

## BAB IV

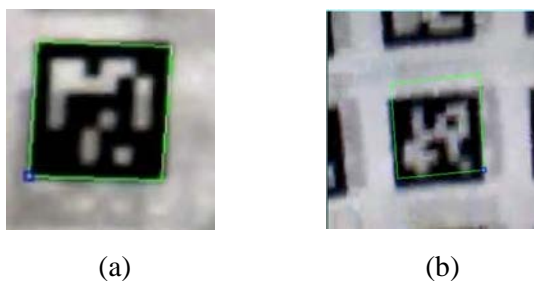
### HASIL DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan terkait hasil dan analisis yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan, di antaranya identifikasi sistem pemosisian *drone* dengan menentukan kecepatan maksimum *drone* untuk mendeteksi MFP, identifikasi kecepatan *drone* untuk memperoleh parameter pengontrol, pengujian penelusuran posisi *drone* dengan pergerakan ke arah yang berbeda, pengujian algoritma pemisahan, dan pengujian penelusuran titik berbasis kontrol terpusat untuk tugas pemetaan pada *drone*.

#### 4.1 Sistem Pemosisian

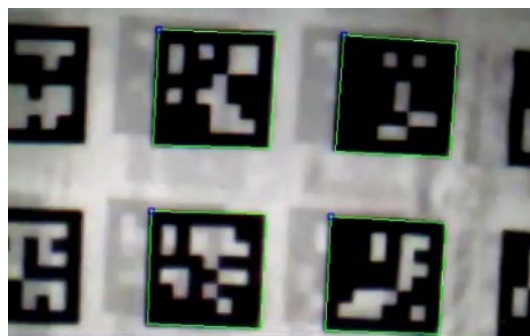
Proses pengambilan citra marka menggunakan kamera bawah *drone* saat *drone* berada pada kondisi terbang dan memberikan perintah maju. Pada penelitian [6], pembacaan MFP dapat terdeteksi hingga nilai masukan kecepatan sebesar 1 m/s, sehingga nilai kecepatan di atas 1 m/s tidak dapat mendeteksi MFP [6]. Pada penelitian [6], ukuran marka yang dideteksi oleh *drone* berukuran 60 cm x 60 cm, sementara pada penelitian ini berukuran 12,5 cm x 12,5 cm. Oleh karena itu, *drone* akan mengambil citra marka dengan kecepatan 50 cm/s.

Pada Gambar 4.1 (a), citra marka MFP yang terdeteksi saat *drone* diam memiliki resolusi yang baik. Akan tetapi, saat *drone* bergerak dengan kecepatan 50 cm/s, citra marka MFP yang ditangkap oleh kamera *drone* tidak sebaik marka yang terdeteksi saat *drone* dalam kondisi diam. Citra marka MFP pada saat *drone* bergerak ditunjukkan pada Gambar 4.1 (b).

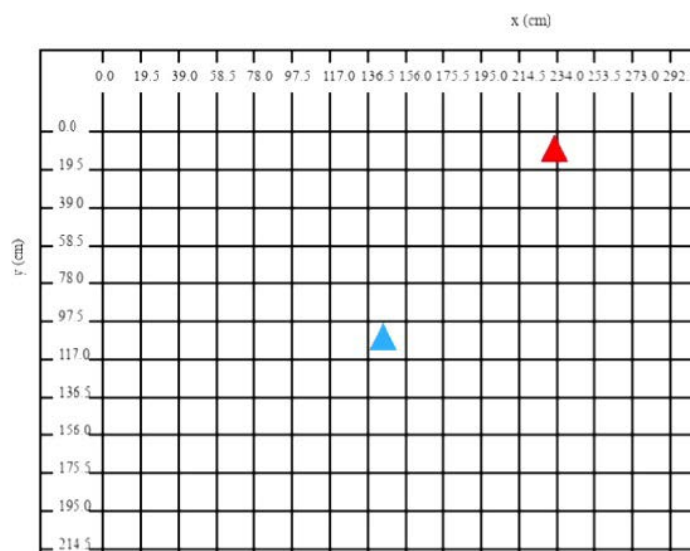


**Gambar 4.1.** Marka MFP yang terdeteksi oleh drone (a) saat diam dan (b) saat *drone* bergerak dengan kecepatan 50 cm/s.

Meskipun posisi *drone* sesuai perhitungan, yaitu (146,25;107,25). Dengan demikian, resolusi citra marka yang terdeteksi rendah, *drone* tetap mendapatkan informasi ID dari marka tersebut. Pendeteksian beberapa marka dapat memberikan informasi posisi *drone* yang presisi. Gambar 4.2 (a) merupakan hasil deteksi beberapa marka dan koordinat yang diperoleh. Pada proses deteksi beberapa marka tersebut, posisi *drone* berada pada 4 ID dengan koordinat masing-masing adalah (136,5;97,5), (156;97,5), (136,5;117), dan (156;117). Dengan pendeteksian beberapa marka MFP, posisi dari drone yang diperoleh adalah (146,25;107,25). Gambar (4.2) (b) merupakan tampilan UI sinkronisasi posisi *drone* dari deteksi beberapa MFP. Segitiga berwarna biru merepresentasikan *drone* pada kondisi melayang. Berdasarkan tampilan UI, posisi *drone* berada pada koordinat (146,25;107,25) dan sesuai dengan posisi riil.



(a)



(b)

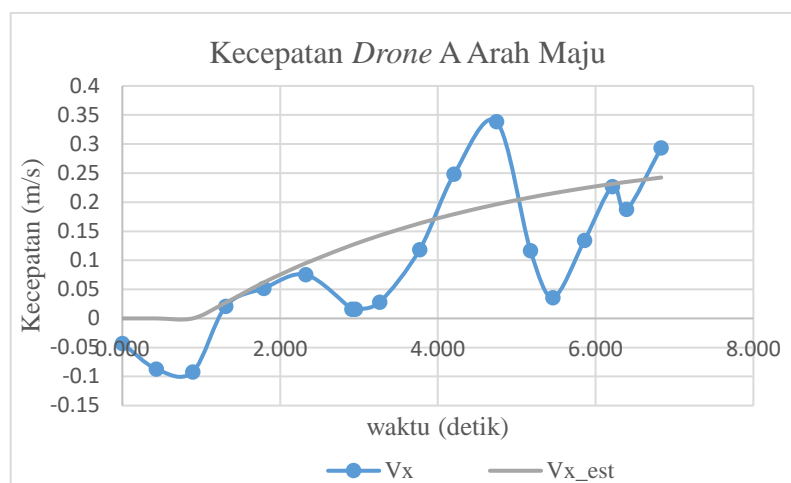
**Gambar 4.2.** Ilustrasi deteksi beberapa MFP (a) MFP yang terdeteksi dan menunjukan posisi riil *drone* dan (b) posisi *drone* dari hasil pengolahan pada UI.

## 4.2 Identifikasi Karakteristik *Drone*

Identifikasi karakteristik dilakukan pada kecepatan *drone* untuk menentukan parameter pengontrol yang akan digunakan pada penelitian ini. Identifikasi karakteristik dilakukan pada masing-masing *drone* dengan kondisi ruangan yang sama dan pergerakan arah yang sama.

### 4.2.1 Hasil Identifikasi Karakteristik *Drone*

Proses identifikasi pergerakan *drone* dilakukan dengan cara memberikan perintah bergerak searah sumbu x dan sumbu y. Pada penelitian ini dilakukan identifikasi pergerakan *drone* pada nilai kecepatan 50 cm/s. Nilai tersebut dipilih untuk memenuhi kebutuhan tugas *drone* dalam menangkap citra pemetaan, sehingga kecepatan yang dimasukkan pada *drone* harus sekecil mungkin. Respons kecepatan yang didapatkan untuk proses identifikasi memiliki bentuk serupa dengan FOPTD pada penelitian [6], sehingga identifikasi respons dapat dilakukan dengan pendekatan FOPTD. Gambar 4.3 merupakan respons sistem dengan nilai kecepatan 0,100 dari *drone* A. Data lengkap identifikasi kecepatan *drone* A dan *drone* B pada Lampiran C.



**Gambar 4.3.** Hasil identifikasi pergerakan ke kiri dari *drone* A.

Parameter FOPTD untuk setiap arah pergerakan *drone* A ditampilkan pada Tabel 4.1. Fungsi alih kecepatan dengan arah maju pada *drone* A diekspresikan pada Persamaan (4.1). Untuk pergerakan arah lain, parameter  $K$ ,  $t_d$ , dan  $\tau$  dapat disubstitusikan ke Persamaan (2.29).

**Tabel 4.1.** Hasil identifikasi kecepatan *drone* A dan *drone* B.

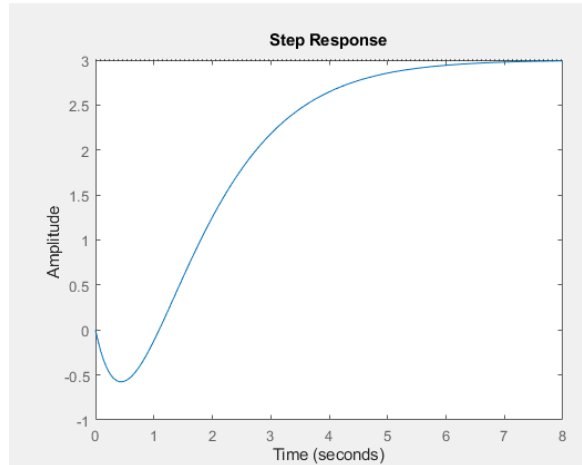
Arah	Drone A				Drone B			
	Parameter FOPTD			SSE	Parameter FOPTD			SSE
	$K$	$\tau$	$t_d$		$K$	$\tau$	$t_d$	
Maju	2,998	3,543	0,974	0,112	2,999	0,976	1,692	0,524
Mundur	1,681	0,280	0,075	0,070	3,541	0,858	0,564	1,289
Ke Kanan	1,430	0,957	0,560	0,148	1,182	1,000	0,425	0,342
Ke Kiri	6,655	0,523	0,742	1,579	2,353	0,723	0,555	0,152

$$G(s) = \frac{2,998}{3,543 s + 1} e^{-0,974 s} \quad (4.1)$$

Persamaan (3.2) diubah menggunakan pendekatan Padé. Pendekatan Padé dilakukan untuk melakukan pendekatan pada bagian waktu tunda dari fungsi transfer FOPTD. Dengan demikian, Persamaan (4.1) menggunakan pendekatan Padé dapat dituliskan sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{2,998}{4,543 s + 1} \times \frac{1 - \frac{0,974}{2} s}{1 + \frac{0,974}{2} s} \quad (4.2)$$

Persamaan (4.2) diberi input step untuk melihat respons fungsi transfer dalam simulasi. Gambar 4.3 merupakan grafik respons input step dari fungsi transfer Persamaan (4.2). Berdasarkan Gambar 4.4 tersebut, sistem memiliki *undershoot* yang diakibatkan oleh komponen *zero* dari fungsi transfer. Komponen *zero* tersebut merupakan bagian dari waktu tunda, Gambar 4.3 pun menunjukkan adanya waktu tunda pada sistem selama 0,974 detik.



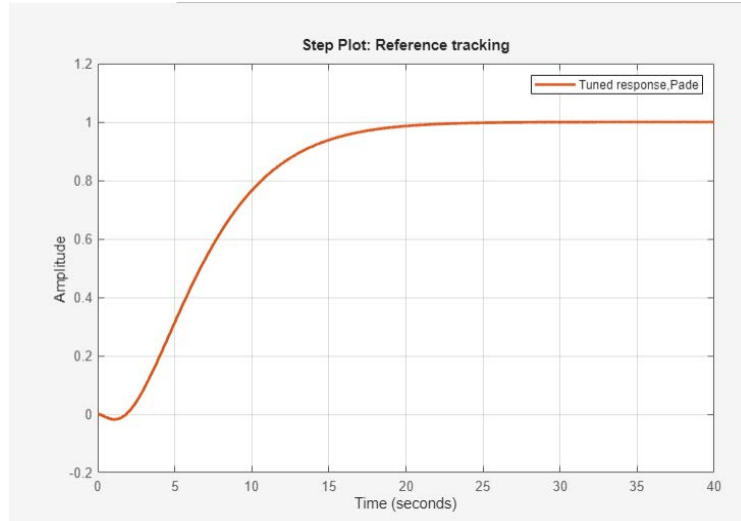
**Gambar 4.4.** Respons sistem input step untuk *drone* A arah maju

#### 4.2.2 Hasil Penalaan Parameter Pengontrol PD

Persamaan (4.2) digunakan sebagai model sistem yang digunakan untuk perancangan pengontrol. Pada penelitian ini pengontrol yang digunakan merupakan pengontrol PD untuk menghilangkan *undershoot*. Dengan menggunakan Persamaan (4.2) yang merupakan pendekatan Padé, maka proses perancangan pengontrol PD dapat dilakukan dengan menggunakan metode *root locus*. Dengan demikian, parameter pengontrol PD untuk masing-masing *drone* dapat diperoleh, seperti pada Tabel 4.2. Hasil pengontrolan dari *drone* A untuk bergerak maju ditunjukkan oleh Gambar 4.4. Berdasarkan Gambar 4.5, *overshoot* yang dimiliki oleh sistem dapat tereduksi sehingga keluaran tersebut memberikan hasil menuju satu sesuai input yang diberikan.

**Tabel 4.2.** Parameter pengontrol PD untuk *drone* A dan *drone* B

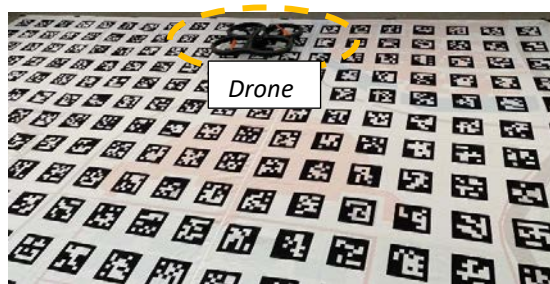
Arah	<i>Drone A</i>		<i>Drone B</i>	
	$K_p$	$T_d$	$K_p$	$T_d$
Maju	0,487	0,7905	0,501	0,846
Mundur	0,11	0,038	0,217	0,282
Kanan	0,597	0,479	0,639	0,213
Kiri	0,106	0,371	0,302	0,362



**Gambar 4.5.** Grafik respons sistem *drone* A arah maju dengan pengontrol PD.

### 4.3 Pengujian Individu

Proses penelusuran posisi *drone* dilakukan secara individu dengan memberikan perintah kepada *drone* untuk terbang mengikuti titik referensi yang diberikan dan *drone* akan mendarat jika titik referensi terakhir telah dicapai. Gambar 4.6 merupakan ilustrasi terkait pengujian individu dengan asumsi tidak ada gangguan angin dari luar.



**Gambar 4.6.** Ilustrasi pengujian individu.

Pengujian penelusuran posisi dilakukan dengan menggunakan sistem pemosisian deteksi beberapa MFP yang telah dirancang sebelumnya pada Bab III. Titik referensi yang ditentukan membuat pergerakan *drone* searah sumbu x dan sumbu y. Jumlah titik referensi yang diberikan kepada *drone* bergantung dengan arah pergerakan *drone* karena kondisi ruangan dan ukuran karpet MAT yang terbatas.

#### 4.3.1 Penelusuran Rute Searah Sumbu X

Gambar 4.7 (a) merupakan hasil pengujian pergerakan maju pada *drone* A searah sumbu x. Berdasarkan Gambar 4.7 (a), pergerakan arah maju pada *drone* dilakukan

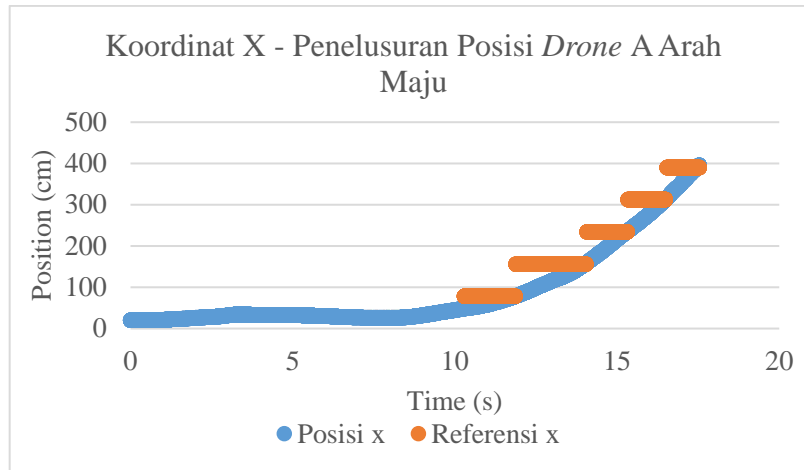
dengan memberikan lima titik target, yaitu (78;156), (156;156), (234;156), (312;156), dan (390;156). Pengujian dilaksanakan setelah *drone* masuk kondisi melayang dan siap menerima perintah pergerakan. Pada Gambar 4.6, posisi awal *drone* tidak di titik  $x = 0$ , tetapi di titik  $x = 19,5$ . Hal tersebut dilakukan agar *drone* terhindar dari tabrakan.

Pada proses pengujian ini, *drone* menghadap sejajar dengan sumbu  $x$ , sehingga pergerakan maju *drone* ditandai dengan bertambahnya nilai koordinat pada sumbu  $x$ , seperti Gambar 4.7 (b). Proses pergantian posisi dilakukan sama seperti pada penelitian [6], bahwa pergantian titik referensi tidak dilakukan dengan jeda, melainkan berubah ketika mencapai radius 30,0 cm dari titik target terkini. Untuk menyelesaikan penelusuran titik yang diberikan pada pergerakan maju, waktu yang dibutuhkan *drone* A menjalankan tugas tersebut adalah 17 detik.

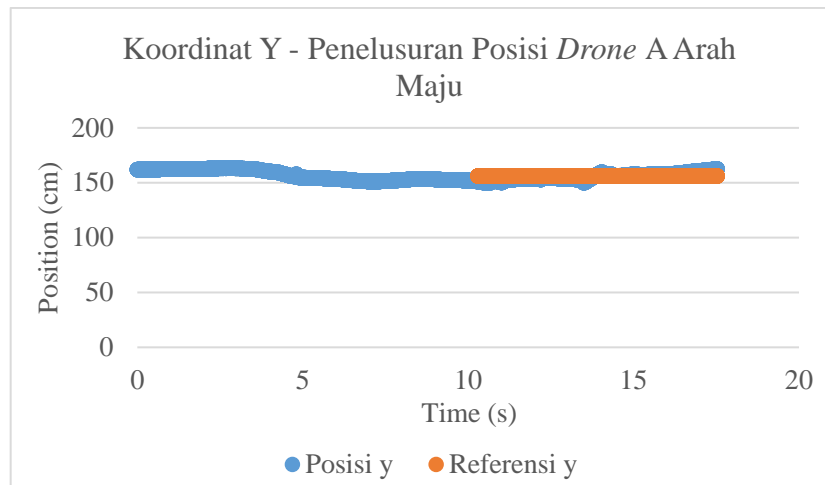
Gambar 4.7 (c) merupakan posisi *drone* A pada sumbu  $y$ . Pada Gambar 4.7 (c) *drone* melayang di sekitar  $y = 156$  dan menerima perintah untuk menjaga koordinat  $y$ .



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4.7.** Penelusuran posisi dengan arah maju pada sumbu x (a) rekaman posisi *drone* saat bergerak maju, (b) profil posisi pada sumbu x dan (c) profil posisi sumbu y.

Untuk membandingkan hasil penelusuran penelitian ini dengan penelitian [6] dapat dilihat perbandingan nilai RMSE pada Tabel 4.3. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pada penelitian ini nilai RMSE penelusuran posisi *drone* lebih rendah dibandingkan penelitian [6], sebagai contoh nilai RMSE *drone* A saat bergerak searah sumbu x positif (maju) nilai RMSE awalnya 19,3 cm dan pada penelitian ini menurun menjadi sebesar 5,2 cm.

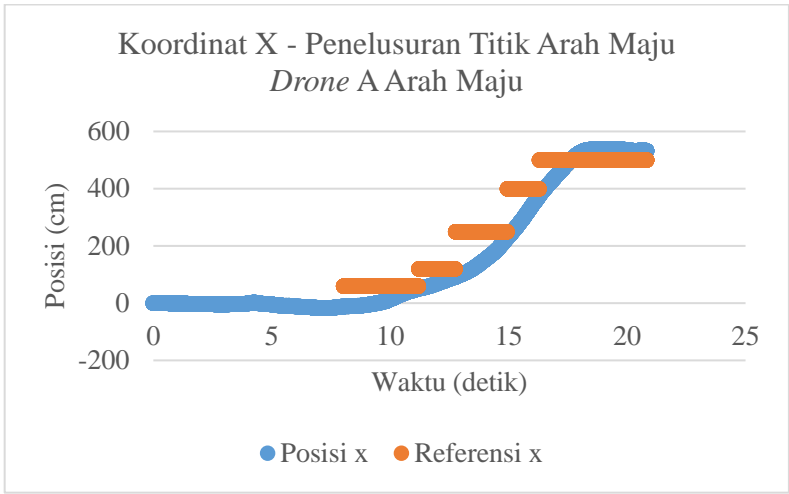


**Tabel 4.3.** Perbandingan nilai RMSE pada penelitian 2022 dan penelitian 2024.

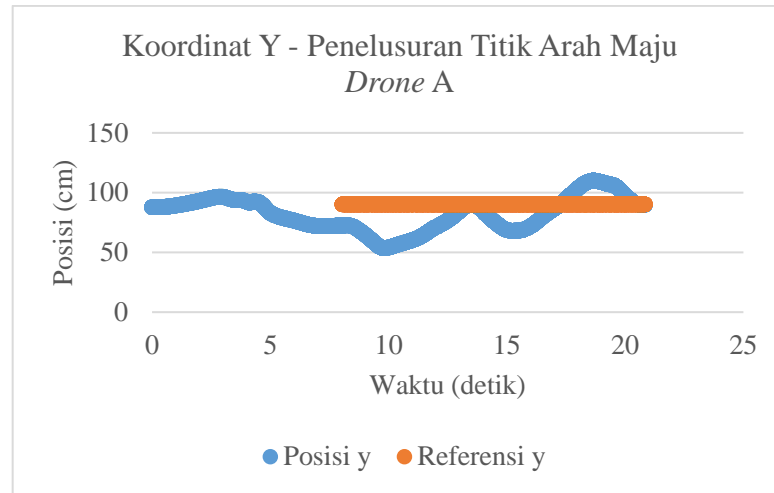
		Nilai RMSE (cm)			
		Maju	Mundur	Kanan	Kiri
Penelitian 2022	Drone A	19,3	13,4	9,9	6,6
	Drone B	14,4	10,1	8,7	9,5
Penelitian 2024	Drone A	5,2	7,8	7,7	6,3
	Drone B	5,0	6,7	8,5	8,6

Apabila posisi sumbu y pada *drone* A Gambar 4.7 (c) dibandingkan dengan Gambar 4.8 (c) yang merupakan posisi *drone* A pada sumbu y dari hasil penelitian [6] dengan nilai posisi y = 90, dapat dilihat bahwa posisi *drone* A pada sumbu y Gambar 4.7 (b) lebih terjaga pada rentang nilai yang diberikan jika dibandingkan dengan posisi *drone* pada Gambar 4.8 (b).

Hal tersebut dikarenakan sistem pemosisian yang digunakan tidak lagi menggunakan kombinasi sistem pemosisian dan sistem pengontrol PD, melainkan menggunakan pendeteksian beberapa MFP dan penggunaan titik acuan yang merupakan titik tengah kamera sebagai titik pusat *drone*. Proses penelusuran posisi pada pergerakan arah mundur diberikan titik referensi yang merupakan kebalikan dari titik referensi pergerakan maju *drone*, yaitu (312;156), (234;156), (156;156), (19,5;156). Grafik pergerakan arah mundur *drone* A dan drone B dapat dilihat pada Lampiran D.



(a)



(b)

**Gambar 4.8.** Penelusuran posisi pada penelitian Giga dengan arah maju pada sumbu x (a) posisi pada sumbu x dan (b) posisi sumbu y [6].

#### 4.3.2 Penelusuran Rute Searah Sumbu Y

Proses penelusuran posisi pada pergerakan arah kanan dan kiri dilakukan dengan menyimpan posisi *drone* tetap menghadap sumbu x. Oleh karena itu, pergerakan *drone* ke arah kanan dan kiri ditandai dengan berubahnya nilai koordinat pada sumbu y. Titik referensi yang digunakan untuk pengujian arah kanan dan kiri lebih sedikit dibandingkan pengujian arah maju. Hal tersebut dikarenakan ukuran koordinat sumbu y yang lebih kecil dibandingkan koordinat x pada karpet MAT yang dirancang, seperti pada Gambar 3.9. Selain itu, jumlah titik referensi dikurangi untuk menghindari tabrakan dengan dinding dan mengurangi efek turbulensi akibat baling-baling. Pergerakan searah sumbu y pada *drone* A dapat dilihat pada Lampiran D. Dengan demikian, waktu tempuh *drone* A untuk melakukan pergerakan ke arah kanan sebesar 15 detik dan waktu tempuh pergerakan ke arah kiri sebesar 14 detik.

Pengujian penelusuran posisi dilakukan juga pada *drone* B dengan langkah-langkah yang sama, seperti pada *drone* A. Perbandingan hasil pengujian untuk kedua *drone* ditunjukkan pada Tabel 4.4. Berdasarkan hasil tersebut, waktu tempuh dari tiap *drone* berbeda dikarenakan karakteristik *drone* yang berbeda. Pergerakan *drone* searah sumbu y memiliki jarak tempuh yang lebih dekat dibandingkan dengan arah searah sumbu x, sehingga memberikan waktu tempuh yang lebih cepat juga. Akan tetapi, pada *drone* B, waktu tempuh ke arah kanan lebih lambat dibandingkan ke

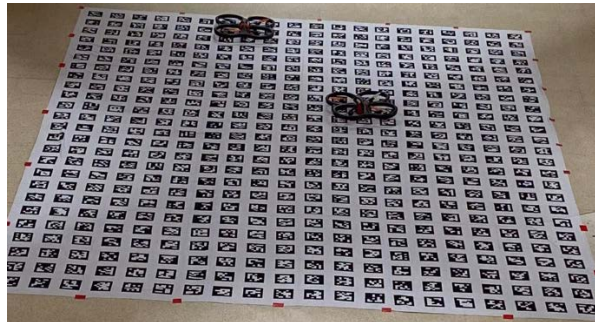
arah kiri karena kecepatan *drone* saat bergerak ke arah kanan lebih kecil dibandingkan saat bergerak mundur.

**Tabel 4.4.** Waktu tempuh pengujian penelusuran posisi tiap *drone* (detik).

	Arah Pergerakan <i>Drone</i> (detik)			
	Maju	Mundur	Kanan	Kiri
<b><i>Drone A</i></b>	17	17	15	14
<b><i>Drone B</i></b>	23	19	20	18

#### 4.4 Pengujian Berkelompok

Pengujian berkelompok dilakukan dengan dua pengujian, yaitu pengujian algoritma pemisahan untuk melihat respons *drone* dalam menghindari tabrakan dan pengujian tugas pemetaan. Gambar 4.9 merupakan ilustrasi pengujian berkelompok, kedua *drone* terbang di atas karpet MAT yang menunjukkan koordinat posisi dalam satuan cm.



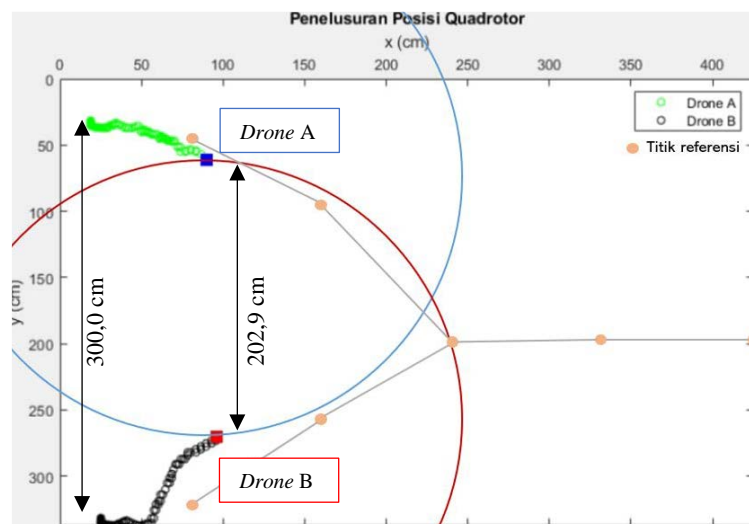
**Gambar 4.9.** Ilustrasi pengujian berkelompok.

##### 4.4.1 Pengujian Algoritma Pemisahan untuk Menghindari Tabrakan

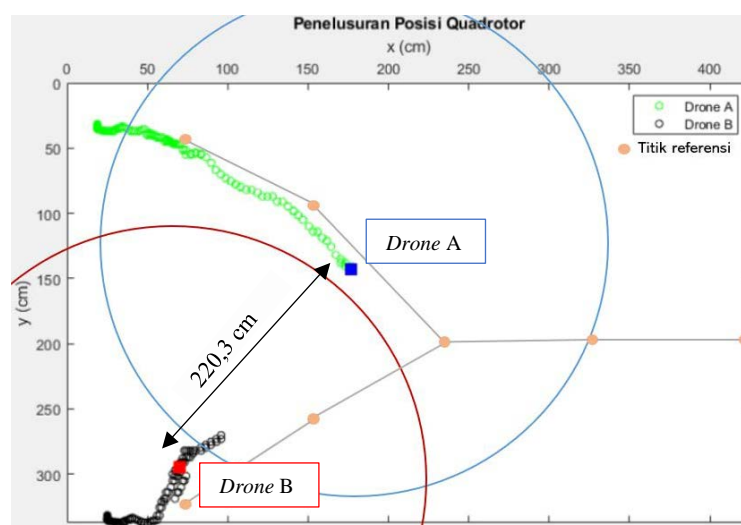
Proses pengujian algoritma pemisahan dilakukan dengan memberikan jalur yang beresiko tabrakan untuk kedua *drone*. Pada pengujian ini, jarak minimum antar titik pusat *drone A* dan *drone B* ditetapkan sebesar 200 cm. Dengan demikian, ketika kedua *drone* berada pada jarak kurang dari 200 cm, maka kedua *drone* akan menghindar menjauhi satu sama lain. Sebaliknya, jarak maksimum antar *drone* ditetapkan sebesar 400 cm. Gambar 4.8 merupakan hasil dari pengujian algoritma pemisahan. Ketika kedua *drone* berada pada jarak 200 cm, *drone* akan memberikan arah pergerakan untuk menghindar. Pada proses pengujian, *drone A* akan tetap

bergerak menuju titik C dan *drone* B akan bergerak berlawanan arah (mundur) ke titik G.

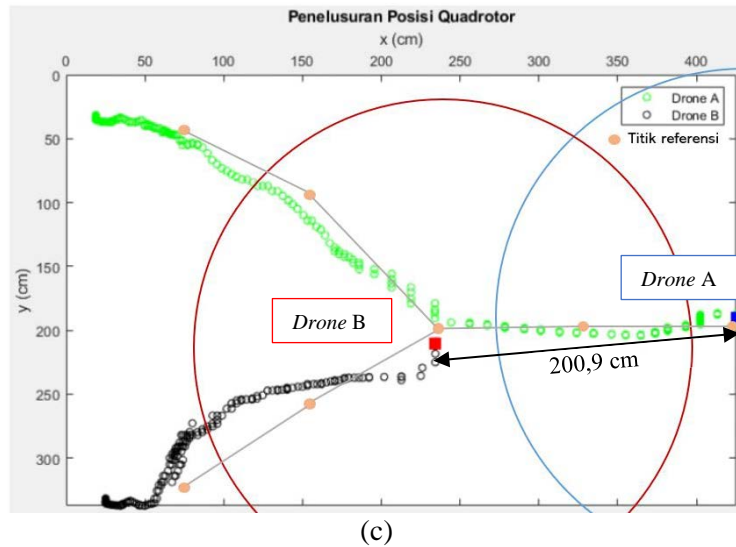
Respons pergerakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.10 (a), jarak antar *drone* mendekati jarak minimum yang diperbolehkan pada  $t = 3$  detik dan posisi *drone* B yang berada pada posisi (92,9;275,5). Oleh karena itu, *drone* B bergerak mundur ke posisi (68,5;300) saat  $t = 5$  detik, seperti Gambar 4.10 (b) dan jarak antar *drone* menjadi 220,3 cm. Karena jarak antar *drone* lebih dari jarak minimum, *drone* B kembali bergerak mengikuti rute yang diberikan, yaitu menuju titik C apabila *drone* A telah melewati titik C dan jarak antar *drone* lebih dari 200 cm, seperti Gambar 4.10 (c).



(a)



(b)

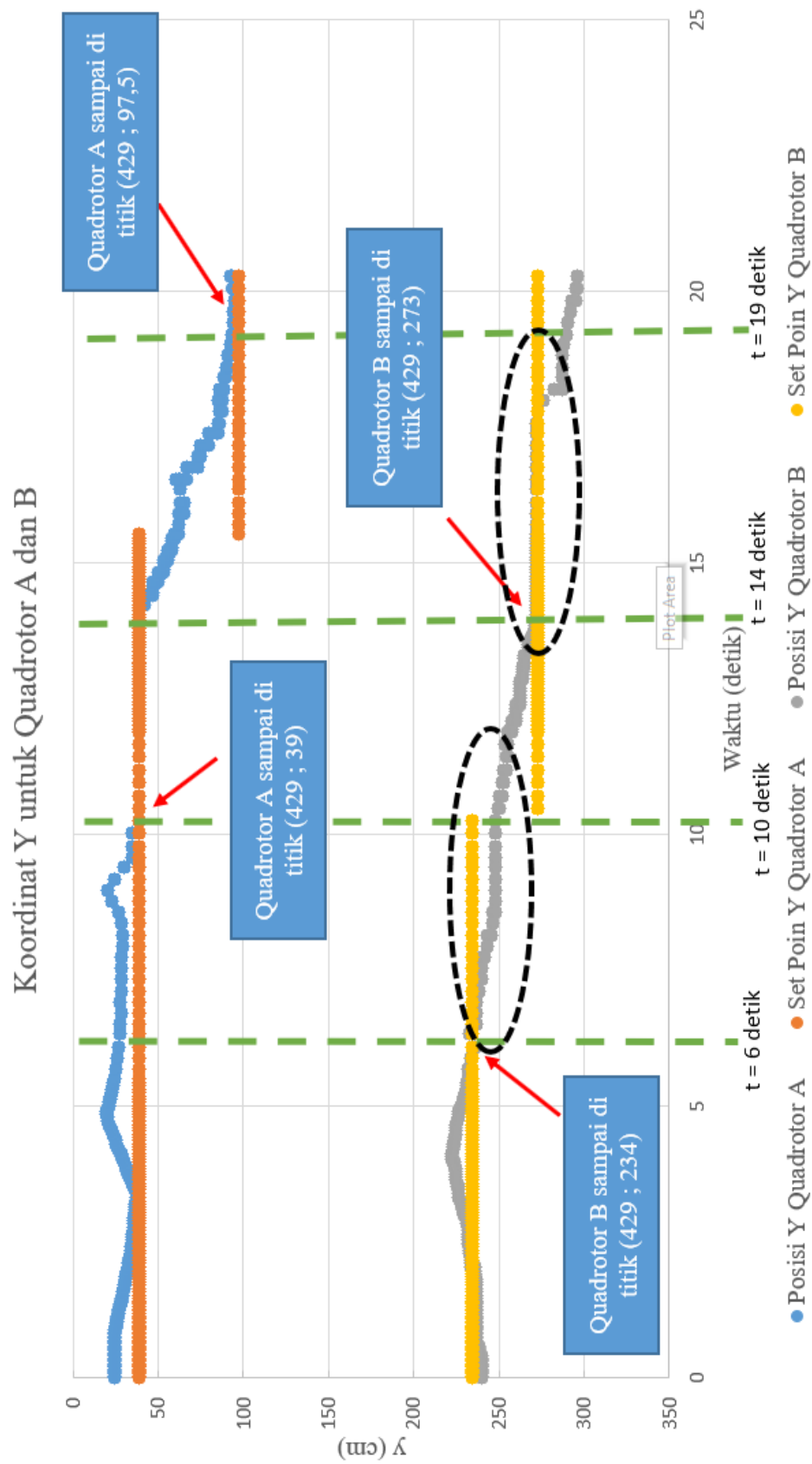


**Gambar 4.10.** Rekaman posisi *drone* pada pengujian algoritma pemisahan (a) pada  $t = 3$  detik, (b) pada  $t = 5$  detik, dan (c) pada  $t = 11$  detik.

#### 4.4.2 Pengujian untuk Tugas Pemetaan

Gambar 4.11 merupakan data yang diambil hingga detik 20 saat kedua *drone* mengalami pergeseran pada sumbu  $y$ . Gambar 4.11 menunjukkan bahwa *drone B* sampai lebih dahulu pada titik referensi (429;234) pada detik 6 dan *drone A* belum sampai di titik (429;39). Oleh karena itu, *drone B* akan menunggu dengan melayang di titik (429;234) hingga *drone A* sampai di titik (429;39). Berdasarkan gambar tersebut, *drone A* mencapai titik (429;39) pada detik 10.

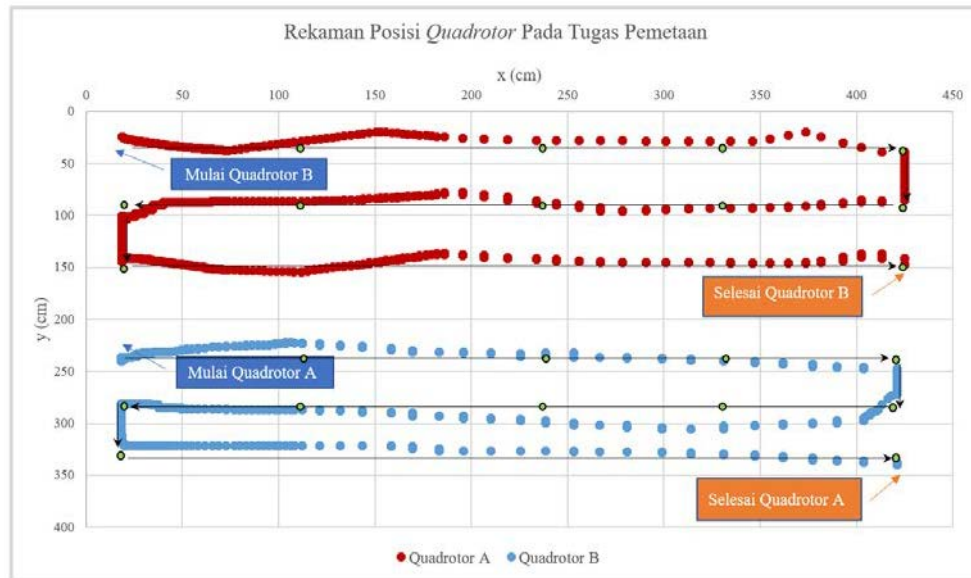
Dengan demikian, skenario pergerakan *drone* pada saat melakukan tugas pemetaan pada *drone* jamak untuk menghindari tabrakan dan menjaga jarak aman antar *drone* pada nilai 200 cm hingga 400 cm dapat digunakan pada penelitian ini. Ketika *drone A* dan *drone B* sudah mengalami pergerakan ke sumbu  $y$  dengan titik referensi masing-masing (429;97,5) dan (429;273), maka kedua *drone* akan bergerak bersama-sama pada arah sumbu  $x$ .



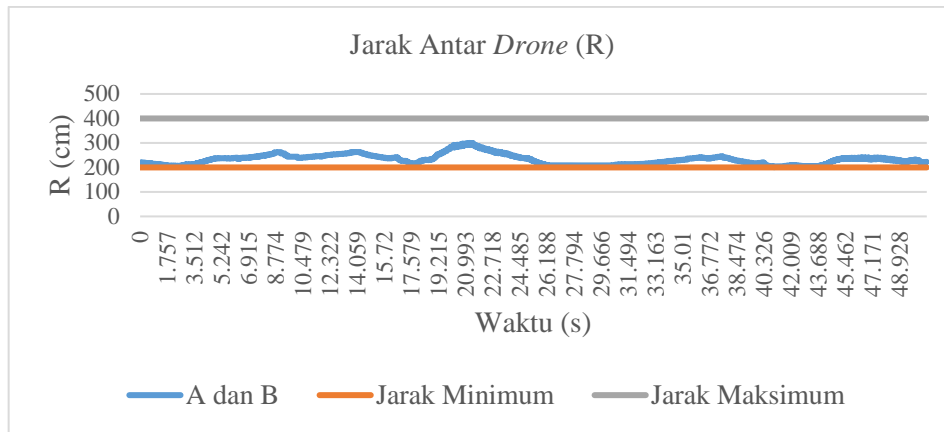
**Gambar 4.11.** Penelusuran posisi *drone* A dan *drone* B selama 20 detik.

Kedua *drone* akan melakukan tugas pemetaan dengan mengikuti titik target yang diberikan sebagai jalur pemetaan. Radius toleransi yang ditetapkan terhadap target sebesar 30,0 cm. Gambar 4.12 merupakan hasil penelusuran posisi *drone* jamak saat melakukan tugas pemetaan. Gambar 4.12 menunjukkan posisi *drone* tidak tepat berada di posisi awal, yaitu (19,5;39) untuk *drone* A dan (19,5;234) untuk *drone* B. Berdasarkan Gambar 4.12, kedua *drone* mengikuti jalur sesuai titik referensi yang diberikan, meskipun *drone* B mengalami pergeseran dari titik referensi yang diberikan, yaitu pada posisi (281;302). Pergeseran yang dialami oleh *drone* B diakibatkan adanya turbulensi dari baling-baling setiap *drone* serta jalur yang diberikan sebagai referensi *drone* melakukan pemetaan berbentuk titik. Penggunaan jalur referensi berupa titik menyebabkan *drone* bergerak tidak mengejar lurus mengikuti jalur referensi yang ditentukan. Akan tetapi, pergeseran tersebut berada pada radius toleransi.

Tugas pemetaan akan selesai jika kedua *drone* menemukan titik referensi terakhir. Apabila hanya satu *drone* saja yang baru sampai di titik referensi terakhir, *drone* tersebut akan berada pada kondisi melayang menunggu *drone* lain mencapai titik referensi terakhir juga. Pada penelitian ini, *drone* A berhasil menemukan titik referensi terakhir, yaitu titik (429;156) pada detik 49. Sedangkan, *drone* B berhasil menemukan titik referensi terakhir, yaitu titik (429;351) pada detik 51. Dengan demikian, *drone* akan berada pada kondisi melayang mulai dari detik 49 hingga detik 51, sehingga kedua *drone* akan mendarat pada detik 51,317 sesuai dengan algoritma yang dirancang. Selain itu, Gambar 4.9 (b) menunjukkan bahwa jarak antar *drone* berada pada nilai rata-rata 232,2 cm.



(a)



(b)

**Gambar 4.12.** Hasil pengujian tugas pemetaan (a) posisi *drone* pada koordinat *cartesius* dan (b) jarak tiap *drone* relatif terhadap waktu.

Untuk mengetahui performa antar *drone* dalam melakukan tugas pemetaan sesuai dengan jalur yang ditentukan, maka perhitungan performa tersebut menggunakan RMSE, seperti penelitian sebelumnya. Perhitungan RMSE dilakukan dengan menghitung galat antara posisi *drone* secara aktual dengan titik referensi yang diberikan. Dengan demikian, hasil yang didapat oleh *drone* A adalah 12,3 cm dan *drone* B adalah 22,5 cm. Selain itu, jarak tempuh tiap *drone* untuk melakukan tugas pemetaan jika dihitung mulai berdasarkan posisi awal hingga akhir dapat dilihat pada Tabel 4.5. Dengan demikian, pengujian untuk tugas untuk kedua *drone* pada penelitian ini memberikan performa yang baik dengan luas area tugas yang terbatas, yaitu sebesar 420 cm x 350 cm.



**Tabel 4.5.** Data hasil tugas pemetaan.

	<b>Jarak Tempuh</b>	<b>Waktu Tempuh</b>	<b>Error<sub>d</sub></b>	<b>RMSE</b>
<b><i>Drone A</i></b>	1405,5 cm	49 detik	151,4 cm <sup>2</sup>	12,3 cm
<b><i>Drone B</i></b>	1405,5 cm	51 detik	507,4 cm <sup>2</sup>	22,5 cm