

ANALISIS EFEK *HARMONIC DISTORTION* TERHADAP AKURASI PENGUKURAN *RECEIVER INSTRUMENT LANDING SYSTEM*

Muhammad Ghiffari Albanna^{1*}, M. Arif Sulaiman², Didik Sulistyo³

^{1,2,3} Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Jl. Raya PLP Curug, Serdang Wetan, Kec. Legok, Kabupaten Tangerang, Banten 15820; (021)5982204

Keywords:

Total Harmonic Distortion (THD), Instrument Landing System (ILS), Localizer, Difference Depth Modulation (DDM), GNU radio.

Correspondent Email:

16032110017@ppicurug.ac.id

Abstrak. Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat bagaimana efek distorsi harmonik total (THD atau *Total Harmonic Distortion*) berdampak pada akurasi pengukuran penerima di sistem *Instrument Landing System (ILS)*. Dalam lingkungan bandara, perangkat listrik non-linear dapat menyebabkan distorsi harmonik, yang berdampak pada kualitas sinyal navigasi yang diterima pesawat. Ini terutama berlaku untuk parameter DDM (*Difference in Depth of Modulation*). Metode kuantitatif eksperimental digunakan; sinyal ILS yang terdistorsi disimulasikan menggunakan GNU Radio dan diuji dalam situasi nyata menggunakan HackRF One dan *Portable ILS Receiver*. Ada gangguan dalam bentuk harmonik orde ke-3, 5, dan 7 pada frekuensi 90 Hz dan 150 Hz, serta frekuensi tambahan seperti 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz. Ini ditampilkan sebagai 1%, 3%, dan 5% THD, dengan variasi +10% dan -30%. Meskipun terdapat gangguan harmonik hingga 5% THD, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai DDM dan SDM tidak mengalami perubahan yang signifikan, menunjukkan bahwa gangguan ini tetap berada dalam batas toleransi sistem ILS. Penelitian ini menunjukkan bahwa, selain pengujian spektrum dan inspeksi penerbangan sebagai bagian dari pengujian ground check, evaluasi lingkungan elektromagnetik di bandara sangat penting untuk menjamin keandalan sistem ILS. Evaluasi toleransi memastikan bahwa sistem beroperasi secara optimal meskipun terpapar distorsi harmonik.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. This research aims to analyze the effect of harmonic distortion (*Total Harmonic Distortion/THD*) on the measurement accuracy of receivers in the *Instrument Landing System (ILS)*. Harmonic distortion may originate from non-linear electrical devices in the airport environment and interfere with the quality of navigation signals received by aircraft, especially in terms of DDM (*Difference in Depth of Modulation*). A quantitative experimental approach was employed through ILS signal simulation using GNU Radio and practical testing using HackRF One and *Portable ILS Receiver*. Interference was injected in the form of 3rd, 5th, and 7th order harmonics from 90 Hz and 150 Hz signals, along with additional frequencies (30 Hz, 60 Hz, 120 Hz) and THD variations of 1%, 3%, 5%, with extra tests at 10% and 30%. Simulation results show that harmonic interference up to 5% THD did not cause significant deviations in DDM or SDM and remained within ILS system tolerances. However, higher THD and additional frequencies caused small fluctuations that were not detected during ground checks but had observable effects during flight checks, as evidenced by signal anomalies during aircraft approach. This research emphasizes the importance of spectrum analysis and flight inspection as complements to ground checking and highlights the need for comprehensive electromagnetic evaluation at airports to ensure the reliability of ILS systems. A tolerance evaluation method was applied to assess whether the system remained functional under harmonic exposure

1. PENDAHULUAN

Instrument Landing System (ILS) merupakan sistem navigasi penting yang digunakan untuk membantu pesawat dalam mendarat dengan presisi, terutama dalam kondisi visibilitas rendah. ILS terdiri dari dua komponen utama: *Localizer* untuk panduan lateral dan *Glide Path* untuk panduan vertical [1]. Akurasi dari sistem ini sangat bergantung pada kualitas sinyal yang diterima oleh *receiver* pesawat, yang diukur melalui parameter seperti *Difference in Depth of Modulation* (DDM). Oleh karena itu, distorsi harmonik, yang dapat menurunkan kualitas sinyal ILS, disebabkan oleh adanya frekuensi harmonik (kelipatan bulat dari frekuensi dasar).

Dalam sistem listrik, komponen non-linier seperti sumber daya listrik dan inverter merupakan sumber utama *harmonic distortion* [2]. Keberadaan harmonik dalam sistem listrik dapat menyebabkan *overheating* pada peralatan, efisiensi energi yang rendah, dan kesalahan dalam pengukuran elektronik. Dengan meningkatkan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD), distorsi harmonik dapat mengganggu akurasi pengukuran penerima ILS dan fungsi sistem navigasi serta perangkat pengukur. Sebuah studi oleh Ajenikoko dan Ojerinde (2015) mengungkapkan bahwa THD yang tinggi dapat menyebabkan *overheating* pada peralatan dan memperpendek umur operasionalnya, sehingga mengganggu fungsi navigasi yang kritis [3].

Sinyal ILS harus mempertahankan nilai THD di bawah 1% untuk memenuhi standar Lampiran 10 Organisasi Penerbangan Sipil Internasional (ICAO), agar sistem ini dapat memberikan layanan yang andal dan panduan pendaratan yang aman. Di sisi lain, dalam praktiknya, nilai THD cenderung lebih tinggi dari batas ini, terutama di lingkungan padat seperti bandara dengan berbagai perangkat listrik. Faktor-faktor seperti peningkatan beban nonlinier dan gangguan elektromagnetik berkontribusi pada terjadinya harmonik di bandara. Hal ini dapat menyebabkan kesalahan dan berpotensi mengakibatkan kecelakaan pendaratan. Penelitian oleh Salicru (2020) membuktikan bahwa harmonik telah efektif dalam menimbulkan gangguan sistem listrik yang parah, seperti resonansi dan distorsi tegangan, yang dapat secara langsung mempengaruhi akurasi sistem ILS [4].

Karena distorsi pada sinyal yang ditransmisikan, selain yang disebabkan oleh penyebaran *Doppler*, umumnya akan muncul di penerima dalam bentuk distorsi harmonik, maka perlu dilakukan penyelidikan mengenai bagaimana harmonik-harmonik tersebut dapat diukur.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki bagaimana tingkat *Total Harmonic Distortion* (THD) mempengaruhi akurasi pengukuran pada penerima sinyal *Instrument Landing System* (ILS) dan menentukan sejauh mana tingkat THD yang lebih tinggi dapat menyebabkan penyimpangan pada nilai *Difference in Depth of Modulation* (DDM) pada sistem *Localizer*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Instrument Landing System (ILS) merupakan sistem radio navigasi yang digunakan sebagai alat bantu pendaratan presisi. Sistem ini memancarkan sinyal yang memberikan informasi arah (azimuth), sudut luncur (*glide path*), dan jarak pesawat terhadap landasan pacu [5]. ILS terdiri atas tiga komponen utama, yaitu *localizer*, *glide path*, dan *marker beacon*. Di Indonesia, sistem yang digunakan umumnya termasuk kategori I (Cat. I), sehingga hanya mengandalkan *middle marker* dan *outer marker* karena kondisi cuaca relatif stabil dengan jarak pandang di atas 800 meter [6]. Selain itu, ILS bekerja bersama alat bantu navigasi lain seperti DME, DVOR, dan NDB [7].

Localizer berfungsi memberikan panduan arah horizontal pesawat terhadap sumbu landasan dengan frekuensi kerja 108–111,975 MHz. Sinyal *localizer* terdiri atas dua komponen audio 90 Hz dan 150 Hz yang dimodulasi secara amplitudo. Ketika pesawat berada tepat di jalur pendaratan, kedua sinyal tersebut diterima dengan kedalaman modulasi yang sama (DDM = 0), sehingga posisi pesawat dinyatakan sejajar dengan garis tengah runway [8]. *Glide path* memberikan panduan vertikal agar pesawat mengikuti lintasan pendaratan dengan sudut sekitar 3°, dengan perbedaan modulasi antara sinyal 90 Hz dan 150 Hz menunjukkan posisi pesawat terhadap lintasan ideal—positif jika terlalu tinggi dan negatif jika terlalu rendah [9][10].

Marker beacon berfungsi memberikan informasi jarak pesawat terhadap ambang

landasan pada frekuensi 75 MHz. Sistem ini terdiri atas tiga penanda, yaitu outer marker (OM) pada jarak 4–7 NM, middle marker (MM) pada 1,5–3 NM, dan inner marker (IM) sekitar 450 meter dari ambang batas. Namun, penggunaan IM di Indonesia jarang dilakukan karena kondisi jarak pandang yang masih baik [11].

Dalam pengujian sistem ILS, perangkat seperti HackRF One dan Portable ILS Receiver (PIR) sering digunakan. HackRF One merupakan perangkat *Software Defined Radio* (SDR) yang dapat mengirim dan menerima sinyal pada frekuensi 1 MHz hingga 6 GHz. Alat ini digunakan untuk simulasi dan analisis berbagai sistem komunikasi nirkabel seperti Wi-Fi, GPS, radar, dan navigasi penerbangan [12]. PIR berfungsi untuk menangkap serta menganalisis sinyal ILS guna memastikan parameter sinyal, seperti kedalaman modulasi dan kekuatan sinyal, berada dalam batas yang sesuai standar [11].

Gangguan yang sering memengaruhi akurasi sistem ILS adalah distorsi harmonik, yaitu munculnya sinyal pada kelipatan frekuensi utama 90 Hz dan 150 Hz. Gangguan ini dapat menimbulkan kesalahan pembacaan panduan navigasi karena mengubah rasio kedalaman modulasi. Distorsi harmonik biasanya disebabkan oleh ketidaklinieran pada pemancar, antena rusak, atau peralatan listrik di sekitar bandara. Menurut standar ICAO Annex 10, nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) maksimum yang diizinkan adalah 1% untuk menjamin keselamatan operasional [13].

Dalam simulasi dan analisis sinyal, GNU Radio sering digunakan sebagai perangkat lunak sumber terbuka (*open-source*) untuk merancang dan menguji sistem berbasis SDR. GNU Radio memungkinkan pemrosesan sinyal dilakukan sepenuhnya melalui perangkat lunak sehingga sistem menjadi lebih fleksibel dan efisien [14]. Selain itu, Spectrum Analyzer digunakan untuk menganalisis spektrum frekuensi dan amplitudo sinyal guna mendeteksi harmonik, noise, serta gangguan lainnya. Alat ini berperan penting dalam pengujian sistem komunikasi seperti radar, ILS, dan sinyal satelit [15].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk menganalisis pengaruh tingkat *Total Harmonic Distortion* (THD) terhadap akurasi pengukuran penerima sinyal *Instrument Landing System* (ILS) [16]. Pendekatan ini memungkinkan peneliti memperoleh data kuantitatif melalui simulasi dan pengukuran terkontrol, sehingga hubungan antara variabel dapat dianalisis secara statistik. Desain penelitian dikembangkan dengan melakukan simulasi sinyal ILS yang mengandung variasi harmonik pada tingkat tertentu untuk mengamati penyimpangan hasil pengukuran.

Skenario eksperimen dirancang dengan mentransmisikan sinyal ILS yang telah dimodifikasi berdasarkan variasi THD yang ditentukan. Proses ini dilakukan menggunakan perangkat lunak GNU Radio, yang berfungsi menghasilkan sinyal dengan kandungan harmonik terkontrol seperti harmonik ke-3, ke-5, dan ke-7 [17].

3.2. Objek Penelitian

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah penerima ILS (ILS Receiver), yang berfungsi menerima sinyal *localizer* dan *glide path* yang dipancarkan dari stasiun darat. Penerima tersebut diuji terhadap beberapa tingkat THD untuk menentukan sejauh mana penyimpangan nilai *Difference in Depth of Modulation* (DDM) terjadi akibat gangguan harmonik.

3.3. Metode Pengumpulan Data

Data diperoleh melalui beberapa tahap pengukuran dan verifikasi, yaitu:

3.3.1 Pengukuran Tingkat THD

Simulasi sinyal dilakukan dengan variasi THD sebesar 0%, 1%, 3%, dan 5%, sesuai dengan standar IEEE 519-2014 [18] dan ICAO Annex 10 [1]. Untuk memperluas analisis, juga disimulasikan THD sebesar 10% dan 30%.

3.3.2 Verifikasi Sinyal Menggunakan Spectrum Analyzer

Sinyal hasil simulasi dianalisis menggunakan *spectrum analyzer* untuk memastikan amplitudo dan frekuensi harmonik orde ke-3, ke-5, dan ke-7 sesuai parameter yang telah ditentukan. Langkah ini memastikan bahwa komposisi harmonik sesuai dengan kondisi eksperimen yang diharapkan.

3.3.3 Pengujian Receiver ILS

Sinyal *localizer* dengan modulasi standar (90 Hz dan 150 Hz) diberikan ke penerima ILS portabel (*Portable ILS Receiver/PIR*) untuk mengukur nilai DDM yang dihasilkan dari setiap variasi THD.

3.3.4 Observasi dan Dokumentasi

Selama pengujian, penyimpangan DDM dan *Sum of Depth Modulation* (SDM) dicatat secara sistematis. Pola gangguan sinyal dan perubahan bentuk spektrum juga diamati menggunakan *spectrum analyzer* untuk memberikan visualisasi terhadap efek harmonik.

3.3.5 Studi Literatur

Data eksperimental didukung oleh literatur dan standar internasional seperti ICAO Annex 10, jurnal ilmiah, dan laporan teknis terkait sistem navigasi udara.

3.4. Metode Analisis Data

Analisis dilakukan melalui dua tahap utama:

3.4.1 Analisis Deskriptif

Data hasil pengukuran dianalisis untuk menggambarkan hubungan antara tingkat THD dan perubahan nilai DDM pada sinyal *localizer*. Analisis ini menunjukkan pola perubahan akurasi penerima terhadap peningkatan distorsi harmonik.

3.4.2 Evaluasi Toleransi

Nilai penyimpangan DDM dibandingkan dengan batas toleransi yang ditetapkan oleh ICAO Annex 10 guna menilai apakah distorsi

yang terjadi masih dalam batas aman operasional [19]. Tahap ini bertujuan menentukan sejauh mana tingkat THD dapat ditoleransi oleh sistem ILS sebelum memengaruhi keandalan panduan pendaratan secara signifikan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Empat referensi utama digunakan dalam penelitian ini, terdiri dari tiga jurnal nasional dan satu dokumen resmi ICAO. Studi Khairunnisa [20] menunjukkan bahwa sinyal AM dapat menghasilkan *sideband* tambahan akibat harmonik yang menyebabkan deviasi sinyal penerima, sehingga menjadi dasar untuk memahami efek harmonik pada sinyal ILS. Penelitian oleh Desriyanto dkk. [21] mengungkap bahwa lampu LED taxiway di bandara dapat menghasilkan harmonik signifikan pada 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz yang berpotensi mengganggu sistem komunikasi dan navigasi bandara. Sementara itu, penelitian Fatonah et al. [22] menunjukkan bahwa pemeliharaan dan kalibrasi berpengaruh langsung terhadap performa *localizer* pada sistem ILS. Dokumen ICAO [1] menetapkan batas toleransi THD maksimum 1%, 3%, dan 5% sebagai standar acuan keselamatan sistem navigasi penerbangan.

Berdasarkan hasil kajian literatur tersebut, dapat dipahami bahwa gangguan harmonik pada orde ke-3, ke-5, dan ke-7 dari frekuensi utama 90 Hz dan 150 Hz dapat menurunkan kualitas sinyal dan mengakibatkan penyimpangan pada nilai DDM. Selain itu, interferensi frekuensi rendah seperti 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz juga dapat menyebabkan gangguan tambahan terhadap kestabilan sinyal navigasi pesawat.

Simulasi konseptual dilakukan menggunakan perangkat lunak GNU Radio untuk memodelkan sistem pemancar dan penerima sinyal ILS. Pemodelan blok simulasi transmitter dan receiver mengikuti rancangan dari penelitian sebelumnya [23], yang menjelaskan desain alur graf komunikasi berbasis *Software Defined Radio* (SDR). Dalam simulasi ini, dua sinyal pembawa 90 Hz dan 150 Hz dimodulasi amplitudo dan disisipi harmonik pada orde ke-3 (450 Hz), ke-5 (750 Hz), dan ke-7 (1050 Hz). Selain itu, gangguan non-harmonik juga disimulasikan pada 30 Hz, 60

Hz, dan 120 Hz untuk merepresentasikan gangguan dari lingkungan bandara.

4.1 Hasil Simulasi Konseptual (GNU Radio)

Simulasi awal dilakukan untuk memahami bagaimana sistem ILS merespon gangguan harmonik yang disisipkan ke dalam sinyal referensi arah (guidance signal) pada frekuensi 90 Hz dan 150 Hz. Gangguan harmonik disisipkan dengan variasi *Total Harmonic*

Distortion (THD) sebesar 1%, 3%, dan 5%, serta dua variasi tambahan yaitu 10% dan 30% yang berfungsi sebagai data pelengkap. Frekuensi harmonik yang diuji meliputi: orde ke-3, 5, dan 7 dari 150 Hz: 450 Hz, 750 Hz, 1050 Hz; orde ke-3, 5, dan 7 dari 90 Hz: 270 Hz, 450 Hz, 630 Hz; dan frekuensi tambahan (non-harmonik): 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz (berdasarkan laporan gangguan lapangan pada ILS *receiver* pesawat yang tidak terdeteksi saat *ground check*). Hasil pembacaan DDM dan SDM pada simulasi dapat dilihat pada Tabel dan gambar berikut ini.

Tabel 1. Frekuensi 1: 30, 60, 120

| Target THD (%) | Frekuensi Aktif (Hz) | A ₃ | A ₅ | A ₇ | THD Hitung (%) | Keterangan Pembacaan |
|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 1 | 30, 60, 120 | 0.000590 | 0.000393 | 0.000197 | 1.0 | 0.004582 |
| 3 | 30, 60, 120 | 0.001770 | 0.001180 | 0.000590 | 3.0 | 0.004723 |
| 5 | 30, 60, 120 | 0.002951 | 0.001967 | 0.000984 | 5.0 | 0.004806 |
| 10 | 30, 60, 120 | 0.005901 | 0.003934 | 0.001967 | 10.0 | 0.004917 |
| 30 | 30, 60, 120 | 0.017703 | 0.011802 | 0.005901 | 30.0 | 0.005259 |

Tabel 2. Frekuensi 2: 450, 750, 1050

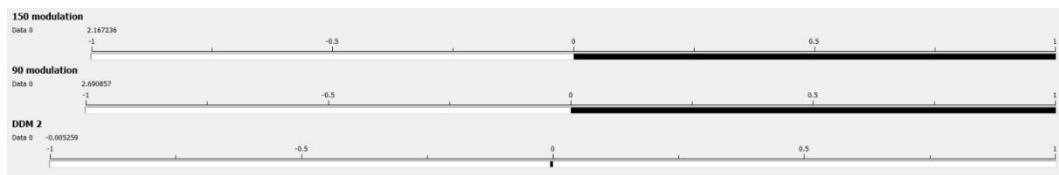
| Target THD (%) | Frekuensi Aktif (Hz) | A ₃ | A ₅ | A ₇ | THD Hitung (%) | Keterangan Pembacaan |
|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 1 | 450, 750, 1050 | 0.000590 | 0.000393 | 0.000197 | 1.0 | 0.004958 |
| 3 | 450, 750, 1050 | 0.001770 | 0.001180 | 0.000590 | 3.0 | 0.005156 |
| 5 | 450, 750, 1050 | 0.002951 | 0.001967 | 0.000984 | 5.0 | 0.004946 |
| 10 | 450, 750, 1050 | 0.005901 | 0.003934 | 0.001967 | 10.0 | 0.005003 |
| 30 | 450, 750, 1050 | 0.017703 | 0.011802 | 0.005901 | 30.0 | 0.004830 |

Tabel 3. Frekuensi 3: 270, 450, 630

| Target THD (%) | Frekuensi Aktif (Hz) | A ₃ | A ₅ | A ₇ | THD Hitung (%) | Keterangan Pembacaan |
|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 1 | 270, 450, 630 | 0.000590 | 0.000393 | 0.000197 | 1.0 | 0.004932 |
| 3 | 270, 450, 630 | 0.001770 | 0.001180 | 0.000590 | 3.0 | 0.004860 |
| 5 | 270, 450, 630 | 0.002951 | 0.001967 | 0.000984 | 5.0 | 0.004970 |
| 10 | 270, 450, 630 | 0.005901 | 0.003934 | 0.001967 | 10.0 | 0.004982 |
| 30 | 270, 450, 630 | 0.017703 | 0.011802 | 0.005901 | 30.0 | 0.004933 |



Gambar 1. Pembacaan GNU Radio Frekuensi Orde 3,5,7



Gambar 2. Pembacaan GNU Radio Frekuensi Noise



Gambar 3. Pembacaan GNU Radio Frekuensi Orde 150

Hasil pembacaan dari simulasi menunjukkan bahwa Hasil pembacaan dari simulasi menunjukkan bahwa pada variasi THD sebesar 1%, 3%, dan 5%, baik dari harmonik orde ke-3, 5, maupun 7 dari sinyal 150 Hz maupun 90 Hz, tidak ditemukan perubahan yang signifikan terhadap nilai DDM dan SDM. Nilai-nilai pembacaan tetap stabil dan berada dalam rentang toleransi sistem ILS. DDM tercatat tetap mendekati nol (0) pada seluruh skenario tersebut, yang menandakan bahwa penyisipan harmonik tidak menyebabkan penyimpangan arah sinyal *localizer* dalam kondisi simulative[24]. Di sisi lain, nilai SDM juga tidak mengalami penurunan berarti, yang menunjukkan bahwa kedalaman modulasi total dari sinyal tetap terjaga meskipun terdapat gangguan harmonik.

Namun demikian, ketika dilakukan simulasi dengan frekuensi tambahan non-harmonik seperti 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz, muncul fluktuasi kecil pada pembacaan DDM dan SDM. Meskipun fluktuasi ini tidak ekstrem, tetap tercatat sebagai potensi pengganggu, terutama pada nilai-nilai pengamatan yang lebih sensitif. Meskipun demikian, seluruh nilai hasil simulasi tetap berada dalam rentang toleransi DDM ± 0.155 sesuai standar ICAO. Selain itu, frekuensi 450 Hz yang muncul sebagai hasil harmonik dari dua sumber sekaligus (90 Hz dan 150 Hz) juga tidak menyebabkan perubahan berarti terhadap DDM dan SDM selama amplitudo harmoniknya dikendalikan sesuai batas THD yang telah ditetapkan.

4.2 Evaluasi Toleransi Sistem

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem ILS pada sisi penerima menunjukkan ketahanan yang baik terhadap gangguan harmonik hingga tingkat THD sebesar 30%, selama amplitudo harmonik tidak berlebihan. Fluktuasi pada nilai DDM dan SDM mulai terlihat ketika tingkat THD mencapai 10% hingga 30%, namun nilai tersebut masih berada di bawah ambang batas toleransi DDM sebesar ± 0.155 . Sementara itu, simulasi dengan gangguan pada frekuensi non-harmonik, seperti 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz, menunjukkan efek yang lebih signifikan dibandingkan dengan gangguan harmonik pada orde ke-3, ke-5, dan ke-7, meskipun dampaknya masih belum cukup besar untuk menyebabkan deviasi DDM keluar dari batas toleransi. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi gangguan di luar spektrum harmonik yang umum dapat menimbulkan potensi gangguan tersembunyi terhadap kestabilan sinyal sistem ILS, terutama apabila sumber gangguan tersebut berasal dari lingkungan operasional nyata, seperti peralatan bandara maupun pesawat[25].

4.3 Hasil Pengamatan Nyata (Uji Lapangan Menggunakan Portable Receiver)

Pengamatan nyata dilakukan dengan memancarkan sinyal ILS dari GNU Radio melalui perangkat HackRF One, dan kemudian menangkap sinyal tersebut menggunakan *Portable ILS Receiver*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memverifikasi kestabilan

parameter DDM dan SDM terhadap pengaruh gangguan harmonik *Total Harmonic Distortion* (THD), sebagaimana telah disimulasikan sebelumnya.

Skenario uji menyisipkan frekuensi harmonik pada dua sideband utama ILS, yaitu 90 Hz dan 150 Hz. THD divariasikan pada 1%, 3%, dan 5% sebagai fokus utama, serta 10% dan

30% sebagai data tambahan. Frekuensi harmonik yang diuji meliputi: Orde ke-3, 5, dan 7 dari 150 Hz : 450 Hz, 750 Hz, 1050 Hz; Orde ke-3, 5, dan 7 dari 90 Hz : 270 Hz, 450 Hz, 630 Hz; dan frekuensi tambahan yang sering muncul pada pengukuran lapangan : 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz.

Tabel 4. Hasil Simulasi DDM (Noise 30 Hz, 60 Hz, 120 HZ)

| Frekuensi | Noise 30 Hz, 60 Hz, 120 HZ | | |
|---------------|----------------------------|---------------|------------|
| Sumber sinyal | Hack RF | | |
| Alat ukur | Normarc | Rohde&schwarz | Thales |
| THD Level 0% | 0 % ddm | 0 % ddm | 0 % ddm |
| THD Level 1% | 0.11 % ddm | 0 % ddm | 0.4 % ddm |
| THD Level 3% | 0.05 % ddm | 0.067 % ddm | 0.33 % ddm |
| THD Level 5% | 0.04 % ddm | 0.13 % ddm | 0.32 % ddm |
| THD Level 10% | 0.04 % ddm | 0.2 % ddm | 0.45 % ddm |
| THD Level 30% | -0.01% ddm | 0.33 % ddm | 0.57 % ddm |

Tabel 5. Hasil Simulasi DDM (Orde 3,5,7 (150 Hz))

| Frekuensi | Orde 3,5,7 (150 Hz) | | |
|---------------|---------------------|---------------|------------|
| Sumber sinyal | Hack RF | | |
| Alat ukur | Normarc | Rohde&schwarz | Thales |
| 0% | 0 % ddm | 0% ddm | 0 % ddm |
| 1% | 0.04 % ddm | 0.01 % ddm | 0.33 % ddm |
| 3% | 0.09 % ddm | -0.07 % ddm | 0.35 % ddm |
| 5% | -0.08 % ddm | 0.05 % ddm | 0.24 % ddm |
| 10% | -0.07 % ddm | 0.02 % ddm | 0.36 % ddm |
| 30% | 0.06 % ddm | 0.03 % ddm | 0.23 % ddm |

Tabel 6. Hasil Simulasi DDM (Orde 3,5,7 (90 Hz))

| Frekuensi | Orde 3,5,7 (90 Hz) | | |
|---------------|--------------------|---------------|------------|
| Sumber sinyal | Hack RF | | |
| Alat ukur | Normarc | Rohde&schwarz | Thales |
| 0% | 0 % ddm | 0 % ddm | 0 % ddm |
| 1% | -0.05 % ddm | 0.33 % ddm | 0 % ddm |
| 3% | -0.08 % ddm | -0.13 % ddm | 0.32 % ddm |
| 5% | 0.03 % ddm | 0.4 % ddm | 0.42 % ddm |
| 10% | 0.02 % ddm | 0.2 % ddm | 1.1 % ddm |
| 30% | -0.06 % ddm | -0.33 % ddm | 0.58 % ddm |

Tabel 7. Hasil Simulasi SDM (Noise 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz)

| Frekuensi | Noise 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz | | |
|---------------|----------------------------|---------------|--------|
| Sumber Sinyal | Hack RF | | |
| Alat ukur | Normarc | Rohde&schwarz | Thales |
| 0% | 40% | 40.06% | 40% |
| 1% | 40.34% | 40.03% | 40.01% |
| 3% | 40.04% | 40.05% | 40.05% |
| 5% | 40.07% | 40.05% | 40.06% |
| 10% | 40.06% | 41.75% | 40.84% |
| 30% | 39.99% | 39.99% | 40.10% |

Tabel 8. Hasil Simulasi SDM (Orde 3,5,7 (150 Hz))

| Frekuensi | Orde 3,5,7 (150 Hz) | | |
|---------------|---------------------|---------------|--------|
| Sumber Sinyal | Hack RF | | |
| Alat Ukur | Normarc | Rohde&schwarz | Thales |
| 0% | 40% | 40% | 40% |
| 1% | 39.97% | 40.03% | 40.02% |
| 3% | 39.95% | 39.99% | 40.06% |
| 5% | 40.08 | 40.03% | 40.08 |
| 10% | 39.95% | 40.14% | 40.03% |
| 30% | 39.91% | 40.04% | 39.97% |

Tabel 9. Hasil Simulasi SDM (Orde 3,5,7 (90 Hz))

| Frekuensi | Orde 3,5,7 (90 Hz) | | |
|---------------|--------------------|---------------|--------|
| Sumber Sinyal | Hack RF | | |
| Alat Ukur | Normarc | Rohde&schwarz | Thales |
| 0% | 40% | 40.06% | 40.03 |
| 1% | 40.03% | 40.04% | 40.04% |
| 3% | 40.01% | 40.05% | 40.10% |
| 5% | 40.08% | 40.02% | 39.99% |
| 10% | 39.94% | 40.08% | 40.06% |
| 30% | 40.05% | 40.06% | 40.05% |

Meskipun data pembacaan DDM dan SDM pada Tabel diatas menunjukkan hasil yang stabil dan berada dalam rentang toleransi, hasil pengamatan visual pada spektrum sinyal mengungkapkan adanya sejumlah frekuensi lain yang ikut terpancarkan selain frekuensi utama ILS. Frekuensi-frekuensi ini merupakan komponen harmonik maupun noise tambahan yang tidak muncul secara eksplisit dalam hasil pembacaan *portable receiver*.

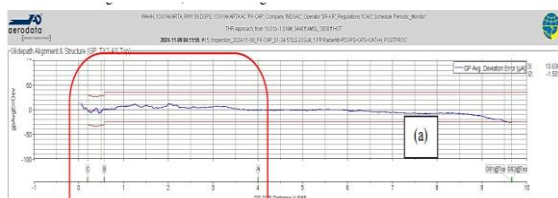
Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem *ground check* seperti PIR (*Portable ILS Receiver*) memang mampu menangkap parameter navigasi secara fungsional, tetapi

tidak selalu mampu mengungkap keberadaan sinyal gangguan tersembunyi [26]. Oleh karena itu, penggunaan *spectrum analyzer* menjadi penting untuk mengidentifikasi spektrum sinyal secara lebih menyeluruh, termasuk komponen-komponen yang berpotensi mengganggu performa ILS pada saat *flight check*.

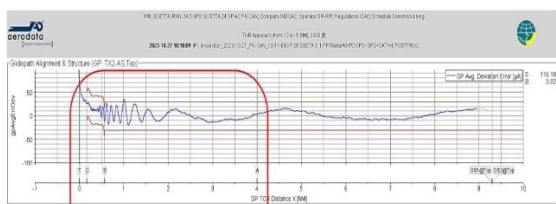
Berdasarkan hasil pengamatan langsung di lapangan, pola pembacaan DDM dan SDM secara umum menunjukkan konsistensi dengan hasil simulasi menggunakan GNU Radio, terutama pada variasi THD sebesar 1%, 3%, dan 5%. Pada frekuensi harmonik orde ke-3, 5, dan 7 dari sinyal 90 Hz dan 150 Hz, nilai DDM dan

SDM tetap stabil tanpa adanya deviasi yang signifikan. Seluruh nilai pengukuran masih berada dalam rentang toleransi sistem ILS sebagaimana diatur dalam spesifikasi ICAO Annex 10. Ketika THD dinaikkan menjadi 10% dan 30%, memang muncul fluktuasi kecil pada nilai DDM dan SDM, namun fluktuasi tersebut tetap dalam ambang aman dan tidak berdampak nyata terhadap pembacaan arah atau glide slope, sehingga tidak menimbulkan efek signifikan pada sistem navigasi pesawat.

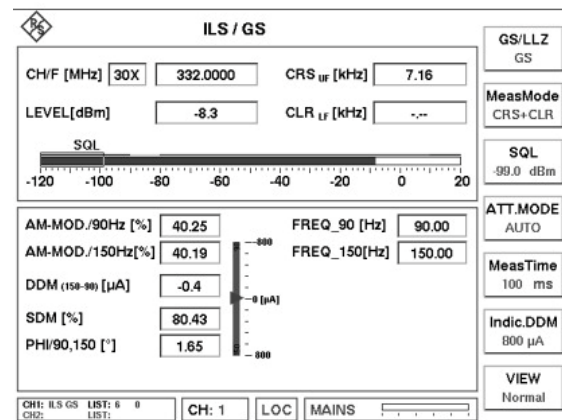
Selain gangguan dari harmonik utama, frekuensi tambahan seperti 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz juga memberikan dampak berupa fluktuasi ringan pada pembacaan DDM dan SDM. Meskipun tidak menyebabkan gangguan besar secara langsung, keberadaan frekuensi-frekuensi ini tetap penting diperhatikan karena mengindikasikan potensi interferensi tersembunyi. Hal ini didukung oleh hasil penelitian Wildan et al. (2025)[27], yang menyatakan bahwa gangguan frekuensi semacam ini tidak selalu terdeteksi melalui pengujian *ground check* menggunakan *receiver portable*, namun dapat menimbulkan anomali seperti *reverse crossing* DDM saat dilakukan inspeksi penerbangan (*flight inspection*). Dengan demikian, meskipun fluktuasi yang diamati masih dalam batas toleransi, fenomena ini menegaskan bahwa pembacaan normal pada alat uji darat belum tentu menjamin kestabilan sinyal di udara. Harmonisa seperti 30 Hz dan turunannya hingga 450 Hz dapat memperburuk kondisi multipath dan menyebabkan penyimpangan pembacaan DDM pada fase pendekatan pesawat.



Gambar 4. Pembacaan *Flight Check* Normal



Gambar 5. Pembacaan *Flight Check* Terdistorsi



Gambar 6. Parameter Normal Pada PIR

Hasil pengamatan flight check menunjukkan adanya penyimpangan pada sinyal glide slope yang tergambar dari fluktuasi garis deviasi (*deviation error*) sepanjang jalur pendekatan pesawat. Fenomena ini menandakan adanya ketidakstabilan sinyal yang bisa dipicu oleh gangguan harmonik tersembunyi di lingkungan bandara [28].

Sedangkan hasil pembacaan dari alat *Portable ILS Receiver* (PIR) pada saat *ground check* menunjukkan parameter yang masih berada dalam kondisi normal. Nilai DDM dan SDM yang ditampilkan berada dalam rentang toleransi sistem, dan tidak menunjukkan indikasi gangguan sinyal.

Perbedaan hasil antara *flight check* dan *ground check* ini menguatkan temuan bahwa gangguan harmonik terutama pada frekuensi tambahan seperti 30 Hz, 60 Hz, dan 120 Hz tidak selalu terdeteksi oleh alat *ground check*, namun dapat menimbulkan efek signifikan saat pengukuran dilakukan di udara. Oleh karena itu, pengujian lapangan secara menyeluruh termasuk *flight inspection* menjadi penting untuk mengevaluasi akurasi dan integritas sistem ILS secara menyeluruh.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi konseptual GNU Radio dan pengamatan langsung (menggunakan HackRF One dan Portable ILS Receiver), peneliti dapat menyimpulkan bahwa:

- Gangguan harmonik yang baik pada sistem ILS Tidak terdapat penyimpangan yang signifikan antara nilai DDM yang sesuai, serta nilai SDM yang dipantau untuk variasi Total Harmonic Distortion (THD) sebesar

- 1%, 3%, dan 5% dari harmonik ke-3, ke-5, dan ke-7 frekuensi pada kedua band yang diteliti (90 Hz dan 150 Hz). Nilai-nilai ini berada dalam batas toleransi sistem ILS sebagaimana dijelaskan dalam ICAO Annex 10.
- b. THD lebih besar (10% dan 30%) mulai menimbulkan variasi pada nilai SDM, namun fluktuasi ini masih berada dalam batas aman dan DDM tidak pernah melebihi $\pm 0,155$, sehingga sistem panduan pesawat tetap stabil dan presisi.
- c. Untuk penelitian lanjutan, peneliti menyarankan untuk menambah variasi frekuensi harmonik atau jenis modulasi lain serta menguji dampak pada komponen lain seperti Glide Slope (GS) dan Marker Beacon, guna memahami ketahanan sistem ILS secara lebih menyeluruh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ICAO (annex10), “*Volume I Radio Navigation Aids Aeronautical Telecommunications International Standards and Recommended Practices*,” 2018.
- [2] A. Surapati, M. Panggabean, and M. K. A. Rosa, “Pengaruh Total Harmonic Distortion (THD) Terhadap Pembacaan kWh Meter Semi Digital,” *Jurnal Amplifier: Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro Dan Komputer*, vol. 12, no. 1, pp. 25–33, 2022.
- [3] G. A. Ajenikoko and A. I. Ojerinde, “Effects of Total Harmonic Distortion on power system equipment,” *Innovative Systems Design and Engineering*, vol. 6, no. 5, pp. 114–120, 2015.
- [4] R. Pinyol, “Harmonics: Causes, effects and minimization,” *Salicru white papers*, 2015.
- [5] P. Dewanata, “Study Banding Komunikasi Alat Bantu Pendaratan Instrument Landing System Dengan Airfiel Lighting System Di Bandar Udara Ngurah Rai Bali,” 2014.
- [6] A. Aldiefa, S. Purnomo, and D. Anggraini, “Analisis Teknis Persyaratan Penempatan Peralatan Dan Mobilitas Masyarakat Terhadap Pancaran Localizer Menggunakan Diagram Fishbone Di Bandar Udara Adi Soemarmo Solo,” *Langit Biru: Jurnal Ilmiah Aviasi*, vol. 12, no. 1, pp. 29–38, 2019.
- [7] M. M. A. Eltahier and K. Hamid, “Review of instrument landing system,” *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 106–113, 2017.
- [8] N. A. Kaban, M. A. Sulaiman, H. Fadly, N. H. Siregar, “Analisa Kerusakan Transmitter 2 Pada Localizer 05 Merk Thales Type 421 Di Perum Lppnpi Cabang Medan,” 2024.
- [9] L. Musthofa, “Analisis Tindakan Corrective Maintenance Pada Modul Oscillator Peralatan Glide Path Merek Normarc Di Perum Lppnpi Cabang Surabaya,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, Aug. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4360.
- [10] E. Öktemer and E. E. Gültekin, “Operational usage and importance of instrument landing system (ILS),” *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, vol. 2, no. 1, pp. 18–21, 2021.
- [11] . C. L. Simatupang, N. Harahap, and S. Hafas, “Rancangan Prototipe Marker Beacon Sebagai Media Pembelajaran Di Politeknik Penerbangan Medan,” 2024.
- [12] M. Ibrahimaj, “RF Hacking Lab Development: HackRF One and Flipper Zero,” 2024.
- [13] J. Suprpto, C. G. Irianto, and R. R. A. Siregar, “Analisis Trafo Scott Mengatasi Penurunan Kapasitas Daya Akibat Distorsi Harmonik,” *Energi & Kelistrikan*, vol. 12, no. 2, pp. 90–99, 2020.
- [14] D. W. Wangsa and B. Syihabuddin, “Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Multimedia,” Universitas Amikom Yogyakarta, 2018.
- [15] F. Sabur and M. Nur, “Sosialisasi Penerapan Modul Spectrum Analyzer,” *Darmabakti: Jurnal Inovasi Pengabdian Dalam Penerbangan*, vol. 2, no. 1, pp. 37–41, 2021.
- [16] S. B. Prajitno, “Metodologi penelitian kuantitatif,” *Jurnal. Bandung: UIN Sunan Gunung Djati* (tersedia di <http://komunikasi.uinsgd.ac.id>), pp. 1–29, 2013.
- [17] R. Dhavitra, “Analisis Dampak Total Harmonic Distortion Terhadap Losses Dan Derating Pada Transformator Distribusi Di Fakultas Teknik Universitas Riau,” 2015.
- [18] L. Marrero, L. García-Santander, L. Hernandez-Callejo, P. Bañuelos-Sánchez, and V. J. González, “Harmonic distortion characterization in groups of distribution networks applying the IEEE Standard 519-2014,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 4, pp. 526–533, 2021.
- [19] A. Wibowo, H. Hermawan, and A. Syakur, “Analisis Distorsi Harmonik Total Arus Bocor Permukaan Isolator Resin Epoksi Pengisi

- Silika Kondisi Kering Dan Basah,” *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 17, no. 2, pp. 98–107, 2015.
- [20] K. Politeknik and N. Banjarmasin, “Analisis Dan Simulasi Spektrum Sinyal Am Dengan Menggunakan Matlab,” Print) *Jurnal ELTIKOM*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [21] N. Desriyanto, K. G. S. ISMAIL, and A. Samanhudi, “Analisis Harmonik Beban Lampu LED Taxiway Light,” *Aviation Science and Technology Journal*, vol. 1, no. 01, pp. 1–8, 2024.
- [22] F. Fatonah, L. Kurnianingsih, and T. Jaya, “Analysis of The Effect of Maintenance and Calibration on The Performance of,” *The Localizer Equipment Syntax Transformation*, vol. 4, no. 11, 2023.
- [23] T. Toni, M. A. Sulaiman, M. F. Y. Dewantara, and M. Wildan, “Penerima Sinyal VOR dan ILS untuk Alat Bantu Pengecekan di Darat,” *TELKA-Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 10, no. 3, pp. 217–229, 2024.
- [24] P. C. Amalu, C. O. Okonkwo, O. M. Olayiwola, “Verification of The Accuracy of an Instrument Landing System’s Localizer: A Study of an International Airport in Nigeria” *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 20, no 2, p. 68-75, Nov 2019.
- [25] S. Kim, K. H. Koo, “Design of a Cartesian Feedback Linear Power Amplifier for 100 MHz Band ILS Cartesian Feedback–Linearized Power Amplifier for 100-MHz-Band ILS” *The Journal Of Korean Institute Of Electromagnetic Engineering And Science*, vol 35, no 4, p. 311-318, Apr 2024.
- [26] P. Sakalas, A. Mukherjee, “Harmonic Distortion Peculiarities of High-Frequency SiGe HBT Power Cells for Radar Front End and Wireless Communication”, *Electronics*, vol. 14, no. 2984, 2025.
- [27] M. Wildan, P. Wibowo, M. S. Wicaksono, M. A. Sulaiman, E. T. Rahmadani, and M. A. Prasojo, “Anomalous Investigation of ILS Glide Path Signals on Runway 24 at the Jakarta Air Traffic Service Center,” *Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, and Controls (AVITEC)*, vol. 7, no. 1, p. 53, Feb. 2025, doi: 10.28989/avitec.v7i1.2847
- [28] X. Wang, P. Zhang, S. Ding, “A Study on the Harmonic Distortion of Seismic-Grade Sigma-Delta MEMS Accelerometers Using a Multiple Degree-of-Freedom Model”, *Sensors*, vol. 23, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23198222>