

CLAY LINER CHARACTERISTIC CHANGE IN SANITARY LANDFILL CONSTRUCTION DUE TO LEACHATE FILTERED WITH LIMESTONE

PERUBAHAN KARAKTERISTIK TANAH LEMPUNG SEBAGAI *CLAY LINER* PADA KONSTRUKSI *SANITARY LANDFILL* AKIBAT REMBESAN *LEACHATE* HASIL FILTRASI *LIMESTONE*

Ratna Yuniarti

Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram

Jl. Majapahit 62 Mataram 83125

e-mail: ratna_yuniarti@yahoo.com

ABSTRACT

In general, a liner system in sanitary landfill consists of both geo-membrane barrier and clay liner. Although geo-membrane is an absolute barrier against advection, pollutants can permeate it by diffusion so that leakage may occur through the liner. Since clay liner can be damaged by leachate which has low or high pH, it is necessary to develop sanitary landfill by placing limestone as a filter between geo-membrane and clay liner. Due to its common use in water treatment, limestone may increase the quality of leachate and provide protection for the clay liner. The aims of this research are to know the hydraulic conductivity, the change of mineral and chemistry of clay as a liner and its damage with natural and leachate filtered with limestone as permeant. Compaction tests showed that optimum water content of clay is 26,00% and maximum dry density is 1,36 gr/cm³. Meanwhile, hydraulic conductivity of clay to natural leachate is $5,64 \times 10^{-9}$ and $2,24 \times 10^{-9}$ cm/s to filtered leachate. Higher value of hydraulic conductivity indicated that clay particle more vulnerable to damage with natural leachate as permeant than that of filtered leachate. From the result of SEM test, it can be seen that the damage of clay liner by installing limestone as a filter is lower than that of clay liner without filter.

Keywords: clay liner, limestone, filter, sanitary landfill

ABSTRAK

Secara umumnya, suatu *liner system* pada *sanitary landfill* terdiri dari *geo-membrane* barrier dan *clay liner*. Meskipun *geo-membrane* adalah penghalang yang baik pada arah horizontal, polutan dapat menembusnya secara difusi sehingga kebocoran tetap terjadi melalui *clay liner* tersebut. Selama *clay liner* dapat dirusak oleh *leachate* yang mempunyai nilai pH rendah atau tinggi, hal tersebut perlu untuk pengembangan *sanitary landfill* dengan menempatkan *limestone* sebagai filter antara *geo-membrane* dan *clay liner*. Karena itu umum digunakan dalam pengolahan air, *limestone* meningkatkan kualitas dari *leachate* dan digunakan pelindungan *clay liner*. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui konduktivitas hidrolik, perubahan mineral dan kimia dari lempung sebagai *liner* dan rusaknya dengan alam dan *leachate* yang disaring dengan *limestone* sebagai permeant. Uji tekan menunjukkan bahwa kandungan air optimum lempung sebesar 26,00% dan rapat masa kering maksimum 1,36 gr/cm³. Sementara itu, konduktivitas hidrolik lempung untuk *leachate* alam sebesar $5,64 \times 10^{-9}$ and $2,24 \times 10^{-9}$ cm/dt untuk *leachate* tersaring. Konduktivitas yang lebih tinggi menunjukkan bahwa partikel lempung sangat mudah rusak dengan *leachate* alam sebagai permeant daripada *leachate* tersaring. Hasil dari uji SEM, dapat terlihat bahwa kerusakan *clay liner* dengan menggunakan batu kapur sebagai saringan lebih rendah daripada *clay liner* tanpa saringan.

Kata-kata kunci: clay liner, batu kapur, saringan, sanitary landfill

PENDAHULUAN

Metode pengelolaan sampah yang paling umum dilakukan di Indonesia saat ini adalah membuangnya ke lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dengan sistem *open dumping*, sampah ditumpuk begitu saja di lahan kosong sebagai urugan. Tetapi metode pembuangan ini sangat membahayakan karena cairan lindi (*leachate*) yang merupakan hasil pembusukan sampah tersebut akan mengalir masuk ke dalam tanah dan mencemari air tanah. Masih banyaknya penduduk yang menggunakan air sumur yang berasal dari air tanah sebagai sumber air bersih, maka kesehatan masyarakat menjadi tidak terjaga karena mereka mengonsumsi air yang telah tercemar.

Dibandingkan dengan *open dumping*, pengelolaan sampah yang lebih baik adalah sistem *sanitary landfill* (penimbunan secara sehat). *Sanitary landfill* didesain sedemikian rupa untuk mencegah merembesnya *leachate* ke dalam air tanah. Di dasar TPA, dipasang *clay liner* yaitu tanah lempung yang dipadatkan lapis demi lapis dengan energi dan kadar air tertentu. Di atas *clay liner*, dipasang *geo-membrane* yang juga berfungsi mencegah merembesnya *leachate* ke dalam air tanah (Bagchi, 1994). Walaupun demikian, bukan berarti metode *sanitary landfill* tidak memiliki kelemahan. Meskipun *geomembrane* tersebut sangat kedap (koefisien rembesannya $< 0,0000001$ cm/detik), tetapi juga mudah rusak. Kerusakan itu dapat terjadi ketika dilaksanakannya

pekerjaan konstruksi karena alat-alat konstruksi yang beroperasi, kerusakan karena regangan, robek akibat perbedaan penurunan tanah yang mendukungnya, bocor akibat *coarse aggregate* pada lapisan di bawahnya, bocor karena benda tajam ketika kelebihan beban, dan sebagainya (Davis, 1998).

Selain itu, kepadatan *clay liner* sangat dipengaruhi oleh kadar air pada saat pematatan dan energi pematatan yang akan sangat mempengaruhi koefisien rembesannya. Setelah dialiri *leachate*, mungkin saja partikel *clay liner* itu akan berubah atau mengalami kerusakan. *Leachate* dengan pH yang rendah (asam) dapat mengubah atau menghancurkan struktur butiran tanah lempung dari *clay liner*. Demikian juga *leachate* dengan pH ≥ 11 (basa) dapat menyebabkan kerusakan butiran lempung yang mengakibatkan koefisien rembesan dari *clay liner* akan membesar (Mochtar, 2001).

Karena partikel *clay liner* pun dapat berubah setelah dialiri *leachate*, di atas *clay liner* perlu dipasang filter yang dapat memperbaiki kualitas *leachate* sehingga *clay liner* tadi tidak mengalami kerusakan walaupun terjadi kebocoran pada konstruksi *geomembrane*.

Material yang akan dipergunakan untuk maksud tersebut adalah *limestone*. *Limestone* adalah salah satu batuan sedimen yang unsur utamanya terdiri dari kalsium karbonat (CaCO₃) dan biasanya merupakan campuran unsur-unsur magnesium karbonat,

silika dan oksida besi. *Limestone* ini dapat dipakai dalam pekerjaan-pekerjaan konstruksi, misalnya sebagai bahan lapis pondasi bawah pada konstruksi jalan raya (Yuniarti, 1997).

Penelitian yang dilakukan oleh Yuniarti (2008) menyimpulkan bahwa setelah melewati filter *limestone*, pH *leachate* berubah dari 5,51 menjadi 6,65; 6,70; 6,72; 6,99 dan 7,04 pada filter setebal 10, 20, 30, 40 dan 50 cm sehingga *limestone* tadi dapat menetralkan *leachate* yang bersifat asam. Pada filter setebal 30 cm, nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) *leachate* berkurang cukup signifikan dari 108,3 mg/l menjadi 73,4 mg/l sedangkan nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) *leachate* berkurang dari 672 mg/l menjadi 192 mg/l. Secara umum, penggunaan filter *limestone* dengan ketebalan 30 cm cukup efektif karena filter setebal 40 dan 50 cm tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan bagi pengurangan kandungan polutan pada *leachate*, ditinjau dari standar baku mutu air limbah.

Mengingat penggunaan filter *limestone* pada konstruksi *sanitary landfill* dapat memperbaiki kualitas *leachate*, penelitian ini ingin menguji karakteristik tanah lempung sebagai *clay liner* setelah dirembesi *leachate* asli dan *leachate* hasil filtrasi *limestone*. Dengan terlindungnya *clay liner*, maka pencemaran *leachate* terhadap air tanah dapat dicegah, sehingga kesehatan masyarakat yang menggunakan air sumur di sekitar lahan TPA juga lebih terjaga.

Cairan Lindi (*Leachate*) Sampah

Di lokasi pembuangan akhir, sampah akan mengalami proses dekomposisi yang disebabkan oleh mikroorganisme yang mengakibatkan terjadinya perubahan fisik, kimia dan biologis sampah secara simultan. Salah satu hasil dari dekomposisi sampah adalah *leachate*. Menurut Bagchi (1994), faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas *leachate* adalah komposisi sampah, umur *landfill*, temperatur pada lokasi *landfill*, kadar air sampah dan ketersediaan (*supply*) oksigen. Sampah perkotaan merupakan jenis sampah yang komposisinya paling bervariasi mulai dari sisa makanan yang mudah membusuk sampai sampah yang tidak dapat diuraikan oleh mikroorganisme seperti kaca dan besi. Mengingat komposisi sampah kota yang sangat bervariasi, maka kualitas *leachate* sampah kota mempunyai rentang nilai konsentrasi yang sangat besar.

Kualitas *leachate* juga dipengaruhi oleh umur *landfill*. Secara umum, konsentrasi polutan yang terkandung pada *leachate* pada tahun pertama lebih rendah dibandingkan pada tahun-tahun berikutnya. Kualitas *leachate* mencapai puncaknya setelah beberapa tahun kemudian menurun lagi secara perlahan-lahan. Di samping komposisi sampah dan umur *landfill*, kualitas

leachate dipengaruhi oleh temperatur. Kondisi temperatur mempengaruhi pertumbuhan bakteri dan reaksi-reaksi kimia yang berlangsung pada *landfill*. Selain itu, kadar air sampah memegang peranan yang sangat penting pada proses degradasi secara biologis. Kualitas *leachate* pada *landfill* di daerah yang beriklim kering sangat berbeda dengan kualitas *leachate* pada daerah yang beriklim basah untuk jenis sampah yang sama.

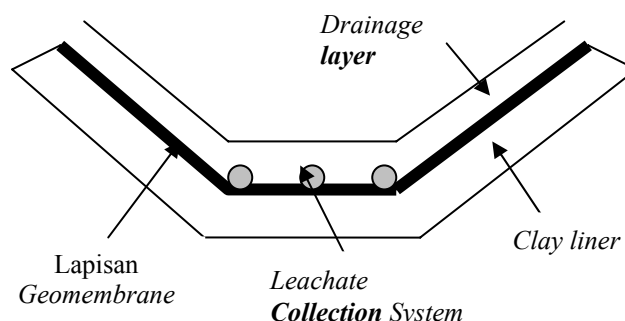
Ketersediaan oksigen merupakan faktor yang mempengaruhi kualitas *leachate* mengingat kandungan kimia yang dihasilkan pada *landfill* tergantung dari proses dekomposisinya, yaitu aerob (memerlukan oksigen) dan anaerob (tidak memerlukan oksigen). Kondisi anaerob pada *landfill* akan berlangsung sejalan dengan ditutupnya sampah dengan tanah atau penimbunan sampah baru di atasnya.

Konstruksi *Sanitary Landfill*

Tujuan yang paling mendasar dari pelaksanaan konstruksi *sanitary landfill* adalah untuk melindungi air tanah yang ada supaya tidak terkontaminasi oleh *leachate* yang merupakan hasil dari proses dekomposisi sampah. Agar sebuah *landfill* dapat berfungsi dengan baik, elemen-elemen strukturnya harus dirancang dengan tepat dan sesuai standar. Elemen-elemen struktur yang harus ada pada sebuah *landfill* adalah lapisan tanah dasar, lapisan *clay liner*, *geomembrane*, pipa pengumpul *leachate*, konstruksi lapisan drainase, konstruksi lapisan penutup serta kolam-kolam pengolahan (Bagchi, 1994). Sebagai lapisan drainase, digunakan pasir kasar yang berfungsi untuk menahan sampah padat sehingga yang masuk ke lapisan di bawahnya hanya cairan sampah saja. Lapisan penutup yang biasanya berupa tanah lempung berfungsi untuk mencegah berkembang biaknya lalat dan organisme pembawa penyakit lainnya. Saluran pengumpul *leachate* diperlukan untuk mengalirkan *leachate* ke kolam-kolam pengolahan sebelum dikembalikan lagi ke alam (Bagchi, 1994).

Clay Liner

Pada konstruksi sebuah *landfill*, lapisan kedap air yang menggunakan lempung sebagai materialnya (*clay liner*) dibuat dengan tebal lapisan vertikal berkisar antara 1,2 meter sampai 1,5 meter sedangkan dinding samping harus lebih tebal dari lapisan vertikal dengan kemiringan 1 : 4 (Bagchi, 1994). Koefisien rembesan (*hydraulic conductivity*) *clay liner* harus lebih kecil atau sama dengan 1×10^{-7} cm/detik. Untuk itu, ada beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu: prosentase kandungan lempung, plastisitas, kadar air saat pemadatan, jenis alat pemadat yang digunakan dan tebal minimum *liner*.



Gambar 1. Konstruksi *sanitary landfill*

Dari hasil penelitian di laboratorium, dapat diketahui bahwa ukuran gumpalan mempunyai pengaruh terhadap permeabilitas lempung (Daniel, 1984, dalam Bagchi, 1994), sehingga sangat penting memperkecil ukuran gumpalan untuk mendapatkan lapisan lempung dengan permeabilitas rendah. Ukuran gumpalan yang direkomendasikan berkisar antara 4,6 mm – 25 mm. Untuk mendapatkan ukuran gumpalan yang diinginkan, lempung yang akan digunakan sebagai material *liner* pada sebuah *landfill* harus melewati proses pemadatan terlebih dahulu. Pemadatan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan pada susunan tanah dan mempengaruhi sifat mekanisnya, khususnya permeabilitas tanah.

Material Limestone

Limestone adalah salah satu batuan yang terbentuk dari proses sedimentasi yang sangat lama. Unsur utama *limestone* adalah kalsium karbonat (CaCO_3), dan terdapat unsur-unsur magnesium karbonat, silika dan oksida besi. Akibat gabungan bahan-bahan ini, warna *limestone* bermacam-macam dari putih hingga merah coklat. *Limestone* yang mengandung kalsium karbonat dan magnesium karbonat yang sama banyaknya disebut dolomit (Das, 1998).

Kapur / gamping yang diperoleh dari pemanasan *limestone* pada suhu tinggi, mempunyai sifat menetralkan keasaman air (Miller, 1995). Pada proses penjernihan air, kapur mempunyai peranan yang cukup penting sebagai zat pereaksi (koagulan) yang dapat mengendapkan garam-garam Ca, Fe dan Al yang tidak larut dalam air (Kusnaedi, 1997). Disamping untuk mengatur agar pH air menjadi netral, pemberian kapur pada proses penjernihan air berfungsi untuk membantu efektifitas proses selanjutnya (BPPT, 1999).

Penelitian yang dilakukan oleh Yuniarti (1997) mengenai karakteristik *limestone* yang digunakan sebagai lapis pondasi bawah pada konstruksi jalan raya, menyimpulkan bahwa *limestone* memiliki ketahanan yang cukup besar terhadap degradasi. Karena itu, perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut terhadap potensi pemanfaatan *limestone* pada pekerjaan-pekerjaan konstruksi yang lain, misalnya sebagai filter pada konstruksi *sanitary landfill*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari pengujian sifat-sifat fisik dan mekanis *limestone*, sifat-sifat fisik dan mekanis tanah lempung, pengujian nilai koefisien rembesan tanah lempung yang dialiri *leachate* asli (tanpa melalui filter *limestone*) dan *leachate* hasil filtrasi *limestone*, pengujian kandungan mineral dan kimia tanah lempung serta struktur mikroskopis tanah lempung yang tidak dirembesi, dirembesi *leachate* asli dan *leachate* hasil filtrasi *limestone*.

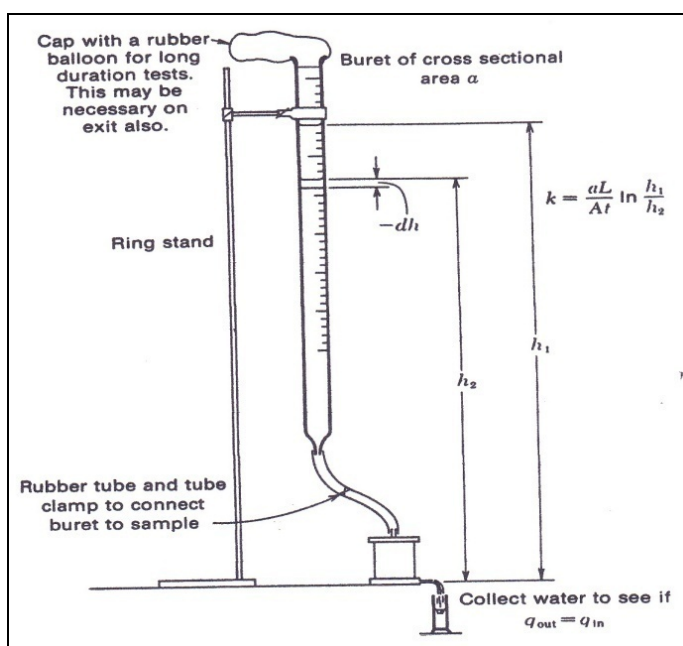
Pengujian sifat fisik dan mekanis meliputi gradasi, berat jenis, batas cair, batas plastis serta kadar air optimum dan tingkat kepadatan maksimum. Pengujian gradasi sesuai dengan prosedur AASHTO T-27-82 (*American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1982). Adapun pengujian berat jenis mengikuti prosedur AASHTO T-100-74 atau ASTM D-854-5 (*American Society for Testing and Materials*, 1991). Pengujian batas cair mengikuti prosedur AASHTO T-89-81, pengujian batas plastis mengikuti prosedur AASHTO T-90-81. Percobaan pemadatan *limestone* dilakukan berdasarkan prosedur AASHTO T-180-74.

Pengujian tanah lempung yang dirembesi *leachate* dilakukan dengan alat *falling head permeameter*. Nilai koefisien rembesan dapat ditentukan setelah *pore volume of flow* ≥ 2 (US EPA, 1989) atau kecepatan aliran mencapai konstan. Menurut Bowles (1992), perhitungan nilai *k* dari data hasil pengamatan test *falling head* adalah :

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

dengan:

- a* = luas buret (cm^2)
- A* = luas sampel (cm^2)
- L* = panjang sampel (cm)
- t* = waktu (detik)
- h*₁ = tinggi *head* mula-mula (= 200 cm)
- h*₂ = tinggi *head* akhir (cm)



(a)



(b)

Gambar 2. Detail pengujian rembesan

Perubahan kandungan mineral tanah lempung setelah dirembesi *leachate* asli dan *leachate* hasil filtrasi *limestone* dilakukan dengan *X-Ray Diffractometer* (XRD), sedangkan pengujian kandungan kimia tanah lempung dilakukan dengan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS). Adapun pengujian tingkat kerusakan *clay liner* dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Sample *limestone* yang dipakai sebagai filter pada penelitian ini diambil dari Desa Mangkung Kecamatan Praya Barat Kabupaten Lombok Tengah, sedangkan tanah lempung diambil dari Desa Tanak Awu Kecamatan Penujak Kabupaten Lombok Tengah dan cairan *leachate* diambil dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah di Desa Kebon Kongok Kabupaten Lombok Barat.

Pengujian ini dilakukan di laboratorium Geotek Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram dan Laboratorium Uji Material Puspitek Serpong Tangerang Banten.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Fisik dan Mekanis *Limestone*

Berdasarkan hasil pengujian *specific gravity* atau berat jenis diketahui bahwa nilai berat jenis (Gs) *limestone* adalah 2,65. Dari hasil pengujian distribusi ukuran butiran, dapat diketahui bahwa *limestone* yang digunakan sebagai filter tersebut mempunyai ukuran butiran kerikil = 0,46%, pasir = 28,24%, lanau / lempung = 71,29%. Hasil pengujian batas-batas konsistensi tanah menunjukkan nilai batas cair (*Liquid Limit*) = 23,84%, batas plastis (*Plastic Limit*) = 21,34%. Indeks plastisitas (*Plasticity Index*) = 2,50% diperoleh dari selisih antara batas cair dan batas plastis. Nilai batas-batas konsistensi tersebut menunjukkan bahwa *limestone* mempunyai plastisitas rendah (nilai PI berkisar antara 1 – 7%).

Dengan partikel butiran yang $\geq 50\%$ lolos saringan nomor 200, batas cair $< 50\%$ dan bersifat inorganik, maka berdasarkan sistem *Unified Soil Classification System* (USCS), *limestone* diklasifikasikan sebagai ML soil (M = *moam* / lanau, L = *low plasticity*). Dari hasil uji pematatan dengan metode pematatan Proctor standar diperoleh nilai kadar air optimum sebesar 14,80% dan berat volume kering maksimum $\gamma_{d_{maks}} = 1,74 \text{ gr/cm}^3$. Parameter kepadatan ini digunakan sebagai dasar untuk membuat filter setebal 30 cm.

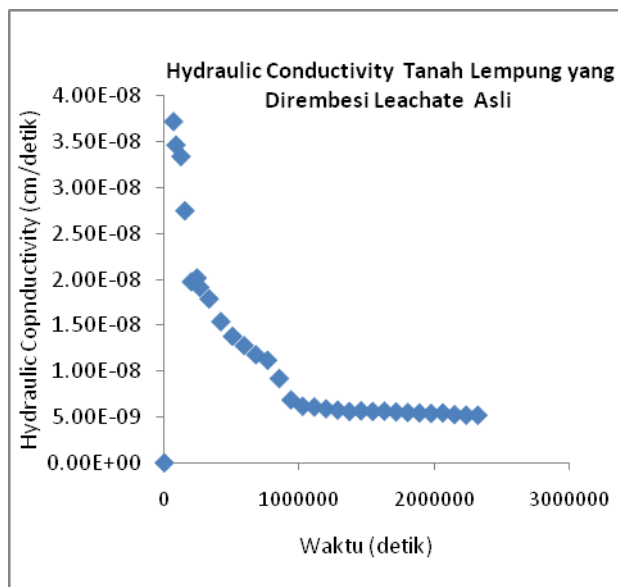
Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Lempung

Berdasarkan pengamatan secara visual, tanah lempung Tanak Awu memiliki warna kehitaman pada saat basah sedangkan pada saat kering berwarna abu-abu kehitaman. Dari pengujian *specific gravity* diketahui bahwa nilai berat jenis (Gs) tanah lempung adalah 2,70. Pengujian distribusi ukuran butiran menunjukkan bahwa tanah lempung mempunyai ukuran butiran pasir = 11,68%, lanau = 34,37% dan lempung = 53,95%. Hasil pengujian batas-batas konsistensi tanah menunjukkan bahwa batas cair (*Liquid Limit*) = 116,04%, batas plastis (*Plastic Limit*) = 30,42% dan *Plasticity Index* = 85,62%. Dari nilai batas-batas konsistensi tersebut, dapat diketahui bahwa tanah lempung Tanak Awu mempunyai plastisitas yang sangat tinggi. Distribusi ukuran partikel dan batas-batas konsistensi tanah lempung tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan klasifikasi jenis tanahnya sesuai dengan sistem *Unified Soil Classification System* (USCS). Dengan partikel butiran yang $\geq 50\%$ lolos saringan nomor 200, batas cair $> 50\%$ dan bersifat organik plastisitas tinggi, tanah lempung diklasifikasikan sebagai CH soil (C = *clay*, H = *high plasticity*).

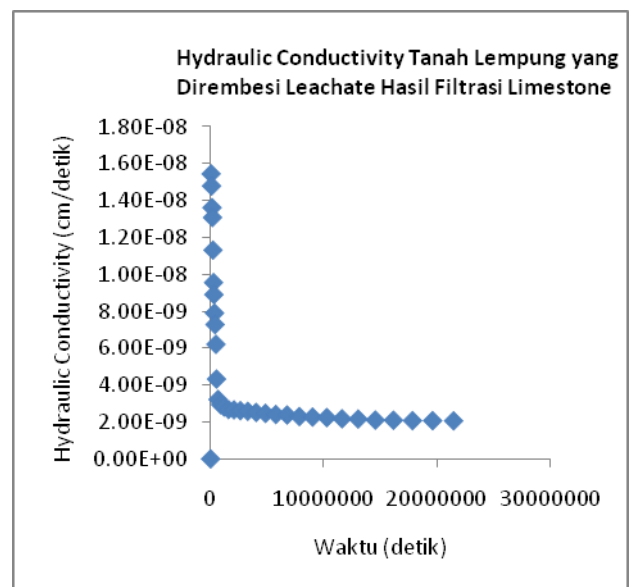
Dari hasil uji pematatan dengan metode pematatan Proctor standar diperoleh nilai kadar air optimum sebesar 26,00% dan berat volume kering maksimum $\gamma_{d_{maks}} = 1,36 \text{ gr/cm}^3$. Jika dibandingkan dengan berat volume kering maksimum *limestone*, $\gamma_{d_{maks}}$ dari tanah lempung ini lebih kecil yang berarti derajat kepadatannya lebih rendah. Parameter kepadatan ini digunakan sebagai dasar untuk membuat sampel *clay liner* yang selanjutnya akan dilakukan pengujian permeabilitas.

Hydraulic Conductivity dari Tanah Lempung

Gambar 3 memperlihatkan kurva hubungan antara *hydraulic conductivity* dengan waktu pengamatan. Dari gambar tersebut, tampak bahwa *hydraulic conductivity* dari tanah lempung cukup besar diawal pengetesan, kemudian mengecil dan akhirnya konstan. Hal ini menunjukkan bahwa diawal pengetesan *leachate* dapat dengan mudah mengisi pori-pori tanah lempung yang belum jenuh sehingga *leachate* dengan cepat mengalir masuk ke dalam tanah lempung. Setelah pori-pori tanah lempung cukup jenuh maka kecepatan *leachate* untuk masuk menjadi stabil.

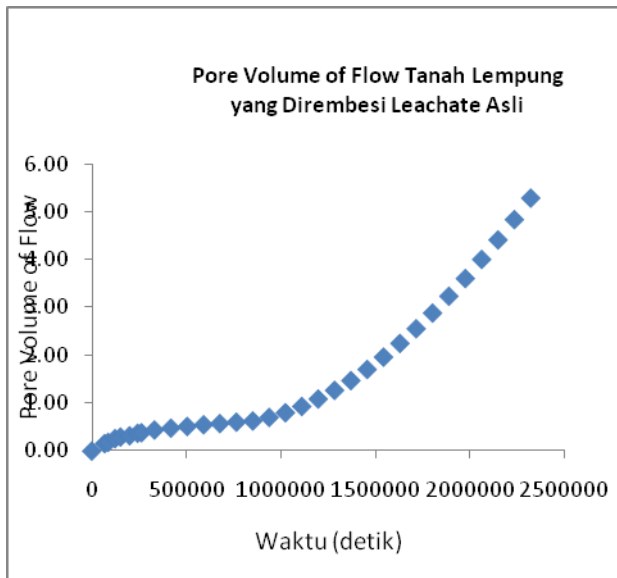


(a)

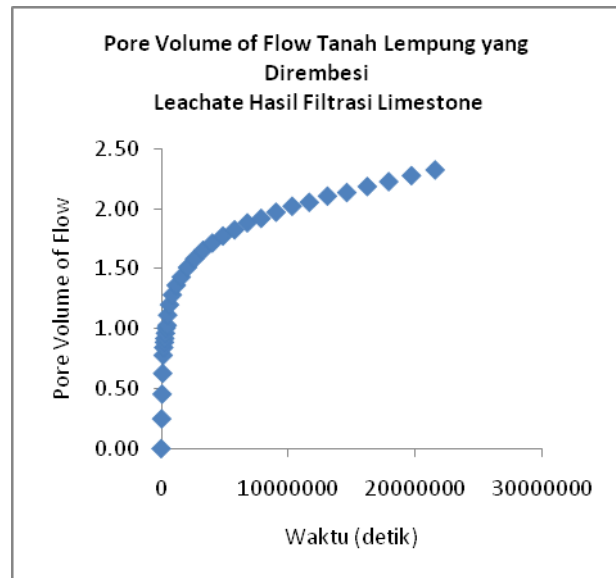


(b)

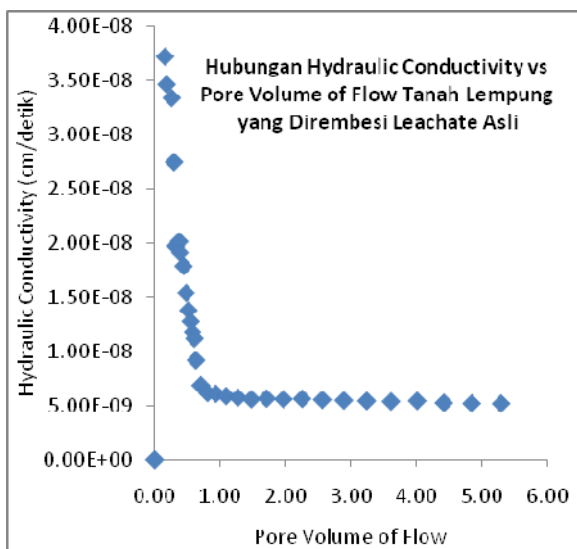
Gambar 3. Grafik hubungan *hydraulic conductivity* vs waktu



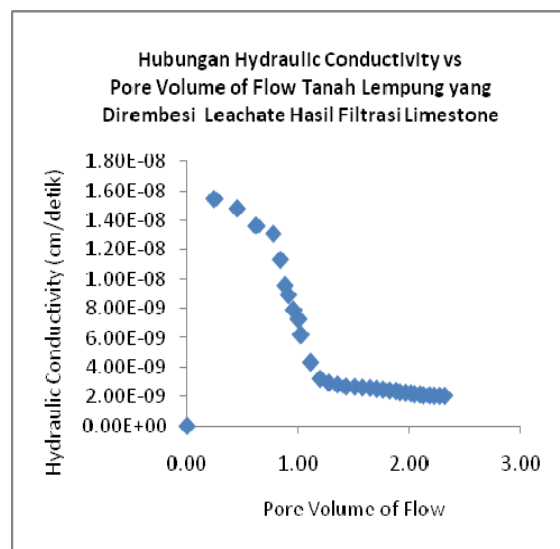
(a)



(b)

Gambar 4. Grafik hubungan *pore volume of flow* vs waktu

(a)



(b)

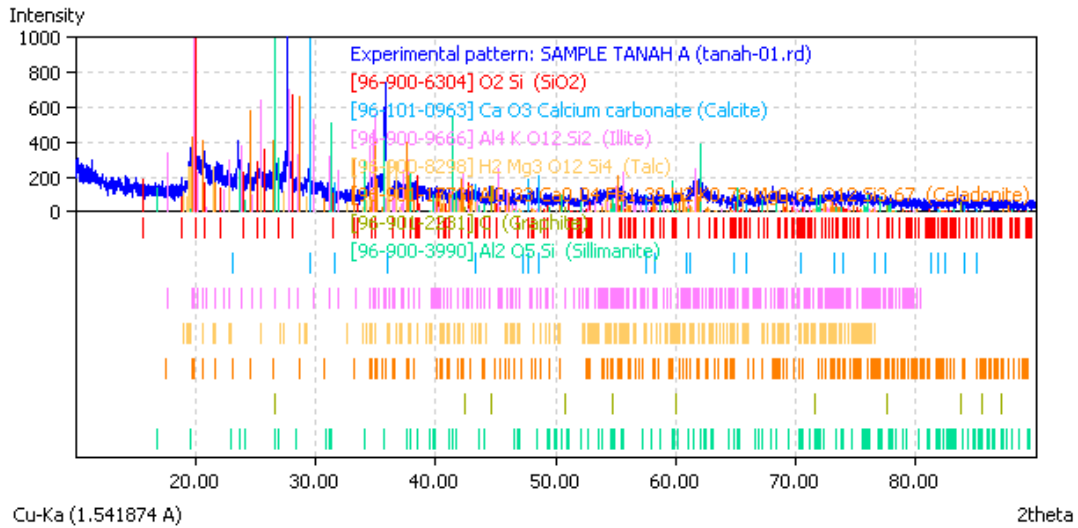
Gambar 5. Grafik hubungan *hydraulic conductivity* vs *pore volume of flow*

Dari Gambar 4 baik pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli maupun *leachate* hasil filtrasi yang menunjukkan hubungan antara *pore volume of flow* terhadap waktu, terlihat bahwa harga *pore volume of flow* semakin besar dengan bertambahnya waktu. Mula mula, *leachate* hanya mengisi rongga-rongga antar partikel tanah lempung, namun lama kelamaan partikel tanah lempung menjadi mengembang sehingga volume *leachate* dalam butiran tanah lempung menjadi semakin besar. Berdasarkan grafik hubungan antara *hydraulic conductivity* dengan *pore volume of flow* yang disajikan pada Gambar 5(a) diatas, terlihat bahwa *pore volume of flow* tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli > 2 tercapai ketika $k = 5,64 \times 10^{-9}$ cm/detik. Sedangkan dari Gambar 5(b) terlihat bahwa nilai *hydraulic conductivity* tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone* mencapai konstan dengan harga $k = 2,24 \times 10^{-9}$ cm/detik. Nilai koefisien rembesan yang lebih besar menunjukkan bahwa partikel tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli (tanpa melalui filtrasi *limestone*) lebih mudah mengalami kehancuran karena kerusakan partikel butirannya.

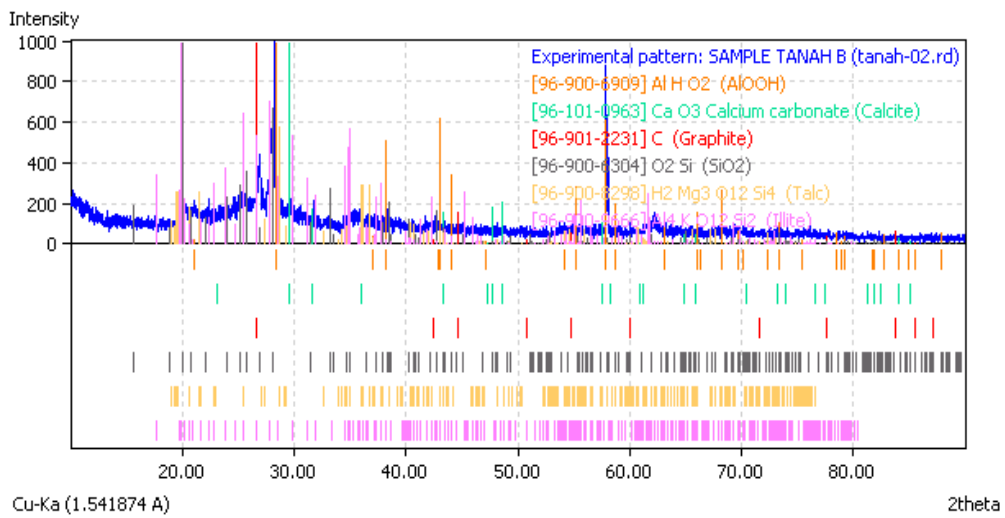
Perubahan Kandungan Mineral Tanah Lempung

Hasil tes *X-Ray Diffractometer* dari tanah lempung yang tidak dirembesi, dirembesi *leachate* asli dan *leachate* hasil filtrasi *limestone* disajikan pada Gambar 6 sampai dengan Gambar 8 berikut.

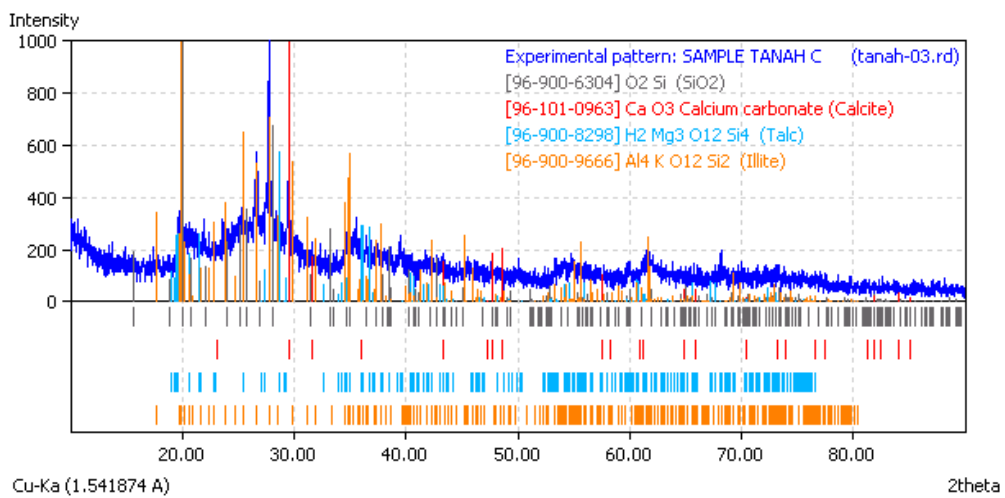
Dari Gambar 6 terlihat bahwa bahwa senyawa Illite, Silimanite, Talc, Silicon Oxide, Celadonite, Graphite dan Calcite terdapat pada sampel tanah lempung asli (tidak dirembesi). Sementara senyawa Silimanite dan Celadonite yang terdapat pada tanah lempung asli tidak terdapat pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli dan *leachate* hasil filtrasi *limestone*. Pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli terdapat senyawa Aluminium Oxide Hydroxide yang sebelumnya tidak terdapat pada tanah lempung asli. Dari Gambar 8 di atas terlihat bahwa hanya senyawa Illite, Talc, Silicon Oxide dan Calcite yang tertinggal pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone*.



Gambar 6. Identifikasi profil difraksi sinar X dari tanah lempung yang tidak dirembesi

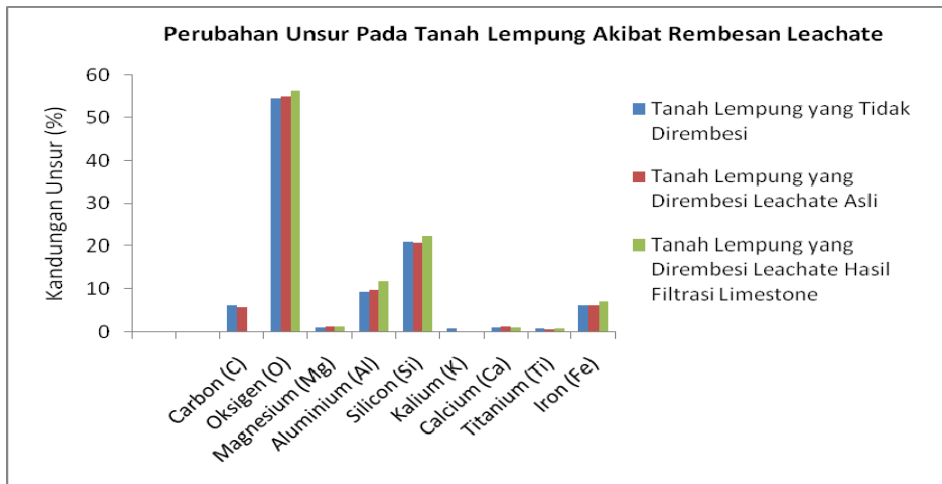


Gambar 7. Identifikasi profil difraksi sinar X dari tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli



Gambar 8. Identifikasi profil difraksi sinar X dari tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone*

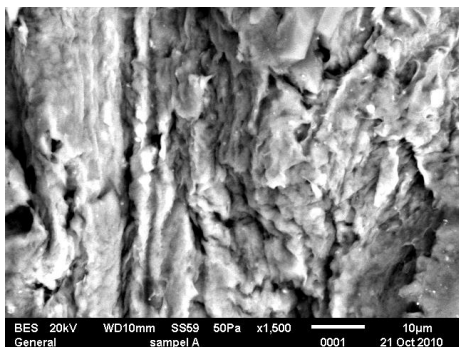
Perubahan Unsur Pada Tanah Lempung



Gambar 9. Perubahan Unsur Pada Tanah Lempung Akibat Rembesan *Leachate*

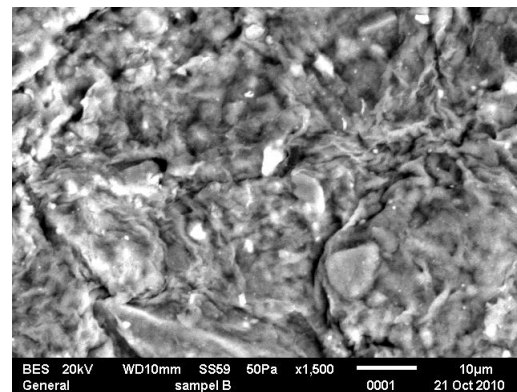
Dari Gambar 9 di atas, terlihat bahwa unsur yang paling dominan pada tanah lempung yang tidak dirembesi, tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli maupun yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone* adalah Oksigen (O) kemudian disusul dengan Silicon (Si). Pada tanah lempung yang tidak dirembesi, unsur Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) dan Titanium (Ti) merupakan unsur yang tidak dominan, yang masing-masing memiliki prosentase kurang dari 1% berdasarkan fraksi massa. Pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli, unsur Calcium (Ca) dan Magnesium (Mg) pada *leachate* terlarut ke dalam tanah lempung sehingga mempertinggi kandungan kedua unsur tersebut. Pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone*, unsur Carbon (C) dan Kalium (K) tidak ditemukan sama sekali yang pada tanah lempung asli masing-masing sebesar yang 6,12% dan 0,71%.

Perubahan Mikrostruktur Tanah Lempung



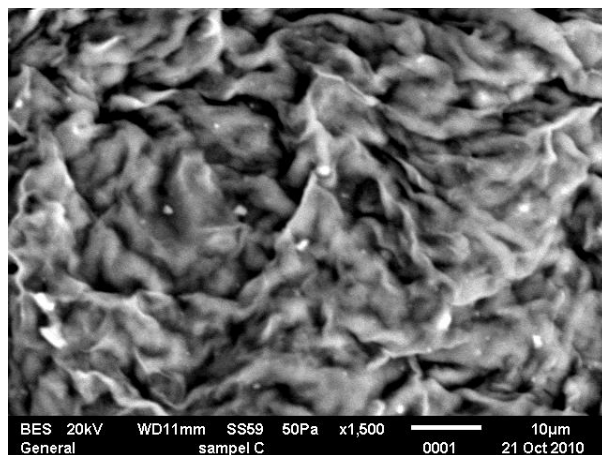
Gambar 10. Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada tanah lempung yang tidak dirembesi
Perubahan mikrostruktur tanah lempung akibat rembesan *leachate* disajikan pada Gambar 10 sampai dengan Gambar 12.

Partikel tanah lempung yang tidak dirembesi berupa lembaran-lembaran yang berbentuk pipih tersebar di seluruh permukaan. Lembaran-lembaran pipih pada tanah lempung asli tadi mengalami kehancuran dan berubah bentuk menjadi *rounded irregular* setelah dirembesi *leachate* yang tidak difilter. Pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone*, morfologi permukaan tampak lebih beraturan.



Gambar 11. Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli

Berdasarkan hasil uji SEM, tingkat kerusakan partikel tanah lempung sebagai *clay liner* yang di atasnya dipasang filter *limestone* lebih kecil dibandingkan dengan tanah lempung yang tidak dipasang filter.



Gambar 12. Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada tanahlempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone*

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil tes rembesan menunjukkan bahwa tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli mempunyai koefisien rembesan sebesar $5,64 \times 10^{-9}$ cm/detik, sedangkan tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone* mempunyai nilai *hydraulic conductivity* sebesar $2,24 \times 10^{-9}$ cm/detik. Nilai koefisien rembesan yang lebih besar menunjukkan bahwa partikel tanah lempung yang dirembesi *leachate* asli (tanpa melalui filtrasi *limestone*) lebih mudah mengalami kehancuran karena kerusakan partikel butirannya.
2. Pada tanah lempung yang tidak dirembesi, terdapat senyawa Illite, Silimanite, Talc, Silicon Oxide, Celadonite, Graphite dan Calcite, sementara hanya senyawa Illite, Talc, Silicon Oxide dan Calcite yang tertinggal pada tanah lempung yang dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone*.
3. Unsur yang dominan pada tanah lempung baik yang tidak dirembesi, dirembesi *leachate* asli maupun dirembesi *leachate* hasil filtrasi *limestone* adalah Oksigen (lebih dari 50%), disusul dengan Silicon dan Aluminium.
4. Berdasarkan hasil uji SEM, tingkat kerusakan partikel tanah lempung sebagai *clay liner* yang di atasnya dipasang filter *limestone* lebih kecil dibandingkan dengan tanah lempung yang tidak dipasang filter.

DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation Officials (1982). *AASHTO Material*, Part I, Specification, Washington D.C.

- American Society for Testing and Materials (1991). *Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4, Vol. 04.08. Philadelphia.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (1999). *Alat Pengolah Air Gambut Type TP2AS Sistem Batch*, Jakarta.
- Bagchi, A. (1994). *Design, Construction and Monitoring of Landfills*, John Wiley & Sons, New York.
- Bowles, J. E. (1992). *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.
- Das, B.M. (1998). *Principles of Geotechnical Engineering*, 4th Edition, PWS Publishing Company, Boston.
- Davis, M.L. (1998). *Introduction to Environmental Engineering*, McGraw-Hill, Singapore.
- Kusnaedi (1997). *Mengolah Air Gambut dan Air Kotor untuk Air Minum*, Swadaya, Jakarta.
- Miller, M.M. (1995). *Lime in Mineral Yearbook 1995*, <http://minerals.cr.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/>
- Mochtar, N.E. (2001). *Perubahan Kandungan Kimia dan Orientasi Partikel Clay Liner Akibat Rembesan Leachate Sampah Perkotaan*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITS, Surabaya.
- United State Environmental Protection Agency. (1989). *Procedures for Modelling Flow Through Clay Liners to Determine Required Liner Thickness*. EPA / 530 / SW. 84 – 001, Washington.
- Yuniarti, R. (1997). *Tinjauan Terhadap Karakteristik Limestone Sebagai Bahan Lapis Pondasi Bawah pada Konstruksi Jalan Raya*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Mataram.
- Yuniarti, R. (2008). *Penggunaan Limestone Sebagai Filter Pada Konstruksi Sanitary Landfill*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Mataram.