



Homepage Journal: <https://jurnal.unismuhpalu.ac.id/index.php/JKS>

Analisis Pengaruh Variasi *Fiber Doped Amplifier* dan Panjang Gelombang Laser terhadap *Optical Power* pada Perancangan Sistem FMCW LiDAR

Analysis of the Effect of Variations in Doped Fiber Amplifier and Laser Wavelength on Optical Power in FMCW LiDAR System Design

Riski Ramadani¹, Meta Yantidewi², Rohim Aminullah Firdaus^{3*}, Afyah Nikmah⁴
^{1,2,3,4}Universitas Negeri Surabaya

*Corresponding Author: E-mail: rohinfirdaus@unesa.ac.id

Artikel Penelitian

Article History:

Received: 26 April 2024
Revised: 30 April 2024
Accepted: 7 May 2024

Kata Kunci:

Optical Power;
FMCW LiDAR;
Fiber Doped Amplifier;
Panjang Gelombang Laser

Keywords:

Optical Power;
FMCW LiDAR;
Fiber Doped Amplifier;
Laser Wavelength

DOI: [10.56338/jks.v7i5.5267](https://doi.org/10.56338/jks.v7i5.5267)

ABSTRAK

Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) LiDAR merupakan teknologi pendeteksian objek dengan teknik memodulasi frekuensi sinar laser secara kontinu. FMCW LiDAR memiliki kelebihan dalam mendeteksi objek karena dapat menghasilkan pendeteksian objek secara akurat. Salah satu parameter yang berperan dalam pendeteksian sistem ini adalah *optical power*. Namun *optical power* dapat berkurang karena ketidaksesuaian kombinasi *fiber doped amplifier* dengan panjang gelombang laser sehingga pada penelitian ini dilakukan pengukuran *optical power* secara simulasi terhadap berbagai jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis *Holmium Doped Fiber Amplifier* (HDFA) mengeluarkan *optical power* yang lebih besar dibandingkan jenis *fiber doped amplifier* lainnya, yakni sebesar 20,02 mW. Selain itu, panjang gelombang 1550 nm menghasilkan keluaran *optical power* yang optimal diberbagai jenis *fiber doped amplifier*. Pada penelitian ini semua jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser menghasilkan frekuensi *beat* sebesar 20 MHz dan objek terdeteksi pada jarak 100 meter.

ABSTRACT

Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) LiDAR is an object detection technology using the technique of continuously modulating the frequency of laser light. FMCW LiDAR has advantages in detecting objects because it can produce accurate object detection. One of the parameters that plays a role in detecting this system is *optical power*. However, *optical power* can be reduced due to an incompatibility between the doped fiber amplifier and the laser wavelength, so in this research *optical power* measurements were carried out by simulating various types of doped fiber amplifier and laser wavelength. The research results show that the *Holmium Doped Fiber Amplifier* (HDFA) type produces greater *optical power* than other types of doped fiber amplifiers, namely 20.02 mW. In addition, the 1550 nm wavelength produces optimal *optical power* output in various types of fiber doped amplifiers. In this research, all types of doped fiber amplifiers and laser wavelengths produce a *beat frequency* of 20 MHz and objects are detected at a distance of 100 meters.

PENDAHULUAN

Light Detection and Ranging (LiDAR) adalah teknologi pendeteksian objek menggunakan laser dengan memancarkan pulsa cahaya kemudian menghitung waktu pulsa saat memantul kembali ke sensor (Warburton et al., 2017). Salah satu teknik yang digunakan pada sistem LiDAR untuk mendeteksi objek adalah *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) (Zhang et al., 2019). Teknik FMCW adalah teknik pendeteksian objek dengan memodulasi frekuensi sinar laser secara kontinu. FMCW menggunakan laser dengan frekuensi yang bervariasi terus-menerus (Qian et al., 2022). Saat laser memantul kembali ke sensor setelah mengenai objek, gelombang yang diterima menunjukkan perbedaan waktu kedatangan dan pergeseran frekuensi akibat efek Doppler (Flores-Fuentes et al., 2022). Perbedaan frekuensi ini menghasilkan frekuensi *beat* yang dimanfaatkan untuk mengukur jarak dan kecepatan objek (Kim et al., 2020). Adapun kelebihan dari teknik FMCW yakni kemampuannya untuk mendeteksi objek secara akurat, kecepatan objek dan memiliki kemampuan untuk mengurangi gangguan dari sumber cahaya eksternal sehingga lebih efisien dalam berbagai kondisi lingkungan (Garipey et al., 2016; Hong & Yang, 2013). Namun, keakuratan deteksi FMCW LiDAR dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya *optical power* (Webster et al., 2005). Dalam sistem FMCW LiDAR, tingkat *optical power* krusial untuk keterbacaan sensor LiDAR (Zhao et al., 2022). Jika *optical power* tidak cukup kuat maka sinyal yang kembali ke sensor menjadi lemah sehingga menghasilkan penurunan kualitas data dan keakuratan pengukuran (Adams, 2000). Sebaliknya *optical power* yang terlalu tinggi—berada di atas ambang sensitivitas maksimum sensor—membuat sistem boros energi dan merusak sensor bahkan berbahaya bagi manusia saat digunakan pada kendaraan tanpa sopir atau *self-driving* karena dapat menyebabkan sensasi hangat, luka bakar, dan meningkatkan risiko kanker (Donda, 2017; Liang et al., 2020). Dalam sistem FMCW LiDAR, *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang adalah parameter yang mempengaruhi besarnya *optical power* (Rodrigo et al., 2014). *Fiber doped amplifier* berfungsi untuk memperkuat sinyal cahaya yang melewati serat optik sehingga meningkatkan *optical power* untuk mendeteksi objek pada jarak yang jauh sedangkan parameter panjang gelombang adalah jarak antara dua puncak berurutan dalam gelombang cahaya yang dipancarkan oleh laser (Chen et al., 2022; Ramadani et al., 2023). Penentuan jenis panjang gelombang cahaya krusial dalam sistem LiDAR karena berimplikasi pada penstabilan dan pengoptimalan keluaran *optical power* sehingga panjang gelombang cahaya harus cocok dengan pita absorpsi dan emisi dari dopan dalam *fiber doped amplifier* (Bagheri et al., 2013).

Penelitian terkait pengukuran *optical power* pada sistem FMCW LiDAR pernah dilakukan oleh Ahmad et al. (2021) menggunakan *sweep* laser dengan panjang gelombang 1,55 μm dan menggunakan Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) serta menggunakan *avalanche photodiode* (APD) yang dikembangkan dari $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ yang memiliki lapisan penggandaan (*M-layer*) ganda. Dari komponen-komponen tersebut sistem FMCW LiDAR menghasilkan *optical power* sebesar +6,95 dBm atau setara +5,01 mW. Pada riset ini, *optical power* tidak diukur secara langsung menggunakan *power meter* tetapi diketahui secara matematis dari pengukuran sinyal *Radio Frequency* (RF) yang didapatkan dari sinyal *Intermediate Frequency* (IF) dalam sistem LiDAR. Sistem yang dikembangkan oleh Ahmad et al. (2021) memiliki kelebihan dalam penggunaan *sweep* laser yang mampu menghasilkan kedalaman modulasi optik hingga 200% sehingga menghasilkan spektrum optik stabil. Namun pada sistem ini terjadi arus gelap yang meningkat ketika tegangan APD berada di atas tegangan *breakdown* (V_{br}) sehingga mendominasi arus total mengakibatkan penurunan sensitivitas dan peningkatan *noise* pada APD. Selain itu *optical power* yang dihasilkan oleh sistem ini tergolong rendah (5,01 mW) sehingga tidak kompatibel untuk penerapan pendeteksian objek jarak jauh. Riset lain terkait pengukuran *optical power* dilakukan oleh Rahmatulloh et al. (2023) melakukan perancangan menggunakan CW laser dan *avalanche photodetector* (APD). Pada riset ini melakukan pengamatan terhadap variasi panjang kabel fiber dan penerapan EDFA terhadap redaman dan *optical power* dari sistem. Hasil riset ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengidentifikasi peredaman optik pada sistem dengan memperpendek panjang dari

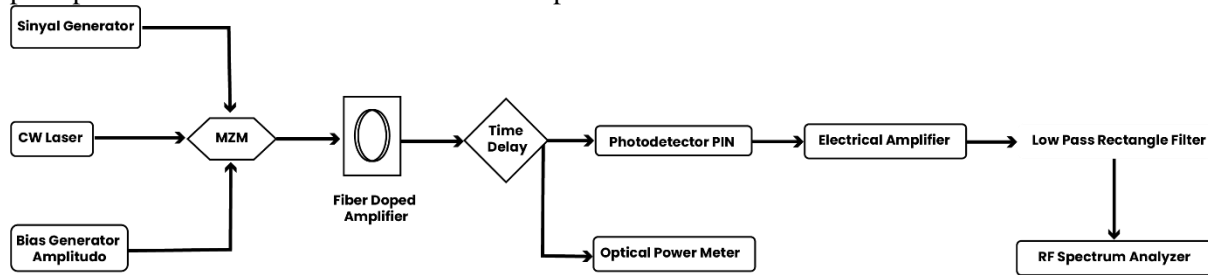
fiber optik dan *optical power* dapat diterima oleh APD dengan penguatan EDFA. Namun, penelitian ini terbatas terhadap pengamatan atenuasi yang terjadi pada sistem optik saja tanpa mengamati pengaruh variasi komponen-komponen yang divariasikan pada sistem terhadap *optical power* yang ditransmisikan ke APD.

Penelitian terkait *optical power* FMCW LiDAR telah dilakukan sebelumnya oleh Ahmad et al. (2021) dan Rahmatulloh et al. (2023) namun pada penelitian tersebut hanya mengukur *optical power* dari pengaut optik jenis Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) saja tanpa mengeksplor lebih jauh pengaruh variasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser terhadap *optical power* dari sistem FMCW LiDAR. Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian pengukuran *optical power* dari sistem FMCW LiDAR secara langsung menggunakan *power meter* sehingga menghasilkan pengukuran yang akurat. Pengukuran *optical power* dilakukan pada sistem FMCW LiDAR yang divariasikan jenis *fiber doped amplifier* yakni Thulium Doped Fiber Amplifier (TDFA), Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), Praseodymium Doped Fiber Amplifier (PDFA), Ytterbium Doped Fiber Amplifier (YDFA), dan Holmium Doped Fiber Amplifier (HDFA). Setiap variasi jenis *amplifier* tersebut dilakukan variasi pula panjang gelombang lasernya dari 355 nm, 400 nm, 532 nm, 710 nm, 800 nm, 1064 nm, 1550 nm, and 1574 nm. Dengan mengeksplorasi kombinasi berbagai *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang pada sistem FMCW LiDAR dapat mengidentifikasi konfigurasi optimal dari penggunaan *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang pada sistem FMCW LiDAR sehingga dapat menghasilkan minimnya kehilangan *optical power* untuk meningkatkan keakuratan pendeteksian objek untuk aplikasi navigasi otomotif, pemetaan 3D, dan pemantauan lingkungan. Selain mengamati *optical power* penulis juga mengamati frekuensi *beat* yang dihasilkan oleh sistem dari hasil penerimaan deteksi objek dan mengamati jarak yang terdeteksi dari data frekuensi *beat* untuk memvalidasi keakuratan pendeteksian dari berbagai variasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser yang digunakan pada sistem FMCW LiDAR.

METODE

Pengukuran *optical power* sistem FMCW LiDAR dilakukan secara simulasi menggunakan *software Optisystem 22*. Sistem FMCW LiDAR didesain berdasarkan beberapa bagian utama, yakni pemancar (*transmitter*), objek target, dan penerima (*receiver*) (Shao et al., 2022). Pada bagian *transmitter* terdapat *Continuous Wave (CW)* laser dengan *power* 40 mW; sinyal generator dengan *bandwidth* modulasi frekuensi sebesar 300 MHz; bias *generator amplitude* untuk memberikan *offset* atau bias tegangan ke sinyal *input* sebesar dua level dan *fiber doped amplifier* untuk meningkatkan *optical power* optik laser saat ditransmisikan untuk pendeteksian objek serta *Mach-Zehnder Modulator (MZM)* digunakan untuk mengontrol dan memodulasi gelombang cahaya yang dihasilkan oleh CW laser sebelum gelombang tersebut dipancarkan ke arah target (Choquette et al., 2010; Liu et al., 2013; Ramadani et al., 2023). Pada bagian objek target direpresentasikan melalui simulasi dengan mengatur parameter jarak target sebesar 100 meter dan *time delay* digunakan untuk menentukan jarak ke target berdasarkan waktu yang dibutuhkan sinyal untuk melakukan perjalanan pulang-pergi sinyal ke target yang diatur pada nilai 10×10^{-6} detik (Qingchun et al., 2021). Bagian terakhir terdapat *receiver* yang terdiri dari *optical power meter* untuk mengukur keluaran *optical power* yang dihasilkan dari *transmitter*; *photodetector Positive-Intrinsic-Negative (PIN)* untuk mengkonversi sinyal cahaya yang dipantulkan dari target menjadi sinyal listrik dan *electrical amplifier* sebagai peningkatan amplitudo sinyal listrik yang diterima dari *photodetector PIN*; *low pass rectangle filter* digunakan untuk memblokir frekuensi tinggi dalam sinyal listrik yang mencakup *noise* dari pembacaan deteksi objek sehingga meningkatkan pembacaan deteksi objek (Ramadani et al., 2023). Lalu, terdapat pula komponen *Radio Frequency (RF) spectrum analyzer* untuk mendeteksi nilai dari *frekuensi beat* yang dihasilkan dari interaksi antara gelombang laser yang dipancarkan dan yang diterima kembali setelah memantul dari objek (Naim et al., 2020). Secara keseluruhan komponen-komponen yang digunakan

pada penelitian FMCW LiDAR diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Pengukuran *Optical Power* dari Sistem FMCW LiDAR

Pada Gambar 1 terdapat komponen *fiber-doped amplifier* yang divariasikan dalam sistem FMCW LiDAR untuk mengukur besarnya *optical power* masing-masing *fiber doped amplifier*. Jenis-jenis *fiber doped amplifier* yang digunakan sebagai penguat *optical power* meliputi TDFA, EDFA, PDFA, YDFA, dan HDFA. Masing-masing jenis *fiber doped amplifier* tersebut memiliki karakteristik penyerapan dan emisi yang berbeda-beda pada berbagai panjang gelombang sehingga penelitian ini memvariasikan pula panjang gelombang laser yang diaplikasikan pada setiap jenis *fiber doped amplifier* tersebut untuk mengetahui efisiensi *optical power* dari masing-masing keluaran *amplifier* (Y. Wang et al., 2023). Panjang gelombang yang diuji mencakup 355 nm, 400 nm, 532 nm, 710 nm, 800 nm, 1064 nm, 1550 nm, dan 1574 nm. Pemilihan panjang gelombang tersebut didasarkan pada karakteristik masing-masing jenis *fiber doped amplifier* untuk mengoptimalkan pengukuran *optical power* dalam sistem FMCW LiDAR.

HASIL

Hasil dari penelitian pengukuran *optical power* dalam sistem FMCW LiDAR yang melibatkan variasi jenis *fiber doped amplifier* dan panjang yang disajikan dalam Tabel 1. *Optical power* diukur menggunakan *optical power meter* yang berhadapan dengan keluaran CW laser yang telah dimodulasi oleh sinyal *generator*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *optical power* terbesar yang dicapai adalah 20,02 mW menggunakan jenis HDFA dengan semua variasi panjang gelombang yang diuji. Selain itu, penelitian ini juga mencakup pengamatan terhadap frekuensi *beat* dan jarak objek yang terdeteksi oleh sistem FMCW LiDAR untuk masing-masing variasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang.

Tabel 1. Hasil Pengukuran *Optical Power* dari Sistem FMCW LiDAR

Jenis <i>Fiber Doped Amplifier</i>	Panjang Gelombang Laser (nm)	<i>Optical Power</i> (mW)	Frekuensi <i>Beat</i> (MHz)	Jarak Terukur (m)
TDFA	355	20,02	20	100
	400	20,02	20	100
	532	20,02	20	100
	710	20,02	20	100
	800	10,07	20	100
	1064	13,903	20	100
	1550	13,462	20	100
	1574	11,401	20	100
	355	10,549	20	100

Jenis <i>Fiber Doped Amplifier</i>	Panjang Gelombang Laser (nm)	Optical Power (mW)	Frekuensi <i>Beat</i> (MHz)	Jarak Terukur (m)
EDFA	400	10,502	20	100
	532	10,674	20	100
	710	10,707	20	100
	800	10,04	20	100
	1064	19,092	20	100
	1550	19,209	20	100
	1574	19,459	20	100
PDFA	355	20,02	20	100
	400	20,02	20	100
	532	20,02	20	100
	710	20,02	20	100
	800	20,02	20	100
	1064	19,611	20	100
	1550	20,02	20	100
YDFA	1574	20,02	20	100
	355	20,02	20	100
	400	20,02	20	100
	532	20,02	20	100
	710	20,02	20	100
	800	20,02	20	100
	1064	10,459	20	100
HDFA	1550	20,02	20	100
	1574	20,02	20	100
	355	20,02	20	100
	400	20,02	20	100
	532	20,02	20	100
	710	20,02	20	100
	800	20,02	20	100

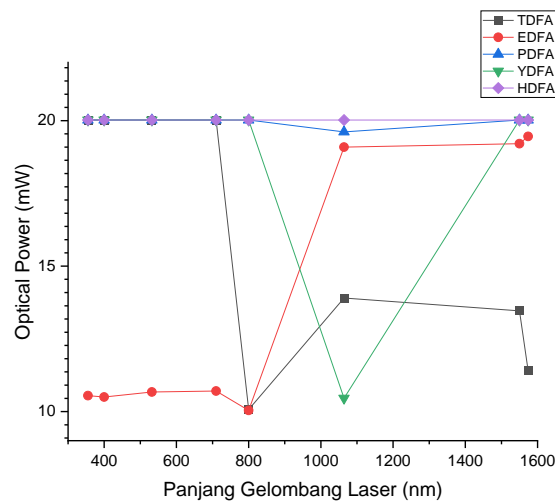
Pada Tabel 1 frekuensi *beat* yang dihasilkan oleh sistem bernilai sama walaupun telah dilakukan variasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser. Hasil frekuensi *beat* yang terukur dari komponen RF *spectrum analyzer* sebesar 20 MHz. Hasil dari frekuensi *beat* ini digunakan untuk menghitung jarak objek (R) dari sensor menggunakan persamaan 1 (Qingchun et al., 2021).

$$R = \frac{cT}{2B} f_b(t) \quad (1)$$

Jarak objek yang terdeteksi diukur menggunakan Persamaan 1, dengan variabel kecepatan cahaya (c) sebesar 3×10^8 m/s, waktu tempuh sinyal laser FMCW 10×10^{-6} detik, *bandwidth* modulasi (B) 300 MHz, dan frekuensi *beat* $f_b(t)$ yang terbaca melalui RF *Spectrum Analyzer* (Qingchun et al., 2021). Berdasarkan perhitungan dari data frekuensi *beat* pada berbagai jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang, jarak objek yang terukur adalah 100 meter, sesuai dengan jarak peletakan objek pada simulasi dan teori dari persamaan 1.

DISKUSI

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *optical power* dalam sistem FMCW LiDAR dipengaruhi oleh jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser yang digunakan. *Fiber doped amplifier* dapat meningkatkan *optical power* laser bila dipadukan dengan panjang gelombang yang sesuai dengan karakteristik dopant fibernya sehingga menghasilkan transmisi sinyal optik yang lebih kuat dan efisien serta pengurangan *noise* (Tomaszewska-Rolla et al., 2022). Selain itu, pemilihan panjang gelombang laser mempengaruhi penetrasi sinyal, interaksi dengan target, dan kecocokan dengan detektor (Szafarczyk & Toś, 2022). Gambar 2 menyajikan pengukuran *optical power* untuk berbagai kombinasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang.



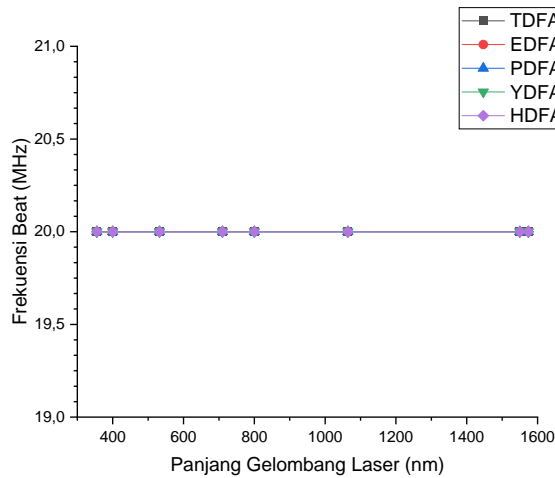
Gambar 2. Pengukuran *Optical Power* dari Variasi *Fiber Doped Amplifier* Dan Panjang Gelombang Laser

Pada Gambar 2 dapat diketahui HDFA--disimbolkan dengan warna ungu-- menghasilkan *optical power* yang lebih besar dan konstan dibandingkan jenis *fiber doped amplifier* lainnya. HDFA menghasilkan *optical power* sebesar 20,02 mW untuk manipulasi panjang gelombang 355 nm, 400 nm, 532 nm, 710 nm, 800 nm, 1064 nm, 1550 nm, dan 1574 nm. Hal tersebut terjadi karena HDFA dapat bekerja pada panjang gelombang 2 hingga 2.15 μm sehingga pada penelitian ini menghasilkan *optical power* yang konstan karena panjang gelombang yang diterapkan pada sistem FMCW LiDAR masih dalam rentang optimal (Alharbi et al., 2022). Konsentrasi dan karakteristik ion holmium dalam serat doping fiber HDFA dapat mengoptimalkan kinerja pada berbagai panjang gelombang sehingga *optical power* yang dihasilkan bernilai konstan (Tompkins et al., 2023). Selanjutnya, *Fiber doped amplifier* jenis lain yang menghasilkan *optical power* hampir sama dengan HDFA adalah PDFA (disimbolkan dengan warna biru pada Gambar 2). Rata-rata *optical power* yang dihasilkan oleh PDFA sebesar 20,02

mW, namun pada panjang gelombang 1064 nm mengalami penurunan kinerja, sementara pada panjang gelombang lain seperti 355 nm, 400 nm, 532 nm, 710 nm, 800 nm, 1550 nm, dan 1574 nm masih mempertahankan *optical power* yang konstan. PDFFA lebih optimal untuk operasi pada panjang gelombang dengan transisi elektronik spesifik ion Praseodymium di sekitar panjang gelombang 1.3 μm dan 1.6 μm (G. Alharbi et al., 2022). Pada 1064 nm, terjadi kurangnya transisi yang efisien atau tingkat penyerapan yang lebih tinggi sehingga mengurangi efisiensi penguatan (Yorks et al., 2021). Oleh karena itu, terjadi sedikit penurunan *optical power* pada panjang gelombang 1064 nm.

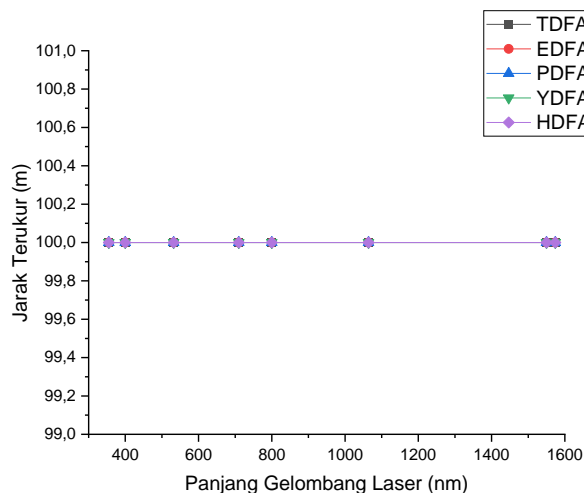
Adapun hasil *optical power* dari YDFA dari penerapan panjang gelombang 355 nm, 400 nm, 532 nm, 710 nm dan 800 nm menghasilkan *optical power* sebesar 20,02 mW hampir sama dengan HDFA dan PDFFA. Namun pada panjang gelombang 1064 nm pada YDFA juga mengalami penurunan *optical power* seperti PDFFA. Penurunan *optical power* dengan panjang gelombang 1064 nm mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan PDFFA, yakni sebesar 10,459 mW. Hal tersebut dikarenakan YDFA memiliki karakteristik material yang berbeda dari PDFFA, termasuk tingkat absorpsi dan emisi yang berbeda pada panjang gelombang 1064 nm. Material *ytterbium* memiliki tingkat absorpsi yang lebih tinggi pada panjang gelombang 1064 nm mengakibatkan efisiensi konversi yang lebih rendah dan penurunan *optical power* lebih besar dibandingkan dengan material *praseodymium* (PDFFA) yang memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi pada panjang gelombang yang sama (Bobkov et al., 2022). Namun, percobaan dengan panjang gelombang 1550 nm dan 1574 nm *optical power* kembali meningkat sebesar 20,02 mW karena *ytterbium* memiliki pita penyerapan yang luas di sekitar 980 nm dan pita emisi mulai dari 970 nm hingga sekitar 1200 nm (Gu et al., 2019). Selanjutnya analisis terkait penguat optik EDFA—disimbolkan dengan garis merah—yang menghasilkan *optical power* yang lebih kecil dari jenis *amplifier* sebelumnya yakni sekitar 10 mW pada panjang gelombang 355 nm, 400 nm, 532 nm, 710 nm, 800 nm. Namun, pengujian pada panjang gelombang 1064 nm, 1550 nm dan 1574 nm menghasilkan *optical power* yang meningkat yakni 19,042 mW, 19,209 mW dan 19,459 karena material *erbium* memiliki pita absorpsi dan emisi yang efisien di sekitar panjang gelombang 1550 nm, yang jauh lebih efisien dibandingkan pada panjang gelombang yang lebih pendek (355 nm - 800 nm) (Bo-Hun Choi et al., 2003). Panjang gelombang seperti 355 nm hingga 800 nm berada di luar pita emisi utama *erbium* sehingga efisiensi amplifikasi rendah pada panjang gelombang tersebut (W. C. Wang et al., 2015). Fenomena ini disebabkan ketidaksesuaian antara energi foton pada panjang gelombang 355 nm - 800 nm dan ketidaksesuaian tingkat energi yang tersedia dalam material *erbium* yang terdoping dalam fiber optik sehingga menghasilkan *optical power* yang lebih rendah (Nanda et al., 2020).

Selanjutnya TDFA yang menghasilkan *optical power* yang besar pada panjang gelombang 300 nm hingga 710 nm sebesar 20,02 mW. Namun mengalami penurunan *optical power* pada panjang gelombang 800 nm sebesar 10,07 mW kemudian mengalami peningkatan sekaligus penurunan saat panjang gelombang semakin besar yakni pada panjang gelombang 1064 nm, 1550 nm, dan 1574 nm dan hasil secara runtut sebesar 13,903 mW, 13,462 mW, 11,401 mW. Hal tersebut dikarenakan material thulium memiliki pita absorpsi yang efisien di sekitar 785 nm dan 1600 nm akan tetapi walaupun berdekatan dengan 785 nm, panjang gelombang 800 nm terjadi perbedaan dalam karakteristik material dan konfigurasi serat sehingga mengurangi efektivitas penguatan *optical power* (Schmidt et al., 2024). Selain itu, pada panjang gelombang seperti 1064 nm, 1550 nm, dan 1574 nm, meskipun terjadi peningkatan daya dibandingkan 800 nm masih ada penurunan *optical power* secara bertahap disebabkan kurangnya resonansi langsung antara panjang gelombang dan pita emisi thulium (Pokorný et al., 2022). Dalam riset ini, frekuensi *beat* juga diobservasi menggunakan berbagai varian *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang dalam sistem FMCW LiDAR yang esensial untuk menghitung jarak objek. Hasil pengukuran frekuensi *beat* disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang terhadap frekuensi *beat*

Gambar 3 menunjukkan bahwa variasi jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser tidak mempengaruhi frekuensi *beat* sehingga menghasilkan nilai yang konstan pada 20 MHz. Kestabilan frekuensi *beat* dalam sistem FMCW LiDAR ini terjadi karena semua variasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser yang diuji menghasilkan *output optical power* yang cukup untuk *photodetector* PIN dalam mendeteksi objek sehingga frekuensi *beat* terbaca tetap pada nilai yang sama. Setelah mendapatkan data frekuensi *beat* dilakukan perhitungan matematis berdasarkan persamaan 1 yang menghasilkan jarak terukur dari berbagai kombinasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang seperti yang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh Variasi *Fiber Doped Amplifier* dan Panjang Gelombang Terhadap Jarak Deteksi Objek

Gambar 4 menunjukkan bahwa variasi jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang tidak mempengaruhi jarak deteksi objek yang terkonfirmasi oleh frekuensi *beat* yang konsisten sebesar 20 MHz pada semua variasi percobaan. Hal ini mengindikasikan bahwa jarak terukur objek tetap sama, sesuai dengan perhitungan matematis dari persamaan 1 yang menghasilkan jarak 100 meter. Hasil ini

sesuai dengan teori dan pengaturan jarak objek yang telah ditetapkan dalam simulasi. Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa *optical power* yang cukup yang dipengaruhi oleh variasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang sehingga *photodetector* PIN menerima sinyal secara efektif sehingga frekuensi *beat* yang dihasilkan oleh *RF spectrum analyzer* stabil pada 20 MHz sehingga konsisten dengan teori dan jarak yang dikondisikan dalam simulasi.

KESIMPULAN

Penelitian pengukuran *optical power* dalam sistem FMCW LiDAR telah dilakukan melalui simulasi menggunakan *software Optisystem* dengan memvariasikan jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut mempengaruhi nilai *optical power* yang dihasilkan oleh sistem. Dari berbagai jenis *fiber doped amplifier* yang diuji, jenis HDFA terbukti paling efektif karena menghasilkan *optical power* yang konstan dan tinggi, yaitu 20,02 mW pada berbagai panjang gelombang sehingga menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis *amplifier* lainnya. Selain itu, panjang gelombang 1550 nm diidentifikasi sebagai yang paling optimal untuk diaplikasikan pada berbagai jenis *fiber doped amplifier* karena panjang gelombang ini menghasilkan *optical power* yang relatif tinggi di semua jenis *amplifier* yang diuji dalam sistem FMCW LiDAR. Frekuensi *beat* yang dihasilkan dari setiap kombinasi *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang tetap konstan pada 20 MHz sehingga memenuhi kondisi minimal untuk penerimaan *photodetector* PIN dan menghasilkan pembacaan jarak yang akurat sebesar 100 meter sesuai dengan teori dan pengaturan jarak dalam simulasi.

SARAN

Penelitian terkait pengaruh *optical power* dari sistem FMCW LiDAR dalam penelitian ini hanya berfokus kepada analisis parameter variasi jenis *fiber doped amplifier* dan panjang gelombang laser. Diperlukan pengamatan parameter lain pada sistem FMCW LiDAR untuk mengoptimalkan efisiensi keluaran dari *optical power* yang krusial dalam pendeteksian sistem FMCW LiDAR.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, M. D. (2000). Lidar design, use, and calibration concepts for correct environmental detection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6), 753–761. <https://doi.org/10.1109/70.897786>
- Ahmad, Z., Liao, Y.-M., Kuo, S.-I., Chang, Y.-C., Chao, R.-L., Naseem, Lee, Y.-S., Hung, Y.-J., Chen, H.-M., Chen, J., Guo, J.-I., & Shi, J.-W. (2021). High-Power and High-Responsivity Avalanche Photodiodes for Self-Heterodyne FMCW Lidar System Applications. *IEEE Access*, 9, 85661–85671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089082>
- Alharbi, A. G., Kanwal, F., Ghafoor, S., Habib, N., Kanwal, B., Atieh, A., Kousar, T., & Mirza, J. (2022). Performance Optimization of Holmium Doped Fiber Amplifiers for Optical Communication Applications in 2–2.15 μm Wavelength Range. *Photonics*, 9(4), 245. <https://doi.org/10.3390/photonics9040245>
- Bagheri, M., Frez, C., Kelly, B., Gupta, J. A., & Forouhar, S. (2013). High output power, fibre-coupled distributed feedback lasers operating near 2.05 μm wavelength range. *Electronics Letters*, 49(24), 1552–1553. <https://doi.org/10.1049/el.2013.2503>
- Bobkov, K. K., Mikhailov, E. K., Zaushitsyna, T. S., Rybaltovsky, A. A., Aleshkina, S. S., Melkumov, M. A., Bubnov, M. M., Lipatov, D. S., Yashkov, M. V., Abramov, A. N., Umnikov, A. A., Guryanov, A. N., & Likhachev, M. E. (2022). Properties of Silica Based Optical Fibers Doped With an Ultra-High Ytterbium Concentration. *Journal of Lightwave Technology*, 40(18), 6230–6239. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3191862>
- Bo-Hun Choi, Hyo-Hoon Park, & Moo-Jung Chu. (2003). New pump wavelength of 1540-nm band for

- long-wavelength-band erbium-doped fiber amplifier (l-band edfa). *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 39(10), 1272–1280. <https://doi.org/10.1109/JQE.2003.817582>
- Chen, J.-D., Wu, K.-W., Ho, H.-L., Lee, C.-T., & Lin, F.-Y. (2022). 3-D Multi-Input Multi-Output (MIMO) Pulsed Chaos Lidar Based on Time-Division Multiplexing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 28(5): Lidars and Photonic Radars, 1–9. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2022.3150791>
- Choquette, K. D., Chen, C., & Plant, D. V. (2010). High speed modulation of coupled cavity VCSELs. *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 108–109. <https://doi.org/10.1109/ACP.2010.5682810>
- Donda, A. (2017). Don't Turn a Blind Eye to Safety. *Journal of System Safety*, 53(3), 30–40. <https://doi.org/10.56094/jss.v53i3.109>
- Flores-Fuentes, W., Alba-Corpus, I. Y., Sergiyenko, O., & Rodríguez-Quiñonez, J. C. (2022). A structural health monitoring method proposal based on optical scanning and computational models. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 18(8), 155013292211126. <https://doi.org/10.1177/15501329221112606>
- G. Alharbi, A., Mirza, J., Raza, M., & Ghafoor, S. (2022). Performance Enhancement of Praseodymium Doped Fiber Amplifiers. *Computers, Materials & Continua*, 73(3), 5411–5422. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.029317>
- Garipey, G., Tonolini, F., Warburton, R., Chan, S., Henderson, R., Leach, J., & Faccio, D. (2016). Detection and tracking of moving objects hidden from view. *Imaging and Applied Optics 2016*, CTh4B.3. <https://doi.org/10.1364/COSI.2016.CTh4B.3>
- Gu, Y. Y., Fu, Y. M., Lu, H., & Cui, Y. (2019). Study on Energy Level and Spectral Characteristics of High Power Yb Doped Fiber Laser. *Applied Mechanics and Materials*, 893, 57–61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.893.57>
- Hong, D.-B., & Yang, C.-S. (2013). Algorithm Implementation for Detection and Tracking of Ships Using FMCW Radar. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2013.16.1.1>
- Kim, C., Jung, Y., & Lee, S. (2020). FMCW LiDAR System to Reduce Hardware Complexity and Post-Processing Techniques to Improve Distance Resolution. *Sensors*, 20(22), 6676. <https://doi.org/10.3390/s20226676>
- Liang, X., Huang, Z., Lu, L., Tao, Z., Yang, B., & Li, Y. (2020). Deep Learning Method on Target Echo Signal Recognition for Obscurant Penetrating Lidar Detection in Degraded Visual Environments. *Sensors*, 20(12), 3424. <https://doi.org/10.3390/s20123424>
- Liu, Y., Wu, K., Li, N., Lan, L., Yoo, S., Wu, X., Shum, P. P., Zeng, S., & Tan, X. (2013). Regenerative Er-doped Fiber Amplifier System for High-repetition-rate Optical Pulses. *Journal of the Optical Society of Korea*, 17(5), 357–361. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2013.17.5.357>
- Naim, N. F., Sudin, S. N. M., Sarnin, S. S., Ya'acob, N., & Supian, L. S. (2020). Design of fiber bragg grating (FBG) temperature sensor based on optical frequency domain reflectometer (OFDR). *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(3), 3158. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp3158-3165>
- Nanda, K., Kundu, R. S., Punia, R., Mohan, D., & Kishore, N. (2020). Resonant and Non-resonant Nonlinear Optical Properties of Er³⁺ modified BaO-ZnO-B₂O₃ Glasses at 532 and 1550 nm. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 541, 120155. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120155>
- Pokorný, J., Aubrecht, J., & Peterka, P. (2022). Broadband fiber-optic thulium-doped amplifier for wavelengths beyond the L-band. In C.-A. Bunge, K. Kalli, & P. Peterka (Eds.), *Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VII* (p. 12). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2622428>
- Qian, R., Zhou, K. C., Zhang, J., Viehland, C., Dhalla, A.-H., & Izatt, J. A. (2022). Video-rate high-precision time-frequency multiplexed 3D coherent ranging. *Nature Communications*, 13(1), 1476.

- <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29177-9>
- Qingchun, H., Kaida, C., & Jing, X. (2021). Modeling of detection techniques for FMCW lidar using OptiSystem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1939(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1939/1/012066>
- Rahmatulloh, M. A., Hanto, D., Yantidewi, M., Agitta Rianaris, & R.A. Firdaus. (2023). Analisis Redaman Fiber Optik dengan Menggunakan Pemodelan Software Optisystem. *Jurnal Kolaboratif Sains*, 6(7), 630–639. <https://doi.org/10.56338/jks.v6i7.3795>
- Ramadani, R., Khairunisa, S. A., & Khoiro, M. (2023). Characteristics Analysis of Hybrid Optical Amplifier with Doped Fiber Variations for Fiber Optic Communications Network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2623(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2623/1/012022>
- Rodrigo, P. J., Iversen, T. F. Q., Hu, Q., & Pedersen, C. (2014). Diode laser lidar wind velocity sensor using a liquid-crystal retarder for non-mechanical beam-steering. *Optics Express*, 22(22), 26674. <https://doi.org/10.1364/OE.22.026674>
- Schmidt, E. L., Ou, Z., Ximendes, E., Cui, H., Keck, C. H. C., Jaque, D., & Hong, G. (2024). Near-infrared II fluorescence imaging. *Nature Reviews Methods Primers*, 4(1), 23. <https://doi.org/10.1038/s43586-024-00301-x>
- Shao, B., Tan, Q., Zhang, W., Liang, D., Deng, X., Zhang, B., & Zhang, W. (2022). Chip-based microwave-photonic LiDAR for high-speed ranging and velocimetry. In G.-D. Peng, M. Yang, & X. Fan (Eds.), *Advanced Sensor Systems and Applications XII* (p. 8). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2638112>
- Szafarczyk, A., & Toś, C. (2022). The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements. *Sensors*, 23(1), 292. <https://doi.org/10.3390/s23010292>
- Tomaszewska-Rolla, D., Lindberg, R., Pasiskevicius, V., Laurell, F., & Soboń, G. (2022). A comparative study of an Yb-doped fiber gain-managed nonlinear amplifier seeded by femtosecond fiber lasers. *Scientific Reports*, 12(1), 404. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04420-3>
- Tompkins, S. A., Driver, S. P., Robotham, A. S. G., Windhorst, R. A., Lagos, C. del P., Vernstrom, T., & Hopkins, A. M. (2023). The cosmic radio background from 150 MHz to 8.4 GHz and its division into AGN and star-forming galaxy flux. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 521(1), 332–353. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad116>
- Wang, W. C., Yuan, J., Li, L. X., Chen, D. D., Qian, Q., & Zhang, Q. Y. (2015). Broadband 27 μm amplified spontaneous emission of Er^{3+} doped tellurite fibers for mid-infrared laser applications. *Optical Materials Express*, 5(12), 2964. <https://doi.org/10.1364/OME.5.002964>
- Wang, Y., Wang, S., Halder, A., & Sahu, J. (2023). (INVITED) Bi-doped optical fibers and fiber amplifiers. *Optical Materials: X*, 17, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2022.100219>
- Warburton, R., Aniculaesei, C., Clerici, M., Altmann, Y., Gariepy, G., McCracken, R., Reid, D., McLaughlin, S., Petrovich, M., Hayes, J., Henderson, R., Faccio, D., & Leach, J. (2017). Observation of laser pulse propagation in optical fibers with a SPAD camera. *Scientific Reports*, 7(1), 43302. <https://doi.org/10.1038/srep43302>
- Webster, S., McDonald, F. C., Villanger, A., Soileau, M. J., Van Stryland, E. W., Hagan, D. J., McIntosh, B., Torruellas, W., Farroni, J., & Tankala, K. (2005). *Optical damage measurements for high peak power ytterbium doped fiber amplifiers* (G. J. Exarhos, A. H. Guenther, K. L. Lewis, D. Ristau, M. J. Soileau, & C. J. Stolz, Eds.; p. 599115). <https://doi.org/10.1117/12.639287>
- Yorks, J. E., Selmer, P. A., Kupchock, A., Nowotnick, E. P., Christian, K. E., Rusinek, D., Dacic, N., & McGill, M. J. (2021). Aerosol and Cloud Detection Using Machine Learning Algorithms and Space-Based Lidar Data. *Atmosphere*, 12(5), 606. <https://doi.org/10.3390/atmos12050606>
- Zhang, X., Pouls, J., & Wu, M. C. (2019). Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR. *Optics Express*, 27(7), 9965. <https://doi.org/10.1364/OE.27.009965>

Zhao, J., Xu, H., Zhang, Y., Shankar, V., & Liu, H. (2022). Automatic Identification of Vehicle Partial Occlusion in Data Collected by Roadside LiDAR Sensors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676(5), 708–718. <https://doi.org/10.1177/03611981211069347>