



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. PEKERJAAN TIMBUNAN

2.1.1. Deskripsi Pekerjaan Timbunan

Pekerjaan penimbunan meliputi pengumpulan material, pengangkutan, penempatan di lokasi baru, serta pemadatan tanah yang diinginkan atau material granular untuk konstruksi timbunan. Selain itu, penimbunan juga didefinisikan sebagai kegiatan meletakkan atau menambah volume material yang sejenis atau material lain dengan tujuan untuk meratakan permukaan yang berupa lubang sebelumnya atau meninggikan elevasi permukaan untuk mendapatkan kondisi permukaan tanah yang lebih baik (Clements, 1982). Sedangkan timbunan sendiri yakni material yang ditempatkan diatas kondisi tanah asli sebelumnya. Pekerjaan timbunan yang sering kita jumpai dalam kegiatan konstruksi sipil antara lain persiapan pembangunan jalan, persiapan lahan untuk bangunan di lokasi tanah lunak, pembuatan tanggul, bendungan, kegiatan reklamasi pantai, dan lain sebagainya.

Tipe-tipe timbunan dibagi menjadi: *Common Embankment*, *Selected Embankment*, *Selected Embankment for Swampy Areas*, dan *Granular Structural Fill*.¹

- ❖ *Common Embankment* yakni penimbunan biasa yang dilakukan tanpa prosedur khusus untuk selanjutnya.
- ❖ *Selected Embankment* yakni penimbunan yang ditujukan untuk perbaikan daya dukung tanah subgrade atau perbaikan struktur lereng. Penimbunan ini juga dapat digunakan pada area yang mempunyai kadar air tinggi atau tempat serupa dimana jika menggunakan material plastis *common embankment* akan sulit untuk dipadatkan dengan hasil memadai. Proses

¹ Widjojo A. Prakoso, Ir. M.Sc. Ph.D, Kuliah Metode Konstruksi Geoteknik, 12 Februari 2007.



pemadatan untuk timbunan ini membutuhkan prosedur yang teliti dan diperhitungkan sebelumnya.

- ❖ *Selected Embankment for Swampy Areas* yakni penimbunan yang diperlukan untuk menutup genangan air pada daerah rawa atau sejenisnya. Metode ini ditujukan untuk menurunkan level muka air tanah yang tidak bisa dikeringkan pada daerah rawa tersebut.
- ❖ *Granular Structural Fill* digunakan untuk drainase pada timbunan, material yang digunakan biasanya koral dengan ukuran kecil yang dapat diresapi air secara mudah dan cepat.

2.1.2. Ketentuan Dimensional

Dalam pelaksanaan pekerjaan timbunan terdapat ketentuan yang harus dipenuhi sehingga hasil pekerjaan yang dicapai sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Ketentuan-ketentuan umum yang harus dilakukan antara lain sebagai berikut:

1. Penyelesaian tingkat lapisan (*levels / grades*) setelah pemadatan tidak boleh satu centimeter lebih tinggi atau dua centimeter lebih rendah dari spesifikasi awal yang ditentukan.
2. Seluruh permukaan timbunan yang tampak harus cukup halus dan seragam dengan kemiringan yang cukup untuk aliran air permukaan (*free run-off surface water*).
3. Penyelesaian permukaan kemiringan timbunan tidak boleh tertukar dengan garis profil spesifikasi lebih dari sepuluh centimeter.
4. Timbunan tidak boleh ditempatkan pada layer melebihi dua puluh centimeter tebal kepadatan atau dalam layer kurang dari sepuluh centimeter tebal kepadatan.



2.1.3. Standar Referensi

Standar referensi yang biasa digunakan sebagai acun pekerjaan timbunan antara lain sebagai berikut:

Standar Nasional Indonesia (SNI) :

- SNI 03-3422-1994 (AASHTO T 88 - 90) : Metode Pengujian Analisis Ukuran Butir Tanah Dengan Alat Hidrometer (*Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils*).
- SNI 03-1967-1990 (AASHTO T 89 - 90) : Metode Pengujian Batas Cair dengan Alat Casagrande (*Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*).
- SNI 03-1966-1989 (AASHTO T 90 - 87) : Metode Pengujian Batas Plastis (*Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*).
- SNI 03-1742-1989 (AASHTO T 99 - 90) : Metode Pengujian Kepadatan Ringan Untuk Tanah (*Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop*).
- SNI 03-1743-1989 (AASHTO T180 - 90) : Metode Pengujian Kepadatan Berat Untuk Tanah (*Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop*).
- SNI 03-2828-1992 (AASHTO T191- 86) : Metode Pengujian Kepadatan Lapangan Dengan Alat Konus Pasir (*Standard Method of Test for Density of Soil In-Place by the Sand-Cone Method*).
- SNI 03-1744-1989 (AASHTO T193 - 81) : Metode Pengujian CBR Laboratorium (*Standard Method of Test for The California Bearing Ratio*).



American Association of State Highway and Transportation Officials
(AASHTO) :

- AASHTO T145 - 73 : Klasifikasi tanah dan agregat campuran untuk konstruksi jalan raya (*Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purpose*).
- AASHTO T258 - 78 : Penentuan tanah ekspansif dan upaya perbaikan (*Determining Expansive Soils and Remedial Actions*)
- AASHTO T310 – 03 : *In-Place Density and Moisture Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)*

2.1.4. Pemilihan Material Timbunan

Pemilihan material timbunan harus dilakukan dari sumber yang telah diketahui atau disetujui pihak yang terkait (owner, konsultan, pengawas, *engineer*, atau yang lainnya) berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan. Pemilihan material timbunan juga disesuaikan dengan jenis pekerjaan timbunan yang akan dilakukan berdasarkan ketentuan standar spesifikasi yang dijadikan acuan.

Untuk pekerjaan timbunan jenis *Common Embankment*:

Material timbunan yang diklasifikasikan sebagai *Common Embankment* harus terdiri dari tanah galian atau material batuan yang telah disetujui oleh *engineer* terkait sebagai kesesuaian untuk pekerjaan permanen yang telah ditentukan sebelumnya. Material tersebut juga dipilih secara khusus untuk menghindari penggunaan tanah lempung plastisitas tinggi dan tanah lanau kelembungan yang golongan sebagai A – 7 oleh AASHTO spesifikasi M 145 atau sebagai CH pada *Unified* atau *Casagrande Soil Classification System*. Penggunaan tanah plastisitas tinggi tidak dapat dihindari atau diizinkan, misalnya material yang hanya akan digunakan pada *backfill* yang tidak diperlukan dalam penyediaan *bearing* dan *shear strength* yang memadai. Namun, penggunaan tanah plastisitas tinggi dalam 30 cm sebagai material langsung dibawah perkerasan atau bahu *subgrade* tidak diperbolehkan sama sekali. Ketentuan timbunan tersebut dilakukan pengujian sesuai dengan SNI 03-1744-1989, dengan



nilai CBR tidak kurang dari 6 % setelah empat hari perendaman (*soaking*) ketika dipadatkan hingga 100% dari maksimum *dry density* sesuai ketentuan SNI 03-1742-1989.

Tanah ekspansif tinggi yang memiliki *activity value* (nilai aktivitas) lebih tinggi dari 1,25 atau satu derajat perluasan diklasifikasikan oleh AASHTO sebagai *Very High* atau *Extra High expansive soils*. Jenis tanah tersebut tentunya tidak diperbolehkan untuk digunakan sebagai material timbunan. *Activity value* pada tanah timbunan juga dapat diukur dengan ketentuan sebagai *ratio Plasticity Index* (SNI 03-1966-1989) atau *Percent Clay Sizes* (SNI 03-3422-1994).

Untuk pekerjaan timbunan jenis *Selected Embankment*:

Timbunan akan diklasifikasikan sebagai *selected embankment* ketika digunakan pada lokasi dan tujuan tertentu dimana jenis *selected embankment* telah dispesifikasikan dan diperlihatkan pada rencana awal atau kesepakatan lain yang tertulis pada *planning engineer*. Timbunan yang diklasifikasikan sebagai *selected embankment* harus terdiri dari tanah atau material batuan yang bertemu semua dengan bagian atas material yang digunakan untuk *selected embankment* dan dalam penambahan harus memenuhi ketentuan kebutuhan prorerti lainnya, tergantung pada kegunaan yang diharapkan sesuai permintaan atau persetujuan pihak *engineer*. Dalam semua aplikasi, material timbunan *selected embankment* harus dites dengan ketentuan SNI 03-1744-1989, memiliki nilai CBR sekurang-kurangnya 25% setelah empat hari perendaman (*soaking*) ketika dipadatkan hingga 100% dari maksimum *dry density* sesuai ketentuan SNI 03-1742-1989.

Pada saat digunakan dalam situasi dimana kondisi pemadatan *under saturated* atau kondisi banjir yang tidak dapat dihindari, *selected embankment* harus menggunakan material *sand* (pasir) atau *gravel* (koral) atau material granular lainnya dengan maksimum indeks plastisitas 6%. Ketika digunakan pada lereng atau pekerjaan stabilisasi timbunan atau situasi yang lainnya dimana *shear strength* yang memadai sangat penting dibutuhkan, tetapi kondisi normal *dry compaction* berlaku *selected embankment* boleh menggunakan timbunan batu, *clayey gravel* bergradasi baik, *sandy clay*, atau lempung dengan plastisitas rendah. Tipe material yang diseleksi atau disetujui oleh *engineer* tergantung pada



kecuraman lereng yang dibangun atau diisi serta *bearing pressure* yang didukung. Ketika digunakan sebagai lapisan *capping subgrade material selected embankment* harus ditempatkan dalam ketebalan 250 mm atau disesuaikan dengan perencanaan yang ditetapkan. Material *selected embankment* harus seragam gradasi agregat kasar dengan ukuran material tidak lebih besar dari 63 mm dan tidak lebih dari 15% lolos saringan 37,5 mm.

Untuk pekerjaan timbunan jenis *Selected Embankment for Swampy Areas*:

Material pilihan timbunan untuk daerah rawa sedapat mungkin harus berupa pasir atau koral atau material granular murni lainnya dengan maksimum indeks plastisitas 6%. Timbunan pada area ini dapat diperkuat dengan pemasangan geogrid sebagai langkah antisipasi terjadi longsor pada sisi timbunan.

Untuk pekerjaan timbunan jenis *Granular Structural Fill*:

Timbunan diklasifikasikan sebagai *granular structural fill* ketika digunakan pada sisi *abutment* didepan dinding, sayap dinding (*wing walls*), *retaining walls*, dan sisi dinding gorong-gorong sesuai yang ditunjukkan atau yang direncanakan oleh *engineer*. Timbunan yang diklasifikasikan sebagai *granular structural fill* harus menyediakan karakteristik drainase yang baik dengan memperlihatkan tidak lebih 4% dari berat lolos saringan 0,074 mm ketika dites berdasarkan SNI 03-3422-1994 dan harus memiliki properti gradasi tergantung pada penggunaan sebagai berikut:

- Setiap 0,1 m³ mengandung koral murni atau yang dihancurkan menyesuaikan gradasi GP dalam *Unified System*, harus ditempatkan pada punggung lubang saluran.
- Setiap 1 m tebal lapisan dari medium hingga pasir koarsa atau koral murni menyesuaikan gradasi SW atau GW dalam *Unified System*, harus ditempatkan berlawanan dengan tanah sisi-sisi dari *abutment*, *wingwalls*, *retaining walls*, dan sisi dinding gorong-gorong perpanjangan dari pijakan (*footings*) bawah atau elemen bawah hingga bagian sisi bawah mendekati bidang (*run-on-slabs*) atau *subbase* timbunan.



2.2. MATERIAL TIMBUNAN RINGAN

Seperti yang telah dibahas sebelumnya pemilihan material timbunan disesuaikan dengan jenis pekerjaan timbunan yang didesign sebelumnya. Material tersebut pada umumnya berupa material yang diambil langsung dari alam berupa tanah urug, pasir, koral, dan batuan. Material yang dipilih tersebut untuk kemudian disesuaikan dengan spesifikasi yang diinginkan misalnya nilai CBR, ukuran gradasi, nilai plastisitas dan lain sebagainya. Pemilihan material alam tersebut pada umumnya dilakukan pada pekerjaan timbunan yang hanya bertujuan untuk meratakan atau meninggikan elevasi permukaan serta tidak terdapat permasalahan yang signifikan mengenai tanah dasar (*subgrade*).

Namun, pada pekerjaan timbunan yang menempati tanah dasar lunak diupayakan pemilihan material timbunan dengan berat jenis ringan. Berat jenis ringan yang dimaksud dalam hal ini yakni lebih kecil dari 18 kN/m^3 sebagai berat jenis rata-rata tanah urug pada umumnya. Material ringan dari alam yang dapat diambil untuk timbunan sebagai contoh adalah batu apung dengan berat jenis $4,8 - 9,6 \text{ kN/m}^3$ (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara, 2005). Sedangkan material ringan lainnya berupa material buatan atau modifikasi dari berbagai bahan untuk kemudian dimodifikasi sedemikian hingga menjadi material ringan dengan berat jenis lebih ringan dari tanah urug pada umumnya. Sebagai contoh material ringan timbunan yang telah dikembangkan antara lain material ringan dari bahan dasar ban bekas, gelas, sisa batu bara, kelapa sawit, dan material sintetis lainnya.

Dalam pekerjaan yang berhubungan dengan geoteknik, geomaterial dengan berat jenis ringan dikembangkan atau yang sering digunakan sebagai material timbunan untuk konstruksi jalan raya. Material dengan berat jenis lebih ringan meminimalisasi kebutuhan pondasi, mengurangi pengupasan lahan (*land cutting*) pada area perbukitan, mencegah/mengurangi *settlement*, dan mempercepat waktu konstruksi. Pada perkuatan dinding penahan tanah, timbunan dengan berat jenis lebih ringan akan mengurangi tekanan lateral sehingga mengurangi kebutuhan struktural dinding termasuk pondasi dengan demikian dapat menghemat biaya konstruksi.



2.2.1. Material Ringan Dari Batu Apung

Batu apung (*pumice*) adalah jenis batuan yang berwarna terang, mengandung buih yang terbuat dari gelembung berdinding gelas, dan biasanya disebut juga sebagai batuan gelas vulkanik silikat. Batuan ini terbentuk dari magma asam oleh aksi letusan gunungapi yang mengeluarkan materialnya ke udara, kemudian mengalami transportasi secara horizontal dan terakumulasi sebagai batuan *piroklastik*. Batu apung mempunyai sifat *vesicular* yang tinggi, mengandung jumlah sel yang banyak (berstruktur selular) akibat ekspansi buih gas alam yang terkandung di dalamnya, dan pada umumnya terdapat sebagai bahan lepas atau fragmen-fragmen dalam breksi gunung api. Sedangkan mineral-mineral yang terdapat dalam batu apung adalah *feldspar*, *kuarsa*, *obsidian*, *kristobalit*, dan *tridimit*.

Jenis batuan lainnya yang memiliki struktur fisika dan asal terbentuknya sama dengan batu apung adalah *pumicit*, *vulkanik cinter*, dan *scoria*. Didasarkan pada cara pembentukan, distribusi ukuran partikel (fragmen), dan material asalnya, batu apung diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu: *sub-areal*, *sub-aqueous*, *new ardante*, dan hasil endapan ulang (*redeposit*). Sifat kimia dan fisika batu apung antara lain, yaitu: mengandung oksida SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO , CaO , TiO_2 , SO_3 , dan Cl , hilang pijar (*Loss of Ignition*) 6%, pH 5, bobot isi ruah 480 – 960 kg/m^3 , peresapan air (*water absorption*) 16,67%, berat jenis 0,8 gr/cm^3 , hantaran suara (*sound transmission*) rendah, rasio kuat tekan terhadap beban tinggi, konduktifitas panas (*thermal conductivity*) rendah, dan ketahanan terhadap api sampai dengan 6 jam. Keterdapatannya batu apung selalu berkaitan dengan rangkaian gunung api berumur kuartar sampai tersier. Penyebaran mineral ini meliputi daerah Serang, Sukabumi, Pulau Lombok, dan Pulau Ternate².

Aplikasi penggunaan batu apung sebagai material ringan antara lain sebagai agregat yang dipakai untuk campuran beton. Dengan berat ringan yang dimilikinya telah memenuhi persyaratan sebagai agregat untuk beton ringan seperti yang tercantum dalam ASTM C 330 - 89 dan BS 8110 *part 3*. Metode

² Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batu bara, 2005.



perencanaan campuran (mix design) yang dipakai adalah metode *specific gravity factor method-pycnometer* basis dan ACI 211.2 - 91. Benda uji berupa silinder sebanyak 104 buah dan pengujian dilakukan terhadap perkembangan kuat tekan beton umur 3, 7, 14, dan 28 hari serta kuat tarik umur 28 hari. Hasil dan penelitian laboratorium menunjukkan bahwa beton ringan dengan menggunakan agregat kasar batu apung mempunyai berat volume yang lebih rendah dari beton normal dan mempunyai kekuatan tekan yang memenuhi syarat untuk komponen struktural ringan³.

Demikian juga dalam pekerjaan geoteknik, penggunaan material ringan timbunan dari batu apung dapat diaplikasikan sebagai upaya pengurangan *settlement* akibat beban sendiri timbunan. Mengenai *strength* yang diperlukan, sesuai dengan pengujian untuk material beton diatas, dan nilai permeabilitas sebesar 16,67% cukup memadai untuk konstruksi timbunan sehingga dapat mengurangi konstruksi tambahan untuk drainase.

2.2.2. Material Ringan Dari Ban Bekas

Penggunaan material ringan dari bahan dasar ban bekas dilatar belakangi semakin banyaknya pembuangan ban bekas yang terdapat pada tempat pembuangan sampah. Dengan jumlah yang semakin banyak menjadikan kondisi yang berbahaya jika pemusnahan ban bekas tersebut dilakukan dengan cara dibakar. Disaat yang sama, perkembangan konstruksi geoteknik memunculkan ide, teknik dan penggunaan Material alternatif berdasarkan inovasi-inovasi yang terus berkembang.

Melihat kondisi tersebut, muncul ide bahwa ban bekas dapat digunakan sebagai material ringan timbunan dalam bentuk ban utuh, diparut/dihancurkan, atau dicampur dengan tanah. Banyak studi berhubungan dengan penggunaan ban bekas dalam aplikasi geoteknik yang telah dilakukan khususnya sebagai material timbunan. Studi tersebut termasuk penyelidikan laboratorium, model fisika dan

³ Handoko Sugiharto, *Studi Penggunaan Batu Apung Untuk Beton Ringan Sebagai Komponen Struktural*, Petra Christian University Research Centre, 2004.



numerik, serta investigasi lapangan (Ahmed and Lovell, 1993; Bernal, 1996; Masad, 1996; Lee, 1999; Chu and Shakoor, 1997; Tweedie, 1998, Bergado and Youwai, 2002; Humphrey and Tweedie, 2002; and Edil, 2002; dan masih banyak lainnya). Prosedur persiapan modifikasi Material ringan dari ban bekas dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Ban bekas dipotong/dihancurkan sehingga potongan tersebut hanya berupa karet, sedangkan kandungan besi atau kawat pada ban bekas telah dibuang sebelumnya.
2. Properti geoteknik dari potongan tersebut tergantung pada seberapa besar tingkat kepadatan dan kuantitas dari pasir atau tanah yang dicampur dengan material tersebut.
3. OPC digunakan sebagai dasar proses pencampuran material dengan semen. Design bervariasi dilakukan dengan rasio yang berbeda dari OPC pada potongan material, penambahan zat/agen pengikat, penambahan material pengganti OPC, penambahan busa cair, atau perbedaan rasio *water- cement* (WC).
4. Spesimen disiapkan dengan pencampuran manual (*hand-mixing*) dan ditempatkan kedalam 70,7 mm cetakan yang dituangkan dan dipadatkan dengan vibrator selama 15 detik.

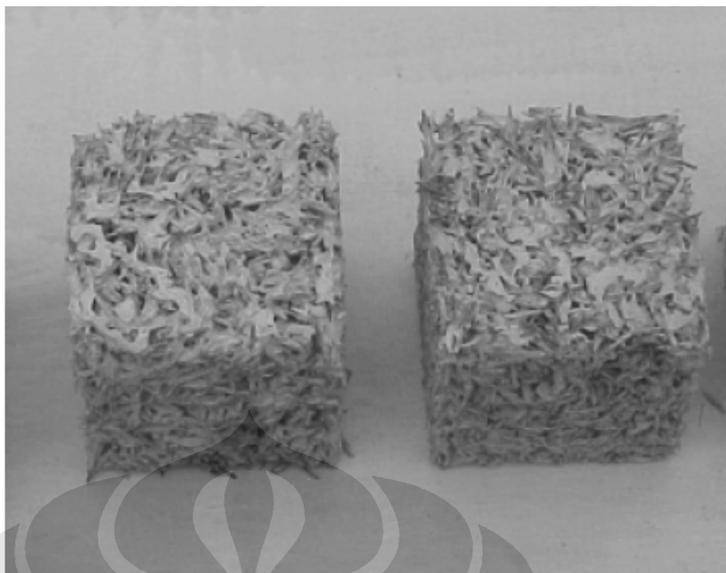
Gambar 2.2.2.a. Persiapan Potongan Ban Bekas untuk Spesimen Percobaan



Sumber: Naser Ghani, University Sains Malaysia



Gambar 2.2.2.b. Spesimen untuk Pengetesan



Sumber: Naser Ghani, *Shredded Scrap Tire Based Lightweight Geomaterial For Civil Engineering Works*

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.2.b, spesimen dicetak kedalam bentuk kubus untuk kemudian dilanjutkan tahap pengetesan. Kepadatan dan konsistensi spesimen dicek saat cetakan dibuka setelah satu hari pengambilan dan menghasilkan akurasi 95% nilai rata-rata.

Tahap Pengetesan:

Spesimen geomaterial dari berbagai macam design campuran yang dibuat dilakukan pengetesan untuk mengetahui karakteristik kekuatan (*strength*) dan kompresibilitas dengan menggunakan mesin tekan yang secara khusus disiapkan untuk pengetesan material ringan yang bersifat kompresibel. Spesimen dites untuk mengetahui karakteristik leleh (*yielding behavior*), kemudian tujuan utama dari pengetesan tersebut yakni untuk mengidentifikasi karakteristik kekuatan (*strength*) dan kompresibilitas serta parameter lainnya yang berhubungan dengan properti geoteknik untuk digunakan dalam design dan pemodelan pekerjaan geoteknik. Studi properti lainnya yang termasuk antara lain densitas (γ), *secant modulus* (E_{50}), kompresif stress, strain, porositas dan permeabilitas.



Densitas dari setiap spesimen diidentifikasi terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan uji tekan. Sebuah mesin uji tekan umum disiapkan untuk pengujian, dengan pemberian beban ringan hingga gaya 2000 N diterapkan dan alat *transducer* untuk mengukur strain dari spesimen yang diuji. Kecepatan pembebanan untuk semua pengetesan adalah 1 mm/menit, sedangkan umur spesimen selama pengetesan yakni 7 hari setelah pencetakan. Spesimen yang diuji harus telah dilakukan curing dalam temperatur kamar dan didalam ruangan. Sebagai contoh pengujian yang dilakukan oleh A. Naser Ghani (*School of Civil Engineering, Universiti Sains Malaysia*) tiga spesimen disiapkan untuk pengetesan, masing-masing spesimen ditekan melebihi 5% tingkat leleh (*yield*) dan hingga mengalami kegagalan (*failure*). Banyak beberapa kompresibel spesimen tidak mengalami kegagalan diatas 20% deformasi. Pada kasus tersebut pemberian tekanan diakhiri pada tingkat strain 20%. Pengujian permeabilitas dan karakteristik drainase dilakukan dengan menggunakan metode pengujian permeabilitas constant head. Sampel dibuat *pre-cast* dalam kontainer dan diuji setelah tujuh hari.

Gambar 2.2.2.c. Tes *Yielding* pada Spesimen



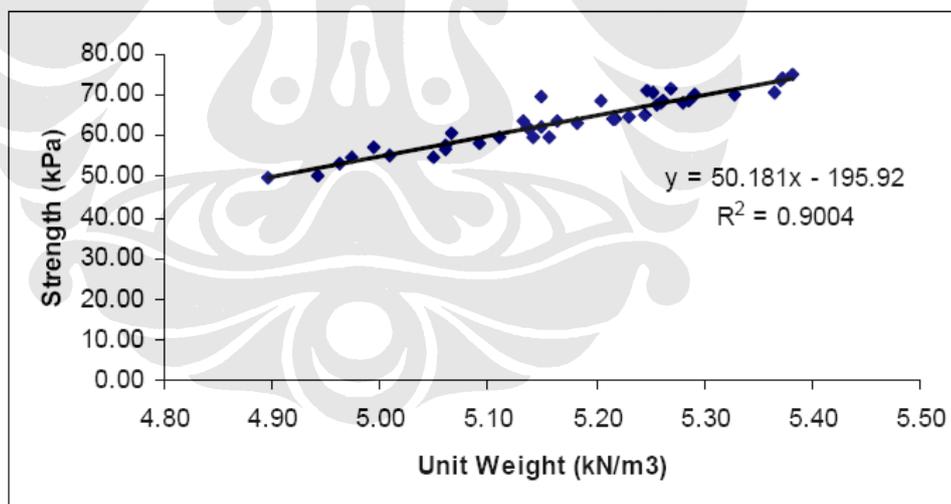
Sumber: (*ibid.*)



Densitas dan Kompresibel *Strength*

Hasil mengindikasikan bahwa *strength* memiliki hubungan yang linear terhadap densitas, semakin besar nilai densitas maka *strength* yang dihasilkan juga semakin besar. Peninjauan densitas dilakukan melalui dua cara untuk mendapatkan data statistik spesimen. Pemadatan dilakukan pada satu kelompok spesimen dengan *rodding* dan yang lainnya dilakukan dengan cara diberi getaran. Kontrol vibrasi pada spesimen memberikan konsistensi lebih baik dari densitas dalam 3% hingga cukup, sedangkan *rodding* pada spesimen mengindikasikan variasi yang lebih luas yakni 5% hingga cukup. Untuk itu, persiapan kontrol vibrasi dipilih untuk penerapan berikut dan persiapan-persiapan spesimen yang lain. Hubungan antara densitas dan *strength* spesimen yang telah disiapkan dengan kontrol vibrasi dapat dilihat pada grafik 2.2.2.a. berikut, nilai R^2 dari hubungan tersebut adalah lebih dari 0,9 dan dapat disimpulkan bahwa densitas yang lebih besar menghasilkan kompresif *strength* yang lebih besar pula.

Grafik 2.2.2.a. Hubungan Nilai Densitas dan Kompresif *Strength*



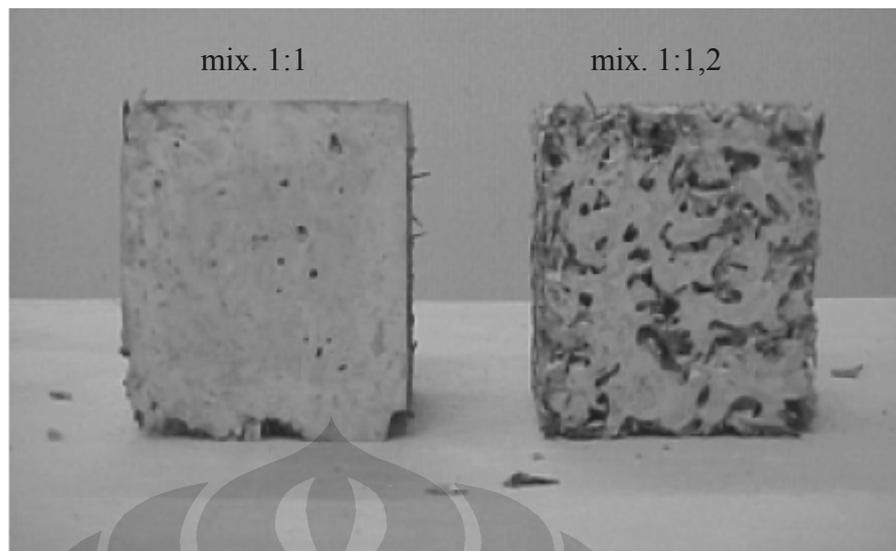
Sumber: (*ibid.*)

Efek Proporsi Campuran

Dalam kategori ini, perbedaan rasio OPC pada potongan material digunakan, kandungan semen dalam campuran diproporsikan antara lain 1:1; 1:1.2, 1:1.4, 1:1.5, 1:1.6, 1:1.8, dan 1:2 dengan rasio *water cement* 0,6. Berikut adalah contoh sampel segregasi pasta semen dari proporsi campuran :



Gambar 2.2.2.d. Segregasi Pasta Semen



Sumber: (*ibid.*)

Tabel berikut menunjukkan efek kandungan semen dalam design campuran sehubungan dengan kompresif *strength*, modulus elastis, dan deformasi pada kondisi maksimum *strength*:

Tabel 2.2.2.a. Efek dari Kandungan Semen

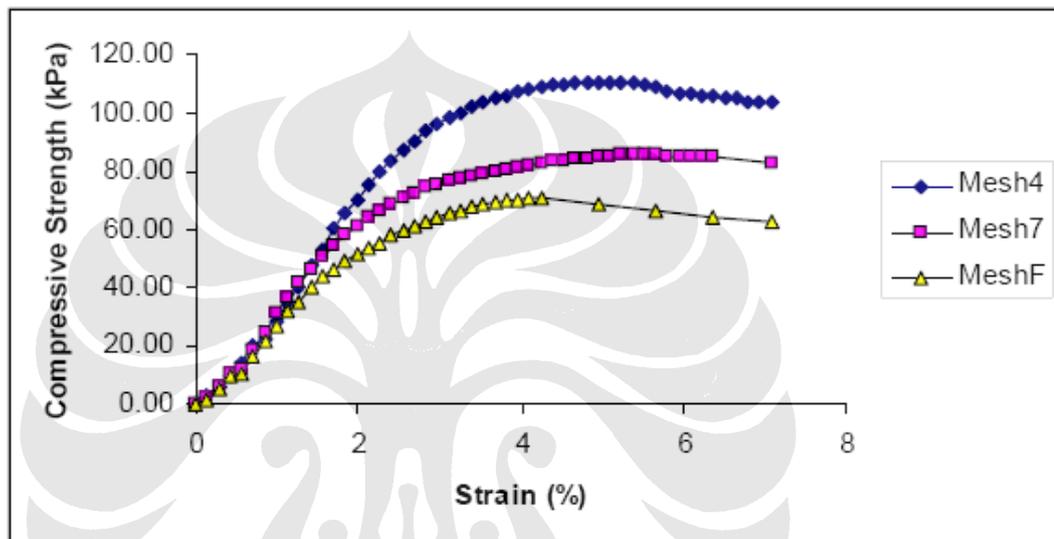
SPECS	UNIT WT	Max Stress	Secant Modulus E50	Modulus @2.5% Strain
	kN/m ³	kPa	kPa	kPa
1:1.4-1	5.27	92.67	2706.70	2931.61
1:1.4-2	5.38	110.51	3116.45	3228.12
1:1.4-3	5.25	93.39	3254.60	2982.95
1:1.5-1	5.22	95.21	2882.86	3010.37
1:1.5-2	5.33	97.87	3352.19	3260.48
1:1.5-3	5.19	88.17	3361.62	2854.66
1:1.6-1	4.85	60.32	2100.42	1980.40
1:1.6-2	5.02	74.46	2383.95	2647.49
1:1.6-3	4.98	67.30	2605.69	2466.66
1:1.8-1	4.52	43.01	1875.88	1621.73
1:1.8-2	4.83	58.70	2454.03	2114.99
1:1.8-3	4.66	52.18	2128.71	1947.44
1:2-1	4.48	41.81	1847.60	1608.20
1:2-2	4.67	52.60	2141.09	2015.91
1:2-3	4.54	45.41	1762.73	1724.68
R Squares to Unit Wt.		0.9729609	0.859823	0.972070545

Sumber: (*ibid.*)



Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa, kandungan semen lebih besar akan meningkatkan nilai *strength*, densitas dan modulus dari material geokomposit. Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa, densitas, *strength* dan deformasi hingga 2,5% strain menunjukkan keterkaitan yang signifikan. Kemudian, pengaruh ukuran potongan terhadap *strength* dapat ditunjukkan pada grafik berikut:

Grafik 2.2.2.b. Kompresif *Strength* Vs. *Strain*
Pengaruh Ukuran Potongan Terhadap Kekuatan (*Strength*)



Sumber: (*ibid.*)

Karakteristik Drainase

Dari penggunaan geokomposit material ringan tersebut dapat dibandingkan karakteristik drainase dengan material konvensional timbunan lain yakni tertera pada tabel berikut:

Tabel 2.2.2.b. Karakteristik Drainase

	Geocomposite	Sand	Gravel
Permeability, K (cm/s)	45 - 75	0.1 - 10	1 - 100
Porosity, n	0.38 - 0.54	0.16 - 0.49	0.12 - 0.46

Sumber: (*ibid.*)

Nilai koefisien permeabilitas dari material ringan ban bekas berdasarkan hasil uji menunjukkan lebih besar dari material pasir, dan nilai porositasnya juga lebih



besar dari pasir. Untuk itu, material geokomposit ini cocok digunakan sebagai timbunan dan memperkecil upaya pembuatan konstruksi drainase tambahan.

2.2.3. Material Ringan *Expanded Polystyrene (EPS) Geofom*⁴

Dalam struktur pekerjaan geoteknik seperti timbunan, massa dari material timbunan mendominasi beban-baban gravitasi dan design seismik. Pengurangan beban-baban tersebut merupakan alasan utama secara signifikan terhadap penggunaan material ringan timbunan (*low-density*) pada pekerjaan tanah. Sebagai contoh ketertarikan global terhadap perkembangan terbaru tentang design dan pedoman spesifikasi pengembangan variasi penggunaan material-material ringan (*Matériaux*, 1997) termasuk material-material ringan yang terdapat di Amerika Serikat. *Federal Highway Administration* (FHWA) secara singkat telah mengembangkan sebagai bagian dari demonstrasi proyek FHWA 116 untuk metode perkuatan/perbaikan tanah.

Expanded Polystyrene (EPS), merupakan tipe dari busa plastik (*plastic foam*) yang telah diperkenalkan sebagai material pilihan pada sebagian besar pekerjaan tanah yang menggunakan material ringan. EPS adalah salah satu tipe dari *geofom* yang mana bersama dengan *geocomb* dikenal sebagai golongan dari *cellular geosynthetics*. Ketika EPS dikenal memiliki banyak fungsi aplikasi yang berbeda (Horvath, 1995), pengenalan yang paling tepat dan sebagian besar secara luas yang biasa digunakan hingga saat ini adalah sebagai material ringan timbunan.

Contoh aplikasi penggunaan EPS *geofom* sebagai Material ringan timbunan yakni proyek konstruksi jalan raya Boston dan Massachusetts Amerika Serikat. Ketika digunakan sebagai material ringan timbunan, EPS dimodelkan secara tipikal dalam bentuk blok-blok prisma dengan ukuran 600x1200x2400 mm. Dalam bentuk ini EPS disebut sebagai *EPS-block geofom*. Blok-blok

⁴ Hany L. Riad, Ph.D., P.E.; Anthony L. Ricci, P.E.; Peter W. Osborn; John S. Horvath, Ph.D., P.E., *Expanded Polystyrene (EPS) Geofom for Road Embankments and Other Lightweight Fills in Urban Environments*



tersebut dapat digunakan dalam ukuran penuh atau dipotong di tempat fabrikasi untuk menyesuaikan kebutuhan spesifik geometrik jalan.

Design EPS

EPS hanya memiliki densitas 1% hingga 2% dari densitas tanah, batu atau beton semen portland (*portland-cement concrete* (PCC)). Kondisi ini sangat unik karena EPS memiliki densitas yang lebih rendah secara signifikan dari semua material ringan timbunan seperti busa PCC (*foamed PCC*), serpihan batu ringan, potongan/parutan ban bekas, serat kayu dan blok-blok geocomb (*Matériaux*, 1997). Disamping memiliki keunikan densitas rendah, EPS memiliki nilai rasio *strength* terhadap densitas yang tinggi dan standar tipe material yang terdapat di seluruh dunia yang dapat mendukung kompresif stres dalam jangka panjang hingga kira-kira 100 kPa. Indeks ini dapat dibandingkan dengan banyak jenis tanah dan dengan penyesuaian antara design dan konstruksi sudah lebih dari cukup untuk mendukung beban kendaraan bermotor, kereta api, pesawat terbang dan struktur bangunan ringan.

Karena keunikan memiliki densitas rendah, penggunaan EPS sebagai material ringan timbunan secara umum tidak membutuhkan tambahan penggunaan teknik perbaikan tanah seperti *preloading* atau pencampuran tanah, ketika kondisi tanah lunak terdapat pada lokasi proyek. Kondisi ini memberikan keuntungan yakni dapat mengurangi biaya dan dapat mempercepat penyelesaian konstruksi. EPS berwujud padat, bukan suatu material khusus seperti tanah, campuran serpihan batu, atau material sisa seperti ban bekas. Sebagai hasil, timbunan yang terdiri dari blok-blok EPS secara utuh dalam kondisi stabil terhadap sisi vertikal kemiringan. Keadaan ini memberikan banyak manfaat termasuk pengurangan material dan biaya konstruksi seperti meminimalkan penggunaan kebutuhan lahan pada wilayah penataan kota.

Konstruksi EPS

Blok-blok EPS yang dirancang tipikal tiba dilokasi proyek dengan ukuran dan bentuk yang disesuaikan untuk kemudian siap ditempatkan. Konstruksi dapat dilakukan disemua kondisi pada temperatur dan cuaca bagaimanapun. Untuk

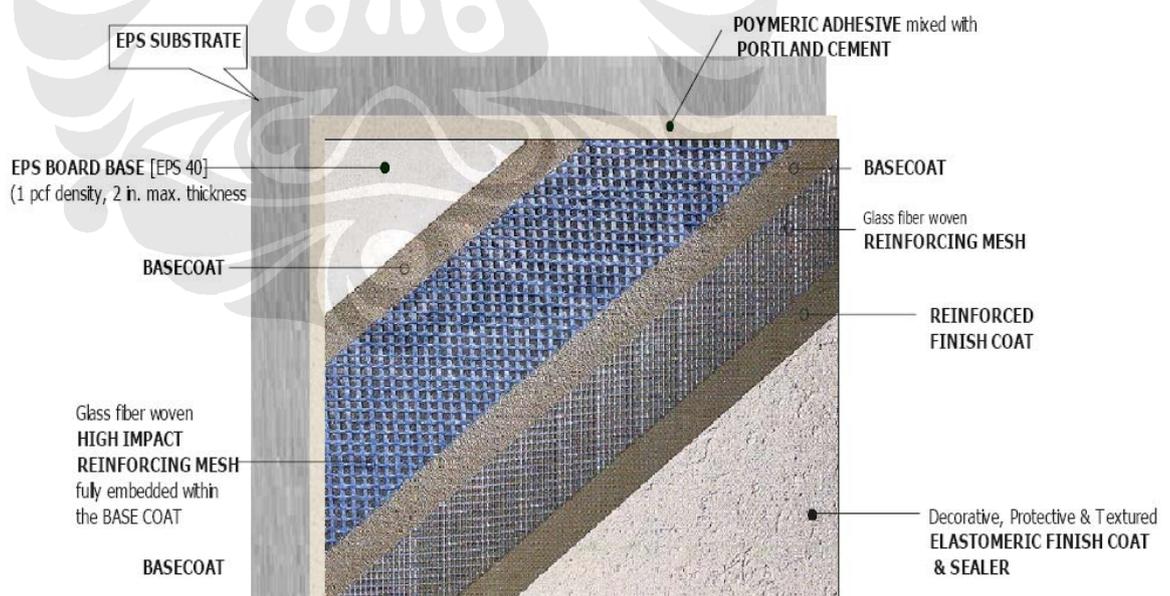


memasang blok-blok EPS hanya membutuhkan tenaga kerja biasa yang tidak membutuhkan *skill* khusus. Pada saat konstruksi EPS juga tidak menimbulkan kebisingan, debu atau bau secara langsung sebagai akibat penggunaan EPS dan secara khusus merupakan masalah penting jika diterapkan pada lingkungan perkotaan.

EPS juga memiliki sifat ramah lingkungan dan aman selama proses pembuatan, konstruksi dan penempatan di dalam tanah. Tidak seperti busa plastik yang lainnya, EPS tidak menimbulkan gas yang membahayakan lapisan atmosfer bumi khususnya ozon pada saat pembuatan dan tidak berpotensi menimbulkan gas berbahaya pada saat ditempatkan di dalam tanah. Tidak seperti material sisa lainnya yang digunakan sebagai material ringan timbunan, EPS tidak berpotensi mengalami perubahan kimia atau terjadi reaksi di dalam tanah yang mengakibatkan pembakaran secara konstan atau menimbulkan unsur toxic yang berbahaya.

Gambar 2.2.3. a. Penampang Melintang

Exterior Insulation and Finishing System (EIFS) dengan Substrat EPS



Sumber: Hany L. Riad, Ph.D., P.E.; Anthony L. Ricci, P.E.; Peter W. Osborn; John S. Horvath, Ph.D., P.E., *Design of Lightweight Fills for Road Embankments on Boston's Central Artery/Tunnel Project, 2004*



2.2.4. Material Ringan Dari Abu Terbang (*Fly-Ash*) Batu Bara⁵

Untuk mempertemukan *gap* dalam berat jenis antara timbunan EPS dan agregat-agregat ringan lainnya, Southern Illinois University (SIU) telah mengembangkan campuran *controlled low strength material* (CLSM) yang dapat digunakan untuk membuat material ringan timbunan yakni menggunakan bahan dasar abu terbang batu bara. Berat jenis dari CLSM dapat divariasikan dari 30 hingga 110 lb/ft³ dan dapat digunakan sebagai material timbunan dengan cara pengecoran atau penempatan langsung (*pre-cast*) dalam bentuk yang bermacam-macam. CLSM telah digunakan di berbagai negara selama hampir 40 tahun. CLSM merupakan material yang dapat mengalami pemadatan sendiri dan merupakan Material sementasi yang dapat digunakan untuk penggantian timbunan yang dipadatkan. Karena CLSM memiliki properti sementasi dan mungkin membutuhkan untuk dilakukan penggalian/pemindahan dikemudian hari, kompresif *strength* harus kurang dari 1200 Psi. Sering kali, *strength* yang dibutuhkan kurang dari 200 Psi agar mudah dilakukan penggalian/pemindahan dikemudian hari.

Terdapat banyak perbedaan campuran CLSM yang digunakan di berbagai tempat, tetapi SIU telah menemukan komposisi campuran paling ekonomis yakni terdiri dari sekitar 300 pound semen portland, 200 pound abu terbang dan 600 pound air. Tanpa penambahan pemasukan udara, komposisi ini dapat menyediakan kompresif *strength* sekitar 500 Psi. Karena sejumlah udara yang masuk dalam campuran CLSM bertambah, maka *strength* dan berat jenisnya bisa berkurang.

Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Abu Terbang

Beberapa keuntungan dalam penggunaan abu terbang adalah menggunakan material sisa yang biasanya menempati tempat pembuangan sampah sehingga dapat mengurangi volume sampah ditempat tersebut. Kemudian produk dari abu terbang dapat digunakan sebagai elemen padat *pre-cast* atau digunakan sebagai

⁵ E. Bane Kroeger, P.E., *Use of Lightweight Flyash Blocks to Construct Fills on Sensitive Soils*, Department of Mining and Mineral Resources Engineering, Southern Illinois University



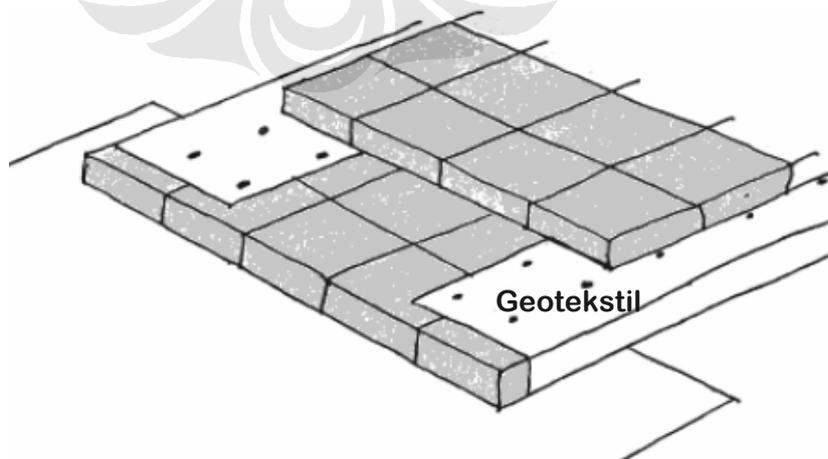
material pengecoran pada timbunan. Keuntungan menggunakan blok-blok abu terbang dengan berat jenis yang lebih ringan dan *strength* yang dimilikinya ialah dapat secara mudah dipotong dan dibentuk dengan tangan manual atau alat-alat berat.

Beberapa kerugian dalam menggunakan abu terbang adalah beberapa peraturan kota/daerah mungkin tidak mengizinkan penggunaan material abu terbang untuk struktur timbunan. Properti material dari blok-blok abu terbang bisa berubah-ubah (variabel) terhadap waktu karena perubahan pembakaran batu bara pada pembangkit listrik dan sumber material abu terbang mungkin sangat sulit ditemukan di beberapa tempat. Kerugian lain dalam menggunakan blok-blok abu terbang yakni biaya yang cukup mahal. Biaya dapat bervariasi sesuai dengan *strength* yang dihasilkan dari blok-blok tersebut, tetapi secara tipikal rentang biayanya antara \$ 25 /yd³ hingga \$ 55/yd³.

Konstruksi Bolok-blok Abu Terbang

Untuk proyek konstruksi dimana perkuatan lateral diperlukan, geotekstil atau geogrid dapat disisipkan diantara lapisan dan celah dari blok-blok yang ditempatkan. Kondisi ini akan saling mengikat antar blok-blok tersebut dan menyediakan nilai yang besar untuk perkuatan lateral dalam timbunan.

Gambar 2.2.4.a. Blok Timbunan Abu Terbang (*Fly-Ash*) dengan Perkuatan Lateral Geotekstil



Sumber: E. Bane Kroeger, P.E, Southern Illinois University



Selubung protektif terhadap tanah asli dapat ditambahkan pada sisi timbunan untuk menjaga timbunan terhadap infiltrasi air permukaan dan menjaga geotekstil terhadap kerusakan.

2.2.5. Material Ringan Dari Busa Kaca (*Foam Glass*)⁶

Sebuah proyek penelitian oleh Norwegian Public Road Administration (NPRA) mengemukakan penyelidikan kemungkinan penggunaan aplikasi material ringan untuk konstruksi jalan raya. Granular busa kaca (*cellular glass*) merupakan sebuah produk hasil daur ulang dari sampah agregat granular kaca. Material tersebut dibentuk dalam proses dimana logam-logam tixic dan polutan-polutan lain yang terdapat pada material tersebut dibuang. Hasil dari proses tersebut berupa Material dengan unit densitas ringan, memiliki properti isolator panas yang baik, dan memiliki nilai kompresif strength yang tinggi. Ukuran butiran normal dari busa kaca antara 10 – 60 mm, ketika ditempatkan dan dipadatkan dalam kondisi timbunan kering unit densitas paling ringan akan bernilai antara 300 – 350 kg/m³ tergantung pada mesin pemadat dan upaya pemadatan. Baru-baru ini pada proyek jalan, deformasi dan variasi kemungkinan kandungan kelembaban, unit densitas, dan distribusi ukuran partikel tanah telah dimonitor. Aplikasi dari busa gelas pada konstruksi jalan merupakan bagian dari program besar dengan tujuan untuk meningkatkan penggunaan *recycled* material pada konstruksi jalan pada umumnya.

Konsep Busa Kaca (*Foam Glass*)

Sejumlah produk kaca digunakan dalam jumlah besar di belahan bumi bagian barat. Produk tersebut meliputi berbagai variasi rupa dari sisa/sampah kaca mulai dari bola lampu dan peralatan penerangan yang lainnya seperti lampu merkuri, botol, kaca jendela, kaca mobil dan lain-lain, serta limbah industri. Di Eropa rata-rata konsumsi penggunaan kaca pertahun sekitar 30 – 40 kg per orang.

⁶ Roald Aabøe (Norwegian Public Roads Authorities, NPRA. Norway); Even Øiseth, (SINTEF Civil and Environmental Engineering. Norway) , *Foamed Glass – An Alternative Lightweight And Insulating Material*.



Pada saat yang sama, produk sampah juga menjadi bahan mentah yang kemungkinan dapat digunakan kembali (didaur ulang). Beberapa sampah kaca mungkin digunakan secara langsung dalam produksi seperti botol dan produk yang lainnya, tetapi beberapa sampah kaca juga mengandung material toxic yang harus dibuang dalam proses daur ulang. Sehubungan dengan hal ini, proses produksi telah diaktifkan berdasarkan pada daur ulang sampah kaca di wilayah tengah Norwegia. Biaya busa kaca yang diantarakan sampai ditempat di Norwegia saat ini sekitar \$ 35 - 40 per m³.

Gambar 2.2.5.a. Tipikal Partikel Busa Kaca (*Foam Glass*)



Sumber: Roald Aabøe, Norwegian Public Roads Authorities, NPRA. Norway

Di Norwegia sekitar empat juta lampu merkuri digunakan setiap tahun dan berarti untuk mendaur ulang sekitar 40% dari jumlah produksi tahunan yakni sekitar 50.000 m³ busa kaca. Dalam proses produksi peralatan penerangan dan sampah kaca lainnya yang mengandung toxic diolah untuk menghilangkan komponen logam berat dan komponen lain yang sulit diuraikan oleh alam. Produk yang dihasilkan sekarang telah digunakan sebagai material ringan timbunan pada sekitar 25 proyek jalan di Norwegia dan NPRA telah memberlakukan program monitoring untuk mengevaluasi properti material dan performa struktural.



Proses Produksi

Busa kaca diproduksi menggunakan teknologi daur ulang yang ramah lingkungan dari sampah yang terkontaminasi dan mengandung toxic antara lain dari lampu merkuri, serbuk limbah industri dan abu terbang, PC dan tabung TV, serta lapisan kaca pada baterai. Proses didasarkan pada konsep mentransformasikan serbuk kaca dengan halus dari sumber bahan kaca yang berbeda dicampur dengan aktivator seperti silika karbida kedalam busa kaca. Dalam proses *grinding* logam-logam berat disebar dan didaur ulang pada tempat pelelehan logam. Serbuk disebar diatas plat baja dan diproses dengan oven temperatur tinggi, dimana serbuk mengalami pengembangan sekitar empat kali dan yang tertinggal di oven adalah material busa kaca. Ketika produk keluar dari oven, kondisi ini akan retak dan terpisah menjadi unit-unit yang lebih kecil karena perubahan temperatur yang mendadak. Ukuran butiran normal dari busa kaca antara 10 – 60 mm. Proses produksi bebas dari debu dan gas yang berbahaya dan tidak membutuhkan air pada tingkatan proses bagaimana pun.

Secara umum prinsip dari proses pembersihan sangat mudah yakni memisahkan dan membersihkan sampah dalam fraksi –fraksi untuk *treatment* alur proses lebih lanjut. Selama proses tersebut komponen toxic direduksi dibawah batas deteksi. Sehubungan dengan hal ini, sertifikat telah diperoleh untuk mengkonfirmasi material yang mungkin mengalami pelarutan sebagai produk dari timbunan yang memiliki kandungan toxic dibawah kondisi izin sehingga aman bagi lingkungan. Busa kaca secara umum terdiri dari 8% volume kaca dan 92% gelembung gas.

Properti Material

Kualitas material yang diuraikan oleh produsen (NPRA) antara lain sebagai berikut:

- Unit densitas *bulk* rendah, produk dibuat dalam dua kualitas yakni 180 kg/m³ (ukuran ringan) dan 225 kg/m³ (standad).
- Isalotar termal kualitas tinggi.
- *Strength* material tinggi: 60 – 120 kN/m².
- Absorpsi kelembaban rendah.



- Stabil terhadap temperatur dan bahan-bahan kimia.
- Sudut kemiringan natural busa kaca tanpa pemadatan stabil hingga 45° .

Dengan sifat material ringan, drainase baik, dan properti ketahanan mungkin dibutuhkan dalam penggunaan sebagai material ringan timbunan dan atau sebagai pelindung lapisan beku pada cuaca temperatur rendah. Untuk investigasi fisik dan properti mekanikal berbagai program monitoring telah dilakukan baik pengetesan di lapangan maupun di laboratorium.

Beberapa dari eksisting timbunan busa kaca, selubung pipa baja tipis tipikal diameter 400-570 mm dipres/ditekan atau digetarkan kedalam busa kaca. Partikel-partikel yang terkandung didalam selubung baja dikeluarkan dan material yang digali ditimbang dalam keadaan basah dan kering. Tes lapangan akan dimonitor dengan pengujian-pengujian dari waktu-ke waktu untuk mengamati deformasi, kadar air dan densitas timbunan.

Gambar 2.2.5.b. Pemasangan Selubung Baja



Sumber: (*ibid.*)



Data yang berhubungan dengan kadar air dan densitas diukur oleh NPRA ditunjukkan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 2.2.5.a. Tes Lapangan pada Material Busa Kaca yang Ditempatkan Dalam Struktur Jalan

Road project	Mat. type	Year	Field test	Volume m ³	Water cont. % (by weight)	Density kg/m ³	Fines < 8 mm (%)
Lodalen	Light	2001	2001	1500	3 -18	325	
Rv 120	Light	2001	2001	2900		500 ¹⁾	15 - 65
E 6 Mule	Light	2002	2002	550		295	25 - 35
E6 Eggemarka	Std.	2002	2003 2004	1000	15 – 20 ?	345 384 ²⁾	20 7-14
Postterminalen	Std	2000	2000	2750			30
E6 Rosendal	Std	1999	2002	310	18	530 ³⁾	30
E 6 Klemetsrud	Light	2003	2003	1100	0,5	271	5 - 20

Sumber: (*ibid.*)

- 1) Rata-rata densitas berdasarkan Material di lapangan dan volume teoretis yang dipasang sekitar 300 kg/m³.
- 2) Rata-rata densitas untuk dua tes dalam layer bagian atas berdasarkan pengukuran *dry density* dan asumsi kadar air 15%.
- 3) Rata-rata densitas berdasarkan Material di lapangan dan volume teoretis yang dipasang sekitar 350 kg/m³.

Pengujian laboratorium mengenai absorpsi air telah ditunjukkan oleh Norwegian Building Research Institute (NBI) dengan hasil seperti tertera pada tabel berikut:

Tabel 2.2.5.b. Performa Uji Laboratorium pada Material Busa Kaca

Material type	Water absorption (2000) % by weight after 22 weeks	Water absorption (2003) % by weight after 50 weeks
Light	76	48
Standard	103	45

Sumber: (*ibid.*)



Properti Strength dan Deformasi

Material telah diuji dengan beban siklik besar menggunakan peralatan tiaksial ukuran diameter 300 mm untuk menemukan resistensi pada pengembangan deformasi permanen yang diakibatkan oleh pembebanan secara berulang-ulang. Hasil yang diperoleh sangat relevan untuk aplikasi design jalan dimana material yang digunakan pada struktur jalan merupakan bagian dari *base layer* dan *sub-base layer*. Untuk penggunaan struktur jalan, material memiliki properti elastis yang dapat dibandingkan dengan koral /*gravel* biasa yang pada umumnya digunakan sebagai material dasar jalan. Satu hal yang sangat penting bahwa *level stress* dijaga dalam nilai yang rendah dibawah kondisi pada umumnya yang akan mengakibatkan kegagalan dan deformasi permanen pada Material. Untuk aplikasi pembebanan yang berulang-ulang, tegangan siklik direkomendasikan dibatasi hingga 75 kPa untuk mengurangi deformasi permanen.

Oedometer besar dengan diameter 500 mm digunakan untuk mengukur deformasi material ketika terekspose oleh beban permanen. Hasil yang relevan seperti yang ditunjukkan tabel 2.2.5.c. Selama tahun 2004 program pengetesan diperluas termasuk *creep test* jangka panjang untuk menemukan nilai karakteristik kemungkinan deformasi jangka panjang. Tipikal penggunaan hingga sekarang telah ditingkatkan hingga kira-kira 100 kN/m² berdasarkan tekanan dan pengalaman yang menunjukkan tidak ada kerusakan deformasi jangka panjang pada proyek manapun. *Creep test* jangka panjang akan memungkinkan dilakukannya estimasi deformasi jangka panjang untuk kondisi pembebanan yang berbeda. Uji oedometer yang telah dihasilkan digunakan untuk mengestimasi sejumlah *creep* jangka panjang dengan asumsi linear perkembangan waktu resistensi.

Tabel 2.2.5.c. Deformasi/*Settlement* pada Material Busa Kaca

Quality and compaction level / Stress level	50 kN/m ²	100 kN/m ²	300 kN/m ²
Light 1.25	1 %	4 %	> 15 %
Light 1.34	0.25 %	1.3 %	> 11 %
Standard 1.24	0.3 %	1.1 %	> 10.5 %

Sumber: (*ibid.*)



Tabel 2.2.5.d. Estimasi Deformasi *Creep* Setelah 1 Hari pada Level *Stress**Beban Permanen 300 kN/m²

Compaction level	1 year	5 years	25 years	100 years
1.25	2.9 %	3.8 %	4.6 %	5.3 %
1.34	2.0 %	2.6%	3.1 %	3.5 %

*dibawah level *stress* 75 kN/m² deformasi *creep* diabaikan

Sumber: (*ibid.*)

Setelah ditempatkan didalam timbunan dan kepadatan relatif kecil, kemudian deformasi diharapkan akibat dari perkerasan jalan dan beban hidup (*live load*). Deformasi sekitar 1 – 2 % dari ketebalan layer diukur dalam proyek hingga kini, tetapi harus dicatat bahwa pengukuran telah diakhiri untuk jangka priode waktu relatif pendek. Pengamatan terus-menerus selama tiga tahun mengindikasikan bahwa kerusakan dan deformasi cenderung dapat diabaikan. Dua timbunan busa kaca secara temporer akan digali dan dipindahkan ke lokasi lain untuk digunakan kembali pada lain waktu dan diharapkan untuk memberi informasi yang lebih lengkap mengenai perilaku struktural. Pengukuran deformasi dari beban *traffic* mengindikasikan secara signifikan deformasi lebih besar terjadi pada bagian tepi timbunan, kemungkinan besar karena kurangnya *lateral restrain* dari material tersebut.

Tabel 2.2.5.e. Pengamatan Deformasi pada Timbunan

Site	Max height of fill in m	Com-paction factor %	Layer thickness for compaction	Deforma-tions, % short term	Deforma-tions, % long term	Deforma-tions on slopes %
Lodalen	2	1.25	2 m	0.5 – 1	+0.5	4
Rv 120	3	1.60	1 m	1	+ 0 – 0.5	2 – 3
E 6 Mule	3	1.25				
E6 Eggemarka	4		1-1.5 m	1	+ 0.5	2
E6 Rosendal	2.5	1.40	0.5 m			
E6 Klemetsrud	3	1.20	Up to 4 m	0.5	+0.5	

Sumber: (*ibid.*)



2.2.6. Material Ringan Dari Serbuk Kayu

Di tahun 1972, kali pertama timbunan ringan menggunakan serbuk kayu dikonstruksikan di jalan raya negara bagian Washington sebagai upaya perbaikan yang mendesak karena longsor yang merusak bagian segmen jalan (Kilian, 1992). Serat/serbuk kayu dipilih karena dua alasan. Pertama, serbuk kayu dapat digunakan sebagai material dalam kondisi cuaca apapun. Hujan tidak mempengaruhi penempatan dan pemadatan dari timbunan yang dikerjakan. Kedua, beratnya yang ringan dapat digunakan sebagai material ringan timbunan yang dapat mengurangi tekanan gaya pada tanah yang kurang satabil yang menyebabkan keruntuhan. Rata-rata, timbunan serbuk/serat kayu memiliki berat kurang dari 50% berat dari timbunan tanah konvensional. Selain itu, serbuk kayu tersedia dan dapat diperoleh secara singkat dari tempat pemotongan/penggergajian kayu lokal Washington barat. Perusahaan kayu yang berlokasi di pinggiran Washington telah menggunakan material serbuk kayu untuk konstruksi timbunan *non-engineering* diatas lapisan sedimen yang lemah selama bertahun-tahun dan juga terutama untuk proyek-proyek Washington State Department of Transportation (WSDOT).

Ketika memutuskan menggunakan serbuk kayu sebagai bahan konstruksi timbunan dibawah struktur jalan, terdapat dua masalah yang harus dijadikan peninjauan. Pertama, masalah ketahanan serbuk kayu terhadap pembusukan mengingat bahan tersebut merupakan material organik yang memungkinkan terjadi pembusukan dalam waktu jangka panjang. Estimasi awal memperkirakan design penggunaan material serbuk kayu diperuntukkan dalam jangka waktu 15 hingga 30 tahun. Hasil investigasi oleh WSDOT menemukan bahwa tumpukan serbuk kayu gergaji yang berusia 70 tahun bagian dalam tidak mengalami dekomposisi. Peninjauan kedua yakni risiko terjadinya kebakaran spontan sebagai akibat timbunan serbuk kayu kontak langsung dengan api. Oksidasi biologi meningkatkan temperatur hingga kira-kira 167°F diikuti oleh reaksi kimia yang meningkatkan temperatur hingga menimbulkan api. Pengontrolan temperatur serbuk kayu dan pengurangan kandungan oksigen yang ada adalah metode untuk mencegah kenaikan temperatur hingga menimbulkan api (Bowes, 1956).



Karena kali pertama timbunan ringan dari serat/serbuk kayu dikonstruksikan pada tahun 1972, lebih dari 20 penambahan timbunan telah dikonstruksikan antara tahun 1973 hingga 2003. Timbunan tersebut dikonstruksikan pada area curah hujan sedang hingga tinggi di bagian barat Washington. Rata-rata usia timbunan tersebut sekitar 26 tahun. Sebagian besar timbunan serbuk kayu dikonstruksikan pada area lereng sebagai material timbunan ringan yang ditempatkan diatas tanah lunak. Hingga sekarang WSDOT belum menemukan timbunan serbuk kayu yang mengalami kebakaran sejak kali pertama material tersebut dikonstruksikan.

Sebuah studi dilakukan oleh WSDOT diadakan pada tahun 1992 untuk mengevaluasi performa jangka panjang dari timbunan serbuk kayu (Kilian, 1992). Lebih dari setengah sampel serbuk kayu yang diperoleh dari timbunan tersebut ditemukan dalam kondisi masih utuh dan tidak ada serbuk kayu yang mengalami pembusukan. Performa dari timbunan serbuk kayu dapat dibandingkan dengan hasil pekerjaan lain pada proyek perkerasan jalan, dan mengindikasikan bahwa timbunan serbuk kayu memiliki performa yang lebih baik dari pekerjaan disekitarnya. Diwaktu yang akan datang WSDOT akan melanjutkan penggunaan serbuk/serat kayu sebagai sumber material utama ketika design geoteknik membutuhkan material ringan untuk timbunan.

2.2.7. Material Ringan *Expanded Shale, Clay and Slate* (ESCS)

Expanded Shale, Clay and Slate (ESCS) yang berarti terbuat dari serpihan batu, lempung dan batu tulis merupakan salah satu material ringan yang dibuat dari campuran bahan-bahan tersebut ditempat dapur keramik putar (*rotary kiln*) dimana bahan dasar Material tersebut dipanaskan lebih dari 2000°F seperti pada pembuatan keramik. ESCS terkadang disebut juga sebagai *Lightweight Aggregate* (LWA). Material ringan ESCS adalah material bersih, tidak berbau dan tidak mengandung mineral toxic yang dapat membahayakan kehidupan. ESCS merupakan material seperti keramik, tidak berbahaya dan terbuat dari bahan anorganik. Dalam penggunaan seabagi material timbunan, ESCS dapat dicampur dengan tanah lain sebagai tambahan. Material tersebut mengandung kapur namun



dapat diprediksi melalui analisis, konsisten dan stabil setiap waktu dalam kondisi dibawah jenis tanah apapun.

Gambar 2.2.7.a. Material Ringan ESCS



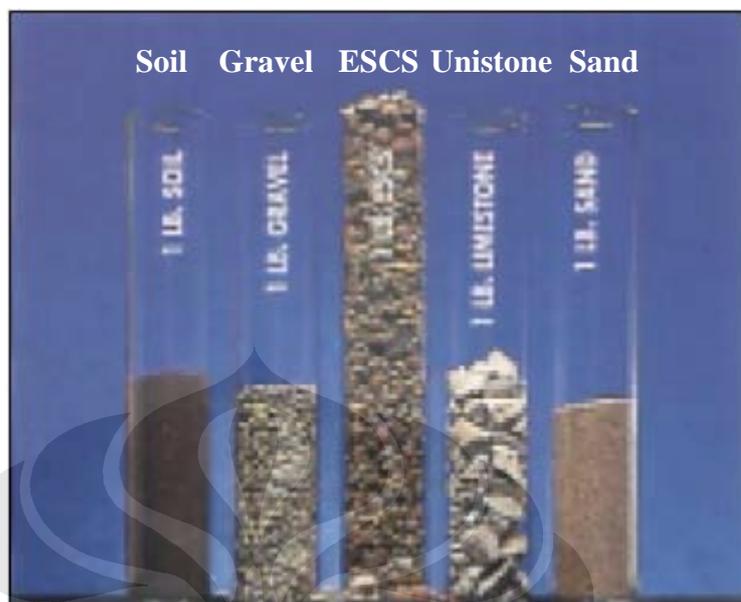
Sumber: *Expanded Shale, Clay and Slate Institute*, Salt Lake City, UT 84117

Material tersebut kuat dan tidak akan mengalami kerusakan selama pengangkutan, pengerjaan, dan pengaplikasian pada kondisi apapun. Sifat dari material tersebut yakni isolator terhadap temperatur, cocok pula digunakan sebagai media tanaman dan melindungi tanah dari retak akibat perubahan temperatur.

Densitas material ESCS hanya sepertiga dari berat batu atau pasir pada umumnya yakni sekitar 45 hingga 80 lb/ft³. Hal ini memiliki keuntungan ketika dalam pengangkutan, pengerjaan, dan pemasangan material. Namun demikian, material ini cukup berat untuk ditiup dan tidak mudah larut oleh air hujan dalam kondisi cuaca normal. Material ringan ESCS memberikan volume dua kali lipat atau lebih pada kondisi berat yang sama dengan material konvensional lainnya. Sehingga, nilai densitas dari ESCS lebih rendah dibanding dengan material konvensional pada umumnya dan layak dikatakan sebagai material ringan.



Gambar 2.2.7.b. Perbandingan Volume Material Ringan ESCS dengan Material Lainnya pada Kondisi Berat yang Sama



Sumber: (*ibid.*,)

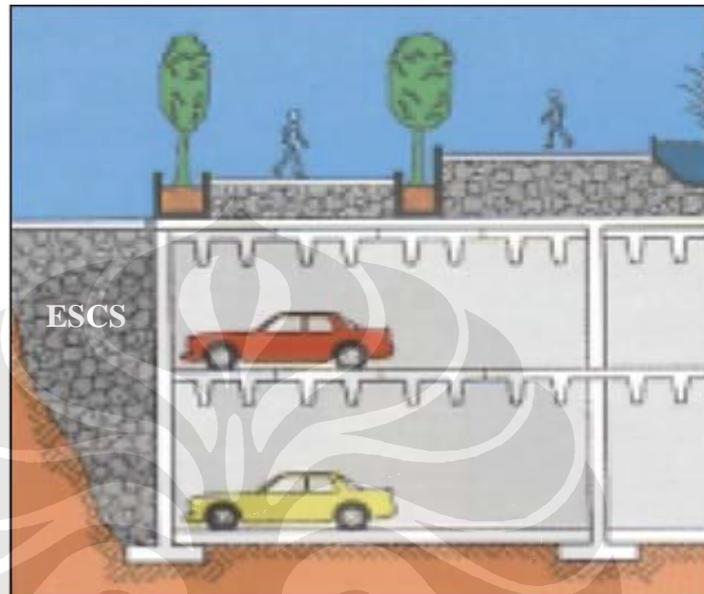
Produk dari ESCS di beberapa tempat dibuat dan dipasarkan dengan nama yang bermacam-macam. Keuntungan dari penggunaan material ini yakni tersedia dalam berbagai ukuran dan memiliki perilaku yang sama sesuai dengan standar agregat pada ukuran yang sama. Kekurangan dari penggunaan Material ini, yakni biaya yang cukup mahal sekitar \$ 30/yd³ belum termasuk biaya pengangkutan dan ketersediaannya terbatas di beberapa tempat.

Contoh proyek yang menggunakan material ESCS adalah Barney Allis Plaza Kansas City, Missouri. Sekitar 6.000 yd³ agregat material ringan ESCS digunakan sebagai timbunan di atas eksisting *basement* area parkir. Tujuan dari penggunaan agregat tersebut yakni menyediakan drainase *subsurface*, pengurangan beban mati (*dead load*) dan stabilisasi jangka panjang. Pada proyek Gateway Village yang berlokasi di Downtown Charlotte, Carolina Utara, penggunaan ESCS dipilih untuk mengurangi beban mati (*dead load*) pada konstruksi taman di atas gedung. Proyek lain yang menggunakan material ESCS adalah Capital Center Project di propinsi Rhode Island. Proyek ini melibatkan *retaining wall* setinggi 35 kaki di atas lapisan tanah lanau lunak. Designer menggunakan ESCS sebagai timbunan untuk menghindari terjadinya *settlement*



yang dalam sebagai bentuk kegagalan dari konstruksi yang mengambil lokasi ditepi sungai.

Gambar 2.2.7.c. Konstruksi Timbunan Menggunakan ESCS untuk Mengurangi Beban Mati



Sumber: (*ibid.*)

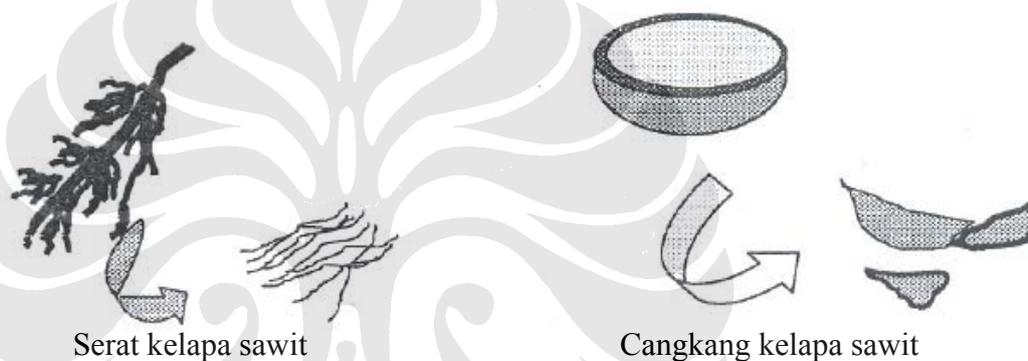
2.2.8. Material Ringan Dari Sisa Kelapa Sawit

Penggunaan material limbah kelapa sawit dari industri pengolahan minyak kelapa mulai diterapkan sebagai upaya pengurangan jumlah limbah yang akan memenuhi tempat pembuangan akhir (TPA) sampah. Limbah kelapa sawit dapat berupa tandan kosong, serabut, dan tempurung yang dapat dimodifikasi untuk material ringan timbunan. Baru-baru ini penggunaan material ringan dari sisa kelapa sawit diterapkan sebagai upaya pengurangan berat sendiri timbunan yang dapat mengakibatkan *settlement* timbunan yang terlalu besar. Selain itu, modifikasi material sisa kelapa sawit dengan asbuton juga dilakukan untuk pencegahan serangan rayap tanah yang dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur bangunan (Purwito. Dipl.E.Eng dan Dr. Ir. Anita. F. MT, 2005).



Metode pembuatan material ringan dari sisa kelapa sawit kurang lebih mirip dengan metode pembuatan material ringan dari potongan ban bekas yang dikemukakan sebelumnya oleh Naser Ghani dari University Sains Malaysia, dimana bahan dasar dicampur dengan material lain sebagai pengikat untuk kemudian dilakukan pengujian terhadap *strength* yang dihasilkan. Selain sebagai material timbunan, penggunaan sisa kelapa sawit terutama cangkangnya juga dipakai sebagai pengganti agregat kasar untuk modifikasi beton ringan.

Gambar 2.2.8.a. Limbah Kelapa Sawit



Sumber: Purwito. Dipl.E.Eng dan Dr. Ir. Anita. F. MT, *Pemanfaatan Limbah Sawit Dan Asbuton Untuk Bahan Pencegah Serangan Rayap Tanah*, Kolokium 2005

Dari serangkaian percobaan yang dilakukan mengenai modifikasi material ringan diperoleh hasil bahwa rata-rata berat dari material ringan sisa kelapa sawit bisa mencapai tiga perempat hingga sepertiga dari berat tanah pada umumnya. Variasi rantang berat yang dihasilkan tergantung pada proporsi campuran yang diterapkan. Kemudian penggunaan material pengikat khususnya jenis semen atau aspal juga turut menyumbang hasil akhir dari perolehan data yang didapatkan. Secara umum, aplikasi penggunaan material ringan dari limbah kelapa sawit mulai diterapkan khususnya pada lokasi yang berdekatan dengan perkebunan dan industri pengolahan minyak kelapa sawit sebagai penerapan konsep *zero waste* untuk mengurangi jumlah volume limbah yang dihasilkan di tempat-tempat tersebut.



2.3. MODIFIKASI MATERIAL RINGAN

Seperti pada pembuatan beton, modifikasi Material ringan untuk timbunan membutuhkan beberapa komponen antara lain semen, agregat, air dan material campuran lainnya. Beberapa komponen tersebut dicampur bersama dan dibentuk kedalam ukuran yang diinginkan ketika campuran masih dalam kondisi basah. Dalam beberapa menit dari campuran tersebut, semen dan air mulai terjadi reaksi kimia yang disebut sebagai proses hidrasi (*hydration*). Reaksi ini akan terus berlanjut seiring dengan berjalannya waktu, terjadi proses pengerasan, menjadi kuat, dan menjadi lebih tahan.

2.3.1. Tipe-tipe Semen

Semen adalah segala Material yang dapat merekatkan atau menyatukan komponen-komponen material lain menjadi satu keadaan yang utuh seperti layaknya bahan lem. Dalam bidang teknik sipil atau dunia konstruksi, semen atau Material sementasi didekatkan pada definisi bahan perekat pada beton, mortar, atau spesimen (*grout*). Terdapat dua tipe semen yang digunakan dalam dunia industri konstruksi yakni semen *hydraulic* dan *nonhydraulic*. Semen *hydraulic* adalah semen yang dapat menjadikan produk bentuk padat dimana semen tersebut membutuhkan air dalam proses pencampurannya. Material yang dihasilkan menjadi lebih padat dan kompak dan tidak dapat terpisah ketika ditempatkan di dalam air. Sedangkan semen *nonhydraulic* yakni semen yang tidak membutuhkan air dalam mengubah bentuk menjadi produk material padat. Terdapat beberapa jenis dari kedua tipe-tipe semen tersebut antara lain tertera pada tabel berikut:



Tabel 2.3.1.a. Semen *Hydraulic* dan *Nonhydraulic*

Material	Sementasi alami
Portland cement	Hydraulic
Lime	Nonhydraulic
Gypsum	Nonhydraulic
Natural pozzolan	Pozzolanic or latent hydraulic
Fly sah	Pozzolanic or latent hydraulic
Silica fume	Latent hydraulic
Ground blast-furnace slag	Hydraulic or latent hydraulic

Sumber: Shan Somayaji, *Civil Engineering Materials*.

2.3.1.a. Semen *Hydraulic*

Sebagian besar jenis semen *hydraulic* yang digunakan adalah semen Portland. Semen tersebut dibuat dengan memanaskan campuran batu kapur (*limestone*) dan lempung hingga kondisi sekering mungkin kemudian digiling/dihaluskan hingga menjadi serbuk halus. Banyak jenis semen *hydraulic* dapat diproduksi dengan mencampurkan bersama material *latent hydraulic* dan semen portland. Biasanya jenis semen tersebut sudah umum digunakan dalam berbagai konstruksi bangunan.

Semen Alam

Semen alam juga merupakan salah satu jenis dari semen *hydraulic*. Semen ini diperoleh dengan membakar tanah yang mengandung lempung (*argillaceous*) atau magnesium batu kapur (disebut sebagai batu semen) yang memiliki komposisi kimia sesuai tanpa penambahan material lain dan digiling menghasilkan abu yang dapat digunakan sebagai semen. Di tahun 1818, selama dilakukannya survey geologi untuk pembangunan Erie Canal, batu semen alam yakni batu yang mengandung kapur pekat, silika, dan almunia ditemukan dekat Chittenango, New York. Sejumlah bangunan bersejarah di Amerika Serikat termasuk jembatan Brooklyn, patung Liberty, dan American Museum of Natural History dibangun menggunakan semen alam.



Semen Campuran

Semen campuran terdiri dari kombinasi arang semen portland dan abu terbang, pozzolan alam atau pozzolan calcined, limbah bijih logam (*slag*) dalam batasan campuran yang ditentukan. Semen tersebut umumnya memiliki resistensi leleh tinggi terhadap unsur alkali, agregat-agregat reaktif dan air laut.

Portland Pozzolan dan Semen Pozzolan

Pozzolan merupakan produk alami atau tiruan yang dikomposisikan terutama dari kapur pekat (*lime*), silika dan alumina. Semen Portland pozzolan diproduksi dengan mencampurkan semen portland dengan pozzolan. ASTM C595 mengidentifikasi dua tipe semen portland pozzolan yakni tipe IP digunakan pada konstruksi beton pada umumnya, dan tipe P digunakan pada kondisi dimana *strength* tinggi pada keadaan awal tidak diperlukan. Sejumlah pozzolan memiliki berat kira-kira 15 % hingga 40% dari berat semen. Semen *portland pozzolan-modified* dibuat dengan cara yang sama seperti pada semen portland pozzolan, tetapi komponen pozzolannya kurang dari 15% beratnya. Semen portland pozzolan memiliki panas yang lebih kecil pada saat hidrasi dan temperatur yang lebih rendah pada saat penyusutan dibanding dengan semen pada umumnya. Kondisi ini sangat cocok diterapkan pada struktur bangunan yang besar seperti dam, dermaga, dan pondasi. Beton yang dibuat dengan semen ini sangat cocok untuk diterapkan ditempat-tempat yang memiliki pH rendah (bersifat asam) sebagai upaya meningkatkan resistensi bangunan terhadap kerusakan yang ditimbulkan senyawa sulfat.

Semen Portland Sisa Pembakaran Bijih Logam

Semen portland sisa pembakaran bijih logam terdiri dari material yang mirip dan seragam dengan campuran semen portland dan agregat halus sisa pembakaran bijih logam. Sisa pembakaran bijih logam adalah produk nonmetalik yang terdiri dari silikat dan aluminosilikat dari kalsium dan bahan yang lainnya yang dikembangkan dalam kondisi dilelehkan secara simultan dengan besi dalam tungku pembakaran. Ketika lelehan bijih (*slag*) secara cepat didinginkan



menghasilkan produk granular berkilau seperti kaca yang merupakan granular bijih tungku pembakaran, dan proses ini disebut sebagai *granulating*.

Semen portland sisa pembakaran bijih logam diproduksi dengan penggilingan arang semen portland dan material halus *slag*, atau pencampuran semen portland dan material halus *slag*, atau mengkombinasikan antara proses penggilingan dan pencampuran. Sejumlah material *slag* memiliki berat 25% hingga 70% dari total berat semen. Modifikasi semen portland *slag* hampir mirip dengan semen portland sisa pembakaran bijih logam, tetapi unsur slag memiliki berat 25% lebih kecil dari berat semen biasa.

Semen Putih

Semen putih adalah semen yang cocok digunakan untuk agregat halus yang terekspos dan untuk membuat warna semen dengan penambahan pigmen. Warna putih diperoleh dengan pendekatan eliminasi kandungan besi dari semen portland biasa. *Iron-free clay* (kaolinite atau lempung china) adalah bahan yang digunakan dalam pembuatannya, dan bauksit (aluminium oksida) adalah bahan yang sering dibutuhkan untuk memperoleh kandungan alumina yang diperlukan.

Semen Tembok (Masonry Cement)

Semen tembok mengandung material halus yang terpisah seperti kapur pekat atau batu kapur tanah dan debu yang mengandung bahan khusus, dan dicampur dengan semen portland. Penambahan bahan campuran dan batu kapur di dalam semen memberikan sifat yang mudah dikerjakan (*good workability*) dan retensi terhadap air. Kedua sifat tersebut merupakan properti yang sangat penting dari pembuatan adonan beton.

Semen Plastik

Semen plastik adalah campuran dari kira-kira 96% semen portland dan bahan-bahan yang bersifat plastis serta debu yang mengandung bahan khusus. Semen ini biasa digunakan terutama untuk plaster eksterior dan untuk ketahanan serta kebutuhan perkerasan pada lapisan permukaan yang terekspos.



Semen Alumina Tinggi (High-Alumina Cement)

Semen alumina tinggi disebut juga sebagai semen kalsium aluminat. Semen ini diproduksi dengan pembakaran batu kapur dan bauksit, dan mengandung sintered kalsium aluminat (monokalsium aluminat, CA) sebagai pengganti kalsium silikat dari semen portland. Jumlah alumina (Al_2O_3) dalam semen ini sekitar 40%, sedangkan pada semen portland kandungan alumina hanya sebesar 4%. Semen alumina tinggi memiliki keuntungan yakni *strength* yang dihasilkan sangat cepat dan memiliki properti yang sangat keras. Beton yang dibuat dari semen ini harus dijaga tetap dingin selama periode pencampuran (*mixing*) dan sesudahnya untuk mambatasi panas temperatur dari proses hidrasi.

Jika temperatur beton naik diatas $85^{\circ} F$ atau $30^{\circ} C$, misal dari proses mula-mula hingga menjadi panas, keadaan ini menjadikan hilangnya *strength* karena kenaikan porositas dan mengurangi volume kepadatan. Kehilangan *strength* dapat dikurangi melalui penggunaan nilai rasio *water-cement* yang rendah.

2.3.1.b. Semen Nonhydraulic

Dua tipe semen nonhydraulic yang biasa digunakan adalah gipsum ban kapur pekat (*lime*). Semen gipsum diperoleh melalui proses pengapuran (*calcining*) pada material-material gipsum. Sedangkan semen kapur pekat (*lime*) diperoleh melalui proses pengapuran (*calcining*) dari batu kapur. Campuran kapur gipsum dan air telah digunakan oleh orang-orang Mesir kuno sekitar tahun 3000 SM untuk konstruksi piramida. Sedangkan campuran lime telah digunakan di banyak peradaban seluruh dunia, dimana material tersebut dapat mengikat material lain dan memiliki permeabilitas rendah.

Kapur Pekat (Lime)

Material ini secara umum adalah kapur mentah atau kalsium oksida yang diperoleh melalui pembakaran batu kapur atau kalsium karbonat pada temperatur diatas $900^{\circ} C$ atau sekitar $1650^{\circ} F$. Pada proses ini, semua kandungan air dan karbon dioksida dikeluarkan, menyisakan komponen kalsium oksida berupa material padat putih yang disebut dengan kapur mentah (*quicklime* atau *unsakled lime*).



Mengacu pada bahan bangunan, *lime* tersedia dalam dua bentuk yakni *quicklime* dan *hydrated lime*, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Karena lebih cepat dan lebih aman dalam tuuan pengendalian, *hydrated lime* lebih luas penggunaannya dari pada *quicklime*. *Quicklime* yang dapat dibeli dalam bentuk serbuk yang telah dihancurkan, harus ditempatkan pada tempat yang aman dari kontaminasi bahan lain karena sifatnya yang reaktif. Ketika ditambah dengan air harus dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah percikan-percikan yang dapat menyebabkan kebakaran.

Hydrated lime secara umum dijual dalam sak dengan berat 50 lb. Tipe S *hydrated lime* juga disebut sebagai *pressure-hydrated lime* mengandung hingga 8% kombinasi *unhydrated* kalsium oksida dan magnesium oksida. Tipe N *hydrated lime* yang juga disebut dengan *normal hydrated lime* harus direndam di dalam air selama satu malam terlebih dahulu sebelum digunakan untuk meningkatkan plastisitas dan kemudahan pengerjaan (*workability*). Ketika *hydrated lime* digunakan, kondisi ini diasumsikan bahwa satu unit volume *hydrated lime* kering memproduksi satu unit volume *lime putty*. Spesifik gravity dari lime memiliki nilai rentang antara 2,3 hingga 2,6 dan *bulk density* antara 35 hingga 40 pcf (560 – 640 kg/cm^3). Satu sak lime diasumsikan menghasilkan sekitar 1,15 ft^3 *lime putty*.

Gypsum

Gypsum murni adalah hasil dari hidrasi *lime* sulfat ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) yang juga disebut sebagai kalsium sulfat dihidrat. Bahan ini merupakan mineral sulfat yang terdapat pada umumnya di semua tempat dan dalam bentuk yang bermacam-macam. Batu pualam putih (Alabaster) adalah bahan yang dapat dijadikan material halus gipsum. Jenis-jenis gipsum transparan/tembus cahaya antara lain seperti yang ditemukan di Inggris dan Italia, warnanya agak keputih-putihan mudah untuk dibuat ukiran dan biasanya digunakan untuk objek dekorasi.

Selenit adalah jenis batu gipsum semi transparan yang terdapat dalam kadar yang kecil pada batuan. Kapur gipsum (*calcining gypsum*) merupakan material yang terbentuk pada relatif temperatur rendah, berupa proses kristalisasi material gipsum yang larut dalam air, bentuk yang lainnya adalah kalsium sulfat hemihidrat atau kalsium sulfat. Material ini juga disebut dengan anhidrat atau



anhidrasi kalsium sulfat, yang terbentuk dari proses dehidrasi. Plaster gipsum dibuat dengan mengkombinasikan kapur gipsum yang dapat larut dalam air, dengan pasir, air dan bahan campuran lainnya. Pembuatan bahan ini sangat cepat dan perkembangan *strength* terjadi secara sepat pula, proses ini melibatkan kombinasi secara parsial atau keseluruhan dari dehidrasi kalsium sulfat dengan air untuk membentuk hidrat kalsium sulfat atau mineral gipsum.

2.3.2. Semen Portland

2.3.2.a. Pembuatan Semen Portland

Istilah semen portland mendeskripsikan golongan dari semen *hydraulic* yang diproduksi dengan melumatkan arang yang dibuat pada tempat pembuatan semen dan terdiri dari *hydraulic* kalsium silikat sebagai komponen utamanya. Semen portland dibuat melalui pemanasan hingga terjadi peleburan awal yang dikontrol secara cermat dicampur dari bahan batu kapur dan lempung, dengan atau tanpa material mentah sekunder seperti bijih bauksit dan besi, kemudian digiling menghasilkan produk yang disebut dengan arang/abu (*clinker*) dalam bentuk serbuk halus. Sebagian besar bahan campuran untuk pembuatan semen portland ditemukan di alam. Batu kapur, serpihan batu, batu tulis, lempung, kapur, *marl* (deposit tanah alam yang ditemukan di dasar danau atau rawa, terdiri dari lempung dan kalsium karbonat), pasir silika, dan bijih besi merupakan material yang dapat dijadikan bahan campuran pembuatan semen portland. Masing-masing pembuatan fasilitas mungkin menggunakan kombinasi campuran yang berbeda-beda dari material mentah tersebut tergantung pada komposisi kimia yang dibutuhkan. Namun, batu kapur yang mengandung kurang dari 3% unsur $MgCO_3$ dan lempung adalah bahan yang sebagian besar digunakan.

Terdapat tiga komponen utama dari bahan mentah yang digunakan dalam pembuatan semen portland, komponen tersebut adalah lime (CaO), silika (SiO_2), dan alumina (Al_2O_3). Sedangkan bahan mentah lainnya yang digunakan dalam pembuatan semen portland sesuai dengan kandungan mineral yang dibutuhkan antara lain sebagai berikut:



Tabel 2.3.2.a.1. Bahan Mentah Beserta Kandungan Unsur yang Biasa Digunakan untuk Pembuatan Semen Portland

Raw material	Compound
Cement rock	Lime, silica, alumina
Limestone	Lime
Chalk	Lime
Slag	Lime, silica, alumina
Oyster shell	Lime
Marble	Lime
Clay	Silica, alumina
Shale	Alumina
Fly ash	Alumina, silica
Kaolin	Alumina
Bauxite	Alumina
Sand	Silica
Quartzite	Silica
Traprock	Silica
Iron ore	Iron oxide
Iron dust	Iron oxide
Pyrite	Iron oxide, sulfates
Gypsum	Sulfate

Sumber: (*ibid.*)

Semen portland dibuat melalui salah satu proses yakni proses basah dan proses kering. Dalam keduanya, material mentah dibuat homogen dengan dihancurkan, digiling, dan dicampur hingga kira-kira 80% dari Material mentah tersebut lolos saringan nomor 200 ASTM. Dalam proses basah, campuran dalam bentuk *slurry* yang mengandung air kira-kira 30% – 40% dipanaskan hingga mencapai 2750° F (1510° C) pada tempat pembakaran putar dengan panjang horizontal 250 – 500 ft (76 – 153 m) dan diameter sekitar 12 – 16 ft (3,6 – 4,8 m). Gas alam, minyak tanah, atau batu bara digunakan sebagai bahan pembakaran. Pada temperatur yang tinggi ini, oksida kalsium, silika, alumina dan besi secara kimia dikombinasikan dalam bentuk arang/abu semen. Dalam proses kering, campuran dituangkan ke dalam tempat pembakaran dan dibakar pada kondisi kering yang memberikan kondisi penghematan konsumsi bahan bakar dan penggunaan air, namun proses ini menghasilkan banyak debu.



2.3.2.b. Kandungan Kimia Semen

Semen portland secara tipikal terdiri sekitar 65% CaO, 21% SiO₂, 4,5% Al₂O₃, dan 3% Fe₂O₃. Dalam penambahannya, sejumlah kecil kurang dari 2,5% unsur SO₃, MgO, NaO₂, dan K₂O ditemukan. Dalam arang/abu semen oksida tersebut terdapat sebagai senyawa khusus dalam bentuk kristal halus yang saling mengikat. Sebagian besar senyawa tersebut terbentuk dari silika dan aluminat.

Sekitar 75% semen portland dikomposisikan dari kalsium silikat, senyawa alumina, besi, dan gipsum yang tersusun menjadi komponen yang seimbang. Empat komponen campuran utama dari semen portland antara lain:

- ❖ Trikalsium silikat (3CaO. SiO₂)
- ❖ Dikalsium silikat (2CaO. SiO₂)
- ❖ Trikalsium aluminat (3CaO. Al₂O₃)
- ❖ Tetrakalsium aluminoforit (4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃)

Masing campuran senyawa tersebut dalam produk industri diberi notasi pendek untuk mempermudah penyebutan komponen yang terkandung seperti tertera pada tabel berikut:

Tabel 2.3.2.b.1. Produk Industri Senyawa Kimia Semen

Compound	Chemical formula	Industry code (abbreviation)	% amount (range)	Rate of reaction With water
Tricalcium silicate	3CaO. SiO ₂	C ₃ S	35 – 65	Medium
Dicalcium silicate	2CaO. SiO ₂	C ₂ S	15 – 40	Slow
Tricalcium aluminate	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A	0 – 15	Fast
Tetracalcium aluminoferrite	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	6 – 20	Medium

Sumber: (*ibid.*)

Proporsi campuran tersebut dihitung dari analisis kimia semen berdasarkan prosedur ASTM C150. Karakteristik *strength* semen portland tergantung pada proporsi relatif dari silikat C₃S dan C₂S yang bernilai sekitar 75% dari semen. Nilai persentase C₃S yang lebih besar mengakibatkan panas hidrasi yang lebih besar dan memberi keuntungan nilai *strength* yang dicapai lebih cepat. Nilai persentase C₂S yang lebih besar menambah waktu pencapaian nilai *strength* sehingga pencapaian kekerasan optimum semen menjadi lebih lama.



Sedangkan pembagian tipe-tipe semen berdasarkan komposisi kimia dan penggunaannya tertera pada tabel berikut:

Tabel 2.3.2.b.2. Tipe-tipe Semen Portland dan Penggunaannya

Cement types	Standart chemical requirements (%)				Uses
	C ₃ S max.	C ₂ S min.	C ₃ A max.	C ₄ AF + 2C ₃ A max.	
I and IIA	-	-	-	-	General uses: when specisl properties are not required
II and IIA	-	-	8	-	General uses: has moderate sulfate resistance and heat of hydration
III and IIIA	-	-	15	-	When high early strength is required
IV	35	40	7	-	When low heat of hydration is required
V	-	-	5	25	When high sulfate resistance is required

Sumber: (*ibid.*)

2.3.2.c. Strength Dari Semen

Istilah *strength* semen merupakan pengukuran nilai kompresif *strength* dari adonan campuran (mortar), bukan dari pasta semen itu sendiri. Untuk semua tipe penggunaan semen pengetesan dilakukan pada hari ke 3, k3 7 dan hari ke 28. Pengetesan yang tertera pada peraturan ASTM C109, memberikan pengukuran relatif *strength* pada hasil pengerjaan campuran yang ditetapkan. ASTM menetapkan nilai minimum *strength* sebesar 1800 Psi (12,4 MPa) pada hari ke 3, dan 2800 Psi (19,3 MPa) pada hari ke 7 untuk semen tipe I. untuk semen tipe II harga kompresif *strength* masing-masing pada hari ke 3 dan ke 7 adalah 1500 Psi (10,3 MPa) dan 2500 Psi (17,2 MPa) dan untuk tipe semen III minimum *strength* pada hari ke 3 sebesar 3500 Psi (24,1 MPa).

Secara tipikal, semen portland tipe I yang dibuat di Amerika Serikat menunjukkan nilai *strength* sebesar 3500 Psi (24,1 MPa) pada hari ke 3, 4500 Psi (31,1Mpa) pada hari ke 7, dan 5300 Psi (36,6 MPa) pada hari ke 28. Angka tersebut menunjukkanemen yang dibuat memiliki *strength* yang lebih besar dari rekomendasi minimum dan pencapaian nilai *strength* pada hari ke 7 mendekati sama dengan hari yang ke 28.



2.3.2.d. Konsistensi Semen

Konsistensi normal diukur menggunakan ASTM C187, yakni properti yang biasa dipakai dalam pengaturan properti semen. Pengujian dilakukan dalam sebuah *vicat apparatus* menggunakan jarum berbiameter 10 mm diberi beban 300 g. Pasta dikatakan memiliki konsistensi normal ketika *plunger* menekan 10 ± 1 mm dibawah permukaan asli dalam waktu 30 detik. Sejumlah air diperlukan, untuk menunjukkan berapa persen dari berat kering semen yang merupakan rasio *water-cement* dari konsistensi normal, dan biasanya untuk semen-semen pada umumnya nilainya antara 24 – 33 %.

2.3.3. Prosedur Mix Design

Prosedur percobaan *mix design* diformulakan untuk mencapai campuran yang memadai dari kebutuhan *strength*, *durability* dan *workability* sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Prosedur tersebut dapat diuraikan sebagai berikut:

1. *Workability* (slump) ditentukan untuk tipe pekerjaan campuran.
2. Ukuran maksimum agregat dipilih berdasarkan kebutuhan dari pekerjaan campuran.
3. Kandungan udara (*air content*) ditentukan dari kebutuhan *durability*.
4. Rasio *water-cement* (*w/c ratio*) dipilih untuk mencapai *strength* dan *durability* campuran yang memadai.
5. Jumlah air dan agregat kasar dipilih berdasarkan *workability* rata-rata.

Campuran atau beton yang digunakan untuk semua konstruksi mengandung sejumlah udara yang terperangkap, biasanya antara 0,5 – 2 persen. Gelembung udara yang relatif besar dan tidak terdistribusi rata kedalam campuran, tidak meningkatkan *workability* dan mengurangi *durability* dari campuran yang dihasilkan. Sehingga, untuk meningkatkan *workability* dari campuran, kandungan udara meningkatkan *durability* kekerasan campuran (beton) yang dihasilkan.

Beton yang lebih kuat bukan selalu beton yang lebih baik. Pencapaian *strength* tinggi seringkali ditempuh dengan kebutuhan semen yang lebih besar yang seharusnya tidak perlu, sehingga dapat meningkatkan risiko retak dan



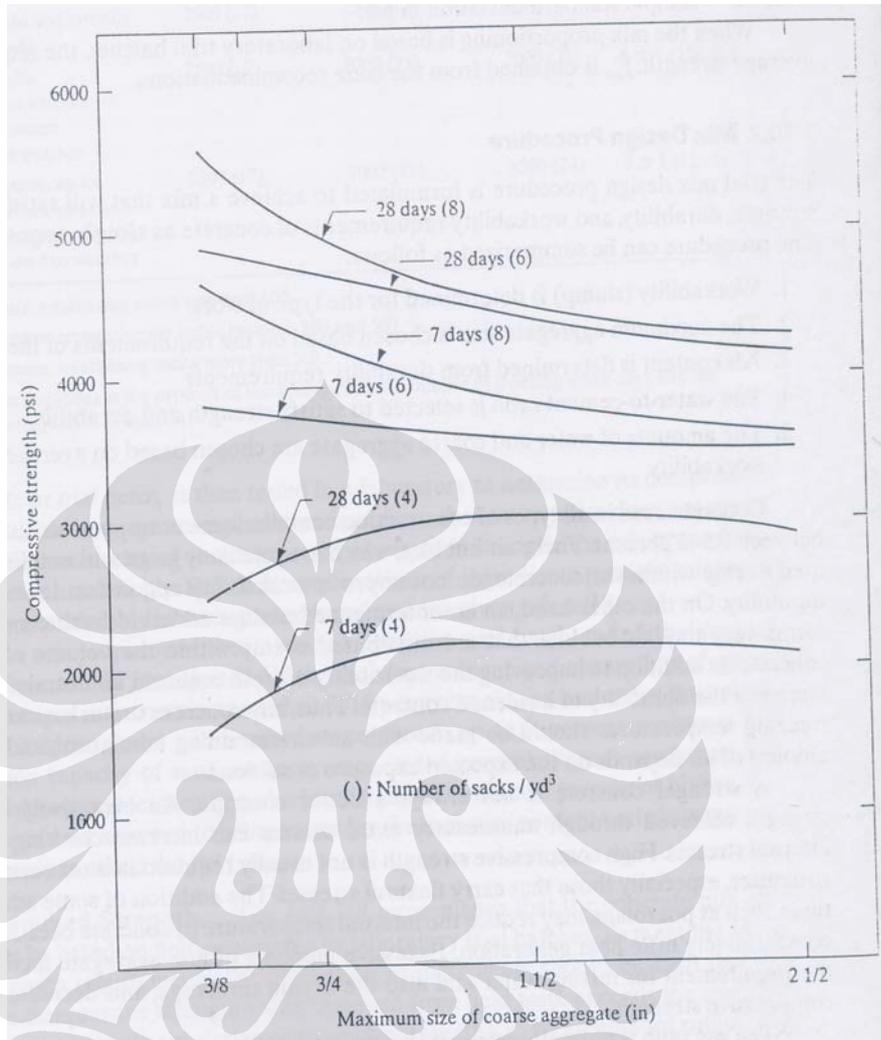
penambahan tegangan internal beton. Kompresif *strength* yang tinggi tidak selalu dibutuhkan dalam sebagian besar struktur beton, khususnya yang dibutuhkan untuk tegangan lentur. Jumlah agregat halus yang berlebih meningkatkan kebutuhan campuran air dan juga penyusutan kering, dan mengurangi nilai kompresif *strength*. Sehingga penyesuaian antara proporsi campuran dengan kebutuhan design perlu diperhitungkan.

Rasio *water-cement* (*w/c ratio*) secara normal dipilih berdasarkan kebutuhan kompresif *strength*. Akan tetapi, seorang ilmuwan Prancis bernama R. Feret, 1892 menyimpulkan bahwa *strength* beton tergantung pada rasio volume semen terhadap ruang yang tersedia pada campuran. Kandungan semen yang lebih besar pada volume yang diberikan akan memberikan *strength* yang lebih besar. Penambahan nominal ukuran maksimum agregat kasar, akan mengurangi luas permukaan komponen agregat sehingga mengurangi kebutuhan air untuk campuran. Dengan kata lain, jika ukuran agregat bertambah jumlah kebutuhan air untuk mencapai ketentuan level dari *workability* akan berkurang. Namun, luas permukaan yang lebih kecil dari komponen agregat berarti area ikatannya lebih kecil sehingga *strength* yang dihasilkan lebih rendah.

Penambahan ukuran maksimum agregat kasar akan memperkecil nilai kompresif *strength*. Pada umumnya, ukuran agregat yang paling kecil menghasilkan *strength* tertinggi untuk *w/c ratio* yang diberikan. Agregat yang memiliki sudut membutuhkan lebih banyak air dari pada agregat yang berbentuk bulat. *Workability* beton juga dipengaruhi oleh temperatur setempat. Misalnya jika temperatur meningkat, kebutuhan air untuk mencapai slump yang diinginkan juga meningkat. Sekitar 2 lb air dibutuhkan (perkubik yard beton) untuk setiap kenaikan temperatur sebesar 3⁰ F. Kemudian curing juga sangat penting dilakukan untuk perkembangan *strength* yang diinginkan. Hubungan yang mempengaruhi nilai *strength* dari penggunaan agregat yang lebih besar tergantung pada proporsi campuran, kandungan semen, dan kandungan air seperti yang ditunjukkan pada grafik berikut:



Grafik 2.3.3.a. Pengaruh Ukuran Agregat Kasar pada Nilai Kompresif *Strength*



Sumber: (*ibid.*)

Prosedur mix design diberikan sebagai berikut, dengan catatan bahwa hasil-hasil proses dalam percobaan campuran mungkin membutuhkan penyesuaian modifikasi tergantung pada hasil pengetesan:

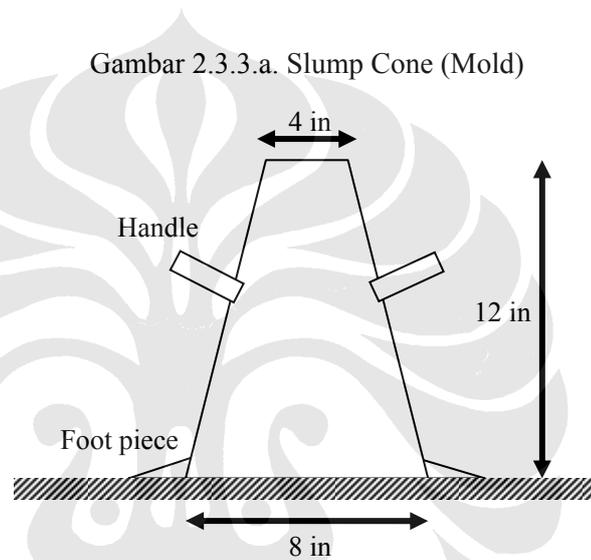
Langkah 1 : Penentuan Slump

Konsistensi adalah pengukuran tingkat basah atau kecairan dari campuran beton dan tergantung pada proporsi dan properti dari campuran. Ini adalah bagian penting dari komponen *workability*. Campuran basah secara umum lebih mudah dikerjakan dari pada campuran kering, tetapi campuran pada konsistensi yang sama mungkin berbeda dalam *workability*. Konsistensi secara umum diukur



dengan *slump test* (ASTM C143). Hasil dari pengujian ini disebut sebagai slump, yang juga digunakan secara tidak langsung dalam pengukuran karakteristik *workability*. Hampir semua penyesuaian pekerjaan beton menggunakan *slump test* untuk mengukur perubahan *workability*, misalnya untuk perbandingan relatif *workability* antara tipe-tipe beton yang berbeda.

Slump test dikembangkan pada tahun 1913 di Amerika Serikat oleh C.M. Chapman. Berikut adalah gambar alat *slump cone (mold)* berbentuk kerucut logam yang digunakan pada *slump test*:

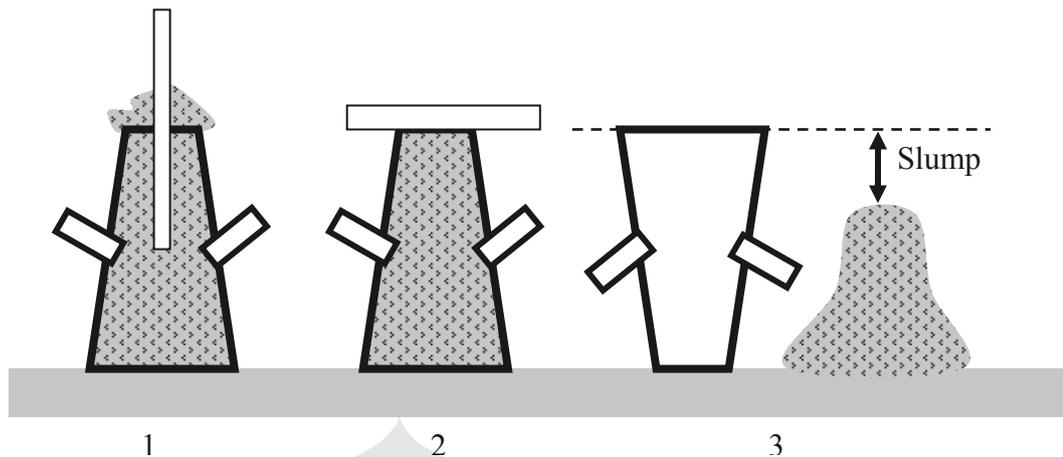


Sumber: (*ibid.*)

Cara pengujian yakni, mold ditempatkan pada permukaan yang datar dan tidak bersifat absorbtif dengan posisi tegak. Kemudian, diisi dengan adonan campuran yang telah dibuat dalam tiga layer, masing-masing sepertiga bagian. Setelah penempatan dan pengisian tersebut, layer pertama dipadatkan dengan batang agar campuran menempati ruangan secara merata sebanyak 25 kali. Proses ini dilakukan pengulangan untuk layer-layer berikutnya hingga layer yang paling atas. Ketika mold terisi penuh dengan adonan campuran, puncak adonan campuran dari mold diratakan dengan sedikit ditekan, kemudian mold diangkat keatas dengan perlahan-lahan. Selisih antara tinggi mold dengan penurunan adonan campuran diukur (mengambil bagian ditengah), dan hasil tersebut adalah nilai slump yang diperoleh.



Gambar 2.3.3.b. Prosedur *Slump Test*



Sumber: (*ibid.*)

Keterangan:

1. Mengisi mold dengan prosedur standar.
2. Meratakan permukaan mold.
3. Mengangkat mold dan mengukur penurunan puncak bagian tengah spesimen.

Sedangkan nilai maksimum dan minimum slump yang direkomendasikan untuk berbagai jenis konstruksi tertera pada tabel berikut:

Tabel. 2.3.3.a. Rekomendasi Slump untuk Berbagai Jenis Tipe Konstruksi

Types of construction	Slump (in.)	
	Maximum	Minimum
Footing, caissons, foundation walls, and substructure walls	3	1
Beams, coloumns, and walls	4	1
Pavements, and slabs	3	1
Mass concrete	2	1

Sumber: (*ibid.*)

Langkah 2 : Memilih Ukuran Maksimum Agregat

Memilih ukuran maksimum yang mungkin diterapkan pada proporsi campuran yakni memperbesar ukuran maksimum dari agregat bergradasi baik, kemudian memperkecil total rongga (*void*) dari proporsi campuran yang



dihasilkan. Misalnya, suatu campuran memerlukan lebih sedikit mortar per unit volume dari beton. Secara umum dapat dilakukan dengan pendekatan:

$$\text{Ukuran maksimum} \leq (\text{dimensi terdekat} / 5) \dots\dots\dots(\text{Pers.2.3.3.1})$$

$$\text{Ukuran maksimum} \leq (\text{kedalaman slab} / 3) \dots\dots\dots(\text{Pers.2.3.3.2})$$

$$\leq 0,75 \text{ (jarak bersih antar tulangan pada beton)}$$

Langkah 3 : Perkiraan Campuran Air Dan Kandungan Udara

Terdapat dua kondisi dalam memperkirakan campuran air untuk pencapaian slump dan tipe campuran yang diinginkan, yakni kondisi tidak ada udara yang masuk dan pengizinan udara masuk dalam campuran. Untuk kondisi udara masuk dalam campuran (*air-entrained*) harus digunakan ketika hasil campuran/beton terekspos dan dibutuhkan untuk mencapai resistensi yang cukup terhadap stres sebagai akibat dari temperatur yang fluktuatif. Jumlah air yang dibutuhkan (berdasarkan slump yang ingin dicapai) berkurang seiring dengan meningkatnya ukuran maksimum dari agregat. Berikut adalah tabel yang memperlihatkan hubungan nilai slump terhadap campuran air dan kandungan udara pada campuran:

Tabel. 2.3.3.b. Perkiraan Campuran Air dan Kandungan Udara untuk Campuran Agregat

Range of Slump (in.)	Approximate mixing water (lb/yd ³ of mixing) For nominal maximum size of CA (in.)							
	0,375	0,5	0,75	1	1,5	2	3	6
	Non-air entrained							
1 – 2	350	335	315	300	275	260	240	210
3 – 4	385	365	340	325	300	285	365	230
6 – 7	410	385	360	340	315	300	285	-
Approximate Air content (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	Air entrained							
1 – 2	305	295	280	270	250	240	225	200
3 – 4	340	325	305	295	275	265	250	220
6 – 7	365	345	325	310	290	280	270	-
Recommended Air content (%)	4.5-7.5	4.0-7.0	3.5-6.0	3.0-6.0	2.5-5.5	2.0-5.0	1.5-4.5	1.0-4.0

Sumber: Shan Somayaji, *Civil engineering Materials*, dan ACI 211.1-91



Kemudian dilanjutkan pada peninjauan kandungan udara untuk campuran normal dan campuran beton ringan dalam kondisi *moderate* dan *severe exposure*. *Moderate exposure* adalah kondisi dimana terdapat pada iklim dingin, campuran beton akan terekspos secara berkala terhadap kondisi lembab hingga beku, dan tidak menggunakan garam untuk menghilangkan lapisan beku tersebut. *Severe exposure* adalah kondisi dimana terdapat pada iklim dingin, campuran beton mungkin akan terus menerus kontak dengan kondisi lembab hingga beku atau menggunakan garam untuk menghilangkan lapisan beku tersebut. Berikut adalah tabel hubungan ukuran maksimum agregat kasar terhadap kandungan udara total untuk campuran beton *frost-resistant*:

Tabel. 2.3.3.c. Total Kandungan Udara untuk Campuran Beton *Frost-Resistant*

Normal maximum coarse aggregate size (in.)	Air content (%)	
	Severe exposure	Moderate exposure
0,375	7,5	6
0,5	7	5,5
0,75	6	5
1	6	4,5
1,5	5,5	4,5
2	5	4
3	4,5	3,5

Sumber: Shan Somayaji, *Civil engineering Materials*, dan ACI 318-89

Langkah 4 : Memilih Rasio Water – Cement (W/C)

Rasio w/c (dari berat) dipilih berdasarkan kebutuhan *strength* dan *durability* dari design campuran. Ketika menggunakan semen tipe I, nilai perkiraan dan konservatif dapat diestimasikan dari tabel berikut:



Tabel. 2.3.3.d. Nilai Izin Maksimum Rasio Berat W/C untuk Percobaan *Mix Design*

Specified compressive strength $f'c$ (Psi)	Absolute water/cementitious materials ratio by weight	
	Non-air entrained	air entrained
2500	0,67	0,54
3000	0,58	0,46
3500	0,51	0,40
4000	0,44	0,35
4500	0,38	-
-	-	-

Sumber: (*ibid.*)

Sebagai catatan bahwa tabel tersebut menunjukkan nilai izin maksimum rasio berat w/c untuk kompresif *strength* yang telah dispesifikasikan. Kemudian, nilai *strength* rata-rata yang dibutuhkan harus lebih besar dari pada nilai *strength* yang telah dispesifikasikan dalam design campuran. Upaya tersebut dapat ditempuh berdasarkan penyesuaian ketentuan seperti yang tertera pada tabel berikut:

Tabel. 2.3.3.e. Kebutuhan Rata-rata Kompresif *Strength* untuk Percobaan *Mix Design*

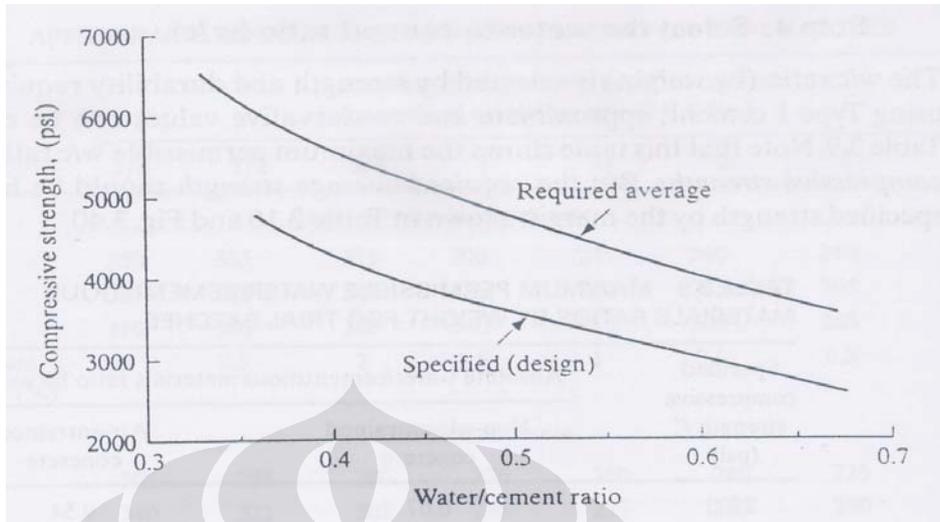
Specified compressive strength $f'c$ (Psi)	Required average compressive strength $f'c$ (Psi)
< 3000	$f'c + 1000$
3000 – 5000	$f'c + 1200$
> 5000	$f'c + 1400$

Sumber: (*ibid.*)

Hubungan ketentuan nilai rata-rata kompresif *strength* yang dibutuhkan pada tabel diatas, juga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Grafik 2.3.3.b. Nilai Spesifikasi dan Kebutuhan Rata-rata Kompresif *Strength*



Sumber: (*ibid.*)

Langkah 5 : Menghitung Kandungan Semen

Perhitungan kandungan semen dalam campuran dapat dilakukan dengan formulasi sebagai berikut:

$$\text{Berat kandungan semen} = \frac{\text{Perkiraan campuran air}}{(\text{w/c})} \dots\dots\dots(\text{Pers.2.3.3.3})$$

Langkah 6 : Perkiraan Kandungan Agregat Kasar

Untuk perkiraan atau penentuan kandungan agregat kasar dalam campuran dapat dilihat pada tabel dibawah yang memberikan ketentuan volume agregat kasar (kondisi *dry-rodded*, per unit volume dari campuran beton) untuk menghasilkan campuran beton berdasarkan *workability*. Volume tergantung pada modulus agregat halus dan ukuran maksimum agregat kasar.



Tabel. 2.3.3.f. Volume Agregat Kasar Per Unit Volume Campuran Beton Berdasarkan Kebutuhan *Workability*.

Nominal maximum coarse aggregate size (in.)	Volume of dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for fineness modulus of sand			
	2,4	2,6	2,8	3,0
0,375	0,50	0,48	0,46	0,44
0,5	0,59	0,57	0,55	0,53
0,75	0,66	0,64	0,62	0,60
1	0,71	0,69	0,67	0,65
1,5	0,75	0,73	0,71	0,69
2	0,78	0,76	0,74	0,72
3	0,82	0,80	0,78	0,76
6	0,87	0,85	0,83	0,81

Sumber: Shan Somayaji, *Civil engineering Materials*, dan ACI 211.1-91

Langkah 7 : Perkiraan Kandungan Agregat Halus

Kandungan agregat halus dalam campuran ditentukan dengan perhitungan selisih antara total volume campuran beton dan volume komposisi material yang telah dilakukan perhitungan hingga langkah 6 tersebut diatas.

Volume agregat halus = volume campuran beton – (volume air, volume semen, agregat kasar, dan udara).

$$V_{fine\ aggregate} = V_{concrete} - (V_{cement} + V_{CA} + V_{water} + V_{air}) \dots (Pers.2.3.3.4)$$

Langkah 8 : Menentukan Campuran Di Lapangan (Berdasarkan Kelembaban Agregat Halus dan Agregat Kasar)

Penyesuaian kandungan air dan berat dari agregat halus dan agregat kasar tergantung pada kadar kelembaban dalam agregat tersebut. Peninjauan perhitungan dari langkah 1 hingga langkah 7 didasarkan pada asumsi bahwa agregat tidak memberikan atau menyerap kelembaban pada campuran. Pada kenyataannya, kondisi tersebut diharapkan terdapat kandungan air/kelembaban dan berat yang diperhitungkan harus ditambah sebagai akibat dari kelembaban yang diabsorpsi dan yang terdapat dipermukaan dari partikel agregat tersebut. Kemudian, jumlah campuran air harus dikurangi dengan jumlah kelembaban bebas yang terkandung dalam agregat tersebut. Kelembaban bebas adalah selisih



dari kandungan kelembaban dengan absorpsi pada agregat. Dengan kata lain, jika agregat dalam kondisi kering akan menyerap kelembaban dari campuran air. Sehingga, jumlah campuran air harus ditambah untuk mengganti absorpsi air oleh agregat.

Langkah 9 : Perhitungan Proporsi Campuran Di Lapangan

Langkah ini diupayakan dengan penentuan proporsi antara semen, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan mengambil berat semen sebagai acuan perbandingan.

Cement : fine aggregate : coarse aggregate : water = C : FA : CA : W

Contoh: suatu campuran dikomposisikan berat semen, agregat halus, agregat kasar, dan air masing-masing adalah 580 lb, 1177 lb, 1979 lb, dan 250,6 lb.

$$\begin{aligned}\text{Proporsi campuran lapangan} &= C : FA : CA : W \\ &= 580 : 1177 : 1979 : 250,6 \\ &= 1 : 2,03 : 3,41 : 0,43\end{aligned}$$

Langkah 10 : Menghitung Masing-masing Berat Komponen Campuran

Berat masing-masing komponen campuran dihitung dengan menyamakan total volume dari komponen campuran terhadap total volume beton yang dihasilkan. Berikut adalah contoh perhitungannya:

$$\text{Proporsi campuran} = 1 : 2 : 3,3 : 0,5$$

$$\text{Kandungan udara} = 3\%$$

$$\text{Specific gravity dari semen, agregat halus, dan agregat kasar} = 3,15; 2,65; \text{ dan } 2,7$$

$$\text{Volume beton yang dibutuhkan} = 2,2 \text{ ft}^3$$

Persamaan total volume beton:

$$2,2 = \frac{W_c}{62,4} \left[\frac{1}{3,15} + \frac{2}{2,65} + \frac{3,3}{2,7} + \frac{0,5}{1} \right] + \frac{3(2,2)}{100}$$

$$2,2 = \frac{W_c}{62,4} (2,794) + 0,066$$

Diperoleh nilai $W_c = 48 \text{ lb}$, mengacu pada perbandingan proporsi campuran sehingga didapatkan komponen campuran yang lainnya :



$$W_{FA} = 48 \times 2 = 96 \text{ lb}$$

$$W_{CA} = 48 \times 3,3 = 158 \text{ lb}$$

$$W_w = 48 \times 0,5 = 24 \text{ lb}$$

2.4. TANAH LUNAK

Kegagalan yang terjadi pada *sub-grade* pondasi timbunan biasanya terdapat pada konstruksi timbunan yang mengambil lokasi di atas tanah lunak dan tanah gambut. Mengingat tanah lunak dan tanah gambut memiliki kapasitas daya dukung yang kecil, sehingga tidak mampu menahan beban timbunan yang besar. Akibatnya, *settlement* yang terjadi pada timbunan dan pada tanah dasarnya sendiri sangat besar. Adapun spesifikasi tanah gambut dan tanah lunak yang melatar belakangi upaya pengontrolan *settlement* melalui pemilihan material timbunan ringan pada pekerjaan konstruksi timbunan, tertera pada tabel sebagai berikut:

Tabel 2.4.a. Spesifikasi Tanah Gambut

Parameter tanah gambut	Rentang nilai
Kadar air, w (%)	467 – 1224
Berat jenis, Gs	1,50 – 1,77
Berat isi, γ (kN/m ³)	9,0 – 10,5
Kandungan organik (%)	41,0 – 99,7
Kandungan fiber (%)	6,0 – 56,0
pH	1,77 – 3,25
C' (kPa)	0 – 4
Sudut geser, ϕ' (°)	17 – 39
Su (kPa)	6 – 17
Cc	1,31 – 9,63
Klasifikasi Von Post, H	H2 – H5
Koefisien permeabilitas vertikal, k (m/s)	$8,4 \times 10^{-8}$ – $3,5 \times 10^{-7}$

Sumber: Fahmi Aldamar, Maulidya Indah Junica,
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan



Tabel 2.4.b. Spesifikasi Tanah Lunak

Tanah Lempung (Clay)						
Konsistensi	N – SPT	Sondir		Vane shear test	Geser unconfined	Torvane
		qc (kg/cm ²)	Fs (kg/cm ²)	S (kg/cm ²)	qu (kg/cm ²)	S (kg/cm ²)
Very soft	2	5	0 – 0,1	0,125	0,25	0,125
Soft	2 – 4	5 – 10	0,1 – 0,3	0,125 – 0,25	0,25 – 0,50	0,125 – 0,25
medium	4 – 8	10 – 20	0,3 – 0,45	0,25 – 0,50	0,50 – 1,00	0,25 – 0,50
Tanah Pasir (Sand)						
Kepadatan relatif	Kerapatan Relatif (Dr)	N – SPT	Perlawanan konus qc (kg/cm ²)	Sudut geser ϕ (... ^o)		
Very loose	< 0,2	< 4	< 20	< 30		
Loose	0,2 – 0,4	4 – 10	20 – 40	30 – 35		
Medium	0,4 – 0,6	10 – 30	40 – 120	35 – 40		

Sumber: Terzaghi dan Peck, 1948

Selain itu, peninjauan klasifikasi tanah berdasarkan pengaruh sifat kegempaan untuk lapisan setebal maksimum 30 m paling atas dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Tabel 2.4.c. Jenis-jenis Tanah

Jenis tanah	Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata, v_s rata-rata (m/det)	Nilai rata-rata SPT, $N_{rata-rata}$	Kuat geser nilai rata-rata, $Su_{rata-rata}$ (kPa)
Tanah keras	≥ 350	≥ 50	≥ 100
Tanah sedang	$175 \leq v_s \text{ rata} < 350$	$15 \leq N_{rata} < 50$	$50 \leq Su_{rata} < 100$
Tanah lunak	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil dengan tanah lunak yang tebal total lebih dari 3 m dengan $PI > 20$, $w_n \geq 40\%$, dan $Su < 25$ kPa		
Tanah khusus	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi		

Sumber : SNI 03-1726-2002, pasal 4.6.3