



# **SISTEM PENGENDALIAN *COMBINE HARVESTER* TANPA AWAK UNTUK LAHAN SAWAH**

**SETYA PERMANA SUTISNA**



**ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2021**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



### *@Hak cipta milik IPB University*

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Sistem Pengendalian *Combine Harvester* Tanpa Awak Untuk Lahan Sawah” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Januari 2021

Setya Permana Sutisna  
F163150061

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## RINGKASAN

SETYA PERMANA SUTISNA. Sistem Pengendalian *Combine Harvester* Tanpa Awak Untuk Lahan Sawah. Dibimbing oleh TINEKE MANDANG, I DEWA MADE SUBRATA dan RADITE PRAEKO AGUS SETIAWAN.

Salah satu faktor pendorong perkembangan kendaraan pertanian otomatis adalah masalah tenaga kerja. Pekerjaan bidang pertanian khususnya *onfarm* merupakan pekerjaan tidak menarik bagi sebagian besar angkatan kerja. Pekerjaan fisik yang berat, penghasilan yang kecil dan tidak menentu menjadi alasan utama. Hal ini tidak hanya terjadi di Indonesia bahkan negara-negara lain di dunia. Selain itu, ketepatan pekerjaan operator dalam mengoperasikan kemudi bergantung pada keterampilan dan mental operator tersebut. Ketidaktepatan ini dapat mengakibatkan penurunan produktivitas dan efisiensi sehingga mendorong kebutuhan akan kemudi otomatis.

Luas areal sawah di Indonesia tahun 2019 menurut Badan Pusat Statistik (BPS) sebesar 7,46 juta hektar yang terus meningkat seiring dengan program pemerintah guna memenuhi kebutuhan pangan rakyat Indonesia. Salah satu masalah yang timbul yaitu waktu panen yang hampir bersamaan, terutama saat panen raya membuat para petani mengalami kesulitan untuk mendapatkan tenaga bantuan dari buruh tani. Selain itu, biaya upah yang semakin tinggi memperburuk masalah yang dihadapi yang berdampak pada terjadinya keterlambatan pemanenan. Padi yang terlambat dipanen membuat mutu gabah yang dihasilkan dan harga jualnya menjadi turun. Sehingga mesin *combine harvester* tanpa awak akan menjadi solusi kebutuhan pertanian Indonesia di masa yang akan datang.

Otomatisasi kendaraan pertanian sangat bergantung pada jenis dan fungsi mesin, sensor navigasi, algoritma pengendalian, aktuator, metode komputasi, perangkat elektronik, dan lingkungan kerja. Hal ini membuat, penelitian otomatisasi kendaraan pertanian masih menarik bagi peneliti untuk terus dikembangkan. Selain itu, kemajuan teknologi sensor dan perangkat komputasi juga menjadi ketertarikan tersendiri untuk diaplikasikan. Oleh karena itu, penelitian sistem pengendalian *combine harvester* tanpa awak ini dilakukan.

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan sistem pengendalian *combine harvester otonom*. Sistem kemudi *two-row head-feeding combine harvester* yang dikendalikan menggunakan operator dimodifikasi sehingga menjadi mesin yang dapat beroperasi sendiri mengikuti lintasan pola kerja yang telah ditentukan. Akurasi sistem pengendalian yang tinggi diharapkan mampu memanen dengan baik dengan jumlah tanaman padi yang tidak terpanen sedikit. Mesin dapat bekerja mengikuti pola kerja pemanenan yang bekerja menyusuri setiap sisi lahan.

Kegiatan penelitian dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu pemodelan gerak kendaraan *differential-steering*, pembuatan mekanisme penggerak tuas-tuas kemudi, sensor kecepatan trek roda, pengembangan sistem pengendalian, dan pengendalian belok pada ujung lintasan. Selanjutnya, pengujian akhir dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendalian yang telah dibuat dalam mengikuti lintasan acuan.

Pemodelan gerak kendaraan diketahui bahwa sistem gerak *combine harvester* mengikuti model gerak *differential-steering*. Sensor navigasi yang digunakan terdiri dari sensor giroskop dan *rotary encoder* yang digunakan untuk mengukur

kecepatan masing-masing roda trek. Berdasarkan informasi data dari sensor tersebut, posisi model ditentukan menggunakan navigasi *dead reckoning*. Cara ini dapat menentukan posisi berdasarkan arah gerak dan kecepatan maju. Pengendalian gerak model agar dapat mengikuti jalur referensi menggunakan pengendalian PID odometer. Kecepatan masing-masing roda trek ditentukan berdasarkan eror posisi dan orientasi. Hasil pengujian tahap ini menunjukkan bahwa model sistem pengendalian lintasan menunjukkan eror lateral rata-rata sebesar 0,26 cm.

Pembuatan mekanisme penggerak tuas-tuas kemudi telah dilakukan pada pedal kopling, tuas gigi maju-mundur, tuas *feeder* dan tuas setir. Hasil pengujian mekanisme penggerak menunjukkan masing-masing mekanisme dapat bergerak sesuai dengan perintah dari mikrokontroler. Kebutuhan waktu masing-masing mekanisme untuk menggerakkan tuas-tuas kemudi menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan menekan pedal kopling sebesar 1,26 s, perubahan posisi tuas gigi maju-mundur sebesar 1,73 s, waktu untuk menarik tuas *feeder* sebesar 1,13 s, dan tuas setir sebesar 0,74 s.

Pengukuran kecepatan yang andal dan akurat merupakan hal yang penting dalam sistem pemandu kendaraan otonom seperti pada mesin *combine harvester* otonom. Pemantauan dan pengukuran kecepatan rotasi untuk setiap trek dapat digunakan untuk memperkirakan orientasi *combine harvester*. Pada tahap ini dilakukan kajian penggunaan sensor *proximity* untuk mengukur kecepatan masing-masing trek *combine*. Sensor *proximity* mendeteksi gigi pada roda gigi trek sehingga menghasilkan sinyal pulsa. Analisis output sinyal dilakukan dengan dua cara untuk menentukan kecepatan putar masing-masing trek yaitu dengan cara menghitung frekuensi dan dengan menghitung periode gelombang keluaran sensor *proximity*. Kecepatan putar trek roda yang kecil berkisar 15 rpm sampai 50 rpm menghasilkan output sinyal sensor *proximity* dengan frekuensi yang rendah. Frekuensi yang dihasilkan berkisar 1 Hz sampai 5 Hz sehingga kecepatan trek 15 – 50 rpm diplot dalam rentang frekuensi 1-5 Hz. Sehingga, metode lain yang dapat digunakan adalah dengan mengukur waktu periode gelombang tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa eror rata-rata pengukuran kecepatan putar dengan mengukur frekuensi sebesar 4,2 rpm sedangkan menggunakan pengukuran waktu periode 1,3 rpm.

Sistem pengendalian *combine harvester* yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan sensor navigasi RTK-GPS, giroskop, dan sensor *proximity* untuk mengukur kecepatan roda trek. Pengujian sistem dilakukan pada kecepatan maju 0,17 m/s dan frekuensi pengukuran sensor navigasi 5 Hz. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *combine harvester* otonom mampu mengiktui lintasan pemanenan. Rata-rata eror lateral *combine* pada lintasan lurus sebesar 0,081 m.

Kata kunci: *combine harvester*, sensor navigasi, sistem pengendalian otonom.

## SUMMARY

SETYA PERMANA SUTISNA. Unmanned Combine Harvester Control Systems for Paddy Field. Supervised by TINEKE MANDANG, I DEWA MADE SUBRATA and RADITE PRAEKO AGUS SETIAWAN.

One of the driving factors for the development of automatic vehicles is labor. Jobs in agriculture, especially on farm, are unattractive jobs for a large part of the workforce. Hard physical work, small income, and uncertain income is the main reason. This does not only happen in Indonesia, but even in other countries in the world. In addition, the accuracy of the operator's job in operating controls on mental skills and operators. This inaccuracy can result in decreased productivity and the need to push for automatic steering.

The area of rice fields in Indonesia in 2019 according to the Central Statistics Agency (BPS) was 7,46 million hectares which continues to increase in line with government programs to meet the food needs of the Indonesian people. One of the problems that arise is that the harvest time is almost at the same time, especially during the main harvest, making it difficult for farmers to get help from farm laborers. In addition, higher wage costs exacerbate the problems faced, which results in delays in harvesting. Rice that is harvested late makes the quality of the grain produced, and the selling price drops. So that the unmanned combine harvester machine will be a solution to Indonesia's agricultural needs in the future.

The automation of agricultural vehicles is highly dependent on the type and function of engines, navigation sensors, control algorithms, actuators, computational methods, electronic devices, and the work environment. This makes agricultural vehicle automation research still attractive for researchers to continue to develop. In addition, advances in sensor technology and computing devices are of particular interest to be applied. Therefore, research on the unmanned combine harvester control system was carried out.

This research was focusing on the development of an autonomous combine harvester control system. The operator-controlled two-row head-feeding combine harvester steering system was modified so that it becomes a self-propelled machine following a predetermined work pattern trajectory. The high accuracy of the control system was expected to be able to harvest well with a small number of unharvested rice plants. Machines can follow a harvesting pattern running along each side of the field.

The research activity was carried out in several stages, namely modeling the motion of the differential-steering vehicle, manufacturing the steering levers drive mechanism, wheel track speed sensors, developing the control system, and turn control at the end of tracks. Furthermore, the final test is carried out to evaluate the performance of the control system that has been made in following the reference path.

Modeling the vehicle motion shows that the combine harvester motion system follows the differential-steering model. The navigation sensor used consists of a gyroscope sensor and a rotary encoder which is used to measure the speed of each trackwheel. Based on data information from these sensors, the model position is determined using dead reckoning navigation. This method can determine the position based on the direction of motion and speed forward. Control of mode



motion in order to follow the reference path using the odometer PID control. The speed of each track wheel is determined based on the position and orientation error. The test results at this stage indicate that the track control system model shows an average lateral error of 0,26 cm.

The making of the driving mechanism for the steering levers has been carried out on the clutch pedal, forward and backward gear lever, feeder lever, and steering lever. The results of the driving mechanism test show that each mechanism can move according to the command from the microcontroller. The time needed for each mechanism to move the steering levers shows that the time required to sign the clutch lever is 1,26 s, the change in the position of the transmission lever is 1,73 s, the time to pull the feeder lever is 1,13 s, and the steering lever is 0,74 s.

Reliable and accurate speed measurement is essential in autonomous vehicle guidance systems such as on an autonomous combine harvester. Monitoring and measurement of rotational speed for each track can be used to estimate the orientation of the combine harvester. At this stage, a study of the use of the proximity sensor was conducted to measure the speed of each track combine. The proximity sensor detects a gear on the track gear, thereby generating a pulse signal. Signal output analysis is performed to determine the rotational speed of each track. Small wheel track rotations ranging from 15 rpm to 50 rpm produce a low-frequency proximity sensor signal output. The resulting frequency ranges from 1 Hz to 5 Hz so that the track speed of 15 - 50 rpm is plotted in the 1-5 Hz frequency range. So, another method that can be used is to measure the time period of the wave.

The test results show that the average error of measuring the rotational speed by measuring the frequency is 4,2 rpm while using a time measurement period of 1,3 rpm.

The combine harvester control system developed in this study uses RTK-GPS navigation sensors, gyroscopes, and proximity sensors to measure the speed of the track wheels. System testing is carried out at a forward speed of 0,17 m / s and a measurement frequency of 5 Hz navigation sensors. The test results showed that the autonomous combine harvester was able to follow the harvesting trajectory. The mean lateral combine error in a straight line is 0,081 m.

*Keywords: autonomous control system, combine harvester, navigation sensors.*



© Hak Cipta milik IPB, tahun 2021  
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

*Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.*

*Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.*





# **SISTEM PENGENDALIAN *COMBINE HARVESTER* TANPA AWAK UNTUK LAHAN SAWAH**

**SETYA PERMANA SUTISNA**

Disertasi  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Doktor pada  
Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian

**ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2021**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:**

- 1 Dr. Ir. Desrial, M.Eng., IPU.
- 2 Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si.

**Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:**

- 1 Dr. Ir. Desrial, M.Eng., IPU
- 2 Dr. Ir. Muhammad Hariansyah, S.T., M.T.

Judul Disertasi : Sistem Pengendalian *Combine Harvester* Tanpa Awak Untuk  
Lahan Sawah  
Nama : Setya Permana Sutisna  
NIM : F163150061

Disetujui oleh

Pembimbing 1:  
Prof. Dr. Ir. Tineke Mandang, M.S.



Pembimbing 2:  
Dr. Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr.

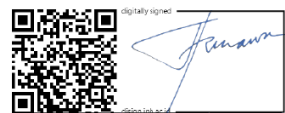


Pembimbing 3:  
Dr. Ir. Radite Praeko Agus Setiawan, M.Agr.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:  
Dr. Ir. Wawan Hermawan, M.S.  
NIP. 196303231987031002



Dekan Sekolah Pascasarjana:  
Prof. Dr. Ir. Anas Miftah Fauzi, M.Eng.  
NIP. 196004191985031002



Tanggal Ujian Tertutup: 22 Januari 2021      Tanggal Lulus: 29 Januari 2021

## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Februari 2017 sampai bulan Januari 2021 ini ialah pengembangan sistem pengendalian kendaraan pertanian, dengan judul “Sistem Pengendalian *Combine Harvester* Tanpa Awak Untuk Lahan Sawah”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing Ibu Prof. Dr. Ir. Fineke Mandang, M.S., Bapak Dr. Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr., dan Bapak Dr. Ir. Radite Praeko Agus Setiawan, M.Agr. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Wawan Hermawan, M.S. selaku ketua program studi Ilmu Keteknikan Pertanian, Bapak Dr. Ir. Desrial, M.Eng., IPU., Bapak Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si., dan Bapak Dr. Ir. Muhammad Hariansyah, S.T.,M.T. selaku penguji luar komisi pembimbing yang telah banyak memberi masukan dan saran. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Dr. H. Didi Hilman, S.H., M.H., M.Pd.I. sebagai ketua yayasan Pendidikan Ibn Khaldun Bogor, Bapak Dr. H. Endin Mujahidin, M.Si sebagai rektor Universitas Ibn Khaldun Bogor, Bapak Dr. H. M. Nanang Prayudyanto, M.Sc sebagai dekan Fakultas Teknik dan Sains UIKA Bogor, Bapak Dr. H. Ending Bahrudin, M.Ag., Bapak Dr. Ir. Yogi Sirodz Gaos, M.T., serta seluruh rekan sejawat Universitas Ibn Khaldun Bogor yang telah memberi semangat, motivasi, dan doa. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh pimpinan dan staf Sekolah Pascasarjana, Fakultas Teknologi Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, serta Laboratorium Lapangan Siswadi Supardjo, Institut Pertanian Bogor atas pelayanan dan fasilitas yang telah diberikan. Terima kasih kepada rekan-rekan seperjuangan mahasiswa program doktor Ilmu Keteknikan Pertanian IPB, khususnya Angkatan 2015 atas semangat, kerjasama, doa, dan pertukaran pikiran. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada kedua orang tua (Bapak Ir. Entis Sutisna, M.Si. dan Ibu Ir. Hj. Subaeda Ruku), istri (Irna Erliana, S.Pd), anak (Kayla Anugrah Permana), serta seluruh keluarga dan sahabat, atas segala dukungan, doa dan kasih sayangnya.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Januari 2021

*Setya Permana Sutisna*

## DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Kebaruan ( <i>novelty</i> )	5
<b>II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>6</b>
<b>III IDENTIFIKASI SISTEM DAN KARAKTERISTIK KONTROL KEMUDI MODEL <i>COMBINE HARVESTER</i></b>	<b>9</b>
3.1 Pendahuluan	9
3.2 Metode Penelitian	10
3.3 Hasil dan Pembahasan	13
3.4 Simpulan	18
<b>IV RANCANG BANGUN MEKANISME PENGGERAK PENGENDALI OTOMATIS TUAS-TUAS KEMUDI <i>COMBINE HARVESTER</i></b>	<b>19</b>
4.1 Pendahuluan	19
4.2 Metode Penelitian	20
4.3 Hasil dan Pembahasan	28
4.4 Simpulan	30
<b>V PENGUKURAN KECEPATAN TREK <i>COMBINE HARVESTER</i> MENGUNAKAN SENSOR <i>PROXIMITY</i> INDUKTIF</b>	<b>31</b>
5.1 Pendahuluan	31
5.2 Metode Penelitian	31
5.3 Hasil dan Pembahasan	33
5.4 Simpulan	37
<b>VI SISTEM PENGENDALIAN <i>COMBINE HARVESTER</i> OTOMATIS</b>	<b>38</b>
6.1 Pendahuluan	38
6.2 Metode Penelitian	39
6.3 Hasil dan Pembahasan	44
6.4 Simpulan	50
<b>VII PENGENDALIAN BELOK <i>COMBINE HARVESTER</i> PADA UJUNG LINTASAN</b>	<b>51</b>
7.1 Pendahuluan	51
7.2 Metode Penelitian	52
7.3 Hasil dan Pembahasan	56
7.4 Simpulan	62
<b>VIII PEMBAHASAN UMUM</b>	<b>63</b>



IX	SIMPULAN DAN SARAN	66
9.1	Simpulan	66
9.2	Saran	66
	DAFTAR PUSTAKA	67
	LAMPIRAN	71
	RIWAYAT HIDUP	82

Hak Cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## DAFTAR TABEL

1	Tabel 1 Perbandingan bagian-bagian model dan riil	11
2	Tabel 2 Hasil pengujian mekanisme penggerak	29
3	Tabel 3 Spesifikasi sensor induktif	32
4	Tabel 4 Spesifikasi <i>combine harvester</i>	39

## DAFTAR GAMBAR

1	Gambar 1 Bagan alir tahapan penelitian	4
2	Gambar 2 Elemen dasar kendaraan pertanian otomatis (Reid <i>et al.</i> 2000)	6
3	Gambar 3 Diagram alir penelitian identifikasi karakteristik kemudi	10
4	Gambar 4 Desain model fisik <i>combine harvester</i>	11
5	Gambar 5 Posisi relatif kendaraan, eror posisi, dan orientasi	12
6	Gambar 6 Sistem kendali model <i>combine harvester</i>	13
7	Gambar 7 Respon waktu kecepatan linier trek motor	14
8	Gambar 8 Perubahan orientasi model terhadap waktu	14
9	Gambar 9 Uji simulasi persamaan PID	15
10	Gambar 10 Pengujian <i>approaching</i>	16
11	Gambar 11 Letak spidol sebagai penanda jejak model <i>combine harvester</i>	16
12	Gambar 12 Pengujian lisan garis lurus	17
13	Gambar 13 Uji garis lurus pada kondisi nyata	17
14	Gambar 14 Pengujian belok model <i>combine harvester</i>	18
15	Gambar 15 Diagram alir rancang bangun mekanisme penggerak tuas.	20
16	Gambar 16 Posisi pedal kopling	21
17	Gambar 17 Desain mekanisme empat batang hubung penggerak pedal kopling	22
18	Gambar 18 Poligon vektor kecepatan sudut mekanisme penggerak pedal kopling	23
19	Gambar 19 Posisi tuas transmisi	23
20	Gambar 20 Desain mekanisme empat batang hubung penggerak tuas transmisi	24
21	Gambar 21 Poligon kecepatan linier mekanisme empat batang hubung transmisi	24
22	Gambar 22 Posisi tuas transmisi	25
23	Gambar 23 Desain mekanisme penggerak tuas <i>feeder</i>	25
24	Gambar 24 Poligon kecepatan mekanisme penggerak tuas <i>feeder</i>	26
25	Gambar 25 Posisi tuas setir <i>combine harvester</i>	26
26	Gambar 26 Desain mekanisme penggerak tuas setir	27
27	Gambar 27 Pemasangan mekanisme penggerak pedal kopling	27
28	Gambar 28 Pemasangan mekanisme penggerak tuas transmisi	28
29	Gambar 29 Pemasangan mekanisme penggerak tuas <i>feeder</i>	29
30	Gambar 30 Pemasangan mekanisme penggerak tuas setir	29

31	Gambar 31 Diagram pengukuran kecepatan trek menggunakan sensor <i>proximity</i>	32
32	Gambar 32 Posisi sensor induktif	33
33	Gambar 33 Diagram akuisisi data	34
34	Gambar 34 Pengukuran frekuensi pulsa keluaran	34
35	Gambar 35 Model kendaraan penggerak diferensial (Suguri <i>et al.</i> 2004)	35
36	Gambar 36 Interval waktu untuk satu periode pulsa keluaran	35
37	Gambar 37 Pulsa keluaran sensor jarak induktif pada 15,5 rpm	36
38	Gambar 38 Uji validasi	36
39	Gambar 39 <i>Combine harvester</i> otonom	39
40	Gambar 40 Posisi sensor jarak	40
41	Gambar 41 Diagram skematik sistem kendali	40
42	Gambar 42 Mekanisme penggerak tuas kemudi	41
43	Gambar 43 Algoritma pengendalian <i>combine harvester</i> otonom	42
44	Gambar 44 Model kendaraan roda dua dengan kemudi diferensial	42
45	Gambar 45 Error lateral dan heading <i>combine harvester</i>	43
46	Gambar 46 Perencanaan jalur kerja <i>combine</i>	44
47	Gambar 47 Pengujian sensor RTK-GPS	45
48	Gambar 48 Pengujian akurasi sensor giroskop	45
49	Gambar 49 Pengujian akurasi sensor kecepatan trek roda	46
50	Gambar 50 Tes belok <i>combine harvester</i>	47
51	Gambar 51 Pengujian <i>approaching</i> pengendalian <i>combine harvester</i>	47
52	Gambar 52 Pengujian <i>combine harvester</i> mengikuti jalur lintasan lurus	48
53	Gambar 53 Jalur referensi dan jalur <i>combine</i> sebenarnya	49
54	Gambar 54 Akar kuadrat rata-rata error lateral pada jalur lintasan lurus	49
55	Gambar 55 <i>Combine harvester</i> otomatis	52
56	Gambar 56 Diagram alir penelitian pengendalian belok	53
57	Gambar 57 Posisi letak antena GPS dan ujung <i>header</i>	54
58	Gambar 58 Dua metode belok pada ujung lintasan	54
59	Gambar 59 Algoritma pengendalian berbelok langsung 90°	55
60	Gambar 60 Algoritma pengendalian belok dengan gerak mundur	56
61	Gambar 61 Proses perubahan orientasi <i>combine</i>	57
62	Gambar 62 Rata-rata perubahan sudut <i>heading</i> terhadap waktu	57
63	Gambar 63 Posisi riil antena GPS	58
64	Gambar 64 Koordinat posisi antena GPS dan ujung <i>header</i>	58
65	Gambar 65 Proses berbelok langsung 90° di ujung lintasan	59
66	Gambar 66 (a) Tanaman yang akan dipanen, (b) tanaman yang tidak terpanen pada saat belok	59
67	Gambar 67 Area tanaman tidak terpanen pada bagian tengah lahan	60
68	Gambar 68 Proses belok dengan gerakan mundur di ujung lintasan	60
69	Gambar 69 Pembagian area kombinasi metode belok langsung dan gerakan mundur	61
70	Gambar 70 Hasil pengujian pemanenan <i>combine harvester</i> otomatis	64

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Spesifikasi <i>Arduino Mega 2560</i>	72
---	----



2	Lampiran 2 Spesifikasi sensor <i>proximity</i>	73
3	Lampiran 3 Spesifikasi sensor giroskop	74
4	Lampiran 4 Spesifikasi Raspberry Pi4	75
5	Lampiran 5 Spesifikasi RTK GPS	76
6	Lampiran 6 Desain mekanisme penggerak kemudi	77
7	Lampiran 7 Desain mekanisme penggerak stir	78
8	Lampiran 8 Desain mekanisme penggerak tuas transmisi	79
9	Lampiran 9 Desain mekanisme penggerak <i>header</i>	80
10	Lampiran 10 Desain mekanisme penggerak kopling	81

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



### *@Hak cipta milik IPB University*

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.