

BAB IV

ANALISIS DAN HASIL

4.1 Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui karakteristik, kualitas, dan konsistensi data yang dihasilkan oleh setiap sensor yang digunakan dalam sistem navigasi kendaraan. Tahap pengujian ini menjadi bagian awal dari proses analisis karena data sensor merupakan masukan utama yang digunakan dalam proses estimasi posisi dan orientasi kendaraan. Oleh karena itu, sebelum data sensor digunakan dalam proses fusi menggunakan *Extended Kalman Filter* (EKF), masing-masing sensor perlu diuji secara terpisah untuk mengetahui kualitas data serta karakteristik kesalahan yang dihasilkan.

Pengujian dilakukan terhadap tiga sumber data utama, yaitu Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Measurement Unit (IMU), serta encoder steering dan *feedback* posisi aktuator. Pengujian GNSS difokuskan pada karakteristik kestabilan posisi dan kualitas penerimaan sinyal pada kondisi kendaraan diam. Pengujian IMU dilakukan untuk mengetahui karakteristik data percepatan dan kecepatan sudut yang digunakan sebagai masukan estimasi keadaan kendaraan. Sementara itu, pengujian encoder steering dan *feedback* dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara perintah posisi steering dengan posisi aktual aktuator.

Hasil dari masing-masing pengujian selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kelayakan data sensor sebagai masukan sistem estimasi. Dengan demikian, pengujian sensor tidak hanya bertujuan untuk menunjukkan keluaran masing-masing sensor, tetapi juga memberikan dasar evaluasi sebelum data tersebut digunakan pada tahapan pengujian dan tuning sistem EKF.

4.1.1 Pengujian Dan Analisis GNSS

Pengujian Global Navigation Satellite System (GNSS) dilakukan untuk mengevaluasi kualitas measurement posisi yang digunakan sebagai sumber koreksi posisi global pada sistem lokalisasi. Pengujian dilakukan pada dua kondisi lingkungan, yaitu kondisi penerimaan sinyal terhalang/indoor dan kondisi outdoor dengan area penerimaan satelit yang lebih terbuka. Pemilihan kedua kondisi tersebut bertujuan untuk

mengamati perubahan kualitas solusi GNSS akibat perbedaan kondisi propagasi sinyal. Pada lingkungan terhalang, keberadaan struktur di sekitar receiver dapat menyebabkan berkurangnya kualitas penerimaan sinyal akibat obstruction, Non-Line-of-Sight (NLOS), maupun multipath. Oleh karena itu, pengujian ini tidak digunakan untuk membuktikan multipath secara langsung, tetapi untuk mengevaluasi pengaruh kondisi lingkungan terhadap kualitas solusi posisi GNSS.

Data pada masing-masing kondisi direkam selama 61 s. Parameter yang diamati meliputi jumlah satelit, position Dilution of Precision (pDOP), horizontal accuracy (hAcc), posisi hasil transformasi pada frame map, serta status penerimaan measurement berdasarkan quality gate. Parameter tersebut dipilih karena solusi GNSS tidak hanya ditentukan oleh tersedianya koordinat posisi, tetapi juga oleh kualitas geometri satelit dan estimasi ketidakpastian posisi yang diberikan oleh receiver. Pada implementasi sistem, measurement GNSS hanya diteruskan menuju proses lokalisasi apabila memenuhi batas kualitas yang telah ditentukan. Setiap epoch dicatat dalam bentuk latitude, longitude, jumlah satelit, pDOP, hAcc, posisi x-y map, serta status quality gate yang ditampilkan pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Batas Penerimaan GNSS

Parameter	Nilai YAML	
	Aktual	
min_satellites	8	Minimum satelit untuk quality fix
max_dop	2,0	Batas DOP
max_hacc_m	2,5 m	Batas horizontal accuracy
nmea_fallback_min_satellites	8	Minimum satelit fallback GGA
nmea_fallback_max_hdop	1,4	Batas HDOP fallback

Berdasarkan **Tabel 4.1**, quality gate utama mensyaratkan sedikitnya 8 satelit, nilai DOP maksimum 2,0, dan hAcc maksimum 2,5 m. Pada fallback NMEA, jumlah satelit minimum tetap ditetapkan sebesar 8 dengan HDOP maksimum 1,4. Penggunaan beberapa parameter sekaligus dimaksudkan agar kelayakan measurement tidak ditentukan hanya berdasarkan status fix atau jumlah satelit. Measurement dengan jumlah satelit yang mencukupi tetap dapat ditolak apabila nilai ketidakpastian

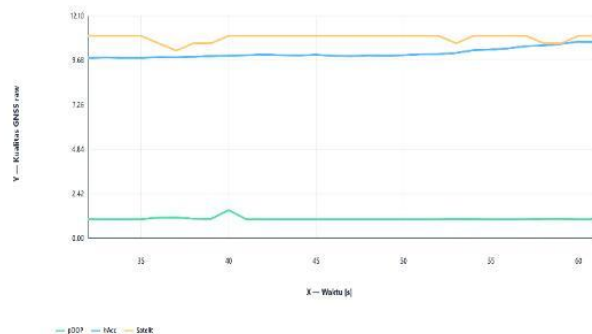
horizontal melebihi batas yang telah ditentukan. Parameter quality gate tersebut sesuai dengan konfigurasi aktif yang digunakan sebelum data GNSS diteruskan ke proses transformasi koordinat dan estimasi posisi global.

Setelah batas penerimaan ditentukan, hasil pengujian pada kondisi terhalang dan outdoor dibandingkan secara statistik. Perbandingan dilakukan untuk mengetahui perubahan jumlah satelit, pDOP, hAcc, tingkat keberhasilan quality gate, serta kestabilan posisi yang dihasilkan selama periode pengamatan seperti pada **tabel 4.2**.

Tabel 4. 2 Ringkasan Pengujian Indoor/Outdoor

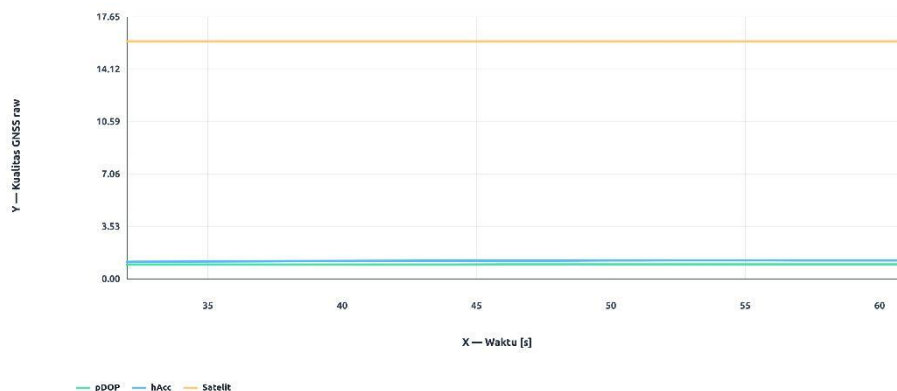
Parameter	Terhalang/Indoor	Outdoor
Durasi pengamatan	61 s	61 s
Rata-rata satelit	10,784	16,000
Rata-rata pDOP	1,091	0,978
Rata-rata hAcc	9,907 m	1,204 m
Quality gate pass	0%	100%
RMS dispersi posisi	3,471 m	0,817 m

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa kondisi lingkungan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kualitas measurement GNSS. Pada kondisi outdoor, jumlah satelit rata-rata mencapai 16,000 dengan pDOP rata-rata 0,978 dan hAcc rata-rata 1,204 m. Seluruh measurement pada kondisi tersebut memenuhi quality gate sehingga diperoleh tingkat penerimaan sebesar 100%. Sebaliknya, pada kondisi terhalang jumlah satelit rata-rata masih mencapai 10,784 dan pDOP rata-rata sebesar 1,091, tetapi hAcc meningkat menjadi 9,907 m. Nilai tersebut jauh melebihi batas hAcc maksimum 2,5 m sehingga seluruh measurement pada kondisi terhalang ditolak oleh quality gate. Perubahan kualitas measurement selama periode pengamatan perlu diamati terhadap waktu karena nilai rata-rata saja belum menunjukkan apakah kualitas GNSS bersifat stabil atau mengalami perubahan sesaat. Oleh karena itu, jumlah satelit, pDOP, hAcc, dan status penerimaan measurement pada kondisi terhalang divisualisasikan pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4. 1 Kualitas Fix GNSS Pada Kondisi Indoor

Berdasarkan **Gambar 4.1**, kondisi terhalang masih memungkinkan receiver memperoleh jumlah satelit yang melebihi batas minimum serta nilai pDOP yang relatif rendah. Akan tetapi, hAcc tetap berada jauh di atas batas penerimaan 2,5 m. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jumlah satelit yang mencukupi dan nilai pDOP yang baik belum secara langsung menjamin bahwa solusi posisi memiliki ketidakpastian horizontal yang rendah. Dengan demikian, penggunaan hAcc sebagai salah satu parameter quality gate menjadi penting agar measurement dengan ketidakpastian posisi yang tinggi tidak digunakan sebagai koreksi posisi global. Sebagai pembandingan, parameter kualitas GNSS pada kondisi outdoor divisualisasikan dengan skala pengamatan yang sama. Grafik ini digunakan untuk menunjukkan kestabilan kualitas fix ketika penerimaan satelit lebih terbuka, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.2**.

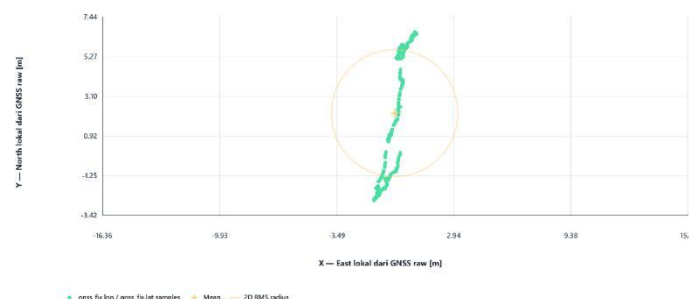


Gambar 4. 2 Kualitas Fix GNSS Pada Kondisi Outdoor

Pada kondisi outdoor, **Gambar 4.2** menunjukkan karakteristik measurement yang lebih stabil. Jumlah satelit berada pada sekitar 16 satelit, pDOP tetap berada di bawah batas 2,0, dan hAcc berada pada sekitar 1,2 m sehingga seluruh measurement memenuhi quality gate. Dari 61 epoch yang direkam, seluruh 61 measurement dinyatakan

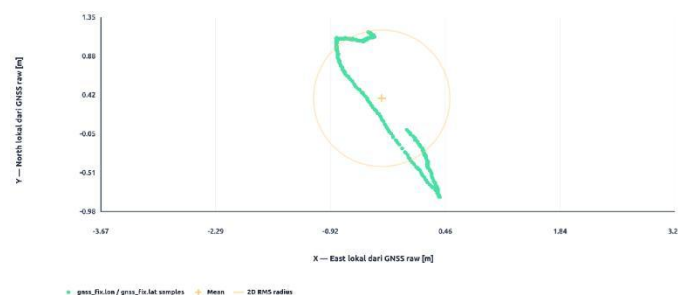
memenuhi kriteria penerimaan atau sebesar 100%. Kondisi ini menunjukkan bahwa lingkungan dengan visibilitas satelit yang lebih terbuka menghasilkan solusi GNSS dengan estimasi ketidakpastian horizontal yang lebih rendah dibandingkan kondisi terhalang.

Selain parameter kualitas yang diberikan receiver, kestabilan posisi GNSS juga dievaluasi berdasarkan penyebaran titik posisi hasil transformasi ke koordinat planar. Analisis sebaran posisi digunakan untuk mengetahui besarnya variasi posisi ketika receiver diam atau berada pada lokasi yang relatif tetap. Sebaran posisi pada kondisi terhalang ditampilkan pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4. 3 Sebaran Posisi GNSS Pada Kondisi Indoor

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa titik posisi pada kondisi terhalang memiliki penyebaran yang lebih besar terhadap pusat datanya. Berdasarkan hasil perhitungan, RMS dispersi posisi pada kondisi tersebut mencapai 3,471 m. Besarnya dispersi menunjukkan bahwa posisi hasil pengukuran mengalami variasi yang lebih besar meskipun receiver berada pada kondisi pengamatan yang sama. Variasi tersebut konsisten dengan tingginya nilai hAcc pada kondisi terhalang. Sebagai pembandingan, sebaran posisi pada kondisi outdoor ditampilkan pada **Gambar 4.4**



Gambar 4. 4 Sebaran Posisi GNSS Pada Kondisi Outdoor

Sebaran posisi pada **Gambar 4.4** terlihat lebih terkonsentrasi dibandingkan kondisi terhalang. RMS dispersi posisi outdoor diperoleh sebesar 0,817 m, sedangkan kondisi

terhalang menghasilkan RMS dispersi 3,471 m. Dengan demikian, dispersi posisi pada kondisi terhalang sekitar empat kali lebih besar dibandingkan kondisi outdoor. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kondisi penerimaan sinyal tidak hanya memengaruhi indikator kualitas receiver, tetapi juga memengaruhi kestabilan posisi hasil pengukuran.

Perlu diperhatikan bahwa RMS dispersi pada pengujian ini tidak menyatakan akurasi absolut GNSS terhadap ground truth geodetik. Nilai tersebut digunakan untuk menggambarkan kestabilan atau penyebaran posisi terhadap pusat data selama periode pengamatan. Demikian pula, hAcc merupakan estimasi ketidakpastian horizontal yang diberikan oleh receiver dan bukan merupakan error posisi aktual terhadap suatu titik ground truth. Oleh karena itu, pengujian ini lebih tepat digunakan untuk menilai konsistensi dan kelayakan measurement GNSS, bukan untuk menyatakan akurasi absolut sensor. Hal ini juga sesuai dengan interpretasi data yang telah digunakan pada hasil pengujian.

Hasil pengujian juga memperlihatkan bahwa parameter kualitas GNSS perlu dievaluasi secara bersamaan. Pada kondisi terhalang, jumlah satelit rata-rata sebesar 10,784 masih berada di atas syarat minimum 8 satelit dan pDOP rata-rata 1,091 masih lebih kecil daripada batas 2,0. Meskipun demikian, hAcc rata-rata sebesar 9,907 m telah jauh melebihi batas 2,5 m. Bahkan nilai hAcc minimum pada kondisi tersebut masih sebesar 9,6332 m sehingga tidak terdapat satupun dari 61 epoch yang dapat diterima. Sebaliknya, pada kondisi outdoor, hAcc maksimum hanya sebesar 1,257 m, pDOP maksimum sebesar 1,0498, dan jumlah satelit tetap 16 sehingga seluruh measurement memenuhi quality gate.

Secara teknis, hasil tersebut menunjukkan bahwa jumlah satelit tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator kualitas solusi posisi. Receiver dapat tetap melacak sejumlah satelit dalam lingkungan terhalang, tetapi kualitas propagasi sinyal yang diterima dapat menurun akibat adanya obstruction, NLOS, atau multipath. Kondisi tersebut dapat meningkatkan ketidakpastian pseudorange dan akhirnya memperbesar ketidakpastian posisi horizontal. Oleh karena itu, penggunaan kombinasi jumlah satelit, DOP, dan hAcc lebih tepat dibandingkan hanya menggunakan satu parameter penerimaan.

Implikasi hasil pengujian terhadap sistem lokalisasi adalah bahwa measurement GNSS dengan ketidakpastian tinggi tidak boleh langsung diberikan sebagai koreksi pada estimasi posisi global. Jika measurement tersebut tetap digunakan, perubahan posisi GNSS yang besar dapat memberikan koreksi yang tidak representatif terhadap keadaan kendaraan dan berpotensi menyebabkan perubahan mendadak pada estimasi posisi dalam frame map. Quality gate berfungsi sebagai lapisan validasi untuk mencegah kondisi tersebut dengan hanya meneruskan measurement yang memenuhi kriteria kualitas.

Berdasarkan hasil pengujian, data GNSS pada kondisi outdoor dinyatakan lebih layak digunakan sebagai sumber koreksi posisi global karena memenuhi seluruh batas quality gate dengan RMS dispersi yang lebih rendah. Sebaliknya, measurement pada kondisi terhalang ditolak karena nilai hAcc berada jauh di atas batas yang ditentukan. Oleh karena itu, data outdoor yang telah memenuhi quality gate selanjutnya digunakan pada pengujian EKF global pada Subbab 4.3, sedangkan kondisi terhalang digunakan sebagai bukti bahwa proses validasi GNSS diperlukan sebelum measurement digunakan dalam proses sensor fusion.

4.1.2 Pengujian IMU

IMU dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik perubahan heading serta kestabilan keluaran kecepatan sudut sumbu-Z yang digunakan dalam sistem lokalisasi kendaraan. Pengujian difokuskan pada dua aspek, yaitu linearitas perubahan heading terhadap sudut referensi dan karakteristik keluaran gyro-Z ketika sensor berada dalam kondisi diam. Pengujian ini diperlukan karena IMU menjadi salah satu sumber informasi orientasi dan kecepatan sudut yang digunakan dalam proses estimasi keadaan kendaraan.

Pengujian linearitas heading dilakukan pada sembilan sudut referensi, yaitu 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° , dan 360° . Pada setiap posisi, data direkam selama sekitar 60 s dengan target laju sampling 50 Hz. Heading awal digunakan sebagai baseline sehingga parameter yang dibandingkan bukan heading absolut, tetapi perubahan heading atau delta heading terhadap posisi awal. Dengan pendekatan tersebut, nilai 360° merepresentasikan satu putaran penuh terhadap posisi awal, sehingga evaluasi

dilakukan terhadap perubahan sudut kumulatif dan bukan terhadap representasi heading modulo 360° .

Pra-pengolahan data IMU mengikuti metode yang telah dijelaskan pada Subbab 3.6.2. Koreksi kecepatan sudut giroskop mengacu pada Persamaan (2.3), sedangkan orientasi direpresentasikan menggunakan quaternion sebagaimana Persamaan (2.4). Dengan demikian, data heading yang dianalisis pada pengujian ini telah menggunakan konvensi dan proses pra-pengolahan yang sama dengan data yang digunakan dalam sistem navigasi. Untuk mengetahui kesesuaian perubahan heading sensor terhadap sudut referensi, hasil pengukuran pada setiap posisi dibandingkan berdasarkan delta heading, error terhadap sudut referensi, serta laju data aktual. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian 9 sudut

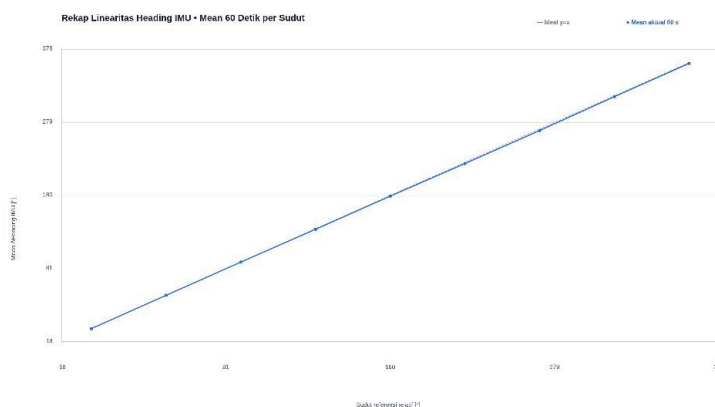
Referensi [$^\circ$]	Delta IMU [$^\circ$]	Error [$^\circ$]	Rate [Hz]
0	0,000	0,000	47,826
45	45,055	+0,055	48,600
90	90,038	+0,038	45,563
135	134,456	-0,544	48,896
180	179,341	-0,659	49,662
225	223,429	-1,571	48,915
270	268,075	-1,925	49,633
315	313,978	-1,022	49,595
360	358,962	-1,038	49,345

Berdasarkan **Tabel 4.3**, delta heading IMU secara umum mengikuti kenaikan sudut referensi. Pada sudut 45° dan 90° , error masing-masing hanya sebesar $+0,055^\circ$ dan $+0,038^\circ$. Setelah sudut 135° , error mulai bernilai negatif dan meningkat hingga mencapai nilai absolut maksimum $1,925^\circ$ pada referensi 270° . Pada referensi 315° dan 360° , error kembali menurun menjadi masing-masing $-1,022^\circ$ dan $-1,038^\circ$. Hasil tersebut menunjukkan adanya kecenderungan deviasi yang bertambah pada sebagian rentang sudut, meskipun hubungan antara perubahan sudut referensi dan keluaran IMU secara keseluruhan tetap mendekati linear.

Perlu diperhatikan bahwa error pada pengujian ini menyatakan selisih antara delta heading IMU dan sudut referensi pengujian. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak

langsung menyatakan akurasi absolut sensor terhadap arah geografis. Interpretasi error bergantung pada ketelitian sumber sudut referensi yang digunakan selama pengujian.

Untuk memperjelas hubungan antara perubahan heading referensi dan hasil pembacaan sensor, nilai delta heading IMU diplot terhadap sudut referensi sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4.5 Linearitas Heading IMU Terhadap Sudut Refrensi

Berdasarkan **Gambar 4.5**, hubungan antara sudut referensi dan delta heading IMU menunjukkan kecenderungan yang mendekati hubungan linear ideal. Keluaran sensor meningkat mengikuti pertambahan sudut referensi mulai dari 0° hingga satu putaran penuh. Kedekatan antara kurva hasil pengukuran dan garis referensi menunjukkan bahwa perubahan heading yang dihasilkan sensor mampu merepresentasikan perubahan orientasi kendaraan secara konsisten pada rentang pengujian.

Meskipun demikian, terdapat deviasi yang semakin terlihat pada beberapa sudut setelah 135° . Error negatif menunjukkan bahwa delta heading yang terbaca sedikit lebih kecil dibandingkan sudut referensi atau mengalami underestimation terhadap perubahan sudut yang diberikan. Deviasi terbesar terjadi pada 270° dengan error $-1,925^\circ$. Setelah posisi tersebut, besar error kembali mengecil sehingga tidak menunjukkan penyimpangan yang terus bertambah secara monoton sampai akhir pengujian.

Untuk menilai karakteristik linearitas secara lebih kuantitatif, data sembilan posisi pengujian diringkas menggunakan parameter slope regresi, koefisien determinasi, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), error maksimum absolut, dan laju publikasi aktual. Ringkasan hasil tersebut ditunjukkan pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4. 4 Ringkasan Karakteristik Linearitas IMU

Metrik	Hasil
--------	-------

Metrik	Hasil
Mean rate aktual	48,671 Hz
Slope linearitas	0,995430
Koefisien determinasi R^2	0,999987
RMSE heading	1,002°
MAE heading	0,761°
Error maksimum absolut	1,925°

Berdasarkan **Tabel 4.4**, diperoleh slope linearitas sebesar 0,995430. Nilai tersebut mendekati nilai ideal 1, yang menunjukkan bahwa besar perubahan heading yang dihasilkan IMU hampir sebanding dengan perubahan sudut referensi. Koefisien determinasi sebesar 0,999987 menunjukkan bahwa hubungan antara sudut referensi dan delta heading IMU sangat mendekati hubungan linear pada skenario pengujian yang dilakukan.

Nilai slope yang sedikit lebih kecil dari 1 konsisten dengan kecenderungan sebagian hasil pengukuran pada sudut besar yang sedikit berada di bawah nilai referensi. Dengan kata lain, pada keseluruhan rentang pengujian terdapat kecenderungan kecil bahwa perubahan heading IMU lebih rendah daripada perubahan sudut referensi. Namun, selisih tersebut masih relatif kecil dibandingkan rentang pengujian 0° sampai 360°.

RMSE heading diperoleh sebesar 1,002°, sedangkan MAE sebesar 0,761°. RMSE yang lebih besar daripada MAE menunjukkan bahwa beberapa titik dengan error lebih besar memberikan kontribusi lebih tinggi terhadap nilai kesalahan keseluruhan, terutama error sebesar 1,925° pada sudut 270°. Nilai maksimum absolut tersebut menunjukkan titik penyimpangan terbesar yang ditemukan selama pengujian sembilan sudut.

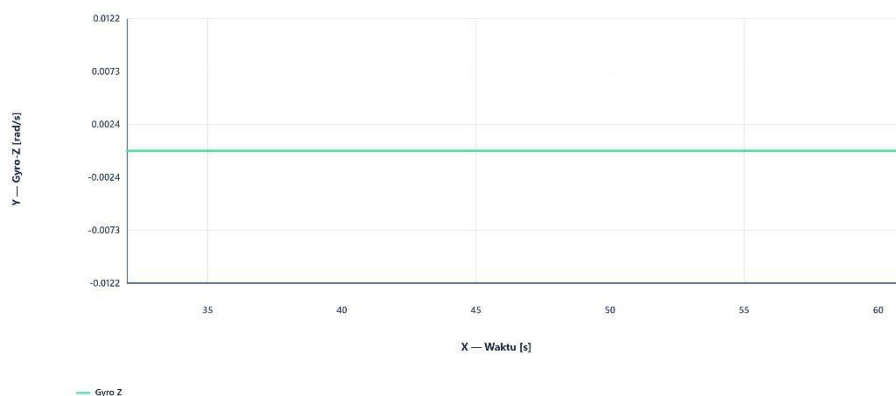
Nilai RMSE, MAE, dan error maksimum tersebut dihitung langsung dari selisih antara sembilan nilai delta heading IMU terhadap sembilan sudut referensi. Dengan demikian, nilai statistik tersebut merupakan hasil pengukuran pada skenario pengujian yang dilakukan dan bukan nilai estimasi teoritis.

Selain ketepatan perubahan heading, aspek temporal sensor juga perlu diperhatikan karena data IMU digunakan sebagai sumber informasi gerak dengan laju tinggi. Dari seluruh posisi pengujian diperoleh laju publikasi rata-rata sebesar 48,671 Hz. Nilai tersebut mendekati target 50 Hz, meskipun terdapat variasi laju antarposisi dengan nilai

terendah 45,563 Hz pada pengujian 90° dan nilai tertinggi mendekati 49,662 Hz pada pengujian 180°.

Laju aktual sebesar 48,671 Hz menunjukkan bahwa IMU mampu menyediakan measurement orientasi dan kecepatan sudut dengan periode pembaruan yang jauh lebih rapat dibandingkan sumber posisi global GNSS. Karakteristik tersebut penting dalam proses estimasi keadaan karena perubahan rotasi kendaraan dapat diperbarui pada interval waktu yang lebih pendek, sedangkan GNSS memberikan koreksi posisi global pada laju yang lebih rendah.

Setelah pengujian linearitas heading, karakteristik keluaran kecepatan sudut sumbu-Z diamati ketika sensor berada dalam kondisi diam. Pengujian ini digunakan untuk melihat apakah terdapat perubahan keluaran gyro-Z pada saat secara fisik tidak diberikan rotasi terhadap sumbu vertikal. Hasil pengamatan ditunjukkan pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4. 6 Stabilitas Keluaran Gyro-Z IMU saat diam

Berdasarkan **Gambar 4.6**, keluaran gyro-Z pada kondisi IMU diam tercatat sebesar 0 rad/s selama interval pengujian. Data pada topic tersebut berasal dari nilai gyro yang telah didekode dari paket sensor sebelum digunakan oleh estimator, sehingga nilai nol yang diamati bukan merupakan keluaran EKF maupun hasil pengolahan grafik.

Kondisi tersebut dapat dijelaskan berdasarkan karakteristik keluaran digital sensor. Pada konfigurasi yang digunakan, gyro bekerja pada rentang pengukuran $\pm 2000^\circ/\text{s}$ dengan data keluaran bertipe integer 16-bit. Dengan demikian, satu tingkat perubahan data digital ekuivalen dengan sekitar $0,061^\circ/\text{s}$ atau $0,00107 \text{ rad/s}$. Perubahan kecepatan sudut yang sangat kecil ketika sensor berada dalam kondisi diam dapat berada di bawah

resolusi keluaran tersebut sehingga direpresentasikan sebagai nilai nol. Selain itu, IMU menggunakan filtering internal pada sensor sehingga fluktuasi kecil pada kondisi statis dapat semakin teredam sebelum data dikirimkan ke sistem.

Oleh karena itu, nilai gyro-Z sebesar 0 rad/s pada pengujian ini tidak diinterpretasikan sebagai kondisi giroskop yang benar-benar bebas noise atau bias, melainkan menunjukkan bahwa tidak terdapat rotasi sumbu-Z yang terukur pada resolusi keluaran sensor dalam kondisi diam. Dengan demikian, hasil pengujian ini lebih tepat digunakan sebagai verifikasi kestabilan keluaran gyro-Z pada kondisi statis, sedangkan karakterisasi noise giroskop secara lebih detail memerlukan pengukuran dengan resolusi dan analisis statistik yang lebih sensitif.

4.1.3 Pengujian Feedback Kecepatan dan Steering sebagai Sumber Odometri

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik feedback kecepatan penggerak dan sudut steering yang digunakan sebagai masukan pembentukan odometri kendaraan. Feedback kecepatan digunakan untuk merepresentasikan gerak longitudinal kendaraan, sedangkan feedback steering digunakan untuk menentukan arah perubahan pose berdasarkan model kinematika Ackermann. Statistik utama data selama pengujian dirangkum pada **Tabel 4.5**.

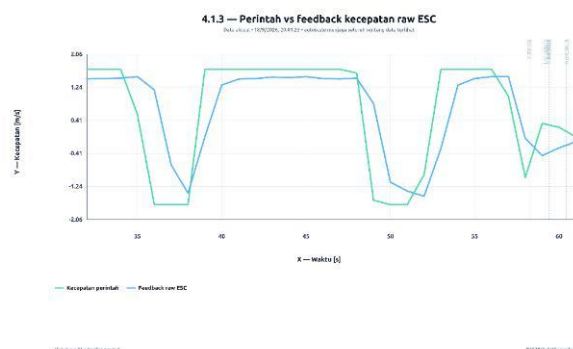
Tabel 4. 5 Statistik Utama Feedback Kendaraan

Series	Mean	Std	Min	Max	P95
Steering perintah [rad]	-0,0427	0,2362	-0,3685	0,3685	0,3685
Feedback encoder raw [rad]	2,8393	1,1383	0,6389	4,9341	4,7761
Kecepatan perintah [m/s]	0,8797	1,2783	-1,6878	1,6878	1,6878
Feedback ESC raw [m/s]	0,7832	1,0652	-1,5010	1,6374	1,5010
Kecepatan GNSS raw [m/s]	1,2662	0,4226	0,0921	1,8515	1,6757

Berdasarkan **Tabel 4.5**, kecepatan perintah memiliki rentang $-1,6878$ hingga $1,6878$ m/s, sedangkan feedback ESC berada pada rentang $-1,5010$ hingga $1,6374$ m/s.

Kesamaan tanda positif dan negatif menunjukkan bahwa feedback ESC dapat merepresentasikan arah gerak maju dan mundur kendaraan. Sementara itu, kecepatan GNSS berada pada rentang 0,0921–1,8515 m/s dan bernilai positif karena data tersebut merepresentasikan besar kecepatan terhadap permukaan, sehingga tidak digunakan secara langsung untuk menentukan arah gerak longitudinal pada odometri.

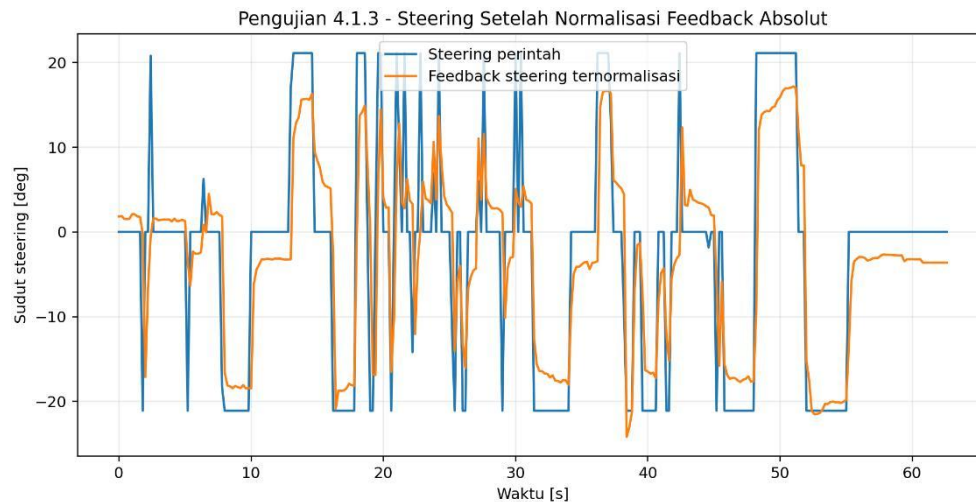
Pada data steering, nilai command berada pada domain sudut steering relatif terhadap posisi tengah kendaraan, sedangkan feedback encoder raw masih berada pada domain posisi absolut aktuator. Oleh karena itu, keduanya tidak dapat dibandingkan secara langsung sebagai error. Feedback encoder terlebih dahulu disetarakan terhadap posisi center dan mapping fisik steering sesuai Pseudocode 3.3 sebelum digunakan dalam pembentukan odometri. Untuk melihat respons kecepatan terhadap waktu, kecepatan perintah, feedback ESC, dan kecepatan GNSS dibandingkan sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4. 7 Kecepatan Perintah, Feedback ESC Dan GNSS

Berdasarkan **Gambar 4.7**, feedback ESC mengikuti perubahan kecepatan perintah dan mempertahankan informasi arah gerak sehingga sesuai digunakan sebagai sumber kecepatan longitudinal pada odometri lokal. Pembacaan GNSS menunjukkan karakteristik yang berbeda karena berasal dari estimasi kecepatan global dan tidak mempertahankan tanda arah maju-mundur pada data yang digunakan. Oleh karena itu, GNSS pada pengujian ini digunakan sebagai pembanding karakteristik gerak, sedangkan feedback ESC digunakan sebagai sumber utama kecepatan odometri.

Selanjutnya, feedback steering disetarakan ke domain sudut steering kendaraan agar dapat dibandingkan dengan steering command. Hasil perbandingan setelah penyetaraan ditunjukkan pada **Gambar 4.8**.



Gambar 4. 8 Steering Perintah Dan Feedback Setelah Penyetaraan Refrensi

Berdasarkan **Gambar 4.8**, feedback steering setelah penyetaraan menunjukkan arah perubahan yang mengikuti steering command. Selisih yang masih muncul dapat dipengaruhi oleh respons dinamis aktuator, toleransi mekanik, maupun ketidaksempurnaan hasil kalibrasi. Dengan demikian, feedback steering yang telah dikonversi ke sudut kendaraan dapat digunakan bersama feedback kecepatan ESC sebagai masukan pembentukan odometri berbasis kinematika Ackermann.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa feedback ESC sesuai digunakan sebagai sumber kecepatan longitudinal karena menyediakan nilai bertanda sesuai arah gerak, sedangkan feedback steering dapat digunakan setelah dilakukan penyetaraan dari posisi absolut aktuator ke sudut steering kendaraan. Kedua informasi tersebut selanjutnya menjadi masukan odometri pada proses estimasi gerak lokal.

4.1.4 Pengujian Heading RM3100 dan Inersia

Pengujian heading dilakukan dengan membandingkan heading RM3100 dan heading inersia selama 61 s. Perbandingan ini digunakan untuk mengevaluasi konsistensi kedua sumber arah. Residual didefinisikan sebagai heading inersia dikurangi heading RM3100. Selain residual, drift inersia dihitung terhadap baseline awal pada dataset yang sama.

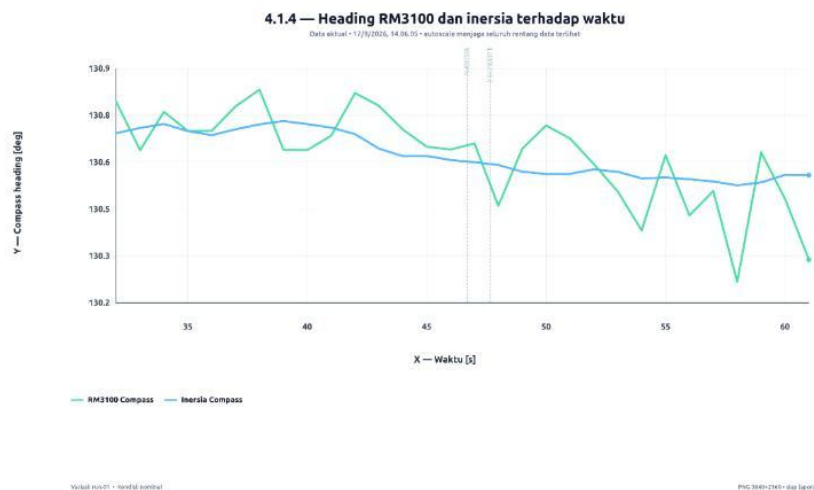
Residual heading dihitung pada setiap sampel agar selisih sudut tetap berada pada representasi sudut yang konsisten. Selanjutnya, rumus nilai rata-rata, simpangan baku, dan RMSE pada Subbab 2.11.1 digunakan untuk merangkum 61 sampel residual.

Untuk menilai konsistensi dua sumber heading, residual antara heading inersia dan RM3100 dihitung pada seluruh sampel pengujian. Statistik residual yang digunakan sebagai dasar analisis dirangkum pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4. 6 Ringkasan Heading RM3100 dan Inersia

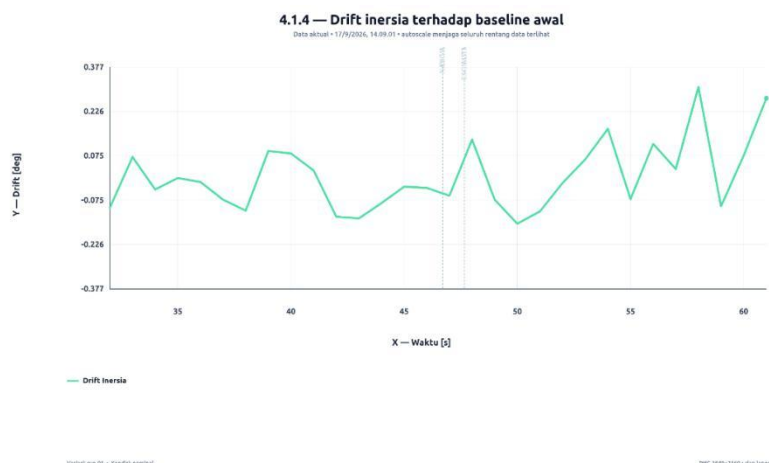
Metrik	Hasil
Mean heading RM3100	130,636°
Mean heading inersia	130,642°
Mean residual	+0,006°
Std residual	0,111°
RMSE residual	0,110°
P95 residual	0,219°
Maksimum residual	0,309°
Drift akhir inersia	+0,271°

Untuk melihat kesesuaian kedua sumber heading secara langsung, heading RM3100 dan heading inersia diplot terhadap waktu pada grafik yang sama. Hasil perbandingan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4. 9 Heading RM3100 Dan Heading Inersia Terhadap Waktu

Perubahan heading inersia terhadap nilai awal kemudian diamati untuk mengetahui kecenderungan drift selama periode pengujian. Besarnya perubahan terhadap baseline awal divisualisasikan pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4.9 Drift Heading Inersia Terhadap Baseline

4.2 Pengujian dan Analisis Extended Kalman Filter Lokal

EKF lokal diuji menggunakan tiga paket konfigurasi, yaitu Candidate A, Baseline, dan Candidate B. Parameter yang berubah meliputi frequency, sensor_timeout, measurement covariance, process noise covariance dan predict to current time. Kelima parameter memiliki pengaruh teoritis yang berbeda terhadap perilaku estimator: frequency mengatur laju siklus estimasi, sensor_timeout menentukan batas umur measurement, R menentukan tingkat kepercayaan terhadap measurement, Q menentukan tingkat ketidakpastian model prediksi, dan predict_to_current_time menentukan apakah state diproyeksikan sampai timestamp publikasi. Karena seluruh parameter berubah sebagai satu paket, pembahasan teori tiap parameter digunakan untuk menjelaskan kecenderungan, tetapi hasil pengujian tidak dipakai untuk menyatakan hubungan sebab-akibat tunggal.

Seluruh konfigurasi yang berbeda ditampilkan pada **Tabel 4.7** agar respons setiap profil dapat ditelusuri terhadap parameter yang aktif. Penyajian selanjutnya tetap mengikuti struktur parameter pada laporan sumber, tetapi interpretasinya selalu membaca beberapa indikator sekaligus, yaitu residual, measurement age, continuity, dan uncertainty state.

Tabel 4. 7 Profile Konfigurasi Lokal yang di uji

Parameter	Cand. A	Baseline	Cand. B
frequency	25 Hz	30 Hz	40 Hz
sensor_timeout	0,30 s	0,25 s	0,20 s
R ESC v_x	0,04120	0,03576	0,03563

Parameter	Cand. A	Baseline	Cand. B
R GNSS v_x	0,0030	0,0025	0,0020
R IMU yaw	0,00900	0,00762	0,00600
R IMU ω_z	0,00050	0,00040	0,00030
Q_x / Q_y	0,040 / 0,040	0,050 / 0,050	0,060 / 0,060
Q_{yaw}	0,050	0,060	0,075
Q_{v_x}	0,020	0,025	0,035
Q_{ω_z}	0,015	0,020	0,025
predict_to_current_time	false	true	true

4.2.1 Pengujian Parameter Frequency

Frequency menentukan seberapa sering EKF menjalankan siklus prediksi-koreksi dan memperbarui keluaran state. Nilai 25 Hz, 30 Hz, dan 40 Hz secara nominal setara dengan periode sekitar 40 ms, 33,3 ms, dan 25 ms. Secara teoritis, frequency yang lebih tinggi dapat memperkecil interval pembaruan state dan meningkatkan respons temporal apabila measurement tersedia dengan laju yang memadai. Namun, jika sumber measurement lebih lambat atau mengalami jitter, kenaikan frequency tidak otomatis membuat data lebih fresh karena filter dapat melakukan lebih banyak prediksi di antara dua measurement. Pengaruh ini dievaluasi bersama RMSE residual v_x , measurement age, dan continuity pada **Tabel 4.8**.

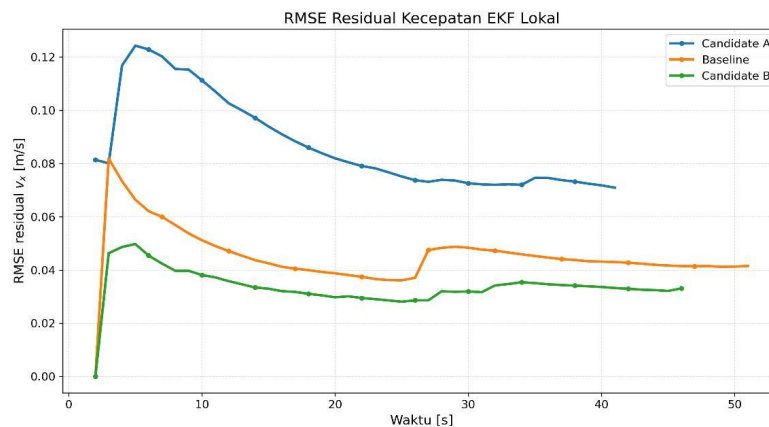
Tabel 4. 8 Hasil akhir pengujian frequency EKF lokal

Profil	f [Hz]	RMSE v_x [m/s]	Mean age [s]	P95 age [s]	C [%]
Cand. A	25 Hz	0,07096 m/s	0,07280 s	0,167 s	99,5%
Baseline	30 Hz	0,04154 m/s	0,04232 s	0,126 s	99,2%
Cand. B	40 Hz	0,03311 m/s	0,07917 s	0,330 s	87,9%

Berdasarkan **Tabel 4.8**, Candidate B pada 40 Hz menghasilkan RMSE residual v_x paling kecil sebesar 0,03311 m/s, tetapi P95 measurement age meningkat menjadi 0,330 s dan continuity turun menjadi 87,9%. Baseline pada 30 Hz menghasilkan RMSE 0,04154 m/s dengan P95 age 0,126 s dan continuity 99,2%. Secara teori, frequency yang lebih tinggi memberi peluang pembaruan lebih rapat, tetapi data ini menunjukkan bahwa kualitas real-time tetap dibatasi oleh laju dan keteraturan measurement. Karena

timeout, R, Q, dan predict_to_current_time juga berubah, hasil tersebut tidak digunakan untuk menyatakan bahwa frequency menjadi penyebab tunggal perbedaan kinerja.

Untuk memastikan nilai akhir tidak menutupi perilaku selama pengujian, residual kecepatan diamati terhadap waktu. Perkembangan RMSE residual ditampilkan pada **Gambar 4.10** sehingga kestabilan masing-masing profil dapat dinilai sepanjang run, bukan hanya dari satu angka ringkasan.



Gambar 4. 10 Perbandingan RMSE residual kecepatan EKF lokal

Berdasarkan **Gambar 4.10**, Candidate A memiliki residual lebih besar pada fase awal kemudian menurun, sedangkan Baseline dan Candidate B berada pada tingkat lebih rendah. Candidate B memiliki residual akhir terkecil, tetapi keunggulan tersebut tidak dapat dibaca terpisah dari measurement age dan continuity. frequency hanya salah satu faktor yang membentuk respons estimator sehingga pemilihan konfigurasi tidak didasarkan pada residual saja.

4.2.2 Pengujian Parameter sensor_timeout

Sensor_timeout menentukan batas umur measurement yang masih diterima untuk proses koreksi. Secara teoritis, timeout yang lebih kecil membuat filter lebih cepat menandai data terlambat sebagai stale sehingga mengurangi penggunaan measurement lama, tetapi nilai yang terlalu ketat dapat menurunkan continuity ketika terjadi jitter atau keterlambatan komunikasi. Timeout yang lebih besar lebih toleran terhadap variasi waktu kedatangan, tetapi meningkatkan kemungkinan measurement yang lebih tua masih dipakai. Dampak praktisnya dievaluasi melalui mean age, P95 age, continuity, dan RMSE v_x pada **Tabel 4.9**.

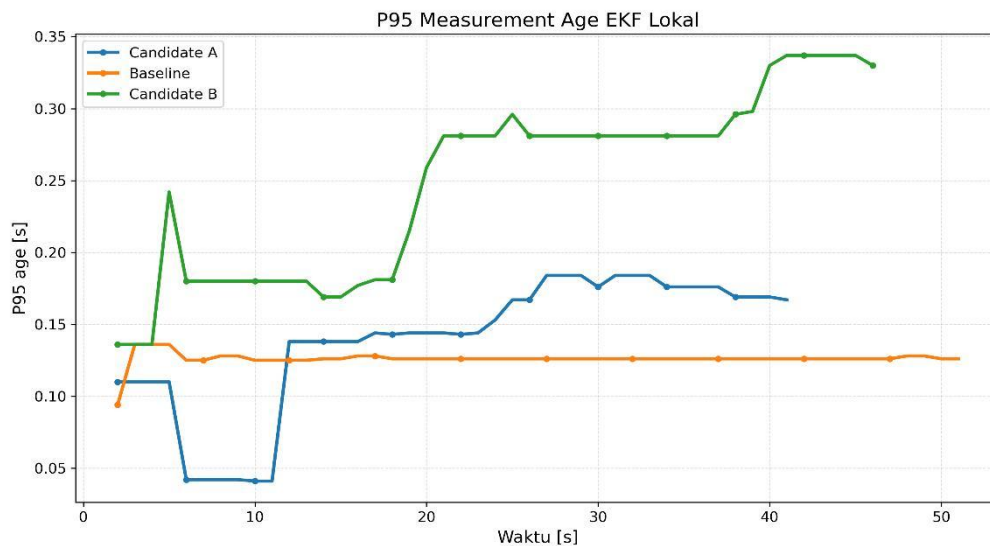
Tabel 4. 9 Hasil Profile Sensor Timeout EKF Lokal

Profil	timeout [s]	Mean age [s]	P95 age [s]	C [%]	RMSE v_x [m/s]
--------	-------------	--------------	-------------	-------	------------------

Profil	timeout [s]	Mean age [s]	P95 age [s]	C [%]	RMSE v_x [m/s]
Cand. A	0,30 s	0,07280 s	0,167 s	99,5%	0,07096 m/s
Baseline	0,25 s	0,04232 s	0,126 s	99,2%	0,04154 m/s
Cand. B	0,20 s	0,07917 s	0,330 s	87,9%	0,03311 m/s

Berdasarkan **Tabel 4.9**, Candidate B menggunakan timeout paling kecil 0,20 s tetapi memiliki continuity terendah 87,9% dan P95 age tertinggi 0,330 s. Baseline dengan timeout 0,25 s mempertahankan P95 age 0,126 s dan continuity 99,2%. Kecenderungan ini sesuai dengan prinsip bahwa timeout yang terlalu ketat dapat membuat filter lebih mudah kehilangan koreksi ketika measurement datang tidak seragam. Meskipun demikian, hasil tidak dapat dipakai sebagai bukti pengaruh tunggal timeout karena frequency, covariance, dan mekanisme prediksi juga berubah pada paket yang sama.

Freshness tidak cukup dinilai dari satu nilai akhir, sehingga P95 measurement age diamati terhadap waktu dan ditampilkan pada **Gambar 4.11**. Grafik ini digunakan untuk melihat apakah keterlambatan hanya terjadi sesaat atau menjadi kecenderungan selama run.



Gambar 4. 11 P95 measurement age EKF lokal

Berdasarkan **Gambar 4.11**, Baseline mempertahankan P95 age yang relatif rendah dan stabil, sedangkan Candidate B meningkat hingga sekitar 0,33 s pada bagian akhir run. Hal ini menunjukkan bahwa menaikkan frequency sekaligus memperketat timeout tidak otomatis meningkatkan freshness apabila rantai measurement memiliki jitter. Oleh

karena itu, timeout diperlakukan sebagai batas proteksi temporal yang harus disesuaikan dengan karakteristik sumber data aktual.

4.2.3 Pengujian Measurement Covariance

Measurement covariance R merepresentasikan ketidakpastian measurement dan memengaruhi besar-kecilnya bobot koreksi terhadap state hasil prediksi. Secara teoritis, R yang lebih kecil menyatakan measurement lebih dipercaya sehingga filter cenderung mengikuti measurement lebih kuat; respons dapat menjadi lebih cepat dan residual terhadap measurement dapat mengecil, tetapi sensitivitas terhadap noise atau outlier juga dapat meningkat. Sebaliknya, R yang lebih besar mengurangi pengaruh measurement dan membuat estimator lebih bergantung pada prediksi model. Nilai R yang aktif pada setiap profil serta residual yang dihasilkan dirangkum pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4.10 Measurement Covariance Yang Terekam Pada EKF Lokal

Profil	R_{ESC} v_x	R_{GNSS} v_x	R_{IMU} yaw	R_{ESC} ω_z	R_{IMU} ω_z	RMSE v_x ESC
Cand. A	0,04120	0,0030	0,00900	0,09206	0,00050	0,07096
Baseline	0,03576	0,0025	0,00762	0,06945	0,00040	0,04154
Cand. B	0,03563	0,0020	0,00600	0,06956	0,00030	0,03311

Berdasarkan **Tabel 4.10**, Candidate B menggunakan beberapa nilai R yang lebih kecil dan menghasilkan RMSE v_x paling rendah, sedangkan Candidate A menggunakan R yang lebih besar dan residual lebih tinggi. Kecenderungan tersebut searah dengan teori bahwa measurement dengan R lebih kecil diberi kepercayaan lebih besar. Namun, karena frequency, sensor_timeout, Q , dan predict_to_current_time juga berubah pada saat yang sama, data ini tidak dapat digunakan untuk menetapkan R sebagai penyebab tunggal. R digunakan sebagai salah satu parameter penjelas ketika menilai trade-off antara respons terhadap measurement dan robustness terhadap noise.

4.2.4 Pengujian process_noise_covariance

Process noise covariance Q menyatakan ketidakpastian model pada tahap prediksi. Secara teoritis, Q yang lebih besar membuat covariance prediksi tumbuh lebih cepat sehingga filter menjadi lebih siap dikoreksi oleh measurement, tetapi uncertainty state juga dapat meningkat. Q yang terlalu kecil dapat membuat filter terlalu percaya pada model sehingga respons terhadap perubahan measurement menjadi lambat atau terlalu kaku. Pada pengujian ini, nilai Q dibandingkan dengan mean sigma state dan RMSE v_x

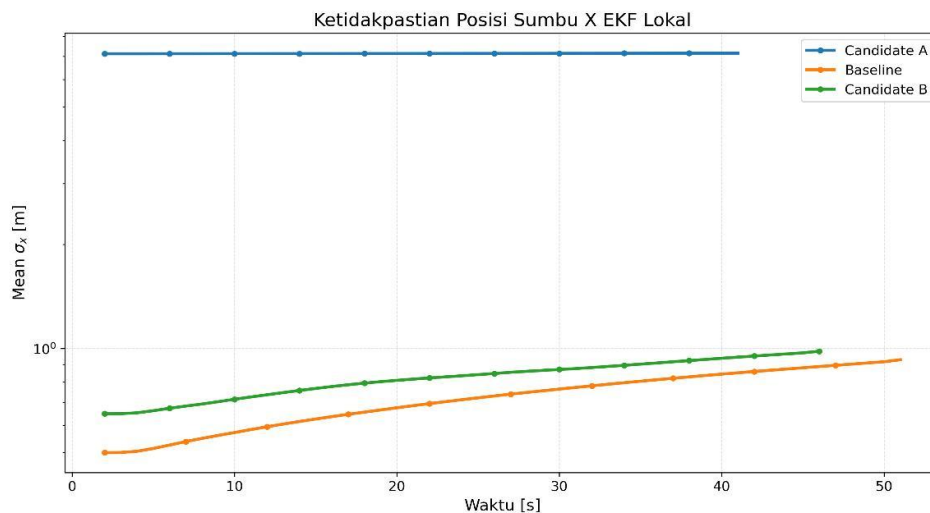
untuk melihat bagaimana asumsi model tercermin pada keluaran estimator. Hasilnya ditampilkan pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4. 11 Proses Noise dan Ketidakpastian EKF Lokal

Profil	Q_x	Q_y	Q_{yaw}	Q_{v_x}	Q_{ω_z}	Mean σ_x	RMSE v_x
Cand. A	0,040	0,040	0,050	0,020	0,015	7,151 m	0,07096
Baseline	0,050	0,050	0,060	0,025	0,020	0,928 m	0,04154
Cand. B	0,060	0,060	0,075	0,035	0,025	0,982 m	0,03311

Berdasarkan **Tabel 4.11**, Candidate A justru menghasilkan mean σ_x sebesar 7,151 m, jauh lebih besar daripada Baseline 0,928 m dan Candidate B 0,982 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa uncertainty aktual merupakan keluaran interaksi seluruh konfigurasi dan riwayat measurement, bukan fungsi satu nilai Q saja. Secara teori Q tetap menentukan laju pertumbuhan ketidakpastian model, tetapi pada dataset ini pengaruhnya tidak dapat dipisahkan dari R , frequency, timeout, dan availability measurement. Oleh karena itu, mean sigma digunakan sebagai indikator kesehatan estimator dan bukan sebagai bukti kausal satu parameter.

Untuk melihat apakah uncertainty meningkat secara sesaat atau bertahan selama run, perkembangan mean sigma X ditampilkan pada **Gambar 4.12**. Grafik ini melengkapi residual karena estimator dapat memiliki residual kecil terhadap measurement tetapi tetap memiliki covariance state yang besar.



Gambar 4. 12 Perkembangan mean sigma X EKF lokal

Berdasarkan **Gambar 4.12**, Candidate A berada pada tingkat uncertainty yang jauh lebih tinggi dibanding Baseline dan Candidate B. Kondisi ini menunjukkan bahwa continuity yang tinggi belum cukup untuk menyatakan estimator sehat apabila covariance state membesar. nilai Q dan R perlu dipilih sehingga estimator tetap responsif terhadap measurement tanpa menghasilkan uncertainty yang tidak terkendali.

4.2.5 Pengujian predict_to_current_time

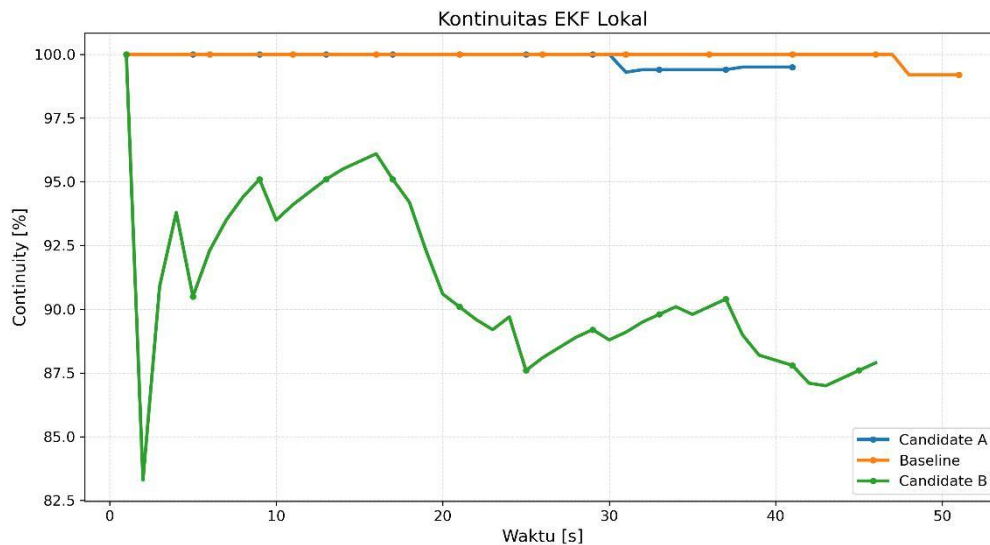
Parameter predict_to_current_time menentukan apakah state diproyeksikan dari timestamp measurement terakhir sampai waktu publikasi keluaran filter. Secara teoritis, opsi true dapat mengurangi lag timestamp pada keluaran yang dikonsumsi komponen downstream, terutama ketika measurement tidak tiba tepat pada waktu publikasi. Namun, prediksi tambahan tetap bergantung pada model dan kualitas state terakhir; parameter ini tidak dapat menghilangkan measurement age yang berasal dari sensor atau komunikasi. Dampaknya dievaluasi bersama P95 age, continuity, dan RMSE pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4. 12 Hasil Predict To Current Time EKF Lokal

Profil	predict	P95\ age [s]	C [%]	RMSE v_x [m/s]
Cand. A	false	0,167 s	99,5%	0,07096 m/s
Baseline	true	0,126 s	99,2%	0,04154 m/s
Cand. B	true	0,330 s	87,9%	0,03311 m/s

Berdasarkan **Tabel 4.12**, Baseline dan Candidate B sama-sama menggunakan predict_to_current_time=true, tetapi menghasilkan karakteristik age dan continuity yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi prediksi hingga waktu publikasi bukan jaminan freshness yang lebih baik apabila parameter lain dan availability measurement berbeda. Secara teori fitur ini mengurangi ketertinggalan representasi state terhadap waktu publikasi, tetapi pada pengujian ini efeknya tidak dapat dipisahkan secara kausal dari frequency, timeout, R, dan Q.

Sebagai penutup evaluasi EKF lokal, continuity keluaran dibandingkan terhadap waktu pada **Gambar 4.12** berikut. Grafik ini digunakan untuk memastikan konfigurasi tidak hanya memberikan residual rendah, tetapi juga mampu mempertahankan keluaran estimator selama pengujian.



Gambar 4.12 Kontinuitas keluaran EKF lokal

Berdasarkan grafik continuity, Baseline dan Candidate A mempertahankan keluaran mendekati 100%, sedangkan Candidate B turun lebih besar sepanjang run. Secara keseluruhan, Candidate B memiliki residual terkecil tetapi freshness dan continuity lebih rendah.

Candidate A memiliki continuity tinggi tetapi uncertainty posisi membesar; sementara Baseline mempertahankan residual rendah, P95 age rendah, continuity 99,2%, dan uncertainty yang terkendali. Karena pengujian menggunakan paket tuning, Baseline dipertahankan sebagai konfigurasi operasional berdasarkan keseimbangan indikator, bukan karena satu parameter tertentu dianggap paling baik.

4.3 Pengujian dan Analisis Extended Kalman Filter Global

EKF global dievaluasi menggunakan measurement posisi GNSS pada frame map beserta informasi arah dan kecepatan sesuai konfigurasi sistem. Berbeda dengan EKF lokal, indikator utamanya berkaitan dengan konsistensi pose global, freshness measurement, continuity, covariance posisi, dan besarnya lonjakan koreksi. Residual posisi pada bagian ini merupakan selisih terhadap measurement GNSS dan bukan error absolut terhadap ground truth eksternal. Oleh karena itu, nilai RMSE XY digunakan sebagai indikator konsistensi terhadap GNSS dan harus dibaca bersama uncertainty serta max position jump.

Seperti EKF lokal, Candidate A, Baseline, dan Candidate B pada EKF global mengubah beberapa parameter secara bersamaan. Parameter tersebut ditampilkan pada

Tabel 4.13 untuk menunjukkan konfigurasi lengkap tiap run. Pengaruh teoritis frequency, sensor_timeout, covariance GNSS, Q posisi, dan predict_to_current_time tetap dibahas, tetapi data tidak digunakan untuk menyatakan hubungan sebab-akibat tunggal karena eksperimen bukan one-factor-at-a-time.

Tabel 4. 13 Profil konfigurasi EKF global yang diuji

Parameter	Cand. A	Baseline	Cand. B
frequency	25 Hz	30 Hz	40 Hz
sensor_timeout	0,60 s	0,50 s	0,40 s
R GNSS posisi X/Y	hAcc ²	hAcc ²	hAcc ²
R GNSS v _x	0,0030	0,0025	0,0020
R COG yaw	0,00150	0,001218	0,00100
Q _x / Q _y	0,100 / 0,100	0,120 / 0,120	0,150 / 0,150
predict_to_current_time	false	true	true

Berdasarkan **Tabel 4.13**, ketiga profil memiliki kombinasi frequency, timeout, R, Q, dan predict_to_current_time yang berbeda. Karena covariance posisi GNSS dibentuk dari hAcc², tingkat kepercayaan terhadap posisi global juga mengikuti kualitas measurement yang terjadi saat run. Oleh karena itu, analisis berikut menilai trade-off residual, age, continuity, uncertainty, dan max jump sebagai satu karakteristik paket estimator.

4.3.1 Pengujian Parameter Frequency

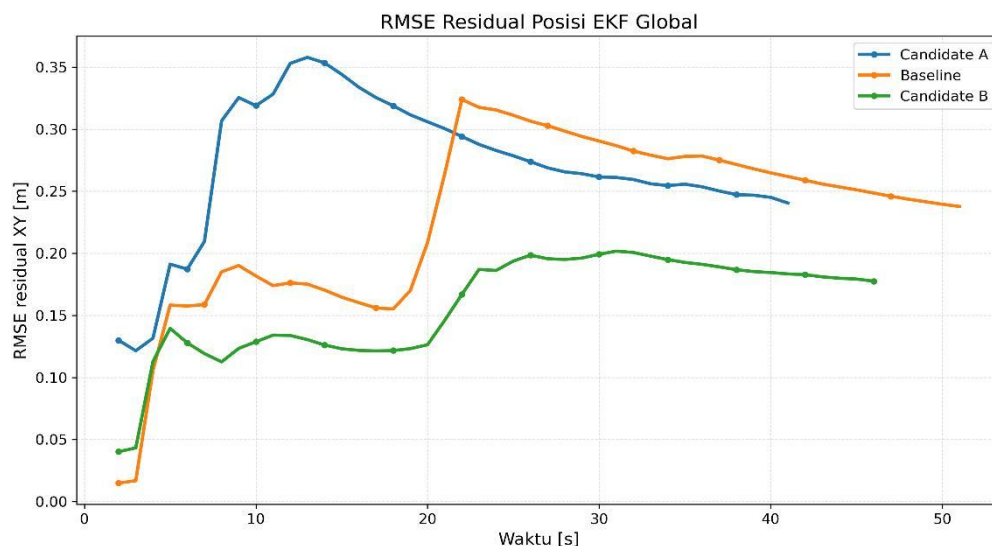
Frequency pada EKF global menentukan laju eksekusi estimasi pose terhadap frame map. Secara teoritis, frequency yang lebih tinggi memperkecil periode update dan dapat membuat pose global lebih responsif ketika measurement tersedia cukup cepat. Namun, GNSS memiliki laju lebih rendah daripada siklus EKF sehingga peningkatan frequency terutama menambah tahap prediksi di antara koreksi GNSS. Karena itu, frequency harus dinilai bersama measurement age dan continuity. Hasil ketiga profil disajikan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4. 14 Hasil Akhir Frekuensi EKF Global

Profil	Frequen cy	RMSE XY GNSS	Mean age	P95 age	Continui ty	GNSS avail.
Cand. A	25 Hz	0,24051 m	0,06287 s	0,157 s	100,0%	100%
Baseline	30 Hz	0,23774 m	0,04005 s	0,123 s	99,6%	100%
Cand. B	40 Hz	0,17756 m	0,07892 s	0,334 s	96,4%	100%

Berdasarkan **Tabel 4.14**, Candidate B pada 40 Hz menghasilkan RMSE XY terkecil 0,17756 m, tetapi P95 age meningkat menjadi 0,334 s dan continuity turun menjadi 96,4%. Baseline pada 30 Hz menghasilkan RMSE 0,23774 m dengan P95 age 0,123 s dan continuity 99,6%. Seluruh run memiliki GNSS availability 100%, sehingga perbedaan freshness terutama berasal dari perilaku estimator dan sinkronisasi measurement. Hasil ini menunjukkan bahwa frequency yang lebih tinggi tidak otomatis meningkatkan kualitas real-time pose global ketika input GNSS datang pada laju yang lebih rendah.

RMSE residual XY kemudian diamati terhadap waktu untuk memastikan nilai akhir mewakili perilaku sepanjang run. Perbandingan tersebut ditampilkan pada **Gambar 4.13**.



Gambar 4. 13 Perbandingan RMSE residual posisi EKF global

Berdasarkan **Gambar 4.13**, Candidate B mempertahankan residual posisi lebih rendah setelah fase awal, sedangkan Candidate A dan Baseline berada pada tingkat lebih tinggi. Secara teori frequency dapat memengaruhi kerapatan pembaruan, tetapi residual pada grafik tetap dipengaruhi oleh R, Q, timeout, predict_to_current_time, serta kualitas GNSS. Karena itu, grafik digunakan untuk menilai karakteristik paket konfigurasi dan bukan untuk mengisolasi pengaruh frequency.

4.3.2 Pengujian Parameter sensor_timeout

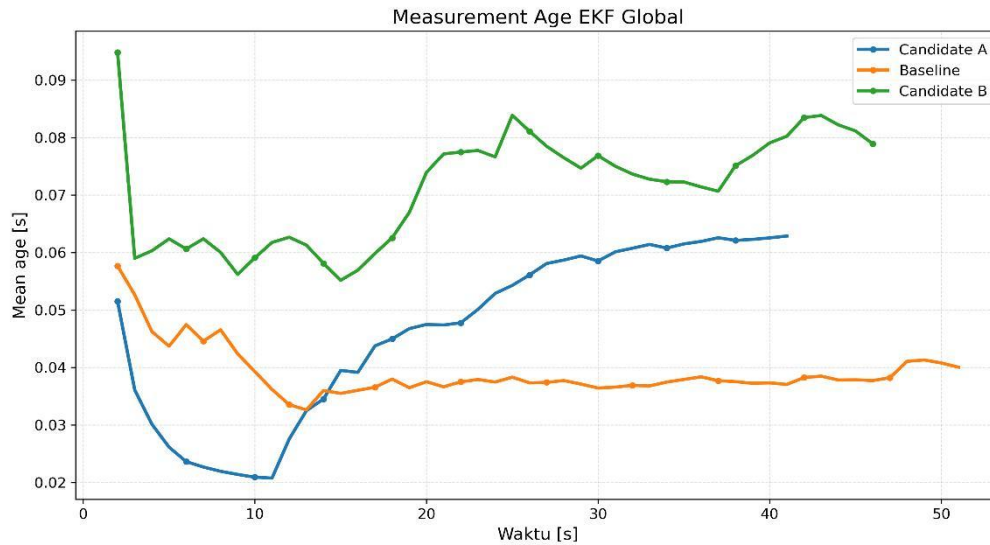
Sensor_timeout pada EKF global menentukan berapa lama measurement global masih dianggap layak untuk koreksi. Secara teoritis, timeout kecil mengurangi penggunaan data yang terlambat tetapi dapat menurunkan continuity ketika terdapat jitter, sedangkan timeout besar lebih toleran terhadap variasi waktu kedatangan namun berisiko mempertahankan measurement lama lebih lama. Pada pengujian ini timeout dianalisis bersama GNSS availability, gap maksimum, continuity, RMSE XY, dan mean age. Ringkasan hasil ditampilkan pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4.15 Hasil Profile Sensor_Timeout EKF Global

Profil	timeout [s]	GNSS [%]	Gap maks [s]	C [%]	RMSE XY [m]	Mean age [s]
Cand. A	0,60 s	100%	0,0 s	100,0%	0,24051 m	0,06287 s
Baseline	0,50 s	100%	0,0 s	99,6%	0,23774 m	0,04005 s
Cand. B	0,40 s	100%	0,0 s	96,4%	0,17756 m	0,07892 s

Berdasarkan **Tabel 4.15**, tidak terdapat gap GNSS pada ketiga run dan availability mencapai 100%, tetapi continuity estimator tetap berbeda. Candidate B menggunakan timeout terpendek 0,40 s dan continuity terendah 96,4%, sedangkan Baseline menggunakan 0,50 s dan continuity 99,6%. Kecenderungan tersebut konsisten dengan fungsi timeout sebagai batas stale, tetapi tidak dapat dijadikan patokan pengaruh tunggal karena frequency, R, Q, dan predict_to_current_time juga berubah dalam paket yang sama.

Perubahan mean measurement age kemudian divisualisasikan pada **Gambar 4.14** untuk melihat kestabilan freshness selama run, bukan hanya membandingkan nilai ringkasan pada akhir pengujian.



Gambar 4. 14 Mean measurement age EKF global

Berdasarkan **Gambar 4.14**, Baseline memiliki measurement age paling rendah dan relatif stabil, Candidate A berada pada tingkat menengah, sedangkan Candidate B cenderung paling tinggi. Kondisi ini memperkuat bahwa timeout harus dipilih berdasarkan karakteristik waktu kedatangan measurement aktual, bukan sekadar dibuat sekecil mungkin.

4.3.3 Pengujian Measurement Covariance GNSS

Measurement covariance posisi GNSS dibentuk dari $hAcc^2$ sehingga nilainya berubah mengikuti kualitas posisi receiver. Secara teoritis, $hAcc$ yang lebih besar menghasilkan covariance posisi yang lebih besar dan membuat filter menurunkan kepercayaan terhadap koreksi GNSS. Sebaliknya, covariance yang lebih kecil meningkatkan pengaruh measurement terhadap state global. Selain R posisi, R kecepatan GNSS dan R COG yaw juga memengaruhi bobot measurement masing-masing. Hubungan $hAcc$, R, residual, dan max position jump disajikan pada **Tabel 4.16**.

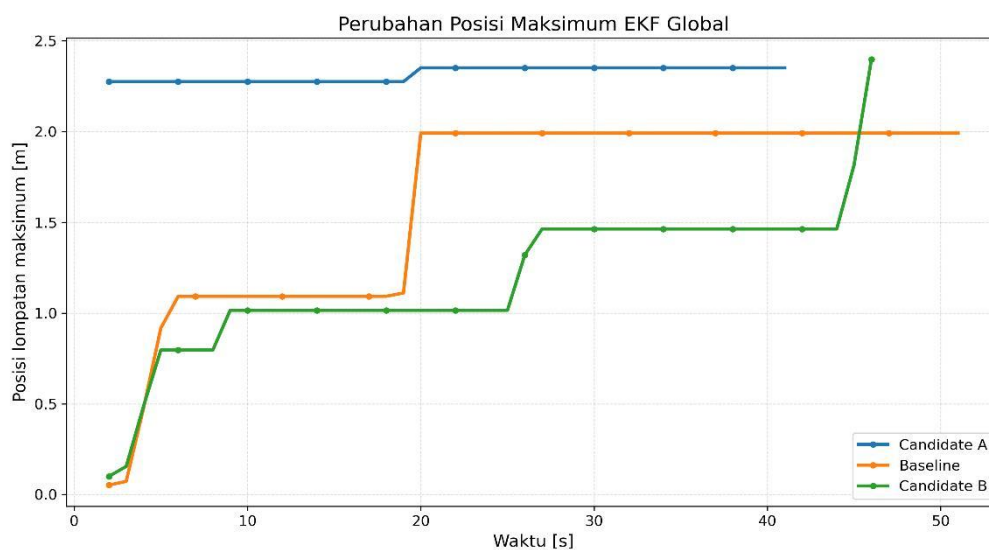
Tabel 4. 16 Measurement Covariance dan Residual EKF Global

Profil	Mean hAcc	R GNSS X/Y	R GNSS v_x	R COG yaw	RMSE XY	Max jump
Cand. A	1,53761 m	2,37319	0,0030	0,00150	0,24051 m	2,35170 m
Baseline	1,64094 m	2,69621	0,0025	0,001218	0,23774 m	1,99236 m

Profil	Mean hAcc	R GNSS X/Y	R GNSS v_x	R COG yaw	RMSE XY	Max jump
Cand. B	1,82001 m	3,31335	0,0020	0,00100	0,17756 m	2,39846 m

Berdasarkan **Tabel 4.16**, mean hAcc meningkat dari Candidate A menuju Candidate B dan R GNSS posisi meningkat sesuai pembentukan hAcc². Candidate B tetap menghasilkan RMSE XY terkecil, tetapi max position jump terbesar 2,39846 m; Baseline memiliki max jump paling kecil 1,99236 m. Secara teori, R menentukan tingkat kepercayaan terhadap measurement, tetapi besar lonjakan posisi juga dipengaruhi Q, waktu koreksi, heading, dan state sebelumnya. Oleh karena itu, residual kecil tidak cukup untuk menyatakan estimator global paling stabil.

Karena koreksi global yang terlalu besar dapat memengaruhi kestabilan map-odom, maximum position jump dibandingkan secara visual pada **Gambar 4.15**. Grafik ini digunakan sebagai indikator robustness koreksi, melengkapi RMSE residual yang hanya mengukur kedekatan rata-rata terhadap GNSS.



Gambar 4. 15 Perubahan posisi maksimum pada EKF global

Berdasarkan **Gambar 4.15**, Baseline mempertahankan lonjakan posisi maksimum yang lebih rendah dibanding profil lain. Candidate B memiliki residual rata-rata lebih kecil tetapi lonjakan posisi lebih besar. Hasil ini menunjukkan trade-off antara kemampuan mengikuti measurement dan kestabilan koreksi global; konfigurasi yang terlalu agresif terhadap measurement dapat menghasilkan residual kecil namun tidak selalu memberikan transisi pose yang paling halus.

4.3.4 Pengujian process_noise_covariance Posisi X-Y

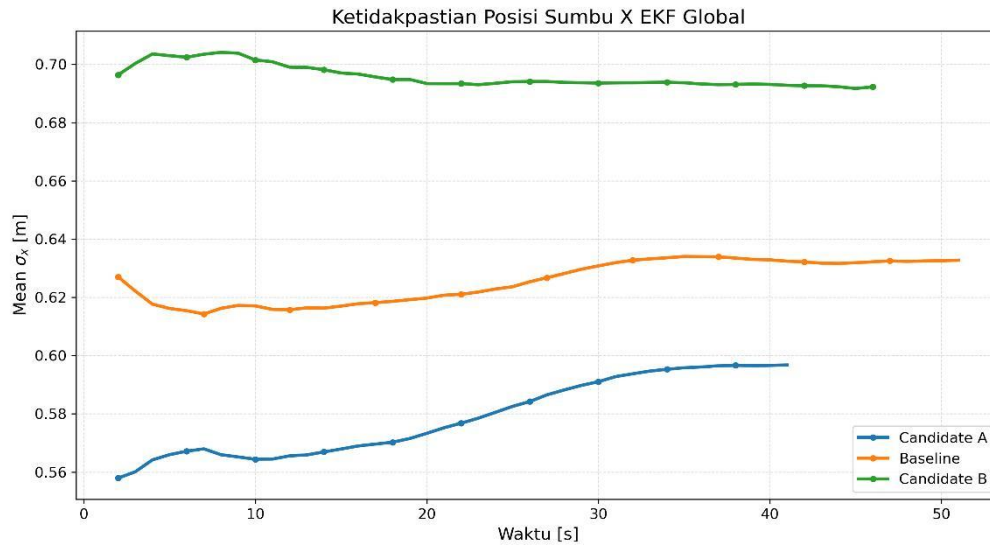
Process noise covariance Q_x dan Q_y mengatur besarnya ketidakpastian model posisi yang ditambahkan pada tahap prediksi. Secara teoritis, Q yang lebih besar membuat covariance prediksi tumbuh lebih cepat sehingga measurement GNSS dapat memberikan koreksi lebih kuat pada tahap update, tetapi mean sigma posisi juga cenderung meningkat. Q yang terlalu kecil dapat membuat filter terlalu percaya pada model dan lebih lambat mengikuti perubahan measurement. Hubungan Q , mean sigma, residual, dan max jump disajikan pada **Tabel 4.17**.

Tabel 4. 17 Proses dan Noise dan Ketidakpastian EKF Global

Profil	Q_x	Q_y	Mean σ_x	Mean σ_y	RMSE XY	Max jump
Cand. A	0,100	0,100	0,59677 m	0,59251 m	0,24051 m	2,35170 m
Baseline	0,120	0,120	0,63278 m	0,63427 m	0,23774 m	1,99236 m
Cand. B	0,150	0,150	0,69229 m	0,69358 m	0,17756 m	2,39846 m

Berdasarkan **Tabel 4.17**, kenaikan Q_x dan Q_y dari Candidate A menuju Candidate B diikuti kenaikan mean sigma posisi. Candidate B mempunyai RMSE XY lebih kecil tetapi sigma dan max jump lebih besar. Kecenderungan ini sejalan dengan prinsip bahwa Q lebih besar meningkatkan uncertainty prediksi dan membuka ruang koreksi measurement yang lebih kuat. Namun, karena parameter lain ikut berubah, hasil tersebut tidak dapat dijadikan bukti kausal tunggal pengaruh Q .

Perkembangan sigma X ditampilkan pada **Gambar 4.16** untuk melihat apakah perbedaan uncertainty terjadi secara konsisten sepanjang run dan bukan hanya pada nilai ringkasan akhir.



Gambar 4. 16 Mean sigma X pada EKF global

Berdasarkan **Gambar 4.16**, Candidate A memiliki sigma X paling rendah, Baseline berada di tengah, dan Candidate B paling tinggi. Hasil ini memperlihatkan peningkatan uncertainty model filter dapat menjadi lebih responsif terhadap measurement, tetapi keyakinan terhadap state prediksi juga menurun. Penetapan Q karena itu harus mempertimbangkan residual sekaligus uncertainty dan kestabilan koreksi.

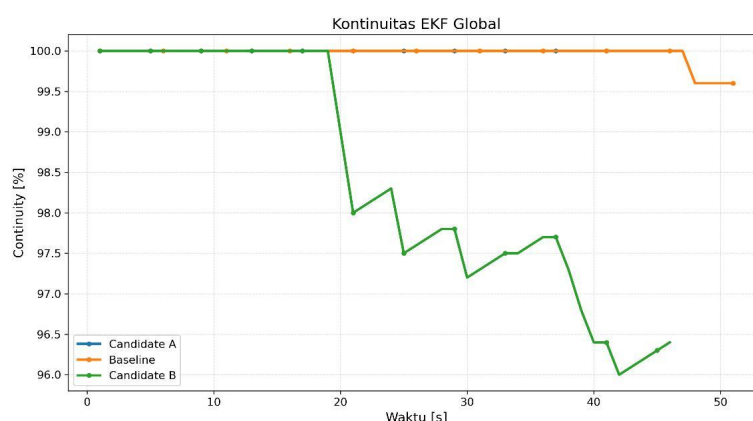
4.3.5 Pengujian predict_to_current_time

Predict_to_current_time pada EKF global memiliki fungsi yang sama dengan EKF lokal, yaitu memproyeksikan state hingga timestamp publikasi. Secara teoritis, opsi true membantu mengurangi ketertinggalan timestamp output tetapi tidak mengurangi usia measurement yang berasal dari sensor. Karena koreksi global berasal dari GNSS yang lebih lambat, pengaruh parameter ini harus dibaca bersama freshness, continuity, residual, dan max position jump. Ringkasan hasil ditampilkan pada **Tabel 4.18**.

Tabel 4. 18 Hasil Predict_To_Current Time EKF Global

Profil	predict	P95 age [s]	C [%]	RMSE XY [m]	Jmax [m]
Cand. A	false	0,157 s	100,0%	0,24051 m	2,35170 m
Baseline	true	0,123 s	99,6%	0,23774 m	1,99236 m
Cand. B	true	0,334 s	96,4%	0,17756 m	2,39846 m

Berdasarkan **Tabel 4.18**, Baseline menghasilkan P95 age terendah 0,123 s sekaligus max jump paling kecil 1,99236 m. Candidate B juga menggunakan predict_to_current_time=true tetapi memiliki P95 age 0,334 s dan max jump 2,39846 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fitur prediksi hingga waktu publikasi bukan penentu tunggal freshness maupun kestabilan pose. Kinerja aktual tetap bergantung pada keseluruhan paket filter dan kualitas measurement. Continuity keluaran global kemudian dibandingkan pada **Gambar 4.17** untuk



Gambar 4.17 Kontinuitas keluaran EKF global

Pada **Gambar 4.17** memperlihatkan Candidate A tetap mendekati 100%, Baseline hanya turun sedikit pada akhir run, sedangkan Candidate B turun hingga sekitar 96,4%. Pola tersebut mendukung penggunaan continuity sebagai indikator penting selain residual posisi.

4.4 Pengujian dan Analisis Smac Hybrid-A* Planner

Pengujian planner mengikuti struktur data 4.4.1 sampai 4.4.5 pada ketiga paket. Planning time mengacu pada Persamaan (2.25), endpoint error pada Persamaan (2.26), success rate pada Persamaan (2.27), dan minimum clearance pada Persamaan (2.28). Start dan goal antar-run tidak sepenuhnya identik, sehingga path length dan clearance digunakan sebagai informasi karakteristik run, bukan dasar kausal tunggal untuk satu parameter.

4.4.1 Pengujian minimum_turning_radius

minimum_turning_radius merepresentasikan batas geometrik kelengkungan minimum yang dapat dicapai kendaraan Ackermann. Secara teoritis, radius yang lebih kecil memperluas ruang solusi dan memungkinkan belokan lebih tajam, tetapi nilai yang lebih kecil daripada kemampuan fisik kendaraan dapat menghasilkan jalur yang

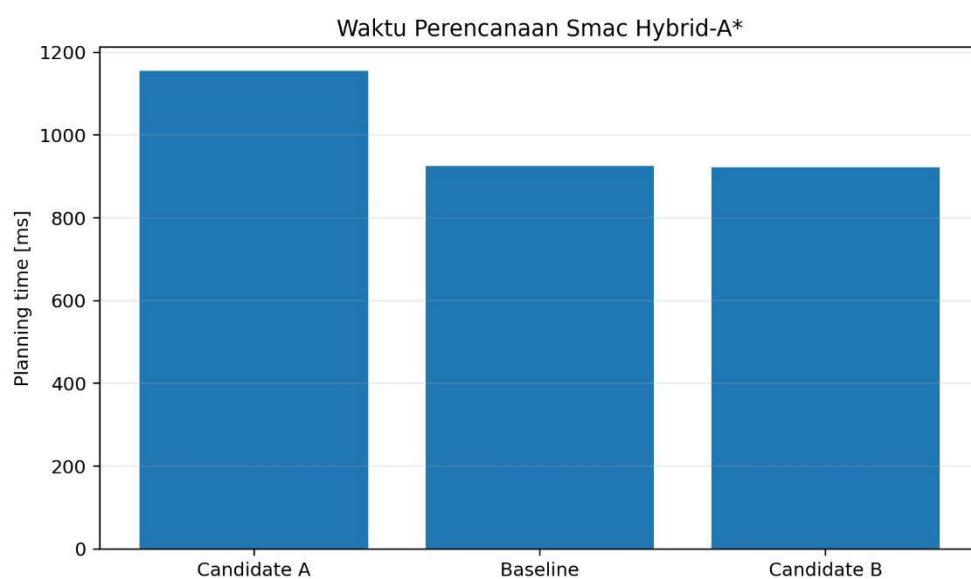
tidak feasible. Radius yang lebih besar menjaga jalur lebih konservatif tetapi dapat mengurangi kemampuan planner melewati area sempit. Pada dataset ini nilai candidate radius tidak disweep; planner diverifikasi pada constraint radius aktual sistem. Planning time, panjang jalur, endpoint error, clearance, dan status disajikan pada **Tabel 4.19**

Tabel 4.19 Hasil Planner Pada Constraint Radius Putar Yang Digunakan

Profil	tplan [ms]	Lpath [m]	eend [m]	dmin [m]	Status
Cand. A	1155 ms	17,04943 m	0,03606 m	2,26274 m	PASS
Baseline	925 ms	19,82881 m	0,04472 m	0,80000 m	PASS
Cand. B	923 ms	16,79944 m	0,10296 m	0,40000 m	PASS

Berdasarkan **Tabel 4.19**, ketiga profil menghasilkan status PASS pada constraint geometri yang digunakan. Workbook 4.4.1 tidak mencatat beberapa nilai candidate minimum_turning_radius, sehingga data tidak mendukung klaim pengaruh variasi radius secara langsung. Nilai runtime aktif 1,452435565298 m diperlakukan sebagai batas kinematika sistem. Oleh karena itu, hasil pada bagian ini merupakan verifikasi feasibility planner, bukan eksperimen untuk menentukan radius terbaik.

Waktu komputasi kemudian dibandingkan untuk melihat beban pencarian pada masing-masing paket konfigurasi. Perbandingan planning time ditampilkan pada **Gambar 4.18**.



Gambar 4.18 Planning time pada tiga profil planner

Berdasarkan **Gambar 4.18**, Candidate A membutuhkan waktu perencanaan paling lama, sedangkan Baseline dan Candidate B hampir sama. Karena start-goal dan parameter lain tidak identik, grafik ini hanya menunjukkan karakteristik beban komputasi pada run masing-masing. Planning time tidak dapat dikaitkan secara tunggal dengan minimum_turning_radius karena radius tidak divariasikan secara terkendali pada dataset.

4.4.2 Pengujian downsampling_factor

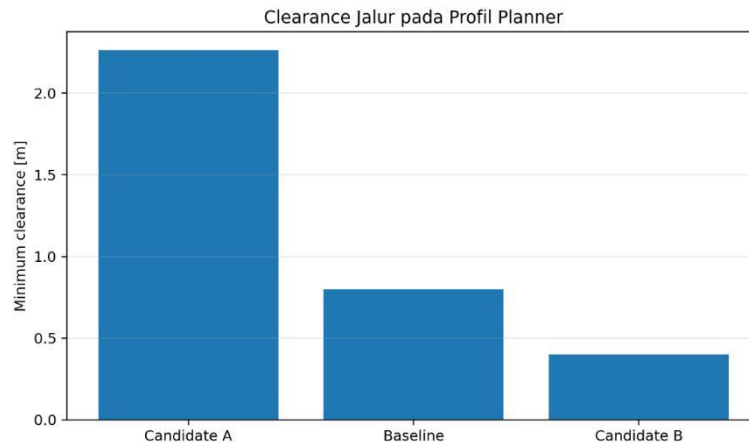
downsampling_factor menentukan apakah planner mencari jalur pada resolusi costmap asli atau pada grid yang lebih kasar. Dengan resolusi global costmap 0,1 m, factor 1 mempertahankan grid 0,1 m, sedangkan factor 2 secara efektif membuat pencarian menggunakan grid sekitar 0,2 m. Secara teoritis, grid yang lebih kasar dapat mengurangi jumlah sel pencarian dan beban komputasi, tetapi detail obstacle, clearance, serta presisi endpoint ikut berkurang. cost_penalty juga berpengaruh karena nilai yang lebih besar membuat planner lebih menghindari area dengan cost tinggi. Data ketiga profil ditampilkan pada **Tabel 4.20**.

Tabel 4. 20 Hasil Downsampling Global Costmap

Profil	Downsample	Factor	tplan [ms]	Lpath [m]	dmin [m]	Status
Cand. A	false	1	1155 ms	17,04943	2,26274	PASS
Baseline	false	1	925 ms	19,82881	0,80000	PASS
Cand. B	true	2	923 ms	16,79944	0,40000	PASS

Berdasarkan **Tabel 4.20**, Candidate B menggunakan downsampling factor 2 dengan planning time 923 ms dan minimum clearance 0,40000 m, sedangkan Baseline menggunakan factor 1 dengan planning time 925 ms dan clearance 0,80000 m. Secara teori hasil ini dapat dibaca sebagai trade-off resolusi spasial terhadap komputasi, tetapi start-goal, cost_penalty, dan parameter lain juga berbeda sehingga downsampling tidak dapat ditetapkan sebagai satu-satunya penyebab perubahan clearance atau planning time. Baseline mempertahankan factor 1 agar pencarian menggunakan grid asli 0,1 m.

Minimum clearance digunakan untuk melihat seberapa dekat jalur terhadap area berbiaya tinggi atau obstacle. Perbandingan nilai clearance antarpaket ditampilkan pada **Gambar 4.19**.



Gambar 4.19 Minimum clearance pada profil planner

Berdasarkan **Gambar 4.19**, Candidate A menghasilkan clearance paling besar, Baseline berada di tengah, dan Candidate B paling kecil pada run masing-masing. Secara teoritis, downsampling dan cost_penalty dapat memengaruhi kecenderungan jalur terhadap obstacle, tetapi nilai clearance juga dipengaruhi posisi start-goal, bentuk costmap, footprint, dan inflation layer. Karena itu, grafik digunakan untuk menilai karakteristik geometrik path, bukan mengisolasi pengaruh satu parameter.

4.4.3 Pengujian Planner Tolerance

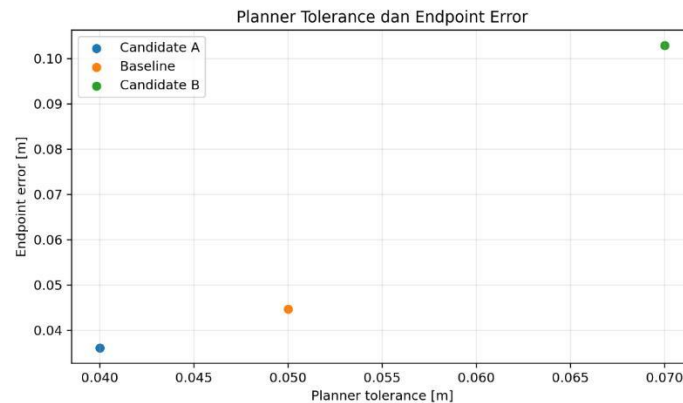
Planner tolerance menentukan kelonggaran posisi endpoint path terhadap goal yang diminta. Secara teoritis, tolerance yang lebih kecil menuntut endpoint lebih dekat ke goal tetapi dapat mempersempit ruang solusi ketika sel goal tidak feasible akibat obstacle atau diskretisasi orientasi. Tolerance yang lebih besar meningkatkan peluang menemukan solusi, tetapi endpoint yang diterima dapat berada lebih jauh dari goal nominal. Nilai tolerance dan endpoint error pada setiap profil disajikan pada **Tabel 4.21**.

Tabel 4.21 Planner Tolerance dan Endpoint Error

Profil	tol [m]	eend [m]	tplan [ms]	Lpath [m]	Status
Cand. A	0,040 m	0,03606 m	1155 ms	17,04943 m	PASS
Baseline	0,050 m	0,04472 m	925 ms	19,82881 m	PASS
Cand. B	0,070 m	0,10296 m	923 ms	16,79944 m	PASS

Berdasarkan **Tabel 4.21**, Candidate A pada tolerance 0,040 m menghasilkan endpoint error 0,03606 m, Baseline pada 0,050 m menghasilkan 0,04472 m, dan Candidate B pada 0,070 m menghasilkan 0,10296 m. Kecenderungan tersebut searah

dengan prinsip bahwa tolerance lebih longgar dapat menerima endpoint lebih jauh. Namun, karena downsampling, cost_penalty, start-goal, dan parameter lain juga berbeda, data tidak dapat digunakan sebagai regresi pengaruh tolerance secara tunggal. Hubungan tolerance dan endpoint error ditampilkan pada **Gambar 4.20** agar kecenderungan geometrik ketiga run dapat dilihat secara visual.



Gambar 4. 20 Hubungan tolerance dan endpoint error pada profil planner

Berdasarkan **Gambar 4.20**, endpoint error meningkat pada profil dengan tolerance yang lebih besar, namun secara pembacaan tetap dikatakan PASS atau berhasil dikarenakan jarak akhir mobil aktual dengan tolerance masih dinyatakan dibawah tolerasnsi sehingga sistem menyatakan keberhasilan navigasi. Secara teori pola tersebut masuk akal karena planner diberi ruang endpoint yang lebih luas. Meskipun demikian, jumlah profil terbatas dan parameter lain berubah secara bersamaan, sehingga hasil ini hanya digunakan sebagai karakteristik konfigurasi dan tidak dijadikan patokan kausal tunggal.

4.4.4 Pengujian Goal Checker dan Pencapaian Goal

Goal checker menentukan kapan misi dinyatakan selesai setelah jalur diikuti oleh controller. Pada konfigurasi ini XY goal tolerance sebesar 1,0 m menetapkan radius posisi yang diterima sebagai goal tercapai, sedangkan yaw goal tolerance sebesar π rad membuat orientasi akhir praktis tidak menjadi pembatas. tolerance posisi yang lebih besar meningkatkan robustness terhadap error lokalisasi dan kendali tetapi mengurangi presisi terminal. Nilai jarak akhir, kecepatan akhir, dan status Navigation2 disajikan pada **Tabel 4.22**.

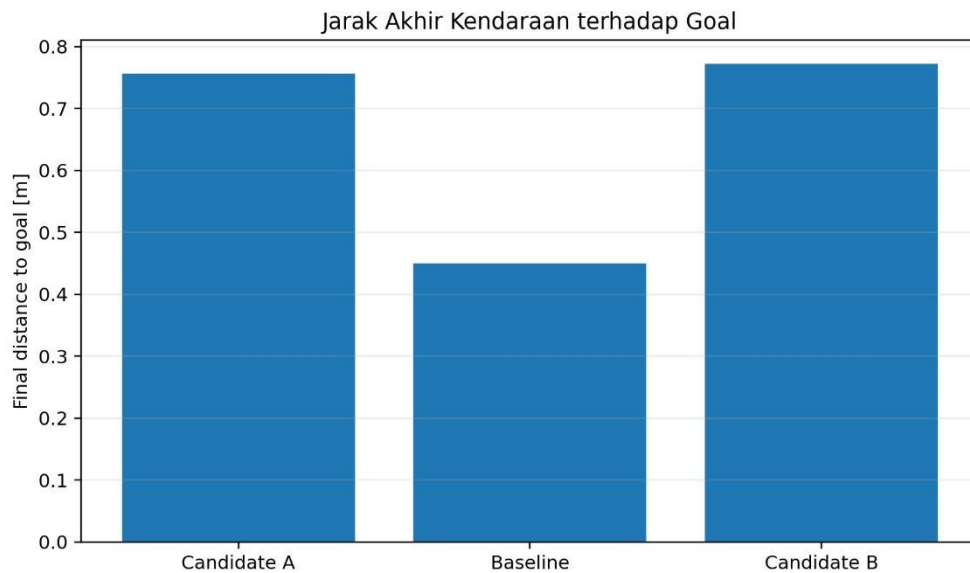
Tabel 4. 22 Hasil akhir goal checker dan Navigation2

Profil	tolXY [m]	tol ψ [rad]	dgoal [m]	vfinal [m/s]	ω final [rad/s]	Status
--------	-----------	------------------	-----------	--------------	------------------------	--------

Profil	tolXY [m]	tol ψ [rad]	dgoal [m]	vfinal [m/s]	ω final [rad/s]	Status
Cand. A	1,0 m	π rad	0,75669 m	0,58093 m/s	0,03624 rad/s	SUCCEED ED
Baseline	1,0 m	π rad	0,45047 m	0,43930 m/s	0,00000 rad/s	SUCCEED ED
Cand. B	1,0 m	π rad	0,77199 m	0,35666 m/s	0,00000 rad/s	SUCCEED ED

Berdasarkan **Tabel 4.22**, ketiga run berakhir dengan status SUCCEED ED dan final distance berada di dalam XY goal tolerance 1,0 m. Baseline menghasilkan final distance 0,45047 m, Candidate A 0,75669 m, dan Candidate B 0,77199 m. Yaw tolerance π rad mencegah kendaraan melakukan manuver tambahan hanya untuk menyamakan orientasi akhir. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa kriteria goal checker dapat dipenuhi, tetapi tidak dapat dianggap disebabkan oleh tolerance saja karena kualitas lokalisasi, jalur, dan controller ikut menentukan keberhasilan misi.

Jarak akhir kendaraan terhadap goal kemudian divisualisasikan pada **Gambar 4.21** untuk menunjukkan margin masing-masing run terhadap batas penerimaan 1,0 m.



Gambar 4. 21 Jarak akhir kendaraan terhadap goal

Berdasarkan **Gambar 4.21**, seluruh profil berhenti di dalam radius goal yang ditetapkan, dengan Baseline menghasilkan jarak akhir paling kecil pada run ini. Hasil tersebut digunakan sebagai verifikasi pencapaian goal, bukan sebagai bukti bahwa satu nilai tolerance merupakan penyebab tunggal. Secara keseluruhan, konfigurasi planner

dipilih berdasarkan kombinasi feasibility, planning time, clearance, endpoint error, dan keberhasilan misi.

4.5 Sintesis Hasil Pengujian

Setelah seluruh tahapan pengujian sensor, EKF lokal, EKF global, dan Smac Hybrid-A* dianalisis secara terpisah, diperlukan evaluasi terintegrasi untuk menentukan konfigurasi yang paling sesuai digunakan pada sistem navigasi ADV. Evaluasi tersebut tidak hanya mempertimbangkan besarnya error atau residual, tetapi juga memperhatikan keterbaruan measurement, kontinuitas estimator, kestabilan ketidakpastian state, respons koreksi posisi global, waktu perencanaan jalur, serta keberhasilan kendaraan mencapai goal. Pendekatan ini diperlukan karena setiap bagian sistem saling berhubungan. Keluaran EKF lokal digunakan untuk mempertahankan estimasi gerak pada frame odom, keluaran EKF global digunakan sebagai referensi posisi terhadap frame map, sedangkan hasil lokalisasi tersebut selanjutnya digunakan oleh Navigation2 dan Smac Hybrid-A* dalam proses pembentukan global path.

Pada estimator, nilai residual yang kecil belum secara langsung menunjukkan konfigurasi yang paling sesuai untuk operasi real-time. Estimator juga harus mampu menyediakan data yang cukup fresh dan kontinu agar transformasi koordinat serta proses perencanaan jalur menerima informasi pose secara konsisten. Oleh karena itu, RMSE digunakan untuk mengamati konsistensi estimator terhadap measurement, P95 measurement age digunakan untuk mengevaluasi keterlambatan data pada kondisi yang mewakili sebagian besar sampel, sedangkan continuity menunjukkan kemampuan estimator mempertahankan keluaran sepanjang pengujian. Pada EKF global, kestabilan koreksi posisi juga perlu dipertimbangkan karena perubahan pose global yang terlalu besar dapat memengaruhi kestabilan hubungan antara frame map dan odom.

Evaluasi planner dilakukan menggunakan planning time, endpoint error, final distance to goal, serta status akhir Navigation2. Planning time menunjukkan kebutuhan waktu komputasi untuk memperoleh global path, sedangkan endpoint error digunakan untuk melihat kesesuaian ujung jalur yang dihasilkan terhadap goal planner. Final distance to goal menunjukkan hasil aktual setelah keseluruhan proses lokalisasi, perencanaan, dan eksekusi navigasi dilakukan. Dengan demikian, konfigurasi yang dipertahankan tidak ditentukan berdasarkan satu nilai minimum, melainkan berdasarkan

kompromi antara kualitas estimasi keadaan, karakteristik real-time, kestabilan lokalisasi global, kemampuan perencanaan jalur, dan keberhasilan penyelesaian misi. Ringkasan indikator utama dari Candidate A, Baseline, dan Candidate B disajikan pada **Tabel 4.23**.

Tabel 4. 23 Ringkasan indikator utama tiga profil

Indikator	Cand. A	Baseline	Cand. B
RMSE v_x EKF lokal	0,07096 m/s	0,04154 m/s	0,03311 m/s
P95 age EKF lokal	0,167 s	0,126 s	0,330 s
Continuity EKF lokal	99,5%	99,2%	87,9%
RMSE XY EKF global	0,24051 m	0,23774 m	0,17756 m
P95 age EKF global	0,157 s	0,123 s	0,334 s
Continuity EKF global	100,0%	99,6%	96,4%
Planning time	1155 ms	925 ms	923 ms
Endpoint error	0,03606 m	0,04472 m	0,10296 m
Final distance to goal	0,75669 m	0,45047 m	0,77199 m
Nav2 result	SUCCEEDED	SUCCEEDED	SUCCEEDED

Berdasarkan **Tabel 4.23**, tidak terdapat satu profil yang menghasilkan nilai terbaik pada seluruh indikator. Candidate B menghasilkan RMSE residual EKF lokal sebesar 0,03311 m/s dan RMSE XY EKF global sebesar 0,17756 m, yang merupakan nilai residual terendah dari ketiga profil. Namun, rendahnya residual tersebut tidak diikuti oleh karakteristik temporal estimator yang lebih baik. Pada EKF lokal, Candidate B menghasilkan P95 measurement age sebesar 0,330 s dan continuity hanya 87,9%, sedangkan pada EKF global P95 age mencapai 0,334 s dengan continuity 96,4%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa estimator dapat berada lebih dekat terhadap measurement yang diterima, tetapi measurement dan keluaran estimasinya tidak selalu tersedia dengan tingkat freshness dan kontinuitas yang sama baiknya. Oleh karena itu, residual yang kecil tidak digunakan sebagai satu-satunya dasar dalam menentukan konfigurasi operasional.

Karakteristik tersebut juga dapat dikaitkan dengan paket tuning Candidate B yang lebih agresif. Pada EKF lokal, frequency dinaikkan menjadi 40 Hz, sensor_timeout diperkecil menjadi 0,20 s, nilai measurement covariance R dibuat lebih kecil, sedangkan process noise Q dinaikkan dibandingkan Baseline. Frequency 40 Hz secara teoritis menghasilkan periode estimasi sekitar 25 ms sehingga filter menjalankan siklus prediksi-koreksi lebih rapat. Akan tetapi, peningkatan frequency tidak otomatis

meningkatkan freshness apabila laju dan kestabilan measurement sumber tidak meningkat dengan proporsi yang sama. Timeout yang lebih pendek juga membuat measurement lebih cepat dinyatakan stale ketika terdapat jitter atau keterlambatan komunikasi. Sementara itu, R yang lebih kecil meningkatkan kepercayaan relatif terhadap measurement dan Q yang lebih besar meningkatkan ketidakpastian model, sehingga filter cenderung lebih mudah mengikuti koreksi measurement. Kombinasi tersebut konsisten dengan residual Candidate B yang lebih kecil, tetapi pada pengujian berlangsung bersamaan dengan peningkatan measurement age dan penurunan continuity. Karena parameter tersebut berubah secara bersamaan, hubungan ini digunakan untuk menjelaskan karakteristik paket konfigurasi dan tidak dapat dinyatakan sebagai pengaruh tunggal salah satu parameter.

Candidate A menunjukkan karakteristik yang berbeda. Continuity EKF lokal mencapai 99,5% dan EKF global 100,0%, sehingga keluaran estimator relatif konsisten tersedia selama pengujian. Akan tetapi, RMSE residual lokal sebesar 0,07096 m/s merupakan yang terbesar di antara ketiga profil, dan pengujian covariance menunjukkan mean ketidakpastian posisi lokal membesar hingga sekitar 7,151 m. Candidate A menggunakan frequency 25 Hz, timeout lokal 0,30 s, serta process noise yang lebih kecil dibandingkan Baseline. Secara teoritis, process noise yang lebih kecil membuat filter memberikan kepercayaan lebih besar terhadap model prediksi. Apabila model tidak sepenuhnya mampu menggambarkan dinamika aktual kendaraan atau measurement memiliki karakteristik yang berubah selama run, covariance state tetap dapat berkembang walaupun continuity keluaran tinggi. Oleh karena itu, continuity yang mendekati 100% pada Candidate A tidak secara langsung menunjukkan bahwa kualitas state yang dihasilkan lebih baik untuk digunakan sebagai referensi navigasi.

Baseline berada di antara kedua karakteristik tersebut. Pada EKF lokal digunakan frequency 30 Hz, atau periode estimasi sekitar 33,3 ms, dengan sensor_timeout sebesar 0,25 s. Frequency tersebut masih memberikan siklus estimasi yang cukup rapat untuk mengikuti dinamika kendaraan, sedangkan timeout 0,25 s memberikan margin terhadap jitter measurement tanpa mempertahankan data terlalu lama. Nilai measurement covariance dan process noise pada Baseline juga berada pada tingkat menengah terhadap Candidate A dan Candidate B. Konfigurasi ini membuat estimator tidak terlalu

bergantung pada model, tetapi juga tidak terlalu agresif mengikuti measurement. Selain itu, `predict_to_current_time = true` digunakan untuk memproyeksikan state hingga waktu publikasi sehingga keluaran estimator lebih sesuai dengan timestamp sistem. Kombinasi tersebut menghasilkan RMSE residual v_x sebesar 0,04154 m/s, P95 age 0,126 s, dan continuity 99,2%. Dengan demikian, residual memang tidak serendah Candidate B, tetapi estimator tetap mempertahankan keterbaruan data dan kontinuitas keluaran pada tingkat yang lebih baik.

Karakteristik yang sama terlihat pada EKF global. Baseline menggunakan frequency 30 Hz, `sensor_timeout` 0,50 s, covariance posisi GNSS yang mengikuti $hAcc^2$, $R_{GNSS} v_x = 0,0025$, $R_{COG yaw} = 0,001218$, serta $Q_x = Q_y = 0,120$. Measurement covariance posisi yang berasal dari $hAcc$ memungkinkan tingkat kepercayaan terhadap posisi GNSS mengikuti kualitas measurement aktual, sehingga GNSS dengan ketidakpastian yang lebih besar tidak diperlakukan sama dengan measurement yang lebih baik. Sementara itu, nilai Q posisi yang moderat memberikan ruang bagi estimator untuk menerima koreksi GNSS tanpa membuat state terlalu responsif terhadap perubahan measurement. Konfigurasi tersebut menghasilkan RMSE XY 0,23774 m, P95 age 0,123 s, dan continuity 99,6%. Selain itu, pengujian sebelumnya menunjukkan bahwa Baseline menghasilkan maximum position jump sebesar 1,99236 m, lebih rendah dibandingkan Candidate A dan Candidate B. Karakteristik ini penting karena keluaran EKF global digunakan dalam proses koreksi referensi global dan pembentukan hubungan map-odom; oleh sebab itu, koreksi pose yang lebih stabil lebih sesuai untuk mempertahankan konsistensi sistem koordinat selama navigasi.

Pada sisi perencanaan jalur, perbedaan planning time antara Baseline dan Candidate B relatif kecil, yaitu 925 ms dan 923 ms, sedangkan Candidate A membutuhkan 1155 ms. Candidate A menghasilkan endpoint error paling kecil sebesar 0,03606 m, sedangkan Baseline sebesar 0,04472 m dan Candidate B sebesar 0,10296 m. Akan tetapi, endpoint error menunjukkan kedekatan ujung global path terhadap target planner dan belum merepresentasikan hasil akhir keseluruhan navigasi. Setelah global path dieksekusi oleh sistem Navigation2, Baseline menghasilkan final distance to goal sebesar 0,45047 m, lebih kecil dibandingkan Candidate A sebesar 0,75669 m dan Candidate B sebesar 0,77199 m. Seluruh profil tetap menghasilkan status

SUCCEEDED karena posisi akhir masih berada dalam XY goal tolerance sistem. Dengan demikian, pada konfigurasi Baseline, waktu komputasi planner tetap rendah dan jalur yang dihasilkan dapat digunakan oleh sistem navigasi hingga kendaraan mencapai area goal dengan jarak akhir yang paling kecil pada dataset pengujian.

Secara terintegrasi, pemilihan Baseline tidak didasarkan pada dominasi satu indikator, melainkan pada kesesuaian karakteristik seluruh rantai navigasi. EKF lokal Baseline memberikan estimasi gerak yang cukup responsif, fresh, dan kontinu; EKF global mempertahankan koreksi posisi dengan measurement age rendah, continuity tinggi, dan lonjakan posisi yang relatif lebih kecil; sedangkan global planner mampu menghasilkan jalur dalam waktu komputasi sekitar satu detik dan membawa sistem hingga memenuhi kriteria goal. Kombinasi tersebut lebih sesuai untuk sistem real-time dibandingkan konfigurasi yang hanya menghasilkan residual paling kecil tetapi mengalami penurunan continuity atau peningkatan measurement age. Oleh karena itu, Baseline dipertahankan sebagai konfigurasi operasional karena memberikan kompromi teknis antara akurasi relatif terhadap measurement, keterbaruan data, kontinuitas estimator, kestabilan uncertainty dan koreksi global, beban komputasi planner, serta keberhasilan penyelesaian misi.

Meskipun demikian, hasil pada **Tabel 4.23** tetap harus dipahami sebagai perbandingan paket konfigurasi. Frequency, sensor_timeout, measurement covariance, process noise covariance, predict_to_current_time, serta beberapa konfigurasi planner berubah secara bersamaan antarprofil. Penetapan Baseline pada penelitian ini berlaku terhadap kombinasi parameter dan kondisi pengujian yang digunakan, sehingga pengujian satu faktor dengan parameter lain dipertahankan tetap diperlukan apabila pengaruh individual setiap parameter ingin ditentukan secara kuantitatif.