

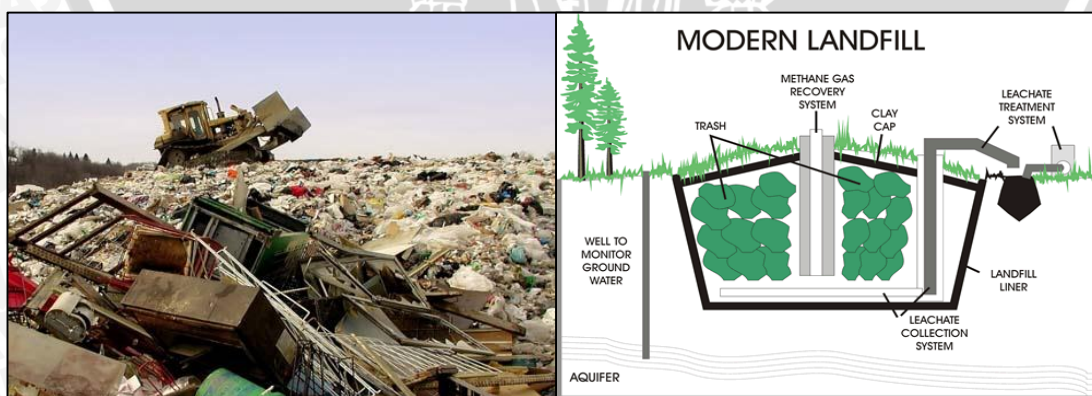
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pencemaran Air Tanah (*Groundwater Contamination*)

Pencemaran adalah masuknya zat yang tidak diinginkan ke dalam air tanah yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Kontaminan air tanah dikategorikan menjadi dua sumber yaitu sumber terpusat yang disebarluaskan, dan sumber-sumber tidak terpusat. Kebocoran tangki penyimpanan gas, kebocoran tangki *septic tank*, dan tumpahan yang disengaja pada TPA adalah contoh dari sumber terpusat. Infiltrasi dari lahan pertanian yang mengandung pestisida dan pupuk adalah contoh dari sumber tidak terpusat.

Dari sekian banyak pencemaran sumber terpusat yang lebih penting adalah tempat pembuangan sampah kota dan tempat pembuangan limbah industri. Ketika salah satu dari sumber pencemaran ini terjadi pada akuifer, potensi meluasnya kontaminasi semakin besar. Sumber pencemaran terpusat lain secara individual kurang signifikan, tetapi sumber pencemaran itu terjadi dalam jumlah besar di seluruh negeri. Beberapa sumber-sumber berbahaya dan kontaminasi yang meluas adalah *septic tank*, kebocoran dan tumpahan bahan bakar minyak dan cairan organik industri padat.

Sistem septik (*septic system*) dirancang sedemikian rupa sehingga limbah yang masuk ke dalam tangki terdegradasi dan diserap oleh pasir serta lapisan tanah di sekitarnya. Kontaminan yang dapat masuk ke dalam air tanah dari sistem septik meliputi bakteri, virus, deterjen, dan pembersih lantai. Hal ini dapat mengakibatkan masalah pencemaran yang sangat serius. Meskipun pada kenyataannya sumber kontaminan pada *septic tank* telah diketahui, namun sumber kontaminan ini masih belum banyak diperhatikan.



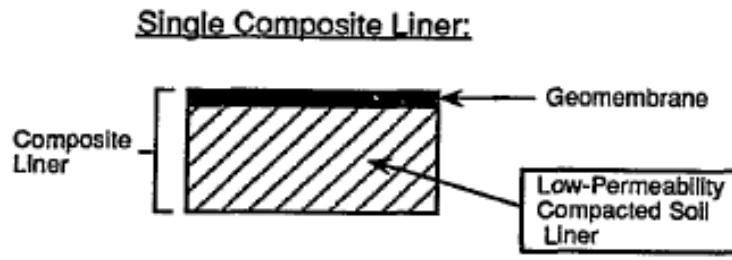
Gambar 2.1. TPA dengan metode *open dumping* (kiri) dibandingkan dengan *modern landfill* (kanan) yang memiliki *landfill liner*.

Sumber: <http://oceanworld.tamu.edu/resources/environmentbook/groundwatercontamination.html> (diakses 23 Februari 2014).

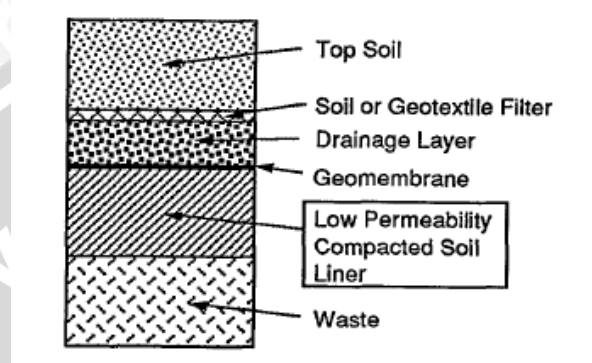
Gambar 2.1 menjelaskan perbandingan metode pembuangan limbah *open dumping* pada TPA yang digunakan oleh kebanyakan kota-kota berkembang dan sistem *modern landfill* yang masih belum banyak diaplikasikan. Sistem *modern landfill* memiliki lapisan TPA (*landfill liner*) untuk menghalangi cairan lindi masuk ke dalam TPA. Cairan lindi dapat mencemari air tanah ketika air hujan meresap ke dalam akuifer di bawah TPA. Kebanyakan TPA yang sudah dibangun tidak mempunyai lapisan untuk menghalangi air hujan yang mengalir melalui TPA, dan beberapa TPA saat ini mempunyai lapisan penyerapan tersebut. Air yang meresap melarutkan bahan-kimia beracun dari baterai, bola lampu yang rusak/pecah, peralatan elektronik, bahan-kimia rumah tangga yang dibuang, cat dan bahan pelarut. Walaupun TPA saat ini melarang pembuangan limbah beracun secara bebas dan mengatur pembuangan limbah untuk mencegah pencemaran air tanah, masih banyak TPA lainnya yang tidak memiliki lapisan (*landfill liner*) sehingga mengakibatkan pencemaran.

2.2. Struktur *Compacted Soil Liner*

Compacted Soil Liner (CSL) telah digunakan selama bertahun-tahun sebagai penghalang merembesnya air untuk Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Beberapa pelapis dasar dan sistem penutup yang umum digunakan adalah CSL tunggal. CSL sering digunakan bersama dengan lapisan geomembran untuk membentuk pelapis komposit, dimana geomembran ditempatkan langsung pada permukaan CSL. Contoh pelapis dasar yang digunakan pada sistem pelapis dan penutup ditunjukkan pada Gambar. 2.2.

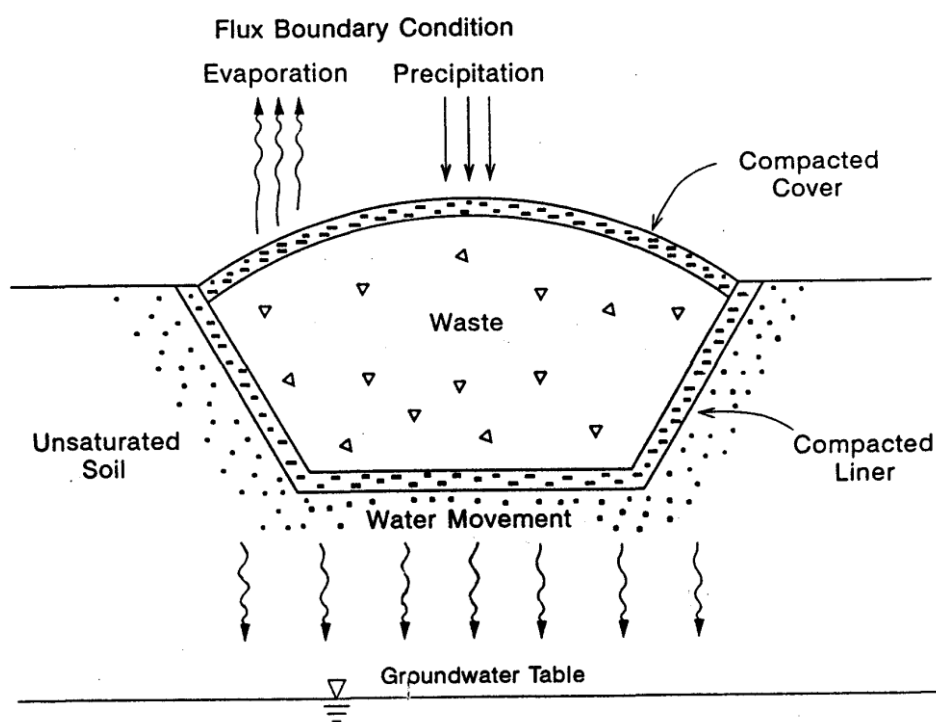


(a) Jenis Sistem Pelapis



(b) Jenis Sistem Penutup

Gambar 2.2. Gambar Contoh CSL pada Pelapis Dasar (a) dan Sistem Penutup (b)
 Sumber : EPA (1993)



Gambar 2.3. Gambar Perpindahan Air melalui Lapisan Penutup di sepanjang Aliran pada Zona Tak Jenuh di bawah Pelapis Dasar.
 Sumber : Dewlyn G. Fredlund dan Harianto Raharjo,1993.

Pemadatan tanah secara luas dimanfaatkan sebagai sistem pelapis dasar (*liner systems*) untuk mencegah merembesnya material limbah ke lingkungan. Efektifitas dari sistem ini dikendalikan oleh permeabilitas dan ketebalan pelapis dasar (*liner*) itu sendiri. Secara umum, *Environmental Protection Agency* (EPA, 1993) menetapkan batas maksimum permeabilitas dan batas minimum ketebalan pelapis dasar (*liner*) yang diijinkan, yaitu ketebalan pelapis dasar (*liner*) harus lebih besar dari 2 ft (0,60 m) serta koefisien permeabilitas tidak diperbolehkan melebihi 1×10^{-9} m/s.

Pemadatan merupakan usaha untuk mempertinggi kerapatan tanah dengan pemakaian energi mekanis untuk menghasilkan pemampatan partikel. Tanah dapat dikerjakan pada mulanya dengan pengeringan, penambahan air, agregat (butir-butir), atau dengan bahan-bahan stabilisasi seperti semen, gamping, abu batubara atau bahan lainnya (Joseph E. Bowles, 1991).

Tujuan pemadatan adalah untuk meningkatkan sifat-sifat teknis suatu jenis tanah. Berat isi kering harus dispesifikasikan untuk mencapai tujuan ini, dan bukannya dengan hanya menentukan “tanah harus dipadatkan sampai 95 persen dari berat isi yang diperoleh dari uji pemadatan standart”. Beberapa keuntungan yang didapatkan dengan adanya pemadatan ini adalah:

1. Berkurangnya penurunan permukaan tanah (*subsidence*), yaitu gerakan vertikal di dalam massa tanah itu sendiri akibat berkurangnya angka pori.
2. Bertambahnya kekuatan tanah.
3. Berkurangnya penyusutan-berkurangnya volume akibat berkurangnya kadar air dari nilai patokan pada saat pengeringan.

Kerugian utamanya adalah bahwa pemuaiian (bertambahnya kadar air dari nilai atokannya) dan kemungkinan pembekuan tanah itu akan membesar (Joseph E. Bowles, 1991).

Pemanfaatan tanah yang berasal dari tempat *ekskavasi* lokal yang berbeda dari proyek konstruksi teknik ini dapat menjadi suatu alternatif yang lebih ekonomis (Wijeyesekera *et al.*, 2001; Met *et al.*, 2004; Bozbey dan Guler, 2005). Tanah hasil *ekskavasi* ini digunakan sebagai campuran untuk pelapis dasar tanah yang dipadatkan (*compacted soil liner*), yang memungkinkan banyak kota-kota kecil dimana kondisi ekonomi tidak mengijinkan penggunaan bahan-bahan geosintetik untuk menyelesaikan permasalahan pembuangan limbah berwawasan lingkungan.

2.2.1. Pelapis Dasar (*Liner*) dan Tanah Penutup (*Landfill Caps*)

Pelapis dasar (*liner*) lahan-urug membutuhkan pemilihan bahan yang mempunyai sifat-sifat kimia dan kekuatan yang cocok. Ketebalannya mampu untuk mencegah kegagalan akibat gaya atau tekanan dari luar atau dari dalam. Lapisan ini juga harus mampu menahan *settlement* atau pengembangan. Fungsi pelapis dasar adalah :

1. Menahan aliran cemaran.
2. Menyerap atau mengurangi cemaran agar tidak terlarut maupun terlarut.

Pelapis dasar dapat dikelompokkan dalam beberapa cara, yaitu :

- a. Berdasarkan metode konstruksinya, antara lain:
 - Secara *on-site*, yaitu bahan dari luar dan dipasang di tempat atau tanah setempat dipadatkan, atau bahan dicampur di tempat atau disebar di tempat.
 - *Prefabricated*, yaitu *liner membrane*.
 - Campuran, yaitu dibawa dari luar dan dipasang pada *site* secara *on-site*.
- b. Berdasarkan sifat-sifat strukturalnya, antara lain:
 - Kaku, contohnya adalah tanah dan semen.
 - Semi kaku, contohnya adalah aspal.
 - *Fleksibel*, contohnya adalah *membrane polimer*.

Komponen utama system *liner* terdiri dari 3 jenis, yaitu:

- a. Lapisan kedap, yaitu lapisan terbawah yang berfungsi sebagai penahan resapan *leachate* ke lapisan tanah di bawahnya.
- b. Lapisan pasir, yaitu lapisan yang berfungsi sebagai tempat pengaliran *leachate* menuju ke saluran pengumpul.
- c. Lapisan tanah pelindung, berfungsi sebagai pelindung lapisan kedap dari pelintasan kendaraan dan gangguan-gangguan lainnya.

Apabila TPA sudah tidak lagi berfungsi dengan baik (atau dinilai membahayakan dalam kondisi saat ini), maka memungkinkan bahwa TPA tersebut harus ditutup dengan cara yang aman dan ramah lingkungan. Peraturan EPA pada 26 Juli 1982, menyatakan filosofi dasar desain yang dimaksudkan untuk menunjukkan pembatasan tempat pembuangan sampah limbah berbahaya. Bukan berarti penutupan ini adalah untuk tempat pembuangan sampah yang tidak berdampak pada sumber air tanah lokal. Rekomendasi ini dijabarkan dengan rincian sebagai berikut:

Penutupan unit tempat pembuangan, penutup adalah lapisan bagian paling atas, yang ditempatkan pada unit bagian penutupan. Penutup (caps), seperti lapisan

bawah belum bisa diharapkan untuk bertahan selamanya. Namun, penutup yang dirancang dan dikelola dengan baik dapat mencegah masuknya cairan ke dalam unit tertutup, dengan demikian dapat meminimalkan pembentukan dan pemindahan lindi, selama bertahun-tahun dan setelahnya tanpa adanya kerusakan. Oleh karena itu, EPA mensyaratkan bahwa penutup akan dirancang dan dibangun untuk meminimalkan pergerakan cairan jangka panjang ke dalam unit tertutup. Karena lempung umumnya akan bertahan lebih lama dibandingkan bahan sintetis, penutup dari lempung berbeda dengan penutup sintetis yang seharusnya menjadi bahan yang dipilih untuk memberikan minimalisasi jangka panjang.

Untuk menghindari penumpukan cairan di TPA tertutup, EPA mensyaratkan bahwa tutup lapisan bawah harus bersifat kedap air. Hal ini akan membutuhkan pemasangan selaput tutup dan lapisan bawah buatan. Dengan demikian, banyak unit yang akan dibutuhkan untuk dua pelapis tutup yang terdiri dari lapisan buatan untuk menghindari efek memancarnya cairan keluar dan memberikan pencegahan infiltrasi jangka pendek, serta lapisan lempung untuk meminimalkan infiltrasi air hujan dan perkembangan cairan lindi jangka panjang. EPA yakin bahwa hal ini akan memberikan perlindungan maksimum bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Masalah utama yang dihadapi dalam pembangunan TPA adalah bagaimana cara untuk mengurangi dampak negatif dari pembuangan limbah seperti tanah longsor, infiltrasi lindi ke dalam tanah dan air tanah, polusi udara, dan erosi terhadap lingkungan. Hal ini dapat diminimalkan dengan membuat lapisan bawah dan atas untuk membatasi mengalirnya lindi ke dalam air tanah (e.g. Bagchi, 2004; Horn & Stepniewski, 2004; Tarsi & Zouboulis 2002; Wysocka et.,al, 2007) disaat yang sama emisi gas dan masuknya oksigen di atas lapisan *capping*. Berdasarkan literatur dan ilmu keteknikan, dua pendekatan yang berbeda diperoleh; pengaplikasian membran polymer dan pemanfaatan material mineral lokal yang mengandung sejumlah tanah lempung (Bagchi, 2004). Kedua pendekatan tersebut mempunyai manfaat dan batasan masing-masing, terutama di negara berkembang yaitu pengaplikasian lapisan dengan mineral lempung, disamping resiko retak (*cracking*), terkadang didukung oleh lapisan sederhana yang datang dari peneliti lokal (e.g. Ahmed, 2008; Gunarathna et.,al, 2007). Tidak hanya di Asia tetapi juga Eropa.

Permeabilitas tanah asli umumnya lebih besar dibandingkan nilai yang ditetapkan oleh standart nasional maupun internasional untuk lapisan bawah TPA (Umumnya konduktivitas hidraulik minimum untuk lapisan bawah TPA tidak boleh

melebihi 1×10^{-9} m/s), tidak sesuai sebagai lapisan *capping*. Pemadatan dapat digunakan untuk mengurangi nilai konduktivitas hidraulik. Pengaruh pemadatan pada sifat hidraulik tanah dapat dengan mudah dijelaskan oleh Hagen - Hukum *Poiseuille* dan telah dibuktikan oleh *Kooistra* dan *Tovey* (1994) yang menemukan bahwa penurunan ukuran dan bentuk tanah disebabkan oleh mesin.

2.2.2. Bentonite sebagai Material Compacted Soil Liner

Pemanfaatan sodium *bentonite* sebagai bahan untuk menurunkan koefisien permeabilitas dari pemadatan tanah telah dipelajari oleh beberapa penulis (*Gleason et.al.*, 1997; *Kaya and Durukan*, 2004; *Roberts dan Shimaoka*, 2008). *Bentonite* adalah mineral lempung yang mengandung *montmorillonite* sebagai mineral penyusun utamanya. Mineral ini mempunyai reaksi sangat kuat terhadap air dan pengembangan (*swelling*), yang mengakibatkan menurunnya konduktivitas hidrolis.

Campuran *bentonite* dengan tanah pasir secara luas digunakan sebagai penghalang untuk mengendalikan perpindahan cairan dari TPA karena campuran *bentonite* dapat berkombinasi dengan kekuatan yang relatif tinggi dan kemampuan rendah dengan daya konduktivitas hidrolis yang sangat rendah. Hal ini dapat dicapai dengan penggunaan suatu campuran yang berisi cukup tanah pasir untuk memastikan stabilitas campuran yang padat dan cukup *bentonite* untuk mengisi kekosongan antar butiran pasir. Manfaat lainnya adalah campuran *bentonite* dengan tanah pasir yang dipadatkan mengandung sejumlah kadar *bentonit* rendah yang bersifat melawan pengeringan (*Tay et.al.* 2001), dan campuran *bentonite* dengan tanah pasir mempunyai suatu bahan kapasitas penyangga kimia yang tinggi (*Yong*, 1999B).

Efek penambahan *Bentonite* terhadap konduktivitas hidrolis ditunjukkan pada gambar 2.4. untuk setiap tanah pasir kelanauan. Sebagai contoh untuk penambahan 4% sodium *Bentonite* cukup untuk menurunkan konduktivitas hidrolis lebih kecil dari dari 1×10^{-7} m/s.



Gambar 2.4. Hubungan antara Penambahan Sodium Bentonite dengan Konduktivitas Hidrolik pada Tanah Pasir Kelanauan yang dipadatkan.
Sumber : EPA (1993)

Lempung *bentonite* telah digunakan dalam berbagai aplikasi pengurukan dan penutupan tempat penyimpanan bahan bakar nuklir. Penyangga di sekitar limbah mengandung *bentonite pre-compacted* yang bersifat sebagai penghalang rembesan, selain itu *bentonite* juga digunakan dalam pengurukan dan penutupan terowongan limbah dan fasilitas bawah tanah yang lain. Lempung *bentonite* mempunyai sifat fisik material tertentu seperti kemampuan mengembang (*swelling*) dan kapasitas penyerapan yang tinggi. Sifat fisik ini tergantung pada mineralogi dan sifat kimia tanah dari material itu sendiri. Ada berbagai produk *bentonite* potensial dalam bentuk komersil yang tersedia di pasaran tetapi mineralogi dan sifat kimia yang terkandung di dalamnya tidaklah sama.

Perbedaan antara mineralogi dan sifat geokimia dari *bentonite* yang berbeda terjadi akibat perbedaan sumber terbentuknya. *Bentonite* biasanya terbentuk oleh perubahan abu vulkanik atau tufa, terutama *rhyolitic* atau *dasit*, baik secara *in situ* atau pengangkutan dan deposit ulang. Karakteristik utama *bentonite* adalah kandungan dari *smectites*, sekelompok mineral lempung dengan berbagai kandungan kimia di dalamnya. Sifat material yang diinginkan dari *bentonite*, seperti kemampuan mengembang, plastisitas, kemampuan pertukaran kation, dll, tergantung pada jumlah mineral *smektit*, spesies *smektit* dan pertukaran kation *interlayer*.

Hal ini penting mengenali sifat potensial mineralogi *bentonite* secara detail untuk mengevaluasi kemampuannya sebagai penyangga dan penguruk, serta mengevaluasi pengaruh keamanan jangka panjang. Untuk memperoleh hasil dari perbandingan karakteristik yang sesuai dengan metode penelitian, diperlukan evaluasi dan penentuan kembali.

2.3. Kriteria Permeabilitas untuk *Compacted Soil Liner Design*

Permeabilitas adalah kemampuan fluida untuk mengalir melalui medium yang berpori adalah suatu sifat teknis. Untuk masalah geoteknis, fluida itu adalah air dan medium yang berpori adalah massa tanah. Setiap bahan yang memiliki rongga disebut berpori, dan apabila rongga tersebut saling berhubungan, maka ia akan memiliki sifat permeabilitas (Joseph E. Bowles).

Permeabilitas merupakan parameter utama dalam merancang suatu tempat pembuangan limbah. Aspek terpenting yang dibutuhkan untuk menghalangi rembesan air yang masuk adalah permeabilitas dari pelapis dasar dan tanah penutup. Umumnya tanah lempung adalah material yang utama dipertimbangkan untuk digunakan. Tetapi, permasalahan dalam penggunaan tanah lempung adalah retaknya lempung pada musim kering. Oleh karena itu, tanah lempung harus dicampur dengan tanah asli untuk mengisi rongga-rongga saat terjadinya keretakan sehingga permasalahan rembesan dapat diatasi.

Banyak sumber menyebutkan tentang parameter permeabilitas tanah atau yang sering disebut dengan konduktivitas hidraulik tanah sebagai pelapis dasar dan tanah penutup. Berdasarkan EPA (1993) koefisien permeabilitas tanah pelapis tidak diperbolehkan melebihi 1×10^{-9} m/s, hal ini tergantung pada material yang dikandung tanah.

Sedangkan, menurut Pedoman *The European Union Landfill* (1999/31/*European Communities*) menentukan parameter permeabilitas berdasarkan jenis limbah yang dibuang di TPA. Pedoman ini merujuk bahwa TPA harus dikondisikan dan dirancang untuk memastikan pencegahan polusi terhadap atmosfer, air tanah, air permukaan dan tanah. Parameter permeabilitas TPA dibedakan berdasarkan persyaratan:

- TPA untuk limbah berbahaya, $K \leq 1 \times 10^{-9}$ cm/s dan ketebalan ≥ 5 m
- TPA untuk limbah tidak berbahaya, $K \leq 1 \times 10^{-9}$ cm/s dan ketebalan ≥ 1 m
- TPA untuk *innert waste*, $K \leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s dan ketebalan ≥ 1 m

Permasalahan utama adalah bagaimana mengurangi efek negatif dari dampak limbah seperti tanah longsor, menyerapnya lindi ke air tanah dan tanah, bau, hujan dan

erosi angin terhadap lingkungan sekitarnya. Pemisahan yang tepat terhadap limbah dapat dilakukan dengan membuat lapisan atas dan lapisan bawah yang membatasi lindi mengalir keluar dan infiltrasi air tanah (*e.g Bagchi, 2004; Horn and Stepniowski, 2004; Tatsi & Zouboulis 2002; Wysocka et.,al., 2007*) sedangkan situasi yang memungkinkan terjadi pada saat yang sama adalah emisi gas dan inflow oksigen dalam tutup lapisan atas.

2.4. Pengaruh Sifat Fisik (*Index Properties*) dan Mekanis Tanah

Sifat permeabilitas dan pengembangan yang dimiliki *bentonite* dan pasir *bentonite* adalah parameter penting untuk merancang TPA. Untuk merancang dan membangun fasilitas yang akurat nilai permeabilitas dari campuran *bentonite* dan pasir ini harus dievaluasi. Karena tujuan ini, berbagai pengujian laboratorium harus dilakukan untuk menyelidiki koefisien permeabilitas menggunakan metode pengujian langsung dan tidak langsung yang diperoleh dari teori konsolidasi menggunakan nilai *liquid limit* *bentonite*. Pengujian permeabilitas juga dilakukan untuk *bentonite* yang telah dipadatkan. Nilai *void ratio* *bentonite* adalah suatu parameter permeabilitas dari *bentonite* dan campuran *bentonite* dengan pasir. Spesimen pada metode pembuatan tidak mempengaruhi permeabilitas. Suatu rangkaian tekanan pengembangan dan uji deformasi ditunjukkan pada penggunaan variasi kadar *bentonite* (30 sampai 90%) pada awal berat kering 2 g/cm^3 untuk menyelidiki karakteristik material penyangga pada limbah radioaktif. kandungan bentonit pada campuran bentonite-pasir adalah sifat dari material penyangga yang utama dan harus dipertimbangkan untuk merancang tempat pembuangan limbah manapun. Kandungan bentonit dan kuat tekan beban pada spesimen dipengaruhi oleh tingkat pengembangan maksimum (*Shirazi et al., 2010*)

Permeabilitas dari pemadatan tanah yang baik tergantung pada struktur pembentukan tanah selama proses vabrikasi. Variabel yang paling berpengaruh pada struktur pemadatan tanah adalah kadar air, pembebanan dan metode pemadatan. Secara umum, nilai permeabilitas menurun saat kadar air mendekati optimum atau sedikit lebih basah dari kondisi OMC, semakin meningkatnya beban dan penggunaan metode peremasan tanah (*Mitchell., et. al, 1965; Benso., et. al, 1994; Wang and Benson, 1995*).

Mineral yang terkandung di dalam tanah dapat mempengaruhi koefisien permeabilitas secara signifikan. Tanah dengan kandungan mineral lempung aktif yang lebih tinggi dan butir tanah yang baik pada umumnya menghasilkan koefisien permeabilitas yang lebih rendah, sebagai akibat dari ketebalan pori-pori tanah yang semakin besar. Pada umumnya, nilai permeabilitas menurun dengan meningkatnya nilai

Liquid limit dan *Plasticity index*, karena indikator ini berhubungan langsung dengan mineralogi dan kandungan lempung dalam tanah (Benson.,et. al, 1994;. Mitchell and Soga, 2005).

2.5. Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah yang digunakan pada pengujian ini adalah sistem klasifikasi tanah AASHTO dan *Unified*. Kedua sistem ini dianggap dapat menafsirkan ciri-ciri suatu tanah karena memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas Atterberg.

2.5.1. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi ini dikembangkan dalam tahun 1929 sebagai *Public Road Administration Classification System*. Sistem ini sudah mengalami beberapa perbaikan ; versi yang saat ini berlaku adalah yang diajukan oleh *Committee on Classification of Materials for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board* dalam tahun 1945 (ASTM Standard no D-3282, AASHTO metode M 1 45).

Sistem klasifikasi AASHTO yang dipakai saat ini diberikan dalam Tabel 2.1. Pada sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir di mana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200. Tanah di mana lebih dari 35% butirannya lolos ayakan No. 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5 , A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

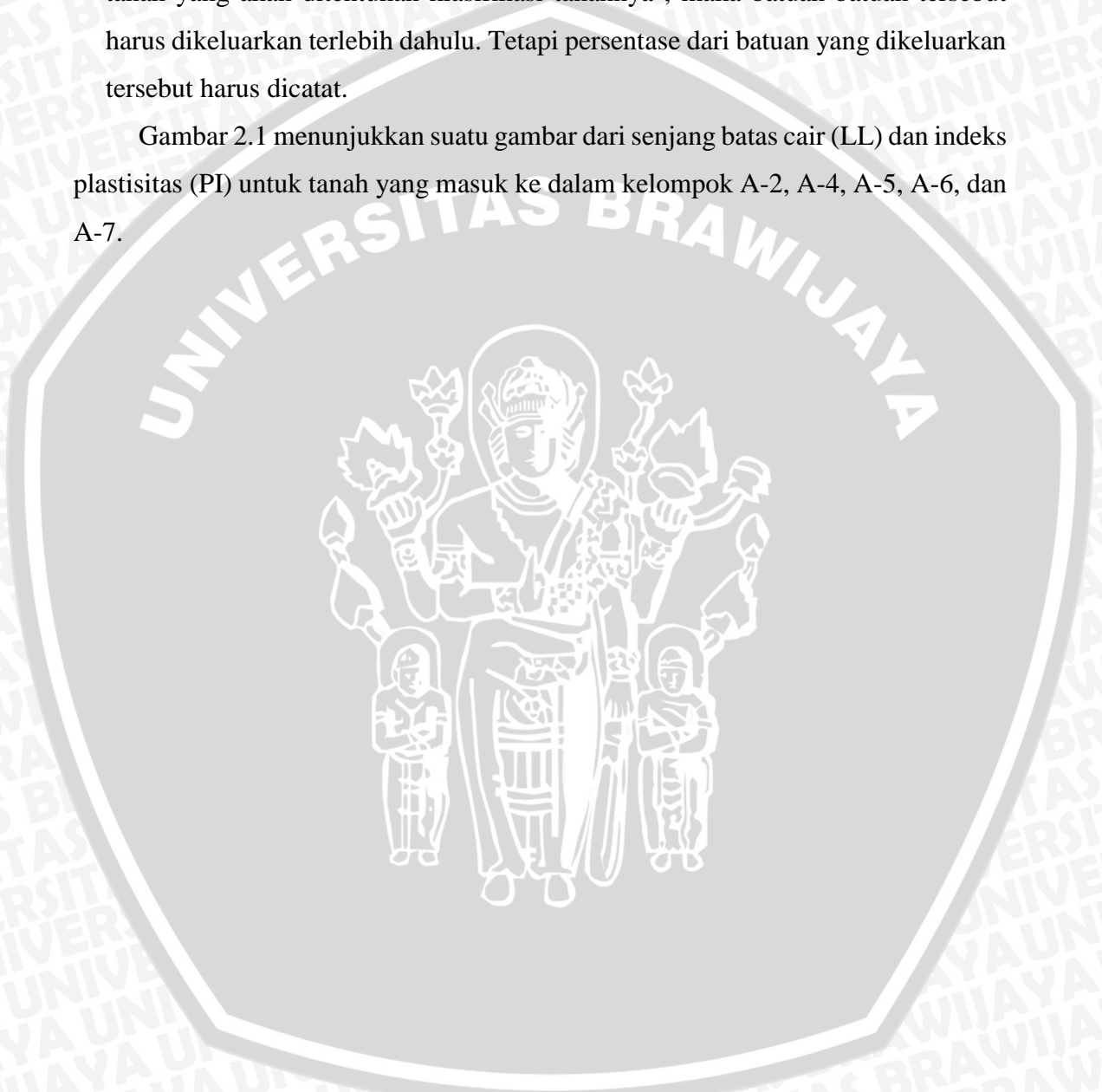
- 1) Ukuran butir
 - a) Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm dan yang tertahan di ayakan No.20 (2 mm).
 - b) Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No 10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm).
 - c) Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.

2) Plastisitas

Lanau merupakan bagian-bagian yang halus dari tanah dengan indeks plastisitas sebesar 10 atau kurang. Lempung merupakan bagian-bagian yang halus dari tanah dengan indeks plastik sebesar 11 atau lebih.

3) Apabila batuan (ukurannya lebih besar dari 75 mm) ditemukan didalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya , maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Gambar 2.1 menunjukkan suatu gambar dari senjang batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah yang masuk ke dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.

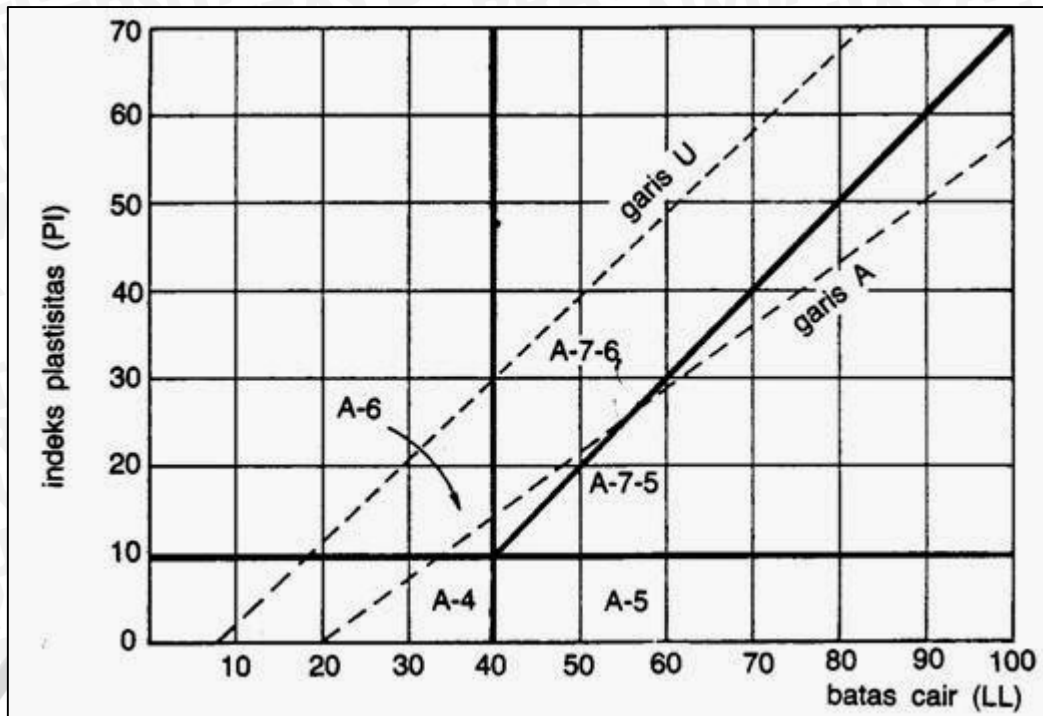


Tabel 2.1. Klasifikasi tanah untuk tanah dasar jalan raya, AASHTO

| Klasifikasi Umum | Tanah Granuler ¹ | | | | | |
|--|------------------------------|------------------|---|--------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | |
| Kelompok | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 |
| Persen lolos saringan : | | | | | | |
| No. 10 | 50 max | | | | | |
| No. 40 | 30 max | 50 max | 51 min | | | |
| No. 200 | 15 max | 25 max | 10 max | 35 max | 35 max | 35 max |
| Batas cair ² Indeks Plastisitas ³ | 6 max | | NP | 40 max 10 max | 41 min 10 max | 40 max 11 min |
| Fraksi tanah | Kerikil dan pasir | | Pasir halus | Kerikil dan pasir lanau atau lempung | | |
| Kondisi kuat dukung | Sangat baik hingga baik | | | | | |
| Klasifikasi Umum | Tanah Granuler | | Tanah Mengandung Lanau-Lempung ² | | | |
| Kelompok | A-2 | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | |
| | A-2-7 | | | | A-7-5 ^b | A-7-6 ^c |
| Persen lolos saringan : | | | | | | |
| No. 10 | | | | | | |
| No. 40 | | | | | | |
| No. 200 | 35 max | 36 min | 36 min | 36 min | 36 min | 36 min |
| Batas cair ³ Indeks Plastisitas ³ | 41 min 11 min | 40 max 10 min | 41 min 10 max | 40 max 10 min | 40 max 10 min | 41 min 11 min |
| Fraksi tanah | Kerikil, pasir lanau/lempung | | Lanau | | lempung | |
| Kondisi kuat dukung | Sangat baik hingga baik | | kurang baik hingga jelek | | | |

* Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$ † Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$

Sumber : Braja M. Das (1985)



Gambar 2.5. Rentang (*Range*) dari Batas Cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) untuk Tanah dalam Kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7

Sumber : Braja M. Das (1985)

Untuk mengevaluasi mutu (kualitas) dari suatu tanah sebagai bahan lapisan tanah dasar (*subgrade*) dari suatu jalan raya, suatu angka yang dinamakan indeks grup (*group index, GI*) juga diperlukan selain kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. Harga GI ini dituliskan di dalam kurung setelah nama kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. Indeks grup dapat dihitung dengan memakai persamaan seperti di bawah ini:

$$GI = (F-35)[0,2+0,005 (LL-40)]+0,01(F-15)(PI-10) \quad (2.1)$$

di mana:

F = persentase butiran yang lolos ayakan No. 200

LL = batas cair (*Liquid Limit*)

PI = indeks plastisitas.

Suku pertama persamaan 2.1, yaitu $(F-35) [0,2+0,005(LL-40)]$, adalah bagian dari indeks grup yang ditentukan dari batas cair (LL). Suku yang kedua, yaitu $0,01 (F-15) (PI-10)$, adalah bagian dari indeks grup yang ditentukan dari indeks plastisitas (PI). Berikut ini adalah aturan untuk menentukan harga dari indeks grup:

- Apabila Persamaan (2.1) menghasilkan nilai GI yang negatif, maka harga GI dianggap nol.

- b. Indeks grup yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.1) dibulatkan ke angka yang paling dekat (sebagai contoh: GI = 3,4 dibulatkan menjadi 3,0; GI = 3,5 dibulatkan menjadi 4,0).
- c. Tidak ada batas atas untuk indeks grup.
- d. Indeks grup untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-1 a, A-1 b, A-2-4, A-2-5, dan A-3 selalu sama dengan nol.
- e. Untuk tanah yang masuk kelompok A-2-6 dan A-2-7, hanya bagian dari indeks grup untuk PI saja yang digunakan, yaitu

$$CI = 0,01 (F - 1,5) (PJ - 10) \quad (2.2)$$

Pada umumnya, kualitas tanah yang digunakan untuk bahan tanah dasar dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari harga indeks grup.

Bila nilai indeks kelompok (GI) semakin tinggi, semakin berkurang ketepatan penggunaan tanahnya. Tanah granuler diklasifikasikan ke dalam klasifikasi A-1 sampai A-3. Tanah A-1 granuler yang bergradasi baik, sedang A-3 adalah pasir bersih yang bergradasi buruk. Tanah A-2 termasuk tanah granuler (kurang dari 35% lewat saringan no. 200), tetapi masih terdiri atas lanau dan lempung. Tanah berbutir halus diklasifikasikan dari A-4 sampai A-7, yaitu tanah lempung-lanau. Perbedaan keduanya didasarkan pada batas-batas Atterberg, Gambar 2.5 dapat digunakan untuk memperoleh batas-batas antara batas cair (LL) dan indeks plastis (PI) untuk kelompok A-4 sampai A-7 dan untuk sub kelompok dalam A-2.

2.5.2. Sistem Klasifikasi *Unified*

Sistem Klasifikasi *Unified* diberikan dalam Tabel 2.2. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu :

- 1) Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu: tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
- 2) Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau-organik dan lempung-organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Klasifikasi tanah berbutir halus dengan simbol ML, CL, OL, MH, CH, dan OH didapat dengan cara menggambar batas cair dan indeks plastisitas tanah yang bersangkutan pada bagan plastisitas (Casagrande, 1948) yang diberikan dalam Tabel 2.2. Garis diagonal pada bagan plastisitas dinamakan garis A yang diberikan dalam persamaan:

$$PI = 0,73 (LL - 20) \quad (2.3)$$

Tabel 2.2. Sistem Klasifikasi Unified

| Divisi utama | | Simbol kelompok | Nama umum |
|--|---|---|--|
| Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200 [†] | Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4 | Kerikil bersih (hanya kerikil) | GW Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | | GP Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | Kerikil dengan butiran halus | GM Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau |
| | | | GC Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung |
| | Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No. 4 | Pasir bersih (hanya pasir) | SW Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | | SP Pasir bergradasi-buruk dan pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | Pasir dengan butiran halus | SM Pasir berlanau, campuran pasir-lanau |
| | | | SC Pasir berlempung, campuran pasir - lempung |
| Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200 | Lanau dan Lempung Batas cair 50% atau kurang | ML Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung | |
| | | CL Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (lean clays) | |
| | | OL Lanau - organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah | |
| | Lanau dan Lempung Batas cair lebih dari 50% | MH Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis. | |
| | | CH Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays) | |
| | | OH Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi | |
| Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi | | PT | Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi |

* Menurut ASTM (1982)

† Berdasarkan tanah yang lolos ayakan 75 mm (3 in)

Tabel 2.2. Lanjutan

| | Kriteria klasifikasi | |
|---|---|---|
| <p>Klasifikasi berdasarkan persentase butir halus Kurang dari 5% lolos ayakan No. 200 GW, GP, SW, SP Lebih dari 12% lolos ayakan No. 200 GM, GC, SM, SC 5% sampai 12% lolos ayakan No. 200 Klasifikasi perbatasan yang memerlukan penggunaan dua simbol</p> | $C_u = D_{60}/D_{10}$ Lebih besar dari 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3. | |
| | Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW | |
| | Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ | Batas-batas Atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda |
| | Batas-batas Atterberg di atas garis A dengan $PI > 7$ | |
| | $C_u = D_{60}/D_{10}$ Lebih besar dari 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 | |
| | Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW | |
| | Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ | Batas-batas Atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda |
| | Batas-batas atterberg di atas garis A dengan $PI > 7$ | |
| <p>Bagan Plastisitas Untuk klasifikasi tanah berbutir-halus dan fraksi halus dari tanah berbutir-kasar Batas Atterberg yang digambarkan di bawah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda Persamaan garis A $PI = 0,73(LL - 20)$</p> <p>The figure is a plasticity chart with 'Batas cair' (Liquid Limit) on the x-axis (0 to 100) and 'Indeks plastisitas' (Plasticity Index) on the y-axis (0 to 60). A diagonal line labeled 'garis A' is plotted with the equation $PI = 0,73(LL - 20)$. The chart is divided into several regions: CH (above line A, LL > 60), CL (above line A, 40 < LL < 60), MH & OH (below line A, LL > 70), ML & OL (below line A, 40 < LL < 70), and CL-ML (below line A, LL < 40). A shaded region is shown below the line A and to the left of the vertical line at LL = 40.</p> | | |
| <p>Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat dalam ASTM Designation D-2488</p> | | |

Sumber : Braja M. Das (1985)

2.5.3. Perbandingan Sistem Klasifikasi AASHTO dan *Unified*

Kedua sistem klasifikasi, AASHTO dan *Unified*, adalah didasarkan pada tekstur dan plastisitas tanah. Juga, kedua sistem tersebut membagi tanah dalam dua kategori pokok, yaitu: berbutir kasar (*coarse-grained*) dan berbutir halus (*fine-grained*), yang dipisahkan oleh ayakan No. 200. Menurut sistem AASHTO, suatu tanah dianggap sebagai tanah berbutir halus bilamana lebih dari 35% lolos ayakan No. 200. Menurut sistem *Unified*, suatu tanah dianggap sebagai tanah berbutir halus apabila lebih dari 50% lolos ayakan No. 200. Suatu tanah berbutir kasar yang mengandung kira-kira 35% butiran halus akan bersifat seperti material berbutir halus. Hal ini disebabkan karena tanah berbutir halus jumlahnya cukup banyak untuk mengisi pori-pori antar butir-butir kasar dan untuk menjaga agar butiran kasar berjauhan satu terhadap yang lain. Dalam hal ini, sistem AASHTO adalah lebih cocok.

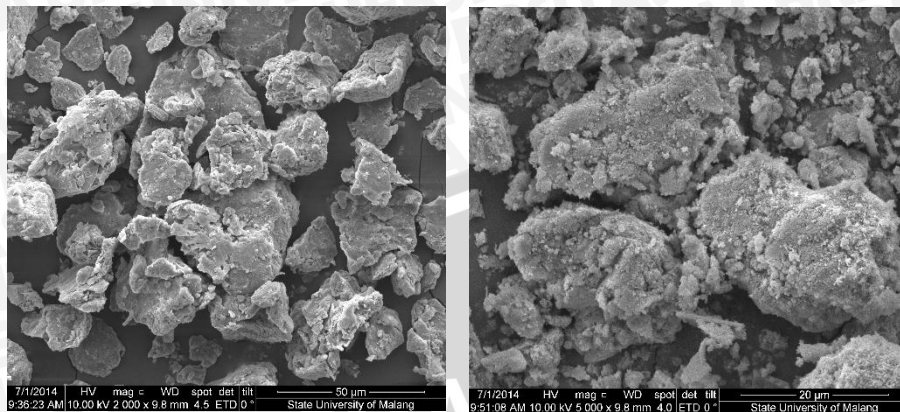
Dalam sistem AASHTO, ayakan no. 10 digunakan untuk memisahkan antara kerikil dan pasir; dalam sistem *Unified*, yang digunakan adalah ayakan No. 4. Dari segi batas ukuran pemisahan tanah, ayakan No. 10 adalah lebih dapat diterima untuk dipakai sebagai batas atas dari pasir. Dalam sistem *Unified*, tanah berkerikil dan berpasir dipisahkan dengan jelas, tapi dalam sistem AASHTO tidak. Kelompok A-2 berisi tanah-tanah yang bervariasi. Tanda-tanda seperti GW, SM, CH, dan lain-lain yang digunakan dalam sistem *Unified* menerangkan sifat-sifat tanah lebih jelas daripada simbol yang digunakan dalam sistem AASHTO.

Klasifikasi tanah organik seperti OL, OH, dan PT telah diberikan dalam sistem *Unified*, tapi sistem AASHTO tidak memberikan tempat untuk tanah organik.

2. 6. Uji SEM (*Scanning Electron Microscope* ASTM E986-97)

Pengujian SEM diatur pada ASTM E986-97. *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah suatu jenis mikroskop elektron yang menciptakan berbagai gambaran dengan memusatkan suatu berkas cahaya energi elektron tinggi ke permukaan suatu sampel dan sinyal pendeteksian dari interaksi elektron dengan permukaan sampel. Dalam uji SEM output yang dihasilkan adalah gambar perbesaran dari pembangkitan sinyal elektron, sehingga terdapat suatu perbedaan antara benda-benda yang materialnya berbeda karena susunan elektronnya yang berbeda-beda pula. Jenis sinyal terkumpul dalam suatu SEM bervariasi dan dapat meliputi elektron sekunder, karakteristik sinar *rontgen*, serta hamburan balik elektron. Pada penggunaan mikroskop elektron, merupakan berkas cahaya elektron yang dipusatkan untuk memperoleh perbesaran jauh

lebih tinggi dibanding suatu mikroskop cahayakonvensional. Contoh hasil uji SEM pada tanah lempung *Bentonite* dan tanah asli dapat dilihat pada Gambar 2.6. berikut.



(a)

(b)

Gambar 2.6. gambar (a) gambar uji SEM lempung *Bentonite* dengan perbesaran 2000x dan gambar (b) gambar uji SEM Tanah Asli dengan perbesaran 5000x
Sumber : Hasil Pengujian

Dari gambar 2.6 dapat ditarik kesimpulan bahwa *bentonite* memiliki susunan yang sangat rapat dan butiran yang relatif kecil. Hal ini ditunjukkan pada hasil uji SEM dengan perbesaran 2000x butiran *bentonite* tetap terlihat kecil dan relatif sama besar dengan yang lainnya, sedangkan pada tanah asli memiliki struktur butiran yang berbeda satu dengan yang lain. Selain itu dari gambar 2.6 menunjukkan bahwa lempung *bentonite* memiliki struktur butir yang lancip, sedangkan pada tanah asli strukturnya bergelombang. Lempung *bentonite* memiliki rongga-rongga kosong yang cukup banyak pada susunannya, sedangkan pada tanah asli relatif lebih rapat dan sedikit rongga.

Bentonite termasuk mineral lempung *clay* golongan *smektit dioktahedral* yang mengandung sekitar 80% *monmorilonit* dan sisanya antara lain *kaolit*, *ilit*, *feldspar*, *gypsum*, abu vulkanik, kalsium karbonat, pasir kuarsa dan mineral lainnya (Gunister *et al.*, 2004).

Istilah *bentonite* pertama kali diperkenalkan oleh W. C. Knight pada tahun 1989. Penamaan ini diberikkan karena *bentonite* ditemukan di daerah Fort Benton, Wyoming, Amerika Serikat. Sedangkan, istilah *monmorilonit* berasal dari Perancis yang ditemukan di Montmorillone Veinne.

Genesa *Bentonite* secara umum dapat dibagi menjadi 4 (empat) macam yaitu:

- a. Terjadi karena pengaruh pelapukan.
- b. Terjadi karena pengaruh *hydrothermal*.

- c. Terjadi karena akibat *devitrifikasi* dari tufa gelas yang diendapkan di dalam air (*lakustrin* sampai *neritic*).
- d. Terjadi karena proses pengendapan kimia dalam suasana basa (*alkali*) dan sangat silikan.

Pelapukan sebagai faktor utama yang menyebabkan terbentuknya jenis mineral lempung. Dalam proses ini adalah komposisi mineral batuan, komposisi kimia dari air dan daya alir air tersebut dalam batuan. Secara umum faktor yang berpengaruh adalah iklim, macam batuan, relief dan tumbuh-tumbuhan yang berada di atas batuan tersebut. Pembentukan endapan *Bentonite* hasil pelapukan kondisi komposisi mineral batuan, komposisi kimia dari air, dan daya air pada batuan asal. Pelapukan yang terjadi diakibatkan oleh reaksi kimia ion-ion Hidrogen (H^+) dalam air tanah dengan senyawa silikat. Ion H^+ berasal dari asam karbon akibat pembusukkan zat-zat organik dalam tanah.

Mineral utama yang terkandung di dalamnya adalah *plagioklas*, *kalium*, *biotit*, *muskovit* dan sedikit kandungan senyawa *Alluminium* dan *Ferro-Magnesia*. *Plagioklas* sangat reaktif, berjumlah banyak dan sumber utama dari *kation* dan *silika* dalam air tanah.

Proses *hydrothermal* mempengaruhi *alterasi* yang sangat lemah sehingga mineral-mineral yang kaya akan *magnesium* seperti *hornblende* dan *biotit* cenderung membentuk *chlorit*. Pada *alterasi* lemah kehadiran unsur-unsur logam alkali dan alkali tanah, kecuali kalium, mineral-mineral mika, *ferromagnesia* dan *feldspar plagioklas* umumnya akan membentuk *montmorillonit* terutama disebabkan adanya *magnesium*. Larutan *hydrothermal* merupakan larutan yang bersifat asam dengan kandungan *klorida*, belerang, karbondioksida, dan *silika*. Komposisi larutan berubah karena ada reaksi dengan batuan gamping menjadi larutan alkali yang bersifat basa, lalu terbawa keluar dan akan tetap bertahan selama unsur alkali dan alkali tanah tetap terbentuk akibat penguraian batuan asal. Dengan adanya unsur alkali dan alkali tanah akan membentuk *Monmorillonit* yang terjadi karena adanya unsur *Magnesium*.

Kehadiran *kalium* baik yang berasal dari *feldspar* ataupun mika primer yang terbentuk karena *alterasi hydrothermal* membentuk zona-zona lingkaran dengan susunan *serisit*, *kaolinit*, *montmorillonit* dan *chlorit*.

Proses *transformasi* (perubahan) dari abu vulkanis yang mempunyai komposisi gelas akan menjadi mineral lempung (*devitrifikasi*) yang lebih sempurna terutama pada daerah danau, lautan dan cekungan sedimentasi. Transformasi dari gunung berapi yang sempurna akan terjadi apabila debu gunung api diendapkan dalam cekungan seperti danau

dan laut. *Bentonite* yang terjadi akibat proses transformasi umumnya bercampur dengan sedimen laut lainnya yang berasal dari daratan seperti batu pasir dan lanau.

Proses pengendapan *bentonite* secara kimiawi dapat berbentuk tidak saja dari tufa tetapi dapat berupa endapan sedimen dalam suasana basa (alkali) yang sangat silikan (*authigenic neoformation*) dan terbentuk pada cekungan sedimen yang bersifat basa dimana unsur pembentukannya antara lain karbonat, silika pipih, fosfat laut dan unsur lainnya yang bersenyawa dengan unsur *alluminium* dan *magnesium*.

2.7. Potensial Mengembang (*Swelling Potential*)

Kembang susut tanah didefinisikan sebagai peristiwa pengembangan (*swell*) karena meresapnya air ke pori-pori tanah menggantikan udara akibat penambahan beban. Tanah lempung, sesuai dengan karakteristiknya adalah tanah yang dapat mengalami pengembangan (*swelling*). Pengembangan tanah ini akan memberikan pengaruh besar terhadap konstruksi yang ditahannya.

Berikut merupakan kriteria potensi mengembang terhadap nilai Indeks Plastisitas (PI) (*Chen, 1975*) :

Tabel 2.3. Kriteria potensial mengembang terhadap PI

| Indeks Plastisitas (PI) | <i>Swelling Potential</i> |
|-------------------------|---------------------------|
| 0 - 15 | Low |
| 10 - 35 | Medium |
| 20 - 35 | High |
| > 35 | Very High |

Sumber : *Chen, 1975*

Selain kriteria potensial mengembang menurut *Chen* di atas, salah satu kriteria potensial mengembang yang juga umum digunakan adalah kriteria potensial mengembang dengan klasifikasi derajat ekspansif (*Seed et.,al, 1962*), yang kemudian disesuaikan pada grafik potensial mengembang seperti yang tertera di bawah ini :

Tabel 2.4. Klasifikasi Derajat Ekspansif

| <i>Swelling Potential</i> (%) | <i>Swelling Degree</i> |
|----------------------------------|------------------------|
| 0 - 1.5 | Low |
| 1.5 - 5 | Medium |
| 5 - 25 | High |
| > 25 | Very High |

Sumber: *Seed et.,al*, 1962

Analisa ayakan dapat digunakan untuk menentukan sifat aktivitas (A), yaitu perbandingan antara indeks plastisitas (IP) dengan jumlah tanah yang lolos ayakan no. 200 dari tanah yang bersangkutan. Skemton (1953) mendefinisikan sebuah parameter untuk menghitung nilai *Activity* (A), menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Activity (A) = \frac{PI}{C-10} \quad (2.4)$$

Dengan PI adalah indeks plastisitas dan C adalah jumlah fraksi tanah lempung pada model benda uji. Dari rumus tersebut Skemton membuat kategori tanah dalam tiga golongan, yaitu:

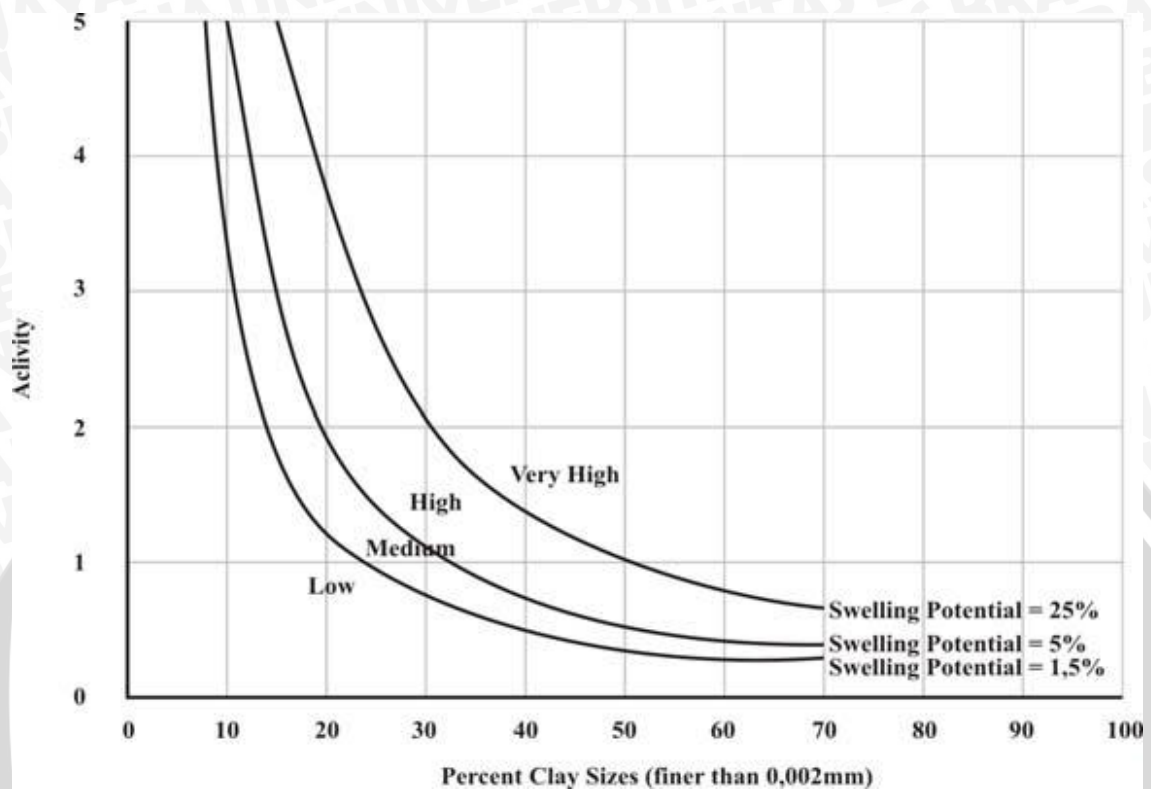
- A < 0,75 : tidak aktif
 0,75 < A < 1,25 : normal
 A > 1,25 : aktif (tanah lempung yang mudah berubah sifatnya apabila kadar airnya berubah).

(*Seed et.,al*, 2003) mengelompokkan besaran aktivitas berdasarkan jenis mineral seperti yang terlihat pada tabel 2.5 di bawah ini.

Tabel 2.5. Hubungan aktivitas dengan mineral

| Mineral | Aktivitas |
|----------------------|-------------|
| Kaolinite | 0,33 – 0,46 |
| Illite | 0,99 |
| Montmorillonite (Ca) | 1,5 |
| Montmorillonite (Na) | 7,2 |

Sumber: *Seed et.,al*, 2003



Gambar 2.7. Grafik Potensial Mengembang

Sumber : Seed et. Al, 1962

Sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.7, (Seed et al., 2003) mengembangkan grafik hubungan nilai aktifitas dan presentase butir tanah lempung yang lolos saringan 0,002 mm yang diperoleh dari hasil pengamatan sejumlah tanah lempung *remolded* yang berbeda-beda yaitu: *bentonite*, *Illite*, *Kaolinite*, dan pasir halus dimana contoh-contoh tanah tersebut dipadatkan 100% pada kadar air optimumnya dan menerima beban lpsi.

Dari gambar 2.7 dapat ditarik kesimpulan bahwa tanah dengan prosentase 0 – 1,5% adalah tanah dengan derajat pengembangan rendah. Sedangkan antara 1,5% - 5% memiliki derajat pengembangan sedang, kemudian tanah diantara 5% - 25% potensi pengembangan memiliki derajat mengembang yang tinggi. Derajat pengembangan sangat tinggi adalah tanah dengan potensial mengembang di atas 25%. Pada umumnya tanah yang memiliki derajat mengembang sangat tinggi adalah jenis tanah lempung dengan kandungan *monmorillonite* yang tinggi pula. Tanah dengan kandungan *monmorillonite* tinggi cenderung bersifat *absorption* yang tinggi, memiliki daya ikat terhadap air yang besar.