
PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI SUMBER DAN DETEKTOR CAHAYA UNTUK EKSTENSOMETER SERAT OPTIK

Tomi Budi Waluyo, Dwi Bayuwati, Bambang Widiyatmoko

Bidang Instrumentasi Fisis dan Optoelektronika,
Pusat Penelitian Fisika – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Kawasan Puspiptek, Serpong 15314 Tangerang Selatan
E-mail: thom002@lipi.go.id

ABSTRAK

Pada makalah ini diuraikan pembuatan sumber cahaya menggunakan diode laser yang distabilkan menggunakan teknik APC (*Automatic Power Control*), dan detektor cahaya yang merupakan paduan suatu diodefoto PIN dan penguat operasional derau rendah jenis CA-251F4 untuk digunakan pada sistem ekstensometer serat optik. Syarat utama bagi ekstensometer serat optik yang berbasis perubahan intensitas cahaya adalah tersedianya sumber cahaya dan detektor cahaya yang andal. Intensitas cahaya yang dipancarkan oleh sumber cahaya harus tetap nilainya (kalau pun berubah maka perubahannya harus dalam batas toleransi penggunaan). Detektor yang digunakan harus peka terhadap perubahan intensitas cahaya dan mempunyai taraf derau yang rendah. Adapun untuk karakterisasinya (pengamatan kestabilan intensitas cahaya sebagai fungsi waktu) digunakan Picoscope 3224 yang berfungsi sebagai *data logger*. Sumber dan detektor cahaya yang dibuat ini dapat digunakan pada sistem ekstensometer optis untuk mengukur pergeseran tanah dengan tingkat ketelitian 0.2 mm.

Kata kunci: sumber cahaya terstabilkan, detektor cahaya derau rendah, sensor serat optik berbasis perubahan intensitas, ekstensometer optis

ABSTRACT

We describe in this paper the construction of a light source using a laser diode stabilized with Automatic Power Control technique, and a light detector which is a combination of a PIN photodiode and a low noise operational amplifier type CA-251F4 to be used in a fiber optic extensometer system. The main requirement for fiber optic extensometer based on intensity-modulation is the availability of reliable light source and detector. The intensity of light emitted from the source should be constant (if it changes then the changes should be still in tolerable limit of applications). The detector should be sensitive to any changes in light intensity and low noise as well. For the characterization (observation of the stability of light intensity as a function of time) we use Picoscope 3224 operated as a data logger. Both of the light source and detector are used in an optical extensometer system to measure land slide with 0.2 mm precision.

Keywords: stabilized light source, low noise optical detector, intensity-modulation optical fiber sensor, optical extensometer

PENDAHULUAN

Syarat utama bagi sumber cahaya yang akan digunakan pada sistem sensor serat optik berbasis perubahan intensitas cahaya adalah kestabilan intensitas cahaya yang dipancarkannya. Perubahan intensitas cahaya yang diterima oleh detektor adalah akibat besaran fisis yang dideteksi oleh sensor. Detektor cahaya yang digunakan harus peka terhadap setiap perubahan intensitas cahaya yang terjadi dan mempunyai taraf derau yang rendah. Pada umumnya sistem sensor serat optik berbasis perubahan intensitas cahaya menggunakan minimal dua detektor cahaya. Satu detektor digunakan untuk mengukur perubahan intensitas cahaya akibat besaran fisis yang dirasakan oleh sensor, sedangkan detektor lainnya digunakan untuk memonitor apakah terjadi perubahan intensitas pada sumber cahayanya [1].

Pada makalah ini diuraikan pembuatan dan karakterisasi sumber serta detektor cahaya sebagai tahap awal perancangan ekstensometer serat optik, yakni sensor yang akan digunakan untuk pengukuran pergeseran tanah. Prinsip sensor ini adalah pengukuran perubahan intensitas cahaya yang merambat di dalam serat optik akibat perubahan rugi lengkungan (*bending loss*) yang dialami oleh serat akibat pergeseran tanah yang terjadi. Sistem ekstensometer optis ini dikembangkan sehubungan dengan banyak terjadinya bencana tanah longsor di Indonesia akhir-akhir ini. Sistem sensor ini diharapkan dapat menjadi alternatif maupun komplemen dari ekstensometer elektronik yang telah umum digunakan (misalnya *wire extensometer* yang menghubungkan pergeseran dengan perubahan resistansi potensiometer [2], maupun *vibrating wire extensometer* yang memanfaatkan perubahan frekuensi getaran dawai akibat pergeseran [3]).

Sistem sensor ekstensometer optis dibuat dengan memanfaatkan sifat inheren serat optik yakni kekebalannya terhadap interferensi elektromagnetik serta dapat menggunakan serat yang panjang karena redaman cahaya oleh serat optik sangat rendah (orde ≤ 0.3 dB/km), sehingga jarak antara sensor dengan detektornya dapat sangat berjauhan (hingga ratusan meter) [1].

Ekstensometer serat optik yang dirancang ini menggunakan diode laser yang distabilkan menggunakan teknik APC (*Automatic Power Control*), detektor cahaya yang merupakan paduan diodofoto PIN dan penguat operasional derau rendah jenis CA-251F4, serta serat optik ragam tunggal tipe SMF-28 sebagai sensor dan kabel serat optik ragam tunggal buatan Pirelli untuk transmisi datanya. Adapun untuk proses karakterisasinya digunakan Picoscope 3224 yang berfungsi sebagai *data logger*.

TEORI

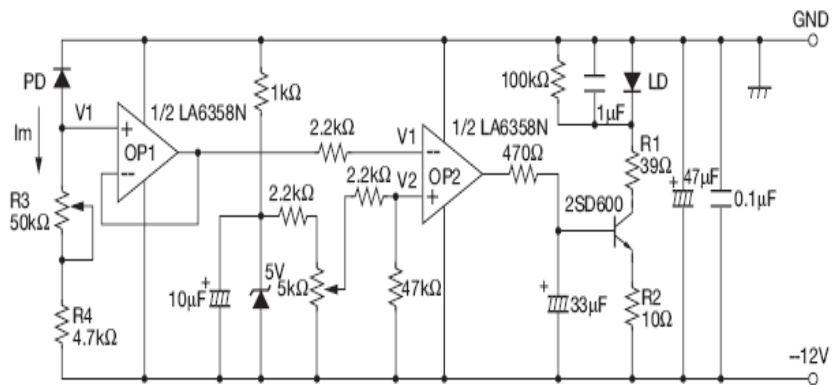
Diode laser adalah laser semikonduktor yang prinsip kerjanya mirip dengan LED (*light emitting diode*) hanya saja foton yang dihasilkan bersifat koheren (memiliki hubungan fase yang tetap) akibat emisi yang terstimulasi [4]. Agar terjadi emisi yang terstimulasi maka perlu keadaan “*population inversion*” yakni jumlah elektron di pita konduksi lebih banyak daripada di pita valensi. Hal ini dapat dicapai dengan menginjeksikan arus listrik ke lapisan aktif material diode laser tersebut yang lebih besar daripada arus ambang (I_{th}) yakni arus yang mulai menyebabkan terjadinya emisi terstimulasi. Karakteristik diode laser sangat dipengaruhi oleh temperatur. Hubungan antara ketergantungan arus ambang terhadap temperatur dapat dinyatakan sebagai [4]:

$$I_{th} = I_{th0} \exp(\Delta T / T_0) \dots\dots\dots (1)$$

dengan I_{th} : arus ambang aktual, I_{th0} : arus ambang awal, ΔT : perubahan temperatur, dan T_0 : temperatur awal.

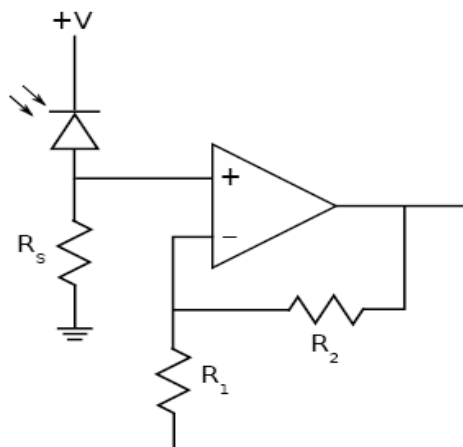
Pada prakteknya, menjaga kestabilan intensitas suatu sumber cahaya, khususnya diode laser, adalah sulit. Selain pengaruh temperatur lingkungan, pada diode laser pun terjadi proses pemanasan sendiri (*self heating*) terutama bila berdaya optis tinggi (puluhan hingga ratusan mW) dan beroperasi pada arus yang besar (hingga ratusan mA). Panas yang ditimbulkannya berdampak juga pada kestabilan daya dan panjang-gelombang cahaya yang dipancarkan. Cara yang umum digunakan untuk menjaga kestabilan pancarannya antara lain adalah dengan menggunakan rangkaian *Automatic Current Control* (ACC) untuk memberikan arus yang konstan, *Automatic Power Control* (APC) yang menggunakan rangkaian kendali catu balik, serta *Thermo-electric Cooling* (TEC) untuk menjaga temperatur operasinya. Ketiga cara tersebut dapat digunakan tersendiri atau dikombinasikan sesuai keperluan.

Rangkaian *Automatic Power Control* (APC) memanfaatkan diode foto internal yang terdapat pada kemasan diode laser untuk memonitor cahaya yang dipancarkannya. Prinsip kerja rangkaian ini adalah sebagai berikut (lihat Gambar 1): cahaya yang dipancarkan oleh diode laser mengakibatkan timbulnya arus I_m pada diode foto sehingga terjadi tegangan $V_1 = I_m (R_3 + R_4)$. Tegangan ini oleh penguat operasional OP1 dimasukkan ke penguat operasional OP2. Penguat operasional OP2 juga menerima tegangan V_2 yang dihasilkan oleh suatu sumber tegangan acuan. Penguat operasional OP2 akan membandingkan nilai kedua tegangan tersebut dan (bila ada perbedaan nilai) akan mengubah nilai arus basis transistor sehingga mengendalikan arus yang mengalir ke diode laser sehingga kondisi $V_1 = V_2$ tetap diperoleh. Dengan demikian diperoleh intensitas pancaran diode laser yang stabil [5].



Gambar 1. Contoh rangkaian Automatic Power Control [5].

Salah satu jenis detektor cahaya yang umum digunakan adalah paduan dari suatu diodefoto dengan penguat operasional sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Rangkaian detektor cahaya [6].

Hal yang perlu diperhatikan pada konfigurasi rangkaian penguat diodefoto jenis ini adalah pemilihan nilai resistor R_s . Semakin besar nilai R_s semakin besar pula nilai tegangan yang dihasilkan oleh diodefoto, namun nilai arus deraunya (*current noise*) juga semakin besar. Selain itu, perlu juga diperhatikan nilai tegangan derau (e_N) dan arus derau (i_N) dari penguat operasional yang digunakan agar memperoleh rangkaian penguat dengan taraf derau yang rendah mengingat total nilai tegangan derau rangkaian penguat ini adalah [6]:

$$e_{TOT} = \sqrt{e_N^2 + (i_N R_S)^2 + (i_N R_{\parallel})^2 + 4.k_B.T.(R_S + R_{\parallel}) + (i_{DCSN} R_S)^2} \dots\dots\dots(2)$$

dengan $R_{\parallel} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, k_B : konstanta Boltzmann, T : temperatur operasi, dan i_{DCSN} adalah nilai arus gelap (*dark current*) yang ditimbulkan oleh diodefoto walaupun dalam keadaan tidak menerima cahaya.

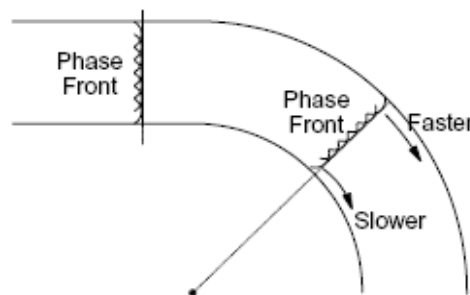
Gelombang cahaya yang merambat di dalam serat optik ragam tunggal (tepatnya: di dalam inti/*core* serat) akan terdistorsi bila seratnya dilengkungkan, lihat Gambar 3. Kecepatan cahaya yang merambat pada bagian dalam lengkungan harus lebih lambat daripada yang bagian luarnya untuk mempertahankan bentuk muka gelombangnya. Ini berarti nilai indeks bias inti serat pada bagian tersebut lebih kecil bila dibandingkan saat serat dalam keadaan lurus [7]. Semakin kecil jari-jari lengkungan maka nilainya semakin mendekati nilai indeks bias selubung/*cladding* sehingga makin banyak cahaya yang keluar dari inti serat, atau semakin besar ruginya. Bila $P(0)$ adalah daya optis sebelum serat dilengkungkan maka besarnya daya yang keluar dari serat optik yang dilengkungkan dengan jari-jari R_C sepanjang L adalah [8]:

$$P(L) = P(0)e^{-\gamma L} \dots\dots\dots(3)$$

dengan γ menyatakan koefisien rugi untuk serat optik ragam tunggal jenis *step index* yang nilainya dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\gamma = C_1 e^{-C_2 R_C} \dots\dots\dots(4)$$

dengan C_1 dan C_2 merupakan konstanta yang terkait dengan parameter-parameter serat optik dan nilainya merupakan fungsi panjang-gelombang [8]. Sensor serat optik untuk pengukuran pergeseran tanah ini menerapkan prinsip rugi lengkungan tersebut. Sensor ini dirancang agar pergeseran tanah menyebabkan perubahan diameter lengkungan serat sehingga intensitas cahaya yang diterima oleh detektor cahaya juga berkurang nilainya.

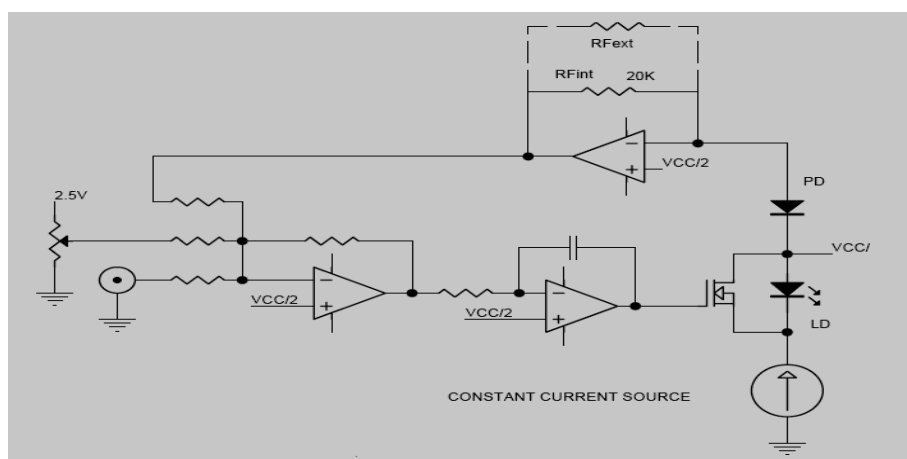


Gambar 3. Perambatan cahaya pada serat optik yang dilengkungkan [7].

METODOLOGI

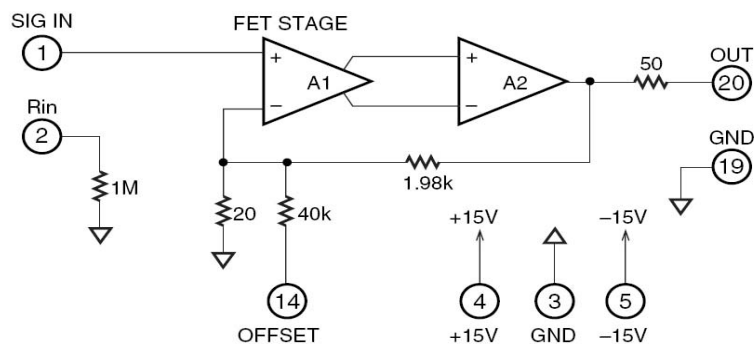
Sumber dan detektor cahaya yang akan digunakan pada sistem sensor serat optik ini dibuat dengan menggunakan komponen-komponen yang ada di pasaran yang dipilih sesuai dengan kebutuhan dan anggaran yang tersedia. Untuk pembuatan sumber cahaya yang terstabilkan dipilih modul Thorlabs LD2000APC yang antara lain dilengkapi dengan rangkaian *slow start* (untuk mencegah kerusakan diode laser akibat kenaikan arus yang tiba-tiba).

Adapun diode laser yang digunakan adalah Hitachi LB5374 *single longitudinal mode DFB (Distributed Feedback) laser* yang beroperasi pada panjang gelombang 1.3 μm dengan daya optis sebesar 1 mW. Modul Thorlabs LD2000APC ini memanfaatkan diodefoto internal yang terdapat pada diode laser tersebut sebagai komponen catu balik pada rangkaian integrator untuk meregulasi intensitas cahaya yang dipancarkan oleh diode laser [9]. Diagram blok modul untuk menstabilkan intensitas diode laser ini diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram blok rangkaian untuk menstabilkan intensitas diode laser [9].

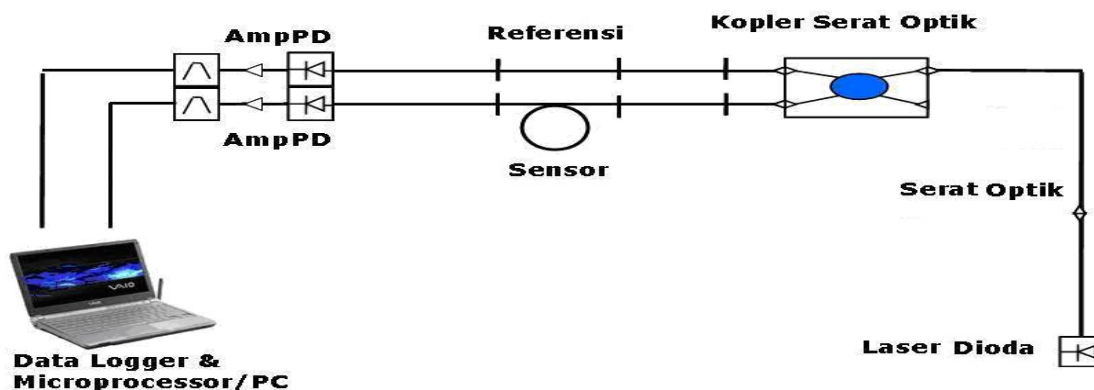
Sebagai detektor cahayanya digunakan diodefoto PIN yang dipadukan dengan penguat operasional derau rendah jenis CA-251F4. Penguat operasional ini mempunyai *single-end FET input* dengan penguatan tetap 100 kali (40 dB) serta tegangan derau dan arus derau masing-masing sebesar 1.4 nV/Hz^{1/2} dan 150 fA/Hz^{1/2} [10]. Diagram blok penguat operasional ini diperlihatkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Diagram blok penguat operasional CA-251F4 [10].

Sebagai pembanding, juga dibuat suatu detektor cahaya yang menggunakan *High-Accuracy Instrumentation Amplifier* jenis INA101 yang tegangan derau dan arus deraunya masing-masing sebesar $13 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ dan $0.8 \text{ pA/Hz}^{1/2}$ [11]. Terlihat bahwa karakteristik derau CA-251F4 jauh lebih baik daripada INA101, namun harganya empat kali lebih mahal.

Adapun untuk pengamatan kestabilan sumber dan detektor cahaya yang telah dibuat ini serta pengukuran kepekaan sensor serat optiknya, digunakan Picoscope 3224 yang dioperasikan sebagai *2-channel data logger* 12 bit yang mampu mendeteksi perubahan sinyal hingga 0.024% (244 ppm) [12]. *Set-up* peralatan untuk pengamatan kestabilan sumber cahaya serta kepekaan sensor serat optik dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram pengamatan kestabilan sumber dan detektor cahaya serta pengukuran kepekaan sensor.

Cahaya luaran dari diode laser yang telah distabilkan dimasukkan ke pencabang serat optik (*optical fiber coupler*) yang masing-masing disambungkan ke kabel serat optik Pirelli sebagai lengan referensi dan lengan ukur. Pada lengan ukur terdapat serat optik SMF-28 yang dilengkungkan yang bertindak sebagai sensor (karakteristik serat jenis ini [13] dapat dilihat pada Tabel 1). Cahaya yang keluar dari kedua lengan tadi diterima oleh detektor cahaya, kemudian diperkuat dan diolah lebih lanjut oleh komputer melalui *data logger*. Sinyal yang berasal dari lengan referensi (dengan detektor cahaya yang menggunakan penguat operasional INA101) merupakan sinyal monitor kestabilan intensitas diode laser, sedangkan sinyal yang berasal dari lengan ukur (dengan detektor cahaya yang menggunakan penguat operasional CA-251F4) merupakan sinyal monitor perubahan intensitas akibat perubahan diameter lengkungan sensor serat optik.

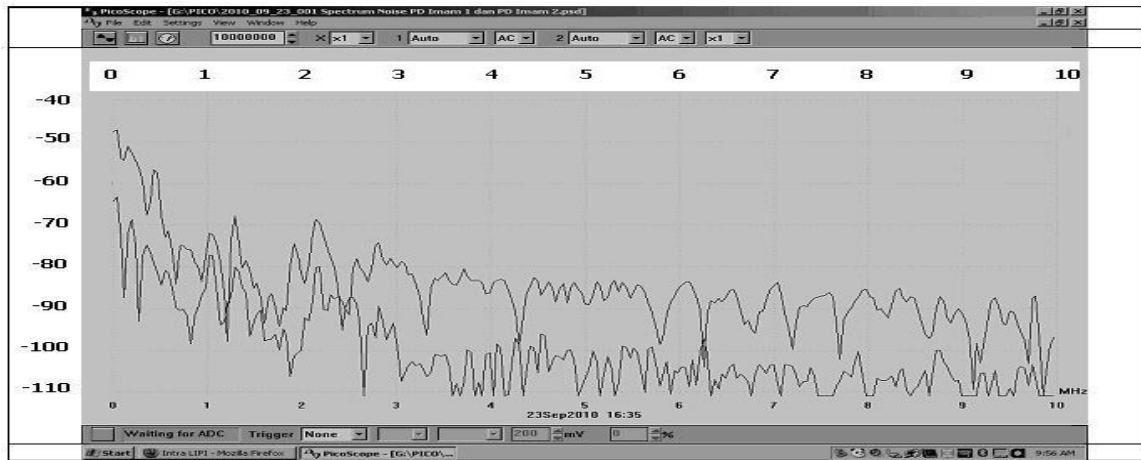
Tabel 1. Parameter serat optik SMF-28 [13].

Diameter inti	8.3 μm
Indeks bias inti	1.4504
Diameter selubung	125 μm
Indeks bias selubung	1.4447
Diameter lapisan pelindung pertama	1.4786
Indeks bias lapisan pelindung pertama	190 μm
Diameter lapisan pelindung ke dua	1.5294
Indeks bias lapisan pelindung ke dua	250 μm

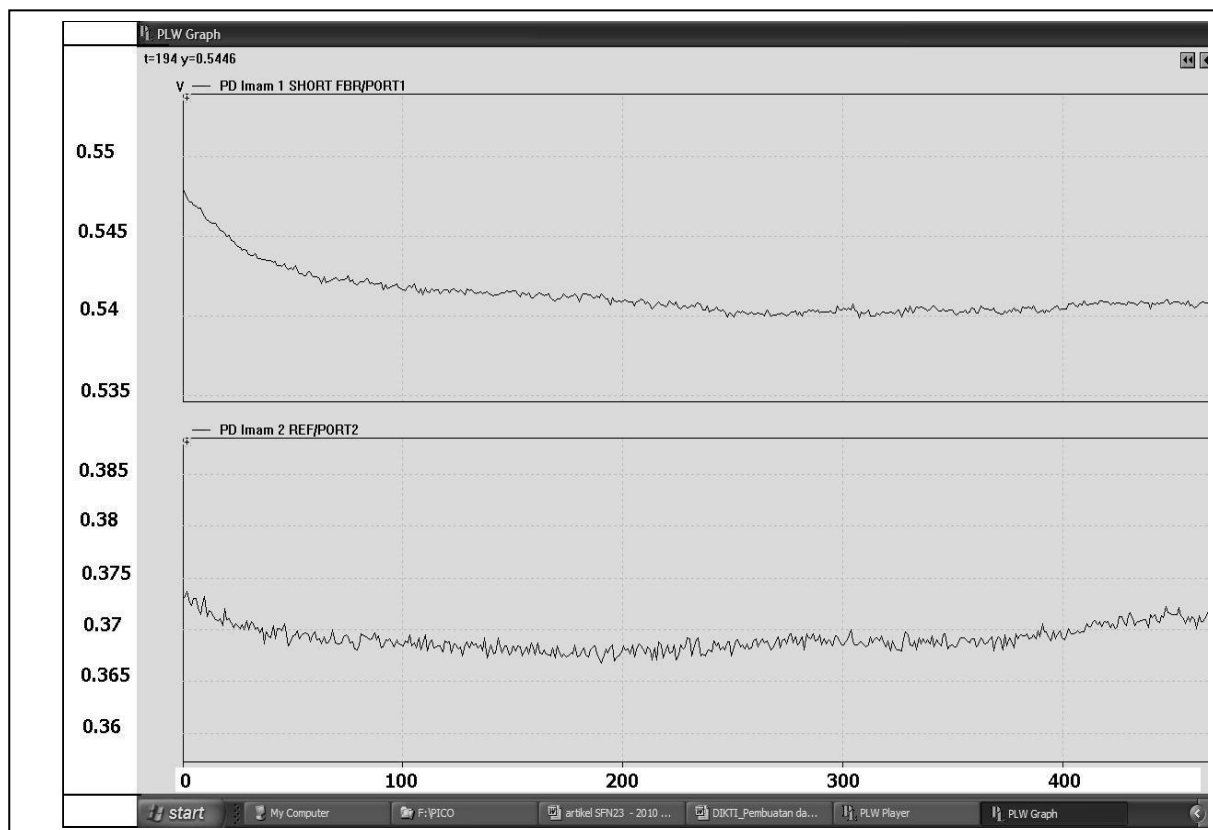
HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui karakter derau dari kedua detektor cahaya yang telah dibuat (masing-masing menggunakan CA-251F4 dan INA101) maka dilakukan pengukuran spektral dalam keadaan tanpa sinyal menggunakan fasilitas FFT (*Fast Fourier Transform*) yang ada pada Picoscope 3224. Dari kurva spektrumnya yang ditunjukkan pada Gambar 7, tampak bahwa taraf derau detektor cahaya yang menggunakan CA-251F4 sekitar 15 dB lebih rendah daripada yang menggunakan INA101.

Untuk melihat kestabilan sistem (sumber cahaya, detektor, dan *data logger*) cahaya diode laser disalurkan secara serempak ke kedua detektor dengan menggunakan suatu pencabang serat optik (*optical fiber coupler*). Tegangan luaran dari kedua detektor tersebut kemudian direkam dengan menggunakan fasilitas *data logger* pada Picoscope 3224 setiap satu menit selama 8 jam. Terlihat dari hasil rekaman (Gambar 8) bahwa tanggapan detektor cahaya terhadap intensitas cahaya yang dipancarkan oleh laser diode yang distabilisasikan menggunakan modul Thorlabs LD2000APC ini turun sekitar 5 mV pada kurun waktu 100 menit pertama dan kemudian relatif stabil setelah itu.

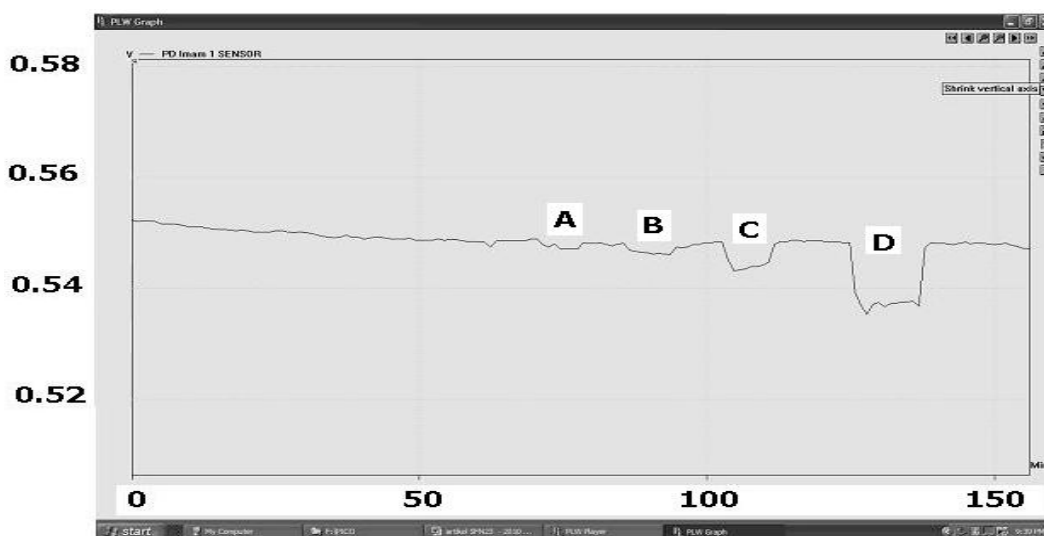


Gambar 7. Spektrum derau detektor cahaya menggunakan CA-251F4 (kurva bawah) dan yang menggunakan INA101 (kurva atas). Sumbu x menyatakan frekuensi dalam MHz dan sumbu y menyatakan tegangan derau dalam dBV.



Gambar 8. Kurva tegangan luaran versus waktu untuk detektor cahaya menggunakan CA-251F4 (atas) dan yang menggunakan INA101 (bawah). Sumbu x menyatakan waktu dalam menit dan sumbu y menyatakan tegangan luaran dalam Volt.

Untuk mengetahui kepekaan sensor serat optik ini maka dilakukan pengukuran perubahan intensitas cahaya akibat rugi lengkungan sebagai berikut: cahaya diode laser dari sumber cahaya disalurkan ke detektor yang menggunakan penguat operasional CA-251F4 melalui serat optik jenis SMF-28, kemudian tegangan luaran detektor cahaya direkam ketika serat optik tersebut dalam keadaan lurus serta ketika dilengkungkan dengan diameter tertentu. Pada Gambar 9 diperlihatkan pola perubahan intensitas cahaya ketika serat dalam keadaan lurus dan ketika dilengkungkan dengan diameter lengkungan 18 mm (A), 16 mm (B), 14 mm (C), dan 12 mm (D).



Gambar 9. Perubahan tegangan luaran akibat perubahan diameter lengkungan (diameter lengkungan untuk A: 18 mm, B: 16 mm, C: 14 mm dan D:12 mm). Sumbu x menyatakan waktu dalam menit dan sumbu y menyatakan tegangan luaran dalam Volt.

Terlihat bahwa terjadi perubahan tegangan luaran sebesar 10 mV ketika diameter lengkungan berubah dari 16 mm ke 12 mm atau terjadi perubahan sebesar 1 mV/0.4 mm. Karena dengan menggunakan Picoscope ini nilai $\frac{1}{2}$ skala terkecilnya ($\frac{1}{2}$ NST) adalah sebesar 0.5 mV maka sistem ini dapat digunakan sebagai ekstensometer optis untuk mengukur pergeseran tanah dengan tingkat ketelitian sebesar 0.2 mm. Tingkat ketelitian yang hanya sebesar 0.2 mm ini dapat dimengerti karena pengukuran perubahan intensitas cahaya akibat rugi lengkungan yang dilakukan pada karakterisasi ini merupakan pengukuran dc (*dc measurement*, pengukuran arus searah) yang didominasi oleh derau $1/f$ (*1/f noise*) [14]. Karakterisasi ini merupakan tahap awal perancangan ekstensometer sensor serat optik dan dilakukan untuk mengetahui potensi ketelitiannya. Sebagai perbandingan pada Tabel 2 disajikan berbagai tingkat ketelitian suatu ekstensometer sesuai penggunaannya [15].

Tabel 2. Tingkat ketelitian ekstensometer sesuai penggunaannya [15].

Range of precision	0.0025 mm (0.0001 in.)	0.025 mm (0.001 in.)	← Increasing precision 0.25 mm (0.01 in.) Increasing range →	2.5 mm (0.1 in.)
	Typical instrument sensitivity	0.0025 mm–0.01 mm (0.0001 in.–0.0004 in.)	0.025 mm–0.10 mm (0.001 in.–0.004 in.)	0.25 mm–1.0 mm (0.01 in.–0.04 in.)
Typical applications	<i>In situ</i> rock testing (plate jack or shear tests).	Tunnels and caverns in hard rock, rock cuts and excavations, shallow foundations.	Large caverns, excavations, or slopes in rock; critical measurements for tunnels or excavations in soil. ¹	Long installations associated with very large slopes, large moving landslides (for soil or rock).
Minimum range	25 mm (1 in.)	25 mm (1 in.)	50 mm (2 in.)	250 mm (10 in.)
Range with reset	50 mm (2 in.)	150 mm (6 in.)	300 mm (12 in.)	1000 mm (40 in.)
Typical length of installation ³	up to 10 m (33ft)	up to 30 m (98 ft)	up to 100 m (330 ft)	up to 200 m and greater (660 ft)
Smallest precision as a ratio of minimum range	1/10,000	1/1000	1/200	1/100

¹ Routine measurements for construction in soil require less precision on the order 1.0 mm (0.04 in.).

² Greater precision may be obtainable for very long installations by the use of strain meters.

³ "Typical length" does not imply maximum feasible length; exceptionally longer installations have been made.

KESIMPULAN DAN SARAN

Telah dibuat sumber cahaya diode laser terstabilkan menggunakan modul Thorlabs LD2000APC dan detektor cahaya menggunakan penguat operasional derau rendah CA-251F4 dengan waktu *warming up* untuk mencapai kestabilan sekitar 100 menit yang memadai untuk digunakan sebagai ekstensometer optis dengan tingkat ketelitian 0.2 mm (sebagai perbandingan, tingkat ketelitian ekstensometer elektronik komersial ada yang nilainya berkisar antara 0.25 – 1.0 mm). Tingkat ketelitian yang hanya sebesar 0.2 mm ini dikarenakan pengukuran perubahan intensitas cahaya akibat rugi lengkungan yang dilakukan pada karakterisasi ini merupakan pengukuran dc (pengukuran arus searah) yang didominasi oleh derau $1/f$ (*1/f noise*). Untuk meningkatkan tingkat ketelitian hingga orde dibawah 0.1 mm perlu dilakukan teknik pengukuran lain (misalnya dengan menggunakan *lock-in amplifier*) sehingga dapat diperoleh ekstensometer yang kompetitif dengan yang lain namun memanfaatkan sifat inheren serat optik (kebal terhadap interferensi elektromagnetik dan jarak antara sensor dengan sistem elektroniknya dapat berjauhan).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Imam Mulyanto atas bantuan teknisnya dalam melaksanakan kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pollock, Clifford R., *Fundamental of Optoelectronics*, Chicago: Irwin, 1995.
2. -, "Wire Extensometer.", <http://www.geotechsystems.com.au/brochure/4015.PDF> (diakses 5 Februari 2010)
3. -, "Vibrating Wire Soil Extensometer.", http://www.soil.co.uk/files/soil/E7_VW%20Soil%20Extensometer.pdf (diakses 5 Februari 2010).
4. Hentschel, Christian. *Fiber Optics Handbook*. Hewlett-Packard GmbH, March 1989.
5. -, 'Laser Diode', Sanyo Catalogue 2008.
6. Lohead, G. "Photodiode amplifiers.", <http://massey.dur.ac.uk/gsl/Documents/Amplifiers.pdf> (diakses 8 Februari 2010).
7. Dutton, Harry J.R.. *Understanding Optical Communications*, 1st ed. IBM Corp., International Technical Support Organization, September 1998.
8. Waluyo, T. B., Dwi Bayuwati, Bambang Widiyatmoko. "Karakterisasi Rugi Lengkungan Serat Optik dengan Optical Time Domain Reflectometer untuk Penggunaannya sebagai Sensor Pergeseran Tanah.", *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, Vol. 9, No. 2 (2009): 34-42.
9. -, *Model LD2000APC Laser Diode Driver Operating Notes*, Doc. No. 0187-D01 Rev E, Thorlabs Inc.
10. -, "Low Noise FET Amplifier CA-251F4.", *Function Module Data Book*, NF Corp., 2005.
11. -, "High Accuracy Instrumentation Amplifier INA 101.", Burr-Brown, 2000.
12. -, "2 Channel Precision Oscilloscopes.", <http://www.picotech.com> (diakses 9 Maret 2010).
13. Wang, Q., et al. "Theoretical and Experimental Investigations of Macro-bend Losses for Standard Single Mode Fibers." *Optics Express*, Vol. 13, No. 12 (June 2005): 4476 – 4484.
14. -, "Techniques of Low Level Light Measurement." *Lasers & Applications* (July 1983): 41 – 45.
15. -, "Suggested Method for Monitoring Rock Movements Using Borehole Extensometers." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.* Vo. 15, Pergamon Press, (1978): 305 – 317.