

SHOT ENHANCEMENT AND THERMAL NOISE APD PIN X APD

Brylliant Raiseviolla Minto^{1*}

¹Telkom University Purwokerto; Jl. DI Panjaitan No.128, Karangreja, Purwokerto, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah, Indonesia; (0281) 641629

Keywords:

APD, APD PIN, *Q-Factor*, *Thermal Noise*, BER

Correspondent Email:

Brylliantrais@gmail.com@gmail.com

Abstrak. Dalam perangkat optik seperti APD, PIN, dan PMT, terdapat *trade-off* antara *Gain*, *Q-factor*, dan BER. Peningkatan *Gain* dapat menurunkan *Q-factor* dan meningkatkan BER. Perubahan daya laser memengaruhi kualitas sinyal, dengan peningkatan daya meningkatkan *Q-factor* dan mengurangi BER, namun juga meningkatkan noise dan konsumsi daya. *Gain* APD atau PIN mempengaruhi sensitivitas deteksi dan kualitas sinyal. Peningkatan sensitivitas deteksi meningkatkan *Q-factor* dan mengurangi BER, tetapi dapat mengorbankan kualitas sinyal. *Noise* termal dan *noise shot* berperan dalam mempengaruhi *Q-factor* dan BER. Pada *Gain* rendah, *noise shot* dominan, sedangkan pada *Gain* tinggi, *noise* termal lebih dominan. Daya *input* pada PMT mempengaruhi *Q-factor*, meningkat seiring dengan peningkatan daya *input*, tetapi mencapai titik jenuh. Kebisingan termal dan kebisingan *shot* mempengaruhi BER, dengan kebisingan termal dominan pada penguatan daya tinggi, namun peningkatan penguatan daya yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kebisingan *shot*. Pemilihan penguatan daya optimal diperlukan untuk mengurangi kebisingan termal tanpa meningkatkan kebisingan *shot*.

Abstract. In optical devices such as PPEs, PINs, and PMTs, there is a trade-off between *Gain*, *Q-factor*, and BER. Increasing *Gain* can decrease *Q-factor* and increase BER. Changes in laser power affect signal quality, with increased power increasing *Q-factor* and reducing BER, but also increasing noise and power consumption. APD or PIN *Gain* affects detection sensitivity and signal quality. An increase in detection sensitivity improves *Q-factor* and reduces BER, but can come at the expense of signal quality. Thermal noise and shot noise play a role in affecting *Q-factor* and BER. At low *Gain*, shot noise is dominant, while at high *Gain*, thermal noise is more dominant. The input power at the PMT affects the *Q-factor*, increasing as the input power increases, but reaching a saturation point. Thermal noise and shot noise affect BER, with thermal noise dominant at high power Gains, but increasing the power *Gain* too high can increase shot noise. Optimal power *Gain* selection is required to reduce thermal noise without increasing shot noise.



JITET is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

1. PENDAHULUAN

Fiber optik merupakan jaringan yang dapat mentransmisi cahaya. Namun, fiber optik memiliki jangkauan yang lebih jauh dari 550 m sampai ratusan kilometer, tahan terhadap interferensi elektromagnetik dan dapat mengirim data pada kecepatan yang lebih tinggi dari jenis lainnya. Fiber optik tidak membawa sinyal elektrik, seperti lainnya yang menggunakan tembaga. Sebagai gantinya, sinyal yang mewakili *bit* tersebut diubah ke bentuk cahaya [1].

Sistem Komunikasi secara umum terdiri dari pemancar sebagai sumber pengirim informasi, detektor penerima informasi, dan media transmisi sebagai sarana untuk melewatkannya [2].

Pada sistem komunikasi serat optik digunakan sebuah detektor yaitu PIN dan APD, dimana PIN ini memiliki waktu respon yang lambat, Adapun dengan APD penerapan tegangan bias terbalik dan mempunyai sensitivitas yang sangat tinggi [3].

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas sinyal dan kinerja deteksi dalam sistem yang menggunakan APD PIN x APD, dan mengetahui seberapa kuat APD PIN dan APD tahan terhadap Thermal noise.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. PIN dan APD

Detektor optik berfungsi sebagai penerima dalam sistem komunikasi optik. Sebuah detektor optik atau *photodetector* adalah kebalikan dari apa yang dikerjakan oleh bagian pengirim, yaitu sumber *optic*. Terdapat 2 (dua) tipe detektor Sistem, yaitu PIN (*Positive Intrinsic Negative*) dan APD (*Avalanched Photo Diode*). Dioda PIN kurang sensitif dibandingkan dengan APD, tetapi desainnya memungkinkan untuk diintegrasikan dengan suatu penguat FET. Dengan begitu, suatu modul terpadu yang mempunyai fleksibilitas penggunaan yang tinggi dapat diperoleh [4].

APD melipat gandakan sinyal utama arus cahaya sebelum memasuki *amplifier*. Ini meningkatkan sensitivitas penerima, karena arus cahaya dilipat gandakan sebelum bertemu

dengan *noise thermal* yang menjadi satu dengan rangkaian penerima [5].

2.2. PRBS (*Pseudo Random Bit Sequence*)

Pseudo Random Bit Sequence (PRBS) adalah komponen yang digunakan untuk membangkitkan sinyal informasi berupa sinyal digital dan sebagai pengubah sinyal elektrik berupa *bit-bit* yang telah dibangkitkan oleh PRBS *Generator* menjadi sinyal optik, digunakan NRZ *Pulse Generator* [6].

2.3. *Pulse Wave Modulation* (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) secara umum adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu periode, untuk mendapatkan tegangan rata – rata yang berbeda. Beberapa contoh aplikasi PWM adalah pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, audio *effect* dan penguatan, serta aplikasi-aplikasi lainnya [7].

2.4. LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER) adalah perangkat yang menggunakan efek mekanika kuantum untuk mengeluarkan sinar koheren melalui satu proses emisi terstimulasi. LASER memiliki sifat kesearahan yang tinggi, monokromatis (memiliki warna dan panjang gelombang tunggal), koheren (rentang frekuensi yang sempit) [8].

2.5. Modulasi

Modulasi merupakan proses penumpangan sinyal informasi pada sinyal carrier. Sinyal informasi tersebut dapat ditumpangkan dengan cara mengubah amplitudo, frekuensi maupun fase dari sinyal *carrier*. Untuk meningkatkan kapasitas informasi yang dikirimkan, dapat melakukan perubahan dengan kombinasi dari beberapa parameter tersebut [9].

2.6. OPM

OPM digunakan untuk mengetahui daya output transmisi sinyal dari fiber *optic* pengirim ke penerima. OPM pada bagian penerima

menggunakan satuan dalam *decibel* meter (dBm) [10].

2.7. Attenuasi

Atenuasi merupakan gambaran seberapa besar cahaya datang berkurang atau hilang dibandingkan dengan energi cahaya datang di permukaan. Pengurangan energi cahaya dikarenakan adanya proses absorpsi dan hamburan [11].

2.8. Filter

Filter adalah sebuah rangkaian yang dirancang agar mengalirkan suatu pita frekuensi tertentu dan menghilangkan frekuensi yang berbeda dengan pita ini. *Low Pass Filter* (LPF) adalah filter yang berfungsi meneruskan sinyal input yang frekuensinya berada di bawah frekuensi tertentu, diatas frekuensi tersebut (frekuensi *cut off*) sinyal akan diredam (FcoL), *High Pass Filter* adalah filter yang berfungsi meneruskan sinyal di atas frekuensi *cut off* diredam (FcoH), *Band Pass Filter* (BPF) yaitu filter yang berfungsi meneruskan sinyal input yang berada diantara dua frekuensi tertentu saja, *Band Stop Filter* (BSF) atau *band reject filter* (BRF) adalah kebalikan dari band pass filter yaitu menghilangkan frekuensi yang ada diantara dua buah frekuensi tertentu [12].

2.9. GAIN

Gain adalah besarnya penguatan terhadap sinyal yang diinputkan ke sebuah amplifier sehingga diperoleh sinyal *output* yang telah diperbesar sekian kalinya [13].

2.10. BER

Bit kesalahan *error bit rate* merupakan laju yang terjadi dalam mentransmisikan sinyal digital. Sensitivitas merupakan daya optik minimum dari sinyal yang datang pada *bit error rate* yang dibutuhkan. Kebutuhan akan BER berbeda beda pada setiap aplikasi, sebagai contoh pada aplikasi komunikasi membutuhkan BER bernilai 10^{-10} atau lebih baik, pada beberapa komunikasi data membutuhkan BER bernilai sama atau lebih baik dari 10^{-12} . BER untuk sistem komunikasi optik sebesar 10^{-9} [14].

2.11. Optisystem

Optisystem merupakan sebuah paket simulasi yang inovatif untuk sistem komunikasi optik yang dapat merancang, menguji, dan mengoptimalkan secara virtual, hampir semua link optik di lapisan fisik untuk spektrum yang luas dari jaringan optik. Perangkat lunak ini merupakan *system level* simulator yang didasarkan pada pemodelan realistik sistem komunikasi serat optik [15].

2.12. Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) adalah *software* atau perangkat lunak yang dikembangkan oleh Mathworks, Inc dengan memanfaatkan matriks dalam penggunaannya. Salah satu kegunaan dari Matlab secara umum adalah untuk pengembangan di bidang komputasi yaitu pengembangan pemrograman atau *software* [16].

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang mungkin digunakan dalam penelitian ini meliputi pemodelan dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak khusus, seperti MATLAB atau Optisystem. Data dan hasil dari penelitian ini akan dianalisis untuk mengukur peningkatan kinerja yang dicapai dengan menggunakan perpaduan APD PIN x APD.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 Nilai Parameter Setelah Melewati APD dan PIN

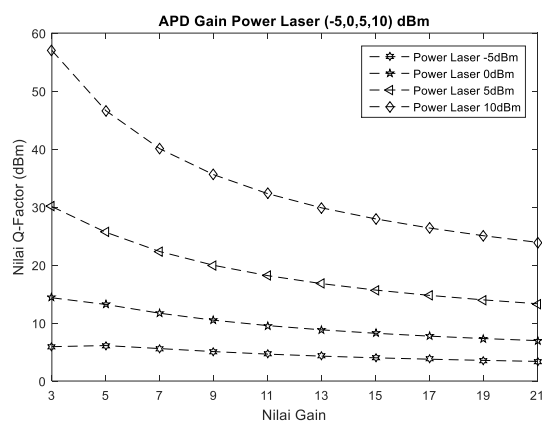
Gain	Q-Factor (dBm)				BER (dBm)			
	-5	0	5	10	-5	0	5	10
3	5.92756	14.3591	30.0863	57.0133	1.52034E-09	4.3063E-47	3.173E-199	0
5	6.11861	13.2049	25.6621	46.6289	4.43922E-10	3.52674E-40	1.21451E-145	0
7	5.59719	11.491	22.3313	40.0595	9.89546E-09	5.77431E-27	8.86629E-111	0
9	5.05795	10.4903	19.9536	35.585	1.30721E-07	3.7977E-26	5.886E-89	7.81289E-278
11	4.64386	9.56201	18.1791	32.3151	1.49427E-06	4.51101E-22	2.71338E-74	1.38786E-229
13	4.29332	8.82911	16.7982	29.8648	7.61413E-06	4.08111E-19	8.67047E-64	1.84918E-195
15	4.00562	8.23551	15.6888	27.9632	2.65799E-05	6.88047E-17	6.38382E-56	1.58311E-172
17	3.76543	7.74366	14.7711	26.3875	7.10072E-05	3.69454E-15	7.90931E-45	6.57297E-154
19	3.56166	7.32812	13.996	25.0586	0.000156993	8.89528E-14	5.77363E-45	4.87123E-139
21	3.38628	6.97136	13.1301	23.9183	0.00030091	1.19299E-12	5.39576E-41	6.79729E-127

Gain	Q-Factor (dBm)				BER (dBm)			
	-5	0	5	10	-5	0	5	10
3	2.63607	8.13104	23.3084	58.8575	0.00419253	2.12458E-16	1.80345E-120	0
5	2.63608	8.13105	23.3085	58.8576	0.00419254	2.12458E-16	1.80345E-120	0
7	2.63609	8.13106	23.3086	58.8577	0.00419255	2.12458E-16	1.80345E-120	0
9	2.63610	8.13107	23.3087	58.8578	0.00419256	2.12458E-16	1.80345E-120	0
11	2.63611	8.13108	23.3088	58.8579	0.00419257	2.12458E-16	1.80345E-120	0
13	2.63612	8.13109	23.3089	58.8580	0.00419258	2.12458E-16	1.80345E-120	0
15	2.63613	8.13110	23.3090	58.8581	0.00419259	2.12458E-16	1.80345E-120	0
17	2.63614	8.13111	23.3091	58.8582	0.00419260	2.12458E-16	1.80345E-120	0
19	2.63615	8.13112	23.3092	58.8583	0.00419261	2.12458E-16	1.80345E-120	0
21	2.63616	8.13113	23.3093	58.8584	0.00419262	2.12458E-16	1.80345E-120	0

Dari data yang diperoleh, terdapat hubungan terbalik antara *Gain* dan *Q-factor* serta hubungan sejalan antara *Gain* dan BER. Artinya, saat *Gain* meningkat pada *Avalanche Photodiode* (APD), kualitas sinyal optik yang diukur dengan *Q-factor* akan menurun, sementara tingkat kesalahan transmisi yang

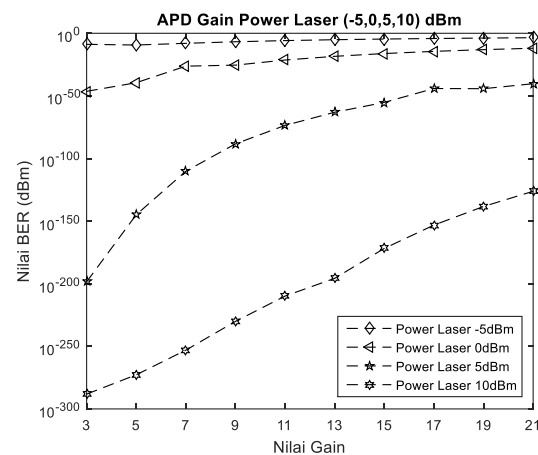
diukur dengan *Bit Error Rate* (BER) akan meningkat.

Selanjutnya, perubahan daya pada laser juga mempengaruhi kualitas sinyal. Tingkat daya yang lebih tinggi dapat meningkatkan kualitas sinyal yang diukur dengan *Q-factor* dan mengurangi tingkat kesalahan transmisi yang diukur dengan BER, jika dibandingkan dengan tingkat daya yang lebih rendah. Namun, peningkatan daya juga dapat mengakibatkan peningkatan konsumsi daya dan risiko peningkatan *noise*.



Gambar 1 Grafik Q – factor APD Gain power

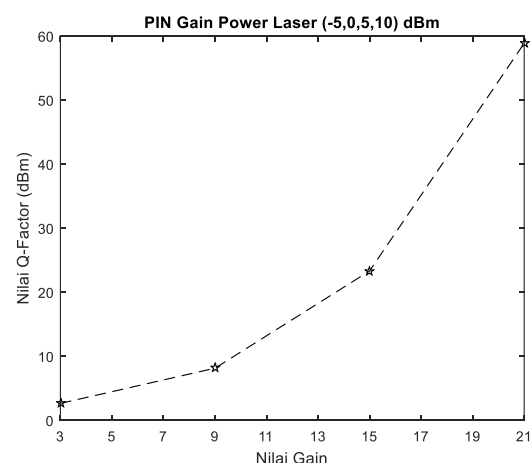
Hasil tersebut menunjukkan adanya *trade off* atau keseimbangan antara beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan, yaitu *Gain* APD, *Q-factor*, dan BER. Ketika *Gain* APD meningkat, sensitivitas deteksi juga meningkat, yang pada beberapa kasus dapat meningkatkan *Q-factor* dan mengurangi BER. Namun, peningkatan *Gain* juga dapat menyebabkan peningkatan *noise* dan mengurangi kualitas sinyal, yang berakibat pada penurunan *Q-factor* dan peningkatan BER.



Gambar 2 Grafik BER APD Gain power

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai BER menurun seiring dengan meningkatnya *Gain* APD. Hal ini karena *Gain* APD meningkatkan sensitivitas APD terhadap sinyal cahaya. Dengan sensitivitas yang lebih tinggi, APD lebih mungkin untuk mendeteksi sinyal cahaya dengan benar. Nilai BER menurun lebih cepat pada *Gain* APD yang lebih rendah. Hal ini karena pada *Gain* APD yang lebih rendah, sinyal cahaya yang lebih lemah dapat dideteksi dengan benar.

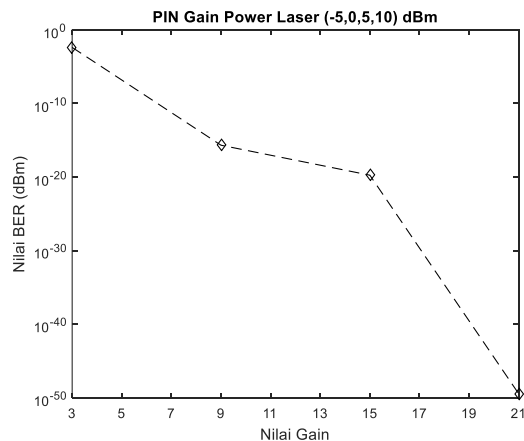
Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa *Gain* APD adalah faktor yang penting dalam menentukan nilai BER. Dengan meningkatkan *Gain* APD, nilai BER dapat diturunkan, sehingga meningkatkan kualitas transmisi data digital.



Gambar 3 Grafik Q – factor PIN Gain power

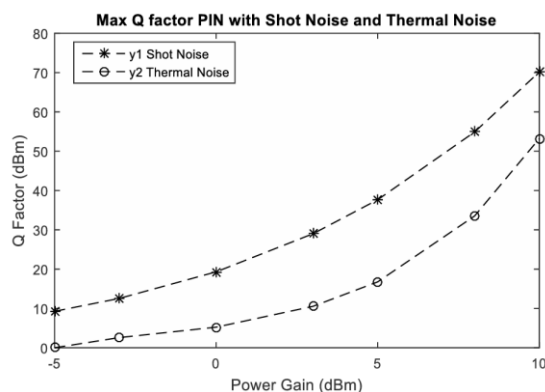
Dengan demikian, terdapat keseimbangan antara meningkatkan sensitivitas deteksi dan mempertahankan kualitas sinyal

yang baik. Dalam hal ini, peningkatan Gain dapat meningkatkan sensitivitas deteksi, tetapi juga dapat mengorbankan kualitas sinyal.



Gambar 4 Grafik BER PIN *Gain power*

Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa *Gain* PIN adalah faktor yang penting dalam menentukan nilai BER. Dengan meningkatkan *Gain* PIN, nilai BER dapat diturunkan, sehingga meningkatkan kualitas transmisi data digital. Perbedaan utama antara grafik BER APD dan PIN adalah bahwa grafik BER PIN memiliki kurva yang lebih curam. Hal ini menunjukkan bahwa PIN lebih sensitif terhadap sinyal cahaya dari pada APD. Oleh karena itu, PIN dapat digunakan untuk mendeteksi sinyal cahaya yang lebih lemah daripada APD. Namun, PIN juga memiliki kekurangan dibandingkan APD. PIN memiliki noise yang lebih tinggi dari pada APD. Hal ini dapat menyebabkan nilai BER yang lebih tinggi pada *Gain* PIN yang tinggi.



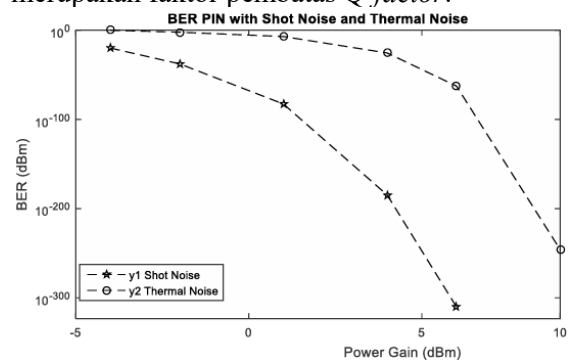
Gambar 5 Grafik *Q-factor Thermal Noise* PIN

Dari diagram tersebut, terlihat bahwa *noise* termal meningkat seiring dengan

peningkatan *Gain*. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya pembawa muatan yang mengalir melalui perangkat pada *Gain* yang lebih tinggi. *Noise shot* juga meningkat seiring dengan peningkatan *Gain*, tetapi pada tingkat yang lebih rendah dari pada *noise* termal.

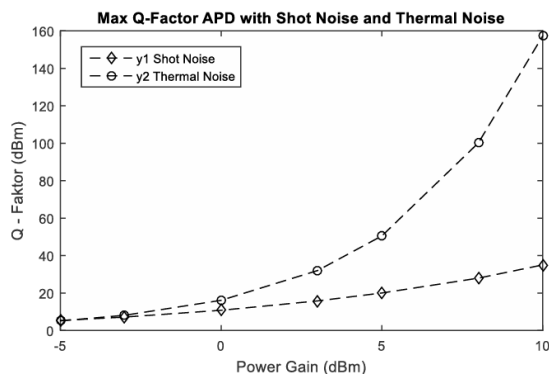
Pada *Gain* yang rendah, *noise shot* lebih dominan daripada *noise* termal. Hal ini menyebabkan *Q-factor* menjadi rendah. Pada *Gain* yang tinggi, *noise* termal menjadi dominan daripada *noise shot*. Hal ini menyebabkan *Q-factor* menjadi tinggi.

Secara umum, diagram tersebut menunjukkan bahwa *noise* termal dan *noise shot* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *Q-factor*. Pada *Gain* yang rendah, *noise shot* merupakan faktor pembatas *Q-factor*. Pada *Gain* yang tinggi, *noise* termal merupakan faktor pembatas *Q-factor*.



Gambar 6 Grafik BER *Thermal Noise* PIN

Grafik ini menunjukkan bahwa BER meningkat seiring dengan peningkatan daya masukan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya *shot noise* dan *thermal noise*. Namun, peningkatan BER akibat *shot noise* lebih besar daripada peningkatan BER akibat *thermal noise*. Pada daya masukan yang rendah, BER didominasi oleh *thermal noise*. Pada daya masukan yang tinggi, BER didominasi oleh *shot noise*. Garis putus-putus pada grafik menunjukkan batas BER yang dapat diterima untuk komunikasi data. Di bawah batas ini, BER masih dapat diterima dan data dapat dikomunikasikan dengan aman. Berdasarkan grafik ini, dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan BER yang rendah, daya masukan pin foton harus dijaga agar tidak terlalu tinggi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan LED atau laser dengan daya pancar yang rendah atau dengan menggunakan pin foton dengan sensitivitas yang tinggi.



Gambar 7 Grafik Q-factor Thermal Noise APD

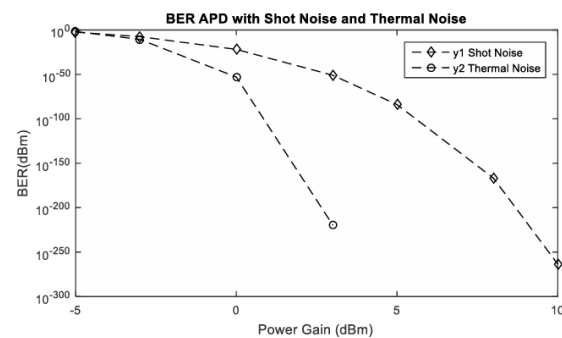
Diagram tersebut menunjukkan hubungan antara nilai Q-factor dan daya input pada sebuah *photomultiplier tube* (PMT). PMT adalah perangkat yang digunakan untuk mendeteksi cahaya. Nilai Q-factor menunjukkan seberapa baik PMT dapat membedakan antara sinyal dan *noise*.

Pada diagram tersebut, sumbu X menunjukkan nilai daya input, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai Q-factor. Daya input adalah jumlah energi cahaya yang diterima oleh PMT.

Dari diagram tersebut, terlihat bahwa nilai Q-factor meningkat seiring dengan peningkatan daya input. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jumlah elektron yang dihasilkan oleh PMT seiring dengan peningkatan daya input. Elektron-elektron tersebut dapat digunakan untuk meningkatkan sinyal keluaran dari PMT, sehingga *noise* relatif menjadi lebih kecil.

Namun, nilai Q-factor tidak akan meningkat terus menerus seiring dengan peningkatan daya input. Pada suatu titik, nilai Q-factor akan mencapai titik jenuh. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya *noise* termal seiring dengan peningkatan daya input. *Noise* termal adalah *noise* yang disebabkan oleh gerakan acak elektron-elektron dalam PMT.

Secara umum, diagram tersebut menunjukkan bahwa nilai Q-factor PMT meningkat seiring dengan peningkatan daya input, tetapi pada suatu titik, nilai Q-factor akan mencapai titik jenuh.



Gambar 8 Grafik BER Thermal Noise APD

Grafik ini memiliki dua garis, yang masing masing mewakili kontribusi kebisingan termal dan kebisingan shot. Kebisingan shot adalah kebisingan yang disebabkan oleh fluktuasi jumlah foton yang ditangkap oleh detektor fotodioda.

Seiring dengan meningkatnya penguatan daya, kebisingan termal menjadi lebih dominan. Hal ini karena penguatan daya meningkatkan sinyal yang ditangkap oleh detektor fotodioda, sehingga kebisingan termal menjadi lebih terlihat.

Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk mengurangi kebisingan termal pada detektor fotodioda APD, perlu dilakukan peningkatan penguatan daya hingga mencapai tingkat tertentu. Namun, peningkatan penguatan daya yang terlalu tinggi justru akan meningkatkan kebisingan shot. dapat dilihat bahwa pada penguatan daya 0 dBm, BER adalah sekitar 10⁻³. Dengan meningkatnya penguatan daya, BER menurun hingga mencapai sekitar 10⁻⁹ pada penguatan daya 10 dBm. Namun, pada penguatan daya 15 dBm, BER mulai meningkat kembali. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kebisingan *shot*.

Untuk mengurangi kebisingan termal pada detektor fotodioda APD, perlu dilakukan peningkatan penguatan daya hingga mencapai tingkat tertentu. Namun, peningkatan penguatan daya yang terlalu tinggi justru akan meningkatkan kebisingan *shot*. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemilihan penguatan daya yang optimal untuk mengurangi kebisingan termal tanpa meningkatkan kebisingan *shot*.

5. KESIMPULAN

- a. Terdapat *trade-off* antara Gain APD, Q-factor, dan BER dalam sistem deteksi optik. Saat Gain APD meningkat, Q-factor cenderung

- menurun dan BER cenderung meningkat.
- b. Terdapat keseimbangan antara meningkatkan sensitivitas deteksi dan mempertahankan kualitas sinyal yang baik.
 - c. *Noise* termal dan *noise shot* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *Q-factor*. Pada *Gain* yang rendah, *noise shot* lebih dominan dan menyebabkan *Q-factor* rendah. Pada *Gain* yang tinggi, *noise* termal menjadi dominan dan menyebabkan *Q-factor* tinggi.
 - d. Mengurangi kebisingan termal pada detektor fotodioda APD, perlu dilakukan peningkatan penguatan daya hingga mencapai tingkat tertentu. Namun, peningkatan penguatan daya yang terlalu tinggi justru akan meningkatkan kebisingan *shot*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Delfin Daffa Pebrian selaku mentor selama proses pengerjaan penelitian ini, bantuan, bimbingan, serta semangat yang diberikan sangat berarti dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hariyadi, "Sistem Komunikasi Fiber Optik Dan Pemanfaatannya Pada PT.Semen Padang," *Vol. I No.1 Januari 2018*, vol. I, no. 1, pp. 43–51, 2018.
- [2] A. H. Okses Efriyanda, Delsina Faiza, "Analisis Kinerja Sistem Komunikasi Serat Optik Dengan Menggunakan Metode Power Link Budget Dan Rise Time Budget Pada Pt.Telkom," vol. 3, no. 3, pp. 63–77, 2014.
- [3] A. I. Mashrur Islam, Shahriar Ahmed, "Performance analysis of 2.5 gbps PIN and APD photodiodes to use in free space optical communication link," *Int. J. Thin Film Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 53–58, 2019, doi: 10.18576/ijtfst/080204.
- [4] I. Umaterate, M. Z. Saifuddin, H. Saman, and R. E. N, "Sistem Penyambungan dan Pengukuran Kabel Fiber Optik Menggunakan Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) pada PT . Telkom Kandatel Ternate," *J. Tek. Elektro Fak. Tek. Univ. Khairun Ternate*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [5] R. S. S, Darjat, and B. Setiyono, "Perancangan Modulator Elektro-Optik Transversal Pockels," *Transmisi*, vol. 13, no. 4, pp. 148–155, 2011, [Online]. Available: <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/transmisi>
- [6] N. E. Musa, "Analisis Arrayed Gratings Menggunakan Filter Fiber Bragg Gratings Pada Jaringan Scm/Wdm Radio Over Fiber," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2016.
- [7] F. B. Lubis and A. Yanie, "Implementasi Pulse Width Modulation (PWM) Pada Penyaluran Limbah Cair Pupuk Kelapa Sawit Berbasis Arduino," *JET (Journal Electr. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 39–46, 2022, doi: 10.30743/jet.v7i2.5394.
- [8] *et al.*, "Karakteristik Listrik dan Optik pada LED dan Laser," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 8, no. 2, pp. 203–208, 2020, doi: 10.23960/jtaf.v8i2.2577.
- [9] A. Y. Prasetya, Suwadi, and T. Suryani, "Implementasi Modulasi dan Demodulasi M-ary QAM pada DSK TMS320C6416T," *J. Tek. Pomits*, vol. 2, no. 1, pp. 46–50, 2013.
- [10] K. S. Juwari, Puguh Jayadi, "Analisis Redaman Kabel Fiber Optic Patchcord Single Core," *JURIKOM (Jurnal Ris. Komputer)*, vol. 9, no. 1, p. 159, 2022, doi: 10.30865/jurikom.v9i1.3846.
- [11] F. Meliani, V. P. Siregar, N. Hendiarti, and E. Parwati, "Pengukuran Koefisien Atenuasi Dan Hubungannya Dengan Kualitas Air Di Perairan Kelurahan Pulau Panggang," *J. Teknol. Perikan. dan Kelaut.*, vol. 9, no. 1, pp. 73–81, 2019, doi: 10.24319/jtpk.9.73-81.
- [12] S. Zefi, F. B. Alifah, and M. F. Shalama, "Rancang Bangun Modul Pembelajaran High Pass Filter Dan Low Pass Filter Untuk Praktikum Di Laboratorium Teknik Telekomunikasi Politeknik Negeri Sriwijaya," vol. 7, no. 2, 2024.
- [13] Indar Sugiarto, Felix Pasila, and Victor Christian, "Identifikasi Gain dan Bandwidth Audio Amplifier Menggunakan MCS-51," *J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 33–39, 2004, [Online]. Available: <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/elk/article/view/15884>
- [14] A. A. O. Ridhwan Prawira Surya Gandaatmaja, Akhmad Hambali, "Analisis Simulasi Performansi Modulasi Direct Dan Eksternal Pada Jaringan FttH Dengan Gigabit Passive Optical Network (GPON)," *e-Proceeding Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 138–145, 2014, [Online]. Available: <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/elk/article/view/15884>
- [15] Rizky Mauludy Muttaqien and M. W. Akhmad Hambali, "Perancangan Jaringan

- Akses Fiber To The Home (Ftth)
Menggunakan Teknologi 10 - Gigabit Passive
Optical Network (Xgpon) Untuk Perumahan
Graha Yasa Asri Dengan Ducting Bersama,”
e-Proceeding Eng., vol. 3, pp. 3–3, 2016.
- [16] A. Atina, “Aplikasi Matlab pada Teknologi
Pencitraan Medis,” *J. Penelit. Fis. dan Ter.*,
vol. 1, no. 1, p. 28, 2019, doi:
10.31851/jupiter.v1i1.3123.