MENGUAK RAHASIA FREKUENSI LASER MENGGUNAKAN SISIRAN FREKUENSI OPTIK SEBAGAI TONGGAK KOMUNIKASI SERAT OPTIK MODERN

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).
Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

MENGUAK RAHASIA FREKUENSI LASER MENGGUNAKAN SISIRAN FREKUENSI OPTIK SEBAGAI TONGGAK KOMUNIKASI SERAT OPTIK MODERN

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET ILMU FISIKA BIDANG OPTOELEKTRONIKA KEPAKARAN KOMUNIKASI SERAT OPTIK

OLEH:

BAMBANG WIDIYATMOKO

Penerbit BRIN

© 2026 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Fotonika - Organisasi Nanoteknologi dan Material

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Menguak Rahasia Frekuensi Laser Menggunakan Sisiran Frekuensi Optik Sebagai Tonggak Komunikasi Serat Optik Modern/Bambang Widiyatmoko-Jakarta: Penerbit BRIN, 2026.

xiv + 117 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1. Komunikasi serat optik
2. Frekuensi Laser
3. Pembangkit sisiran frekuensi optik
4. Standar frekuensi optik

621.38275

Copy editor : Meita Safitri
Proofreader : Meita Safitri
Penata Isi : Meita Safitri
Desainer Sampul : Meita Safitri

Edisi pertama : November 2026

Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS ix
PRAKATA PENGUKUHAN xiii

I. PENDAHULUAN 1

II. PERKEMBANGAN SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK SEBAGAI PENDUKUNG ERA DIGITAL 5
A. Perkembangan Sistem Komunikasi Serat Optik 5
B. Sistem Komunikasi Optik Modern 7
C. Pengukuran Frekuensi Laser untuk Menunjang Komunikasi Serat Optik Modern 10

III. PENGEMBANGAN PEMBANGKIT SISIRAN FREKUENSI OPTIK DAN STANDAR FREKUENSI OPTIK UNTUK PENGUKUR FREKUENSI LASER 17
A. Pembuatan Standar Frekuensi Optik (*Optical Frequency Standard*) 19
B. Pembangkit Sisiran Frekuensi Optik (*Optical Frequency Comb Generator*) 22
C. Realisasi Pencacah Frekuensi Optik berbasis Pembangkit Sisiran Frekuensi Optik 32

IV. POTENSI PEMBANGKIT SISIRAN FREKUENSI OPTIK UNTUK PENGEMBANGAN TEKNOLOGI BARU BIDANG OPTIK 37
A. Aplikasi Sisiran Frekuensi Optik sebagai Sumber Cahaya dalam Komunikasi Optik 37
B. Aplikasi Sisiran Frekuensi Optik dalam Spektroskopi Presisi .. 41
C. Pembangkitan *THz-wave* Mampu Tala Menggunakan Laser Dioda dan Sisiran Frekuensi Optik 43

V. KESIMPULAN 47

VI. PENUTUP 51

UCAPAN TERIMA KASIH 55
DAFTAR PUSTAKA 59
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI 67
DAFTAR RIWAYAT HIDUP 107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem komunikasi serat optik konvensional..... 6
Gambar 2.2 Pembagian frekuensi dalam komunikasi..... 8
Gambar 2.3 Sistem komunikasi serat optik berbasis teknik DWDM..... 9
Gambar 2.4 Blok diagram pengukuran panjang gelombang laser menggunakan *tunable filter*..... 14
Gambar 2.5 Prinsip pengukuran frekuensi laser..... 16
Gambar 3.1 Prinsip pencacah frekuensi optik menggunakan pembangkit sisiran frekuensi optik..... 18
Gambar 3.2 Blok diagram rangkaian laser standar (a) dan (b) contoh laser standar yang distabilkan menggunakan serapan jenuh (*saturated absorption*) dari *Acetylene*..... 21
Gambar 3.3 Proses pembangkitan sisiran frekuensi optik 23
Gambar 3.4 Foto proses perekayasaan pembuatan pembangkit sisiran frekuensi optik..... 25
Gambar 3.5 Produk OFCG yang telah dibuat dan contoh spektrum *sideband* yang terbangkit..... 26
Gambar 3.6 Perbandingan intensitas luaran dari harmonik kedua yang dibangkitkan dengan penyamaan fasa sempurna dan penyamaan fasa kuasi (*Quasi Phase Matching*) orde 1 dan orde 3 sebagai fungsi panjang kristal..... 31
Gambar 3.7 Foto Pencacah Frekuensi Optik *(optical frequency counter*) berbasis OFCG..... 33
Gambar 3.8 Pengamatan kestabilan frekuensi laser menggunakan pencacah frekuensi optik untuk laser *DFB free | running* (a) dan terstabilkan dengan absorpsi saturasi gas *Acethylene* (b) 34

Gambar 4.1 Usulan sistem komunikasi serat optik DWDM menggunakan *comb* sebagai sumber cahaya Implementasi sebagai *multiwavelength source* telah menjadi produk dengan menggabungkan sisiran frekuensi optik dan *wave guide DWDM coupler* seperti foto Gambar 4.2(a). Alat ini menyediakan 64 kanal dengan hanya menggunakan 1 laser. Spektrum Gambar 4.2(b) adalah hasil pemilahan setelah DWDM *coupler*, di mana kualitas sinyal masih lebih dari 30 dB sehinga masih baik untuk mewakili 1 kanal. 39

Gambar 4.2 *Multi wavelength source* berbasis *sisiran frekuensi optik* (a) dan spektrum *sideband* setelah dipisahkan DWDM *coupler* (b) (Widiyatmoko et al., 2004) 40

Gambar 4.3 Perkembangan kapasitas transmisi sistem komunikasi serat optik 40

Gambar 4.4 Skema spektrometer menggunakan 1 spektrum sisiran frekuensi optik 42

Gambar 4.5 Pembangkit *tunable mm/THz Wave* menggunakan laser dan *sideband comb* 45

BIODATA RINGKAS



Dr. Bambang Widiyatmoko, M, Eng. lahir di Boyolali tanggal 30 April 1962 merupakan anak ke 2 dari 6 bersaudara dari pasangan Bapak Alm. H. Tukiman Prapto Mulyono dan Ibu Hjh Sukasmi. Menikah dengan Almh. Arlina Prihharsanti dan dikaruniai 1 putra Erliansyah Widhi Putra dan 1 orang putri Hikarini Esti Pratiwi.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 9/M Tahun 2020, tanggal 13 Februari 2020, yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama dan Nomor 3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022 pada Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset Nomor 233/I/HK/2026, tanggal 5 Oktober 2026 yang bersangkutan dapat melaksanakan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Krasak tahun 1974, Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Teras tahun 1978, Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Boyolali tahun 1981. Memperoleh gelar sarjana muda B.Sc. tahun 1985 dan gelar sarjana Drs. tahun 1987 masing masing dari Jurusan Fisika Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Master of Engineering tahun 1995 dan Doctor of Engineering tahun 2000 dari Tokyo Institute of Technology, Jepang. Mengikuti beberapa pelatihan managerial

ADUM (1996), DIKLAT PIM III (2009) dan DIKLAT PIM II (2012) dan yang terkait dengan bidang kompetensinya antara lain Action Learning Project (ALP) tahun 2007, *drafting* paten tingkat dasar (2008) dan tingkat lanjut (2009).

Menduduki jabatan Struktural sebagai Kepala Laboratorium Jasa Listrik dan Elektronika P3FT-LIPI tahun 1995–1997, sebagai Kepala Bidang Instrumentasi Fisis dan Optoelektronika Pusat Penelitian Fisika (P2F)-LIPI tahun 2008–2012, Pelaksana Tugas Kepala P2F-LIPI tahun 2010–2012, Kepala Pusat P2F LIPI tahun 2012–2017 dan menjadi anggota Komisi Banding Paten, Kementerian Hukum tahun 2022–sekarang. Jabatan Fungsional peneliti dimulai dari ajun peneliti pertama tahun 1995, Peneliti muda tahun 2007, Peneliti Madya 2012 dan Peneliti Ahli Utama tahun 2020.

Menghasilkan 173 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk bagian buku, jurnal, dan prosiding, sebanyak 105 KTI ditulis dalam bahasa Inggris. Menghasilkan 3 hak cipta dan 66 paten, di mana 17 paten internasional dan 17 paten Indonesia telah *Granted*. Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing kerja praktek dan pembimbing skripsi mahasiswa S1 dari berbagai Universitas, antara lain USU, UNS, UGM, UI, UNDIP, UNSOED, UIN Jakarta, UIN Bandung, UIN Malang, UNUD, ITS, UNAIR, UNM, ISTN, UNRI, UNSRI, UNILA, UNES, UNAND, UNHAS, UNLAM, STT Telkom, Univ Telkom dan pembimbing thesis mahasiswa S-2 Universitas Indonesia, UNAND dan ITB. Reviewer berbagai kompetisi ilmiah dan pendanaan seperti RUT, Insinas, PPTI dari Kemenristek, RIIM BRIN, juri Habibie *Award/Price* dan juri di berbagai kompetisi ilmiah di kementerian lainnya. Sebagai inisiator dan Ketua

pembuatan Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) untuk teknisi jaringan serat optik.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota Himpunan Fisika Indonesia (HFI) dari 1992–2016, Ketua HFI tahun 2011–2014, Anggota Japan Applied Physics Society (1993–2006), anggota PPI (2014–sekarang), anggota Ikatan Ahli Bencana Indonesia (IABI) dari 2017–sekarang.

Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun (tahun 2001), XX Tahun (tahun 2008), dan XXX Tahun (tahun 2018) dari Presiden RI. Menerima Habibie Award Bidang Rekayasa tahun 2008, Adidarma Profesi Award dari Persatuan Insinyur Indonesia (PII) tahun 2010, WIPO Medal for Inventor dari Kemenkumham/WIPO tahun 2017. Hasil hasil penelitian yang dilakukan telah menghasilkan beberapa produk komersial baik di Jepang seperti Standar Frekuensi Optik, Pembangkit Sisiran Frekuensi Optik, Pencacah Frekuensi Optik, kontroler F-P Cavity maupun di Indonesia berupa Penghancur Jarum Suntik.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur kehadirat Alloh SWT., atas segala rahmat, nikmat, dan karuniaNya, sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset (*Research Professor*) di BRIN. Untuk itu, pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan penulis memohon doa restu dan kesempatan menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

"MENGUAK RAHASIA FREKUENSI LASER MENGGUNAKAN *SISIRAN FREKUENSI OPTIK* SEBAGAI TONGGAK KOMUNIKASI SERAT OPTIK MODERN"

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* pengembangan pembangkit sisiran fekuensi optik (*optical frequency comb generator)* dari kebutuhan sebagai alat di skala laboratorium sampai pada produk berupa pencacah frekuensi optik (*optical frequency counter)*. Teknologi ini sebagai penguak rahasia frekuensi laser yang selama ini besarannya menjadi misteri sekaligus menjadi tonggak perkembangan komunikasi

serat optik berbasis frekuensi dan sebagai pendorong berbagai teknologi pengukuran presisi di bidang optik.

Orasi ini diharapkan juga dapat memberikan pemahaman tentang peran sisiran frekuensi optik dalam pengembangan komunikasi serat optik dari sistem komunikasi klasik dengan kecepatan data transmisi dalam orde kbit/s sampai komunikasi serat optik modern berbasis frekuensi dengan kecepatan transmisi ratusan Tbit/s.

I. PENDAHULUAN

Dalam dua dekade terakhir, internet telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan masyarakat dunia tidak terkecuali di Indonesia. Awal penggunaannya, akses internet masih mengandalkan jaringan *dial-up* dengan kecepatan yang sangat terbatas dan biaya yang cukup tinggi. Memasuki era 2010-an, lonjakan penggunaan *smartphone* dan hadirnya jaringan 3G hingga 5G membawa perubahan besar. Internet tidak lagi hanya digunakan untuk mencari informasi, tetapi juga untuk berkomunikasi, bekerja, berbelanja, hingga hiburan. Munculnya media sosial seperti *Facebook, Instagram*, dan *YouTube* turut mempercepat pertumbuhan jumlah pengguna internet di tanah air.

Menurut data Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (APJII), jumlah pengguna internet di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya. Jika pada tahun 2010 jumlah pengguna baru mencapai sekitar 42 juta, maka pada tahun 2025 jumlah tersebut telah melampaui 229 juta pengguna, atau sekitar 80,66% dari total penduduk Indonesia (APJII, 2025)

Perkembangan pesat pemakaian internet di Indonesia tidak terlepas dari kemajuan teknologi komunikasi, terutama hadirnya jaringan komunikasi serat optik. Serat optik bekerja dengan mentransmisikan data menggunakan cahaya melalui serat kaca atau plastik yang sangat halus. Teknologi ini memungkinkan kecepatan transfer data yang jauh lebih tinggi dan jangkauan yang lebih luas dibandingkan kabel konvensional. Jaringan serat optik menjadi jalur utama yang menghubungkan pusat-pusat data, penyedia layanan internet (ISP), dan jaringan pengguna

di seluruh wilayah Indonesia. Saat ini, pemerintah bersama penyedia layanan telekomunikasi kemudian memperluas infrastruktur serat optik, seperti melalui mega proyek Palapa Ring, yang bertujuan untuk menghubungkan koneksi internet di seluruh wilayah Indonesia dari barat hingga timur melalui jaringan serat optik nasional. Kehadiran jaringan ini menjadikan koneksi internet lebih cepat, stabil, dan terjangkau, bahkan sampai di daerah terpencil. Hasilnya, komunikasi digital semakin lancar dan efisien. Aktivitas seperti *video conference, streaming, e-learning*, hingga transaksi digital dapat dilakukan tanpa hambatan berarti. Serat optik menjadi jembatan yang menghubungkan masyarakat Indonesia dengan dunia global, membuka peluang ekonomi baru, dan mempercepat transformasi menuju masyarakat digital.

Di Indonesia, perkembangan komunikasi serat optik dimulai dari ranah penelitian berupa komunikasi parsial seperti komunikasi audio dan video (Widiyatmoko et al., 1988, 1998) dengan kapasitas transmisi dalam orde *kbit/s*. Dari pengembangan teknologinya, saat ini komunikasi serat optik telah berkembang pesat yang memungkinkan untuk mentransmisikan data dengan orde puluhan bahkan ratusan *Gbit/s* (Agrell et al., 2024; Nakamura et al., 2022). Peningkatan kapasitas transmisi ini karena adanya temuan-temuan baru pada komponen pendukung dan teknologi jaringan dengan sistem *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), di mana dalam satu inti (*core*) serat optik dilalui ratusan cahaya laser dengan panjang gelombang yang berbeda (Okamoto & Sato, 1993). Dalam sistem komunikasi DWDM, stabilitas frekuensi laser sebagai pembawa informasi dan jarak antara dua frekuensi laser harus benar benar stabil dan terukur. Sebagai contoh, di dalam *International Telecommunication Union* (ITU) merekomendasikan frekuensi standar adalah 193,1 THz dan jarak antar kanal selebar 25 GHz, sehingga diperlukan

alat ukur frekuensi optik yang mampu membedakan frekuensi dua laser atau dua kanal lebih kecil dari jarak antar kanal tersebut.

Di tahun 90-an, frekuensi laser masih menjadi besaran yang misterius dan tidak bisa diukur secara langsung karena frekuensi laser yang digunakan untuk komunikasi sebesar 200 THz atau 2000 miliar getaran per sekon. Pengukuran frekuensi laser masih dilakukan secara tidak langsung dengan menggunakan perantara *wavelength meter* maupun *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) dengan keterbatasan resolusi hanya mencapai 0,01 nm atau dalam orde puluhan GHz sehingga bisa dikatakan kurang presisi bila digunakan untuk mengukur beda frekuensi 2 laser dalam jarak 25 GHz.

Teknik terbaru pengukuran frekuensi laser secara langsung adalah dengan menggunakan Pencacah Frekuensi Optik berbasis pembangkit sisiran frekuensi optik *(Optical Frequency Comb Generator = OFCG)* (Kourogi et al., 2007; Widiyatmoko, 2008; Widiyatmoko, Imai, et al., 2007b; Widiyatmoko, Nakayama, et al., 2006). Pembangkit sisiran frekuensi optik merupakan alat yang dapat membangkitkan ribuan *sideband* dari laser inputnya, di mana kestabilannya sama dengan kestabilan frekuensi laser inputnya atau frekuensi standar yang dipakai. Untuk mempermudah pemahaman dapat dianalogikan dengan meteran, di mana frekuensi standar sebagai titik nol dan *sideband-sideband* yang terbangkit seperti guratan milimeter atau centimeter. Dengan demikian, semua frekuensi laser yang berada dalam jangkauan atau *span* dari sisiran frekuensi optik dapat diukur dengan mudah dan akurat.

Pembuatan Pencacah Frekuensi Optik, berbasis OFCG untuk menguak misteri frekuensi laser yang di dalamnya terkait bagaimana membuat frekuensi standar, pembuatan OFCG dan implementasi sistem pengukuran frekuensi laser sebagai

tonggak komunikasi serat optik modern, sebagai kontribusi ilmiah penulis akan dibahas dalam Bab II sampai dengan Bab V, kesimpulan dan penutup.

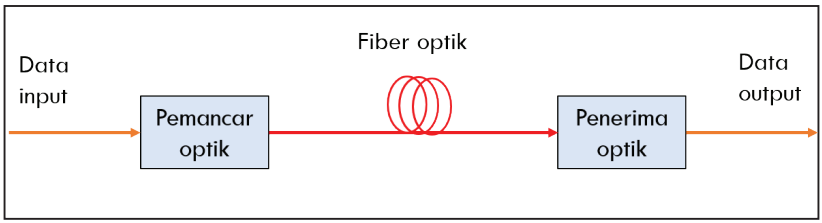
II. PERKEMBANGAN SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK SEBAGAI PENDUKUNG ERA DIGITAL

Teknologi komunikasi telah mengalami lompatan besar sejak ditemukannya serat optik sebagai media transmisi data berkecepatan tinggi. Serat optik merupakan kabel yang terbuat dari serat kaca atau plastik sangat halus sebesar rambut, yang mampu menyalurkan sinyal cahaya dari satu titik ke titik lainnya dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Teknologi ini menjadi tulang punggung jaringan komunikasi saat ini, menggantikan sistem berbasis tembaga yang memiliki keterbatasan dalam kecepatan dan jarak transmisi. Keunggulan serat optik antara lain rugi-rugi (loss) transmisi per kilometernya hanya 1/10.000 dibanding kabel tembaga dengan kecepatan transmisinya mencapai orde ratusan TBit/s. Temuan komponen-komponen pendukung utama seperti laser diode yang bentuknya sangat kecil, dapat diproduksi masal, murah, mudah dimodulasi; teknologi fotodetektor dengan respon yang cepat dan serat optik dengan rugi-rugi transmisi sangat rendah menjadikan komunikasi serat optik berkembang sangat pesat.

A. Perkembangan Sistem Komunikasi Serat Optik

Di awal perkembangannya, komunikasi serat optik dimulai dengan sistem satu arah atau satu inti serat dilalui satu panjang gelombang untuk mentransmisikan data dalam orde kbit/s dengan cara memodulasi langsung laser diode (pemancar optik), mentransmisikan melalui serat optik dan diterima oleh fotodetektor (penerima optik) seperti yang ditunjukkan Gambar 2.1.

Beberapa permasalahan yang muncul di awal pengembangan antara lain keterbatasan kecepatan modulasi data ke laser diode, rugi-rugi transmisi serat optik yang masih tinggi dikarenakan kurangnya tingkat kemurnian kaca silika, rendahnya kecepatan respon dari fotodetektor dan masalah teknis lainnya seperti penyambungan serat optik. Para peneliti terus melakukan penelitian untuk memperbaiki kelemahan-kelemahan masing masing komponen tersebut.



Sumber: Widiyatmoko et al.(1988)

Gambar 2.1 Sistem komunikasi serat optik konvensional

Sistem komunikasi serat optik terus berkembang dengan pengembangan komponen pendukung. Pada sisi pemancar optik, untuk mengatasi keterbatasan kecepatan modulasi langsung ke laser diode dilakukan dengan modulasi external menggunakan kristal *electro-optics modulator* yang mampu memodulasikan data sampai 40 Gbit/s. Demikian juga pada sisi penerima, saat ini respon fotodetektor telah mencapai 60 GHz.

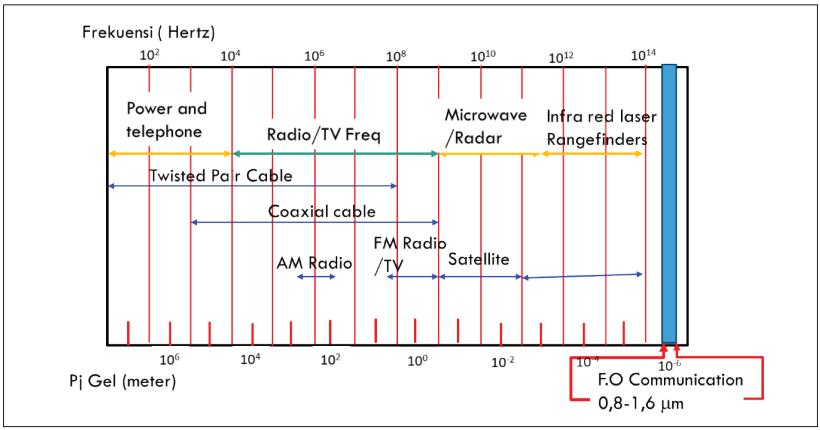
Selain itu, ditemukannya amplifier optik (*optical amplifier*), seperti *Erbium-Doped Fiber Amplifier* (EDFA), membuat sinyal cahaya dapat diperkuat tanpa perlu diubah kembali menjadi sinyal listrik. Hal ini memperpanjang jangkauan transmisi hingga ribuan kilometer, menghubungkan benua melalui jaringan kabel laut (*submarine fiber cable*) yang menjadi tulang punggung internet global.

B. Sistem Komunikasi Optik Modern

Kapasitas serat optik untuk mentransmisikan cahaya secara teori tidak terbatas artinya semua panjang gelombang atau semua warna cahaya bisa ditransmisikan walaupun selama penjalaran ada perbedaan rugi-rugi untuk setiap panjang gelombang. Konsep inilah yang secara nyata digunakan untuk memperbesar kapasitas transmisi serat optik, di mana dalam satu inti serat bisa dilewati ratusan cahaya laser dengan panjang gelombang berbeda dan masing masing laser membawa kanal informasi. Sistem ini dikenal dengan sistem *Wavelength Demultiplexing Multiplexing* (WDM) yaitu dengan melewatkan beberapa cahaya laser atau beberapa kanal dalam satu serat. Di awal implementasi satu serat dilewati 8 atau 16 kanal laser saja dengan jarak antar kanal 10 nm-20 nm atau yang dikenal dengan *Coarse WDM* (CWDM). Dengan sistem ini dapat meningkatkan kapasitas transmisinya 16 kali lipat dibanding sistem konvensional.

Memasuki abad ke-21, komunikasi serat optik berkembang jauh dengan adanya teknologi *Dense WDM* (DWDM), yang memungkinkan satu inti serat membawa ratusan kanal berbeda secara bersamaan melalui berbagai panjang gelombang cahaya. Data terbaru, dalam 1 serat dapat dilewati 1505 panjang gelombang (Puttnam et al., 2024). Inovasi ini membuat kapasitas jaringan meningkat ribuan kali lipat tanpa perlu menambah jumlah kabel. Dalam teknologi komunikasi bisa dikatakan bahwa teknologi komunikasi serat optik DWDM bukan lagi berbasis panjang gelombang, namun berbasis frekuensi laser dikarenakan jarak antar kanal sudah semakin sempit. Kalau dilihat dari domain frekuensi dalam komunikasi, posisi frekuensi serat optik seperti tergambarkan dalam Gambar 2.2, di mana sumbu x bagian bawah adalah domain panjang gelombang (meter), sedang sumbu x di bagian atas adalah frekuensi (Hz). Pada frekuensi rendah, dimulai dengan komunikasi radio dengan modulasi

amplitudo (AM) menggunakan frekuensi dalam orde 10 KHz atau panjang gelombang 100 m sampai 1000 m dan berkisar 100 MHz atau panjang gelombang 1 meter-an untuk radio berbasis modulasi frekuensi (FM) dan Televisi. Komunikasi *handphone* bisanya menggunakan 2,4 GHz atau panjang gelombang 10 cm, komunikasi berbasis gelombang mikro (*microwave*) menggunakan frekuensi sekitar 10 GHz atau panjang gelombang 1 cm, sedangkan komunikasi serat optik menggunakan frekuensi 193 THz sampai 380 THz atau daerah panjang gelombang 0,8 –1,6 μm seperti terlihat pada Gambar 2.2.



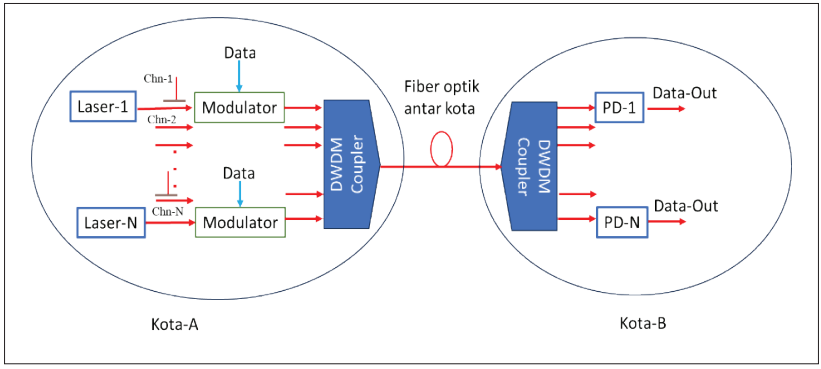
Sumber: Keiser (2003)

Gambar 2.2 Pembagian frekuensi dalam komunikasi

Artinya, frekuensi yang digunakan dalam komunikasi serat optik 1 juta kali lebih tinggi dibanding frekuensi yang digunakan pada komunikasi *handphone*. Seperti diketahui bahwa dalam sistem komunikasi, semakin tinggi frekuensi pembawa maka kapasitas data yang ditransmisikan juga semakin tinggi.

Komunikasi serat optik modern lebih mudah untuk diimplementasikan berbasis sebutan frekuensi dari pada panjang

gelombang seperti halnya dengan sistem komunikasi yang lain. Secara umum, sistem komunikasi serat optik berbasis teknologi DWDM digambarkan dalam blok diagram Gambar 2.3. Sebagai contoh seperti dalam Gambar 2.3, sistem komunikasi DWDM antar kota di mana kota A sebagai pengirim data dan kota B sebagai penerima data atau sebaliknya, maka dalam ruang kontrol di kota A, ada laser 1 sampai laser *N* yang masing-masing mewakili 1 kanal, di mana secara teori nilai *N* tidak terbatas. Masing masing laser dimodulasi sebelum disatukan menjadi satu inti yang kemudian ditransmisikan melalui jaringan serat optik antar kota. Pada kota B terjadi proses sebaliknya, yaitu luaran dari serat optik dibagi menjadi *N* bagian sesuai dengan alokasi frekuensi yang ditentukan. Kemudian terjadi proses demodulasi dari sinyal optik (cahaya laser) menjadi data elektronik seperti semula menggunakan fotodetektor (PD). Data-data elektronik dalam bentuk digital ini kemudian diproses lebih lanjut menjadi data-data yang disalurkan ke pengguna. Dari sisi teknis, jumlah laser yang bisa mencapai ribuan, dalam sistem ini menurut *International Telecommunication Union* (ITU) jarak antar kanal bisa hanya 25 GHz atau 0,02 nm.



Gambar 2.3 Sistem komunikasi serat optik berbasis teknik DWDM

Untuk mengimplementasikan teknologi ini bukan saja diperlukan laser dengan kestabilan tinggi, namun diperlukan laser dengan frekuensi yang akurat, terukur dan dengan jarak antar kanal yang pasti. Untuk itulah diperlukan alat yang dapat secara langsung mengukur frekuensi laser sehingga akan memudahkan dalam pencocokan frekuensi di masing masing kanal.

C. Pengukuran Frekuensi Laser untuk Menunjang Komunikasi Serat Optik Modern

Laser pada dasarnya menghasilkan gelombang elektromagnetik, sama seperti gelombang radio (*radio wave*) maupun gelombang mikro (*microwave*). Karena itu, laser juga memiliki sifat-sifat seperti frekuensi (seberapa cepat gelombang bergetar), amplitudo (seberapa kuat gelombang), dan fase (posisi gelombang pada suatu waktu). Kekuatan atau intensitas cahaya laser dapat diukur dengan alat khusus yang disebut *laser power meter*, namun, mengukur frekuensi laser jauh lebih sulit. Hal ini karena frekuensi laser sangat tinggi mencapai ratusan *Terahertz* (THz), atau ribuan miliar getaran per sekon. Sampai akhir tahun 1990-an, belum ada alat yang bisa langsung mengukur frekuensi laser tersebut. Ada dua metode pengukuran frekuensi laser yaitu pengukuran tidak langsung dan pengukuran langsung, yang terus dikembangkan oleh para peneliti.

1. Pengukuran Frekuensi Laser secara Tidak Langsung

Pengukuran frekuensi laser tidak langsung artinya frekuensi yang didapat bukan merupakan hasil langsung dari pengukuran, namun dari hasil konversi menggunakan rumus yang umum digunakan. Beberapa teknik pengukuran ini telah lama berkembang dan digunakan secara umum melalui produk-produk komersial.

a. Pengukuran Frekuensi Laser berbasis Interferometer

Secara sederhana, interferometer adalah alat atau teknik yang digunakan untuk menggabungkan dua berkas cahaya agar menghasilkan pola terang dan gelap yang disebut pola interferensi. Pola ini muncul karena dua cahaya saling berinteraksi (Paris, 1998) ada bagian yang saling menguatkan (menjadi terang) dan ada yang saling melemahkan (menjadi gelap). Pola interferensi ini menyimpan informasi penting tentang objek atau fenomena yang sedang diteliti. Perbedaan pola tersebut muncul karena ada perbedaan fase antara dua cahaya yang digabungkan, artinya salah satu gelombang cahaya sedikit "terlambat" atau "tergeser" dibandingkan yang lain. Melalui pola ini dapat dipelajari berbagai sifat fisik, seperti bentuk permukaan, jarak, atau perubahan kecil dalam suatu sistem.

Pada umumnya untuk mengukur panjang gelombang laser, para peneliti biasanya menggunakan alat yang disebut *Interferometer Michelson*. Cara kerjanya cukup *simple* dan menarik yaitu sinar laser yang akan diukur dibagi menjadi dua arah atau dua lengan. Satu lengan berfungsi sebagai pembanding (referensi), sedangkan lengan lainnya digerakkan maju-mundur untuk menghasilkan pola terang-gelap (pola interferensi).

Pada saat yang sama, proses serupa juga dilakukan untuk laser pembanding (laser referensi), yaitu laser dengan panjang gelombang yang sudah diketahui dan memiliki nilai yang hampir sama dengan laser yang diukur. Sensor cahaya (fotodetektor) mencatat perubahan intensitas cahaya (terang-gelap) saat panjang salah satu lengan diubah. Dari pola tersebut, komputer atau mikroprosesor menganalisis dan membandingkan hasil kedua laser untuk menentukan panjang gelombang laser yang diukur relatif terhadap laser referensi.

Akurasi hasil pengukuran ini bergantung pada seberapa halus gerakan lengan interferometer saat melakukan pemindaian

(*scanning)*. Semakin kecil langkah gerakannya, semakin akurat hasilnya. Namun, alat ini juga memiliki batas kemampuan, karena hasil pengukurannya dipengaruhi oleh panjang gelombang laser referensi yang digunakan dan ketelitian pergerakan lengan interferometer. Pengukuran frekuensi dengan cara ini disebut pengukuran tidak langsung karena yang diukur adalah panjang gelombang laser yang kemudian baru dikonversi ke frekuensi.

b. Pengukuran Frekuensi Laser berbasis Teknik Difraksi

Metode pengukuran frekuensi laser berbasis defraksi (Hecht, 2002) pada dasarnya juga termasuk pengukuran tidak langsung. Teknik ini banyak digunakan dalam alat yang disebut *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) suatu alat yang berfungsi untuk menganalisis warna atau spektrum cahaya laser.

Prinsip dasarnya mirip dengan cara cahaya putih diuraikan menjadi warna pelangi oleh prisma, tetapi dalam metode ini digunakan alat yang disebut kisi difraksi (*diffraction grating*). Kisi ini memiliki banyak garis halus yang sangat rapat, dan ketika cahaya laser mengenainya, sinar tersebut akan terbelok (terdifraksi) pada sudut tertentu tergantung panjang gelombangnya.

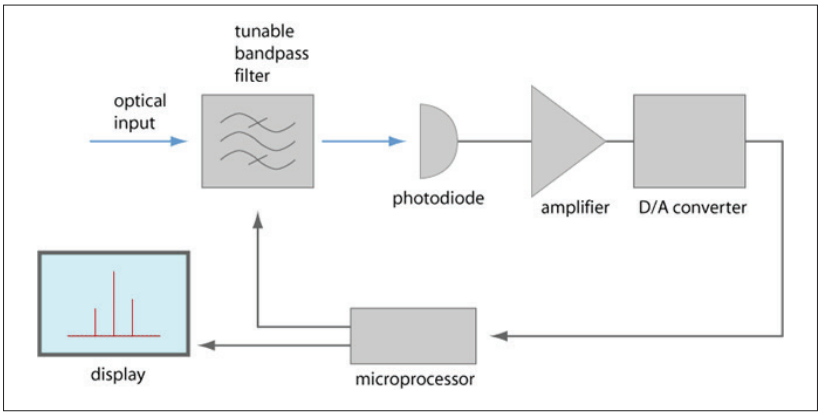
Secara sederhana, semakin panjang gelombang laser, semakin besar sudut pembelokannya. Dalam prakteknya, sinar laser yang terbelok akan jatuh ke posisi tertentu dan posisi inilah yang kemudian dibaca oleh jajaran sensor cahaya (*photodetector array*) untuk menentukan panjang gelombang laser terukur. Selain mengukur panjang gelombang, teknik difraksi ini juga bisa menunjukkan seberapa kuat daya laser pada tiap panjang gelombang, sehingga dapat menampilkan profil spektrum laser secara lengkap.

Namun, tingkat ketelitiannya masih terbatas, tergantung seberapa rapat sensor cahaya yang digunakan atau seberapa halus sudut kisi bisa diputar. Secara umum, metode ini mampu mencapai ketelitian sekitar 0,01 nanometer (nm), atau setara dengan 25 Gigahertz (GHz) pada panjang gelombang 1550 nm.

c. Pengukuran Frekuensi Laser dengan Filter Mampu Tala

Teknik pengukuran panjang gelombang yang lebih sederhana adalah menggunakan filter mampu tala (*tunable filter*), di mana puncak resonansi filter ini dapat ditala (*tune*) dengan memberi tegangan DC ke filter tersebut (Suriamah et al., 2006; Widiyatmoko, et al., 2007). Secara umum, prinsip pengukurannya seperti pada Gambar 2.4. Cahaya terukur dimasukkan ke dalam filter dan luaran filter ditangkap oleh fotodetektor. Luaran dari fotodetektor perlu dikuatkan menggunakan *trans-impedance amplifier* agar tegangannya bisa langsung dibaca oleh mikroprosesor setelah dikonversikan ke dalam nilai digital oleh pengubah tegangan analog ke digital (ADC). Selanjutnya, frekuensi resonansi dari filter ditala dengan memberi tegangan DC ke filter mampu tala dan dikontrol oleh mikroprosesor. Pada saat sapuan tegangan dikenakan ke filter mampu tala, maka frekuensi resonansinya akan berubah secara linier terhadap tegangan yang diberikan. Apabila frekuensi laser terukur tidak bersesuaian dengan resonansi filter, maka tegangan luaran fotodetektor akan nol atau kecil, namun bila bersesuaian maka tegangan luarannya akan maksimum. Dengan mengetahui karakteristik puncak panjang gelombang filter terhadap tegangan yang diberikan, maka panjang gelombang laser dapat diketahui dan selanjutnya dapat dikonversi ke frekuensi laser. metode ini masih sekitar 0,1 nanometer (nm). Meskipun begitu, teknik

ini tetap sangat menarik untuk dikembangkan karena lebih sederhana dan murah.



Sumber: Widiyatmoko et al. (2007)

Gambar 2.4 Blok diagram pengukuran panjang gelombang laser menggunakan *tunable filter*

2. Pengukuran Frekuensi secara Langsung

Pengukuran frekuensi laser secara langsung artinya frekuensi laser dapat secara langsung diukur oleh pencacah frekuensi elektronik dengan teknik atau metode tertentu yaitu dengan melakukan beberapa tahapan penurunan frekuensi laser. Metode pengukuran ini disebut teknik pembagian frekuensi bertahap (*Frequency Divider Stage*) (Udem et al., 1998). Namun, cara ini tergolong rumit karena memerlukan serangkaian langkah teknis yang panjang dan presisi tinggi yang disebut rantai frekuensi (*frequency chain*).

Secara sederhana, proses dimulai dengan menggunakan laser acuan (*laser standard*), yaitu laser dengan frekuensi yang sudah diketahui dan ditetapkan secara internasional sebagai patokan.

Frekuensi laser lain yang akan diukur kemudian "disesuaikan" atau "didekatkan" ke frekuensi laser standar tersebut melalui berbagai proses optik nonlinier, seperti: *Second Harmonic Generation* (SHG) yaitu menggandakan frekuensi cahaya (Widiyatmoko, et al., 1999; Widiyatmoko & Yunaningsih, 2004), *Difference Frequency Generation* (DFG) yang menghasilkan frekuensi baru dari selisih dua frekuensi, *Optical Parametric Oscillation* (OPO) yaitu mengubah frekuensi dengan bantuan kristal optik non-linier, (Wong, 1990) dan *Sum Frequency Generation* (SFG) yaitu proses menjumlahkan dua frekuensi cahaya untuk menghasilkan frekuensi baru atau membangkitkan sisiran frekuensi optik baru dari laser dengan sisiran frekuensi optik dasar (Widiyatmoko et al., 2001).

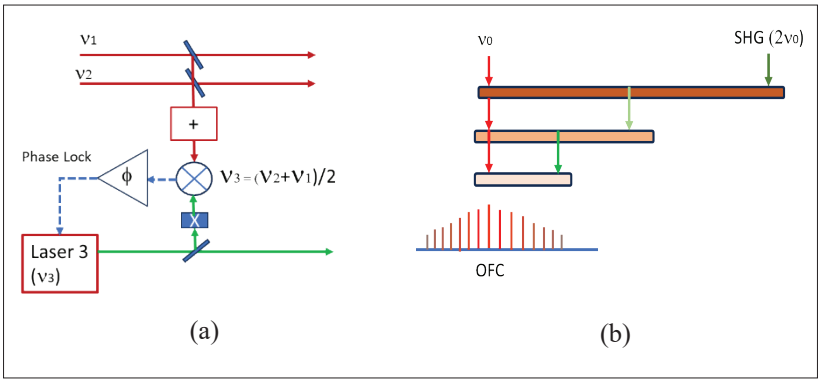
Dengan mengatur proses-proses ini, frekuensi laser yang diukur dapat dibandingkan secara langsung dengan laser standar, sehingga nilainya bisa diketahui dengan ketelitian tinggi, bahkan mencapai tingkat kesalahan hanya sekitar 1 per 10^{-14} atau setara dengan akurasi hingga satu kilohertz (KHz).

Namun, kelemahan metode ini adalah kompleksitas dan biayanya yang sangat tinggi. Teknik ini membutuhkan beberapa laser berdaya tinggi serta kristal optik non linier khusus yang sulit didesain dan dibuat dengan tepat.

Untuk menyederhanakan proses tersebut, para ilmuwan kemudian mengembangkan alat bernama pembangkit sisiran frekuensi optik. Alat ini mampu membangkitkan sisiran frekuensi optik berfungsi seperti "penggaris frekuensi" yang sangat halus, sehingga mengurangi jumlah langkah pembagian frekuensi yang diperlukan dalam teknik pembagian berjenjang (*divider stage*) seperti Gambar 2.5.

Teknik ini merupakan salah satu kemajuan besar dalam bidang metrologi optik khususnya untuk membantu implementasi

komunikasi serat optik berbasis frekuensi. Penelitian dan pengembangan lebih lanjut tentang sisiran frekuensi optik dan penerapannya merupakan konstribusi utama dari penulis yang akan dijelaskan secara lebih mendalam pada Bab III.



Keterangan: (a) Berbasis pembagi frekuensi; (b) Berbasis gabungan dengan Sisiran Frekuensi Optik

Sumber: (a) Hall, J.L. (2006); (b) Widiyatmoko et al. (2007)

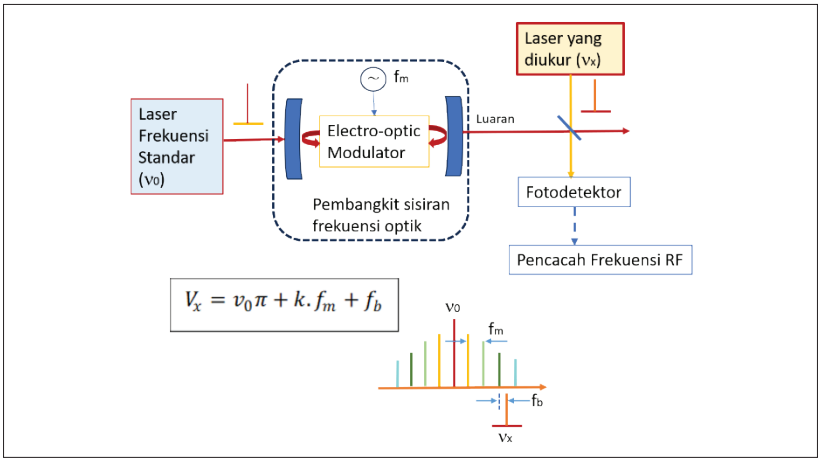
Gambar 2.5 Prinsip pengukuran frekuensi laser

III. PENGEMBANGAN PEMBANGKIT SISIRAN FREKUENSI OPTIK DAN STANDAR FREKUENSI OPTIK UNTUK PENGUKUR FREKUENSI LASER

Laser mempunyai sifat yang unik yaitu mempunyai energi foton, cahaya yang dihasilkan mempunyai koherensi tinggi, dan merupakan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi yang tinggi. Banyak aplikasi baru yang muncul dengan memanfaatkan tingginya frekuensi laser ini seperti dalam komunikasi serat optik berbasis DWDM. Dalam pemakaian laser berbasis frekuensi ini, nilai frekuensinya harus diketahui dengan pasti dan tertelusur. Alat pengukur frekuensi laser secara langsung telah diimplementasikan dengan menggunakan pencacah frekuensi optik berbasis pembangkit sisiran frekuensi optik (Widiyatmoko et al., 2001; Widiyatmoko, et al., 1999; Widiyatmoko, et al., 2007; Widiyatmoko, et al., 2007; Widiyatmoko, 2004). Blok diagram dari pengukur frekuensi laser berbasis sisiran frekuensi optik seperti terlihat dalam blok diagram Gambar 3.1. Ada 4 komponen utama dalam teknik pengukuran ini yaitu standar frekuensi optik, pembangkit sisiran frekuensi optik, fotodetektor dan sistem baca frekuensi.

Standar frekuensi optik dibuat dengan teknik stabilisasi menggunakan serapan dari gas tertentu. Frekuensi laser ini kemudian diukur nilai absolutnya dan ditetapkan sebagai frekuensi standar (ν_o) di sekitar panjang gelombang tersebut.

Dari laser frekuensi standar ini kemudian dibangkitkan sisiran frekuensi optik menggunakan pembangkit sisiran frekuensi optik. Analogi sederhananya adalah standar frekuensi optik sebagai titik “nol” pada meteran, sedang sisiran frekuensi optik dianalogikan dengan pembagi berupa garis-garis kecil dalam ukuran milimeter.



Sumber: Widiyatmoko et al. (2007)

Gambar 3.1 Prinsip pencacah frekuensi optik menggunakan pembangkit sisiran frekuensi optik

Dengan demikian maka di manapun keberadaan frekuensi laser yang akan diukur (ν_x) dapat dihitung dengan pasti sepanjang berada dalam range penggaris atau bersesuaian dengan jangkauan (*span*) dari sisiran frekuensi optik yang terbangkit. Dengan prinsip ini maka frekuensi laser yang diukur dapat dihitung dengan Rumus (1).

$$\nu_x = \nu_0 + k.f_m + f_b \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

di mana f_m adalah frekuensi modulasi pada pembangkit sisiran frekkuensi optik atau jarak antar *sideband*, k adalah orde *sideband* yang bersesuaian dan f_b merupakan frekuensi layangan (*beat frequency*) antara laser terukur dengan *sideband* dari sisiran frekuensi optik terdekat. Dalam hal ini jangkauan frekuensi laser yang dapat diukur tergantung jumlah nilai k atau jangkauan dari sisiran frekuensi optik. Komponen ke 3 berupa fotodetektor dan

ke 4 berupa sistem pembaca, di mana komponen ini secara prinsip telah diketahui dan tersedia di pasaran. Pembuatan pencacah frekuensi optik diawali dengan pembuatan standar frekuensi optik, pembangkit sisiran frekuensi optik dan penggabungan menjadi satu sistem seperti dijelaskan pada sub-bab berikut.

A. Pembuatan Standar Frekuensi Optik (*Optical Frequency Standard*)

Telah dijelaskan bahwa pengukuran frekuensi osilasi laser atau frekuensi laser diperlukan komponen berupa laser frekuensi standar. Laser frekuensi standar juga sangat diperlukan dalam beberapa aplikasi metrologi, misalnya dalam kalibrasi peralatan optik maupun dalam komunikasi serat optik. Perkembangan sistem komunikasi serat optik telah menuju ke sistem DWDM, di mana dalam 1 inti serat dilewati ratusan frekuensi cahaya (panjang gelombang cahaya) dengan jarak tertentu. Jarak antar channel menurut *International Telecommunication Union (ITU)* adalah 100 GHz, 50 GHz dan bahkan 25 GHz (Ishio et al., 1984; Murthy & Mohan, 2001). Jarak ini sangat sempit bila dibanding frekuensi laser yang dipakai yaitu 200.000 GHz atau 200 THz. Untuk menjamin seluruh sistem sinkron dan menjamin tidak ada interferensi antar kanal maka diperlukan frekuensi standar untuk acuan penentuan frekuensi masing-masing kanal.

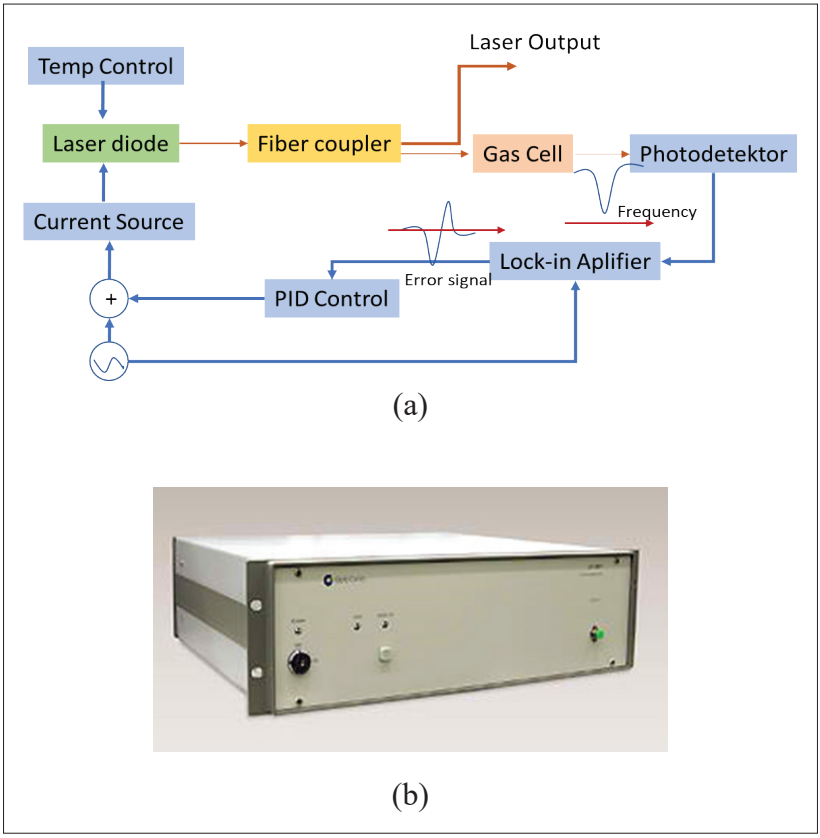
Prinsip pembuatan frekuensi standar atau frekuensi acuan seperti dalam Gambar 3.2.a, di mana luaran cahaya laser yang telah distabilkan frekuensinya menggunakan teknik umpan balik elektronik baik untuk suhu operasi laser maupun sumber arusnya (Agrell et al., 2024; Widiyatmoko et al., 2006), dibagi menjadi 2 bagian menggunakan kopler serat optik (*fiber coupler*) dengan perbandingan tertentu disesuaikan dengan daya laser yang digunakan. Satu bagian sebagai luaran (output) yang seterusnya digunakan lebih lanjut untuk keperluan sumber cahaya dan

sebagian lagi dilewatkan pada gas tertentu misalkan *Acetylene* (De Labachelerie et al., 1994, 1995; Onae, Widiyatmoko et al., 1999) maupun *Methane* (Ishibashi et al., 1999, 2000) sesuai dengan frekuensi yang diinginkan. Daya yang diperlukan untuk memperoleh garis serapan dari gas rata-rata sekitar 1 miliwatt untuk serapan linier, namun untuk mendapat absorpsi saturasinya memerlukan daya laser dalam order 50 milliwatt (Widiyatmoko, Mizawa, et al., 2006).

Gas yang digunakan ini akan menyerap daya laser bila frekuensi laser sama dengan garis serapan dari gas tersebut. Secara teknis, untuk melihat spektrum serapan gas maka frekuensi laser harus ditala di sekitar garis serapan *gas cell*. Saat sapuan frekuensi laser dilakukan, garis absorpsi gas ini dapat dilihat dari luaran fotodetektor menggunakan osiloskop.

Selanjutnya sinyal ini diekstrak oleh *Lock-In Amplifier* untuk menghasilkan sinyal kesalahan fase (*phase error signal)*. Sinyal kesalahan fasa digunakan untuk mengunci frekuensi laser ke garis serapan gas dengan bantuan rangkaian elektronik berupa sistem kontrol *Proporsional Integral Differential* (PID). Dalam hal penggunaan gas *acetylene* sebagai acuan, ada 2 teknik yang digunakan yaitu dengan *linear absorption* dan *saturated absorption* (Moon & Lee, 2004; Onae et al., 2000). Teknik *Linear absorption* lebih mudah direalisasikan dibanding teknik *saturated absorption* karena hanya memerlukan laser daya rendah. Untuk mengevaluasi kestabilan dari laser yang telah terstabilkan dilakukan pengukuran fluktuasi frekuensi laser dalam jangka waktu yang lama dengan mengukur frekuensi pelayangan (*beat frequency)* dari 2 laser yang distabilkan dengan metoda yang sama. Metoda lain adalah dengan mengukur langsung fluktuasi frekuensi menggunakan pencacah frekuensi optik. Dari hasil pengukuran diperoleh kestabilan frekuensi dari laser terstabilkan dengan absorsi linier berkisar antara 10^{-8} hingga

10^{-9}, sedangkan dengan *saturated absorption* bisa mencapai 10^{-11} hingga 10^{-14} atau dalam orde kHz (Widiyatmoko, 2008). Gambar 3.2 (b) adalah foto produk laser frekuensi standar yang dibuat berdasarkan *saturated absorption as Acetylene.*



Sumber: (a) Onae et al. (1999); (b) foto dokumen pribadi

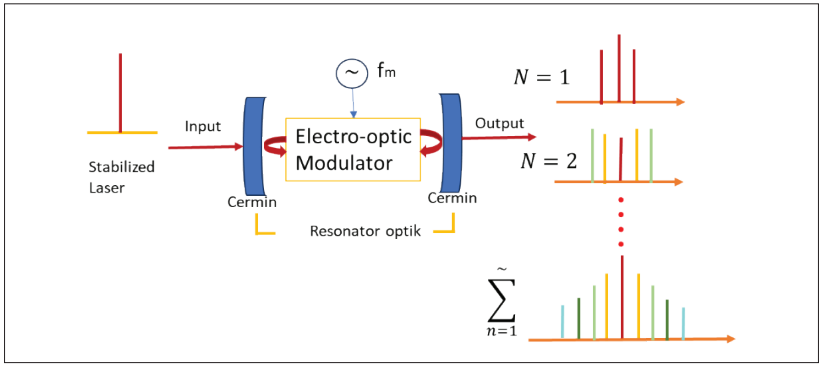
Gambar 3.2 Blok diagram rangkaian laser standar (a) dan (b) contoh laser standar yang distabilkan menggunakan serapan jenuh (*saturated absorption*) dari *Acetylene*

B. Pembangkit Sisiran Frekuensi Optik (*Optical Frequency Comb Generator*)

Salah satu komponen utama dalam realisasi pencacah frekuensi optik adalah sisiran frekuensi optik di mana salah satunya dibangkitkan menggunakan pembangkit sisiran frekuensi optik berbasis elektro-optik modulator (Kourogi, et.el. 1995, K.Imai et.al. 2000, Widiyatmoko et.al 1999, Widiyatmoko et al., 2001, 2005; Widiyatmoko, Imai, et al., 1999; Widiyatmoko, et.al., 2006, Widiyatmoko, et al., 2007). Dalam bahasa mudahnya, pembangkit sisiran frekuensi optik adalah suatu alat untuk membangkitkan ribuan *sideband* atau laser baru turunan dari laser input (laser standar), artinya kestabilan laser baru yang dibangkitkan mempunyai stabilitas yang sama dengan laser standar. Pembangkitan *sideband* dalam frekuensi optik dilakukan dengan mengadopsi sistem modulasi frekuensi dalam sinyal sinusoidal dengan frekuensi modulasi f_m, di mana bila suatu sinyal dimodulasikan maka akan membangkitkan *sideband* di sisi kanan dan kirinya. Dalam hal ini jarak antar *sideband* sama dengan frekuensi modulasi (f_m).

Jumlah *sideband* yang terbangkit pada kondisi ini dipengaruhi oleh efisiensi modulasi yang sangat tergantung dari penyamaan fasa (*phase matching)* rangkaian dan daya gelombang mikro pemodulasi. Sebagai contoh, pada kondisi modulasi satu lintasan dengan menggunakan kristal *Lithium Niobate* ($LiNbO_3$) sebagai elektro-optik modulator, daya *microwave* 10 Watt hanya mampu membangkitkan beberapa *sideband* di kiri dan kanan laser input. Di samping itu, masalah lain bahwa daya *sideband* yang terbangkit juga menurun drastis dari *sideband* orde rendah ke *sideband* orde tinggi, sehingga diperlukan teknik khusus untuk membangkitkan *sideband* dengan jumlah yang banyak. Untuk mengatasi kekurangan tersebut pembangkit sisiran frekuensi optik (OFCG) dibuat dengan menggunakan *electro-optic phase*

modulator yang diletakkan dalam suatu resonator optik seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.3, (Kourogi et al., 1999, 2006; Kourogi, Widiyatmoko, et al., 1995; Widiyatmoko et al., 2005; Widiyatmoko, Imai, et al., 2006, 2007a).



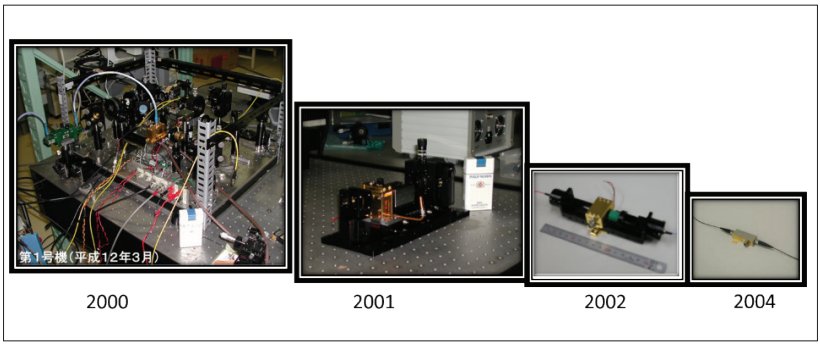
Sumber: Kourogi et al. (1993); Widiyatmoko et al. (1999)

Gambar 3.3 Proses pembangkitan sisiran frekuensi optik

Dalam kondisi dimodulasikan dimana modulator fasa (*phase modulator)* diposisikan di dalam resonator, maka apabila cahaya laser melewati modulator sekali (n=1) akan terbangkit 2 *sideband* dan selama cahaya laser bolak-balik dalam resonator melewati modulator maka dari satu *sideband* dapat terbangkitkan *sideband* berikutnya dan seterusnya yang menghasilkan ribuan *sideband*. Namun kondisi tersebut harus memenuhi beberapa syarat. Syarat pertama adalah kristal yang digunakan sebagai modulator harus mempunyai koefisien elektro-optik yang tinggi dan mempunyai rugi-rugi transmisi optik yang kecil. Syarat kedua adalah besarnya frekuensi modulasi harus kelipatan dari *Free Spectral Range* (FSR) dari resonator (Widiyatmoko et al., 2005). Syarat ketiga, agar *sideband* yang terbangkit mempunyai jangkauan yang lebar diperlukan resonator dengan nilai *finesse* (Q factor) yang tinggi. Nilai *finesse* merupakan indikator yang

menggambarkan efisien atau tidaknya resonator. Resonator biasanya dibuat dengan menggunakan dua buah cermin yang saling berhadapan. Sebagai gambaran, bila kita menggunakan cermin dengan reflektansi 99,5% dalam kondisi ideal *finesse* resonator bisa mencapai 100 namun akan berkurang bila didalam resonator disisipkan *electro-optic modulator* untuk menjadikan pembangkit sisiran frekuensi optik dikarenakan adanya penambahan rugi-rugi dari Kristal E-O modulator. Kondisi ini dalam teknik pembuatannya cukup sulit dikarenakan terjadinya defleksi dalam kristal sehingga merubah lintasan cahaya dalam resonator tersebut. Untuk mengatasi kesulitan teknik ini, dibuat pembangkir sisiran frekuensi optik menggunakan Kristal monolithic (*monolithic comb generator*, Kourogi et al., 1994), di mana kristal yang digunakan sebagai modulator dipoles dan dilapisi dengan material sehingga membentuk resonator optik. Dengan teknik ini, *finesse* resonator bisa mencapai 200 atau 2 kali lipat dari *finesse* resonator yang menggunakan cermin terpisah. Namun demikian masih ada kondisi yang perlu diperhitungkan karena nilai FSR ini tergantung dari indek bias dan panjang kristal yang digunakan. Untuk memenuhi kriteria tersebut dalam pembuatan pembangkit sisiran frekuensi optik *monolithic* dibuat menggunakan kristal *Lithium Niobate* ($LiNbO_3$) sebagai modulator elektro-optik, karena kristal ini mempunyai rugi rugi transmisi yang rendah yaitu sebesar 0,1%/cm dan mempunyai konversi elektro-optik tinggi (r_{33} = 32 pm/V) sehingga sangat efisien sebagai modulator elektro-optik. Di samping itu, untuk memperkecil rugi-rugi di dalam resonator, cermin pembentuk resonator dibuat dengan memoles langsung permukaan kristal dan melapisi dengan material dielektrik sehingga membentuk cermin. Proses rekayasa pembuatan pembangkit sisiran frekuensi optik seperti dalam Gambar 3.4 di mana pada level laboratorium sampai pada level produk

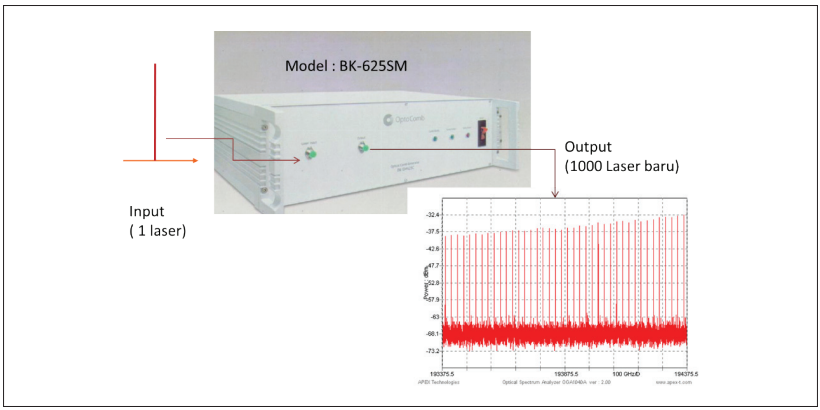
memerlukan proses yang sangat rumit. Di akhir pengembangan pembangkit sisiran frekuensi optik menjadi lebih kecil kompak dengan menyatukan modulator dan resonator menggunakan *waveguide type modulator* (Widiyatmoko et al., 2007, 2007.b; Widiyatmoko, Imai, et al., 2006) sehingga lebih stabil dari sisi mekanik maupun sistem kontrol elektroniknya.



Gambar 3.4 Foto proses perekayasaan pembuatan pembangkit sisiran frekuensi optik

Produk pembangkit sisiran frekuensi optik dapat membangkitkan *sisiran frekuensi optik* dengan jangkauan 7 THz. Apabila frekuensi modulasinya 6 GHz, maka identik dengan terbangkitnya ribuan *sideband* (Kourogi et al., 1999). Jangkauan yang dihasilkan ini telah mencapai jangkauan maksimal karena ada keterbatasan berupa efek dispersi dalam kristal. Efek dispersi ini muncul karena indeks bias suatu material tergantung dari panjang gelombang cahaya. Untuk itu jumlah *sideband* yang terbangkit dibatasi oleh efek dispersi indek bias tersebut. Efek limit dispersi ini disebabkan oleh sifat material yang digunakan untuk elektro-optik modulator terutama perbedaan indeks bias untuk laser dasar dan *sideband* orde tinggi yang terbangkit (Kourogi, Widiyatomoko, et al., 1995).

Gambar 3.5 adalah foto pembangkit sisiran frekuensi optik yang berhasil dibuat dan dikomersialkan beserta *sideband* yang terbangkit yang diukur menggunakan OSA resolusi tinggi pada rentang frekuensi tertentu. Terlihat *sideband* yang berjajar dengan jarak yang sama dan mempunyai spektrum yang sangat sempit. *Sideband* inilah yang dapat digunakan untuk menggantikan laser dengan frekuensi yang tepat dan stabil terutama bila digunakan untuk mengukur beda frekuensi antara 2 laser. Pada level penelitian sisiran frekuensi optik ini telah digunakan untuk mengukur beda frekuensi 2 laser yang terpisahkan selebar 2,6 THz (Widiyatmoko, Kourogi, et al., 1999), di mana bila menggunakan metoda biasa hanya mengukur dalam orde 10 GHz atau bisa meningkatkan jangkau ukur lebih dari 32000 kali.



Gambar 3.5 Produk OFCG yang telah dibuat dan contoh spektrum *sideband* yang terbangkit

Pembangkit sisiran frekuensi optik dengan *bulk crystal* $LiNbO_3$ mempunyai beberapa kekurangan antara lain efisiensi modulasi yang masih rendah walaupun dalam teknis pembuatannya sudah mengupayakan dengan meresonansikan pada frekuensi

modulasinya. Pada kenyataanya untuk membangkitkan sisiran frekuensi optik mencapai *dispersion limit* masih memerlukan daya pemodulasi gelombang mikro sebesar 5 Watt. Daya gelombang mikro sebesar 5 Watt juga menimbulkan masalah lain yaitu meningkatnya suhu kristal akibat desipasi panas yang ditimbulkan. Meningkatnya suhu kristal, akan merubah indeks biasnya dan pada akhirnya akan merubah FSR dari resonator optik yang digunakan, sehingga perlu mengontrol suhu kristal. Cara lain untuk mengefisienkan modulasi atau mengurangi daya *microwave* yang digunakan sisiran frekuensi optik dibuat dengan menggunakan modulator jenis pandu gelombang (*waveguide, Widiyatmoko, Imai,* et al., 2006; Widiyatmoko, Mizawa, et al., 2007), artinya interaksi cahaya dan gelombang mikro sebagai pemodulasi dikenakan dalam area yang sempit (beberapa mikron). Pemakaian modulator jenis pandu gelombang ini, dapat menurunkan daya yg deperlukan sampai dalam orde 100 mW dari yang sebelumnya 5 Watt. Disamping itu penggunaan modulator jenis pandu gelombang pembangkit sisiran frekuensi optik menjadi lebih kecil, kompak dan dapat langsung terkopel (*coupled*) dengan fiber optik. Namun demikian jangkauan dari sisiran frekuensi optik yang dibangkitkan masih dalam orde 5 THz, dikarenakan *finesse* dari modulator turun drastis dikarenakan kesulitan membuat pelapisan cermin pada pandu gelombang.

Upaya untuk memperlebar jangkauan sisiran frekuensi optik secara langsung terus dilakukan, salah satu teknik untuk memperlebar jangkauan dilakukan dengan menggandengkan (*linking)* 2 atau lebih sisiran frekuensi optik (Widiyatmoko, Kourogi, et al., 1999). Dalam teknik penggandengan 2 atau lebih sisiran frekuensi optik, dari beberapa laser dibangkitkan sisiran frekuensi optik, dengan frekuensi modulasi yang sama dan selanjutnya masing masing sisiran frekuensi optik disatukan

dengan cara mengunci laser satu ke laser lain atau laser acuan. Penguncian (*Locking*) antara 2 atau lebih sisiran frekuensi optik dilakukan dengan membangkitkan frekuensi pelayangan dari dua sisiran frekuensi optik yang berhimpitan dan kemudian digunakan untuk menghasilkan sinyal kesalahan (*error signal*) yang digunakan untuk mengunci laser terhadap laser acuan sehingga mendapatkan sisiran frekuensi optik yang berjajar dan memperlebar jangkauan dari sisiran frekuensi optik *y*ang terbangkit. Total jangkauan dari sisiran frekuensi optik menjadi jumlah dari jangkauan masing-masing sisiran frekuensi optik. Dari teknik ini telah menghasilkan jangkauan selebar 8 THz melebihi limit dispersi dari kristal. Pada prinsipnya cara ini dapat dilakukan secara beruntun dengan jumlah *comb* yang tidak terbatas dan hanya dibatasi oleh ketersediaan lasernya.

1. Teknik Memperlebar Jangkauan Sisiran Frekuensi Optik Menggunakan Konversi Non-Linier

Seperti dijelaskan bahwa jangkauan atau jumlah *sideband* yang terbangkit dari pembangkit sisiran frekuensi optik dibatasi oleh efek dispersi dari kristal yang digunakan. Dalam kondisi ini jangkau ukur dalam pengukuran beda frekuensi 2 laser menggunakan bantuan sisiran frekuensi optik ini juga terbatas. Salah satu cara untuk meningkatkan jangkauan dari sisiran frekuensi optik adalah dengan teknik konversi frekuensi non linier (*non-linier frequency conversion*, Imai, Widiyatmoko, et al., 1999; Imai, Zhao, et al., 1999; Widiyatmoko, 2004). Pada proses konversi non-linier, sisiran frekuensi optik yang dihasilkan berbeda dengan frekuensi (panjang gelombang) awalnya. Proses tersebut dapat berupa pembangkitan harmonik kedua, jumlahan frekuensi, selisih frekuensi atau hanya memperlebar jangkauan di sekitar frekuensi awal. Konversi ini bisa direalisasikan karena luaran dari pembangkit sisiran frekuensi optik dalam domain

waktu berupa pulsa yang sangat sempit, sehingga mempunyai konsentrasi daya (*peak power)* yang tinggi dan memungkinkan untuk diamplifikasi. Konversi frekuensi yang sering digunakan adalah dengan menggunakan kristal non-linier seperti KTP, LBO, $LiNbO_3$ atau krital lainnya (Widiyatmoko, et al., 2006; Widiyatmoko, et.al., 2004).

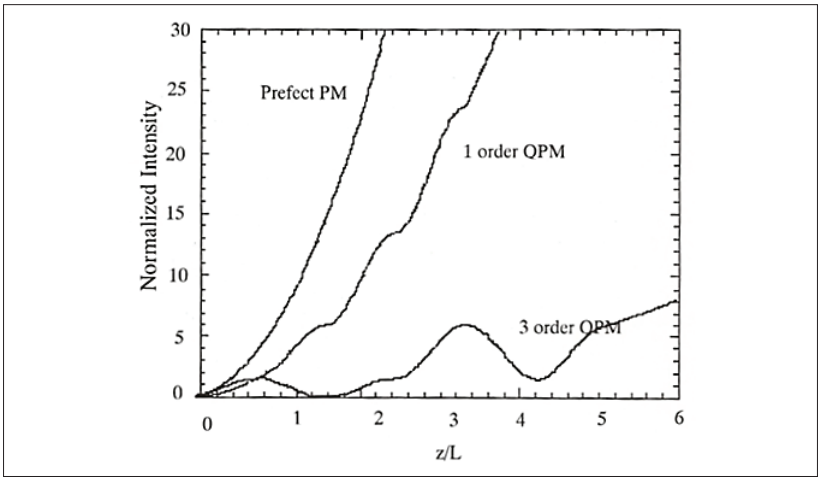
Untuk membangkitkan sisiran frekuensi optik baru dengan teknik konversi frekuensi tak linier menggunakan kristal optik non-linier, diperlukan beberapa syarat yang harus dipenuhi antara lain harus terjadi kesamaan penjalaran fasa antara panjang gelombang awal dengan harmonik kedua didalam kristal. Hal ini dikarenakan penjalaran cahaya dalam kristal sangat tergantung dengan indeks bias, maka syarat ini dapat dihitung dari persamaan *Sellmeier* tentang perubahan indeks bias cahaya dalam kristal. Dari perhitungan ini akan dapat ditentukan sudut potong kristal yang memungkinkan adanya kesamaan penjalaran fasa antara panjang gelombang awal dengan panjang gelombang hasil konversi. Masalah lain yang harus diperhitungkan untuk membangkitkan sisiran frekuensi optik dengan konversi non linier adalah pengaruh lebar panjang gelombang dari sisiran frekuensi optik yang menyebabkan perbedaan indeks bias dalam kristal dilihat dari masing masing komponen *sideband*. Hal ini menyebabkan hanya sebagian *sideband* memenuhi syarat penyamaan fasa (*phase matching)* sehingga tidak semua *sideband* terbangkitan frekuensi konversinya. Masalah ini dapat diatasi dengan menipiskan kristal yang digunakan untuk membangkitkan frekuensi konversi, namun dengan tipisnya kristal yang digunakan akan menyebabkan menurunnya konversi daya optik. Dalam mengatasi permasalahan tersebut pembangkitan harmonik kedua dari sisiran frekuensi optik dilakukan dengan teknik penyamaan fasa secara selektif (*selective-phase-matching)* menggunakan kristal *Potassium Titanyl Phosphate*

(KTP) (Widiyatmoko, Imai,. et al, 1999). Teknik penyamaan fasa secara selektif ini digunakan untuk mengatasi adanya keterbatasan sudut penyamaan fasa untuk semua komponen *sideband* dari sisiran frekuensi optik. Pada prinsipnya *sideband-sideband* dipisah dengan *grating* dan kemudian difokuskan ke kristal KTP dengan lensa yang mempunyai jarak fokus tertentu agar masing masing komponen *sideband* akan jatuh ke kristal dengan sudut yang berbeda beda sesuai dengan sudut penyamaan fasa. Menggunakan teknik ini mampu dibangkitkan harmonik kedua sisiran frekuensi optik pada panjang gelombang 775 nm dengan jangkauan 4 THz atau 2 kali lebih lebar dibanding sisiran frekuensi optik dasar pada panjang gelombang 1550 nm. Keterbatasan lain yang muncul adalah rendahnya koefisien konversi non linear dari kristal yang digunakan dan kesalahan sudut potong kristal yang mengakibatkan *mis-matching*.

Teknik lain yang yang digunakan adalah teknik penyamaan fasa kuasi (*Quasi- phase matching* = QPM, Widiyatmoko, Imai, et al., 1999). Teknik ini tidak bisa menyamakan fasa antara frekuensi atau panjang gelombang laser awal dengan harmoniknya secara sempurna. Teknik ini direalisasikan dengan merubah polarisasi kristal secara periodik dengan jarak tertentu yang dapat disimulasikan terlebih dahulu. Gambar 3.6 menunjukkan hasil simulasi perhitungan yang menunjukkan hubungan antara konversi intensitas relatif terhadap panjang kristal dari teknik konversi non liner dengan penyamaan fasa sempurna dan penyamaan fasa kuasi (QPM) dengan orde 1 dan 3.

Dapat dilihat bahwa efisiensi konversi dari teknik penyamaan kuasi sedikit lebih rendah dari penyamaan fasa sempurna untuk panjang kristal yang sama. Namun demikian secara teknis lebih mudah dilakukan karena tidak tergantung dari sudut potong kristal. Hal ini dapat dilakukan dengan membuat kristal yang

dapat memungkinkan merubah polarisasi dengan mengenakan medan listrik secara periodik dengan jarak tertentu. Dalam percobaan pembakitan harmonik kedua dari sisiran frekuensi optik digunakan kristal *Lithium Niobate* ($LiNbO_3$) atau disebut *periodically poled Lithium Niobate* (PPLN). Jarak periode dari PPLN dihitung dengan mempertimbangkan nilai dari indeks bias kristal untuk panjang gelombang laser awal dan index bias dari panjang gelombang harmoniknya. Harmonik kedua dari sisiran frekuensi optik dengan panjang gelombang dasar 1550 nm dapat dibangkitkan dengan total jangkauan selebar 30 THz di panjang gelombang 775 nm (Widiyatmoko, Imai, et al., 1999). Harmonik kedua ini juga telah digunakan untuk mengukur beda frekuensi dari 2 laser yang berjarak 22 THz, di mana ini jarak terjauh yang dapat diukur menggunakan sisiran frekuensi optik yang terbangkit berbasis elektro optik modulator.



Sumber: Widiyatmoko (2000)

Gambar 3.6 Perbandingan intensitas luaran dari harmonik kedua yang dibangkitkan dengan penyamaan fasa sempurna dan penyamaan fasa kuasi (*Quasi Phase Matching*) orde 1 dan orde 3 sebagai fungsi panjang kristal

2. Teknik Pelebaran Jangkauan Sisiran Frekuensi Optik dengan *Self Phase Modulation*

Teknik yang kedua yaitu teknik *Self Phase Modulation* (SPM) (Imai et al., 1998; Imai, Widiyatmoko, et al., 1999; Imai, Zhao, et al., 1999) yang pada prinsipnya berupa fenomena *four wave mixing* memanfaatkan sifat nonlinear dalam media pandu gelombang berupa serat optik. Dalam teknisnya sisiran frekuensi optik diamplifikasi kemudian dimasukkan ke dalam suatu serat yang panjang atau dalam serat krital sehingga pulsa luaran sisiran frekuensi optik akan terkompres sehingga lebar pulsa semakin menyempit atau spektrumnya melebar. Secara teori, semakin panjang serat yang dilintasi maka akan semakin kuat dalam mengkompres pulsa yang menjalar didalam serat optik. Menggunakan Teknik SPM, sisiran frekuensi optik yang terbangkit dapat menghubungkan frekuensi dasar (laser standar) dengan frekuensi harmonik keduanya. Beda frekuensi antara 2 laser yang terpisah sejauh 12 THz telah mampu diukur dengan sisiran frekuensi optik hasil dari SPM dalam serat optik sepanjang 10 Km (Imai, Widiyatmoko, 1999). Penelitian terkini telah mampu menyambungkan antara frekuensi dasar dan harmoniknya menggunakan laser pulsa daya tinggi dan *non-linear crystal fiber*.

C. Realisasi Pencacah Frekuensi Optik berbasis Pembangkit Sisiran Frekuensi Optik

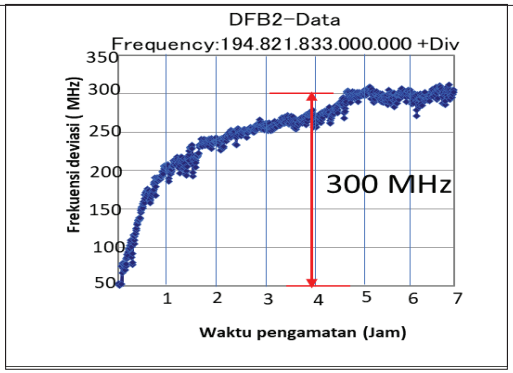
Realisasi pencacah frekuensi optik telah dilakukan dengan mengacu pada prinsip-prinsip yang dikemukakan (Widiyatmoko, 2008) seperti dalam foto Gambar 3.7. Alat ini dibuat dengan menggunakan 2 buah pembangkit sisiran frekuensi optik tipe pandu gelombang dimana masing masing dimodulasi dengan frekuensi yang berbeda. Beda frekuensi sebesar 10 KHz

dimaksud untuk memudahkan menghitung orde *sideband* yang bersesuaian dengan laser yang akan diukur frekuensinya. Semua proses pembacaan dan analisisnya dilakukan dengan terprogram menggunakan perangkat lunak yang dibangun berbasis *Field Programmable Gate Array* (FPGA). Sumber laser yang digunakan dalam alat ini berupa DFB laser yang distabilkan ke serapan saturasi dari gas *Acetylene*, di mana laser ini dapat digunakan sebagai standar dalam komunikasi serat optik DWDM. Di samping sebagai pengukur frekuensi laser secara langsung, pencacah frekuensi optik digunakan untuk mengetahui frekuensi relatif dari laser terukur terhadap laser standar. Di samping itu, pencacah frekuensi optik juga digunakan untuk mengukur stabilitas laser *reference* maupun laser-laser standar dengan melihat fluktuasi frekuensinya dalam jangka waktu tertentu.

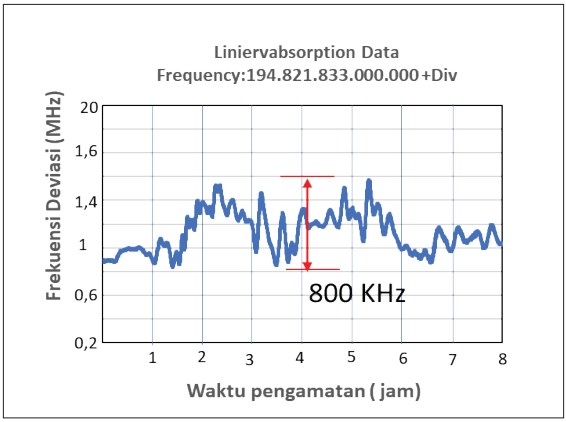


Gambar 3.7 Foto Pencacah Frekuensi Optik *(optical frequency counter*) berbasis OFCG

Gambar 3.8 adalah contoh hasil pengukuran stabilitas laser yang diukur dengan menggunakan pencacah frekuensi optik. Gambar 3.8 (a) adalah grafik stabilitas frekuensi laser dalam kondisi distabilkan arus injeksi dan suhu operasinya, sedangkan Gambar 3.8 (b) adalah grafik stabilitas frekuensi laser yang telah dikunci dengan serapan linier dari *Acetylene*.



(a)



(b)

Sumber: Widiyatmoko (2008)

Gambar 3.8 Pengamatan kestabilan frekuensi laser menggunakan pencacah frekuensi optik untuk laser *DFB free running* (a) dan terstabilkan dengan absorpsi saturasi gas *Acethylene* (b)

Frekuensi laser DFB yang teramati adalah 194.821.833.000 kHz sedang frekuensi laser terstabilkan juga 194.821.833.000 kHz, dengan deviasi yang berbeda saat sebelum terstabilkan dan saat terstabilkan dengan serapan gas *Acetylene*. Terlihat bahwa, dalam jangka waktu 0-8 jam frekuensi DFB laser mengalami drift sampai 300 MHz, sedangkan pada saat dikunci dengan serapan gas *cell*, fluktuasinya di bawah 800 kHz. Ini menunjukkan bahwa pencacah frekuensi optik dapat mengukur frekuensi laser secara presisi dan akurat. Dari uraian ini, betapa peran pembangkit sisiran frekuensi optik dapat membuktikan teori-teori terdahulu yang menyebutkan bahwa cahaya laser benar-benar berupa gelombang elektromagnetik pada umumnya namun mempunyai frekuensi yang tinggi. Artinya pencacah frekuensi optik dapat menguak misteri laser dari segmen yang selama ini belum pernah terkonfirmasi langsung.

IV. POTENSI PEMBANGKIT SISIRAN FREKUENSI OPTIK UNTUK PENGEMBANGAN TEKNOLOGI BARU BIDANG OPTIK

Telah diuraikan bahwa, luaran pembangkit sisiran frekuensi optik mempuyai spektrum yang lebar dan mempunyai ribuan *sideband* dengan jarak yang sangat presisi. Di samping itu, dalam domain waktu luarannya berupa runtunan pulsa optik dengan pengulangan (*repetition rate*) dalam orde MHz - GHz. Kelebihan ini secara ilmiah memunculkan aplikasi-aplikasi baru yang sangat luas untuk meningkatan performa dibanding teknologi yang ada sekarang. Aplikasi baru tersebut antara lain dalam bidang komunikasi serat optik sebagai penyedia *multiwavelength source* untuk meningkatan kapasitas transmisi, bidang spektroskopi dengan teknologi *dual comb spectroscopy*, dan aplikasi lain dalam pembangkit *THz Wave*.

A. Aplikasi Sisiran Frekuensi Optik sebagai Sumber Cahaya dalam Komunikasi Optik

Komunikasi serat optik telah berkembang secara spektakuler dengan hadirnya teknik atau system *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM). Teknologi ini memungkinkan satu kabel serat optik membawa ribuan sinyal cahaya (*laser frequency*) secara bersamaan. Dengan begitu, kapasitas transmisi data dapat meningkat hingga miliaran kali dibandingkan sistem komunikasi biasa. Meskipun sudah banyak digunakan, sistem DWDM memiliki beberapa tantangan. Untuk menghasilkan ribuan panjang gelombang diperlukan juga ribuan laser. Hal ini sulit diterapkan secara teknis karena setiap laser harus memiliki frekuensi yang sangat stabil. Menjaga kestabilan ini

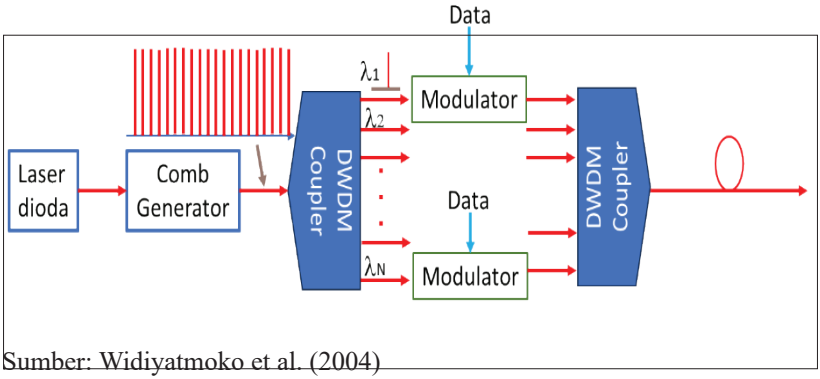
memerlukan ruang yang besar dan pengaturan suhu yang sangat presisi. Selain itu, memastikan setiap laser memancarkan cahaya tepat pada frekuensi yang ditentukan juga menjadi tantangan tersendiri.

Kekurangan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan pembangkit sisiran frekuensi optik. Alat ini mampu menghasilkan ribuan *sideband* (komponen frekuensi cahaya) yang memiliki ketepatan tinggi, baik dalam hal frekuensi maupun jarak antar *sideband*. Keunggulan lain sisiran frekuensi optik tidak terpengaruh oleh kondisi lingkungan seperti suhu atau getaran. Dengan demikian, setiap *sideband* yang dihasilkan dapat berfungsi sebagai pengganti laser-laser individual dalam sistem komunikasi serat optik tersebut. Gambaran dari usulan sistem komunikasi ini seperti dalam Gambar 4.1. Pada teknik ini, di sisi pemancar (*transmitter*), keluaran dari *pembangkit sisiran frekuensi optik* (OFCG) dimasukkan ke filter type pandu gelombang (*waveguide filter*) atau *DWDM multiplexer* untuk memisahkan setiap *sideband* (yang berfungsi sebagai pengganti laser). Setiap *sideband* kemudian dimodulasi menggunakan modulator eksternal agar dapat membawa sinyal data. Setelah dimodulasi, semua sinyal cahaya tersebut digabungkan kembali dan dikirimkan melalui serat optik.

Di sisi penerima (*receiver*), proses yang sama dilakukan secara terbalik untuk memisahkan dan membaca data dari masing-masing *sideband*. Dengan sistem ini, hanya diperlukan satu sumber laser pada sisi pemancar. Penggunaan pembangkit sisiran frekuensi optik ini dapat mempermudah pengaturan frekuensi atau panjang gelombang, serta menghilangkan kebutuhan ruang besar dan pengendalian suhu yang ketat.

Sebagai contoh, jika setiap *sideband* mampu mentransmisikan data sebesar 10 Gbit/s dan terdapat 1000 *sideband* atau 1000 kanal, maka dalam satu inti serat optik dapat ditransmisikan

data hingga 10 Tbit/s. Artinya, kapasitas transmisi meningkat sangat signifikan dibandingkan dengan sistem komunikasi konvensional.

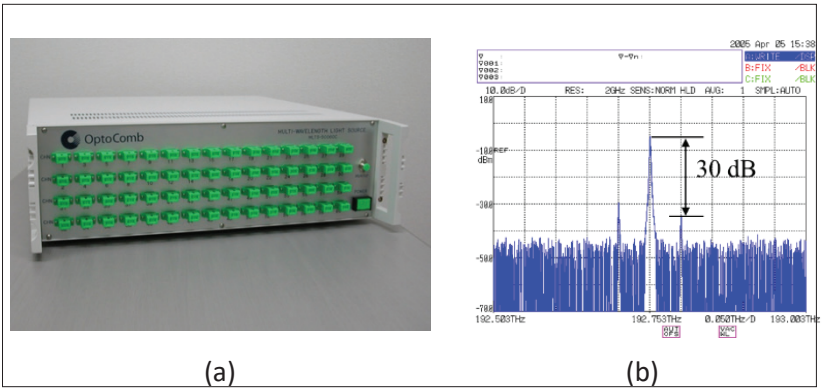


Sumber: Widiyatmoko et al. (2004)

Gambar 4.1 Usulan sistem komunikasi serat optik DWDM menggunakan *comb* sebagai sumber cahaya Implementasi sebagai *multiwavelength source* telah menjadi produk dengan menggabungkan sisiran frekuensi optik dan *waveguide DWDM coupler* seperti foto Gambar 4.2(a). Alat ini menyediakan 64 kanal dengan hanya menggunakan 1 laser. Spektrum Gambar 4.2(b) adalah hasil pemilahan setelah DWDM *coupler*, di mana kualitas sinyal masih lebih dari 30 dB sehinga masih baik untuk mewakili 1 kanal.

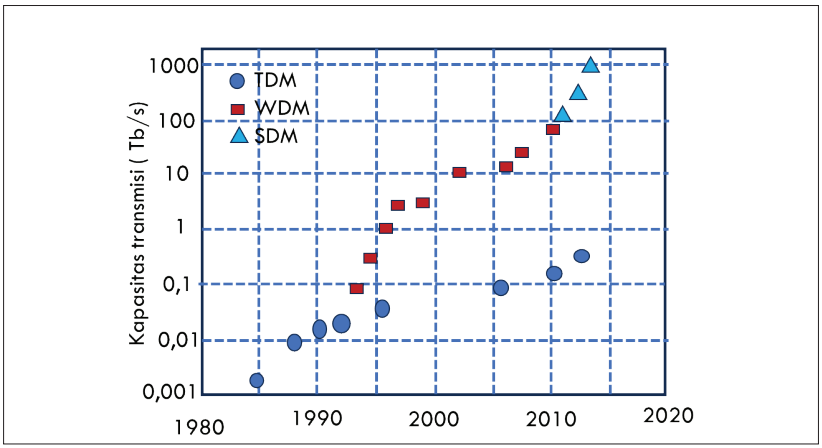
Pemakaian multiwavelength source pada komunikasi serat optik dengan DWDM telah mampu meningkatkan kapasitas transmisi secara drastis sejak tahun 2010. Di samping teknik DWDM, dalam domain waktu ada teknik *Time Domain Multiplexing* (TDM), di mana data ditransmisikan dalam paket laser pulsa. Teknik terbaru adalah dengan sistem *Spatial Division Multiplexing* (SDM), di mana dalam satu serat terdiri dari beberapa N *core* (N inti) atau sering disebut *multi-core* fiber (MCF) di mana masing-masing inti dapat dilakukan *multiplexing* panjang gelombang, sehingga secara keseluruhan

dapat meningkatkan kapasitas $N \times$ kapasitas DWDM, di mana N adalah jumlah inti dalam 1 fiber.



Sumber: Widiyatmoko et al. (2004)

Gambar 4.2 *Multi wavelength source* berbasis *sisiran frekuensi optik* (a) dan spektrum *sideband* setelah dipisahkan DWDM *coupler* (b) (Widiyatmoko et al., 2004)



Sumber: Essiambre et al. (2010)

Gambar 4.3 Perkembangan kapasitas transmisi sistem komunikasi serat optik

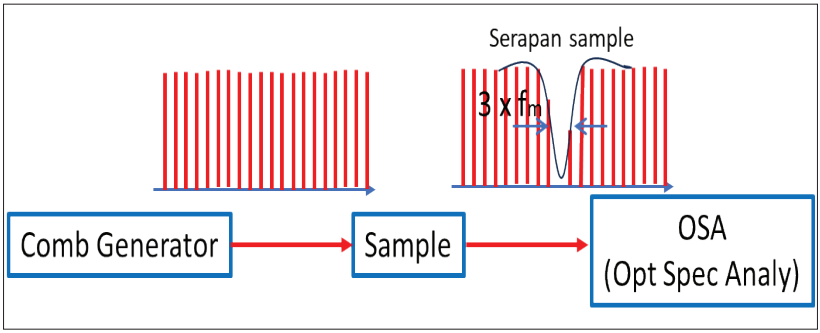
Gambar 4.3 merupakan grafik perkembangan kapasitas transmisi dalam komunikasi serat optik dari tahun 1980–2020 di mana dalam kurun waktu 40 tahun, kapasitas transmisinya meningkat 1 juta kali dan ini akan terus berkembang, sehingga kecepatan komunikasi akan dapat mendukung perkembangan komunikasi dari 5G menuju ke 6G.

B. Aplikasi Sisiran Frekuensi Optik dalam Spektroskopi Presisi

Secara umum, spektroskopi berkerja berdasarkan pemilahan spektrum dari sumber cahaya yang dilewatkan pada sampel yang dapat berupa cairan maupun gas. Interaksi sampel dengan cahaya atau foton inilah yang akan membedakan kandungan sampel satu dengan lainnya. Salah satu pembedanya adalah serapan atau absorpsi sampel uji terhadap cahaya yang melewatinya. Sampel berbeda mempunyai daya serap terhadap cahaya pada panjang gelombang tertentu. Pada alat-alat spektrokopi pada umumnya, pemilahan spektrum tersebut dilakukan dengan menggunakan difraksi pada *grating* seperti halnya pada *Optical Spectrum Analyzer* maupun alat-alat spektrometer yang dinilai kurang presisi dalam pengukurannya.

Penggunaan sisiran frekuensi optik yang mempunyai *side-band* dengan jarak yang sama sebagai sumber cahaya dalam spektroskopi, maka pengukuran lebar serapan dari sampel akan dapat dihitung dengan pasti seperti digambarkan dalam Gambar 4.4. Sebagai contoh dalam Gambar 4.4., spektrum luaran setelah melewati sampel, pada bagian tertentu intensitas 3 *sideband* terserap oleh sampel dan dapat dimonitor oleh OSA. Apabila jarak antar *sideband* sebesar 10 GHz, maka dapat dipastikan lebar serapan sample adalah 30 GHz. Teknik ini akan dapat membedakan spektrum serapan selebar 0,001 nm atau 1000

kali lebih presisi dibanding spektroskopi pada umumnya yang mempunyai tingkat kepresisian hanya 1 nm.



Gambar 4.4 Skema spektrometer menggunakan 1 spektrum sisiran frekuensi optik

Namun demikian, spektroskopi menggunakan satu *comb* seperti Gambar 4.4 masih memerlukan pembaca berupa *optical spectrum analyze*r sehingga masih kurang efisien. Teknik baru yang menjadi trend spektroskopi presisi sekarang adalah menggunakan 2 sisiran frekuensi optik atau disebut *dual combs spectroscopy* (Coddington et al., 2016; Hall, 2006; Patiño Rosas & Cézard, 2024; Ye & Cundiff, 2005). Spektroskopi *dual-comb* adalah teknik spektroskopi baru dengan memanfaatkan kelebihan dari sisiran frekuensi optik dilihat dari resolusi frekuensi, akurasi frekuensi, dan lebar pita yang luas sehingga sangat cocok untuk spektroskopi jangkauan lebar dengan resolusi dan sensitivitas tinggi. Berbeda dengan menggunakan satu sisiran frekuensi optik, teknik ini yang diukur dan dianalisa adalah frekuensi pelayangan (*beat frequency*) antara 2 s*ideband* yang berasal dari 2 sisiran frekuensi optik, di mana salah satunya dilewatkan pada sampel terukur. Dengan demikian, yang diamati adalah runtunan spektrun frekuensi radio (*RF spectrum*) luaran dari fotodetektor sehingga pengukurannya dapat menggunakan peralatan elektro-

nik biasa seperti penganalisa spektrum RF sehingga lebih murah dan simpel.

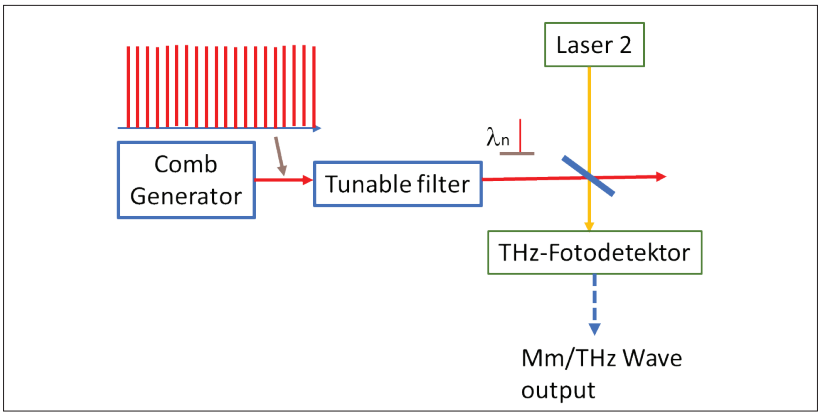
Pengukuran dengan teknik *dual comb*, jauh lebih presisi karena pengamatan secara elektronik menjamin akurasi sampai orde mHz. Tidak seperti alat spektroskopi konvensional, spektroskopi menggunakan *dual-comb* tidak memerlukan bagian bergerak yang kompleks atau kisi-kisi untuk memisahkan frekuensi optik dan menyebarkan spektrum optik. Ini dilakukan secara digital di domain radio frekuensi (RF). Di samping itu, salah satu kelebihannya adalah bahwa kedua jalur optik dapat dengan mudah diterapkan pada serat optik atau *chip* fotonik. Ini secara signifikan mengurangi kerumitan desain sistem mekanik, di samping mempunyai ketelitian yang lebih tinggi dibanding sistem spektroskopi konvensional. Ini membuat spektrometer *dual-comb* lebih kecil dan kuat, dengan kompensasi yang sangat baik untuk gangguan eksternal. Teknik ini tercipta karena temuan pembangkit sisiran frekuensi optik sebagai sumber cahaya yang secara nyata dapat memperbaiki teknik-teknik lama dalam spektroskopi.

C. Pembangkitan *THz-wave* Mampu Tala Menggunakan Laser Dioda dan *Sisiran Frekuensi Optik*

Komunikasi menggunakan gelombang mikro mengalami kejayaan pada dekade 80 an, dan sejak tahun 2000 an terus mengalami stagnasi sampai saat ini. Salah satunya adalah keterbatasan kecepatan transmisi data yang kalah bersaing dengan komunikasi serat optik. Di samping itu alokasi frekuensi yang dapat digunakan juga terbatas, di mana salah satunya disebabkan oleh limitisasi pembangkit sumber gelombang mikro dengan rangkaian elektronik seperti *Dielectric Resonance Oscillator* (DRO) yang terbatas pada orde 10 GHz. Untuk membangkitkan

frekuensi yang lebih tinggi secara elektronis diperlukan penggandaan frekuensi (f*requency doubling*), namun dengan teknik ini akan meningkatkan derau fasa (*phase noise*) dari sinyal yang terbangkit dan akan memperburuk kualitas gelombang yang dibangkitkan. Salah satu teknik untuk membangkitkan gelombang mikro dengan frekuensi tinggi adalah dengan teknik pelayangan (*beating*) dari 2 laser (Sugiarto et al., 2013, 2016; Widiyatmoko, Waluyo, et al., 2007) atau dengan *sideband* dari sisiran frekuensi optik. Dalam hal ini, gelombang mikro terbangkit karena adanya selisih frekuensi antara laser dengan salah satu *sideband* dari sisiran frekuensi optik seperti diperlihatkan pada Gambar 4.5. Luaran dari sisiran frekuensi optik dimasukkan ke filter mampu tala. Dengan memberikan tegangan dc dengan nilai tertentu ke filter, luaran dari filter akan memilih *sideband* yang akan digunakan untuk menghasilkan pelayangannya dengan laser 2 sehingga diperoleh luaran *mm-wave* bahkan *THz-wave* tergantung kecepatan fotodetektor yang digunakan.

Teknik ini bukan hanya dapat membangkitkan *microwave* atau THz wave namun frekuensi yang diperlukan dapat di tala dengan merubah panjang gelombang laser atau dengan memilih *sideband* dari sisiran frekuensi optik yang bersesuaian. Namun demikian, kualitas gelombang mikro yang dibangkitkan sangat tergantung oleh stabilitas frekuensi laser. Untuk itu diperlukan laser yang distabilkan dengan absorpsi atau serapan atom atau molekul. Teknik pembangkit *THz-wave* ini merupakan hal baru sebagai dampak positif akibat ditemukan cara membangkitkan sisiran frekuensi optik yang efektif.



Suember: Widiyatmoko, et al. (2007)

Gambar 4.5 Pembangkit *tunable mm/THz Wave* menggunakan laser dan *sideband comb*

Dari gambaran yang dijelaskan terlihat berbagai aplikasi dari sisiran frekuensi optik di bidang komunikasi dan spektroskopi. Hal ini hanya dimungkikan karena sifat luaran dari sisiran frekuensi optik yaitu terbangkitnya ribuan *sideband* dengan jarak yang tetap dan juga berupa runtunan pulsa dalam orde *femto second* (fs). Aplikasi ini akan bisa terus berkembang khususnya dalam pengukuran presisi bahkan pada bidang kesehatan seperti *optical coherence thomograpy* (Lee et.al. 1998, Widiyatmoko et.al 2007)

V. KESIMPULAN

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi komunikasi serat optik semakin meningkat dan terintegrasi untuk mendukung kebutuhan di era digital. *Fiber to the Home* (FTTH) membawa koneksi optik langsung ke rumah-rumah, menghadirkan internet ultra cepat, layanan *streaming* 4K, hingga *game online* dengan latensi rendah. Di sisi lain, penelitian mengenai serat optik *hollow-core* dan modulasi kecepatan tinggi membuka potensi kecepatan transfer data mendekati kecepatan cahaya di udara.

Saat ini, serat optik menjadi simbol kemajuan komunikasi modern. Serat optik bukan hanya sekadar kabel, melainkan fondasi dari transformasi digital dunia dari komputasi awan, kecerdasan buatan, pusat data global, hingga layanan komunikasi masa depan seperti jaringan 6G.

Kemajuan sistem komunikasi serat optik *modern* memerlukan ketepatan dan keakuratan frekuensi dari laser sebagai sumber cahaya atau komponen utama dalam komunikasi.

Pengembangan pembangkit sisiran frekuensi optik telah mendorong keakuratan alokasi frekuensi dan kestabilan sumber cahaya dalam implementasi sistem komunikasi serat optik modern. Kontribusi utama penelitian ini dalam komunikasi serat optik dan pengukuran presisi mencakup:

1) Penyediaan standar frekuensi optik yang menjadi acuan baik dalam metrology optik maupun sebagai acuan frekuensi pada sumber cahaya dalam komunikasi optik modern yang lebih mendasarkan pada frekuensi dibanding panjang gelombang.

2) Sebagai komponen utama dalam pencacah frekuensi optik yang dapat mengukur frekuensi laser secara akurat bahkan dapat mengukur fluktuasi frekuensi dari laser terukur. Pengukuran frekuensi laser ini sangat penting untuk memastikan alokasi sumber cahaya pada sebuah sistem yang tersebar di seluruh dunia agar dapat tersinkronkan antara satu sistem dengan sistem lainnya.

3) Pembangkit sisiran frekuensi optik dalam domain frekuensi dapat menghasilkan ribuan sumber cahaya yang stabil dan akurat baik dari frekuensi maupun jarak antar sumber cahaya. Dengan sumber cahaya ini dapat digunakan sebagai sumber cahaya pada system DWDM sehingga sistem secara keseluruhan lebih simpel dan mudah dalam perawatannya. Sumber cahaya ini juga mampu mereduksi efek-efek teknis akibat perubahan lingkungan dan mampu menyediakan sumber cahaya yang lebih simpel. Sebaliknya, dalam domain waktu, luaran pembangkit sisiran frekuensi optik ini berupa runtunan pulsa dengan *repetition rate* yang stabil dan konstan menjadikan kandidat sumber cahaya dalam komunikasi serat optik berbasis waktu (*optical time-division multiplexing* = OTDM).

Secara keseluruhan, pengembangan pembangkit sisiran frekuensi optik ini mampu mengatasi kekurangan kekurangan dalam sistem komunikasi serat optik sebelumnya dan memberikan terobosan baru dalam mendorong terealisasikannya sistem komunikasi optik modern berbasis frekuensi. Dalam dunia penelitian, sisiran frekuensi optik menjadi alat yang sangat potensial dalam pengukuran optik presisi seperti *spectroscopy* utamanya teknik *dual comb spectroscopy*.

Penelitian penelitian yang sekarang dilakukan berbasis sisiran frekuensi optik masih banyak yang melihat dari arah frekuensi. Ke depan perlu mengembangkan teknik-teknik pengukuran berbasis sisiran frekuensi optik dari domain waktu seperti aplikasi untuk tomografi koheren maupun profilometri.

VI. PENUTUP

Perkembangan komunikasi serat optik dunia saat ini bergerak sangat cepat karena kebutuhan internet berkecepatan tinggi yang dipicu oleh AI*, cloud computing, streaming*, pusat data, kendaraan otonom, dan jaringan 5G/6G. Saat ini komunikasi serat optik menjadi tulang punggung internet global karena sebagian besar lalu lintas internet dunia berjalan melalui kabel serat optik.

Komunikasi serat optik berbasis frekuensi merupakan suatu keniscayaan untuk meningkatkan kapasitas transmisi. Beberapa tantangan yang masih perlu diselesaikan dalam sistem komunikasi berbasis frekuensi ini antara lain tersedianya standar frekuensi optik di masing masing negara, alat ukur frekuensi laser yang akurat dan komponen-komponen optik yg terkalibrasi berbasis frekuensi. Dalam hal ini pengembangan berbagai instrument berbasis sisiran frekuensi optik menjadi tantangan kedepan, bukan saja dalam bidang komunikasi tetapi juga pada teknologi-teknologi lain.

Di Indonesia, penerapan jaringan serat optik mulai berkembang pesat pada awal tahun 2010-an. Peningkatan kebutuhan internet berkecepatan tinggi, baik untuk pendidikan, bisnis, maupun hiburan, mendorong penyedia layanan telekomunikasi untuk beralih ke infrastruktur berbasis serat optik. Proyek besar seperti Palapa Ring yang membentang dari Sabang sampai Merauke menjadi bukti nyata komitmen pemerintah dalam memperkuat jaringan komunikasi nasional. Serat optik telah membuka era baru komunikasi modern, menghubungkan jutaan masyarakat Indonesia dengan dunia secara *real-time*.

Dari sisi infrastruktur serat optik, Indonesia telah tertata dengan baik sebagai antisipasi kebutuhan transmisi data di masa depan, namun dari sisi teknologi hampir semua komponen pendukung didatangkan dari luar negeri. Dalam hal ini, peran pemerintah, khususnya yang bergerak di bidang komunikasi diharapkan dapat mendorong penelitian dan penggunaan teknologi teknologi karya dalam negeri, karena kebijakan ini akan mendorong kreatifitas para peneliti untuk terus menghasilkan teknologi teknologi terapan yang pada akhirnya mengurangi ketergantungan pada produk impor.

Pengembangan teknologi komunikasi berbasis pembangkit sisiran frekuensi optik di Indonesia dinilai masih jauh bila dihubungkan dengan ketersediaan sumber daya saat ini, namun penelitian penelitian lain dapat dilakukan untuk antisipasi teknologi masa depan utamanya dalam pengukuran presisi berbasis sisiran frekuensi optik.

Penelitian berbasis sisiran frekuensi optik juga sangat potensial untuk menelurkan teknologi di masa depan seperti pembangkitan *THz-Wave*, *optical coherence tomography* dan komunikasi *radio on fiber* yaitu teknologi yang menggabungkan serat optik dan radio frekuensi yang sangat cocok di Indonesia karena kondisinya yang terdiri dari pulau-pulau dan sulit terjangkau. Apabila ini dilakukan, akan dapat memecahkan permasalahan yang selama ini sulit dilakukan karena keterbatasan kondisi alam Indonesia.

Pemakaian sisiran frekuensi optik dalam industri juga telah banyak dirasakan dan bahkan menjadi terobosan besar dalam pengukuran seperti aplikasi sisiran frekuensi optik dalam *profilometer* dan *vibrometer* yang mampu menghasilkan profil suatu sampel dengan ketelitian sub-mikrometer.

Hal-hal yang dituangkan dalam orasi ini menggambarkan bagaimana perjalanan dari penelitian dasar menjadi produk komersial yang secara nyata dilakukan. Pengalaman memberikan gambaran bahwa pengembangan hasil penelitian menjadi produk komersial mempunyai permasalahan yang lebih kompleks dibanding penelitian itu sendiri dalam menghasilkan ilmu pengetahuan baru. Komersialisasi hasil penelitian membutuhkan sumber daya manusia yang unggul dan fokus dalam penguasaan teknologi tertentu. Sumber daya manusia yang diperlukan tidak bisa diukur semata mata dari pendidikannya melainkan dari rekam jejak yang harus dibangun terus menerus dalam bidang yang sama. Untuk itulah diperlukan kebijakan-kebijakan yang dapat membuat kerja para periset lebih fleksibel agar para periset dapat menggunakan tenaga dan pikirannya pada permasalahan teknologi yang dikembangkan. Dengan demikian, para periset dapat menjawab kebutuhan teknologi dengan menciptakan inovasi inovasi baru sesuai kebutuhan riil masyarakat sekaligus menggeser paradigma budaya bangsa dari pemakai teknologi menjadi budaya pencipta teknologi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan mengucap syukur Alhamdullilah ke Hadirat Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah dan ridho-Nya, pada hari ini saya telah menyampaikan naskah orasi Profesor Riset.

Pertama, saya ucapkan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subiyanto dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Bapak Ir. Joko Widodo yang telah menetapkan saya sebagai Peneliti Ahli Utama; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Prof Dr Arief Satria; Wakil kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah, Prof. Dr. Ratno Nuryadi, Prof. Dr. Isnaeni, Prof. Dr. Ir. Sensus Wijonarko M.Sc., dan Prof. Dr. Ir. Andika W.Pramono, M.Sc., Prof. Dr. Ir. Retno Wigajatri Purnamaningsih dari UI, terima kasih atas arahan dan bimbingannya, serta panitia pelaksana pengukuhan yang telah menyelenggarakan pengukuhan profesor riset ini.

Terima kasih kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas S.IP., M.A.; Kepala Organisasi Riset NanoTeknologi dan Material, Prof. Dr. Ratno Nuryadi; Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia BRIN, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si., dan Kepala Pusat Riset Fotonika, Prof. Dr. Isnaeni atas dukungan dan fasilitasinya.

Ucapan terima kasih kepada para senior dan kolega saya di P2F-LIPI dan sekarang di BRIN. Terima kasih juga kepada teman-teman periset Pusat Riset Fotonika BRIN yang tidak saya sebutkan satu persatu atas kerjasama dan supportnya.

Dalam perjalanan karier sebagai peneliti, banyak dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu dalam kesempatan ini saya mengucapkan banyak terima kasih kepada pembimbing studi saat menempuh S-1 di Jurusan Fisika UGM, Alm. Dr Soemartono Prawiroharjo dan Ir Budi Pardono (LIPI), serta pembimbing S-2 dan S-3 dari Tokyo Institute of Technology, Prof Dr. Eng. Motoichi. OHTSU.

Di tengah kehidupan masa kecil yang penuh ketidakpastian, saya tidak akan terarah tanpa bimbingan, kedua orang tua dan guru-guru saya. Untuk itu terima kasih banyak dan tanpa batas kepada bapak saya Alm. H. Tukiman Prapto Mulyono dan ibu saya Hjh Sukasmi atas kasih sayang, pengorbanan, doa doa, perhatian dan banyak hal terkait perjuangan dan budi pekerti yang bapak ibu ajarkan dan contohkan. Terima kasih saya sampaikan untuk bapak ibu Mertua Alm. Bapak Margono dan Ibu Sumarti dan kakak-kakak ipar atas doa dan supportnya. Juga untuk kakak saya Widodo Joko Kismanto dan adik-adik saya Widyastuti, Lilik Widayanto, Sri Lestari, Untung Joko Waluyo, dan seluruh keluarga besar Tukiman, terima kasih atas pengertian, pengorbanan, doa-doa dan supportnya.

Untuk Almarhumah istri tercinta, Arlina Prihharsanti terima kasih atas dukungan, kesabaran, doa-doa, kecintaan dan keikhlasan hidup bersama dalam suka dan duka selama ini. Doa selalu aku panjatkan, semoga engkau kekal di SurgaNya. Juga terima kasih atas pengertian dan dukungannya untuk anak-anak saya Erliansyah Widhi Putra dan Hikarini Esti Pratiwi juga anak menantu Irma Ardiyanti dan cucu cucu Haruna, Ayaka dan Reika. Sekarang ini kalian menjadi penyemangat dan penguat dalam setiap langkah yang saya tempuh.

Terakhir saya ucapkan terima kasih kepada seluruh hadirin yang telah meluangkan waktu untuk menghadiri acara pengukuhan ini. Mohon maaf apabila dalam penyampaian orasi ini banyak kesalahan dan kekuranganya. Mudah-mudahan Alloh SWT selalu melimpahkan rahmat dan hidayah Nya kepada kita semua.

Wassalamu'alaikum wa Rohmatullahi wa Barokatuh.

DAFTAR PUSTAKA

Agrell, E., Karlsson, M., Poletti, F., Namiki, S., Chen, X. (Vivian), Rusch, L. A., Puttnam, B., Bayvel, P., Schmalen, L., Tao, Z., Kschischang, F. R., Alvarado, A., Mukherjee, B., Casellas, R., Zhou, X., Van Veen, D., Mohs, G., Wong, E., Mecozzi, Uysal, M. (2024). Roadmap on optical communications. *Journal of Optics*, *26*(9), 093001. https://doi.org/10.1088/2040-8986/ad261f

APJII. (2025). *Survei Pengguna Internet Indonesia*. Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (APJII). https://survei.apjii.or.id/survei

Coddington, I., Newbury, N., & Swann, W. (2016). Dual-comb spectroscopy. *Optica*, *3*(4), 414. https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000414

Essiambre, R.-J., Kramer, G., Winzer, P. J., Foschini, G. J., & Goebel, B. (2010). Capacity Limits of Optical Fiber Networks. *Journal of Lightwave Technology*, *28*(4), 662–701. https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2039464

Hall, J. L. (2006). Nobel Lecture: Defining and measuring optical frequencies. *Reviews of Modern Physics*, *78*(4), 1279–1295. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1279

Hecht, E. (2002). *Optics* (4th ed.). Addison Wesley.

Imai, K., Kourogi, M., & Ohtsu, M. (1998). 30-THz span optical frequency comb generation by self-phase modulation in an optical fiber. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, *34*(1), 54–60. https://doi.org/10.1109/3.655007

Imai, K., **Widiyatmoko, B**., Kourogi, M., & Ohtsu, M. (1999). 12-THz frequency difference measurements and noise analysis of an optical frequency comb in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, *35*(4), 559–564. https://doi.org/10.1109/3.753660

Imai, K., Zhao, Y., Kourogi, M., **Widiyatmoko, B**., & Ohtsu, M. (1999). Accuracy of optical frequency comb generation in optical fiber. *Optics Letters*, *24*(4), 214. https://doi.org/10.1364/OL.24.000214

Ishibashi, C., Kourogi, M., Imai, K., **Widiyatmoko, B**., Onae, A., & Sasada, H. (1999). Absolute frequency measurement of the saturated absorption lines of methane in the 1.66 μm region. *Optics Communications*, *161*(4–6), 223–226. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00045-0

Ishibashi, C., Suzumura, K., Sazada, H., Kourogi, M., Imai, K., & **Widiyatmoko, B**. (2000, June). *Precise transition frequency of CH_4 in the 1.66um region*. International symposium on molecular spectroscopy, Ohio. USA.

Ishio, H., Minowa, J., & Nosu, K. (1984). Review and status of wavelength-division-multiplexing technology and its application. *Journal of Lightwave Technology*, *2*(4), 448–463. https://doi.org/10.1109/JLT.1984.1073653

Keiser, G. (2003). *Optical Communications Essentials*. McGraw-Hill.

Kourogi, M., Enami, T., & Ohtsu, M. (1994). A monolithic optical frequency comb generator. *IEEE Photonics Technology Letters*, *6*(2), 214–217. https://doi.org/10.1109/68.275432

Kourogi, M., Imai, K., **Widiyatmoko, B**., & Ohtsu, M. (1999). Generation and Application of an Optical Frequency Comb. *J of the Communication Research Laboratory*, *46*(3), 397–401.

Kourogi, M., Nakagawa, K., & Ohtsu, M. (1993). Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, *29*(10), 2693–2701. https://doi.org/10.1109/3.250392

Kourogi, M., **Widiyatmoko, B**., Enami, T., & Ohtsu, M. (1995). Frequency difference measurement using an optical frequency comb generator. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*.

Kourogi, M., **Widiyatmoko, B**., & Imai, K. (2006). *Wavelength Variable Optical Frequency Comb Generator* (Patent No. JP2006337833).

Kourogi, M., **Widiyatmoko, B**., Nakamoto, O., MIsawa, S., & Nakayama, Y. (2007). *Optical Frequency Comb Generator* (Patent No. US7239442 B2).

Kourogi, M., **Widiyatomoko, B**., Takeuchi, Y., & Ohtsu, M. (1995). Limit of optical-frequency comb generation due to material dispersion. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, *31*(12), 2120–2126. https://doi.org/10.1109/3.477736

Moon, H. S., & Lee, W. K. (2004, March). *Saturated Absorption Spectroscopy of $^{13}C_2H_2$ Acetylene Molecule and Its Application to Frequency Stabilization of 1.5 μm Laser Diode*. The Fourth Asian Pacific Laser Symposium (APLS2004).

Murthy, C. S. R., & Mohan, G. (2001). *WDM Optical Networks, Concepts, Design, and Algorithms*. Prentice Hall India.

Nakamura, M., Nagatani, M., Jyo, T., Hamaoka, F., Mutoh, M., Shiratori, Y., Wakita, H., Kobayashi, T., Takahashi, H., & Miyamoto, Y. (2022). *Over 2-Tb/s Net Bitrate Single-carrier Transmission Based on >130-GHz-Bandwidth InP-DHBT Baseband Amplifier Module*.

Okamoto, S., & Sato, K. (1993). Optical path cross-connect systems for photonic transport networks. *Proceedings of GLOBECOM '93. IEEE Global Telecommunications Conference*, 474–480. https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1993.318036

Onae, A., Ikegami, T., Sugiyama, K., Hong, F.-L., Minoshima, K., Matsumoto, H., Nakagawa, K., Yoshida, M., & Harada, S. (2000). Optical frequency link between an acetylene stabilized laser at 1542 nm and an Rb stabilized laser at 778 nm using a two-color mode-locked fiber laser. *Optics Communications*, *183*(1–4), 181–187. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(00)00854-3

Onae, A., Okumura, K., Yoda, J., Nakagawa, K., Yamaguchi, A., Kourogi, M., Imai, K., & **Widiyatomoko, B**. (1999). Toward an accurate frequency standard at 1.5 μm based on the acetylene overtone band transition. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *48*(2), 563–566. https://doi.org/10.1109/19.769658

Optocomb Inc. (2005). *Automated Optical Frequency Counter Model MF-5802A*. Optocomb Inc.

Paris, M. G. A. (1998). *Entanglement and visibility at the output of a Mach-Zehnder interferometer*. https://doi.org/10.48550/ARXIV.QUANT-PH/9811078

Patiño Rosas, W., & Cézard, N. (2024). Greenhouse gas monitoring using an IPDA lidar based on a dual-comb spectrometer. *Optics Express*, *32*(8), 13614. https://doi.org/10.1364/OE.515543

Puttnam, B. J., Luis, R. S., Phillips, I., Tan, M., Donodin, A., Pratiwi, D., Dallachiesa, L., Huang, Y., Mazur, M., Fontaine, N. K., Chen, H., Chung, D., Ho, V., Orsuti, D., Boriboon, B., Rademacher, G., Palmieri, L., Man, R., Ryf, R., … Furukawa, H. (2024). 402 Tb/s GMI Data-Rate OESCLU-Band Transmission. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024*, Th4A.3. https://doi.org/10.1364/OFC.2024.Th4A.3

Sugiarto, I. T., **Widiyatmoko, B**., & Munir, A. (2013). Preliminary Study for Microwave Generator: Experimental Characterization of Stability of Distributed Feedback-based Laser Diode. *Procedia Technology*, *11*, 950–954. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.280

Sugiarto, I. T., Yudasari, N., & **Widiyatmoko, B**. (2016). *Tunability of microwave source based on laser diode using heterodyne technique*. 020015. https://doi.org/10.1063/1.4953940

Suriamah, R., **Widiyatmoko, B**., & Siregar, M. R. T. (2006, December). *A Proposed Fabry-Perot Tunable Filter Based on Photonics and materials Component Analyzer*. IWOFAM-3th IWONN conference, Halong, Vietnam.

Udem, Th., Reichert, J., Hänsch, T. W., & Kourogi, M. (1998). Accuracy of optical frequency comb generators and optical frequency interval divider chains. *Optics Letters*, *23*(17), 1387. https://doi.org/10.1364/OL.23.001387

Widiyatmoko, B. (2000). *Generation of Wide Span Optical Frequency Com using Non-linier Frequency Conversion* [Disertation]. Tokyo Institute of Technology.

Widiyatmoko, B. (2008). Pengukuran stabilitas frekuensi laser diode menggunakan Pencacah Frekuensi Optik. *Jurnal Fisika, Himpunan Fisika Indonesia*, *8*(2), 1–7.

Widiyatmoko, B., Agustine, A., & Akbar, Z. (2007). Pengembangan Analisator Spectrum Optik pada Panjang Gelombang 1550 nm berbasis Filter Mampu Tala. *Prosiding Pertemuan Kalibrasi Instrumentasi Dan Metrologi (PPI-KIM)*, 65–71.

Widiyatmoko, B., Bayuwati, D., Kurniawan, E., Purwowibowo, Maftukhah, T., Suryadi, & Rofianingrum, M. Y. (2021). *Sensor Pengukur Berat Berbasis Makrobending Fiber Optik* (Patent No. IDP000077434B2).

Widiyatmoko, B., Hamidah, E., Suheri, A., & Yunaningsih, R. (2006). Wide Span and Efficient Optical Frequency Comb through Intra Cavity Second Harmonics Generation. *Journal Instrumentasi*, *30*(2), 63–66.

Widiyatmoko, B., Hanto, D., Rofianingrum, M. Y., Nelfyenny, Rianaris, A., Pratomo, H., Ula, R. K., Bayuwati, D., Suryadi, Mulyanto, I., Ilyas, M., Oktalira, F. T., Priwiratama, H., Pradana, M. G., Retnowati, A., & Setiono, A. (2025). Irradiation as a strategy for controlling the growth of Curvularia sp. In oil palm seedlings. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *24*(4), 25. https://doi.org/10.1007/s44447-025-00022-x

Widiyatmoko, B., Imai, K., & Kourogi, M. (2005). *Optical frequency Comb Generator* (Nos. MW2005-47, OPE2005-31; pp. 23–27). IEICE (Institute of Electronics, Information and Communication Engineers).

Widiyatmoko, B., Imai, K., & Kourogi, M. (2006). *Low driving voltage and high finesse waveguide type optical frequency comb generator for optical frequency measurement.* Proceeding of The 2nd Indonesia Japan Joint Scientific Symposium (IJJSS) 2006.

Widiyatmoko, B., Imai, K., & Kourogi, M. (2007a). *Optical comb generator and optical modulator* (Patent No. JP3891977B2).

Widiyatmoko, B., Imai, K., & Kourogi, M. (2007b). *Optical frequency measuring system* (Patent No. JP3989470B2).

Widiyatmoko, B., Imai, K., Kourogi, M., & Ohtsu, M. (1999). Second-harmonic generation of an optical frequency comb at 155 μm with periodically poled lithium niobate. *Optics Letters*, *24*(5), 315. https://doi.org/10.1364/OL.24.000315

Widiyatmoko, B., & Kourogi, M. (2006). *Optical frequency comb generator based optical frequency counter*. 18–25.

Widiyatmoko, B., Kourogi, M., & Imai, K. (2004). *Generation of Multiwavelength sources using Optical Comb Generator*. The 7th International Conference Quality in Research (QIR).

Widiyatmoko, B., Kourogi, M., & Ohtsu, M. (1999). Linking two optical frequency combs by heterodyne optical phase locking between diode lasers at 2.6-THz frequency-difference. *IEEE Photonics Technology Letters*, *11*(4), 460–462. https://doi.org/10.1109/68.752548

Widiyatmoko, B., Mizawa, Nakayama, Nakamoto, & Kourogi, M. (2007). *Waveguide Type Optical Comb Generator* (Patent No. JP3902047B2).

Widiyatmoko, B., Mizawa, S., Nakayama, Y., Nakamoto, & Kourogi, M. (2006). *Manufacturing method of optical comb generator* (Patent No. JP3730534B2).

Widiyatmoko, B., Mizawa, S., Nakayama, Y., Nakamoto, & Kourogi, M. (2007). *Optical communication system and receiver* (Patent No. JP3943426B2).

Widiyatmoko, B., Nakayama, Y., Mizawa, S., Nakamoto, & Kourogi, M. (2006). *Optical Waveguide Type Optical Modulator and Optical Waveguide Type Optical Frequency Comb Generator* (Patent No. JP3758996B2).

Widiyatmoko, B., Pardono, B., & P., S. (1988). Sistem komunikasi video dengan saluran serat optik. *Jurnal Telaah*, *XI*(12).

Widiyatmoko, B., Puranto, P., & Akbar, Z. (2007). *Development of an Optical Spectrum Analyzer in 1550 nm of Wavelength based on Fabry-Perot Tunable Filter*. A06.1-A06.4.

Widiyatmoko, B., & Rofianingrum, M. Y. (2021). Study of Microbending Loss Single Mode Optic Fiber in Sand Powder Against Pressure. *Journal of Technomaterials Physics*, *3*(1), 65–73. https://doi.org/10.32734/jotp.v3i1.5549

Widiyatmoko, B., Rofianingrum, M. Y., Hanto, D., Ahmad Prakosa, J., Mulyanto, I., Khamimatul Ula, R., Bayuwati, D., & Setiono, A. (2022). Macrobending loss in wrapped fiber optic for load detections. *Applied Optics*, *61*(13), 3786. https://doi.org/10.1364/AO.451825

Widiyatmoko, B., Setiono, A., Retnowati, A., Hanto, D., Bayuwati, D., Mulyanto, I., Pratomo, H., Kartolo, S., Ilyas, M., Oktalira, F. T., Yuliani, Y., Priwiratama, H., Pradana, M. G., Ula, R. K., & Suryadi. (2022). *Metoda dan Alat Iradiasi Foton untuk Pengendalian Jamur dan Mikroorganisme Parasit pada Tanaman*.

Widiyatmoko, B., Waluyo, T. B., & Siregar, M. R. T. (2007, December). *A mm-Wave signal generation using laser Diode: Preliminary study*. International Proceeding "The 10th International Conference on Quality in Research (QIR), Faculty of Engineering, University of Indonesia, Depok.

Widiyatmoko, B., & Yunaningsih, R. (2004). Broadband Second Harmonic Generation of Optical Frequency Comb using Selective Phase_matching Method in Potassium Titanyl Phosphate. *Physics Journal of the Indonesia Physical Society*, *A7*, 0205–1.

Widiyatmoko, B., Yunaningsih, R., Hamidah, E., Suheri, A., P.S., S., & Pardono, B. (1998). Perbaikan Stabilitas dan kemampuan tala Laser Diode dengan Teknik Umpan Balik Kisi Kisi Optik. *Journal Instrumentasi*, (33), 1–5.

Widiyatmoko, B., Yuwono, R. Y., & Hamidah, E. (2001). Pembangkit Jumlah Frekuensi antara Laser Kontinyu dengan Sisiran Frekuensi Optik pada Panjang Gelombang 1550 nm. *Jurnal Himpunan Fisika Indonesia*, *4*(0203).

Wong, N. C. (1990). Optical frequency division using an optical parametric oscillator. *Optics Letters*, *15*(20), 1129. https://doi.org/10.1364/OL.15.001129

Ye, J., & Cundiff, S. T. (Eds.). (2005). *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications*. Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/b102450

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

1.	Bagian dari Buku Internasional	2 buah
2.	Jurnal Internasional	42 buah
3.	Jurnal Nasional	27 buah
4.	Prosiding Internasional	63 buah
5.	Prosiding Nasional	39 buah

Kekayaan Intelektual

1.	Paten Internasional	
	a. Terdaftar	2 buah
	b. Tersertifikasi	17 buah
2.	Paten Nasional	
	a. Terdaftar	30 buah
	b. Tersertifikasi	17 buah
3.	Hak Cipta	3 buah

Kerjasama

1.	Transaksi Lisensi	2 buah

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

DAFTAR PUBLIKASI

Bagian dari buku Internasional

1. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.**,and M.Ohtsu. The cavity-enhanced optical-frequency comb generator and its applications. Academic press, Vol 40, ISBN 0-12-475987, ISSN: 1079-4042/01, Cavity-enhanced spectroscopies, Chapter 9, pp 297–319, 2002.
2. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, and M.Ohtsu. Generation of expanded optical frequency combs. Springer, Vol TAP 79, ISBN 3-540-67694-5 ISSN: 0303-4216, Frequency measurement and control, Chapter IV, pp 315–334, 2000.

Jurnal Internasional

3. **Widiyatmoko, B.** and Rietje Yunaningsih. Broadband Second Harmonic of Optical Frequency Comb using Selective Phase-matching Method in Potassium Tytanyl Phosphate. Physics Journal of the Indonesia Physical Society Volume A7(2004) pp. 0205-1.
4. Edi Kurniawan, Hendra G. Harno, Sensus Wijonarko, **Widiyatmoko, B.,** Dwi Bayuwati, Purwowibowo. Tatik Maftukhah. Variable-Structure Repetitive Control For Discrete-Time Linear Systems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (AMCS), Vol. 30, No.2 http://dx.doi.org/10.34768/amcs-2020-0016.

5. Nursidik Yulianto, Purnomosidi and **Widiyatmoko, B.**. Temperature Effect towards DFB Laser Wavelength on Microwave Generation Based on Two Optical Wave Mixing. International Journal of Optoelectronic Engineering Vol 5/ No:2, pp: 21–27, 2015.

6. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Ohtsu. Generation and Application of an Optical Frequency comb. Journal of the Communication Research Laboratory Vol 46, No3, pp 397–401, Nov 1999.

7. K.Imai, M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.** and M.Ohtsu., 12 THz frequency difference measurement and noise analysis of an optical frequency comb in optical fiber., IEEE.J.Quantum Electronics, Vol.35, No.4, April 1999.

8. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Ohtsu. Continuous tuning of an electricaally tunable external cavity semiconductor laser. Optics letters Vol 15, No 16, pp. 1165–1167 August 2000.

9. Ishibashi, M.Kourogi, K.Imai, **Widiyatmoko, B.**, A.Onae and H.Sasada. Absolute frequency measurement of the saturated absorption lines of methan at the 1.66 um region. Optics communications Vol.161, pp 223–226 (1999).

10. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Ohtsu. Accurate relative frequency cancellation between two independent lasers. Opt.Lett. Vol 24, No1, pp.16–18 January 1, 1999.

11. K.Imai, Y.Zhao, M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.** and M.Ohtsu. Accuracy of optical frequency comb generation in optical fiber. Optics.Letters. Vol 24. No.4, February 15,1999.

12. **Widiyatmoko, B.**,M.Kourogi, K.Imai and M.Ohtsu. Second harmonics generation of optical frequency comb at 1.55um using Periodically poled lithium niobate. Optics.Letters. Vol 24, No5, March 1, 1999.

13. **Widiyatmoko, B.**, M.Kourogi, and M.Ohtsu. Linking of two optical frequency comb by heterodyne optical phase locking. IEEE Photonics Technology Letters, Vol.11, No. 4. April 1999.

14. **Widiyatmoko, B.** and Rietje Yunaningsih. Frequency-difference Measurement of 22 THz separated lasers using second Harmonic of Optical Frequency Comb. Physics Journal of the Indonesia Physical Society Volume A7 (2004) pp 0106-1.

15. FGAK Bawahab, E Kurniawan, E Yuniarti, **Widiyatmoko, B.,** D Bayuwati. Performance evaluation and mathematical analysis of direct sequence and frequency hopping spread spectrum systems under wideband interference. International Journal of Advances and Intelligent Informatics 4 (3), 180–191.

16. S.J. Lee, **Widiyatmoko, B.**, M.Kourogi and M.Ohtsu., Ultrahigh Scanning Speed Optical Coherence Tomography., Japan Journal of Applied Physics, Vol.40 (2001) pp. L878–L88.

17. D Irawan, K Ramadhan, F Fitmawati, D Hanto, **Widiyatmoko, B.,** High-Performance of Star-Photonics Crystal Fiber Based on Surface Plasmon Resonance Sensor., Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP) 60 (9), 727–733.

18. D Defrianto, T Saktioto, N Hikma, Y Soerbakti, D Irawan, O Okfalisa, Dwi Hanto and **Widiyatmoko, B.,** External Perspective of Lung Airflow Model Through Diaphragm Breathing Sensor Using Fiber Optic Elastic Belt., Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP) 60 (7), 561–566.

19. D Irawan, K Ramadhan, S Saktioto, F Fitmawati, D Hanto, **Widiyatmoko, B..,** Hexagonal two layers-photonics crystal fiber based on surface plasmon resonance with gold coating biosensor easy to fabricate., Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 28 (1), 146.

20. **Widiyatmoko, B.**, MY Rofianingrum, D Hanto, JA Prakosa, I Mulyanto, Andi Setiono, Rini Khamimatul Ula, Dwi Bayuwati', Macrobending loss in wrapped fiber optic for load detections., Applied Optics 61 (13), 3786–3792.

21. D Hanto, H Adinantaa, Rini K Ula, Suryadi, Mefina Y. Rofianingruma, I Imam Mulyanto, and **Widiyatmoko, B.,** A Simple and Cost-Effective Physical Distancing Violation Detector Using a Rotating Time of Flight Lidar., Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol 12 (3), 1073–1079.

22. **Widiyatmoko, B.**, Mefina Y. Rofianingrum, H. Ginting, AM Sibuea., Study of Microbending Loss Single Mode Optic Fiber in Sand Powder Against Pressure., Journal of Technomaterial Physics 3 (1), 65–73.

23. Dwi Hanto, Hari Pratomo, Agitta Rianaris, Andi Setiono, Sartika Sartika, Mohamad Syahadi,Eko Joni Pristianto, Dayat Kurniawan, Dwi Bayuwati, Hendra Adinanta, Suryadi,Miftachul Hadi, Imam Mulyanto, Irwan Rawal Husdi, Rini Khamimatul Ula, **Widiyatmoko, B.**, and Edi Kurniawan., Time of Flight Lidar Employing Dual-Modulation Frequencies Switching for Optimizing Unambiguous Range Extension and High Resolution., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 72, PP 1–8, Nop 2023.

24. A Setiono, MI Afandi, H Adinanta, MY Rofianingrum, I Mulyanto, **Widiyatmoko, B..,** Wire Extensometer Based on Optical Encoder for Translational Landslide Measurement., International Journal on Advanced Science, Engineering & Information, 2023.

25. Andi Setiono, Dwi Hanto, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Irwan Rawal Husdi, Dwi Bayuwati, **Widiyatmoko, B..,** Microbending on a single-mode fiber-optic induced by sand grains for load detection., AIP Conference Proceedings, no 2906 2023/11/7.

26. Toto Saktioto, Defrianto Defrianto, Nurfi Hikma, Yan Soerbakti, Syamsudhuha Syamsudhuha, Dedi Irawan, Okfalisa Okfalisa, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto., Airflow vibration of diaphragmatic breathing: model and demonstration using optical biosensor., TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control) 21 (3), 667–674.

27. Nelfyenny Nelfyenny, Dwi Bayuwati, Suryadi Suryadi, Irwan Rawal Husdi, Imam Mulyanto, Aditya Dwi Prasetio, Dedi Irawan, **Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono., Optical laser-generated electricity for powering tilt-meter sensor., International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088–8708), Vol 14, No 6.

28. Hari Pratomo, Sulistyo Sulistyo, Dwi Hanto, Surip Kartolo, Reza Abdu Rahmana, **Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono., Evaluating Deformer Shape Effects on Macrobending-Based Fiber Optic Weight Sensor., International Journal of Microwave & Optical Technology, Vol 19, No 4.

29. D Irawan, K Ramadhan, S Saktioto, F Fitmawati, D Hanto, **Widiyatmoko, B..,** Ultra low loss and dual polarized SPR-PCF sensor based on refractive index., Bulletin of Electrical Engineering and Informatics 12 (6), 3325–3334.

30. B Meyzia, T Emrinaldi, N Wanara, D Hanto, **Widiyatmoko, B.,** A Rianaris, Mohamad Syahadi, Haryana Mohd Hairi., Novel approach peak tracking method for FBG: Gaussian polynomial technique., Science, Technology and Communication Journal 4 (3), 69–78.

31. H Pratomo, Sulistyo, A Setiono, **Widiyatmoko, B.**, RA Rahman., Mechanical and Vibrational Characterization of Reinforced Composite Rubber/Calcium Carbonate for Compressive Optical Sensor Housing., Annales de Chimie Science des Matériaux 48 (3), Vol:14, No;3, 2024.

32. **Widiyatmoko, B.**, R Yunaningsih., Frequency_difference Measurement of 22 THz Separated Lasers using Second Harmonic of Optical Frequency Comb., Physics Journal IPS A7 (2004) 0106.

33. **Widiyatmoko, B.**, R Yunaningsih., Broadband Second Harmonic Generation of Optical Frequency Comb using Selective Phase_ matching Method in Potassium Titanyl Phosphate., Physics Journal IPS A7 (2004) 0205.

34. K Imai, **Widiyatmoko, B.**, M Kourogi, M Ohtsu., 12-THz Frequency Difference Measurements and Noise Analysis of an Optical Frequency Comb in Optical Fibers., IEEE Journal of Quantum Electronics-Institute Electrical and Electronic Engineers Vol: 35No:4, Pp:559–564, 1999.

35. M. Kourogi; **Widiyatmoko, B.**, Y. Takeuchi; M. Ohtsu, Limit of optical-frequency comb generation due to material dispersion., IEEE Journal of Quantum Electronics Volume: 31 Issue: 12, pp 2120 – 2126, Dec 1995. **DOI:** 10.1109/3.477736.

36. **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, Mefina Y Rofianingrum, Nelfyenny, Agitta Rianaris, Hari Pratomo, Rini K Ula, Dwi Bayuwati, Suryadi, Imam Mulyanto, Muhammad Ilyas, Fitria T Oktalira, Hari Priwiratama, Mahardika G Pradana, Atik Retnowati, Andi Setiono., Irradiation as a strategy for controlling the growth of *Curvularia* sp. in oil palm seedlings., Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences *24*(4), 25.

37. Dwi Hanto, Asep Hapiddin, Andi Setiono, Agitta Rianaris, Mohamad Syahadi, Hari Pratomo, Surip Kartolo, Suryadi, **Widiyatmoko, B.,** Investigation and compensation of distance error caused by avalanche gain of a photodetector in an infrared laser rangefinder., Applied Optics *64*(14), 3965–397.

38. Dedi Irawan, Saktioto Saktioto, Azhar Azhar, Sutoyo Sutoyo, Muhammad Sahal, Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, The use of fiber bragg grating coated with polyimide for CO 2 gas sensor, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI) ISSN: 2089-3191, e-ISSN: 2302-9285, DOI: https://doi.org/10.11591/eei.v14i5.9283.

39. Dedi Irawan, Saktioto, Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, Sutoyo., High Sensitivity CH4and CO2Gas Sensor Using Fiber Bragg Grating Coated with SingleLayer Graphene., Science and Technology Indonesiae-ISSN:2580-4391p-ISSN:2580-4405, Vol. 9, No. 3, Juli 2024.

40. Muhammad Bagoes Anargiansyah, Ferdyan Rahmadani Adhi Pramudya, Bilqis Regita Pratiwi Fayensi, Mefina Yulias Rofianingrum, **Widiyatmoko, B.**, Muhimmatul Khoiro., Development of a Chitosan-Coated Fiber Optic Sensor for the Detection of Cadmium Ions in Palm Oil., International Journal of Microwave & Optical Technology Vol. 20, No.6, November 2025.

41. Irwan Rawal Husdi, Andi Setiono, Hari Pratomo, Imam Mulyanto, Mohamad Syahadi, **Widiyatmoko, B**., Retno Wigajatri Purnamaningsih, Sensitivity Enhancement of Fiber Bragg GratingBased Hydrophone Using an Acoustic Resonator for Underwater Sensing., International Journal of Technology, 2025, Vol 16, Issue 6, p1944., DOI: 10.14716/ijtech.v16i6.7502.

42. Anisa Alya Syafri, **Widiyatmoko, B.,** Dwi Hanto, Yan Soerbakti, Reeky Fardinata, Dedi Irawan, Rina Amelia., Wearable FBG Strain Flexibility In Supplemental Oxygen-assisted Respiratory Examination., Journal of Applied Science and Engineering, Volume 28 Issue 11 (2025/11) Pp. 2339–2347; https://doi.org/10.6180/jase.202511_28(11).0005.

43. Tengku Emrinaldi, **Widiyatmoko, B.,** Bunga Meyzia, Sumiaty Ambran, Saktioto Saktioto, Mohamad Syahadi, Agitta Rianaris, Dwi Hanto, Optimizing signal conversion in uniform FBGs with InGaAs photodetectors for medical sensors, TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control, Vol 23, No 4 , 2025, DOI: http://doi.org/10.12928/telkomnika.v23i4.26164

44. Andi Setiono, Hari Pratomo, Imam Mulyanto, Dwi Bayuwati, Irwan Rawal Husdi, Dwi Hanto, Widiyatmoko, B., Macrobending-based optical fiber sensor with spring-enhanced amplification for Weigh-In-Motion applications, Optical Fiber Technology, Volume 100, September 2026, 104634.

Jurnal Nasional

45. **Widiyatmoko, B.,** Budi Pardono, Soemartono P. Sistem komunikasi Video dengan saluran serat optic. Telaah Jilid XI Nomor 1, 2, Tahun 1988.

46. **Widiyatmoko, B.**, Rietje Y. Yuwono and Suprapedi. Time delay optimization for feed forward accurate relative frequency cencelation between two independence lasers. Majalah TELAAH, Jilid XXII Nomor: 1–2, Tahun 2001, pp 1–7. **ISSN: 0125-9121**

47. **Widiyatmoko, B.**, Endang Hamidah, Agus Suheri dan Rietje Yunaningsih. Wide span and Efficient optical frequency comb through intra cavity second harmonics generation. Journal Instrumentasi Vol 30 No 2, Juli–Desember 2006, pp63–66. ISSN 0125-9202.

48. **Widiyatmoko, B.**, Mefina Yulias Rofianingrum, Kerista Sebayang, Grecia Monalisa Manullang. Dynamic Characterization of Macrobending Loss Optical Fiber-Based Load Sensor. Journal of Technomaterials Physics Vol. 03, No. 01, 2021 | 74–82 ISSN: 2656-0747 e-ISSN: 2656-0757, https://doi.org/10.32734/jotp.v3i1.5543

49. **Widiyatmoko, B.** Mefina Yulias Rofianingrum, Herli Ginting; Ayu Monawit Sibuea. Study of Microbending Loss Single Mode Optic Fiber in Sand Powder Against Pressure**.** Journal of Technomaterials Physics Vol. 3, No. 1, 2021 | 65–73 ISSN: 2656-0747 e-ISSN: 2656-0757. https://doi.org/10.32734/jotp.v3i1.5549

50. **Widiyatmoko, B.**, Rietje Yunaningsih dan Endang Hamidah. Pembangkit jumlah-frekuensi antara laser kontinyu dengan optical frequency comb pada panjang gelombang 1.55mm. Jurnal Himpunan fisika Indonesia Volume A4 (2002) 0203.

51. **Widiyatmoko, B.**, Rietje Yunaningsih dan Agus Suheri. Usulan tomografi optik koheren tanpa system mekanik bergerak menggunakan pulsa optik dari pembangkit optical frequency comb: prinsip dasar. Jurnal Himpunan fisika Indonesia Volume A4 (2002) 0204. ISSN: 0854-3046.

52. Rietje Y Yuwono, **Widiyatmoko, B.,** Budi pardono, Agus Suheri dan Endag Hamidah. Reduksi Lebar Spectrum Laser dengan Teknik Umpan Balik Optik Menggunakan resonator optik Fabry-Perot. Majalah TELAAH jilid XVIII, Nomor:2, 1997, Hal 1–9. ISSN 0125-9121.

53. **Widiyatmoko, B.**, Rietje Y. Yuwono, Rika Suriamah dan Budi Pardono. Pembangkit harmonik kedua efisiensi tinggi dari laser CW-Nd-YAG menggunakan kristal MgO-LiNbO3. Jurnal TELAAH, Jilid XIX Nomor: 1–2, Tahun 1998, pp 27–31. **ISSN: 0125-9121.**

54. **Widiyatmoko, B.**, Rietje Yunaningsih, Endang Hamidah, Agus Suheri, Suemartono P.S., dan Budi Pardono. Perbaikan Stabilitas dan kemampuan tala Laser Diode dengan Teknik Umpan Balik Kisi Kisi Optik. Journal Instrumentasi No 33 April 1998, pp 1–5. ISSN 0125-9202.

55. **Widiyatmoko, B..** Pengukuran stabilitas frekuensi laser diode menggunakan Pencacah Frekuensi Optik. Jurnal Fisika, himpunan Fisika Indonesia Vol. 8, No. 2, Desember 2008. ISSN 0854-3046, terakreditasi Nomor: 242/Akred-LIPI/P2MBI/05/2010, Hlm. 1–7.

56. Andi Setiono, Dwi Hanto, dan **Widiyatmoko, B.** Investigasi Sensor Serat Optik untuk Aplikasi Sistem Pengukuran Berat Beban Berjalan (Weight in Motion System. TELAAH Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Volume 31(*1*) 2013: 81–86, ISSN/ISBN/IBSN: 0125-9121.

57. Prabowo Puranto, Prawito, **Widiyatmoko, B.**, dan Suryadi. Pengembangan Inklinometer Portabel untuk Pemantauan Gerakan Horisontal Tanah Lapisan Bawah Permukaan Menggunakan IC MEMS Digital ADIS 16209. Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Telaah. Vol 31 No 2, Edisi November 2013 ISSN/ ISBN/**IBSN**: 0125-9121. Akreditasi No. 522/Akred/ P2MI-LIPI/04/2013

58. Tomi Budi Waluyo, Dwi bayuwati dan **Widiyatmoko, B..** Karakterisasi Rugi Lengkungan Serat Optik Dengan Optical TIME Domain Reflectometer Untuk Penggunaannya Sebagai Sensor Pergeseran Tanah. Jurnal Himpunan Fisika Indonesia Vol 09/ No:2, pp: 34–42, tahun 2009.

59. Prabowo Puranto, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**. Pembuatan dan Uji Coba Data Logger Berbasis Mikrokontroller ATMEGA 32 untuk Monitoring Pergeseran Tanah. Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia. Vol. 10 No.2 Desember 2010. ISSN 0854-3046. No Akreditasi: 242/Akred-LIPI/P2MBI/05/2010

60. Dwi Hanto, Andi Setiono, Iyon T. Sugiarto, Thomas B. Waluyo, dan **Widiyatmoko, B.** Perancangan Alat Ukur Pemilih Span untuk Mengukur Daya Optik. Jurnal Telaah Vol.32/No:2, pp: 52–55, tahun 2016.

61. Andi Setiono, Dwi hanto, **Widiyatmoko, B.** dan Imam Mulyanto. Desain Sensor Beban Kendaraan Menggunakan Teknik Mikrobending Serat Optik. Jurnal TELAAH Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Vol..30/No:2, pp: 33–36, tahun 2012.

62. Andi Setiono, Dwi Hanto and **Widiyatmoko, B.**. Investigasi Sensor Serat Optik untuk Aplikasi Sistem Pengukuran Berat Beban Berjalan (Weight in Motion System). TELAAH Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Vol 31/ No:1, pp: 81–86, tahun 2013.

63. Andi Setiono, Probowo Puranto, dan **Widiyatmoko, B..,** Pembuatan Dan Uji Coba Data Logger Berbasis Mikrokontroler Atmega32 Untuk Monitoring Pergeseran Tanah., Jurnal Himpunan Fisika Indonesia Vol 10/ No:2, pp: 82–94, tahun 2010.

64. Andi Setiono, Arif Anwar dan **Widiyatmoko, B..** Implementasi Ekstensometer untuk monitoring pergeseran permukaan tanah disekitar jalur rel kereta api pada lokasi KM 107 Purwakarta. Jurnal Penelitian transportasi darat, Vol 18. No. 2, pp109–116, tahun 2016.

65. **Widiyatmoko, B.,** Dwi Hanto, dan Prabowo Puranto. Pengembangan Sistem Pengukuran Gejala Fisis Longsor Sistem Elektronik Dan Optik. Berkala Fisika, Jurnal Fisika Teori, Eksperimen dan Fisika Aplikasi, Vol.13, No.2, 2010. pp. B16.

66. TB Waluyo, D Bayuwati, **B Widiyatmoko**. Pembuatan Dan Karakterisasi Sumber Dan Detektor Cahaya Untuk Ekstensometer Serat Optik. Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia 10 (1), 56–67.

67. WP Tresna, D Hanto, **B Widiyatmoko**. Rancangan sensor pergeseran tanah berbasis serat optik untuk deteksi longsor: Studi awal. Widyariset *13*(3), 117–121.

68. Cris Anthony, **B Widiyatmoko**, Asep Yuyu, BEF da Silva. Penstabilan Daya Dioda Laser Secara Otomatis Sebagai Sumber Cahaya Pada Sensor Optik. SAINSTECH: Jurnal penelitian dan pengkajian sains dan teknologi. ISTN Jilid 22, No1, 2012, ISSN: 1410-7104.

69. D Irawan, D Hanto**, Widiyatmoko, B..,** Investigation Of Transmission And Reflection Of Single Mode Fiber Bragg Grating., Jurnal Penelitian Pendidikan IPA *10*(6), 369–376, 2023.

70. SF Nasution, H Harmadi, S Suryadi, **Widiyatmoko, B..,** Development Of River Flow And Water Quality Using IOT-

Based Smart Buoys Environment Monitoring System., JURNAL ILMU FISIKA| UNIVERSITAS ANDALAS *16*(1), 1–12, 2023.

71. RS Putri, E Iriawan, **Widiyatmoko, B.**, E Rayhana., Perancangan Alat Timbangan Hewan Ternak Menggunakan Sensor Fiber Optic dan Software Arduino Ide., Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi *33*(3).

Prosiding Internasional

72. Onae, K.Okumura, J.Yoda, K.Nakagawa, A.Yamaguchi, M.Kourogi, K.Imai and **Widiyatmoko, B..** Towards an accurate frequency standard at 1.5 um based on acetylene overtone transition. Conference on Precision Electromagnetic measurement" (IEEE Trans Instrumentation and measurement, Vol.48, No.2, April 1999.

73. M.Kourogi, J.M. Lee, **Widiyatmoko, B.**, and M.Ohtsu., Ultra-high scanning speed optical coherence tomography using optical frequency comb generators., Technical digest, Conference on Laser and Electro Optics (CLEO) 2001, paper number CWN-3, Baltimore, USA, 2001.

74. Rika Suriamah, **Widiyatmoko, B.** and Masbah R.T. Siregar., A Proposed Fabry-Perot Tunable Filter Based on Photonics and materials Component Analyzer., Proceeding of the IWOFAM-3th IWONN conference, Halong, Vietnam, Desember 6–8, 2006.

75. K. Imai, M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.** and M.Ohtsu. Beat signal measurement of 12 THz separated lasers by self phase modulation in optical fiber. Conference on laser and electro-optics (CLEO'98) San Francisco, May 1998, paper number CthY4.

76. Chikako Ishibasi, K.Suzumura, H.Sasada, M.Kourogi, K.Imai, **Widiyatmoko, B.** and A.Onae**.** Precise transition frequency of CH4 in the 1.66um region. International symposium on molecular spectroscopy, International symposium on molecular spectroscopy, Ohio, USA June 2000, paper number ME12.

77. **Widiyatmoko, B.,** Tomi Budi Waluyo and Masbah R.T. Siregar. A mm-Wave signal generation using laser Diode: preliminary study. International Proceeding "The 10th International Conference on Quality in Research (QIR)" ISSN 1411-1-284, Paper number SSE-01. Faculty of Engineering, University of Indonesia, Depok 4–6 December 2007.

78. IT Sugiarto, N Yudasari, **B Widiyatmoko**. Tunability of microwave source based on laser diode using heterodyne technique. AIP Conference Proceedings Vol 1746/No:1, pp: 020015, tahun 2016.

79. Iyon Titok Sugiarto, **Widiyatmoko, B.**, Achmad Munir., Preliminary Study for Microwave Generator: Experimental Characterization of Stability of Distributed Feedback-based Laser Diode., Procedia Technology Volume 11, 2013, hlm.950–954 DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.280 ISSN/ISBN/IBSN: ISBN: 978-1-63266-347-4.

80. B.Y.B. Widhianto, **Widiyatmoko, B.**, E Kurniawan, S Suryadi, M Hadi. Nonlinearity detection of laser frequency tuning for improving spatial resolution in OFDR. Journal of Physics: Conference Series *1191*(1), 012006.

81. E Kurniawan, N Azura, **Widiyatmoko, B.**, D Bayuwati., Design of Causal Compensator for Dual Periods Repetitive Control System., 2018 International Conference on Computer, Control, Informatics and its application, DOI 10.1109/IC3INA.2018.8629546

82. Nelfyenny Nelfyenny, Raditya Sebastian, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Qomaruddin Qomaruddin, **Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono., Laser-Powered Extensometer for Soil Displacement Monitoring., 2024 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)

83. **Widiyatmoko, B.**, M Ilyas, FT Oktalira, D Hanto, H Pratomo, H Priwiratama, A Setiono., Towards a laser-based irradiation system for attacking Curvularia sp.: Preliminary results., IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol.1308, No.1, 2024

84. S Saktioto, D Defrianto, N Hikma, Y Soerbakti, D Irawan, O Okfalisa, **Widiyatmoko, B.**, D Hanto., External perspective of lung airflow model via diaphragm breathing sensor using fiber optic belt., The 4th Al-Noor International Conference for Science and Technology *4*(1), 1014

85. Edi Kurniawan, Enggar B Pratiwi, Hendra G Harno, Jalu A Prakosa, Purwowibowo Purwowibowo, Hendra Adinanta, **Widiyatmoko, B.**, Rini K Ula, Dwi Hanto, Low-order sliding mode repetitive control for uncertain linear systems perturbed by band-limited periodic disturbances., Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 237 No.9, Page:1558–1572

86. Dwi Hanto, Sartika Sartika, Mefina Yulias Rofianingrum, **Widiyatmoko, B.**, Study on the time of flight optical ranging by using direct modulation of the laser diode., AIP Conference Proceedings, Vol: 2652, 2022/11/14

87. Sensus Wijonarko, Tatik Maftukhah, Dadang Rustandi, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Bernadus H Sirenden, Jalu A Prakosa, Asep Rahmat Hidayat, Dwi Mandaris, Himma Firdaus, Siddiq Wahyu Hidayat., Empirical formulas between outdoor temperature and humidity,. IEEE proceeding, 2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE) pp. 1–6.

88. Jalu A Prakosa, **Widiyatmoko, B.,** Andi Setiono, Mefina Y Rofianingrum, Tatik., Development of monitoring techniques and validation of the acidity level of biofloc pond water for optimizing tilapia aquaculture., IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol:1017, No: 1, Pp: 012006, IOP Publishing

89. Dwi Hanto, Mohammad Arif Rahmatulloh, Eko Joni Pristiyanto, Dayat Kurniawan, Agitta Rianaris, Hari Pratomo, Dedi Irawan, Saktioto Saktioto, **Widiyatmoko, B..,** Sweep frequency modulator using voltage-controlled oscillator for development of incoherent FMCW optical ranging system., AIP Conference Proceedings, Vol.3069, No.1, 2024.

90. Dwi Bayuwati, Suryadi Suryadi, Hendra Adinanta, Prabowo Puranto, Andi Setiono, Imam Mulyanto, **Widiyatmoko, B.**, Edi Kurniawan., Testing of an opto-electric landslide sensor around a toll road-bridge., AIP Conference Proceedings *2652*(1), 2022

91. TG Chandra, I Mulyanto, D Bayuwati, **Widiyatmoko, B.**, E Kurniawan., An investigation on the error measurements of a ratiometric-macrobending based fiber optic inclinometer with left and right angle tilt sensing capability., AIP Conference Proceedings *2256*(1), 2020

92. **Widiyatmoko, B.,** TB Waluyo, MRT Siregar., A mm-wave signal generation using laser diode: preliminary study., Proc. of the 10th International Conference on Quality In Research (QIR), 2007.

93. H Pratomo, S Sulistyo, D Hanto, M Syahadi, D Bayuwati, I Mulyanto, **Widiyatmoko, B.** and Andi Setiono., Macrobending loss in fiber optic wrapped on rubber-spring wire structure under static load-pressure., Journal of Physics: Conference Series *2596*(1), 012023.

94. I Mulyanto, D Hanto, MY Rofianingrum, RK Ula, A Setiono, D Bayuwati, **B,Widiyatmoko.,** Development of a water level monitoring system in a sluice units of flood handling using laser at wavelength 905 nm., AIP Conference Proceedings *2652*(1), 2022.

95. AR Pertiwi, S Saktioto, **Widiyatmoko, B.,** D Hanto., Analysis of pressure distribution in cylindrical tube fluid flow using a fiber Bragg grating., Indonesian Physics Communication (2), 109–114

96. M Jauhar Kholili, Jalu A Prakosa, S Sumowidagdo, S Agmal, **Widiyatmoko, B.**, H Pratomo, R Sadikin, I Putu Susila., Review And Design Of Muon Detector For Monitoring The Building Material Crack For The Earthquake-Resistant House In Indonesia., AIP Conference Proceedings *2913*(1), 2023.

97. I Mulyanto, D Hanto, H Pratomo, A Setiono, D Bayuwati, **Widiyatmoko, B.,** Development Of Water Turbidity Sensor Using Laser Diode/Photodiode Pair At Wavelength Of 905 nm., AIP Conference Proceedings *2906*(1).

98. M Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, T Enami, M Ohtsu., Frequency-difference measurement using an optical-frequency comb generator., Conference on Lasers and Electro-Optics, 1995, paper number: CTuI7.

99. D Bayuwati, I Mulyanto, S Suryadi, A Setiono, **Widiyatmoko, B..,** Investigation on fiber optic inclinometer for inclination measurement based on SMS fiber., AIP Conference Proceedings *2906*(1).

100. A Setiono, **Widiyatmoko, B.**, RW Purnamaningsih., Optical response characteristics of strained uniform fiber Bragg grating using laser diode., Proceeding of SPIE, International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2014) Vol.9444, pp. 159–162.

101. K Imai, M Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, M Ohtsu., Beat signal measurement of 12-THz separated lasers by using self-phase-modulation in optical fiber., Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Conference Edition. 1998 Technical Digest Series, Vol. 6 (IEEE Cat. No. 98CH36178), pp. 472–473.

102. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, and M.Ohtsu. Frequency difference measurement using an optical frequency comb generator.−Technical digest, Conference on Laser and Electro Optics (CLEO) 1995, paper number Ctu-17, Baltimore, USA, 1995.

103. M.Kourogi, K.Imai, **Widiyatmoko, B.,** and M.Ohtsu. Expansion of optical frequency combs by self phase modulation. The 5th symposium on Application and control of laser atomic oscillator. Japanese Applied Physics Society, paper number 5–3, Tokyo 1997.

104. **Widiyatmoko, B.**, K,Imai and M.Kourogi. Optical Comb Generator. IEICE Technical report MW2005-47, OPE2005-31., Pp.23–27, Invited Lecture.

105. **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Kourogi. Low driving voltage and high finesse waveguide type optical frequency comb. Proceeding of The 2nd Indonesia Japan Joint Scientific Symposium (IJJSS) 2006, Paper number IJJSS2006-221. ISBN: 979-15263-1-1.

106. **Widiyatmoko, B.,** M.Kourogi and M.Ohtsu. Optical frequency Comb: Generation, Expansion and Application. Proceedings of the IECI Japan, Workshop 2000, ISSN 1344-7491.

107. **Widiyatmoko, B.**. Optical Frequency Comb Generator as optical source for ultra high scanning speed opticalcoherence tomography. Proceedings of the IECI Japan, Workshop 2001, ISSN 1344-7491.

108. **Widiyatmoko, B..** Aplication of Optical Frequency Comb Generator in Optical Communication. Proceedings of the IECI Japan, Workshop 2003, pp 43–46, ISSN 1344-7491.

109. **Widiyatmoko, B.** and M.Kourogi. Optical frequency comb generator based optical frequency counter. Procedings 3rd International synposium on metrology & physics applications,

and Energy measurement ISMPAEM 2006, pp.18–25 ISSN 1829–6270.

110. **Widiyatmoko, B.,** M.Kourogi and K.Imai. Generation of Multi-wavelength sources using Optical Comb Generator. Proceeding of The 7th International Conference Quality in Research (QIR) 2004, ISSN 14111284.

111. **Widiyatmoko, B.,** S Lee, M Kourogi, M Ohtsu. Development of Optical Frequency Comb Generator for Accurate Difference Frequency Measurement. 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference AP-RASC'01, 53.

112. **Widiyatmoko, B.,** Prabowo Puranto, Zaenal Akbar. Development of an Optical Spectrum Analyzer in 1550 nm of wavelength based on fabry-Perot Tunable Filter. International Proceeding of the 2007 Asian Physics Symposium (APS 2007). Pp.A06.1–A06.4. ISBN 978-979-17090-1-9, Bandung 29–30 November, 2007.

113. Dwi Hanto, Andi Setiono dan **Widiyatmoko, B.**. Design Fiber Bragg grating effect on force sensor for detecting shift land attraction. Proceeding, International conference on Physics and its applications, Solo, july 14, 2010, ISBN: 979-978-3456-68-5, pp. 25–27.

114. Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Retno W. Purnamaningsih. Optical Response Characteristics of Strained Uniform Fiber Bragg Gratting Using Laser Diode. International Seminar on Photonics, Optics, and its Applications (ISPhOA 2014).

115. Andi Setiono, Dwi Hanto and **Widiyatmoko, B.**. Prototype fiber Bragg Grattings (FBG) sensor based on intensity modulation of the laser diode low frequency vibrations measurement. AIP Conference Proceedings Vol.1711/No.1, pp. 030003, tahun 2016.

116. Andi Setiono, Prabowo Puranto, Dwi Hanto and **Widiyatmoko, B.**. Analysis of fiber Brag grating responsivity in the cantilever system using ANOVA. AIP Conference Proceedings Vol.1746/No.1, pp.020009, tahun 2016.

117. S Hafiz, P Prajitno, **Widiyatmoko, B.**,. Development of voltage balancing method for series connected batteries by combination of switched capacitor and modified shunting resistor methods with series connected diodes. Journal of Physics: Conference Series *1191*(1), 012030.

118. M.Y Rofianingrum, **Widiyatmoko, B.**, E Kurniawan, D Bayuwati, I Afandi. Fiber optic load sensor using microbend-deformer. Journal of Physics: Conference Series *1191*(1), 012007.

119. M. I Afandi, H Adinanta, A Setiono, **Widiyatmoko, B.**. High resolution extensometer based on optical encoder for measurement of small landslide displacements. Journal of Physics: Conference Series *985*(1), 012007.

120. **Widiyatmoko, B.,** Rini Khamimatul Ula, Mefina Yulias Rofianingrum. Vehicle Speed Calculation Using Weigh-in-Motion Sensor Based on Fiber Optic. Advances in Social Science, Education and Humanities Research, 2021, 110–113, https://dx.doi.org/10.2991/assehr.k.210909.026, ISSN 2352-5398/ ISBN 978-94-6239-426-1

121. Jalu Ahmad Prakosa, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Sensus Wijonarko. Optoelectronics of Non-Contact Method to Investigate Propeller Rotation Speed Measurement of Quadrotor Helicopter**,** 2021 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), 2021, ISBN:978-1-6654-4147-6 https://doi.org/10.1109/ISESD53023.2021.9501542

122. Mefina Yulias Rofianingrum, Edi Kurniawan, **Widiyatmoko, B.**, Miftachul Hadi. The Effect of Bending Radius and Deformer Addition in Optical Fiber Load Sensor with Sinusoidal Configuration, AIP Conference Proceedings *AIP Conf. Proc.* 2256, 020007 (2020). https://doi.org/10.1063/5.0014661

123. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, **Widiyatmoko, B.,** Mohamad Imam Afandi, Edi Kurniawan, Suryadi. Investigation on A Macro Bending Based-Fiber Extensometer as Displacement Sensor with Light Source Modulation for Power Supply Efficiency. IOP Conf. Series: Journal of Physics. *Proc.* 2256, 020004 (2020), https://doi.org/10.1063/5.0014754

124. Edi Kurniawan, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Suryadi, Mohamad Imam Afandi, Mefina Yulias Rofianingrum, Discrete-Time Design of Model Reference Learning Control System. 2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Poland, 2019, DOI: 10.1109/MMAR.2019.8864713

125. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Suryadi, **Widiyatmoko, B.**, Edi Kurniawan, Theodore Gautama Chandra. A macrobending-based optical fiber inclinometer to measure the ground tilt in the depth which forms a positive and negative angle to the gravity axis. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1191 (2019) 012003 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1191/1/012003.

126. Sakata Shoji and **Widiyatmoko, B.**. Propose of Tsunami Early warning system using Laser tsunami Sensor. Procceding SIEM 2005, Persatuan Pelajar Indonesia Jepang.

127. Hanto, D; Waluyo, TB; Setiono, A; Ula, RK; **Widiyatmoko, B.,** Sari, AR Permata. Design of multi-wavelength optical power meter using feedback resistor combination. 2015 International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), pp. 156–159, IEEE 2015

128. Nugraha, Yayan Prima; Hanto, Dwi; Setiono, Andi; Waluyo, Tomi Budi; **Widiyatmoko, B.**. Design of instrumentation for flatness measurement of railroads. International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), pp. 160–163, IEEE 2015

129. Dwi Hanto, Ula, RK, Setiono, A; Puranto, P; Adinanta, H; Waluyo, TB; **Widiyatmoko, B.**. Comparison study between static and dynamic responses of optical fiber weight in motion sensor. IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series Vol.817, No.1, pp.12041, 2017

130. D Bayuwati, TB Waluyo, **Widiyatmoko, B.**,. Preliminary design of land displacement-optical fiber sensor and analysis of observation during laboratory and field test. International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2014) Jilid: 9444 PP: 94440Z. International Society for Optics and Photonics

131. Nurhanifiyah Azura, Edi Kurniawan, **Widiyatmoko, B.,** Dwi Bayuwati. Sliding Mode Repetitive Controller for a Plant with Time-Varying Sampling Times. IEEE International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), PP: 15–20, 2018

132. Motonobu Kourogi, Kazuiro Imai, **Widiyatmoko, B.**, Advances in electro-optic modulator based frequency combs. IEEE Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, 2005 pp. 133–134, 2005.

133. RK Ula, D Hanto, TB Waluyo, H Adinanta, **Widiyatmoko, B..** Design of micro bending deformer for optical fiber weight sensor. IOP Journal of Physics: Conference Series No.817, p: 012050, 2017.

134. D Hanto, **B Widiyatmoko**, B Hermanto, P Puranto, LT Handoko. Real-time Inklinometer Using MEMS Accelerometer. Proceeding of International Conference On Physics And Its Application For Environmetally Friendly Technology And Disaster Management, Kentingan Physics Forum, 2010.

Prosiding Nasional

135. Dwi hanto, Prabowo Puranto, Andi Setiono dan **Widiyatmoko, B.**. Pengukuran rugi rugi lengkungan serat optik ragam tunggal sebagai rancangan sensor pergeseran permukaan tanah. Prosiding Seminar ASTECHNOVA 2009, Fakultas Teknik, UGM, ISSN 2086-0005, Hal. III-65-72

136. Dwi hanto dan **Widiyatmoko, B..** Perancangan Sensor dan Antarmuka Inklinometer Waktu Nyata. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY, Purworejo 14 April 2012, ISSN: 0853-0823

137. **Widiyatmoko, B.**. Peran Ilmu Fisika Dalam Pembentukan Karakter Bangsa. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY. Purworejo, 2012.

138. **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, dan Andi Setiono, Hendra Adinanta, dan Imam Mulyanto. Rancang Bangun Extensometer untuk deteksi Pergeseran tanah. Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN 2009. ISBN 978-979-96964-6-5. Fakultas teknik Industri UII, Jogyakarta, 14 November 2009, Hlm. D63–D65.

139. **Widiyatmoko, B.,** Andi Setiono, Prabowo Puranto Dwi Hanto., Rancangan Sensor strain tanah berbasis Fiber Brag Grating untuk deteksi tanah Longsor., Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN 2009, ISBN 978-979-96964-6-5, Fakultas teknik Industri UII, Jogyakarta, 14 November 2009 Hlm. D211–D213.

140. Dwi Hanto, Nur Taufik Zamari, Andi Setiono, Thomas Budi Waluyo, dan **Widiyatmoko, B..** Perancangan Penguat Transimpedansi Ganda pada Sensor Weight in Motion Berbasis Serat Optik. Prosiding SNF HFI Jakarta, 2012.

141. **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, dan Andi Setiono, Hendra Adinanta, dan Imam Mulyanto. Sistem pengukuran beban kendaraan berjalan berbasis serat optic. PROSIDING Seminar Insentif Riset SINas 2013.

142. Dwi Bayuwati, Tomi Budi Waluyo dan **Widiyatmoko, B..** Pemanfaatan Sifat Rugi Lengkungan Serat Optik Ragam Tunggal dan Ragam Jamak sebagai Sensor. Seminar Himpunan Fisika Indonesia (HFI) Cabang Jawa Tengah dan Jogjakarta 2013, ISSN/ISBN 0853-0823

143. Dwi Hanto, Iyon Titok Sugiarto, **Widiyatmoko, B.**. Pengukuran perubahan frekuensi laser dioda terhadap perubahan suhu dengan teknik heterodyne. Prosiding SFN XXVI HFI , 2013

144. Andi Setiono, Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, dan Tomi Budi Waluyo. Kajian Penerapan Konsep Impuls untuk Menghitung Berat Kendaraan Berjalan Menggunakan Sensor Serat Optik. PROSIDING SEMINAR 2ND LONTAR PHYSICS FORUM 2013, ISSN/ISBN/IBSN: 978-602-8047-80-7, LTF 1339-1

145. Dwi Hanto, Cindy Al Kindi, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**. Analisa Pengaruh Mikrobending Untuk Aplikasi Pada Sensor Beban Berbasis Serat Optik. Prosiding seminar 2nd lontar physics forum 2013, ISSN/ISBN/IBSN: 978-602-8047-80-7

146. Dwi Hanto, Dessy Hervina Sari, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**. Rancangan Alat Timbang Berbasis Serat Optik Mikrobending Menggunakan Mikrokontroler ATmega32. Prosiding seminar 2nd lontar physics forum 2013, ISSN/ISBN/IBSN: 978-602-8047-80

147. Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati dan Fachruzzak. Pembuatan dan Karakterisasi Ekstensometer Elektronik untuk Sensor Pergeseran Tanah. Proceeding Seminar Ilmu Pengetahuan Teknik 2013

148. Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, Prawito. Sistem komunikasi sensor jamak dengan serial RS 485. Prosiding Seminar Nasional Fisika 2012 Pusat Penelitian Fisika-LIPI Serpong, 4–5 Juli 2012 ISSN/ISBN/IBSN: 2088-4176

149. **Widiyatmoko, B.,** Prabowo Puranto, Andi Setiono dan Dwi Hanto. Pengembangan Sensor Strain Tanah Berbasis Fiber Brag Grating untuk Deteksi tanah Longsor. Prosiding Seminar ASTECHNOVA 2009, Fakultas Teknik, UGM, ISSN 2086-0005, Hlm. III-41-48

150. Prabowo Puranto dan **Widiyatmoko, B..** Karakterisasi Fiber Brag Grating Terjadap Suhu Mengunakan tehnik sapuan Panjang Gelombang Laser. Prosiding pertemuan Ilmiah XXIV, Himpunan Fisika Indonesia Jateng&DIY, ISSN 08.53.0823.Semarang 10 April 2010, Hlm. 241–246

151. **Widiyatmoko, B.,** Anthie Agustine. Pengembangan Sistem karakteristi Komponen Optik Presisi Tinggi. Prosiding Seminar Pemaparan hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik IV, Kedeputian Bidang IPT-LIPI, 31 Maret 2008, ISBN: 979-3688 86 6, Hal B 73.

152. Prabowo Puranto, Meilindra Indriani, **Widiyatmoko, B.**, Andi Suhandi. Karakterisasi Fiber Bragg Grating (FBG) Terhadap Perubahan Suhu. Prosiding Seminar Nasional Fisika 2014.

153. Iyon Titok Sugiarto, Andi Setiono dan **Widiyatmoko, B.**. Analisa Bandwidth Respon Transmisi Fiber Bragg Grating Menggunakan Laser Dioda. Prosiding simposium fisika nasional xxvii himpunan fisika indonesia, terbit 19 Maret 2015, ISSN/ ISBN/IBSN: ISSN: 1411-4771

154. **Widiyatmoko, B.**, Anthie Agustine dan Zaenal Akbar. Pengembangan analisator spectrum optik pada panjang gelombang 1550 nm Berbasis Filter mampu Tala. Prosiding Pertemuan Kalibrasi Instrumentasi dan Metrologi (PPI-KIM) 2007, ISSN: 0852-002 X. P2 KIM LIPI, PUSPIPTEK 2007. Hlm. 65–71

155. **Widiyatmoko, B.**, Rietje Yunaningsih, Budi Pardono, K.Imai and M.Ohtsu. Methoda pengukuran frekuensi absolut laser menggunakan Optical frequency comb Generator. Proceedings Temu Ilmiah VI, persatuan pelajar Indonesia di Jepang, Gifu, 20 Agustus 1997. ISSN:0918-7685, Hlm. 196–200.

156. **Widiyatmoko, B.**, A.Kusnowo dan M.Ohtsu. Optical frequency Comb Generator dan pemakaiannya untuk mengukur beda Frekuensi Laser. Prosiding Konggres Ilmu pengetahuan nasional VI, Serpong 1995.

157. **Widiyatmoko, B.** dan Anung Kusnowo. System kontrol pada *optical comb generator*: untuk mempelajari efek dispersi material. Prosiding Seminar Nasional hasil Penelitian dan Pengembangan Fisika Terapan dan Lingkungan 1996.

158. **Widiyatmoko, B.**, Anung Kusnowo and M.Ohtsu. Metode baru pengukuran frekuensi laser dengan comb generator. Proseding Seminar Nasional hasil Penelitian dan Pengembangan Fisika Terapan dan Lingkungan 1995/1996, Bandung 25–26 Juni 1996, ISBN: 979-8580-09-5979-8580-11-7

159. Prabowo Puranto, Andi Setiono dan **Widiyatmoko, B..** Pengujian stabilitas Laser sebagai penelitian awal dalam perancangan sensor strain tanah berbasis FBG demean teknik Sweeping Laser Dioda. Prosiding Seminar nasional Fisika I, Departemen Fisika, UNAIR. Surabaya 17 Juli 2010, ISBN: 978-979-17494-1-1, Hlm. E5–R8.

160. Prabowo Puranto, **Widiyatmoko, B.,** Dwi hanto. Pengembangan Laser mampu tala pada daerah c-band terotomasi PC. Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN 2009, ISBN: 978-979-96964-6-5, Fakultas teknik Industri UII, Jogyakarta, 14 November 2009, Hlm. D277-D285

161. **Widiyatmoko, B..** Pemakaian laser Diode dalam Spectroscopy dan Aplikasinya sebagai Standar frekuensi Optik.Prosiding Seminar Internasional Pendidikan IPA, Jurusan pendidikan IPA, fakultas tarbiyah dan Keguruan, UIN Jakarta, Mei 2007.

162. **Widiyatmoko, B..** Aplikasi laser Diode sebagai Pembangkit Gelombang Mikro. Prosiding seminar Nasional Aplikasi Fotonika (SNAF-08), ISBN: 978-979-97254-4-8, Surabaya 24–25 April 2008, Hlm. B6-1-B6-4.

163. **Widiyatmoko, B.**, Tomi Budi Waluyo dan Masbah Siregar. Pembangkit gelombang RADAR berdasarkan teknik Heterodyne Optik. Prosiding Seminar Radar Nasional 2008, Jakarta, 30 April 2008, ISSN: 1979-2921, P2ET – LIPI, pp. 33– 6.

164. Wildan Panji Tresna, Iyon Titok Sugiarto dan **Widiyatmoko, B.**, Pengembangan microwave sweep generator berbasis mixing dua dioda laser. Seminar nasional Fisika 2014, Bali prosiding HFI.

165. Andi Setiono dan **Widiyatmoko, B.**. Teknik Stabilisasi Laser Diode Untuk Sumber Cahaya Pada Sensor dan Instrumentasi Optik. Prosiding Seminar Fisika Nasional XXV, Universitas Palangkaraya, 19–20 Oktober 2012.

166. Iyon Titok Sugiarto, **Widiyatmoko, B..** Pengukuran stabilitas frekuensi Laser Diode menggunakan teknik deteksi Heterodyne. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi II 2008, Universitas lampung, 17–18 November 2008, ISBN: 978-979-1165-74-7, Hlm. V-273-V279.

167. **Widiyatmoko, B.**. Stabilisasi Laser Dioda dan Aplikasinya sebagai standard frekuensi Optik. Prosiding Pertemuan Kalibrasi Instrumentasi dan Metrologi (PPI-KIM) 2007, ISSN 0852-002 X. P2 KIM LIPI, PUSPIPTEK 2007. Hlm. 72–78.

168. Budi pardono**, Widiyatmoko, B.,** Rika Suriamah dan Rietje Y Yuwono. Pembuatan Instrumen untuk Stabilisasi Frekuensi Tengah Laser Diode. Prosiding Seminar Nasional hasil Penelitian dan Pengembangan Fisika Terapan dan Lingkungan, Buku I, Bandung 1996.

169. Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Imam Mulyanto. Kajian Mikrobending sebagai Sensor Beban Berbasis Serat Optik Multimode. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY hlm. 179–181, 2012.

170. Andi Setiono, Dwi Hanto, Iyon Titok Sugiarto, Prabowo Puranto, Hendra Adinanta, Tomi Budi Waluyo, **Widiyatmoko, B.**. Pengujian Awal Sistem Sensor Berat Serat Optik Untuk Pengukuran Berat Kendaraan Berjalan. Prosiding Seminar Nasional InSinas 2014.

171. A. Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Karakterisasi Fiber Bragg Grating Terhadap Suhu Menggunakan Teknik Sapuan Panjang Gelombang Laser. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY, Semarang pp. 241–246, 12 September 2010.

172. Bambang Hermanto, L.T. Handoko, **Widiyatmoko, B.**, Santoso Sukirno. Sistem monitoring pergeseran tanah berbasis MEMS accelerometer. Seminar Nasional Fisika 2011, ISSN: 2088-4176 Pusat Penelitian Fisika-LIPI, Serpong–13 Juli 2011.

173. Hendra Adinanta, Dwi Hanto, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**. Kajian distribusi massa pada konstruksi sensor beban berbasis serat optik dengan menggunakan prototipe kendaraan secara statis. Seminar Nasional Fisika 2013 Pusat Penelitian Fisika-LIPI Serpong, 4 September 2013, ISSN: 2088-4176.

Paten Internasional

Paten Granted (17)

174. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.** and K.Imai. Laser beams generator. Paten Jepang Granted, JP4381353B2, 12 September 2009.

175. Motonobu Kourogi, **Widiyatmoko, B.**, Osamu Nakamoto, Shigeyoshi Misawa, Yoshinobu Nakayama. Optical frequency comb generator. Paten Internasional granted: US7239442 B2, July 3, 2007.

176. **Widiyatmoko, B.**, M.kato and M.Kourogi. Pulse Light source for communication. Paten Jepang, Granted, JP 4044503B2, 6 Ferbruari 2008.

177. Motonobu Kourogi, Kazuhiro Imai, **Widiyatmoko, B.**, Optical frequency comb generator and optical modulator. Paten USA, granted US7551342 B2, June 23, 2009 (Granted), EP20050730566B.

178. Motonobu Kourogi, Kazuhiro Imai, **Widiyatmoko, B.**, Optical resonator, Optical modulator, Optical Frequency Comb Generator, Optical Oscillator and Method of preparing Optical Oscillator. Paten Amerika (Internasional) granted no: US7712977B, May 11, 2010.

179. **Widiyatmoko, B.**, Motonobu Kourogi, Osamu Nakamoto, Shigeyoshi Misawa, Yoshinobu Nakayama. Optical Modulator and optical frequency comb generator. Paten Jepang Granted No.: JP3415832B2, 4 April 2003.

180. **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Kourogi. Optical resonator apparatus measurement and method. Paten Jepang Granted, JP4002917B2, 11 September 2007.

181. **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Kourogi. Optical Resonator. Paten Jepang Granted No: JP4781648B2, July 15, 2011.

182. **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Kourogi. Optical frequency measuring system. Paten Jepang Granted, JP3989470B2, 10 Oktober, 2007.

183. **Widiyatmoko, B.**, S. Mizawa, Y. Nakayama, Nakamoto and M.Kourogi. Optical communication system and receiver. Paten Jepang granted, JP3943426B2, 11 July 2007.

184. Y. Nakayama, **Widiyatmoko, B.**, S. Mizawa, Nakamoto and M.Kourogi. Optical waveguide Type Optical Modulator and Optical Waveguide type Optica Frequency Comb Generator. Paten Jepang Granted JP3758996B2, January 13, 2006.

185. **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Kourogi. Control device for Optical comb generator. Paten Jepang No JP3926349B2, Granted 9 Maret 2007.

186. **Widiyatmoko, B.,** K.Imai and M.Kourogi. Optical Comb Generator. Paten Jepang No: JP3910834B2, granted 25 April 2007.

187. **Widiyatmoko, B.**, Mizawa, Nakayama, Nakamoto and M.Kourogi. Waveguide type optical comb generator. Paten Jepang No: JP3902047B2, Granted 4 April 2007.

188. **Widiyatmoko, B.,** K.Imai and M.Kourogi., Optical comb generator and optical modulator. Paten Jepang No: JP3891977B2, Granted 1 Maret 2007.

189. **Widiyatmoko, B.**, K.Imai and M.Kourogi. Light modulator. Paten Jepang No: JP3891976B2, Granted 14 Maret 2007.

190. **Widiyatmoko, B.**, Mizawa, Nakayama, Nakamoto and M.Kourogi. Manufacturing method of optical comb generator. Paten Jepang No: JP3730534B2, Granted 5 Januari 2006.

Paten Terdaftar (2)

191. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.** and K.Imai. Wavelength variable optical frequency comb generator. Paten Jepang terdaftar No: JP2006337833, 14 Desember 2006.

192. M.Kourogi, **Widiyatmoko, B.** and K.Imai. Gas Cell for Saturation Absorption. Paten Jepang terdaftar No JP2007049110A, 22 Januari, 2007.

PATEN INDONESIA

Paten Granted (15)

193. **Widiyatmoko, B.**, Cece, Janjani, Deni S Khairudin. Alat Penghancur Jarum Suntik. Paten Indonesia granted No: IDP000044315, 7 Februari 2017.

194. **Widiyatmoko, B.**, Anthi Agustine, Marga Asta jaya Mulya, Prabowo Puranto. Pendeteksi Kemiringan Menggunakan Akselerometer Berbasis MEMS IC. Paten Indonesia Granted IDP000039971, 17 September 2015.

195. **Widiyatmoko, B.**, Anthie Agustine, Prabowo Puranto dan Imam Mulyanto. Sistem Dan Piranti Pengukuran Kekeruhan Air Secara Insitu. Paten Indonesia Granted **IDP000049067**, 28 Desember 2017.

196. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Thomas Budi Waluyo, **Widiyatmoko, B.**, Prabowo Puranto, Hendra Adinanta, Suryadi. Inklinometer Serat Optik Untuk Mengukur Kemiringan Tanah Berbasis Efek Pelengkungan Makro. Paten Indonesia terdaftar, P00201608053, (Granted: IDP000104795)

197. Mefina Yulias Rofianingrum, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Edi Kurniawan, Imam Mulyanto, Suryadi, Sensus Wijonarko. Sensor Berat Berbasis Serat Optik Dengan Deformer Campuran Pasir Dan Karet Silikon. Paten Indonesia Granted IDP000092462B2.

198. **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Edi Kurniawan, Purwowibowo, Tatik Maftukhah, Suryadi, Mefina Yulias Rofianingrum. Sensor Pengukur Berat Berbasis Makrobending Fiber Optik. Paten Indonesia Granted no: **IDP000077434B2**, 16 Juni 2021.

199. **Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono, Atik Retnowati, Dwi Hanto, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Surip Kartolo, Muhammad Ilyas, Fitria Tisa Oktalira, Yeni Yuliani, Hari Priwiratama, Mahardika Gama Pradana, Rini Khamimatul Ula, Suryadi., Metoda Dan Alat Iradiasi Foton Untuk Pengendalian Jamur Dan Mikroorganisme Parasit Pada Tanaman., paten terdaftar P00202215359 (Granted: IDP000104795).

200. **Widiyatmoko, B.**, Edi Kurniawan, Mefina Yulias Rofianingrum, Hari Pratomo, Cece, Surip Kartolo. Alat Penghancur Jarum Suntik Dengan Elektroda Geser. Paten Indonesia Granted No: IDP000095510, 09 September 2020.

201. **Widiyatmoko, B.**, Mefina Yulias Rofianingrum, Edi Kurniawan, Dwi Bayuwati, Suryadi, Dwi Hanto, Jalu Ahmad Prakosa, Rini Khamimatul Ula, Imam Mulyanto, Hari Pratomo. Sistem Dan Metode Pemantauan Pergerakan Tanah Dan Perubahan Struktur Yang Dilengkapi Dengan Pengumpul Data Bergerak. Paten Indonesia terdaftar No: P00202010049 (Granted: IDP000102232).

202. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, **Widiyatmoko, B.,** Edi Kurniawan, Suryadi, Mefina Yulias Rofianingrum. Inklinometer borehole serat optik untuk mengukur kemiringan tanah berbasis serat optik jenis sms (single mode – multimode – single mode). Paten Indonesia terdaftar No: P00202010059, (Granted: IDP000102367).

203. Thomas Budi Waluyo, Dwi Bayuwati, **Widiyatmoko, B.**, Imam Mulyanto, Suryadi. Ekstensometer Serat Optik Dengan Konfigurasi MSM. Paten Indonesia terdaftar P00201708910, 12 Desember 2017 (Granted IDP000096290).

204. Dwi Bayuwati, **Widiyatmoko, B.**, Tomi Budi Waluyo, Imam Mulyanto, Prabowo Puranto, Hendra Adinanta, Suryadi., Inklinometer Serat Optik Untuk Mengukur Kemiringan Tanah Berbasis Efek Lengkungan Serat, paten granted IDP000097726.

205. **Widiyatmoko, B.**, Anthie Agustine, Imam Mulyanto, Prabowo Puranto., Sistem Dan Sensor Kekeruhan Air Secara Insitu, paten granted IDP000049067.

206. Tomi Budi Waluyo, Dwi Bayuwati, **Widiyatmoko, B.**, Imam Mulyanto, Suryadi., Ektensometer Serat Optik Dengan Konfigurasi Moda Jamak-Moda Tunggal-Moda Jamak, paten granted IDP000096290.

207. Dwi Bayuwati, **Widiyatmoko, B.**, Imam Mulyanto, Suryadi, Edi Kurniawan., Sistem Ekstensometer Serat Optik Dengan Pengaturan Modulasi Sumber Cahaya Laser Untuk Efisiensi Suplai Daya Listrik, paten granted IDP000098292.

Paten Terdaftar (25)

208. **Widiyatmoko, B.**, Prabowo Puranto dan Dwi Hanto. Evaluator Kisi Serat Bragg Menggunakan Teknik Heterodin Dua Laser Dioda. Paten Indonesia terdaftar P00200900682, 22 Desember 2009.

209. **Widiyatmoko, B.**, Dwi hanto, Prabowo Pranto, marga Asta Jaya Mulya, Resetiana Dwi Desiati. Sensor Pergeseran Tanah Elektronik. Paten Indonesia terdaftar P00200900683, 22 Desember 2009.

210. **Widiyatmoko, B.**, Dwi hanto, Andi Setiono, Tomi B Waluyo, Hendra Adinata. Sistem Pengukur Berat Objek Berbasis Serat Optik Dan Sensor Yang Digunakan Pada Sistem Tersebut. Paten Indonesia terdaftar P00201405655, 22 September 2014.

211. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Thomas Budi Waluyo, **Widiyatmoko, B.**, Suryadi, Mohamad Imam Afandi. Inklinometer Serat Optik Untuk Mengukur Kemiringan Tanah Yang Membentuk Sudut Positif Dan Negatif Berbasis Pelengkungan Makro. Paten Indonesia terdaftar P00201708582, 30 November 2017.

212. **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Edi Kurniawan, Imam Mulyanto, Suryadi, Mefina Yulias Rofianingrum, S.Si., M.T., Mohamad Imam Afandi, Surip Kartolo. Sistem Pemantauan Lingkungan Air In Situ Menggunakan Pelampung. Paten Indonesia Terdaftar No: P00201807703, 28 September 2018.

213. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Suryadi, **Widiyatmoko, B.,** Edi Kurniawan. Ekstensometer Serat Optik Dengan Pengaturan Modulasi Sumber Cahaya Laser Untuk Efisiensi Suplai Daya Listrik. Paten Indonesia Terdaftar P00201807705, 28 September 2018.

214. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Suryadi, **Widiyatmoko, B.**, Mohamad Imam Afandi, Edi Kurniawan, Mefina Yulias Rofianingrum. Sistem Sumber Cahaya Laser Panjang Gelombang Tetap dan Pendeteksinya. Paten Indonesia terdaftar P00201911811, 13 Desember 2019.

215. **Widiyatmoko, B.**, Hari Pratomo, Andi Setiono, Imam Mulyanto, Suryadi, Mefina Y. Rofianingrum., Alat Penghasil Suara Untuk Kendaraan Listrik Dengan Intensitas Volume Berdasarkan Kecepatan, Paten Indonesia: P00202504838, 2025.

216. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, **Widiyatmoko, B.**, Hari Pratomo, Andi Setiono, Nelfieny, Qomarudin, Irwan Rawal Husdi, Alat Dan Metode Pendeteksian Perubahan Tekanan Air Berbasis Lengkungan Serat Optik., Paten Indonesia: P00202415135.

217. Joko Pitono, Haryo Prastono, Andi Setiono, S.Si., M.T., **Widiyatmoko, B.**, Dwinita Wikan Utami, Lukita Devy, Hari Pratomo, Emi Sugiartini, Diana Nurani, Ahmad Fauzi, Iskandar Zulkarnaen., Darwin Taulabi, Armelia Tanjung, Farah, Djatmiko Pinardi, M.Eng, R. R. Noorwitri Utami, Setiawan, Muhammad Syakir Ekwasita Rini Pribadi, Alat Pencahayaan Tanaman Secara Hybrid Berbasis Transmisi Cahaya Matahari Dan Led., Paten Indonesia: P00202415447.

218. Djoko Pitono, Haryo Prastono, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwinita Wikan Utami, Lukita Devy, Wildan Panji T, Emi Sugiartini, Diana Nurani, Ahmad Fauzi, Iskandar Zulkarnaen., Darwin Taulabi,., Armelia Tanjung, Farah, Djatmiko Pinardi, R. R. Noorwitri Utami, Setiawan, Muhammad Syakir, Ekwasita Rini Pribadi, Konsentrator Cahaya Matahari Secara Otomatis., Paten Indonesia: P00202314466.

219. Hari Pratomo, Sulistyo, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.,** Dwi Hanto, Surip Kartolo, Mohamad Syahadi, Imam Mulyanto, Dwi Bayuwati, Irwan Rawal Husdi, Agitta Rianaris, Rini Khamimatul Ula, Suryadi., Metode Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berbasis Serat Optik Yang Diperkuat Dengan Komposit Karet Dan Pegas Spiral Dan Produk Yang Dihasilkannya, Paten Indonesia Terdaftar: P00202312304

220. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, Surip Kartolo, Irwan Rawal Husdi, Agitta Rianaris, Rini Khamimatul Ula, Suryadi., Alat Dan Metode Pendeteksian Curah Hujan Berbasis Refleksi Cahaya Laser Menggunakan Serat Optik., paten Indonesia Terdaftar P00202312502

221. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, Surip Kartolo, Irwan Rawal Husdi, Agitta Rianaris, Rini Khamimatul Ula, Suryadi., Sensor Pendeteksi Perubahan Ketinggian Air Berbasis Lengkungan Serat Optik, paten Indonesia Terdaftar P00202311546.

222. Edi Kurniawan, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, Surip Kartolo, Jalu Ahmad Prakosa, Purwowibowo, Bernadus Herdi Sirenden, Rini Khamimatul Ula, Suryadi, Hendra Adinanta., Alat Dan Metode Untuk Menguji Kinerja Gaya Angkat Dan Kecepatan Putar Pada Baling-Baling Drone, Paten Indonesia terdaftar P00202204142.

223. Agitta Rianaris, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, Osen Fili Nami, Surip Kartolo, Irwan Rawal Husdi, Rini Khamimatul Ula, Suryadi., Sistem Dan Metode Untuk Mendeteksi Kestabilan Posisi Titik Raster Ular Dan Kecepatan Sapuan Berkas Laser Dua Dimensi, Paten Indonesi Terdaftar P00202314731

224. **Widiyatmoko, B.**, Edi Kurniawan, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Andi Setiono, Dwi Hanto, Osen Fili Nami, Surip Kartolo, Irwan Rawal Husdi, Rini Khamimatul Ula, Mefina Y. Rofianingrum., Alat Dan Metode Pengukur Berat Dan Kecepatan Kendaraan Tanpa Berhenti Berbasis Serat Optik, Paten Terdaftar P00202204232

225. Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, Hendra Adinata, Suryadi, Edi Kurniawan, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Rini Khamimatul Ula, Mefina Y. Rofianingrum., Alat dan Metode Pengukur Jarak Lateral Antar Obyek Dengan Menggunakan Lidar Berputar, Paten terdaftar P00202204474.

226. **Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono, Dwi Hanto, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Suryadi, Agitta Rianaris, Irwan Rawal Husdi., Sistem Pendeteksi Perubahan Ketinggian Air Laut Berbasis Serat Kisi Bragg, Paten terdaftar P00202404869.

227. Agitta Rianaris, Dwi Hanto, Asep Hapiddin, **Widiyatmoko, B.**, Dayat Kurniawan, Eko Joni Pristianto, Hari Pratomo, Osen Fili Nami, Suryadi, Surip Kartolo., Sistem Pemindaian Area Tampak Muka Pada Benda 3 Dimensi Menggunakan Lidar Putar Dengan Sudut Gerak Terbatas, Paten terdaftar P00202412801.

228. Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, Asep Hapiddin, Suryadi, Bondan Dwisetyo, Muhammad Azzumar, Hari Pratomo, Mefina Y. Rofianingrum. Alat Dan Metode Koreksi Penyimpangan Beda Fasa Pada Lidar Berbasis Indirect Time Of Flight, Paten terdaftar P00202512610.

229. Jalu Ahmad Prakosa, Edi Kurniawan, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B.**, Dwi Hanto, Purwowibowo, Sesus Wijonarko, Purwowibowo, Tatik Maftukhah, Dadang Rustandi, Fito Wigunanto Herminawan, Mefina Yulias Rofianingrum, Yuniswan Darna., Metode Dan Alat Ukur Volume Bioflok Pada Cairan Kolam Ikan Dengan Cahaya Tampak Termodulasi, Paten terdaftar P00202505977.

230. Nelfyenny, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B**., Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Qomarudin, Irwan Rawal Husdi., Alat Sensor Tekanan Air Berbasis Serat Optik, Paten terdaftar P00202507886.

231. Hari Pratomo**, Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono, Dwi Hanto, Suryadi, Iyon Titok Sugiarto, Mefina Yulias Rofianingrum, Qomarudin, Nelfyenny., Alat Uji Sensor Berat Berbasis Serat Optik dengan Pembebanan Statis yang Dilengkapi Pengatur Beban Awal dan Pegas Kompensator, Paten terdaftar P00202512576.

232. Hari Pratomo, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B**., Iyon Titok Sugiarto, Asep hapidin, Suryadi, Mefina Y. Rofianingrum., Alat Pengukur Berat Kendaraan Tanpa Berhenti Berbasis Serat Optik Dengan 4 Sisi Deformer Yang Teraktivasi Tekanan Hidrolik, Paten terdaftar S00202605242.

Paten Sederhana (2)

233. Suryadi, Agus Sukarto Wismogroho, Jayadi, Heri Nugraha, Hari Pratomo, Swivano Agmal, **Widiyatmoko, B.,** Isnaeni, Wahyu Bambang Widayatno, Bambang Hermanto, Abdul Basyir, Didik Aryanto, Marga Asta Jaya Mulya, Akbar Barliansyah, Alat Deteksi Multiplikasi Asam Nukleat Secara Isotermal, Paten sederhana granted IDS000006838.

234. **Widiyatmoko, B.**, Dwi Bayuwati, Edi Kurniawan, Imam Mulyanto, Suryadi, Mefina Yulias Rofianingrum, S.Si., M.T., Aris Subekti. Penyaring Asap dan Polutan dalam Udara Menggunakan Kabut Air. Paten Indonesia granted No: IDS000002894, 12 Februari 2020.

Paten Sederhana Terdaftar (5)

235. Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Suryadi, **Widiyatmoko, B.**, Mohamad Imam Afandi, Edi Kurniawan, Mefina Yulias Rofianingrum. Inklinometer Borehole Berbasis Modul e-Compass Menggunakan Pipa Paralon Sebagai Pemandu Kemiringan. Paten Indonesia Sederhana terdaftar No: S00201911813, 13 Desember 2019.

236. Hari Pratomo, **Widiyatmoko, B.**, Andi Setiono, Imam Mulyanto, Suryadi, Mefina Y. Rofianingrum, Alat Perangkap Nyamuk Dengan Pembunuh Tak Beracun., Paten Indonesia: S00202502556, 2025.

237. Nelfyenny, Andi Setiono, **Widiyatmoko, B**., Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Qomarudin, Irwan Rawal Husdi., Sensor Pergeseran Berbasis Lengkungan Serat Optik Dengan Selubung Seri., Paten sederhana Terdaftar S00202510407.

238. Nelfyenny, Andi Setiono, Dwi Hanto, Dwi Bayuwati, Imam Mulyanto, Hari Pratomo, Qomarudin, Irwan Rawal Husdi., Struktur Rumah Sensor Berbasis Lengkungan Makro Serat Optik Untuk Perbaikan Linieritas Luaran, Paten sederhana S00202413626.

239. Dwi Bayuwati, **Widiyatmoko, B.**, Edi Kurniawan, Imam Mulyanto, Mohamad Imam Afandi, Hendra Adinanta, Edi Kurniawan, Mefina Y. Rofianingrum., Inklinometer Borehole Berbasis Modul E-Compass Menggunakan Pipa Paralon Sebagai Pemandu Kemiringan Tanah, paten sederhana terdaftar S00201911813

Hak Cipta (3)

240. Raden Putri Ayu Pramesti, Aulia Haritsuddin Karisma Muhammad Subekti, Muhamad Rodhi Supriyadi, Josua Geovani Pinem, Muhammad Reza Alfin, Gilang Mantara Putra, Mukti Wibowo, Umi Chasanah, Dewi Habsari Budiarti, Jemie Muliadi, **Widiyatmoko, B.**, Spot Ratio On Leaf (SROL)., Hak Cipta No. EC00202423358.

241. Rini Khamimatul Ula, Risnandar, Dwi Hanto, **Widiyatmoko, B.**, K'Mis Siraman: Sistem Klasifikasi Mikro-plastik Dengan Spektrum Raman; Hak cipta EC002023133152, No. Sertifikat 000566106.

242. Dewi Habsari Budiarti, Umi Chasanah, Raden Putri Ayu Pramesti, Muhamad Rodhi Supriyadi, Mukti Wibowo, Jemie Muliadi, Fadli Cahya Megawanto, Iqbal Reza Al Fikri, Agitta Rianaris, **Widiyatmoko, B**., KuPAS-Daun: Sistem Kuantifikasi Piksel untuk Analisis Spot Daun, Hak Cipta Terkabulkan No. EC 002026066666.

Kerjasama Transaksi Lisensi

243) PT Tesena Inovindo

244) PT Gerlink.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama	:	Dr. Bambang Widiyatmoko, M.Eng.
Tempat Tanggal lahir	:	Boyolali 30 April 1962
Anak ke	:	2 dari 6 bersaudara
Jenis Kelamin	:	Laki laki
Nama Ayah kandung	:	Alm. H. Tukiman
Nama Ibu Kandung	:	Hj. Sukasmi
Nama Istri	:	Almh. Arlina Prihharsanti
Jumlah Anak	:	2
Nama Anak	:	1. Erliansyah Widhi Putra, S.Si 2. Hikarini Esti Pratiwi
Nama Unit	:	Pusat Riset Fotonika
Nma Organisasi	:	Nanoteknologi dan Material
Nama Instansi	:	Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	:	Menguak Rahasia Frekuensi Laser Menggunakan Sisiran Frekuensi Optik Sebagai Tonggak Komunikasi Serat Optik Modern
Ilmu	:	Fisika
Bidang	:	Optoelektronika
Kepakaran	:	Telekomunikasi Fiber Optik

No SK Pangkat terakhir	:	Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 17/K Tahun 2024, tanggal 5 Agustus 2024
No SK Peneliti Ahli Utama	:	Keputusan Presiden Republik IndonesiaNomor 9/M Tahun 2020, tanggal 13 Februari 2020 Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022
Tautan Scopus	:	https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603453373&origin=AuthorProfile
Tautan Google Scholar	:	https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=id&hl=id&user=Gmic6esAAAAJ&sortby=pubdate

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang (Sederajat)	Nama Sekolah/ Perguruan Tinggi	Kota dan Negara	STTB/ IJAZAH TAHUN
1.	SD	SDN I Krasak	Boyolali	1974
2.	SMP	SMP N I Teras	Boyolali	1978
3.	SMA	SMA N I, Boyolali	Boyolali	1981
4.	S-1	FMIPA UGM	Jogyakarta	1987
5.	S-2	Tokyo Institute of Technology, Japan	Tokyo, Jepang	1995
6.	S-3	Tokyo Institute of Technology, Japan	Tokyo, Jepang	2000

C. Pendidikan non formal:

No.	Nama Kursus/Latihan	Tahun	Tempat
1.	Kursus bahasa Jepang	1992	Tokyo
2.	DIKLAT ADUM	1996	Jakarta
3.	DIKLAT ALP (Action learning project) LIPI	2007	Bogor
4.	Diklat penulisan paten lanjutan LIPI	2009	Bogor
5.	DIKLAT PIM TK III	2009	Bogor
6.	DIKLAT PIM TK II	2012	Jatinangor

D. Jabatan Struktural

No.	Tahun	Nama Jabatan	Nama Instansi
1.	1996–2001	Kepala laboratorium Jasa Listrik dan Elektronika (es.IV)	Pusat Penelitian dan PengembanganFisika Terapan-LIPI
2.	2008–2012	Kepala Bidang Instrumentasi Fisis dan Optoelektronika	Pusat Penelitian Fisika LIPI
3.	2010–2013	Plt. Kepala Pusat Penelitian	Pusat Penelitian Fisika LIPI
4.	2013–2017	Kepala Pusat Penelitian	Pusat Penelitian Fisika LIPI

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT jabatan
1.	Ajun Peneliti Muda	1 Agustus 1996
2.	Peneliti Muda III-c	01 Februari 2006

3	Peneliti Muda III-d	1 Oktober 2009
4	Peneliti Madya IV/b	1 September 2012
5	Peneliti Madya IV/c	1 Juni 2018
6	Peneliti Ahli Utama IV/d	1 Maret 2020

F. Penugasan Khusus Nasiona/Internasional

No.	Tugas/jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Peneliti Utama Riset Unggulan Terpadu: Stabilisasi Laser diode menggunakan serapan Rb cell	Kemenristek	1995–1996
2.	Peneliti Utama Riset Unggulan Terpadu: Pembuatan analisator komponen optic presisi menggunakan optical frequency *comb*, generator	Kemenristek	2005–2007
3.	Peneliti Utama riset Kompetitif: Pembangkitan gelombang mikro dengan pelayangan 2 frekuensi laser dioda	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia	2007–2008
4.	Peneliti Utama riset Kompetitif: Pengembangan sensor strain tanah berbasis Fiber Brag Grating	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia	2009–2011
5.	Peneliti Utama Penelitian PKPP: Pembuatan pakan lele apung	Kemenristek	2012
6.	Peneliti Utama INSINAS: Pengembangan sistem ukur beban kendaraan tanpa henti menggunakan *fiber optic* dalam beton	Kemenristek	2012–2013

No.	Tugas/jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
7.	Peneliti utama Insinas: Rancang Bangun Sistem Monitoring Pergerakan Tanah Untuk analisis Stuktur Tanah Jalur Kereta Api dan Antisipasi Longsor	Kemenristek-dikti	2018
8.	Peneliti Utama PPTI: Pengembangan produk sensor dan sistem akusisi data untuk deteksi kondisi struktur tanah di rel kereta api atau jalan raya dalam rangka menjaga keamanan transportasi darat	Kemenristek-dikti	2018

G. Keikut sertaan dalam kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/tugas	Tahun
	Seminar Nasional		
1.	IECI Japan Workshop 2000	Presenter	2000
2.	The 10th Scientific meeting of Indonesia Student Association	Invited Speaker	2001
3.	3th International symposium on Metrology & Physics application and Energy measurement	Participant	2006
4.	Seminar Nasional 2006: Iptek solusi kemandirian bangsa	Pemakalah	2006
5.	Simposium Fisika nasional ke XXI, Makasar	Pemakalah	2006
6.	Inovasi teknologi bahan baku alam untuk industri elektronika	Anngota komisi penilai/ Juri	2007
7.	Seminar ilmiah forum fungsional B2TKS-BPPT	Peserta	2007

No.	Nama Kegiatan	Peran/tugas	Tahun
8.	Kuliah Umum: Peran teknologi fiber optic untuk pengembangan Industri, UDINUS Semarang	Pembicara	2007
9.	Quality In Reseach 1	Presenter	2007
10.	Pertemuan dan presentasi Imiah KIM	Pemakalah	2007
11.	Seminar Nasional Aplikasi Fotonika, ITS	Pembicara	2008
12.	Seminar Teknoin 2009, Universitas Gadjahmada	Presenter	2009

H. Editor Jurnal/Prosiding

No.	Nama Jurnal/Prosiding	Peran/tugas	Tahun
1.	Jurnal Telaah	Dewan editor	2008–2013
2.	Jurnal Fisika, HFI	Dewan editor	2009–2012
3.	Prosiding PPI KIM	Dewan Editor	2015–2016

I. Karya Tulis Imiah

No.	Kualifikasi penulis	Jumlah
1.	Penulis tunggal	0
2.	Bersama penulis lainnya	171

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Inggris	105
2.	Bahasa Indonesia	66
3.	Bahasa Jepang	

J. Pembinaan Kader Ilmiah

Sebagai pengajar/dosen luar biasa			
1.	Dosen Elektronika dasar	Univ Pamulang	2008–2009
2.	Dosen Noise Analysis	Univ Pamulang	2008–2009
Sebagai fasilitator dalam pelatihan			
3.	Pelatihan Jaringan fiber optik	PT Delameta Jakarta	2009
4.	Pelatihan jaringan fiber optik	PT Gunung Sari pratama Surabaya	2023

Pembimbing Pejabat fungsional peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/tugas	Tahun
1.	Andi Setiono	P2Fisika	Ka.Pus/Ka.Keltian	2012–2016
2.	Dwi hanto	P2Fisika	Ka.Pus/Ka.Keltian	2012–2016
3.	Rini K.Ula	P2Fisika	Ka.Pus/Ka.Keltian	2015–2016
4.	Mefina Y Rofianingrum	P2Fisika		2018–2020
5.	Prabowo Puranto	P2Fisika	Ka.Pus/Ka.Keltian	2010–2016
6.	Suryadi	P2Fisika	Ka.Pus/Ka.Keltian	2012–2018
7.	Zaenal Akhbar	P2 Fisika	Ka. Kegiatan	2007–2009

Pembimbing Mahasiswa

No.	Nama Bimbingan	PT/ Universitas	Tahun lulus
Bimbingan			
1.	Usep Gunawan (S-2)	Institute sains dan Teknologi Nasional	2014
2.	Joni Sinambela (S-2)	Universitas Indonesia	2014

No.	Nama Bimbingan	PT/ Universitas	Tahun lulus
3.	Imam Mulyanto (S-2)	Institute sains dan Teknologi Nasional	2017
4.	Irawan (S-2)	Universitas Indonesia	2015
5.	Prabowo Puranto (S-2)	Universitas Indonesia	2012
6.	Dwi Hanto (S-2)	Universitas Indonesia	2013
7.	Andi Setiono (S2)	Universitas Indonesia	2013
8.	Nur Sidik Yulianto (S-2)	Universitas Indonesia	2013
9.	Wildan Panji Tresna (S-2)	Universitas Indonesia	2014
10.	Iyon Titok Sugiarto (S-2)	Institute Teknologi Bandung	2014
11.	S. Hafiz (S-2)	Universitas Indonesia	2014
12.	Qonitatul Hidayah, (S-1)	Universitas Negeri Sebelas maret	2021
13.	Siti Sulikah (S-1)	Institute Teknology Surabaya	2015
14.	Rionda Brahmantyo (S-1)	Institute Teknology Surabaya	2009
15.	Novianti Lasmaria (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2010
16.	Elisda (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2010
17.	Kuni Faizah (S-1)	Universitas Negeri Sebelas maret	2012
18.	Irmawan Oktaviana (S-1)	UIN Jakarta	2012
19.	Meilindra Indriani (S-1)	Universitas Pendidikan Indonesia	2012
20.	Desnia Lestari (S-1)	ISTN	2018

No.	Nama Bimbingan	PT/ Universitas	Tahun lulus
21.	Depi Santi Sinuhaji (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2009
22.	Rican Feri Sirait (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2019
23.	Yosua A. Simanjuntak (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2019
24.	M. Saudara Semesta (S-1)	UNSOED	2019
25.	Imas Trikurnianingsih (S-1)	UNSOED	2019
26.	Veronikha (S-1)	UNSOED	2019
27.	Rully Syafira Putri (S1)	ISTN	2020
28.	Wulan Nia Sari (S-1)	UNSOED	2019
29.	Raja Huttal Tumanggor (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2019
30.	Alin Wahyu Utami (S-1)	UNSOED	2019
31.	Ayu Monawit Sibuea (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2020
32.	Grecia M. Manulang (S-1)	Universitas Sumatra Utara	2020
33.	Erika Ruth G Sianipar(S-1)	Universitas Sumatra Utara	2020
34.	Wiya Iswari (S-1)	ATT Shandy Putra	2020
35.	Kinanthi (S-1)	ATT Shandy Putra	2020
36.	Subhan Fahmi Nasution (S-2)	Univ Andalas	2023
37.	Salsa Ariani Rodiah (S-2)	Univ Andalas	2023

No.	Nama Bimbingan	PT/ Universitas	Tahun lulus
		Penguji S3	
36.	Febrizal	Penguji S-3 teknik Elektro UI	2020
37.	Yus Natali	Penguji S-3 teknik Elektro UI	2022
38	Gunadi Dwi Hantoro	Penguji S-3 teknik Elektro UI	2023

K. Organisasi Profesi

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Himpunan Fisika Indonesia	1992–2017
2.	Ketua	Himpunan Fisika Indonesia	2009–2013
3.	Anggota	Japan Applied Physics	1993–2000
4.	Anggota	Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia	2018–Sekarang
5.	Anggota	Himpenindo/PII	2018– sekarang

L. Tanda Penghargaan

No.	Nama penghargaan	Institusi pemberi penghargaan	Tahun
1.	Satya lencana X tahun	Presiden RI	1998
2.	Satya lencana XX tahun	Presiden RI	2008
3.	Habibie Award, bidang Engineering	The Habibie Center	2008
4.	Adidarma profesi	Persatuan Insinyur Indonesia	2010

No.	Nama penghargaan	Institusi pemberi penghargaan	Tahun
5.	WIPO Inventor Award	WIPO/Kemenkumham	2017
6.	Satya lencana XXX tahun	Presiden RI	2018
7.	Penghargaan sebagai anggota Komisi Banding Paten	Kemenkumham	2024