

Penurunan ketahanan sebagai akibat kerusakan pada beton dapat melalui faktor-faktor (*deteriorating agencies*) sebagai berikut :

1. Faktor eksternal kimia yakni *sulphates, chlorides*, CO₂ dan air (*natural waters*)
2. Faktor eksternal fisika dan juga mekanik antara lain *abrasion, erosion, cavitation, impact dan temperature*
3. Faktor internal yakni reaksi alkali – agregat, perubahan volume karena suhu yang tidak kompatibel dan sifat mekanis agregat dan pasta semen, dan kehadiran sulfat dan klorida dari bahan beton.

Secara umum problem durabilitas pada beton adalah berupa korosi baja pada beton bertulang terdiri dari karbonasi (*carbonation induced corrosion*) dan masuknya klorida (*chloride induced corrosion*), serangan sulfat dan bahan kimia lain, reaksi alkali-agregat, dan proses beku-cair (*freezing and thawing*)

2.6.1. Permeabilitas

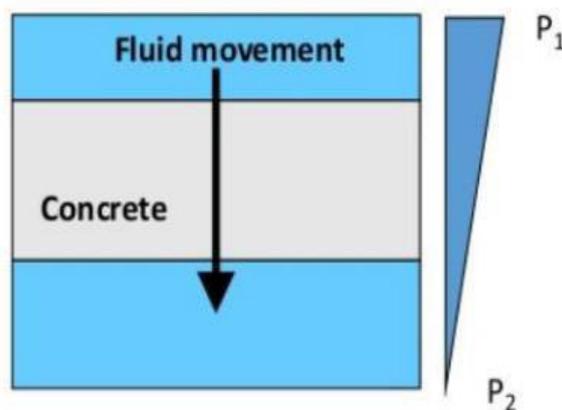
Pembangunan infrastruktur dengan konstruksi dari struktur beton pada lingkungan dengan letak geografis spesifik perlu pertimbangan integrasi antara kekuatan dan durabilitas beton pada tahapan desain struktur. Beton sebagai bahan berpori dapat berinteraksi dengan lingkungannya berupa gas, air atau ion. Interaksi tersebut dapat menyebabkan proses degradasi pada beton atau tulangan yang tertanam di dalam struktur beton (Yuan dan Chi, 2011). Proses kerusakan kimiawi (*chemical deterioration*) pada beton, permeabilitas beton adalah faktor utama yang mengatur laju kerusakan, hubungan antara ketahanan terhadap kerusakan kimia dan permeabilitas (Gjorv, 1983). Permeabilitas dapat dijelaskan yang lebih umum dengan istilah penetrabilitas. Sehingga permeabilitas didefinisikan sebagai properti yang spesifik dari media berpori yang mencirikan kemudahan cairan atau gas meresap di bawah aksi perbedaan tekanan hidrostatis (Andrews-Phaedonos, 2008). Sifat permeabilitas beton sebagai transportasi dalam beton menimbulkan efek degradasi beton sehingga berdampak buruk terhadap kinerjanya. Hal ini menunjukkan bahwa deteriorasi beton tergantung pada permeabilitas beton yang menghadirkan dan mengangkut air atau fluida lainnya melalui struktur pori beton, adanya retakan dan *microclimate* pada permukaan beton (Folic, 2009).

Beton yang bahan dasarnya semen, permeabilitas merupakan faktor utama yang memberikan daya tahannya, serta merupakan parameter penting untuk memperkirakan

umur layanan beton tersebut. Permeabilitas beton untuk mengukur pergerakan fluida pada beton berpori dan dikaitkan dengan daya tahannya. Menunjukkan bahwa permeabilitas kurang realistis karena jenis fluida berpindah ke media yang berpori, tempat fluida mengalir dalam kecepatan tinggi dapat menyebabkan penurunan tekanan, menyebabkan turbulensi aliran dan menghasilkan penyimpangan dalam hukum Darcy. Fenomena ini dapat menghasilkan hasil yang tidak nyata. Salah satu cara menilai turbulensi fluida dalam aliran keluar dapat dicapai dengan pengukuran bilangan Reynolds (Pereira dan Camarini, 2011).

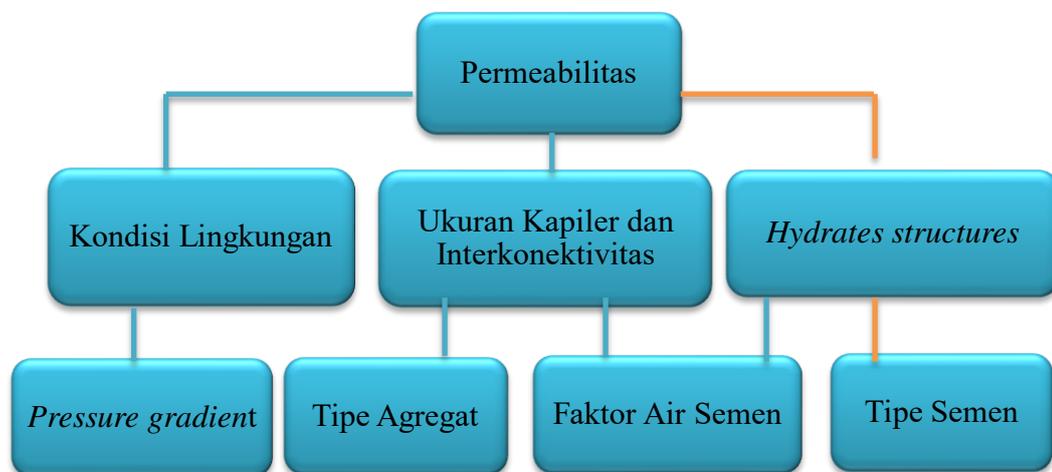
Untuk beton dengan faktor air semen yang sangat rendah, *microcracking* karena pengeringan beton (*self-desiccation*) dapat mempengaruhi permeabilitas beton. Kandungan *silica fume* pada beton mutu tinggi, yang nampaknya meningkatkan penyusutan *autogenous*. Sementara beton kekuatan tinggi tanpa *silica fume* memiliki susut *autogenous* dengan urutan yang sama dengan beton kekuatan normal, keberadaan *silica fume* dapat meningkatkan penyusutan *autogenous* hingga dua kali lipat dari beton kekuatan normal.

Beton kekuatan normal, mikrostruktur khusus pada zona transisi tampaknya terkait dengan pembentukan ruang berisi air di sekitar agregat pada beton segar, karena *bleeding* internal dan *wall efek*, yang mengganggu *packing* partikel semen yang tidak efisien di sekitar agregat. Kalsium hidroksida dan ettringit yang dikenal lebih sering berada di pori-pori besar, yang menyumbang kandungan lebih besar dari fase-fase ini di zona transisi. Zona tersebut memiliki rasio air semen yang lebih besar dibandingkan dengan *bulk* dan karenanya dicirikan oleh porositas yang lebih tinggi.



Gambar 2.17. Mekanisme perpindahan cairan dan atau ion pada beton (Al-Neshawy dan Sistonen, 2015)

Perpindahan cairan dan atau ion secara gradien tekanan (*permeation*) merupakan aliran dengan gradien tekanan (*flow under pressure gradient*). Permeation air dan gas dalam beton yang memiliki fenomena sifat kemudahan dilalui oleh air (*permeability*) seperti pada Gambar 2.17. Kemudahan beton untuk dapat dilalui air sangat berpengaruh terhadap tingkat durabilitas beton tersebut. Faktor –faktor yang berpengaruh pada permeabilitas beton adalah kondisi lingkungan, ukuran kapiler dan konektivitas seperti pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Faktor-faktor yang mempengaruhi permeabilitas (Folic, 2009; Folic and Zenunovic, 2010)

Struktur beton yang berada pada lingkungan yang bersifat agresif penting untuk melihat potensi permeabilitasnya. Pada umumnya semua proses deteriorasi pada beton, permeabilitas beton adalah faktor utama yang mengatur laju terjadinya kerusakan. Selain itu, kalsium hidroksida juga merupakan unsur yang mudah larut yang sangat rentan terhadap serangan kimia. Sifat aliran dalam beton yang mencirikan kuantitatif dari cairan yang akan melewatinya di bawah tekanan diferensial biasanya mempengaruhi bangunan bendungan, lapisan terowongan, struktur penahan cairan, struktur pantai terendam.

Koefisien permeabilitas (K) dari beton yang dilalui cairan pada tekanan dan aliran konstan (*steady-state flow*) dapat dihitung dengan Rumus Darcy (Neville, 2011; Mehta dan Monteiro, 2006) sebagai berikut :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K.(\Delta H . A)}{(L . \mu)} \quad (2.18)$$

dimana :

dq/dt = rate of fluid flow,

μ = viscosity of the fluid,

ΔH = pressure gradient,

A = surface area, and

L = thickness of the solid.

2.6.2. Permeabilitas Air Beton

Provinsi Papua di bagian selatan yakni Kabupaten Merauke, Kabupaten Boven Digoel, Kabupaten Mapi dan Kabupaten Asmat secara topografi merupakan dataran rendah, dengan ketinggian rata-rata di atas permukaan laut kurang dari 100 m. Provinsi Papua bagian selatan dengan luas sekitar 119.000 km², sebagian besar luas wilayah merupakan hutan rawa yang berfungsi sebagai penampungan alami air hujan. Hutan rawa tersebut saling terkoneksi dengan kali yang sekaligus difungsikan sebagai transportasi air. Hamparan tanah dataran memiliki potensi untuk pertanian sawah yang perlu didukung dengan infrastruktur pertanian. Konektivitas antar daerah sebagian terhubung dengan infrastruktur jalan dan jembatan, udara, dan laut dan kali. Bangunan-bangunan sipil pada infrastruktur sebagian merupakan bangunan air, bangunan sipil yang berhubungan dengan air dan bangunan sipil yang terbenam dalam air. Beton yang digunakan pada bangunan-bangunan sipil yang berada di lingkungan seperti tersebut penting untuk diketahui permeabilitas air dari beton tersebut.

Permeabilitas air beton merupakan bagian sifat penting yang berkontribusi terhadap durabilitas beton pada lingkungan yang berhubungan langsung dengan air. Beton permeable adalah beton yang mudah dilalui air, sedangkan beton impermeable adalah beton yang sulit dilalui air (Sugiharto, et al, 2004). Permeasi disebabkan oleh gradien tekanan, yang ditandai dengan permeabilitas air dan udara. Permeabilitas penting dalam beton yang benar-benar terendam dan untuk beton yang menahan masuknya air. Struktur beton tersebut seperti struktur penahan air, beton yang terendam dalam dan atau jembatan, bendungan atau reservoir atau bangunan-bangunan dibawah permukaan tanah, dan anjungan minyak lepas pantai atau pelabuhan (Andrews-Phaedonos, 2008). Sehingga sifat permeabilitas air beton perlu diminimalkan saat

pembuatan beton terutama pada struktur beton yang berhubungan langsung dengan air seperti tersebut di atas. Secara umum permeabilitas beton dipengaruhi oleh faktor lingkungan, ukuran kapiler dan interkoneksi (Folic, 2009; Folic and Zenunovic, 2010).

Macam uji permeabilitas yang lazim dilakukan antara lain permeabilitas terhadap ion klorida, permeabilitas terhadap udara, dan permeabilitas terhadap air. Uji permeabilitas terhadap air sendiri dibedakan menjadi beberapa kategori, yaitu uji serapan permukaan, uji penyerapan air (penetrasi), uji kecepatan aliran air, dan uji kapilaritas. Macam-macam uji tersebut dapat dilakukan uji setempat atau uji di laboratorium. Uji setempat hingga saat ini masih sulit dilakukan karena keterbatasan alat dan kondisi lingkungan. Uji di laboratorium lebih sering dilakukan dengan mengambil contoh beton dari lapangan atau mencetak secara khusus contoh beton yang akan diuji.

Khusus untuk uji permeabilitas terhadap air, di Indonesia masih jarang dilakukan karena uji ini membutuhkan waktu yang cukup lama, harga alat tes permeabilitas yang relatif mahal, dan kondisi lingkungan tropis yang sangat lembab sehingga bisa mempengaruhi keberhasilan tes ini. Padahal hasil uji ini sangat penting khususnya untuk struktur beton di daerah pantai, struktur beton yang terdapat pada permukaan air dan terendam air. Beton yang teresapi oleh air akan mengalami degradasi pada ketahanan dan kekuatannya. Untuk itu perlu diadakan antisipasi pada desain struktur beton yang berhubungan dengan air, seperti jembatan, pelabuhan, dan *basement*.

Untuk mengetahui dan mengukur permeabilitas beton perlu dilakukan pengujian. Uji permeabilitas ini terdiri dari dua macam: uji aliran (*flow test*) dan uji penetrasi (*penetration test*). Uji yang pertama digunakan untuk mengukur permeabilitas beton terhadap air bila ternyata air dapat mengalir melalui sampel beton. Uji penetrasi digunakan jika dalam percobaan permeabilitas tidak ada air yang mengalir melalui sampel. Dari data yang dihasilkan oleh uji permeabilitas ini dapat ditentukan koefisien permeabilitas, suatu angka yang menunjukkan kecepatan rembesan fluida dalam suatu zat.

Koefisien permeabilitas benda uji dihitung dengan menggunakan persamaan berikut yang didasarkan pada Hukum Darcy (Soongswang, et al, 1988) :

$$K = \rho \cdot \frac{H \cdot Q}{P \cdot A} \quad (2.19)$$

dimana :

K : Koefisien permeabilitas dalam in./sec atau cm/dtk

ρ : Kepadatan air dalam lb/in³ atau kg/m³

H : Panjang benda uji dalam inci atau cm

P : Tekanan air dalam psi atau kg/cm²

Q : Tingkat net aliran masuk in³/sec atau cm³/dtk

A : Luas penampang benda uji dalam in² atau cm²

Pada uji penetrasi, Rumus Darcy yang dipakai adalah yang dikembangkan oleh Bungey, 1982 (Sugiharto, et al, 2004) :

$$K = \frac{d^2 \cdot v}{2 \cdot T \cdot h} \quad (2.20)$$

dimana :

K : koefisien permeabilitas (m/det)

d : kedalaman penetrasi (m)

T : waktu penetrasi (det)

h : tinggi tekanan (m)

v : angka pori beton

Angka pori beton (v) dihitung dengan menggunakan rumus yang dikembangkan oleh Katri dan Sirivivatnanon, 1997 (Sugiharto, et al, 2004) sebagai berikut :

$$v = \frac{\left\{ \left(\frac{w}{c} \right) x (100 - \alpha x 36,15) \right\}}{(w + 100/g)} \quad (2.21)$$

dimana:

v : angka pori beton

w/c : faktor air semen

w : jumlah air bebas dalam beton

g : massa jenis beton

α : derajat hidrasi beton (Soroka, 1979)

Beton dengan kualitas baik evaluasi potensi permeabilitas dengan metode aliran konstan kurang efektif, metode penetrasi cairan efektif digunakan untuk beton tersebut. Penetrasi cairan pada spesimen beton dapat terevaluasi dengan baik dengan mengukur

volume air yang masuk ke dalam spesimen. Juga setelah penetrasi cairan telah selesai sesuai durasi yang ditentukan, selinder beton dibelah longitudinal dan mengukur rata-rata kedalaman penetrasi cairan sesuai perubahan warna spesimen jenuh air. Penerapan tekanan cairan konstan uniaksial pada spesimen, kedalaman penetrasi cairan dapat setara dengan koefisien permeabilitas melalui pendekatan penggunaan hokum Darcy yang dikembangkan oleh Valenta, 1969 (Li, 2011; Neville, 2011) sebagai berikut :

$$k_1 = \frac{x^2 v}{2 \Delta H \cdot T} \quad (2.22)$$

dimana :

- k_1 : Koefisien permeabilitas (m/dtk)
- x : Kedalaman penetrasi (m)
- v : Volume fraksi beton yang ditempati oleh pori-pori
- ΔH : Tinggi tekanan (m)
- T : Durasi penetrasi (dtk)

Nilai pori v merupakan rongga udara yang tidak diisi dengan air kecuali dibawah tekanan. Mengacu pada hal tersebut dapat dihitung dari pertambahan massa beton selama uji penetrasi. Pertimbangan bahwa hanya rongga pada spesimen yang ditembus air, pendekatan nilai v sebagai berikut (Li, 2011) :

$$v = \frac{\Delta W}{D \cdot A \cdot x} \quad (2.23)$$

dimana,

- ΔW : Pertambahan berat benda uji selama penetrasi
- D : Berat jenis beton
- A : Luas penampang (m^2)

Pada uji aliran, koefisien permeabilitas dihitung dengan Rumus Darcy (Sugiharto, et al, 2004) :

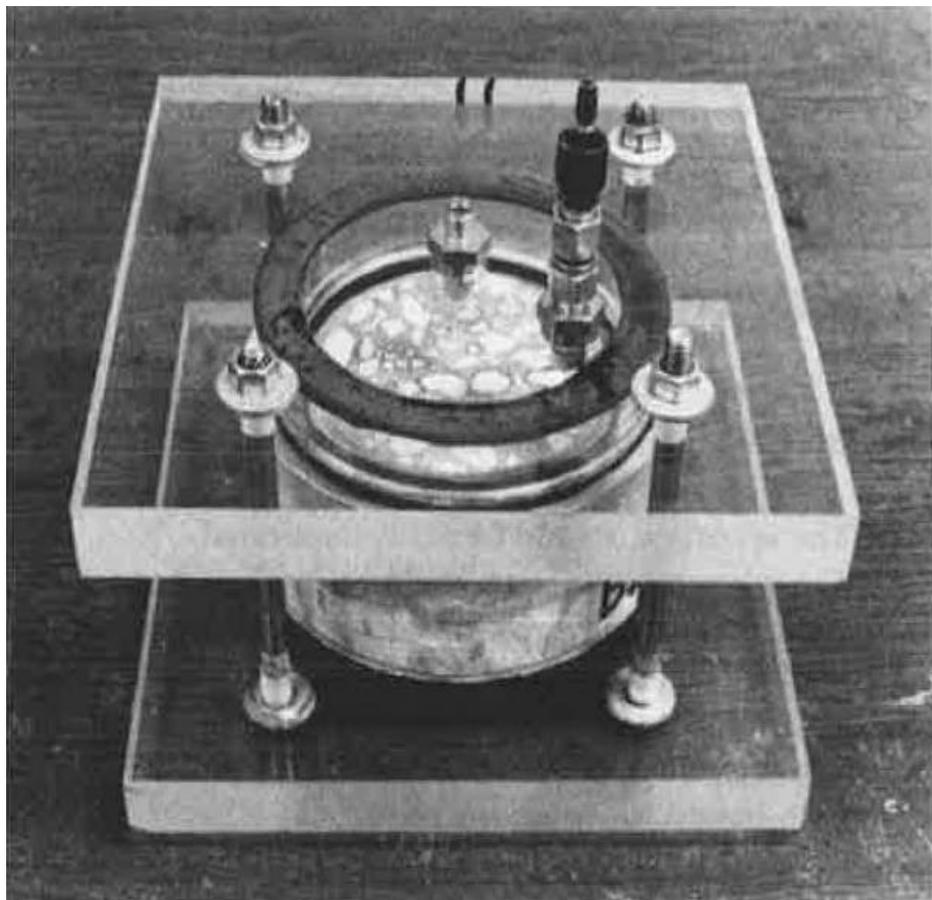
$$K = \frac{\rho \cdot g \cdot L \cdot Q}{P \cdot A} \quad (2.24)$$

dimana:

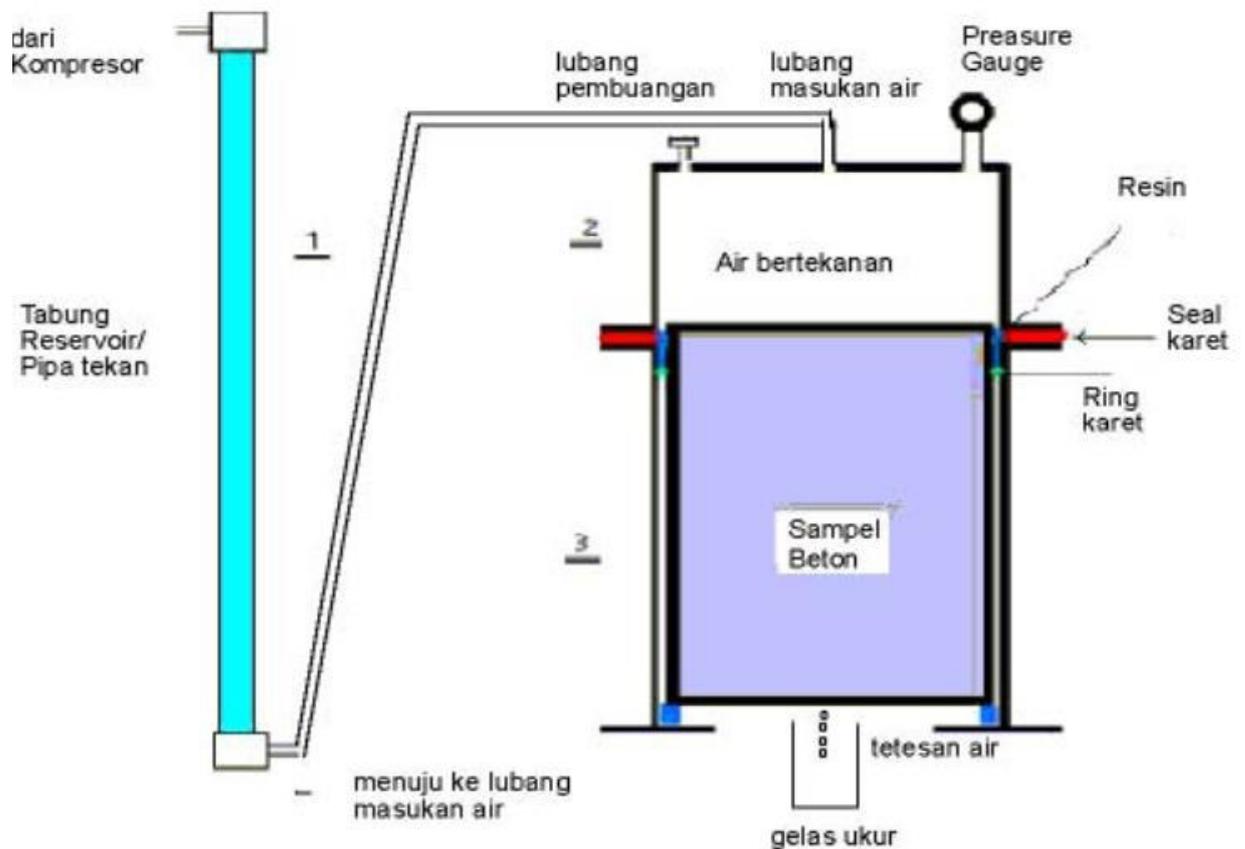
- K : koefisien permeabilitas (cm/det)
- ρ : massa jenis air (kg/cm³)
- g : percepatan gravitasi (cm/det²)
- L : panjang atau tinggi sampel (cm)

- Q : debit aliran air (cm^3/det)
 P : tekanan air ($\text{kg cm}/\text{det}^2/\text{cm}^2$)
 A : luas penampang sampel (cm^2)

Pengembangan beberapa metode pengukuran permeabilitas air pada beton dilakukan untuk mendapatkan metode dalam rangka untuk mengevaluasi nilai kualitatif beton tersebut. Pengembangan alat uji permeabilitas oleh Soongswang, et al (1988) untuk metode uji aliran dan alat uji permeabilitas oleh Sugiharto, et.al (2004) untuk menguji permeabilitas beton dengan metode uji aliran dan penetrasi. Alat ini dipakai untuk uji permeabilitas yang selanjutnya besaran nilai koefisien permeabilitas didapatkan dari uji tersebut. Skematik alat tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.19 dan 2.20. Alat ini juga memiliki beberapa komponen utama yang diintegrasikan dalam suatu sistem untuk menghasilkan cairan yang betekanan konstan yang akan meresap atau melalui benda uji.



Gambar 2.19. Alat uji permeabilitas (Soongswang, et al, 1988)



Gambar 2.20 Alat uji permeabilitas (Sugiharto, et.al, 2004)

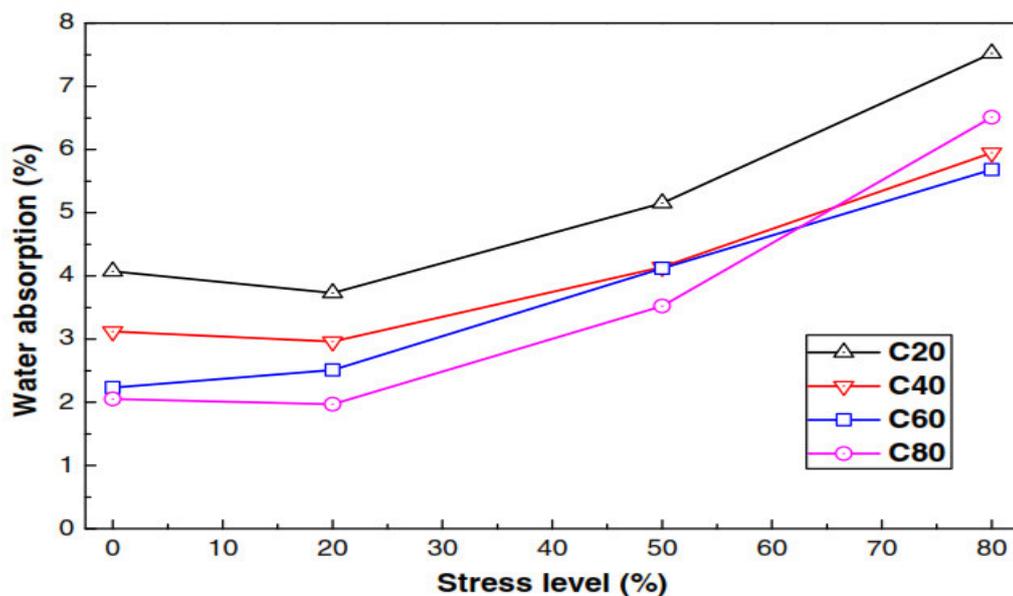
Gupta et al (2017) meneliti durabilitas beton dengan uji permeabilitas pada beton dari penggunaan tailing tembaga. Metode pada uji penetrasi cairan dilakukan menurut DIN 1048 (1991) pada spesimen kubus beton umur 28 hari ukuran 150 mm. Spesimen uji pada uji penetrasi cairan dipertahankan berada pada tekanan air konstan 0,5 Mpa sebagai beban tekanan normal. Setelah selesai pengujian, selanjutnya spesimen dipindahkan dari peralatan, dibelah pada pusat untuk membuat dua bagian sama setelah 5–10 menit pengeringan. Kedalaman penetrasi maksimum diukur dari tiga spesimen, dan rata – rata pengukuran dihitung sebagai kedalaman penetrasi.

Hasil pengamatan permeabilitas air menunjukkan bahwa salah satu karakteristik yang mempengaruhi daya tahan beton adalah permeabilitasnya terhadap masuknya air dan berpotensi merusak beton. Kedalaman penetrasi cairan merupakan gambaran potensi permeabilitas beton tersebut yakni kedalaman penetrasi semakin besar sebanding dengan meningkatnya nilai permeabilitas. Hasil uji juga menunjukkan bahwa permeabilitas rendah yang sesuai dapat diperoleh dengan kandungan semen yang

memadai, rasio air semen yang rendah, kompaksi beton yang lengkap, dan perawatan yang memadai. Hasil dan prosedur pengukuran kedalaman penetrasi cairan pada spesimen ditunjukkan pada Gambar 2.21. Pengamatan menunjukkan bahwa kedalaman penetrasi air meningkat secara bertahap dengan meningkatnya jumlah tailing tembaga dalam beton.



Gambar 2.21. Pengukuran kedalaman penetrasi air (*Measurement of depth of water penetration, Gupta et al, 2017*)



Gambar 2.22. Hubungan tingkat tegangan dan serapan air beton (*Relationship between stress level and water absorption of concrete, Bin Lei, et al, 2018*).

Bin Lei , et al (2018) meneliti durabilitas beton sebagai efek dari *cyclic loading deterioration*. Hasil uji seperti pada Gambar 2.22, menunjukkan penyerapan air beton pada tingkat tegangan tekan yang berbeda. Penyerapan air pada awalnya menurun ketika tingkat tegangan tekan kurang dari 20%, dan kemudian meningkat ketika tingkat tegangan di atas 20%, yang konsisten dengan variasi porositas beton pada tingkat pembebanan tekan yang berbeda, retakmikro secara intensif mulai meningkat dan menyebar hingga memperbesar celah dan konektivitas. Penyerapan air beton berkurang dengan meningkatnya kekuatan beton, karena kepadatan mikrostruktur beton kekuatan tinggi. Penyerapan air pada beton meningkat dengan meningkatnya tingkat tegangan, tingkat penyerapan meningkat dengan sangat cepat setelah tingkat tegangan 50% karena retakmikro terjadi pada tahap pembebanan tersebut, hal ini berhubungan dengan kerapuhan beton kekuatan tinggi dan peningkatan retakmikro.

Ruiperez et al (2018) melakukan pengamatan durabilitas beton ringan yang dibuat dari agregat ekspansi dan tanah liat, dengan melakukan evaluasi porositas. Saha dan Sarker (2018) melakukan pengamatan potensi ekspansi reaksi alkali silika agregat feronikel dengan fly ash, dengan melakukan evaluasi porositas. Dave et al (2018) melakukan pengamatan durabilitas beton komposit *green quaternary* karakterisasi dan evaluasi sifat mekanik, dengan melakukan evaluasi kualitas beton dan matriksnya serta penilaian permeabilitas. Liu, M, et al (2018) melakukan pengamatan karakteristik dispersi dari variasi konten Nano-TiO₂ dan pengaruhnya terhadap sifat-sifat komposit berbasis semen, dengan melakukan pengukuran struktur pori dan karakterisasi mekanis dan permeabilitas.

Bin Lei, et al (2018) melakukan uji serapan air pada beton sebagai efek dari *cyclic loading deterioration*. Uji penyerapan air dilakukan setelah pembebanan mekanis, yakni spesimen beton ditempatkan pada tangki air dengan permukaan dasar direndam hingga 2 mm tinggi air selama 48 jam. Ketinggian air di tangki tetap konstan selama periode pengujian. Spesimen diambil dari tangki air dan dibersihkan dengan handuk dan kertas kering dan kemudian ditimbang (W_1). Spesimen kemudian ditempatkan ke dalam oven untuk pengeringan hingga berat konstan (W_2) di bawah suhu 60 ° C. Hasil uji seperti pada Gambar 2.22 dan nilai penyerapan air (A) dihitung dengan persamaan :

$$A = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\%$$

2.7. Hubungan Kekuatan dan Durabilitas Beton

Hubungan Kekuatan dan Ketahanan Beton

Terpenuhinya kebutuhan komposisi semen yang dapat menghasilkan kekuatan awal yang tinggi pada beton, yakni pada penggunaan faktor air semen yang sangat rendah melalui penggunaan semen yang ditingkatkan komposisi kandungannya dan pengurangan kadar air. Langkah tersebut cenderung dapat menghasilkan penyusutan termal yang lebih tinggi, susut pengeringan, modulus elastisitas dan koefisien rangkakan lebih rendah. Dengan jumlah kandungan semen yang lebih tinggi, beton yang dihasilkan berkecenderungan retak yang lebih besar karena peningkatan termal dan susut pengeringan. Koefisien rangkakan cenderung rendah pada beton seperti itu, sehingga tidak banyak ruang untuk relaksasi tegangan. Karena itu beton kekuatan awal tinggi lebih rentan retak daripada beton kekuatan sedang atau rendah.

Dampak Faktor Air Semen pada Ketahanan Beton

Permeabilitas adalah faktor kontributor untuk perubahan volume dan faktor air semen yang lebih tinggi merupakan penyebab fundamental permeabilitas lebih tinggi. Dampak penggunaan faktor air semen terhadap ketahanan beton adalah faktor air semen tinggi berpengaruh pada permeabilitas, perubahan volume, retak, disintegrasi dan kerusakan beton. Hal tersebut merupakan urutan proses dalam beton hubungannya dengan penerapan nilai faktor air semen terhadap ketahanan beton. Untuk ketahanan beton faktor air semen yang rendah adalah kebutuhan fundamental. Tujuan ketahanan beton gunakan faktor air semen serendah mungkin adalah persyaratan mendasar untuk menghasilkan beton padat dan kedap air.

Kecenderungan adanya perbedaan mendasar pada struktur mikro beton yang dibuat dengan faktor air semen tinggi dan faktor air semen rendah. Penggunaan faktor air semen yang rendah permeabilitas menurun ke tingkat dimana beton memiliki sifat yang tahan terhadap air. Hal tersebut tidak berarti bahwa beton tidak mengandung pori dan atau jaringan kapiler yang saling terhubung (*interconnected network of capillaries*), tetapi kapiler tersebut untuk air tidak bisa mengalir lagi melaluinya. Demikian pula sebaliknya pada penggunaan faktor air semen yang tinggi kecenderungan beton yang dihasilkan mengandung pori yang dapat menjadi transport dalam beton. Selanjutnya permeabilitas beton meningkat yang berpengaruh pada menurunnya tingkat ketahanan beton.

Kandungan Semen Minimum dan Maksimum

Secara umum kandungan semen cenderung tidak memiliki peran langsung pada kekuatan beton, jika kandungan semen diperlukan untuk meningkatkan kelecakan campuran beton pada rasio air semen yang diberikan. Namun kekuatan tekan dapat meningkat dengan melakukan berbagai variasi komposisi campuran hubungannya dengan penggunaan semen yang optimum. Sehingga untuk rasio air semen tertentu akan ada cara memilih kandungan semen pada nilai optimum yang dapat menghasilkan kekuatan tekan yang tinggi pada umur 28 hari. Meningkatkan kadar semen di atas nilai optimum mungkin tidak menambah kekuatan beton lagi, khusus untuk campuran dengan penggunaan rasio air semen rendah dan ukuran agregat maksimum lebih besar.

Rekomendasi untuk meningkatkan ketahanan beton di berbagai referensi memberikan batasan hubungannya dengan rasio air semen maksimum, kadar semen minimum, ketebalan penutup, jenis semen dan jumlah klorida dan sulfat dalam beton. Besaran kandungan semen harus memastikan alkalinitas yang cukup hubungannya dengan nilai PH beton untuk memberikan pengaruh lingkungan yang pasif terhadap korosi baja. Pada beton yang berada di lingkungan laut atau dalam air laut kadar semen minimum perlu menjadi pertimbangan khusus antara lain tidak kurang dari $350 \text{ kg} / \text{m}^3$. Kadar semen dan rasio air semen dipilih sedemikian bertujuan untuk menghasilkan volume pasta semen yang cukup untuk mengisi rongga antara agregat halus maupun agregat kasar. Penggunaan kadar semen sekitar $400 \text{ kg} / \text{m}^3$ dan rasio air semen 0,45 cenderung menghasilkan volume pasta pada kisaran 30 persen yang mungkin sesuai untuk batu pecah ukuran maksimum 20 mm. Penggunaan semen sekitar $300 \text{ kg} / \text{m}^3$ dan rasio air semen 0,50 cenderung menghasilkan sekitar 25 persen volume pasta bertujuan untuk mengisi rongga antara agregat kerikil bulat 20 mm. Bagian struktur beton pada lingkungan tertentu yakni berada di bawah tekanan hidrostatik pada satu sisi dan sebagian dibenamkan, pertimbangan penting diberikan pada pengurangan rasio air semen. Juga mungkin perlu peningkatan semen untuk memastikan tingkat kelecakan yang diperlukan untuk pemadatan penuh dan dengan tujuan menghasilkan permeabilitas rendah. Penerapan batasan semen maksimum dalam beton mungkin juga merupakan hal yang penting. Secara umum campuran beton pada kandungan semen yang tinggi cenderung menghasilkan susut yang meningkat selanjutnya menghasilkan retak, juga rangkai beton meningkat pada kandungan pasta semen tertentu.

2.8. Kerangka Berpikir

Pasir galian merupakan material lokal dari Kabupaten Merauke berupa bahan tambang galian C diperoleh langsung dari permukaan tanah atau dengan cara menggali terlebih dahulu. Pasir galian secara visual agak berbeda dengan pasir pada umumnya antara lain butiran dan warna butiran. Butiran pasir galian cenderung merupakan pasir tanah dengan gradasi kasar yang jenisnya sesuai dengan lokasi sumber pasir. Warna butiran pasir galian mungkin ada hubungannya dengan kandungan komposisi kimia. Pasir galina tersebut pada penelitian ini akan dicampur dengan semen yang disebut semen pasir (matriks mortar) merupakan matriks untuk beton. Pasir galian pada penelitian ini merupakan pengganti pasir yang didatangkan dari luar Provinsi Papua sebagai agregat halus beton. Campuran beton pada penelitian ini terdiri dari semen, pasir galian dan batu pecah. Sehingga penting untuk melihat seberapa jauh relasi sifat fisika maupun sifat kimia pasir galian yang merupakan material lokal dengan propertis dan durabilitas beton.

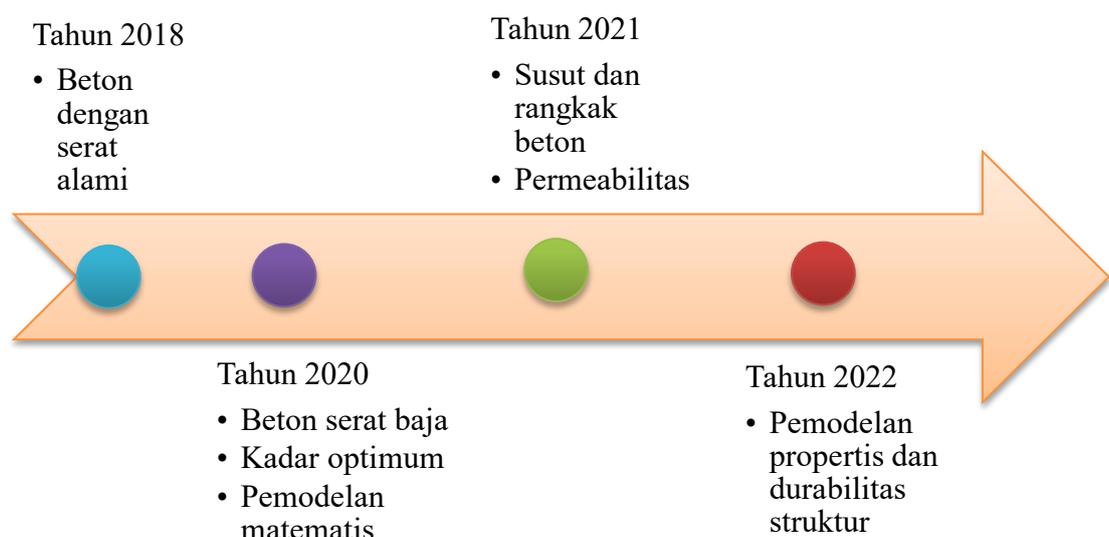
Beberapa kajian yang telah dilakukan terhadap campuran semen dengan pasir dan atau tanah. Secara umum kajian tersebut ingin melihat seberapa jauh hubungan sifat-sifat kimia dan fisika agregat terhadap sifat mekanis mortar dan beton, juga perilaku susut dan durabilitas. L.S. Ho, et al (2018) melakukan analisa pengembangan kekuatan tanah dengan perbaikan semen pada kondisi perawatan yang berbeda melalui penyelidikan mikrostruktur dan kimia. Hasil uji menunjukkan bahwa kekuatan tekan dari semua campuran semen-tanah meningkat secara signifikan dengan penurunan jumlah mikropori yang diinduksikan oleh efek karbonasi dan *suction*.

Suroso, et al (2016) melakukan pengamatan pengaruh reaksi semen pada peningkatan kekuatan semen campur tanah (*soil cement*). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kekuatan tanah meningkat dengan penambahan semen baik sebagai pengikat maupun pengisi antar pori. Juga peningkatan kekuatan disebabkan oleh hidrasi semen dalam *soil cement*, dan juga karena proporsi peningkatan hasil reaksi kalsium silikat hidrat (CSH).

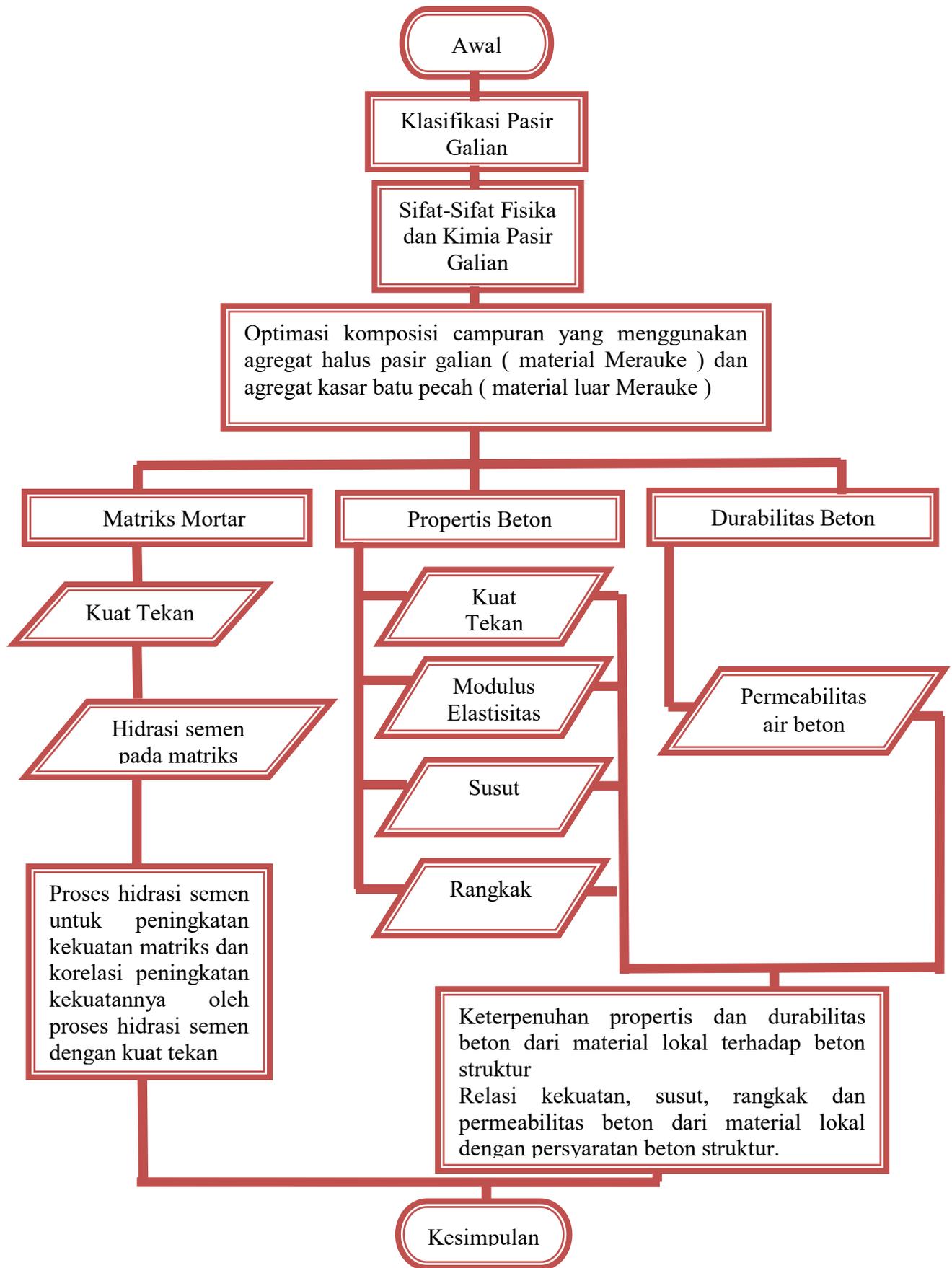
Peningkatan sifat mekanik tanah laterik *fine grained* diperbaiki dengan semen untuk penggunaan pada konstruksi jalan diteliti oleh Mengue, et al (2017). Hasil uji menunjukkan bahwa semen meningkatkan kemampuan tanah laterik terutama pada *optimum moisture content* dan *dry side of optimum*, sehingga memberikan kemungkinan

menggunakan tanah laterik pada lapisan perkerasan jalan. Juga hasil uji menunjukkan bahwa tanah dengan perbaikan semen pada komposisi 6% hingga 9% memenuhi persyaratan kekuatan sehingga tanah laterik dapat digunakan sebagai *base course in rigid pavements*. Dampak positif dari penambahan semen pada tanah dapat menghasilkan terbentuknya *ettringite, calcite, portlandite, dan calcium silicate hydrates* yang berasal terutama dari hidrasi semen.

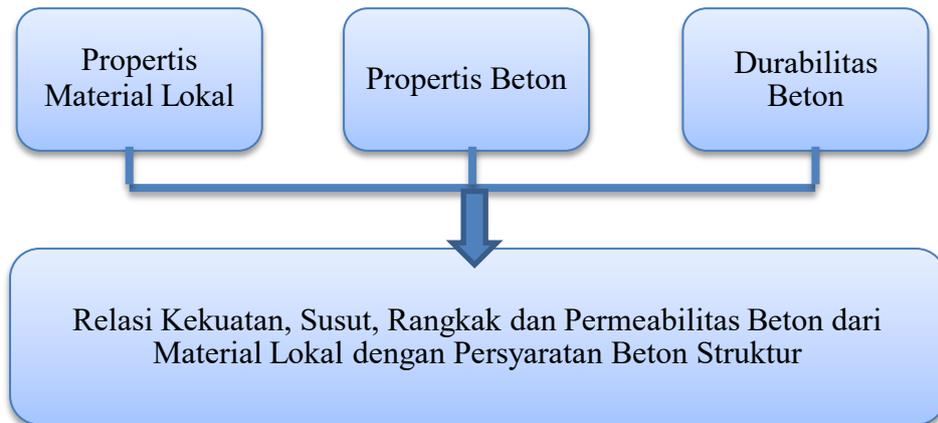
Penggunaan pasir galian berupa material lokal di Kabupaten Merauke Papua sebagai pengganti material yang didatangkan dari luar Provinsi Papua sebagai agregat penyusun beton, penting dilakukan observasi untuk mendapatkan hasil uji baik sifat fisika maupun sifa kimia material. Juga kemungkinan terdapatnya sifat material yang dapat meningkatkan kualitas beton dan atau sebaliknya. Kedua sifat material tersebut penting untuk diketahui, sehingga dapat dianalisis keterpenuhannya apakah memiliki sifat yang baik sebagai agregat beton. Relasi sifat fisika maupun sifat kimia pasir galian dengan sifat beton penting untuk dianalisis untuk mengetahui keterpenuhan propertis dan durabilitas beton dari material tersebut. Terdapat banyak hal yang berhubungan dengan propertis dan durabilitas beton, namun pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap antara lain sifat kimia dan fisika material, sifat mekanis matriks mortar dan beton, perilaku susut dan rangkak serta permeabilitas seperti pada Gambar 2.23 peta jalan penelitian dan Gambar 2.24 dan Gambar 2.25 kerangka berpikir dan rencana penelitian.



Gambar 2.23. Peta jalan penelitian



Gambar 2.24. Kerangka Berpikir



Gambar 2.25. Rencana penelitian