

Uji Kinerja Ekstensometer Serat Optik di Laboratorium dan di Lereng Buatan

Dwi Bayuwati, Tomi Budi Waluyo, Prabowo Puranto, Hendra Adinanta dan Imam Mulyanto

Pusat Penelitian Fisika-LIPI

Kawasan Puspiptek, Gd. 442, Tangerang Selatan 15314

dwib001@lipi.go.id

Abstrak

Pada makalah ini dilaporkan uji kinerja ekstensometer serat optik di laboratorium dan di lereng buatan. Ekstensometer didisain untuk sensor pergeseran tanah dan bekerja berbasis efek pelengkungan makro serat optik. Bagian sensor ekstensometer dibentuk dari seutas serat optik yang dilengkungkan dengan diameter 18 mm dan salah satu ujungnya dihubungkan ke suatu mekanisme penarikan. Bila terjadi pergeseran tanah, serat mengalami penarikan dan diameter lingkarannya mengecil sehingga intensitas keluaran lewat serat akan berkurang akibat rugi lengkungan yang terjadi. Besarnya perubahan intensitas keluaran akan bersesuaian dengan besarnya pergeseran yang terjadi. Ekstensometer serat optik terdiri atas sumber cahaya laser dioda pada panjang gelombang (λ) = 1300 nm, serat optik ragam tunggal sepanjang 50 m sebagai sarana penjalaran cahaya dan sekaligus sebagai sensor, pencabang serat optik, detektor cahaya, serta sistem pengolah data menggunakan *Picoscope 3224* serta personal komputer/PC. Secara teoritis ekstensometer optik yang telah dibuat mempunyai jelajah pengukuran pergeseran sebesar 0-25 mm dengan sensitivitas 0.014 Volt/mm. Telah ditunjukkan secara visual disini bahwa ekstensometer dapat mendeteksi proses longsornya tanah pada suatu lereng buatan yang teramati sebagai penurunan intensitas keluaran dari ekstensometer serat optik.

Keywords: Ekstensometer; serat optik; uji kinerja

1 Pendahuluan

Sensor serat optik telah banyak aplikasinya di berbagai bidang seperti di bidang manufaktur industri, teknik sipil, teknologi militer, perlindungan lingkungan, survei geofisika, teknologi medis dan biologi [1-3]. Banyak jenis sensor serat optik misalnya untuk sensor suhu, tegangan, tekanan, level cairan atau pergeseran [4-7] yang telah diteliti secara intensif dan beberapa telah diproduksi secara komersial.

Ekstensometer serat optik adalah alat untuk mengukur perpanjangan atau pergeseran suatu benda pada sumbu horisontal. Beberapa jenis sensor pergeseran berbasis serat optik telah dikembangkan misalnya menggunakan *fiber bragg grating/ FBG*, interferensi moda jamak atau berbasis pelengkungan makro (*macro bending*) [8,9]. Sensor serat berbasis intensitas dengan memanfaatkan terjadinya pelengkungan makro terlihat sederhana dan mudah dalam disain dan interpretasi sinyalnya mudah walau terkadang mengalami fluktuasi intensitas dan sensitivitasnya rendah. Namun, fluktuasi daya dapat diminimalisir dengan menggunakan sinyal diferensiasi intensitas sinyal dari lengan sensing dan lengan acuan dan kompromi dapat dilakukan antara sensitivitas dan rentang pengukuran. Wang, P. dkk. [5] mengembangkan sensor serat optik untuk pergeseran mikro menggunakan laser yang dapat ditala dan penganalisis spektrum optik, untuk rentang diameter lengkungan 18 ~ 19 mm pada panjang gelombang (λ) 1550 nm.

Suatu ekstensometer serat optik dengan modulasi intensitas dengan memanfaatkan kerugian lengkungan makro telah dikembangkan di sini menggunakan serat optik moda tunggal standar telekomunikasi sebagai sensor dengan sumber cahaya laser dioda pada panjang gelombang (λ) = 1300 nm. Evaluasi kinerja yang dilakukan meliputi pengamatan keluaran sinyal ekstensometer di laboratorium dan semi lapangan di lereng buatan. Perhitungan rugi lengkungan serat optik secara teoritis tidak dilakukan tetapi diberikan suatu ilustrasi apa yang terjadi pada serat optik saat serat dilengkungkan.

2 Teori

Gelombang cahaya yang merambat di dalam inti serat optik akan terdistorsi bila seratnya dilengkungkan karena profil indeks bias serat saat dilengkungkan berbeda dengan saat serat dalam keadaan lurus. Bila $P(0)$ adalah daya optis sebelum dilengkungkan maka besarnya daya yang keluar dari serat optik yang dilengkungkan satu kali berbentuk lingkaran dengan jari-jari R sehingga keliling lingkarannya $L = 2\pi R$ adalah [10]:

$$P(L) = P(0)e^{-\gamma L} \quad (1)$$

Umumnya nilai rugi lengkungan dinyatakan dalam satuan desibel (dB), hingga dalam hal ini:

$$\text{Rugi Lengkuangan} = -10 \log \frac{P(L)}{P(0)} = -10 \log e^{-\gamma L} = 4.34 \gamma L \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

dengan γ menyatakan koefisien rugi lengkungan yang untuk serap optik ragam tunggal jenis *step index* yang nilainya dapat dihitung oleh persamaan berikut [10]:

$$\gamma = \left(\frac{\pi \rho}{R} \right)^{\frac{1}{2}} V^2 W^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{4}{3} \Delta \frac{RW^3}{\rho V^2}} \quad (3)$$

dengan ρ jari-jari inti serat, R jari-jari lengkungan, Δ beda indeks bias inti dan selubung serat, U , V , dan W adalah parameter-parameter serat optik yang nilainya tergantung pada nilai jari-jari inti, indeks bias inti dan selubung serat. Syarat agar serat optik bersifat ragam tunggal pada suatu panjang gelombang tertentu adalah nilai V harus lebih kecil atau sama dengan 2.405. Nilai panjang gelombang yang menyatakan bahwa serat optik mulai bersifat ragam tunggal disebut sebagai panjang gelombang pancung (*cut off wavelength*) dari serat optik tersebut. Jadi besarnya rugi lengkungan serat optik dengan jari-jari lengkungan tertentu juga tergantung pada panjang gelombang cahaya yang merambat di dalam serat optik tersebut [11].

Terlihat dari Persamaan 3 bahwa nilai rugi lengkungan turun secara eksponensial bila jari-jari lengkungan membesar (atau naik secara eksponensial bila jari-jari lengkungan mengecil). Namun pada kenyataannya, untuk cahaya pada suatu serat optik dengan panjang gelombang tertentu, teramati nilai rugi lengkungan justru turun pada saat jari-jari lengkungan mengecil akibat efek *whispering gallery mode (WGM)* yang menyebabkan cahaya yang bocor ke luar dari inti serat dipantulkan oleh selubung serat masuk kembali ke dalam inti [12, 13]. Pada kasus ini, persamaan empiris yang menghubungkan nilai rugi lengkungan (L , dalam satuan dB) dengan jari-jari lengkungan (R , dalam satuan mm) dari serat optik standard ITU G.652.c dengan diameter inti 9 μm dan diameter selubung 125 μm , untuk cahaya dengan panjang gelombang 1550 nm, adalah [13]:

$$L = 5F_1(5F_2 + F_3) \quad (4)$$

dengan:

$$F_1 = c \exp\left(-\frac{R_{eff}}{3}\right)$$

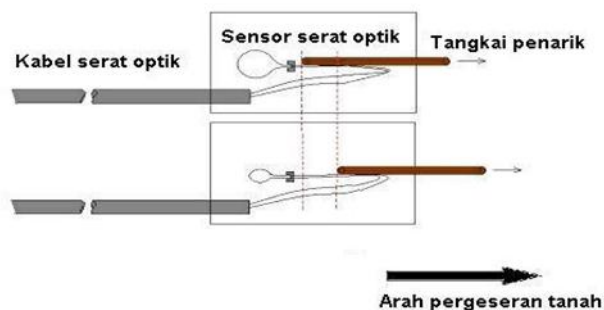
$$F_2 = aJ_1(2.25R_{eff})$$

$$F_3 = b \exp\left(-\frac{R_{eff}}{5}\right) \quad (5)$$

dengan J_1 adalah fungsi Bessel orde pertama, $a = -1.59$, $b = 12.05$, $c = 2.79$, dan $R_{eff} = R - 0.8$. Dari Persamaan 4 dan 5 terlihat bahwa ada hubungan eksponensial antara rugi lengkungan dengan jari-jari lengkungan namun tidaklah monotonik melainkan ada osilasi (nilai rugi lengkungan yang naik-turun) akibat efek WGM. Pada penggunaan serat optik ragam tunggal sebagai sensor berbasis perubahan intensitas cahaya akibat rugi lengkungan, efek WGM ini sebaiknya dihindari atau diminimisasi.

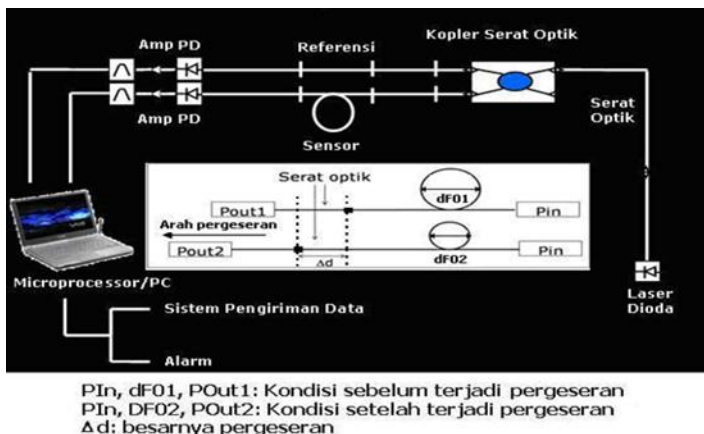
3 Ekstensometer Optis Untuk Deteksi Pergeseran Tanah

Bagian terpenting dari sistem ekstensometer optis adalah sensor serat optik sebagai pendeteksi pergeseran tanah yang terjadi. Sebagaimana telah dinyatakan terdahulu, sensor dibentuk dari seutas serat optik yang dilengkungkan (Gambar 1). Salah satu ujung sensor dihubungkan ke suatu mekanisme penarikan sehingga bila terjadi pergeseran tanah, serat mengalami penarikan dan diameter lingkarannya mengecil akibatnya intensitas keluaran cahaya lewat serat yang masuk detektor akan berkurang karena rugi lengkungan yang terjadi.



Gambar 1 Skema sensor serat optik beserta fenomena penarikan akibat terjadinya pergeseran tanah (atas: posisi awal sensor, bawah: setelah terjadi pergeseran tanah)

Skema lengkap dari sistem ekstensometer optis ini diperlihatkan pada Gambar 2. Sistem terdiri atas sumber cahaya dioda laser yang terstabilkan dengan rangkaian APC, serat optik ragam tunggal sepanjang 50 m sebagai sarana penjalaran cahaya dan sekaligus sebagai sensor, pencabang serat optik sebagai sarana pembagi cahaya, sistem detektor cahaya dengan penguat operasional rendah derau, serta sistem pemrosesan data menggunakan Picoscope 3224 dan PC.



Gambar 2 Skema sistem ekstensometer serat optik

Prinsip kerja dari ekstensometer optis ini dapat diuraikan sebagai berikut (lihat Gambar 2): bila P_{In} adalah daya optis yang masuk serat optik yang menjadi sensor, dF_{01} dan P_{out1} masing-masing adalah diameter lengkungan serat serta daya optis yang keluar dari serat sebelum terjadi pergeseran, maka bila terjadi pergeseran tanah sebesar Δd maka diameter serat akan berubah berkurang menjadi dF_{02} dan daya optisnya turun menjadi P_{out2} . Daya optis inilah yang bersama-sama dengan daya optis dari serat optik acuan yang akan dimonitor dan direkam oleh *data logger* yang selanjutnya dapat dihubungkan dengan perangkat lain seperti alarm untuk peringatan bagi masyarakat setempat, ataupun sistem pengiriman data yang menggunakan jaringan GSM/Internet.

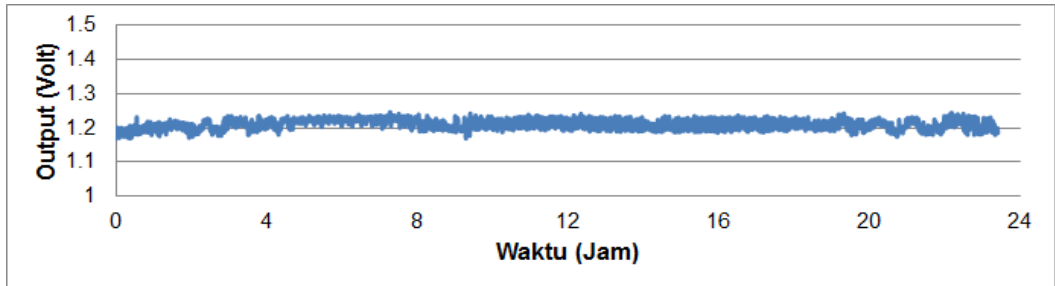
Uji kinerja yang akan dilaporkan disini adalah uji laboratorium dan uji semi lapangan berupa pengamatan keluaran ekstensometer serat optik di laboratorium dan di lereng buatan. Tahapan kegiatan eksperimen yang dilakukan meliputi pengujian laboratorium untuk pengamatan kestabilan keluaran intensitas, pengujian laboratorium untuk perhitungan parameter kinerja, pengujian semi lapangan untuk pengamatan kestabilan intensitas keluaran di lereng buatan dan pengujian semi lapangan untuk pengamatan proses longsor lereng buatan dengan simulasi hujan buatan.

4 Hasil dan Analisis Data

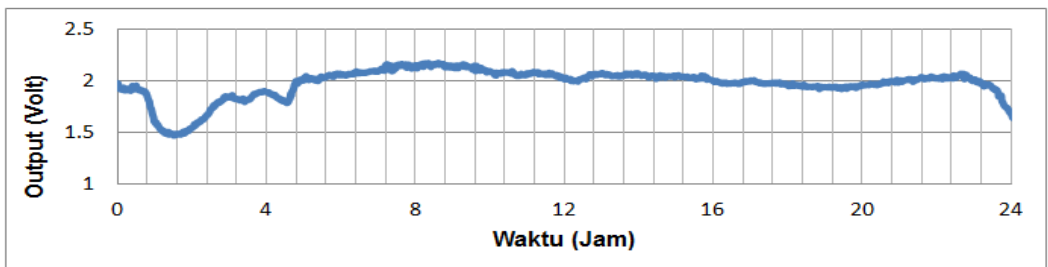
Seperti telah dijelaskan sebelumnya, evaluasi kinerja yang dilakukan meliputi pengamatan keluaran ekstensometer di laboratorium dan lereng buatan yang akan diuraikan secara berurutan dibawah ini.

4.1 Pengujian laboratorium (Pengamatan kestabilan keluaran intensitas)

Untuk pengamatan di laboratorium kami merekam keluaran cahaya laser yang melewati beberapa struktur serat optik pada kondisi *indoor* dan *outdoor* dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pertama, kami merekam keluaran laser yang melewati serat pendek sepanjang 1 meter dengan hasil ditunjukkan pada Gambar 3.a. Kemudian dilakukan hal yang sama pada serat sepanjang 20 meter; dengan suatu *loop* sensor di tengahnya; menghasilkan kurva pada Gambar 3.b. Proses uji ekstensometer dilakukan pada kondisi *indoor* selama 24 jam.



(a)

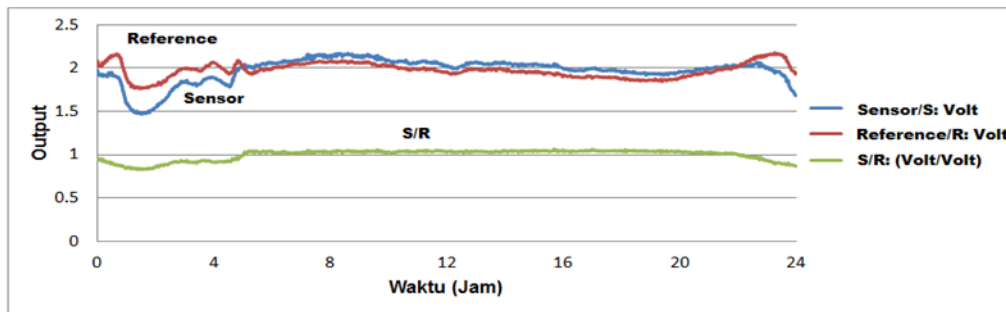


(b)

Gambar 3 Pengamatan keluaran cahaya laser lewat serat optik selama 24 jam di laboratorium (indoor): (a) panjang 1 meter. (b) panjang 20 meter dengan loop sensor

Dapat dilihat pada Gambar 3.a., bahwa untuk serat pendek (1 meter), variasi suhu siang dan malam hampir tidak berpengaruh terhadap transmisi cahaya. Tegangan keluaran cukup rata sepanjang 24 jam dengan variasi output kurang dari 0,1 volt. Sebaliknya, transmisi cahaya dari serat panjang (20 meter) dengan loop sensor ditengah; yaitu pada Gambar 3.b.; berfluktuasi secara tidak beraturan dengan variasi tegangan sekitar 0,8 volt yang disebabkan oleh variasi suhu siang dan malam.

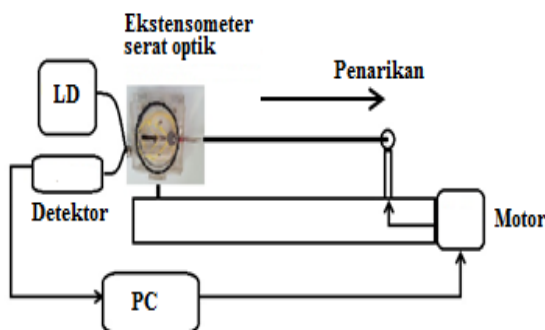
Karena daya keluaran masih sangat berfluktuasi dengan suhu maka dikawatirkan perubahan keluaran daya karena pergeseran akan sulit dideteksi. Untuk itu telah dilakukan beberapa upaya, pertama dengan menambahkan suatu lengan atau *loop* acuan untuk mengkompensasi efek suhu pada ekstensometer serat optik. Kedua, dengan membuat daya masukan laser ke kedua lengan serat sama besar; dan ketiga dengan mengoptimalkan perlindungan mekanis serat dengan membuat suatu rumah akrilik pelindung sensor yang dilengkapi dengan penutup atas. Hasil uji keluaran ekstensometer serat optik dengan kabel serat optik sepanjang 20 meter dalam kondisi ini disajikan pada Gambar 4 terdiri atas daya keluaran lengan acuan, sensor dan (sensor/acuan) atau kurva hasil normalisasi (S/R). Kurva normalisasi ini terlihat cukup datar selama pengukuran indoor 24 jam dengan variasi voltase sekitar 0,1 volt.



Gambar 4 Pengamatan keluaran cahaya laser lewat lengan sensor (S) dan lengan acu (R) serta perbandingan nilai S/R yang merupakan output ekstensometer

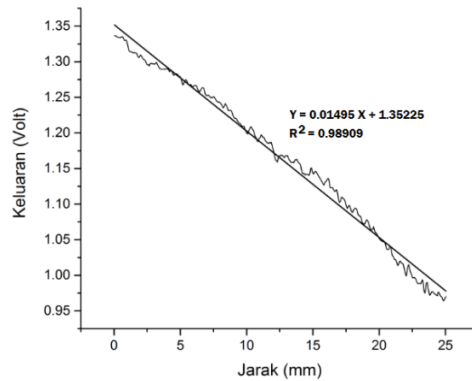
4.2 Pengujian laboratorium (Perhitungan parameter kinerja)

Untuk mendapatkan parameter kinerja ekstensometer optik kami mengamati intensitas keluaran lewat ekstensometer akibat proses pelengkungan (*bending loss*). Sumber cahaya dimasukkan ke port atau lengan masukan dari ekstensometer dan keluaran cahaya lewat serat dimana terdapat loop sensor dimasukkan ke detektor. Jika loop sensor ditarik maka diameter loop akan berkurang dan intensitas cahaya lewat serat akan menurun sesuai pengurangan diameter. Penarikan dilakukan dengan mekanisme penarikan otomatis menggunakan motor yang dikontrol PC dengan diagram eksperimen disajikan pada Gambar 5



Gambar 5 Diagram skema pengukuran intensitas keluaran akibat proses pelengkungan serat melalui proses penarikan secara otomatis pada ekstensometer optik

Loop sensor ditarik sejauh 0-30 mm dan keluaran intensitas berupa tegangan direkam dan dibaca dengan PC. Untuk eksperimen ini cukup digunakan sumber cahaya LED pada panjang gelombang 1310 nm dan serat optik yang digunakan sebagai sensor ekstensometer adalah produk Fujikura. Dari pengukuran daya keluaran selama pelengkungan serat melalui mekanisme penarikan ini diperoleh kurva tegangan keluaran sebagai fungsi jarak penarikan (lihat Gambar 6) sehingga dapat dihitung kemudian jelajah pengukuran serta sensitivitas dari ekstensometer serat optik.

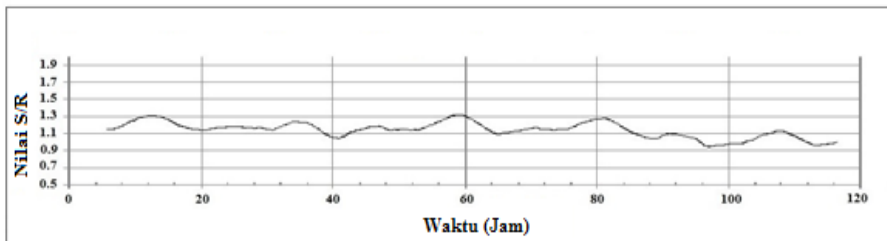


Gambar 6 Kurva keluaran ekstensometer sebagai fungsi jarak penarikan

Dari kurva Gambar 6 terlihat spektrum keluaran ekstensometer *dengan* efek WGM yang dapat diabaikan. Dari perhitungan linierisasi diperoleh koefisien linearitas R^2 : 0.98909 dan jika digunakan sebagai sensor pergeseran memberikan jelajah pengukuran 0-25 mm dan sensitivitas 0.015 Volt/mm.

4.3 Pengujian semi lapangan (Pengamatan kestabilan intensitas keluaran di lereng buatan)

Pada uji eksperimen berikut dilakukan pengamatan keluaran ekstensometer untuk kondisi *outdoor* selama 116 jam dengan diselingi pemberian tarikan pada salah satu ujung *loop* sensor (tarikan 5 mm pada jam ke 84) dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Transmisi normalisasi (S / R) cahaya yang melewati ekstensometer serat dalam kondisi *outdoor* selama 116 jam dengan memberikan simulasi pergeseran 5 mm pada jam ke 84

Dapat dilihat dari grafik pada Gambar 7 bahwa pengaruh variasi suhu harian selama 116 jam dengan pemberian tarikan sebagai simulasi pergeseran sebesar 5 mm (pada jam ke 84) menghasilkan penurunan nilai S/R sebesar 0,2 volt/Volt setelah penarikan; yang memberikan resolusi ekstensometer sebesar 5 mm.

4.4 Pengujian semi lapangan (Pengamatan proses longsor lereng buatan dengan simulasi hujan)

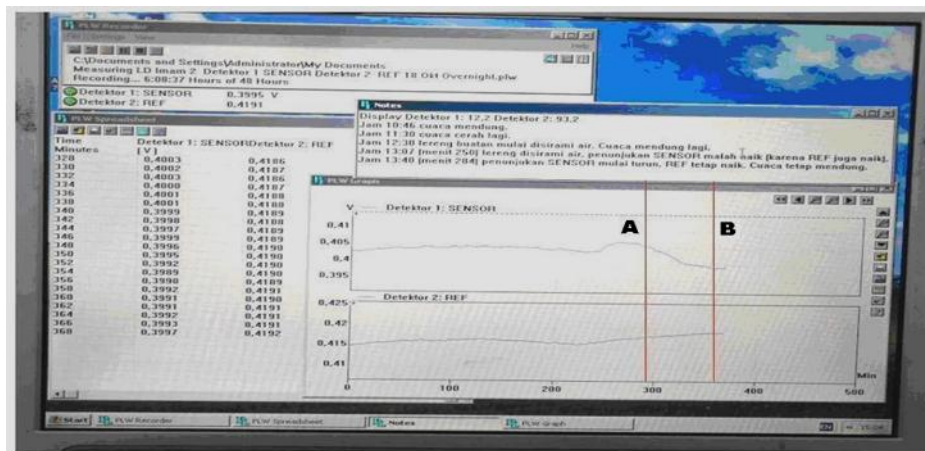
Pengujian ditujukan untuk mengamati fenomena longsornya suatu lereng buatan dengan ekstensometer optik melalui pemberian simulasi hujan buatan terhadap lereng. Untuk proses uji coba semi lapangan, telah dibuat satu bukit mini buatan berstruktur lereng yang rawan longsor serta mekanisme hujan buatan dengan flow air sekitar 0.03 m³ per menit (Gambar 8, atas – kiri). Pada lereng buatan dipasang tonggak-tonggak dengan tali pancang

yang dihubungkan ke sensor serat optik. Dengan pemberian hujan buatan (Gambar 8, atas - kanan) maka tanah akan cenderung bergerak kebawah sambil memberi tekanan pada tonggak-tonggak tersebut sehingga tali pancang tertarik demikian pula sensor serat optik (Gambar 8, bawah).



Gambar 8 Uji coba ekstensometer serat optik di lereng buatan

Karena tali pancang menarik sensor serat maka diameter lingkaran sensor (lihat skema pada Gambar 2) akan makin mengecil dan akibatnya sinyal sensor yang masuk detektor akan mengalami penurunan sebagaimana dapat dilihat grafik tegangan fungsi waktu pada daerah A-B pada Gambar 9. Pada daerah A-B terlihat dengan jelas bahwa sinyal sensor (grafik bagian atas) mengalami penurunan karena terjadinya pergeseran tanah walaupun sinyal acuan (grafik bagian bawah) nilainya naik. Pada menit ke 250 lereng mulai disirami air, sinyal sensor dan sinyal acuan naik tetapi pada menit 284 (titik A) karena tanah mulai turun dan tiang pancang mulai tertarik demikian pula serat sensor; maka sinyal sensor turun walau sinyal acuan masih naik. Inti dari pengamatan yang hendak dikemukakan disini adalah pergeseran tanah yang terjadi akan teramati sebagai penurunan intensitas keluaran cahaya yang melewati serat optik sensor pada ekstensometer serat optik.



Gambar 9 Pengamatan data tegangan keluaran (Volt) sebagai fungsi waktu (menit) dari sistem sensor dalam bentuk teks dan grafik. Batas A dan B adalah selang waktu saat terjadi pergeseran tanah. Grafik bagian atas adalah keluaran sinyal sensor dan bagian bawah adalah sinyal acuan

5 Kesimpulan

Telah diuraikan proses uji kinerja ekstensometer serat optik sebagai sensor pergeseran tanah berbasis optis dengan memanfaatkan fenomena rugi lengkungan pada serat optik yang dilengkungkan. Secara teoritis untuk ekstensometer optik yang telah dibuat diperoleh harga jelajah pengukuran 0-25 mm, sensitivitas 0.014 Volt/mm. Pengamatan secara visual terjadinya longsor pada lereng buatan yang mengakibatkan terjadinya penurunan sinyal keluaran ekstensometer serat optik telah pula dilakukan. Beberapa kegiatan penyempurnaan masih perlu dilakukan misal untuk mencek keakuratan data perlu melakukan perbandingan data pengukuran pergeseran tanah ini dengan peralatan lain dilapangan. Pengembangan perangkat lunak untuk pengolahan data jarak jauh; juga untuk mendapatkan nilai laju pergeseran tanah yang dapat digunakan sebagai sistem deteksi dini bencana longsor sedang dilakukan. Penyempurnaan sistem (pengemasan, pemilihan bahan dan komponen dll.) agar memenuhi syarat sebagai produk komersial juga sedang dilakukan.

Uji coba lebih intensif juga masih perlu dilakukan agar sensor mempunyai performansi dan kekuatan fisik yang optimum.

6 Referensi

- [1] Rajan, G., Introduction to Optical Fiber Sensors, Optical Fiber Sensors, Advanced Techniques and Applications, Rajan, G., CRC Press New York, Taylor and Francis Group, pp. 1-4, 2015.
- [2] Mescia, L., and Prudenzano, F., Review Advances on Optical Fiber Sensors, *Fibers*, 2(1), pp. 1-23, 2014.
- [3] Udd, E., Schulz, W., Seim, J., Coronas, J., Laylor, H.M., Fiber Optic Sensors for Infrastructure Applications, Final Report, Oregon Department of Transportation, FHWA-OR-RD-98-18, 1998.
- [4] He, J., Liao, C., Yang, K., Liu, S., Yin, G., Sun, B., Zhou, J., Zhao, J., and Wang, Y., High-Sensitivity Temperature Sensor Based on a Coated Single-Mode Fiber Loop, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 19, October 1, pp. 4019-4026, 2015.
- [5] Wang, P., Semenova, Y., Wu, Q., Farrell, G., Fiber-optic voltage sensor based on macrobending structure, *Optics & Laser Technology* 43, pp. 922 – 925, 2011.
- [6] Wang, P., Semenova, Y., Wu, Q, Farrell, G., A bend loss based single fiber micro-displacement sensor, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 52, No. 10, pp. 2231 – 2235, 2010.
- [7] Suárez, J.C., Remartinez, B., Menéndez, J.M., Güemes, A., Molleda, F., Optical fiber sensors for monitoring of welding residual stresses, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143–144, pp. 316–320, 2003.
- [8] Ng, J.H., Zhou, X., Yang, X and Hao, J., A simple temperature-insensitive fiber Bragg grating displacement sensor, *Optics Communications*, vol. 273, pp. 398-401, 2007.
- [9] Antonio-Lopez, J.E., LiKamWa, P., Sanchez-Mondragon, J.J., and May-Arrioja, D.A., All-fiber multimode interference micro-displacement sensor, *Meas. Sci. Technol.* 24 055104, pp. 1-7, 2013.
- [10] Miclos, S., Savastru, D., Lancranjan, I., Numerical Simulation of a Fiber Laser Bending Sensitivity, *Romanian Reports in Physics*, vol. 62, No.3, pp. 519 – 527, 2010.
- [11] Jung, Y., Brambilla, G., Richardson, D. J., Comparative study of the effective single mode operational bandwidth in sub-wavelength optical wires and conventional single-mode fibers, *Optics Express* Vol. 17 No. 19, pp. 16619 – 16624, 2009.

- [12]Wang, Q., Farrel, G., Freir, T., Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers, Optics Express Vol. 13 No. 12, pp. 4476 - 4484, 2005.
- [13]Zendehnam, A., Mirzaei, M., Farashiani, A., and Farahani, L. H., Investigation of bending loss in a single mode optical fibre, Pramana - J. Phys., Vol. 74 No.4, pp. 591 - 603, 2010.

7 Acknowledgement

Program penelitian ini didanai dari Program Tematik Pusat Penelitian Fisika-LIPI tahun 2015-2016.