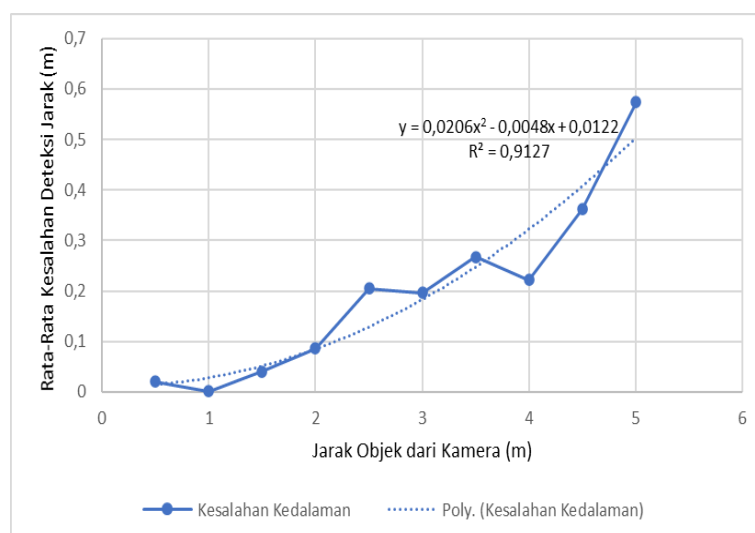


## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Performansi Sensor Kamera

Pada bagian ini dibahas mengenai percobaan yang dilakukan untuk melihat performansi pengukuran kedalaman dari kamera yang digunakan, yaitu kamera Intel RealSense D435. Nilai kesalahan deteksi jarak dengan kamera terdapat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Rata-rata nilai kesalahan deteksi jarak dengan kamera

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa kesalahan deteksi jarak akan semakin meningkat seiring dengan semakin jauhnya jarak objek dari kamera. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (seperti cahaya matahari) dan temperatur kamera yang semakin meningkat seiring dengan semakin lamanya pemakaian kamera. Kenaikan temperatur kamera dapat mengakibatkan hasil pengukuran jarak semakin tidak akurat.

Kemudian, parameter kalibrasi dari kamera harus diketahui karena diperlukan dalam algoritma ORB-SLAM2 untuk menentukan posisi dan orientasi dari kamera secara akurat. Parameter kalibrasi kamera didapatkan dari informasi dari ROS Topics `/camera/color/camera_info` dan `/camera/extrinsics/depth_to_color` dari

RealSense. Parameter dari kamera Intel RealSense D435 yang digunakan untuk ORB-SLAM2 terdapat pada Tabel 4.1.

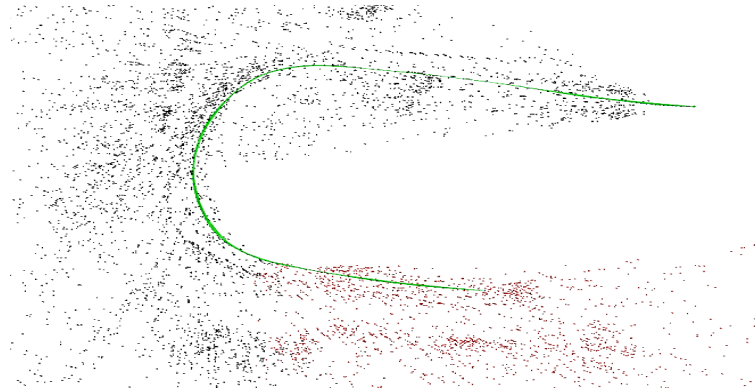
**Tabel 4.1.** Parameter kalibrasi kamera

Parameter Kamera	Nilai
Panjang focal $f_x$ (Camera_ $f_x$ )	614,686
Panjang focal $f_y$ (Camera_ $f_y$ )	614,147
Titik tengah proyeksi $c_x$ (Camera_ $c_x$ )	316,497
Titik tengah proyeksi $c_y$ (Camera_ $c_y$ )	243,045
Baseline	9,285

#### 4.2. Pemetaan Lingkungan dengan ORB-SLAM2

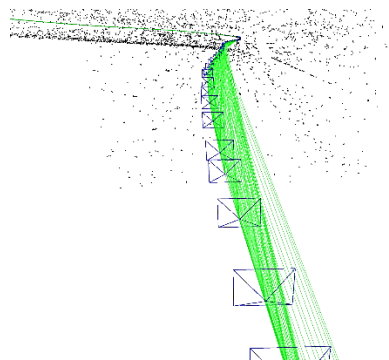
Sebelum digunakan untuk estimasi posisi kendaraan, dilakukan pemetaan lingkungan pengujian. Pemetaan dilakukan setiap pengambilan data sambil menjalankan kendaraan. Keluaran dari proses ini adalah berupa peta lingkungan yang terdiri atas *keypoint* dari lingkungan sekitar dan estimasi trajektori yang dilalui oleh kendaraan selama melakukan pemetaan dalam koordinat ORB-SLAM2.

Pengambilan data dilakukan pada tiga tempat pada Politeknik Negeri Bandung. Lokasi pertama adalah tempat terbuka berukuran sekitar 10 m x 25 m, lokasi kedua adalah tempat terbuka berukuran sekitar 35 m x 20 m, dan lokasi ketiga adalah di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung yang merupakan lingkungan tertutup. Pada Gambar 4.2 terdapat visualisasi dari hasil pemetaan yang dilakukan. Visualisasi dilakukan dengan Pangolin, sebuah *library* untuk mengelola tampilan dan interaksi OpenGL dan untuk mengabstraksi masukan video.



**Gambar 4.2.** Visualisasi hasil pemetaan pada lokasi terbuka berukuran 35 m x 20 m

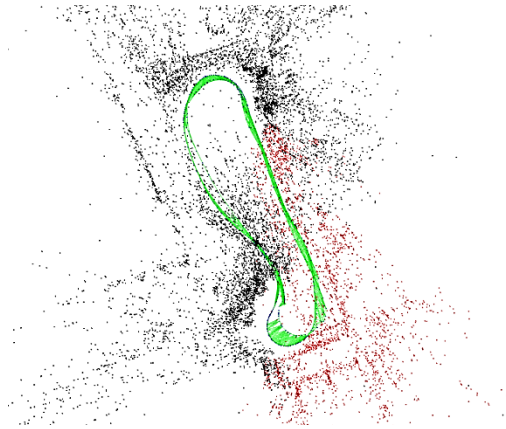
Gambar di atas adalah hasil pemetaan pada lokasi terbuka berukuran sekitar 35 m x 20 m. Terlihat poin berwarna hitam (poin lama) dan poin merah (poin terbaru) dari lingkungan yang dilewati kendaraan. Jalur berwarna hijau yang memvisualisasikan jalur yang dilewati kendaraan selama pemetaan adalah grafik kovisibilitas (garis yang menghubungkan antar *keyframe-keyframe* untuk memberikan informasi saat pembuatan poin-poin baru) dan *spanning tree* (garis yang menghubungkan antar *keyframe* yang paling banyak memiliki poin observasi yang sama). Pada Gambar 4.3 terdapat visualisasi grafik kovisibilitas dan *spanning tree* apabila hasil pemetaan diamati dalam jarak dekat. Kotak-kotak biru yang terdapat pada Gambar 4.3. adalah *keyframe*.



**Gambar 4.3.** Grafik kovisibilitas dan *spanning tree* dari jarak dekat.

Dalam melakukan pemetaan pada lokasi terbuka berukuran 35 m x 20 m ini, cukup dilakukan dalam sekali jalan, sebab proses penentuan posisi dengan ORB-SLAM2 setelah dilakukan pemetaan sudah baik dan tidak terjadi *track loss*. Poin-poin pada peta dapat terdeteksi dengan baik.

Kemudian, visualisasi hasil pemetaan yang dilakukan pada lokasi terbuka berukuran 10 m x 25 m diperlihatkan pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4.** Visualisasi hasil pemetaan pada lokasi terbuka berukuran 10 m x 25 m

Dalam melakukan pemetaan pada lokasi terbuka berukuran 10 m x 25 m ini dibutuhkan pemetaan sebanyak 3-4 putaran, sebab dalam proses *tracking* posisi kendaraan setelah dilakukan pemetaan, ketika berbelok untuk memutar, kerap terjadi *track loss*, dimana ORB-SLAM2 gagal mengestimasi posisi kendaraan karena poin terdapat pada peta tidak dapat terdeteksi. Gagalnya pendeteksian poin disebabkan oleh lokasi yang lebih sempit untuk kendaraan memutar dibandingkan dengan lokasi yang berukuran 35 m x 20 m. Kemudian, lokasi ini lebih kosong dan tidak rindang dibandingkan lokasi yang sebelumnya seperti yang terdapat pada Gambar 4.5, sehingga intensitas cahaya matahari yang lebih kerap berubah-ubah mempengaruhi pendeteksian poin yang sebelumnya sudah dipetakan. Oleh karena itu, pemetaan sebanyak 3-4 putaran dilakukan untuk memperbanyak poin sehingga kejadian *track loss* dapat diminimasi. Kemampuan *loop closing* dari ORB-SLAM2 dimanfaatkan untuk menghasilkan peta yang semakin akurat dengan semakin banyaknya putaran yang dilakukan.



(a)



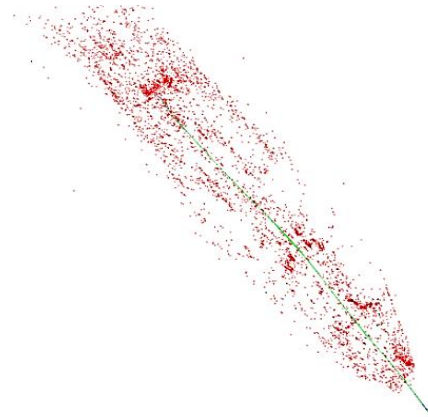
(b)

**Gambar 4.5.** Lokasi pengambilan data berukuran: (a) 10 m x 25 m; (b) 35 m x 20 m.

Kemudian, untuk hasil pemetaan pada lingkungan tertutup, yaitu di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung, terdapat pada Gambar 4.6.



(a)



(b)

**Gambar 4.6.** (a) Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Bandung; (b) Visualisasi hasil pemetaan

Untuk pemetaan pada lokasi tertutup ini hanya dilakukan sebanyak satu kali saja, sebab poin yang dihasilkan sudah cukup banyak dan penentuan posisi kendaraan dengan ORB-SLAM2 setelah dilakukan pemetaan sudah cukup baik.

Hasil pemetaan ini kemudian dapat digunakan untuk estimasi posisi kendaraan. Setelah dilakukan pemetaan, dilakukan transformasi koordinat ORB-SLAM2 agar sesuai dengan koordinat global. Setelah dilakukan transformasi koordinat, posisi kendaraan otonom dapat diestimasi dengan ORB-SLAM2 berdasarkan peta yang telah dibuat sebelumnya.

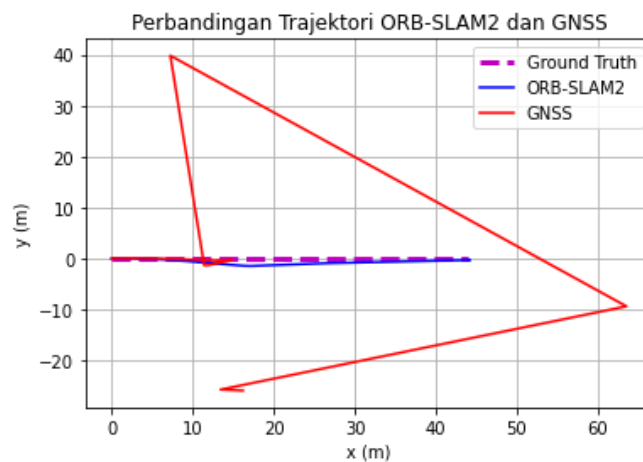
#### 4.3. Perbandingan Performansi ORB-SLAM2 dengan GNSS pada Lingkungan Tertutup

Untuk melihat keunggulan dan kemampuan ORB-SLAM2 untuk menggantikan peran GNSS, dilakukan perbandingan performansi ORB-SLAM2 dengan GNSS ketika melewati lingkungan yang tertutup. Kendaraan berjalan lurus di bawah atap Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung. Dokumentasi proses pengambilan data tersebut terdapat pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7.** Kendaraan sebelum melewati Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung.

Perbandingan trajektori yang diestimasi oleh ORB-SLAM2 dan GNSS terdapat pada Gambar 4.8. Data GNSS kerap hilang setelah melewati bawah atap dan hasil penentuan posisi menjadi tidak akurat. ORB-SLAM2 dapat mengestimasi trajektori dari kendaraan. ORB-SLAM2 dapat menggantikan GNSS untuk lokalisasi pada lingkungan tertutup.

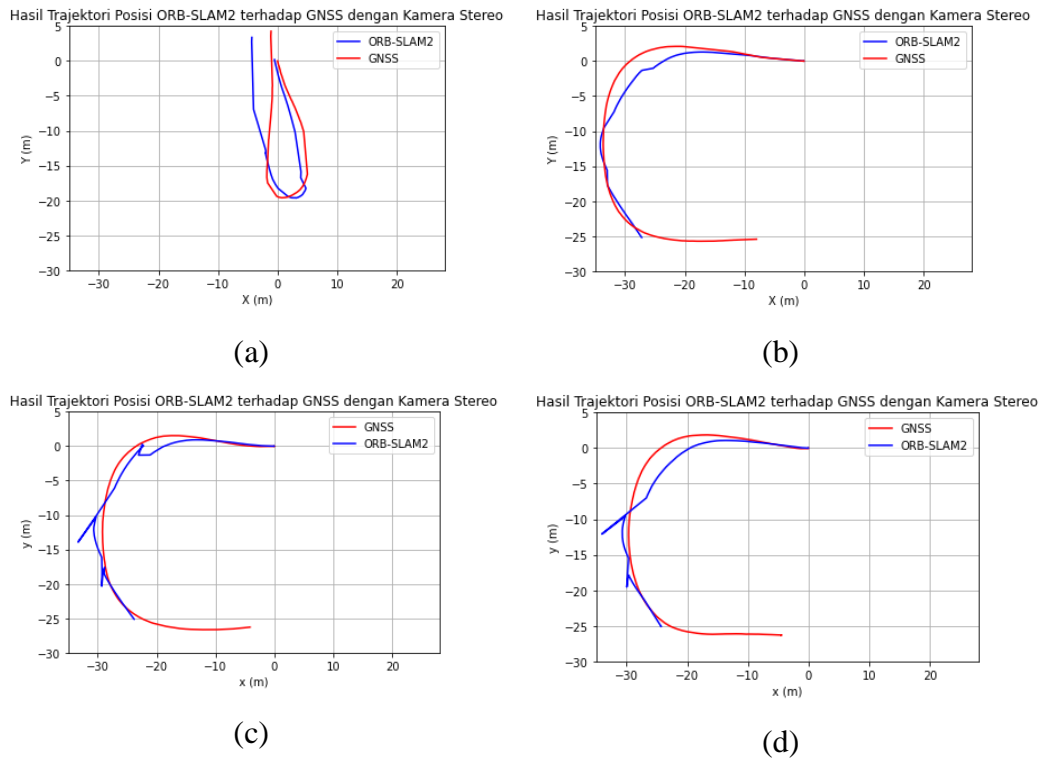


**Gambar 4.8.** Estimasi posisi kendaraan dari ORB-SLAM2 dan GNSS pada lingkungan tertutup.

#### 4.4. Performansi ORB-SLAM2 Berdasarkan Perbedaan Mode Kamera

##### 4.4.1. Performansi ORB-SLAM2 dengan Mode Kamera Stereo

Pada bagian ini dibahas mengenai pengujian performansi ORB-SLAM2 dengan mode kamera stereo. Dalam mode kamera stereo, *frame rate* minimum untuk mendapatkan hasil yang stabil adalah 60 FPS, oleh karena itu 60 FPS adalah *frame rate* yang digunakan dalam pengujian. Percobaan dilakukan secara *real time* dan dimulai dengan pembuatan peta lingkungan terlebih dahulu sebelum lokalisasi diuji. Percobaan dilakukan pada lokasi terbuka. GNSS dianggap sebagai *ground truth* sebab GNSS cukup akurat apabila digunakan pada lingkungan terbuka. Pengambilan data dilakukan sebanyak empat kali. Pada Gambar 4.9, diperlihatkan perbandingan hasil penentuan posisi dengan ORB-SLAM2 terhadap GNSS.



**Gambar 4.9.** Perbandingan hasil penentuan posisi kendaraan dengan ORB-SLAM2 dengan mode kamera stereo terhadap GNSS pada: (a) percobaan 1; (b) percobaan 2; (c) percobaan 3; (d) percobaan 4.

Dari data posisi kendaraan yang ditentukan oleh ORB-SLAM2, dapat dikalkulasi kecepatan kendaraan dari perubahan posisi kendaraan terhadap waktu. Kecepatan kendaraan berdasarkan ORB-SLAM2 ini dibandingkan dengan kecepatan kendaraan berdasarkan GNSS yang juga dihitung dari perubahan posisi terhadap

waktu. Pada Lampiran B.1 terdapat perbandingan hasil penentuan kecepatan kendaraan pada sumbu-x dan sumbu-y oleh ORB-SLAM2 apabila dibandingkan dengan penentuan kecepatan oleh GNSS.

Selain posisi dan kecepatan kendaraan, orientasi berdasarkan pengukuran ORB-SLAM2 turut dievaluasi. Orientasi kendaraan diperoleh dari perpindahan kendaraan pada sumbu-x dan sumbu-y. Orientasi yang dihasilkan oleh ORB-SLAM2 dibandingkan dengan orientasi kendaraan berdasarkan pengukuran GNSS, seperti yang terlampir pada Lampiran B.1.

Dari keempat percobaan yang dilakukan, kemudian dihitung kesalahan dari estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi dengan ORB-SLAM2. Hasil perhitungan kesalahan terdapat pada Tabel 4.2.

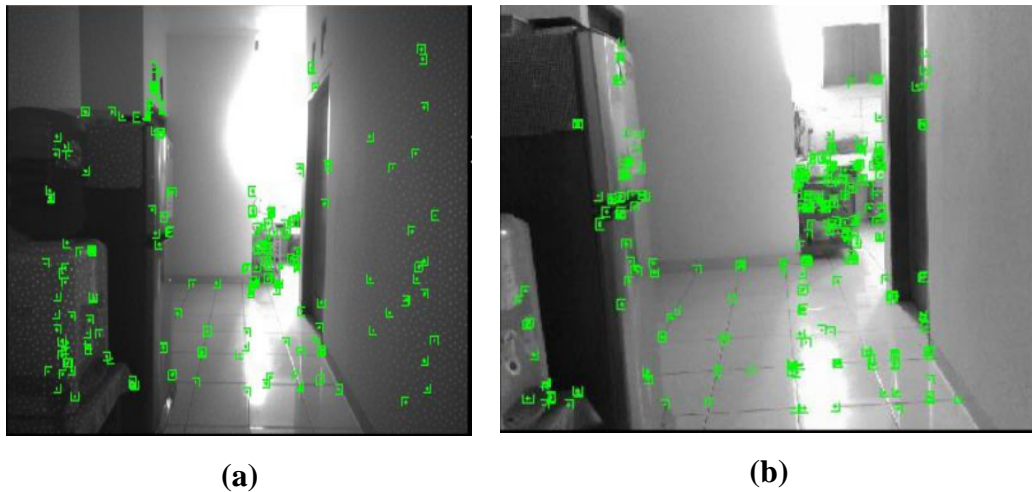
**Tabel 4.2.** Kesalahan estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi ORB-SLAM2 dengan mode kamera stereo

	Posisi (m)		Kecepatan (m/s)		Orientasi (rad)	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Data 1	1,709	1,271	0,231	0,114	0,750	0,990
Data 2	6,036	5,381	1,639	0,916	1,108	0,781
Data 3	7,523	7,297	1,298	0,848	0,852	0,825
Data 4	3,087	1,993	0,575	0,376	2,929	1,781
<b>Rata-Rata</b>	<b>4,589</b>	<b>3,986</b>	<b>0,936</b>	<b>0,564</b>	<b>1,410</b>	<b>1,094</b>

Dari disimpulkan bahwa estimasi dengan ORB-SLAM2 dengan kamera stereo memberikan hasil yang kurang baik dengan kesalahan yang cukup besar dalam estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi kendaraan. Pada estimasi posisi, RMSE dan MAE yang cukup besar disebabkan oleh kegagalan ORB-SLAM2 dalam mengestimasi posisi kendaraan setelah kendaraan berbelok atau melewati jalan lurus dengan sedikit objek di depan kendaraan. Pada Gambar 4.9.a, setelah melewati trajektori yang berbelok dan kendaraan hanya berjalan lurus, terdapat kesalahan dalam penentuan orientasi dan posisi kendaraan sehingga kendaraan tidak berjalan lurus. Pada Gambar 4.9.b, Gambar 4.9.c, dan Gambar 4.9.d, terlihat ORB-SLAM2 dengan mode kamera stereo menghasilkan estimasi penentuan posisi yang kurang baik ketika melewati jalur yang melengkung. Estimasi penentuan



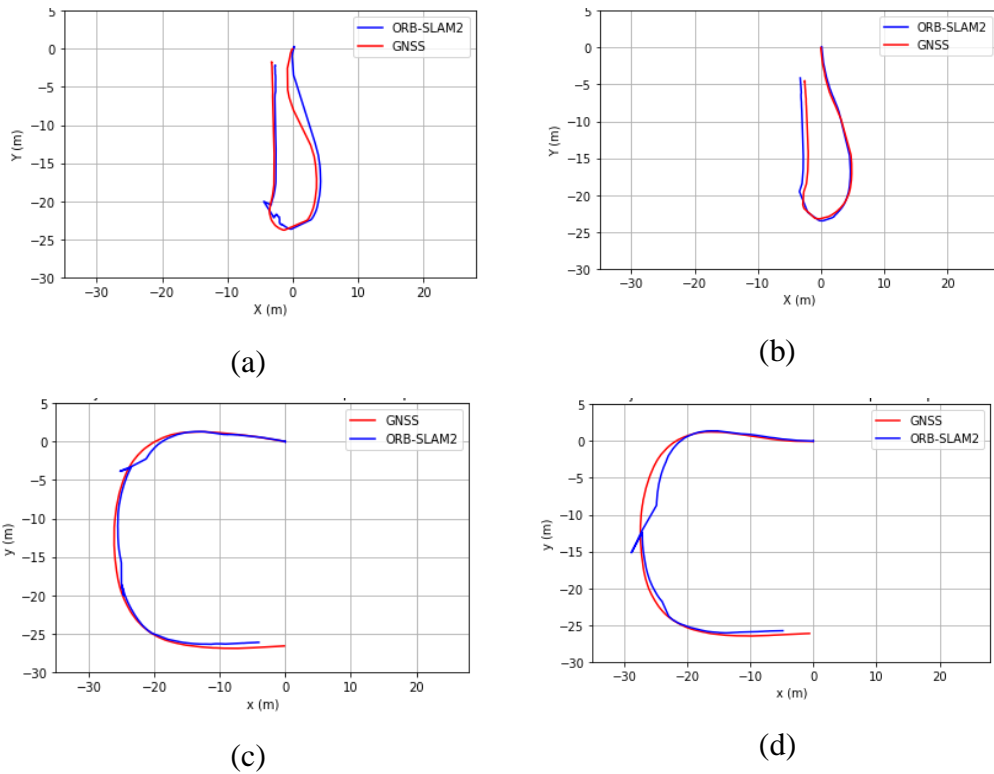
posisi pada jalan lurus di akhir trajektori dengan ORB-SLAM2 juga gagal dan memberikan hasil yang lebih pendek dibandingkan yang seharusnya. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh informasi citra dari masing-masing kamera stereo *infrared* yang kurang baik, sehingga ekstraksi ORB yang dilakukan pada setiap kamera memberikan hasil yang kurang baik dan koordinat *keypoint* yang kurang akurat. Kamera *infrared* adalah kamera yang mendeteksi energi *infrared* dari objek. Hasil citra menghasilkan bintik-bintik yang merupakan pola yang dihasilkan dari penangkapan citra *infrared*. Bintik-bintik tersebut malah disalahpahami sebagai sudut objek dan akhirnya terekstraksi menjadi fitur. Padahal ekstraksi dan deskripsi dari fitur sebagai pengenalan lokasi akan lebih baik apabila dilakukan pada sudut objek. Pada Gambar 4.10 ditunjukkan perbandingan antara citra hasil mode kamera stereo pada Gambar 4.10 (a) dan citra hasil mode RGB pada Gambar 4.10 (b). Dapat terlihat dari Gambar 4.10 (a) terdapat bagian dari tembok karena adanya bintik-bintik yang terdeteksi sebagai fitur padahal tembok bukan sudut objek.



**Gambar 4.10.** Citra yang dihasilkan dari: (a) mode stereo; (b) mode RGB-D

#### 4.4.2. Performansi ORB-SLAM2 dengan Mode Kamera RGB-D

Setelah dilakukan pengujian performansi ORB-SLAM2 dengan mode kamera stereo, dilakukan pengujian performansi dengan mode RGB-D. *Frame rate* dari kamera RGB-D yang digunakan pada percobaan kali ini adalah 30 FPS. Percobaan dilakukan sebanyak empat kali dengan hasil pengukuran GNSS sebagai *ground truth*. Percobaan dilakukan pada lokasi terbuka. Pada Gambar 4.11, diperlihatkan perbandingan hasil penentuan posisi dengan ORB-SLAM2 terhadap GNSS.



**Gambar 4.11.** Perbandingan hasil penentuan posisi kendaraan dengan ORB-SLAM2 dengan mode kamera RGB-D terhadap GNSS pada: (a) percobaan 1; (b) percobaan 2; (c) percobaan 3; (d) percobaan 4.

Kemudian hasil estimasi kecepatan dan orientasi oleh ORB-SLAM2 dievaluasi. Pada Lampiran B.2 terdapat perbandingan hasil penentuan kecepatan kendaraan pada sumbu-x, kecepatan kendaraan pada sumbu-y, dan orientasi oleh ORB-SLAM2 apabila dibandingkan dengan penentuan kecepatan oleh GNSS.

Kesalahan dari estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi dengan ORB-SLAM2 dihitung. Hasil perhitungan kesalahan terlampir pada Tabel 4.3.

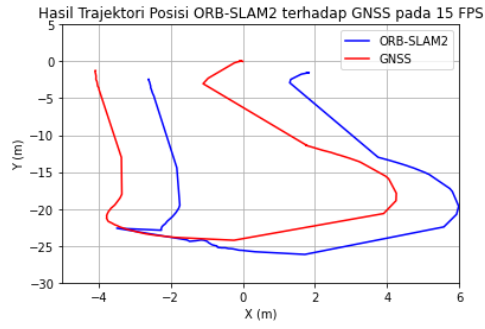
**Tabel 4.3.** Kesalahan estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi ORB-SLAM2 dengan mode kamera RGB-D

	Posisi (m)		Kecepatan (m/s)		Orientasi (rad)	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Data 1	0,484	0,336	0,582	0,146	1,777	0,920
Data 2	0,448	0,365	0,297	0,131	0,369	0,146
Data 3	0,942	0,644	0,988	0,562	0,060	0,034
Data 4	2,400	2,027	0,509	0,447	0,058	0,037
<b>Rata-rata</b>	<b>1,069</b>	<b>0,843</b>	<b>0,594</b>	<b>0,321</b>	<b>0,566</b>	<b>0,284</b>

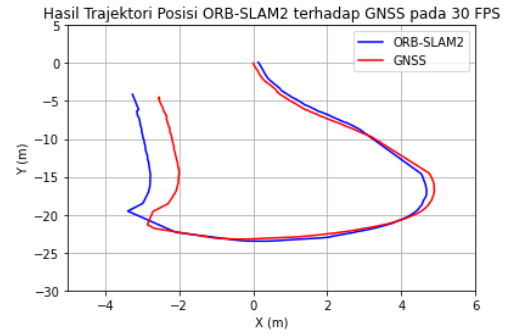
Performansi ORB-SLAM2 dengan mode kamera RGB-D lebih baik dibandingkan dengan mode kamera stereo. Estimasi orientasi dari ORB-SLAM2 dengan mode kamera RGB-D jauh lebih baik, dapat dilihat estimasi posisi kendaraan menjadi lebih sesuai dibandingkan dengan ORB-SLAM2 dengan mode kamera stereo ketika melewati trajektori yang berbelok. Pada jalan lurus di akhir trajektori pada Gambar 4.11, ORB-SLAM2 dengan mode kamera RGB-D memberikan hasil yang mendekati dengan hasil trajektori dari GNSS. Cara mendapatkan informasi koordinat *keypoint* mode RGB-D dan stereo berbeda, dimana pada mode RGB-D, koordinat *keypoint* ( $u_L$ ,  $v_L$ ) didapatkan dari citra RGB dan informasi koordinat  $u_R$  didapatkan dengan informasi kedalaman. Penentuan koordinat *keypoint* dengan informasi dari citra RGB dan kedalaman lebih dapat diandalkan dibandingkan dengan apabila hanya menggunakan informasi dari masing-masing kamera *infrared*. Selain itu, informasi kedalaman yang didapatkan secara langsung dari kamera memungkinkan koordinat yang dihasilkan oleh ORB-SLAM2 memiliki hasil yang lebih mirip dengan pengukuran di dunia nyata.

#### **4.5. Performansi ORB-SLAM2 Berdasarkan Perbedaan *Frame Rate* Kamera**

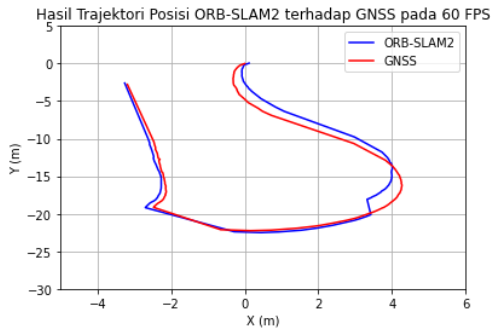
Dilakukan pengujian performansi ORB-SLAM2 berdasarkan perbedaan *frame rate* kamera. Percobaan dilakukan secara *real time*, pada lokasi terbuka, dan dimulai dengan pembuatan peta lingkungan terlebih dahulu sebelum lokalisasi diuji. Pengambilan data dilakukan sebanyak 3-4 kali dengan GNSS sebagai *ground truth*. *Frame rate* kamera yang diuji adalah sebesar 15 FPS, 30 FPS, 60 FPS, dan 90 FPS. Karena dari hasil percobaan sebelumnya performansi ORB-SLAM2 dengan mode kamera RGB-D lebih baik dibandingkan dengan mode stereo, maka percobaan kali ini dilakukan dengan mode kamera RGB-D. Pada Gambar 4.12, diperlihatkan perbandingan hasil penentuan posisi dengan ORB-SLAM2 dengan besar *frame rate* kamera yang diubah-ubah terhadap GNSS pada salah satu percobaan yang dilakukan.



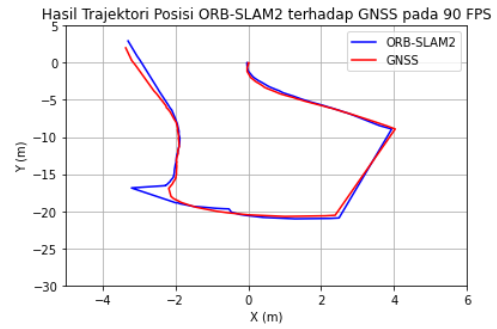
(a)



(b)



(c)

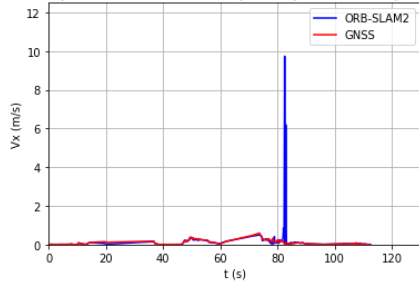


(d)

**Gambar 4.12.** Perbandingan hasil penentuan posisi kendaraan dengan ORB-SLAM2 terhadap GNSS dengan: (a) 15 FPS; (b) 30 FPS; (c) 60 FPS; (d) 90 FPS.

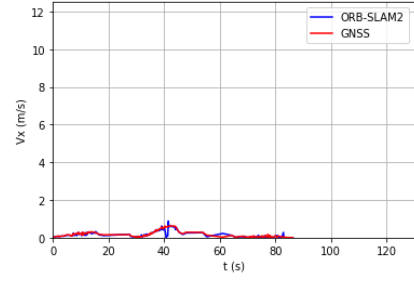
Kemudian hasil estimasi kecepatan oleh ORB-SLAM2 pada percobaan tersebut dievaluasi. Pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 diperlihatkan perbandingan hasil penentuan kecepatan kendaraan pada sumbu-x dan sumbu-y oleh ORB-SLAM2 dengan *frame rate* yang diubah-ubah terhadap hasil pengukuran kecepatan GNSS.

Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu x pada 15 FPS



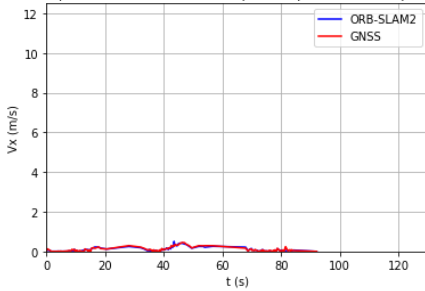
(a)

Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu x pada 30 FPS



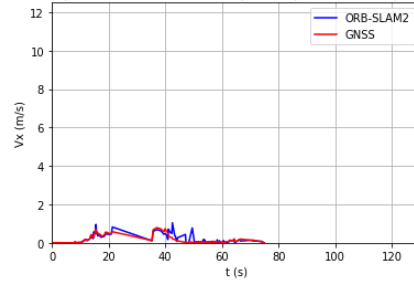
(b)

Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu x pada 60 FPS



(c)

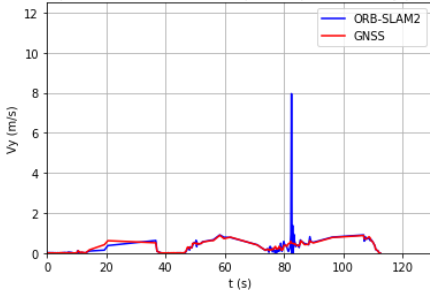
Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu x pada 90 FPS



(d)

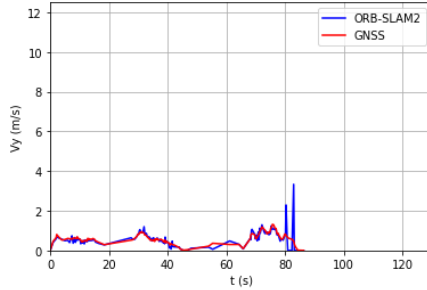
**Gambar 4.13.** Perbandingan hasil penentuan kecepatan kendaraan pada sumbu-x dengan ORB-SLAM2 terhadap GNSS dengan: (a) 15 FPS; (b) 30 FPS; (c) 60 FPS; (d) 90 FPS

Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu y pada 15 FPS



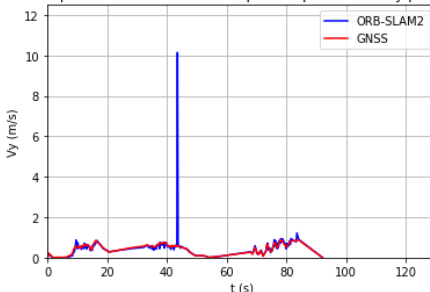
(a)

Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu y pada 30 FPS



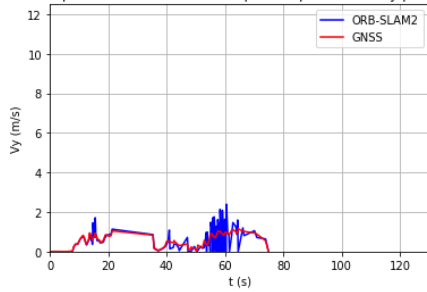
(b)

Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu y pada 60 FPS



(c)

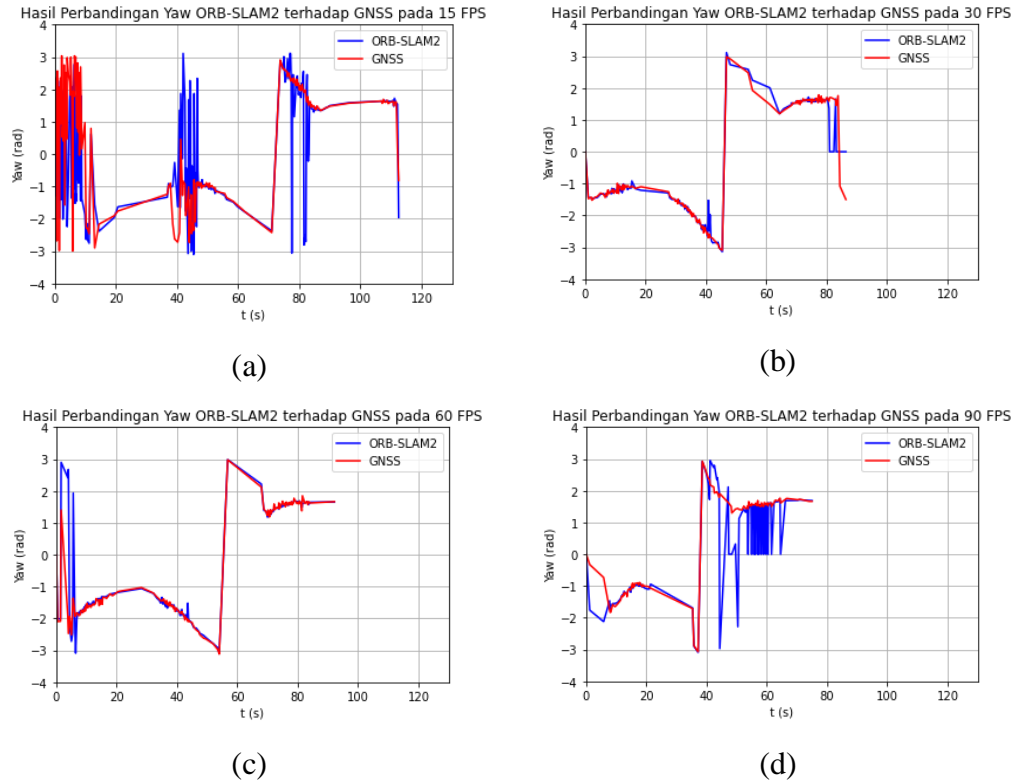
Hasil Kecepatan ORB-SLAM2 terhadap GNSS pada Sumbu y pada 90 FPS



(d)

**Gambar 4.14.** Perbandingan hasil penentuan kecepatan kendaraan pada sumbu-y dengan ORB-SLAM2 terhadap GNSS dengan: (a) 15 FPS; (b) 30 FPS; (c) 60 FPS; (d) 90 FPS

Orientasi yang dihasilkan oleh ORB-SLAM2 dibandingkan dengan orientasi kendaraan berdasarkan pengukuran GNSS. Perbandingan hasil orientasi dengan *frame rate* kamera yang diubah-ubah dapat dilihat pada Gambar 4.15.



**Gambar 4.15.** Perbandingan hasil penentuan orientasi kendaraan dengan ORB-SLAM2 terhadap GNSS dengan: (a) 15 FPS; (b) 30 FPS; (c) 60 FPS; (d) 90 FPS

Untuk menarik kesimpulan, percobaan dilakukan beberapa kali. Hasil pengulangan pengujian terdapat pada Lampiran C. Kesalahan dari estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi dengan ORB-SLAM2 dari seluruh percobaan dikalkulasi dan dicari rata-ratanya. Hasil perhitungan rata-rata kesalahan terlampir pada Tabel 4.4.

Dari perbandingan hasil kesalahan estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi kendaraan dengan *frame rate* kamera yang berbeda-beda, didapatkan rata-rata kesalahan estimasi posisi akan semakin rendah apabila *frame rate* kamera semakin tinggi. Dengan semakin tingginya *frame rate* kamera, citra yang masuk untuk diolah dengan ORB-SLAM2 adalah citra yang paling terbaru sehingga dapat meningkatkan keakuratan penentuan posisi. Namun, estimasi posisi dan kecepatan kendaraan yang paling baik didapatkan ketika *frame rate* kamera 60 FPS, bukan 90 FPS. Hal ini diduga karena *frame rate* maksimum dari kamera RGB dari kamera

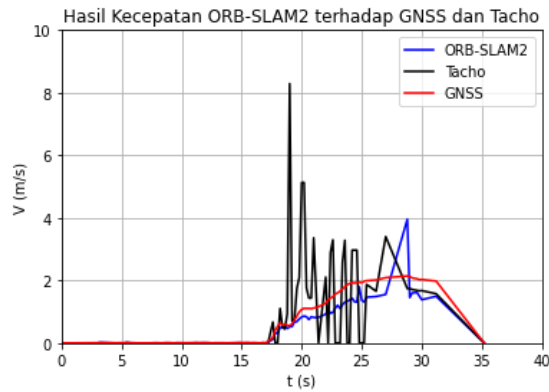
Intel RealSense D435 adalah  $< 90$  FPS. Ketika *frame rate* dari *depth stream* dan kamera RGB pada kamera Intel RealSense D435 diatur sebesar 90 FPS, *frame rate* dari kamera RGB Intel RealSense D435 akan otomatis turun sehingga yang *frame rate*-nya sebesar 90 FPS hanyalah *depth stream* saja. Perbedaan *frame rate* antara *depth stream* dan kamera RGB ini menyebabkan performansi ORB-SLAM2 kurang optimal, sehingga performansi paling baik didapatkan dengan *frame rate* 60 FPS.

**Tabel 4.4.** Perbandingan kesalahan rata-rata estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi ORB-SLAM2 dengan *frame rate* kamera 15 FPS, 30 FPS, 60 FPS, dan 90 FPS terhadap GNSS.

		FPS			
		15	30	60	90
Posisi (m)	RMSE	1,443	1,069	0,903	0,861
	MAE	1,132	0,843	0,582	0,594
Kecepatan (m/s)	RMSE	1,334	0,594	0,537	0,391
	MAE	0,400	0,321	0,290	0,314
Yaw (rad)	RMSE	1,603	0,566	1,661	1,430
	MAE	0,773	0,284	0,745	0,672

#### 4.6. Performansi Hasil Pengukuran Kecepatan dengan ORB-SLAM2

Hasil estimasi kecepatan kendaraan dengan ORB-SLAM2 dibandingkan dengan hasil estimasi kecepatan dengan takometer internal pada kendaraan. Takometer yang digunakan untuk dibandingkan dengan ORB-SLAM2 sebelumnya dikalibrasi agar sesuai dengan hasil estimasi kecepatan kendaraan menurut GNSS. Oleh karena itu, hasil estimasi kecepatan dengan ORB-SLAM2 dan takometer dibandingkan dengan hasil estimasi kecepatan menurut GNSS. Pada Gambar 4.16 terlihat hasil perbandingan estimasi kecepatan menurut ORB-SLAM2 dan takometer terhadap GNSS.



**Gambar 4.16** Perbandingan hasil estimasi kecepatan kendaraan dengan ORB-SLAM2, takometer, dan GNSS.

Percobaan untuk membandingkan performansi estimasi kecepatan oleh ORB-SLAM2 dengan takometer dilakukan sebanyak tiga kali. Untuk grafik estimasi kecepatan untuk percobaan kedua dan ketiga terlampir pada Lampiran D. Kesalahan hasil estimasi kecepatan dengan ORB-SLAM2 dan takometer terhadap GNSS dihitung seperti yang terlihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5.** Perbandingan kesalahan estimasi kecepatan kendaraan dengan ORB-SLAM2, takometer, dan GNSS.

		Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Rata-Rata
ORB-SLAM2 & GNSS ( <i>ground truth</i> )	RMSE (m/s)	0,354	0,590	0,225	<b>0,390</b>
	MAE (m/s)	0,211	0,466	0,158	<b>0,278</b>
Takometer & GNSS ( <i>ground truth</i> )	RMSE (m/s)	1,295	1,602	0,226	<b>1,041</b>
	MAE (m/s)	0,635	0,858	0,159	<b>0,551</b>
ORB-SLAM2 & Takometer ( <i>ground truth</i> )	RMSE (m/s)	1,349	1,900	0,225	<b>1,158</b>
	MAE (m/s)	0,668	1,072	0,126	<b>0,622</b>

Pada Gambar 4.16, terlihat takometer kadang menghasilkan estimasi kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan yang seharusnya yang terlihat seperti puncak, sedangkan GNSS dan ORB-SLAM2 tidak mengestimasi kecepatan kendaraan



sebesar itu. Kemudian, dari hasil perbandingan kesalahan estimasi kecepatan kendaraan dengan ORB-SLAM2 dan takometer pada Tabel 4.5, dihasilkan rata-rata RMSE dan MAE yang lebih rendah pada hasil estimasi kecepatan kendaraan dengan ORB-SLAM2.

Sensor takometer internal pada kendaraan mengukur kecepatan putar motor DC. Terdapat faktor ketidakpastian pada konversi putaran motor DC menjadi putaran roda. Itulah yang mungkin menyebabkan hasil pengukuran kecepatan dengan takometer terkadang memiliki hasil yang kurang baik dan kurang sesuai dengan estimasi kecepatan dari GNSS. Dapat disimpulkan estimasi kecepatan dengan ORB-SLAM2 lebih akurat dan sesuai dengan estimasi kecepatan menurut GNSS dibandingkan dengan takometer.

#### 4.7. Performansi ORB-SLAM2 dalam Mode Otonom

Pada bagian ini, dibahas mengenai pengujian performansi ORB-SLAM2 dalam mode otonom. Pengujian dilakukan pada trajektori lurus, trajektori berbelok, dan pada lingkungan tertutup. Proses pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.17.



(a)



(b)



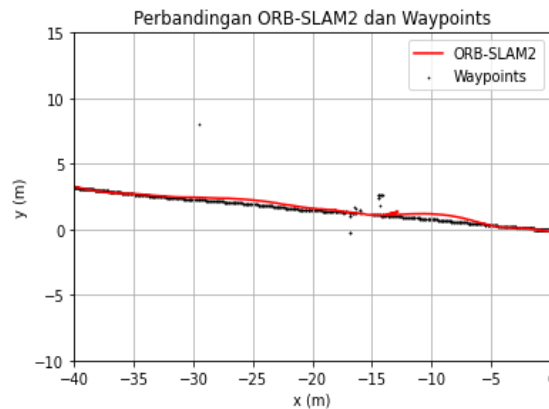
(c)

**Gambar 4.17.** (a) Pengujian pada trajektori lurus; (b) Pengujian pada trajektori belok; (c) Pengujian pada lingkungan tertutup.

Sebelum dijalankan dalam mode otonom, *waypoint* dibuat terlebih dahulu. *Waypoint* ini adalah poin-poin yang nantinya akan menjadi trajektori yang dilewati kendaraan dalam mode otonom. *Waypoint* dibuat dengan merekam data ORB-SLAM2 dengan *rosvbag*. Setelah *waypoint* dibuat, mode otonom dijalankan. Kendaraan akan berusaha mengikuti trajektori dari *waypoint* yang telah dibuat.

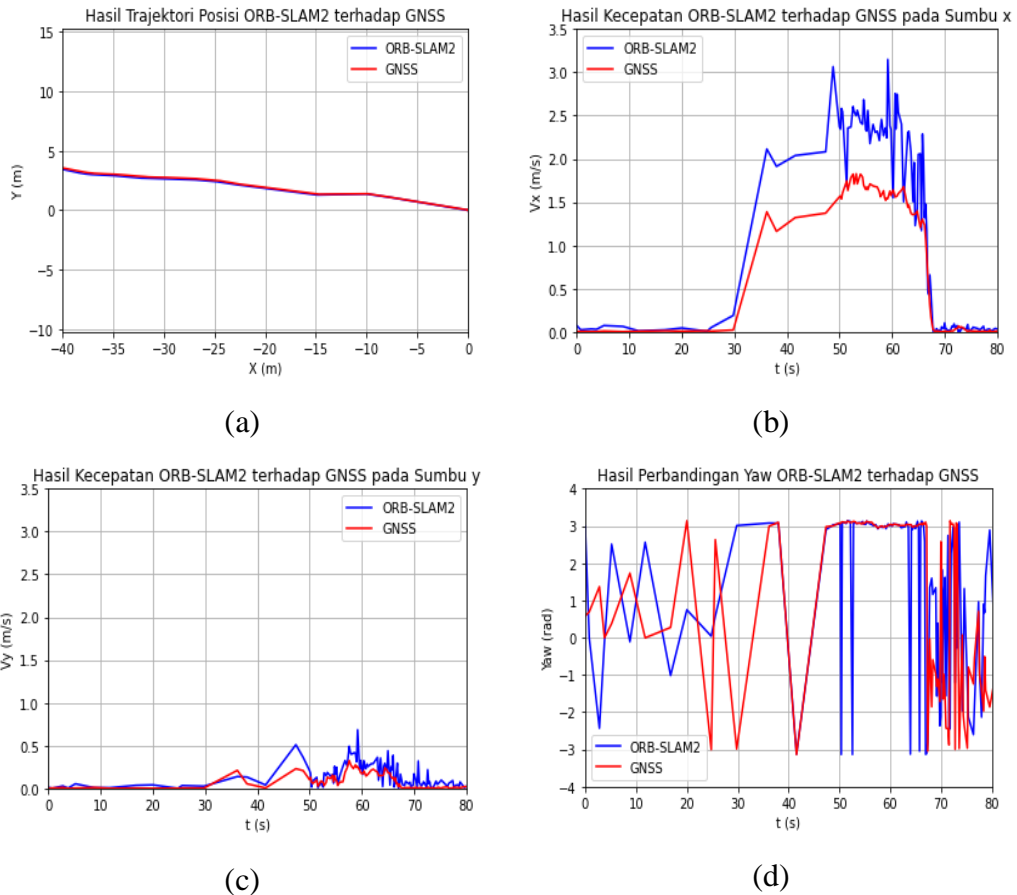
#### 4.7.1. Performasi ORB-SLAM2 dengan Mode Otonom pada Trajektori Lurus

Pada Gambar 4.18, dapat dilihat perbandingan antara *waypoint* yang dibuat dan hasil trajektori kendaraan otonom dengan ORB-SLAM2 untuk trajektori lurus.



**Gambar 4.18.** Perbandingan antara *waypoints* dan hasil trajektori kendaraan otonom dengan ORB-SLAM2 pada trajektori lurus.

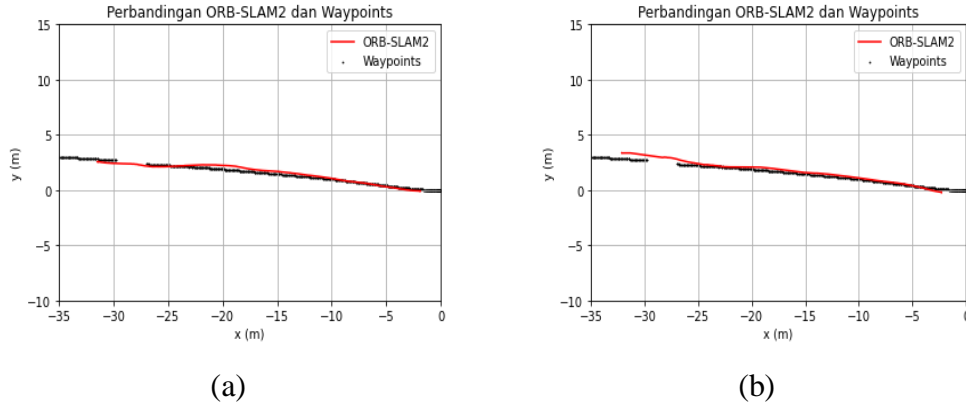
Dari Gambar 4.18, terlihat kendaraan otonom mampu mengikuti *waypoint* yang telah dibuat sebelumnya. Namun, terkadang kendaraan otonom menghasilkan trajektori yang sedikit bergeser dari jalurnya. Pada Gambar 4.19, dapat dilihat perbandingan estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi yang dihasilkan oleh ORB-SLAM2 dibandingkan dengan GNSS.



**Gambar 4.19.** Perbandingan estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi ORB-SLAM2 dengan GNSS pada mode otonom saat trajektori lurus.

Dari Gambar 4.19, dapat dilihat bahwa estimasi posisi oleh ORB-SLAM2 cukup sesuai dengan hasil estimasi GNSS. Namun, estimasi orientasi oleh ORB-SLAM2 terlihat berisilasi walaupun berjalan lurus. Hal ini karena faktor ketidakpastian dari ORB-SLAM2, dimana dalam kondisi diam atau berjalan lurus, ORB-SLAM2 menghasilkan perbedaan posisi yang sebetulnya kecil, namun sudah berbeda kuadran, oleh karena itu terlihat berisilasi pada grafik. Orientasi yang berisilasi inilah yang mungkin menyebabkan terkadang kendaraan agak bergeser sedikit dari jalur, namun secara keseluruhan, kendaraan mampu mengikuti *waypoint* dengan cukup baik. Selain itu, faktor kedua yang mempengaruhi adalah kerapatan dan banyaknya jumlah *waypoints* yang dibuat sebelum mode otonom dilakukan. Semakin rapat dan semakin sesuai *waypoints*, maka posisi kendaraan dalam mode otonom akan semakin akurat.

Percobaan pada trajektori lurus dilakukan sebanyak tiga kali. Perbandingan antara estimasi posisi yang dihasilkan oleh ORB-SLAM2 dengan *waypoints* pada percobaan kedua dan ketiga terdapat pada Gambar 4.20.



**Gambar 4.20.** Hasil perbandingan estimasi posisi oleh ORB-SLAM2 pada: (a) percobaan kedua; (b) percobaan ketiga.

Terlihat pada Gambar 4.20, ORB-SLAM2 mampu mengikuti trajektori lurus yang telah dibuat oleh *waypoints* sebelumnya. Pada Gambar 4.20.b, terlihat trajektori kendaraan agar bergeser dari jalur yang seharusnya dilewatinya saat *waypoints* mengalami kekosongan. *Waypoints* memiliki peran penting bagi kendaraan dalam mode otonom, sehingga *waypoints* yang diambil sebelum mode otonom dilakukan harus banyak dan akurat. Hasil estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi ORB-SLAM2 pada percobaan kedua dan ketiga terlampir pada Lampiran E.

Untuk melihat keakuratan sistem penentu lokasi dengan ORB-SLAM2, kesalahan penentuan posisi, kecepatan, dan orientasi dengan ORB-SLAM2 dibandingkan dengan hasil pengukuran GNSS, seperti yang terlihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6.** Kesalahan estimasi ORB-SLAM2 terhadap hasil pengukuran GNSS pada trajektori lurus

	Posisi (m)		Kecepatan (m/s)		Orientasi (rad)	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Data 1	0,404	0,367	0,551	0,383	2,211	1,273
Data 2	1,859	1,454	0,658	0,537	2,579	1,310
Data 3	1,839	1,223	0,495	0,351	1,472	0,961
<b>Rata-Rata</b>	<b>1,367</b>	<b>1,015</b>	<b>0,568</b>	<b>0,424</b>	<b>2,087</b>	<b>1,181</b>

Dari Tabel 4.6, terlihat estimasi posisi pada percobaan pertama lebih baik dibandingkan pada percobaan kedua dan ketiga. Hal ini karena kondisi lingkungan yang berbeda pada saat pengambilan data. Pada percobaan pertama, cahaya matahari tidak terlalu terik dan tidak kerap berubah, oleh karena itu didapatkan hasil estimasi yang lebih akurat.

Estimasi kesalahan dari posisi kendaraan otonom terhadap *waypoints* pada trajektori lurus dapat dilihat pada Tabel 4.7.

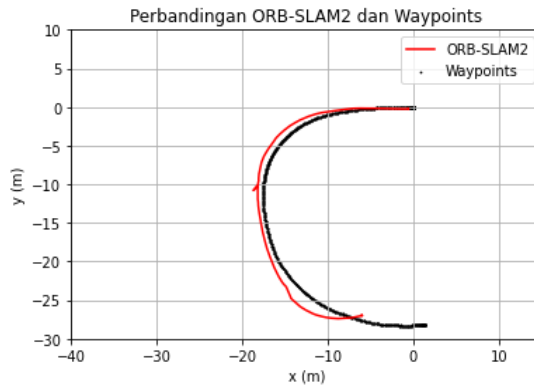
**Tabel 4.7.** Kesalahan estimasi posisi kendaraan dengan ORB-SLAM2 terhadap *waypoints* pada trajektori lurus.

	RMSE (m)	MAE (m)
Data 1	0,096	0,069
Data 2	0,167	0,050
Data 3	0,137	0,044
<b>Rata-Rata</b>	<b>0,133</b>	<b>0,054</b>

Dari Tabel 4.7, dapat dilihat bahwa kesalahan posisi kendaraan otonom dengan ORB-SLAM2 terhadap *waypoints* cukup kecil. Dapat disimpulkan bahwa performansi pengontrolan posisi yang dilakukan cukup baik. Hasil penentuan posisi dengan ORB-SLAM2 juga cukup baik sebab kesalahan penentuan posisi ORB-SLAM2 terhadap GNSS sebagai *ground truth* masih di bawah kesalahan maksimum penentuan posisi menurut standar, yaitu 1,500 m.

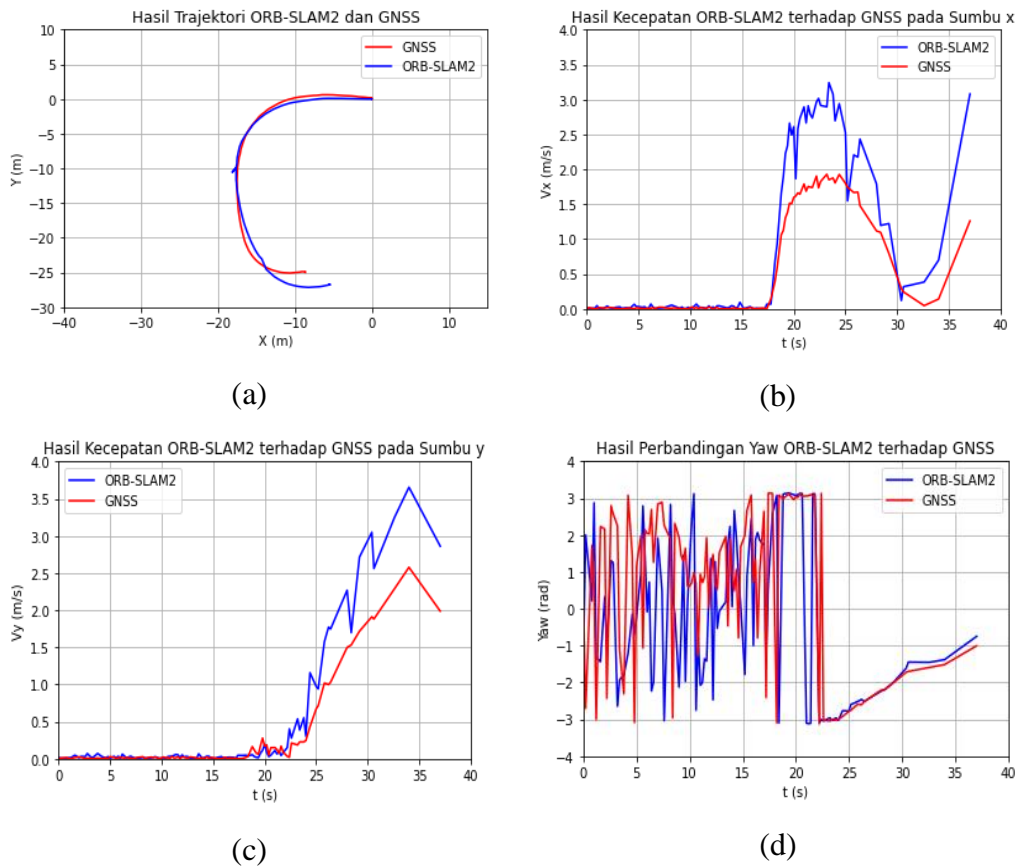
#### **4.7.2. Performansi ORB-SLAM2 dengan Mode Otonom pada Trajektori Berbelok**

Pada Gambar 4.21, dapat dilihat perbandingan antara *waypoint* yang dibuat dan hasil trajektori kendaraan otonom dengan ORB-SLAM2 untuk trajektori berbelok.



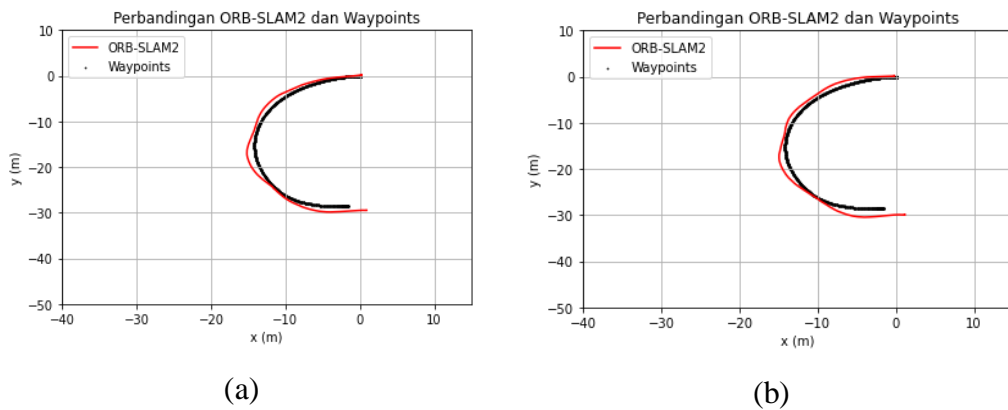
**Gambar 4.21.** Perbandingan antara *waypoints* dan hasil trajektori kendaraan otonom dengan ORB-SLAM2 pada trajektori berbelok.

Dengan ORB-SLAM2, kendaraan otonom mampu untuk membuat gerakan berbelok walaupun belum se-akurat seperti pada *waypoint* yang telah dibuat sebelumnya. Pada Gambar 4.22, terdapat hasil estimasi posisi, kecepatan dan orientasi kendaraan oleh ORB-SLAM2 dalam mode otonom apabila dibandingkan dengan GNSS.



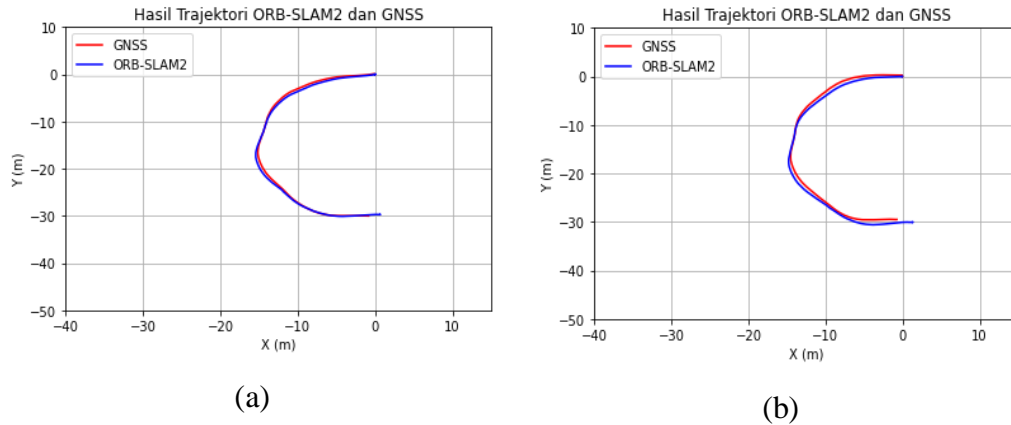
**Gambar 4.22.** Perbandingan estimasi posisi, kecepatan, dan orientasi ORB-SLAM2 dengan GNSS pada mode otonom saat trajektori berbelok.

Dari Gambar 4.22, terlihat kecepatan kendaraan pada detik ke-23 naik secara signifikan. Hal ini karena trajektori berbelok yang digunakan untuk pengujian merupakan trajektori berbelok dan menurun. Kemudian, terlihat orientasi kendaraan sebelum detik ke-23 beresilasi akibat ketidakpastian ORB-SLAM2 dalam kondisi diam dan berjalan lurus. Ketika berbelok (detik ke-23 ke atas), terlihat hasil orientasi ORB-SLAM2 sesuai dengan estimasi orientasi GNSS. Pada Gambar 4.23, dapat dilihat perbandingan hasil estimasi ORB-SLAM2 terhadap *waypoint* pada percobaan kedua dan ketiga.



**Gambar 4.23.** Hasil perbandingan estimasi posisi oleh ORB-SLAM2 pada: (a) percobaan kedua; (b) percobaan ketiga.

Pada Gambar 4.23, terlihat bahwa hasil estimasi posisi ORB-SLAM2 dalam mode otonom pada percobaan kedua dan ketiga memiliki hasil yang cukup mirip, namun juga tidak terlalu sesuai dengan *waypoint*. Pada Gambar 4.24 terlihat perbandingan antara hasil estimasi posisi ORB-SLAM2 dan GNSS pada percobaan kedua dan ketiga.



**Gambar 4.24.** Perbandingan estimasi posisi kendaraan otonom oleh ORB-SLAM2 dan GNSS pada percobaan kedua dan ketiga.

Pada Gambar 4.24, terlihat estimasi posisi kendaraan otonom cukup akurat apabila dibandingkan dengan GNSS. Hasil perbandingan estimasi kecepatan dan orientasi untuk percobaan kedua dan ketiga terlampir pada Lampiran E. Karena sebetulnya pengukuran ORB-SLAM2 cukup akurat terhadap GNSS, maka disimpulkan bahwa kesalahan estimasi posisi pada mode otonom bukan akibat kesalahan estimasi oleh ORB-SLAM2. Kemungkinan hasil trajektori tidak terlalu sesuai dengan *waypoints* akibat jalannya berbelok dan menurun, sehingga dibutuhkan pengontrolan yang lebih akurat dan lebih baik. Selain itu, kurang banyaknya *waypoint* juga menjadi salah satu faktor penyebab.

Untuk melihat keakuratan sistem penentu lokasi dengan ORB-SLAM2, kesalahan penentuan posisi, kecepatan, dan orientasi dengan ORB-SLAM2 dibandingkan dengan hasil pengukuran GNSS, seperti yang terlihat pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8.** Kesalahan estimasi ORB-SLAM2 terhadap hasil pengukuran GNSS pada trajektori berbelok.

	Posisi (m)		Kecepatan (m/s)		Orientasi (rad)	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Data 1	0,381	0,243	0,565	0,329	2,393	1,639
Data 2	0,131	0,070	0,466	0,148	2,632	2,080
Data 3	0,488	0,402	1,015	0,649	2,066	1,092
<b>Rata-Rata</b>	<b>0,333</b>	<b>0,238</b>	<b>0,682</b>	<b>0,375</b>	<b>2,364</b>	<b>1,604</b>

Dari Tabel 4.8, terlihat bahwa kesalahan estimasi posisi dan kecepatan dari ORB-SLAM2 cukup kecil terhadap GNSS. Kesalahan pada hasil estimasi orientasi ORB-



SLAM2 akibat hasil orientasi ORB-SLAM2 yang terlihat berosilasi ketika berjalan lurus atau diam akibat faktor ketidakpastian. Kemudian, pada Tabel 4.9, dapat dilihat estimasi kesalahan dari posisi kendaraan otonom terhadap *waypoints* dalam percobaan pada trajektori berbelok.

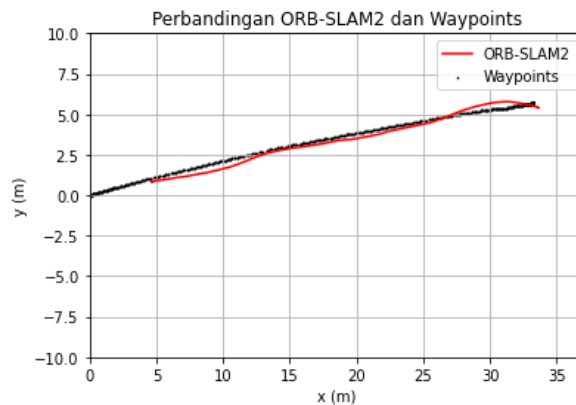
**Tabel 4.9.** Kesalahan estimasi posisi kendaraan dengan ORB-SLAM2 terhadap *waypoints* pada trajektori berbelok.

	RMSE (m)	MAE (m)
Data 1	0,552	0,411
Data 2	0,521	0,387
Data 3	0,788	0,553
<b>Rata-Rata</b>	<b>0,620</b>	<b>0,450</b>

Dari Tabel 4.9, dapat dilihat bahwa performansi pengontrolan posisi yang dilakukan pada trajektori berbelok masih dapat dianggap cukup baik, meskipun trajektorinya menurun sehingga dibutuhkan pengontrolan yang lebih baik lagi agar semakin akurat. Performansi penentuan posisi dengan ORB-SLAM2 dapat dianggap baik sebab kesalahan penentuan posisi ORB-SLAM2 terhadap GNSS sebagai *ground truth* masih di bawah kesalahan maksimum penentuan posisi menurut standar, yaitu 1,500 m.

#### 4.7.3. Performansi ORB-SLAM2 dengan Mode Otonom pada Lingkungan Tertutup

Pada bagian ini dibahas hasil uji performansi ORB-SLAM2 pada lingkungan tertutup untuk memastikan ORB-SLAM2 memungkinkan kendaraan otonom untuk bernavigasi pada lingkungan tanpa sinyal GNSS. Pada Gambar 4.25, terdapat hasil trajektori ORB-SLAM2 terhadap *waypoint* yang telah dibuat sebelumnya.



**Gambar 4.25.** Hasil trajektori yang dihasilkan ORB-SLAM2 pada lingkungan tertutup.

Pada Gambar 4.25 terlihat kendaraan mampu berjalan lurus mengikuti *waypoint*. Namun, permasalahannya masih sama seperti ketika pegujian ORB-SLAM2 ketika berjalan lurus, yaitu jalan dari kendaraan tidak konsisten lurus dan terkadang bergeser sedikit dari jalur yang seharusnya dilewati oleh kendaraan. Meskipun begitu, kesalahan estimasi posisi yang dihasilkan terhadap *waypoints* cukup kecil. Dihasilkan nilai RMSE sebesar 0,142 m dan MAE sebesar 0,091 m, yang berarti pengontrolan posisi dapat berlangsung dengan optimal. Percobaan ini menunjukkan bahwa mode otonom tetap dapat dijalankan walaupun kendaraan berada di lingkungan tertutup dengan ORB-SLAM2, dimana sebelumnya penelitian belum pernah dilakukan pada lingkungan tertutup karena sinyal GNSS yang tidak akurat.