

Tugas Akhir-SF234801

Aplikasi DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*) Sebagai Alat Ukur Kecepatan Untuk Navigasi Robot Bawah Air

ANTONIUS WIJAYA
NRP 5001211068

Dosen Pembimbing
Drs. Bachtera Indarto, M.Si.
NIP 19610404 199102 1 001
Diky Anggoro, M. Si.
NIP 19850809 201404 1 003

Program Studi Sarjana Fisika
Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025



Tugas Akhir-SF234801

Aplikasi DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*) Sebagai Alat Ukur Kecepatan Untuk Navigasi Robot Bawah Air

ANTONIUS WIJAYA

NRP 5001211068

Dosen Pembimbing

Drs. Bachtera Indarto, M.Si.

NIP 19610404 199102 1 001

Diky Anggoro, M. Si.

NIP 19850809 201404 1 003

Program Studi Sarjana Fisika

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



Final Project-SF234801

DPSS Application (Differential Pressure Sensor Speedometer) As a Speed Measurement Instrument for Underwater Robot Navigation

ANTONIUS WIJAYA
NRP 5001211068

Advisors

Drs. Bachtera Indarto, M.Si.
NIP 19610404 199102 1 001
Diky Anggoro, M. Si.
NIP 19850809 201404 1 003

Department of Physics
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025

LEMBAR PENGESAHAN

Aplikasi DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*) Sebagai Alat Ukur Kecepatan Untuk Navigasi Robot Bawah Air

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada:

Program Studi S-1 Fisika

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

Oleh:

ANTONIUS WIJAYA

5001211068

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Drs. Bachtera Indarto, M.Si.

Pembimbing

2. Diky Anggoro, M. Si.

Ko-Pembimbing

3. Iim Fatimah, M.Si.

Penguji

4. Dr. Muhammad Arief Bustomi, M.Si.

Penguji



Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Antonius Wijaya /5001211068
Program studi : Fisika
Dosen Pembimbing / NIP : Drs. Bachtera Indarto, M.Si.
19610404 199102 1 001
Diky Anggoro, M. Si.
19850809 201404 1 003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Aplikasi DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*) Sebagai Alat Ukur Kecepatan Untuk Navigasi Robot Bawah Air " adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 10 Juni 2025

Mahasiswa



Antonius Wijaya
NRP 5001211068

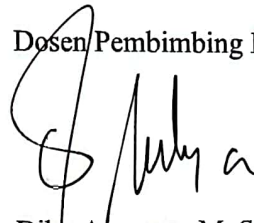
Mengetahui,

Dosen Pembimbing I



Drs. Bachtera Indarto, M.Si.
NIP 19610404 199102 1 001

Dosen Pembimbing II



Diky Anggoro, M. Si.
NIP 19850809 201404 1 003

ABSTRAK

Aplikasi DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*) Sebagai Alat Ukur Kecepatan Untuk Navigasi Robot Bawah Air

Nama Mahasiswa/ NRP : Antonius Wijaya / 5001211068
Departemen : Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Analitika Data
Dosen Pembimbing : 1. Drs. Bachtera Indarto, M.Si.
2. Diky Anggoro, M. Si.

Abstrak

Navigasi pada wahana bawah air otonom merupakan sebuah tantangan besar, terutama dalam mengestimasi kecepatan geraknya secara akurat, mengingat solusi konvensional seperti *Doppler Velocity Log* (DVL) seringkali tidak praktis karena biayanya yang tinggi untuk aplikasi pada wahana kecil. Untuk menjawab permasalahan ini, maka dikembangkan sebuah inovasi berupa *Differential Pressure Sensor Speedometer* (DPSS) sebagai alternatif yang lebih efisien dan terjangkau. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem DPSS, untuk melakukan analisis terhadap kinerja sensor perbedaan tekanan dalam kondisi lingkungan bawah air, serta untuk mengukur kecepatan gerak DPSS dan jarak tempuhnya. Metode yang dilakukan adalah dengan menggerakkan DPSS pada kecepatan tertentu, data yang didapatkan adalah data perbedaan tekanan dari sensor, yang kemudian diolah menjadi data kecepatan dan dibandingkan nilainya dengan kecepatan referensi, setelah itu data kecepatan diolah dengan integrasi numerik metode trapesium untuk mendapatkan jarak tempuh. Variasi yang digunakan adalah variasi *enclosing angle* pada sudut 30° , 60° , dan 90° , serta variasi kecepatan 0,3 m/s hingga 0,65 m/s. Hasil data menunjukkan bahwa nilai sensitivitas rata-rata untuk sensor 1 sekitar 0,833 V/kPa dan untuk sensor 2 sekitar 0,8 V/kPa. Didapatkan juga error kecepatan yaitu 4,22% pada variasi sudut 30° , 2,53% pada sudut 60° , dan 3,28% pada sudut 90° . Sedangkan error pada pengukuran jarak, yaitu yaitu 2,3% pada variasi sudut 30° , 2,65% pada sudut 60° , dan 2,3% pada sudut 90° .

Kata kunci: Bernoulli, DPSS, kecepatan, MPXV7002DP, tekanan.

ABSTRACT

DPSS Application (Differential Pressure Sensor Speedometer) As a Speed Measurement Instrument for Underwater Robot Navigation

Student Name/ NRP : Antonius Wijaya / 5001211068
Department : Department of Physics, Faculty of Science and Data Analytics
Advisors : 1. Drs. Bachtera Indarto, M.Si.
2. Diky Anggoro, M. Si.

Abstract

Navigation for autonomous underwater vehicles presents a significant challenge, particularly in accurately estimating their velocity, given that conventional solutions like the Doppler Velocity Log (DVL) are often impractical for small-scale applications due to their high cost. To address this problem, an innovation in the form of a Differential Pressure Sensor Speedometer (DPSS) has been developed as a more efficient and affordable alternative. The objectives of this research are to develop a DPSS system, to analyze the performance of the pressure differential sensor under underwater environmental conditions, and to measure the speed of the DPSS and its travel distance. The method used is to move the DPSS at a certain speed, the data obtained is the pressure difference data from the sensor, which is then processed into speed data and compared to the reference speed, after which the speed data is processed by numerical integration of the trapezoidal method to obtain the distance traveled. The variations used are enclosing angle variations of 30°, 60°, and 90°, and velocity variations of 0.3 m/s to 0.65 m/s. The data results show that the average sensitivity value for sensor 1 is about 0.833 V/kPa and for sensor 2 is about 0.8 V/kPa. Speed errors were also obtained, namely 4.22% at a 30° angle variation, 2.53% at a 60° angle, and 3.28% at a 90° angle. While the error in distance measurement is 2.3% at an angle variation of 30°, 2.65% at an angle of 60°, and 2.3% at an angle of 90°.

Keywords:*Bernoulli, DPSS, MPXV7002DP, pressure, speed.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat dan penyertaan-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitiannya yang hasilnya tertuang dalam laporan penelitian dengan judul ”**Aplikasi DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*) Sebagai Alat Ukur Kecepatan Untuk Navigasi Robot Bawah Air** ”. Tentu penulis tidak bisa menyelesaikan ini tanpa dukungan berbagai pihak yaitu:

1. Keluarga di rumah yang senantiasa memberikan banyak sekali dukungan secara terus menerus, sehingga membuat saya selalu bersemangat dan termotivasi untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Drs. Bachtera Indarto, M.Si. & Diky Anggoro, M. Si. selaku dosen pembimbing selama mengerjakan penelitian Tugas Akhir.
3. Teman-teman Laboratorium Fisika Dasar, yang telah memberikan segala fasilitas yang penulis butuhkan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
4. Teman-teman mahasiswa fisika angkatan 2021, yang telah saling mendukung dan berjuang bersama dalam mengerjakan Tugas Akhir.

Penulis menyadari keterbatasan ilmu dan pengetahuan yang dimiliki, maka penulis menerima segala kritik dan saran membangun demi penulisan Tugas Akhir ini.

Surabaya, 10 Juni 2025

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR ISTILAH	xii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat	2
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Fluida	6
2.2.2 Prinsip Bernoulli	7
2.2.3 Tabung Pitot	8
2.2.4 Aliran Potensial	9
2.2.5 DPSS (<i>Differential Pressure Sensor Speedometer</i>)	10
2.2.6 MPXV7002DP	12
2.2.7 Arduino Nano	13
2.2.8 ADS1115	13
2.2.9 Sensor 49E	13
 BAB III METODOLOGI	 14
3.1 Metode Penelitian	14

3.1.1	Studi Literatur	14
3.1.2	Pemilihan Parameter	14
3.1.3	Penentuan Sensor	14
3.1.4	Penentuan Aktuator	14
3.1.5	Sistem Elektrik	14
3.1.6	Desain Mekanik	17
3.1.7	Pemrograman.....	19
3.1.8	Pembuatan Alat	19
3.1.9	Pengujian Sistem.....	22
3.2	Bahan dan Peralatan yang digunakan	23
3.3	Urutan Pelaksanaan Penelitian	24
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4.1	Hasil Penelitian	26
4.1.1	Hasil Pengujian Sistem Platform Penggerak.....	26
4.1.2	Hasil Pengujian Sistem DPSS	26
4.1.3	Hasil Pengukuran Kecepatan dan Jarak	28
4.2	Pembahasan	32
BAB V	PENUTUP	34
5.1	Kesimpulan.....	34
5.2	Saran.....	34
DAFTAR PUSTAKA		34
LAMPIRAN A		37
LAMPIRAN B		48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Arah Gaya pada Permukaan Sentuh Fluida Statis dengan Benda	6
Gambar 2.2	Aliran Fluida Melalui Pipa	7
Gambar 2.3	Skema Tabung Pitot	8
Gambar 2.4	Aliran Fluida Melewati Sebuah Silinder dengan Jari-Jari R	9
Gambar 2.5	Aliran Fluida Melalui DPSS	11
Gambar 2.6	Sensor MPXV7002	12
Gambar 2.7	Grafik Keluaran Tegangan Terhadap Perbedaan Tekanan Sensor MPXV7002DP	12
Gambar 2.8	Grafik Karakteristik Sensor 49E	13
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem DPSS	15
Gambar 3.2	Diagram Skematik DPSS	15
Gambar 3.3	Desain PCB DPSS	16
Gambar 3.4	Diagram Blok Sistem Platform Penggerak	16
Gambar 3.5	Diagram Skematik Platform Penggerak	17
Gambar 3.6	Desain PCB Platform Penggerak	17
Gambar 3.7	Desain 3D DPSS	18
Gambar 3.8	Desain 3D Platform Penggerak Keseluruhan	18
Gambar 3.9	Desain 3D Kolam Pengujian	19
Gambar 3.10	Foto DPSS	19
Gambar 3.11	Foto Box Elektrik Platform Penggerak	20
Gambar 3.12	Foto <i>Bracket</i> Platform Penggerak (a) Bagian Depan dan (b) Bagian Belakang	20
Gambar 3.13	Foto Platform Penggerak	21
Gambar 3.14	Foto Kolam Pengujian	21
Gambar 3.15	Foto DPSS dan Platform Penggerak di Dalam Kolam Pengujian	22
Gambar 3.16	Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3.17	Diagram Alir Pengambilan Data	25
Gambar 4.1	Grafik Kecepatan Platform Terhadap Tegangan Motor	26
Gambar 4.2	Grafik Sensitivitas Sensor Pada Sudut 30°	27
Gambar 4.3	Grafik Sensitivitas Sensor Pada Sudut 60°	27
Gambar 4.4	Grafik Sensitivitas Sensor Pada Sudut 90°	28

Gambar 4.5	Grafik Data Pada Sudut 30° Kecepatan 0,5 m/s (a) Grafik ΔP Terhadap Waktu, (b) Grafik Kecepatan Terhadap Waktu, dan (c) Grafik Jarak Terhadap Waktu	29
Gambar 4.6	Grafik Data Pada Sudut 60° Kecepatan 0,5 m/s (a) Grafik ΔP Terhadap Waktu, (b) Grafik Kecepatan Terhadap Waktu, dan (c) Grafik Jarak Terhadap Waktu	30
Gambar 4.7	Grafik Data Pada Sudut 90° Kecepatan 0,5 m/s (a) Grafik ΔP Terhadap Waktu, (b) Grafik Kecepatan Terhadap Waktu, dan (c) Grafik Jarak Terhadap Waktu	31
Gambar A.1	Grafik data pada sudut 30° kecepatan 0,6 m/s (a) grafik ΔP terhadap waktu, (b) grafik kecepatan terhadap waktu, dan (c) grafik jarak terhadap waktu	45
Gambar A.2	Grafik data pada sudut 60° kecepatan 0,6 m/s (a) grafik ΔP terhadap waktu, (b) grafik kecepatan terhadap waktu, dan (c) grafik jarak terhadap waktu	46
Gambar A.3	Grafik data pada sudut 90° kecepatan 0,6 m/s (a) grafik ΔP terhadap waktu, (b) grafik kecepatan terhadap waktu, dan (c) grafik jarak terhadap waktu	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hasil penelitian terdahulu	4
Tabel A.1	Data kecepatan pada berbagai variasi tegangan motor	39
Tabel A.2	Data tegangan keluaran sensor pada variasi tekanan dengan sudut 30°	39
Tabel A.3	Data tegangan keluaran sensor pada variasi tekanan dengan sudut 60°	40
Tabel A.4	Data tegangan keluaran sensor pada variasi tekanan dengan sudut 90°	40
Tabel A.5	Data ΔP kedua sensor pada sudut 30° variasi kecepatan 0,3-0,45 m/s	40
Tabel A.6	Data ΔP kedua sensor pada sudut 30° variasi kecepatan 0,5-0,65 m/s	41
Tabel A.7	Data ΔP kedua sensor pada sudut 60° variasi kecepatan 0,3-0,45 m/s	41
Tabel A.8	Data ΔP kedua sensor pada sudut 60° variasi kecepatan 0,5-0,65 m/s	42
Tabel A.9	Data ΔP kedua sensor pada sudut 90° variasi kecepatan 0,3-0,45 m/s	42
Tabel A.10	Data ΔP kedua sensor pada sudut 60° variasi kecepatan 0,5-0,65 m/s	43
Tabel A.11	Data perhitungan kecepatatan rata-rata DPSS semua variasi	43
Tabel A.12	Data perhitungan error kecepatatan DPSS semua variasi	43
Tabel A.13	Data perhitungan jarak tempuh DPSS semua variasi	44
Tabel A.14	Data perhitungan error jarak DPSS semua variasi	44

DAFTAR ISTILAH

- DPSS : *Differential Pressure Sensor SPeedometer*
- DVL : *Doppler Velocity Log*
- AUV : *Autonomus Underwater Vehicle*
- *Enclosing angle* : Sudut antara titik stagnasi dengan titik pengukuran

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemampuan untuk mengetahui kecepatan pada wahana bawah air otonom seperti AUV sangat penting untuk navigasi yang efektif. Hal ini memungkinkan AUV untuk melakukan misi secara mandiri dalam jangka waktu yang lama, seperti memantau dan mengambil sampel di bawah air. Tantangannya, metode navigasi umum seperti GPS tidak dapat diandalkan karena sinyalnya tidak bisa menembus air. Salah satu solusi yang umum digunakan untuk mengukur kecepatan di bawah air adalah dengan sensor DVL, yang mampu memberikan estimasi kecepatan yang akurat dengan memanfaatkan gelombang akustik dan efek Doppler. Meskipun DVL cukup efektif, harganya yang mahal akan menjadi suatu kendala, terutama pada AUV yang dirancang untuk operasi dengan biaya rendah. Oleh karena itu, sangat dibutuhkan sebuah alternatif pengukuran kecepatan yang lebih murah namun tetap efisien, sehingga AUV dapat dioperasikan dengan baik di bawah air (Fuentes-Pérez dkk., 2018).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan sistem pengukuran kecepatan yang andal dan akurat untuk AUV. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan sensor perbedaan tekanan, yang telah terbukti efektif dalam mengukur kecepatan aliran air. Sensor ini bekerja dengan mengukur perbedaan tekanan antara dua titik, yang memungkinkan estimasi kecepatan aliran yang lebih akurat dibandingkan dengan metode mekanik seperti sensor *flowmeter*. Penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa sensor perbedaan tekanan juga dapat digunakan untuk memberikan estimasi kecepatan pada AUV, bahkan dalam kondisi kecepatan yang bervariasi, serta mampu mendeteksi fluktuasi yang disebabkan oleh gerakan kendaraan.

Dengan mengandalkan sensor perbedaan tekanan, AUV dapat mengatasi tantangan yang dihadapi dalam navigasi bawah air. Selain itu, sistem ini dapat diintegrasikan dengan teknologi lain, seperti sensor inersia dan sistem navigasi berbasis akustik, untuk meningkatkan akurasi dan keandalan navigasi. Oleh karena itu, pengembangan dan penerapan sensor perbedaan tekanan dalam estimasi kecepatan AUV tidak hanya meningkatkan kemampuan navigasi, tetapi juga membuka peluang baru untuk eksplorasi dan penelitian di lingkungan laut yang sulit dijangkau (Meurer dkk., 2020). Dengan latar belakang ini, maka penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi potensi sensor perbedaan tekanan, terlebih sebagai pengukuran kecepatan untuk robot bawah air.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, diperoleh permasalahan yang akan dikaji pada penelitian ini, yaitu :

1. Bagaimana mengembangkan sistem DPSS, yakni pengukuran kecepatan berdasarkan prinsip perbedaan tekanan.
2. Bagaimana melakukan analisis terhadap kinerja sensor perbedaan tekanan dalam kondisi lingkungan bawah air, khususnya pada kecepatan rendah.
3. Bagaimana mengukur kecepatan gerak DPSS dan jarak tempuhnya.

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah, diperoleh tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini, yaitu :

1. Mengembangkan sistem DPSS, yakni pengukuran kecepatan berdasarkan prinsip perbedaan tekanan.
2. Melakukan analisis terhadap kinerja sensor perbedaan tekanan dalam kondisi lingkungan bawah air, khususnya pada kecepatan rendah.
3. Mengukur kecepatan gerak DPSS dan jarak tempuhnya.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan dalam rentang $0,3 \text{ m/s}$ hingga $0,65 \text{ m/s}$, tiap kenaikan $0,05 \text{ m/s}$.
2. *Enclosing angle* yang digunakan adalah 30° , 60° , dan 90° .
3. Fluida yang digunakan adalah air keran pada suhu ruangan dengan massa jenis 1000 kg/m^3 .
4. Pengujian dilakukan pada kolam pengujian dengan dimensi $165 \times 23 \times 37 \text{ cm}$, dengan kedalaman air 18 cm .

1.5 Manfaat

Penulisan laporan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain :

1. Pengembangan Teknologi Robot Bawah Air

Dengan kemampuan mengukur kecepatan secara tepat, DPSS meningkatkan navigasi dan posisi robot di lingkungan bawah air yang dinamis. Selain itu, DPSS lebih murah, dan lebih mudah diterapkan dibandingkan sensor kecepatan lainnya seperti DVL.

2. Aplikasi Praktis

DPSS juga memiliki potensi luas dalam pengukuran kecepatan aliran air di sungai dan saluran lainnya. DPSS dapat mengukur kecepatan aliran pada kecepatan rendah. DPSS tidak menggunakan sistem mekanik, sehingga lebih tahan lama dan ideal untuk berbagai aplikasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengukuran kecepatan dengan menggunakan sensor perbedaan tekanan sudah cukup banyak diteliti, seperti yang dilakukan oleh Fuentes-Pérez dkk. (2016). Penelitian tersebut dilakukan untuk mengembangkan sistem pengukuran kecepatan aliran air menggunakan sensor tekanan diferensial, khususnya sensor SSCDRRN005ND2A5. Penelitian ini menggunakan variasi sudut serangan pada kendaraan bawah air dengan sudut 0° , 15° , 30° , dan 45° , serta kecepatan aliran yang bervariasi dari 0 hingga 50 cm/s tiap kelipatan 5 cm/s. Metode pengambilan data dilakukan melalui pengujian di terowongan aliran yang terkontrol, sensor mengukur perbedaan tekanan antara dua titik untuk menghitung kecepatan aliran menggunakan persamaan Bernoulli dan tabung Pitot. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa sistem ini mampu memberikan pengukuran kecepatan dengan akurasi tinggi, dengan rata-rata kesalahan absolut sebesar 0.024 m/s, serta menunjukkan kinerja yang stabil dalam berbagai kondisi aliran. Hal ini menunjukkan potensi sensor perbedaan tekanan sebagai solusi efisien untuk pengukuran kecepatan dalam aplikasi kendaraan bawah air.

Penelitian selanjutnya adalah dilakukan oleh Fuentes-Pérez dkk. (2018) yang masih terkait juga dengan pengukuran kecepatan dengan sensor perbedaan tekanan. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem pengukuran kecepatan menggunakan sensor perbedaan tekanan dalam kondisi kecepatan dan percepatan yang bervariasi. Penelitian ini menggunakan dua jenis sensor, yaitu sensor analog (MPXV7002) dan sensor digital (SSCDRRN005ND2A5), untuk membandingkan kinerja mereka dalam pengukuran kecepatan. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini mencakup kecepatan alat mulai dari 0,01 hingga 5,5 m/s dan percepatan dari 0,01 hingga 3 m/s², dengan pengujian dilakukan di dalam terowongan air sepanjang 59,4 m. Metode pengambilan data pada penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya, yang mana pada penelitian ini alat DPS digerakkan pada suatu rel dengan kecepatan dan percepatan tertentu, sehingga menyerupai kondisi yang sebenarnya pada robot bawah air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini mampu memberikan nilai kecepatan yang akurat, dengan rata-rata kesalahan absolut sebesar 0,0087 m/s untuk sensor analog dan 0,0107 m/s untuk sensor digital.

Kemudian ada penelitian yang dilakukan oleh Meurer dkk. (2020), yang merupakan penelitian lanjutan dari 2 penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini juga istilah DPSS mulai diperkenalkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem pengukuran kecepatan menggunakan sensor perbedaan tekanan MPXV7002DP dan 16 bit ADC LTC1867 untuk mendapatkan data yang jauh lebih akurat pada kendaraan bawah air otonom. Metode pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan meletakkan DPSS

pada sebuah AUV bernama SPARUS II AUV, yang akan menempuh berbagai variasi lintasan secara otonom dengan kecepatan mulai dari 0,2 hingga 2 m/s. Dalam pergerakannya, DPSS akan merekam data kecepatan dari AUV serta membandingkan hasilnya dengan sensor lain seperti DVL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa DPSS mampu memberikan estimasi kecepatan yang akurat terutama pada kecepatan tinggi. Jurnal penelitian ini terbilang sangat lengkap, karena menampilkan semua persamaan yang digunakan dalam perhitungan kecepatan, bahkan memperhitungkan juga faktor error akurat gerakan *pitch* dan *roll* dari AUV. Hasil penelitian terdahulu lainnya, yang masih berhubungan dengan DPSS, dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1. Hasil penelitian terdahulu

No	Penulis	Judul	Hasil	Publikasi
1	A'imah (2016)	Rancang Bangun Sistem Monitoring Laju Aliran Dengan Metode Perbedaan Tekanan Pada <i>Pitot Tube</i> Menggunakan Sensor MPX2010DP Berbasis Arduino	Hasil dari tugas akhir ini menunjukkan nilai koefisien aliran C_v alat ukur <i>pitot tube</i> adalah $C_v = 18,218x$, dengan x sebagai perbedaan tekanan. Laju aliran yang diukur adalah 2,965 LPM (Liter per menit) dan tingkat kepercayaan 95%. Karakteristik alat menunjukkan hysteresis 45,515%, non-linieritas 15,327%, dan error 1,45%	ITS Repository
2	Iqbal dan Faisal (2018)	Studi Kecepatan Aliran Air dengan Menggunakan Tabung Pitot	Hasil dari penelitian ini menunjukkan distribusi kecepatan aliran air dalam saluran terbuka bervariasi tergantung pada jenis dasar saluran (licin, kerikil, dan beton) dan kemiringan. Kecepatan maksimum aliran terjadi pada dasar saluran licin, dengan nilai tertinggi mencapai 0,365 m/s pada kemiringan 2,5%. penelitian ini juga menunjukkan semakin kasar dasar saluran, maka semakin kecil kecepatan aliran yang dihasilkan.	Academia.edu

No	Penulis	Judul	Hasil	Publikasi
3	Zhu dkk. (2014)	<i>Speed Estimation for Robotic Fish Based on Pressure Sensor</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa metode estimasi kecepatan dapat dilakukan dengan robot ikan berbasis sensor tekanan. Eksperimen dilakukan dengan menarik ikan robot pada 12 kecepatan tarik. Pada setiap kecepatan, data tekanan dicatat untuk menganalisis hubungan antara tekanan dan kecepatan. Hasil dari pengukuran tekanan dan kecepatan dibandingkan untuk mengevaluasi akurasi estimasi kecepatan. Estimasi kecepatan berdasarkan tekanan dapat memberikan hasil yang akurat, dengan deviasi maksimum sebesar 3,37 cm	IEEE
4	Villa dkk. (2021)	<i>Differential Pressure Speedometer for Autonomous Underwater Vehicle</i>	Penelitian ini dilakukan dengan memasang sensor tekanan pada sudut 30° dan 60° dari titik stagnasi, yang memungkinkan pengukuran dalam arah <i>surge</i> dan <i>sway</i> . Selama pengujian, kendaraan ditarik pada kecepatan konstan antara 0,05 m/s hingga 0,5 m/s, dan data tekanan digunakan untuk menghitung kecepatan. Hasil menunjukkan bahwa prototipe ini memberikan kesalahan estimasi kurang dari 4% untuk arah <i>surge</i> dan kurang dari 10% untuk arah <i>sway</i> pada kecepatan yang lebih tinggi. Namun, pada kecepatan yang lebih rendah, kesalahan meningkat, mencapai 82,74% untuk <i>surge</i> dan 52,41% untuk <i>sway</i> pada kecepatan 0,05 m/s.	IEEE

No	Penulis	Judul	Hasil	Publikasi
5	Ariza Ramirez dkk. (2020)	<i>Machine learning post processing of underwater vehicle pressure sensor array for speed measurement</i>	Penelitian ini menggunakan sensor tekanan MPXV5100 untuk mengukur kecepatan AUV, yang ditingkatkan melalui metode <i>mechine learning</i> . Data tekanan diambil pada kecepatan antara 0,3 m/s hingga 1,5 m/s di kolam <i>towing</i> . Metode pasca-pemrosesan menggunakan <i>Neural Networks</i> (NARX-NN) dan <i>Gaussian Processes</i> (GP) berhasil mengatasi non-linearitas, dengan NARX-GP memberikan akurasi terbaik dengan <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) sebesar 0,0143, dibandingkan dengan metode linier yang memiliki RMSE 0,0703.	Elsevier

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Fluida

Fluida merupakan sebuah substansi yang tidak bisa menahan beban tekanan geser. Fluida meliputi zat cair dan gas, sehingga mampu mengalir dan menyesuaikan bentuknya sesuai dengan wadah yang ditempatinya. Sifat inilah yang membedakan fluida dari zat padat yang mempertahankan bentuknya sendiri. Ketika suatu fluida berada dalam keadaan diam, atau statis, di dalam suatu wadah, ia tidak memberikan gaya geser pada permukaan yang ditempatinya. Fluida akan mengerjakan gaya tegak lurus pada setiap titik permukaan yang ditempatinya seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Arah Gaya pada Permukaan Sentuh Fluida Statis dengan Benda

Gambar 2.1 menunjukkan gaya tegak lurus per satuan luas, yang dikenal sebagai tekanan. Tekanan bekerja secara merata ke segala arah dalam fluida yang statis, dan besarnya

bergantung pada kedalaman dan densitas fluida. Secara matematis rumus tekanan dapat dituliskan pada Persamaan 2.1

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

- P adalah tekanan (Pa atau N/m^2)
- F adalah gaya tegak lurus pada permukaan (N)
- A adalah luas permukaan (m^2)

Meskipun gaya adalah vektor, tekanan adalah besaran skalar. Hal ini dikarenakan gaya bekerja tegak lurus ke segala arah dalam fluida, tanpa memiliki satu arah spesifik..

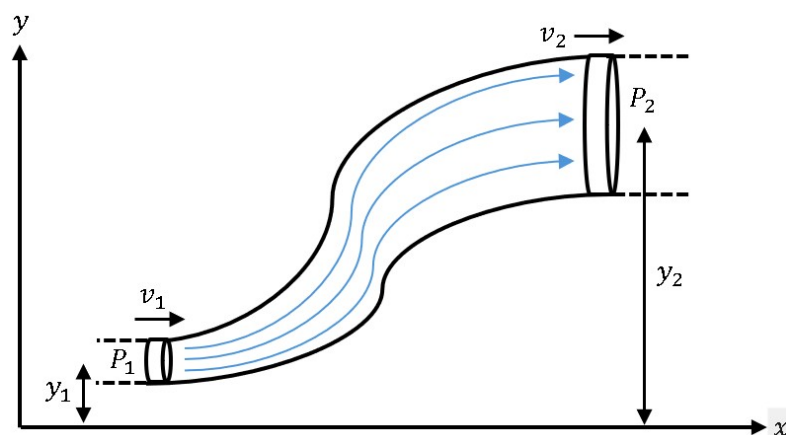
2.2.2 Prinsip Bernoulli

Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa dalam aliran fluida ideal (aliran fluida tak-kental, tak-kompresibel, dan tunak), jumlah energi per satuan volume akan tetap konstan sepanjang setiap streamline, dengan kata lain energi akan terkonservasi di sepanjang streamline. Secara matematis persamaan Bernoulli dapat dituliskan pada Persamaan 2.2

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konstan} \quad (2.2)$$

- P : Tekanan (Pa)
- ρ : Densitas fluida (kg/m^3)
- v : Kecepatan fluida (m/s)
- g : Percepatan gravitasi (m/s^2)
- h : Ketinggian dari titik referensi (m)

Prinsip Bernoulli dapat diterapkan pada berbagai aplikasi. Contoh yang paling sederhana adalah fluida yang mengalir di dalam pipa yang memiliki perubahan ketinggian, seperti Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Aliran Fluida Melalui Pipa

Gambar 2.2 menunjukkan kondisi awal aliran fluida dengan kecepatan v_1 pada ketinggian y_1 di bagian masukan pipa. Fluida yang ditunjukkan dengan warna biru akan bergerak sepanjang

pipa. Kecepatan fluida berubah menjadi v_2 dan tekanan menjadi P_2 pada ketinggian y_2 . Dapat dituliskan persamaan pada titik masukan dan keluaran pipa, seperti persamaan 2.3.

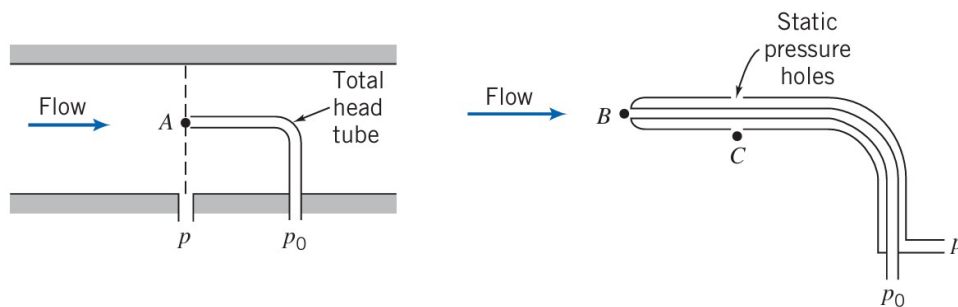
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad (2.3)$$

- P_1 : Tekanan pada titik masukan (Pa)
- P_2 : Tekanan pada titik keluaran (Pa)
- v_1 : Kecepatan fluida pada titik masukan (m/s)
- v_2 : Kecepatan fluida pada titik keluaran (m/s)
- y_1 : Ketinggian fluida pada titik masukan relatif terhadap titik referensi (m)
- y_2 : Ketinggian fluida pada titik keluaran relatif terhadap titik referensi (m)

Persamaan 2.3 juga merupakan persamaan Bernoulli, yang menjelaskan hubungan pada titik masukan dan keluaran pipa. Dari Gambar 2.2, diketahui $y_2 > y_1$, yang berarti terdapat perubahan ketinggian. Jika $A_1 \neq A_2$, maka $v_1 \neq v_2$. Persamaan Bernoulli dapat untuk menghitung perubahan tekanan antara masukan dan keluaran berdasarkan perubahan kecepatan dan ketinggian. Jika $v_2 > v_1$, maka $P_2 < P_1$, untuk menjaga agar jumlah energi total per satuan volume tetap konstan.

2.2.3 Tabung Pitot

Tabung Pitot adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran fluida, baik gas maupun cairan. Prinsip kerjanya didasarkan pada prinsip Bernoulli, yang menghubungkan kecepatan fluida dengan tekanan. Tabung Pitot terdiri dari dua tabung konsentris seperti Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema Tabung Pitot
(Pritchard, 2010)

Gambar 2.3 menunjukkan tabung bagian dalam, yang disebut *stagnation tube*, memiliki lubang di ujung depannya (titik B) yang menghadap langsung ke aliran fluida. Lubang ini mengukur tekanan total P_0 atau tekanan stagnasi. Tabung luar, yang disebut *static tube*, memiliki beberapa lubang kecil di sisi tabung (titik C) untuk mengukur tekanan statis fluida P . Kedua tabung terhubung ke alat pengukur tekanan. Kecepatan aliran fluida dihitung berdasarkan perbedaan antara tekanan total yang diukur oleh *stagnation tube* dan tekanan statis

yang diukur oleh *static tube* (A'imah, 2016). Dapat diturunkan rumus untuk mencari kecepatan aliran fluida yang melalui tabung pitot dengan menggunakan persamaan Bernoulli pada titik B dan C, ketinggian antara B dan C pada tabung pitot tidak terlalu besar maka dianggap $h_B = h_C$, sehingga persamaan Bernoullinya menjadi seperti Persamaan 2.4.

$$P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 = P_C + \frac{1}{2}\rho v_C^2 \quad (2.4)$$

Ujung tabung Pitot yang menghadap aliran fluida (titik B) dirancang sedemikian sehingga fluida yang mendekat dipaksa untuk berhenti sepenuhnya sebelum dibelokkan. Ini menciptakan daerah stagnasi di mana kecepatan fluida pada titik itu (v_B) sama dengan nol. Kecepatan fluida pada titik stagnasi dapat dianggap nol, sehingga didapatkan Persamaan 2.5 dan 2.6.

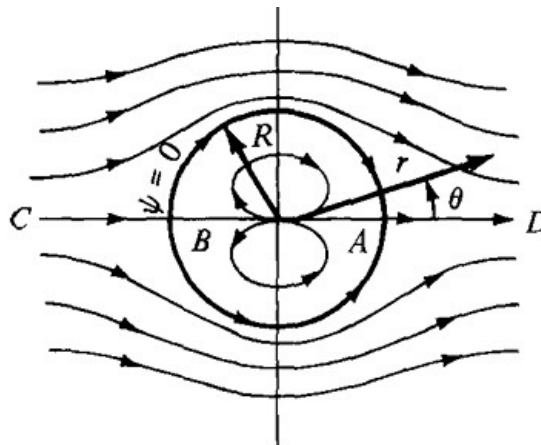
$$P_0 = P + \frac{1}{2}\rho v_C^2 \quad (2.5)$$

$$v_C = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}} \quad (2.6)$$

Jadi, dengan mengukur tekanan stagnasi (P_0) dan tekanan statis (P) menggunakan tabung Pitot, dan mengetahui densitas fluida (ρ), Dapat dihitung kecepatan aliran fluida v_C berdasarkan Persamaan 2.6 (A'imah, 2016).

2.2.4 Aliran Potensial

Aliran potensial adalah jenis aliran fluida yang dapat dijelaskan dengan menggunakan fungsi potensial, aliran tersebut bersifat irrotasional dan tidak kompresibel. Dalam aliran ini, setiap partikel fluida bergerak sedemikian sehingga tidak ada vorteks atau putaran yang terbentuk, dan kecepatan aliran dapat dinyatakan sebagai gradien dari fungsi potensial (Pritchard, 2010). Aliran potensial sering digunakan dalam analisis aliran di sekitar objek seperti silinder, yang terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Aliran Fluida Melewati Sebuah Silinder dengan Jari-Jari R (J. Anderson, 1985)

Gambar 2.4 menunjukkan aliran fluida yang melewati silinder, fungsi potensial dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.7.

$$\phi = -Ur \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \quad (2.7)$$

- ϕ : Fungsi potensial, yang menggambarkan energi per unit massa dalam aliran fluida.
- U : Kecepatan aliran uniform, yaitu kecepatan fluida yang mengalir jauh dari silinder.
- r : Jarak dari pusat silinder ke titik di mana fungsi potensial dihitung.
- R : Jari-jari silinder,
- θ : Sudut dalam koordinat polar, yang diukur dari sumbu horizontal.

Dengan menggunakan koordinat polar, dapat dituliskan Persamaan 2.8, Persamaan 2.9, dan Persamaan 2.10.

$$\nabla \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \quad (2.8)$$

$$V_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (2.9)$$

$$V_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (2.10)$$

Persamaan 2.9 adalah komponen kecepatan radial, sedangkan Persamaan 2.10 adalah komponen kecepatan tangensial. Kecepatan total dari fluida yang bergerak di suatu titik pada permukaan silinder dapat dituliskan pada Persamaan 2.11. Penurunan rumus secara lengkap dapat dilihat pada halaman lampiran.

$$V = 2U \sin \theta \quad (2.11)$$

Persamaan 2.11 akan akurat pada kondisi fluida yang sangat ideal, tetapi dalam kenyataannya aliran fluida memiliki aliran turbulensi. Berdasarkan Pritchard (2010), untuk aliran fluida dengan bilangan Reynolds yang besar, kecepatan di suatu titik pada permukaan silinder adalah seperti Persamaan 2.12.

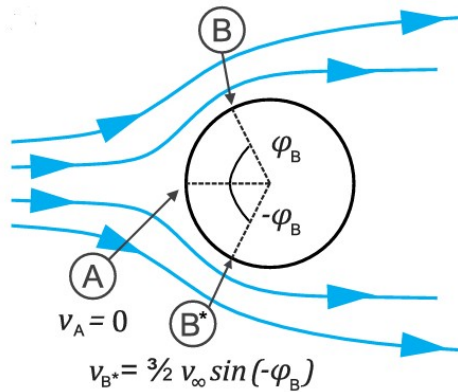
$$V = \frac{3}{2} U \sin \theta \quad (2.12)$$

Dalam kondisi ini, aliran di sekitar benda seperti silinder sering kali mengalami pemisahan dan ada sirkulasi tambahan yang muncul. Sirkulasi ini membuat distribusi kecepatan di sekitar benda berubah, sehingga hasil perhitungan kecepatan dari pendekatan sederhana tidak cukup akurat. Karena itu, rumus kecepatan pada persamaan 2.11 berubah menjadi 2.12. Persamaan 2.12 ini juga digunakan pada penelitian Meurer dkk. (2020), hasil data yang ditunjukkan cukup akurat.

2.2.5 DPSS (*Differential Pressure Sensor Speedometer*)

DPSS memanfaatkan perbedaan tekanan untuk mengukur kecepatan aliran fluida. Prinsip kerjanya menggabungkan prinsip Bernoulli, tabung Pitot, dan teori aliran potensial. Karena gerak itu relatif, maka jika sebuah DPSS bergerak dengan kecepatan konstan di dalam fluida

yang diam, maka kecepatan yang diukur adalah kecepatan dari DPSS itu sendiri. Aliran fluida yang melalui DPSS ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Aliran Fluida Melalui DPSS
(Meurer dkk., 2020)

Gambar 2.5 menunjukkan titik A adalah *stagnation point* dan titik B serta B* adalah *static point*, yang merupakan suatu titik di permukaan silinder dengan sudut φ_B . Dapat dituliskan kembali persamaan 2.6 menjadi Persamaan 2.13 dan Persamaan 2.12 menjadi Persamaan 2.14. Pada Persamaan 2.14, simbol U untuk kecepatan aliran uniform fluida diubah menjadi V_∞ .

$$V_B = \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\rho}} \quad (2.13)$$

$$V_B = \frac{3}{2} V_\infty \sin \varphi_B \quad (2.14)$$

- V_∞ : Kecepatan fluida (m/s)
- V_B : Kecepatan fluida di titik B (m/s)
- P_A : Tekanan pada titik A (Pa)
- P_B : tekanan pada titik B (Pa)
- ρ : Densitas fluida (kg/m^3)
- φ_B : Sudut antara titik B dengan titik A

Dari Persamaan 2.13 dan 2.14, didapatkan Persamaan 2.15 dan 2.16. Proses penurunan rumus secara lengkap dapat dilihat pada halaman lampiran.

$$v_\infty = \sqrt[4]{\frac{2\alpha(\varphi)}{\rho^2} (\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2)} \quad (2.15)$$

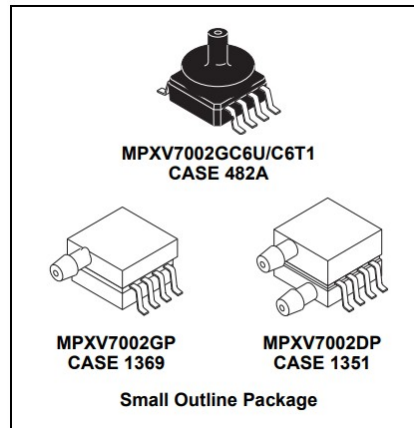
$$\alpha(\varphi) = \left(\frac{4}{9 \sin^2(\varphi)} \right)^2 \quad (2.16)$$

Persamaan 2.15 dan 2.16 adalah persamaan akhir yang akan digunakan untuk menghitung kecepatan dari DPSS, yang mana dalam jenis fluida yang sama, kecepatan hanya bergantung

dari sudut φ dan juga Δp (Meurer dkk., 2020).

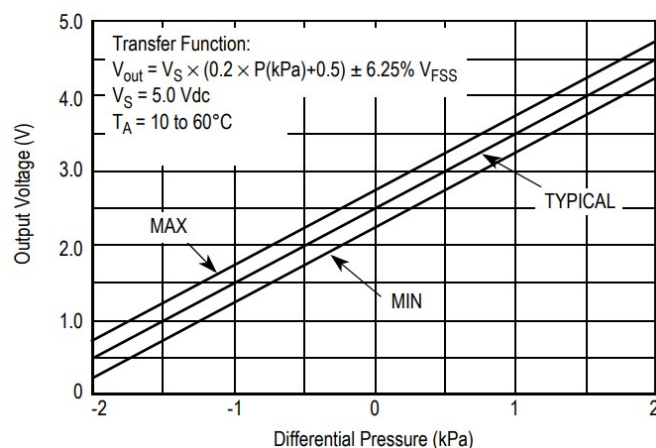
2.2.6 MPXV7002DP

Sensor MPXV7002DP adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua titik. Sensor ini menghasilkan sinyal tegangan keluaran yang bersifat analog, yang mencerminkan nilai perbedaan tekanan yang terukur (Junaidin dkk., 2022). Bentuk dari sensor MPXV7002DP seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Sensor MPXV7002
(Package dan Gauge, 2017)

Gambar 2.6 menunjukkan sensor MPXV7002DP memiliki 2 corong sebagai 2 masukan tekanan. Sensor ini menghasilkan sinyal keluaran dengan sensitivitas 1 V/kPa, dan dapat mengukur perbedaan tekanan dalam rentang ± 2000 Pa (Berkenbusch, 2015). Grafik keluaran sensor MPXV7002DP ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Grafik Keluaran Tegangan Terhadap Perbedaan Tekanan Sensor MPXV7002DP
(Package dan Gauge, 2017)

Gambar 2.7 menunjukkan hubungan linier antara tekanan diferensial dan tegangan keluaran, tegangan meningkat seiring dengan bertambahnya tekanan. Garis maksimum dan minimum

menggambarkan batas variasi keluaran, sementara garis tipikal menunjukkan nilai keluaran yang diharapkan dalam rentang tekanan yang diukur.

2.2.7 Arduino Nano

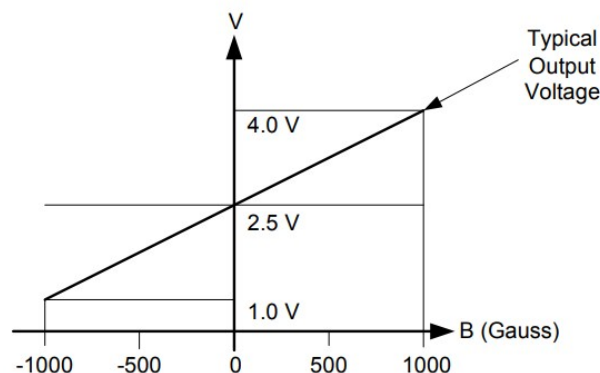
Arduino Nano adalah papan pengembangan mikrokontroler yang berbasis chip ATmega328P, dirancang dengan ukuran yang sangat kecil jika dibandingkan dengan jenis arduino yang lain. Pemrograman Arduino Nano dilakukan melalui konektor USB *mini tipe B*. Arduino Nano memiliki 14 pin I/O digital dan 8 pin *input* analog dengan resolusi 10-bit. Ukurannya yang kecil, yaitu 45 mm x 18 mm, membuatnya ideal untuk proyek-proyek yang memerlukan ruang terbatas (Suari, 2017).

2.2.8 ADS1115

ADS1115 adalah modul konverter analog-ke-digital (ADC), dirancang untuk mengubah sinyal analog menjadi digital. Resolusi hingga 16-bit, mampu memberikan pembacaan yang lebih teliti. ADS1115 memiliki empat channel masukan, sehingga memungkinkan untuk mengukur beberapa sinyal secara bersamaan. Modul ini menggunakan komunikasi I2C, yang memudahkan integrasi dengan berbagai perangkat (Say, 2021). Komponen ini mengatasi keterbatasan resolusi ADC bawaan dari arduino yang hanya 10-bit.

2.2.9 Sensor 49E

Sensor 49E menggunakan efek Hall secara langsung mengukur intensitas medan magnet yang diterapkan padanya, sehingga menghasilkan variasi tegangan yang proporsional. Struktur fisiknya sangat sederhana, terdiri dari pin VCC, GND, dan sinyal (Freitas dkk., 2020). Gambar 2.8 menunjukkan grafik karakteristik dari sensor medan magnet 49E.



Gambar 2.8. Grafik Karakteristik Sensor 49E
(Neves dan da Silva, 2022)

Gambar 2.8 menunjukkan peningkatan tegangan keluaran secara proporsional ketika medan magnet meningkat, dengan titik tengah pada 2,5 V yang menunjukkan kondisi tanpa medan magnet. Pada nilai positif, tegangan mencapai 4,0 V saat medan magnet maksimum, sedangkan pada nilai negatif, tegangan turun hingga 1,0 V.

BAB III

METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian dimulai dengan studi lapangan untuk mengidentifikasi permasalahan yang konkret. Selanjutnya, dilakukan studi literatur untuk menemukan solusi terhadap permasalahan yang dihadapi. Tahap terakhir adalah eksekusi, yang mencakup pembuatan alat. Sebelum proses pembuatan alat dilakukan, perencanaan yang matang akan disusun untuk memastikan kelancaran dan keberhasilan penelitian.

3.1.1 Studi Literatur

Studi literatur difokuskan pada pencarian solusi alternatif untuk mengatasi kendala pengukuran kecepatan pada robot bawah air, mengingat tingginya biaya sensor konvensional seperti DVL. Penelitian ini meninjau dan mengkaji beberapa jurnal dengan penelitian yang serupa, dan menemukan bahwa penggunaan DPSS yang memanfaatkan perbedaan tekanan untuk estimasi kecepatan, memberikan solusi sebagai alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan sensor aliran mekanik konvensional yang menggunakan baling-baling. Namun DPSS hanyalah sebuah instrumen untuk mengukur kecepatan, sehingga dalam proses pengujiannya dibutuhkan sistem lain untuk menggerakkan DPSS dengan kecepatan tertentu. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dibuat juga sistem platform penggerak untuk membawa DPSS bergerak dengan kecepatan tertentu supaya DPSS dapat melakukan pengukuran.

3.1.2 Pemilihan Parameter

Parameter yang ingin diteliti adalah kecepatan gerak mulai dari 0,35 m/s hingga 0,65 m/s setiap kenaikan 0,05 m/s dan variasi *enclosing angle* pada 30°, 60°, dan 90°.

3.1.3 Penentuan Sensor

Sensor yang digunakan dalam penelitian ini adalah sensor perbedaan tekanan MPXV7002DP, lalu ada juga sensor *limit switch* dan sensor medan magnet 49E.

3.1.4 Penentuan Aktuator

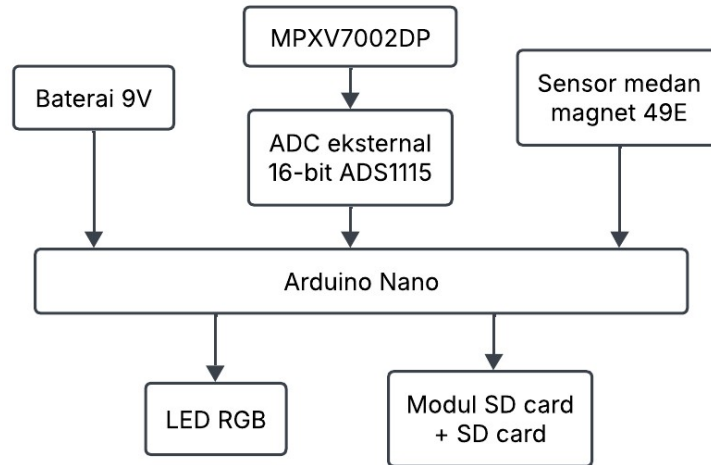
Aktuator digunakan pada sistem platform penggerak, yakni menggunakan motor DC *gearbox*. Pemilihan aktuator ini dikarenakan jenis motor ini dapat dengan mudah diatur kecepatannya dan memiliki torsi yang cukup untuk menggerakkan sistem.

3.1.5 Sistem Elektrik

Sistem elektrik akan terbagi menjadi 2 bagian, yakni sistem elektrik DPSS dan sistem elektrik platform penggerak.

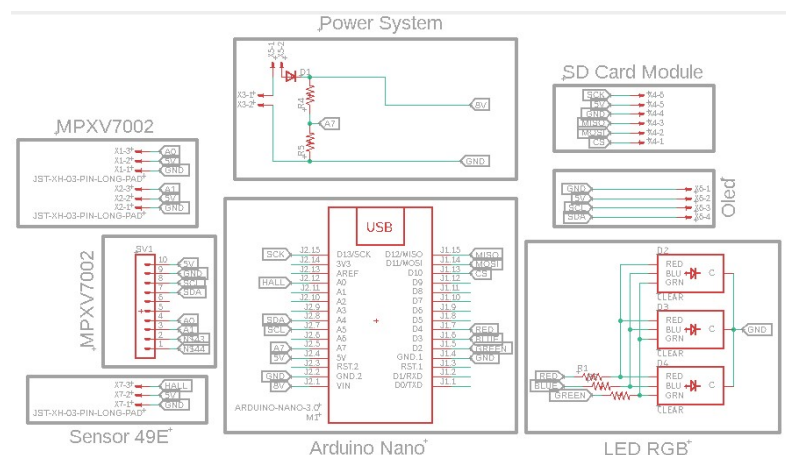
3.1.5.1 Sistem Elektrik DPSS

Sistem elektrik DPSS dimulai dengan pembuatan skema diagram blok sistem pada Gambar 3.1.

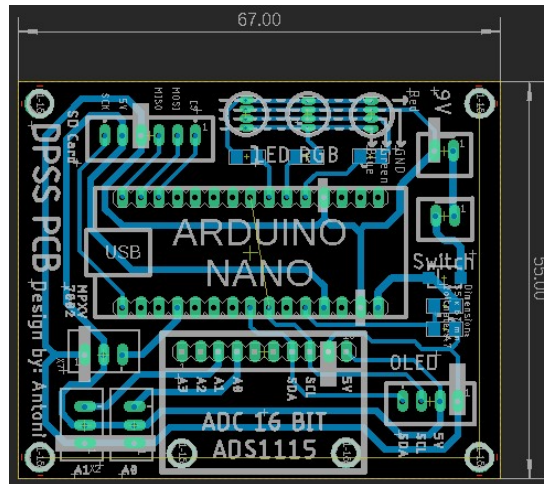


Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem DPSS

Gambar 3.1 menunjukkan sumber daya yang digunakan adalah baterai 9V. Arduino akan menyediakan keluaran tegangan 5V untuk kebutuhan semua komponen. Data perbedaan tekanan dari sensor MPXV7002DP dibaca oleh ADS1115, baru kemudian dikirim ke Arduino melalui komunikasi I2C. Sensor medan magnet 49E berfungsi sebagai pemicu untuk memulai perekaman data. Apabila sensor mendeteksi adanya medan magnet, maka perekaman data di kartu SD dimulai, tetapi jika sensor tidak mendeteksi medan magnet, maka perekaman data berhenti. LED RGB akan memberikan indikator warna yang berbeda untuk setiap kondisi pada sistem, supaya memudahkan pengamatan. Diagram skematik DPSS terdapat pada Gambar 3.2, serta desain PCB pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Diagram Skematik DPSS

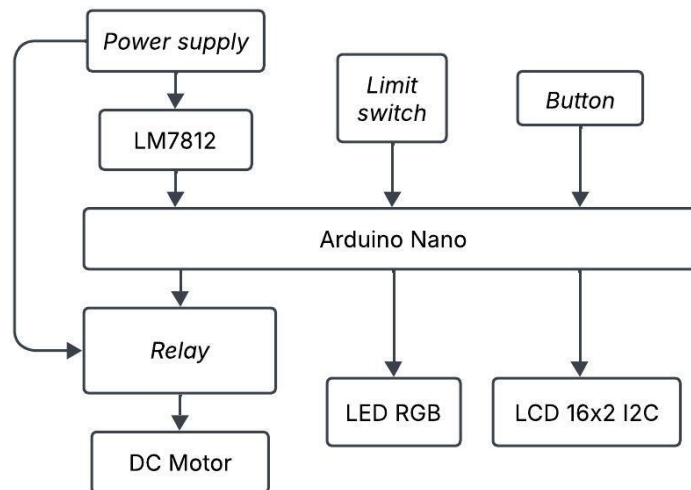


Gambar 3.3. Desain PCB DPSS

Gambar 3.2 dan 3.3 merupakan hasil desain dengan menggunakan *software* Eagle. PCB dicetak dan dipasang komponen elektrik yang lain untuk menjalankan sistem.

3.1.5.2 Sistem Elektrik Platform Penggerak

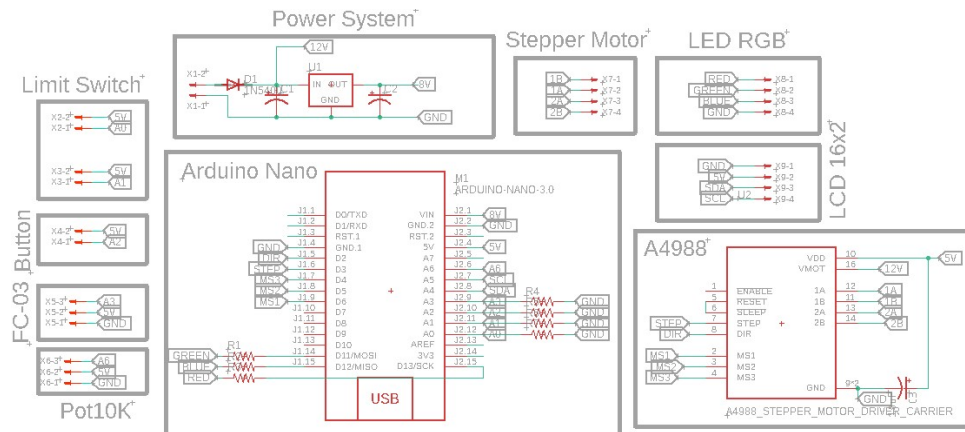
Sistem elektrik platform penggerak dimulai dengan pembuatan skema diagram blok pada Gambar 3.5.



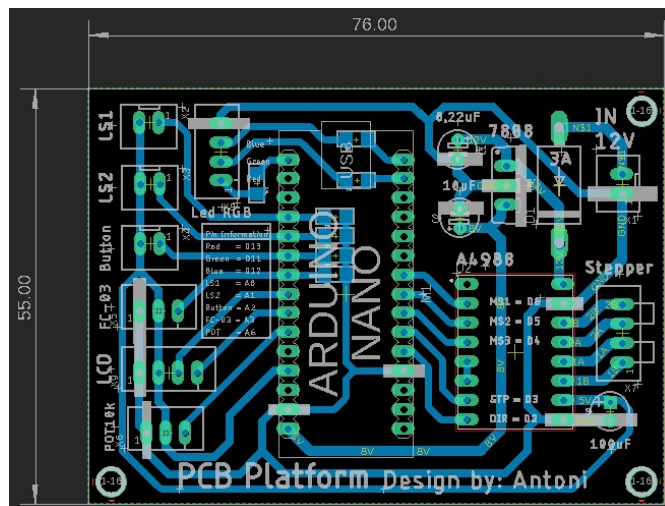
Gambar 3.4. Diagram Blok Sistem Platform Penggerak

Gambar 3.4 menunjukkan sumber daya yang digunakan berasal dari *power supply*, lalu diturunkan menjadi 12V pada LM7812, baru setelah itu menjadi daya masukan ke Arduino Nano. Dari *power supply* juga langsung masuk ke *relay* sebagai daya untuk motor DC. *Button* digunakan sebagai tombol start untuk memulai sistem. Ketika tombol ditekan, maka Arduino akan memberikan perintah ke *relay* untuk mulai menggerakkan motor DC dengan kecepatan sesuai dengan nilai tegangan keluaran *power supply*. Ketika platform yang membawa DPSS

sudah bergerak, di ujung-ujung dari rel sudah terdapat *limit switch*, yang akan ditekan oleh platform. Apabila *limit switch* sudah ditekan, maka motor DC akan bergerak berbalik arah, membawa DPSS kembali ke posisi semula. LED RGB akan memberikan indikator warna yang berbeda untuk setiap kondisi pada sistem, supaya memudahkan pengamatan. Sedangkan LCD 16x2 akan menampilkan waktu dan kecepatan platform, nilai kecepatan ini digunakan sebagai kecepatan referensi. Diagram skematik platform penggerak terdapat pada Gambar 3.5, dan juga desain PCB pada Gambar 3.6.



Gambar 3.5. Diagram Skematik Platform Penggerak



Gambar 3.6. Desain PCB Platform Penggerak

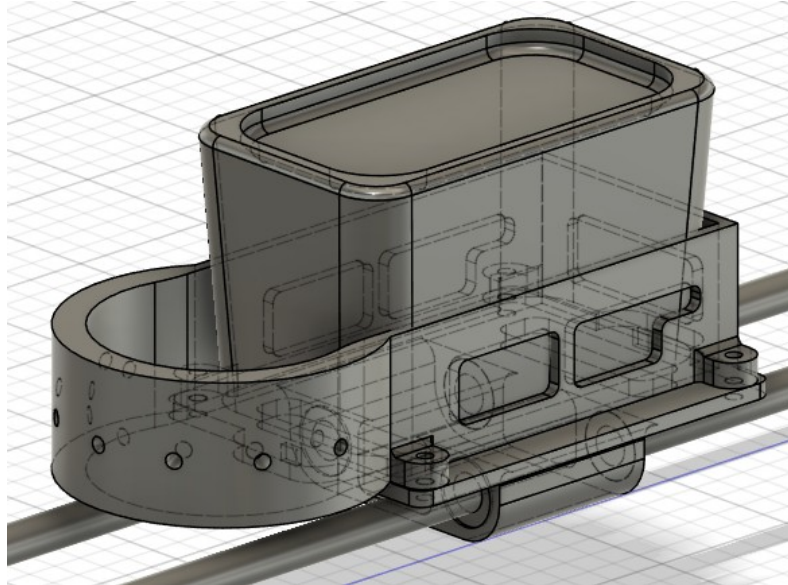
Gambar 3.5 dan 3.6 merupakan hasil desain dengan menggunakan *software* Eagle. PCB dicetak dan dipasang komponen elektrik yang lain untuk menjalankan sistem.

3.1.6 Desain Mekanik

Desain mekanik ini dibagi menjadi 3 bagian, yakni desain mekanik DPSS, desain mekanik platform penggerak, dan desain mekanik kolam pengujian.

3.1.6.1 Desain Mekanik DPSS

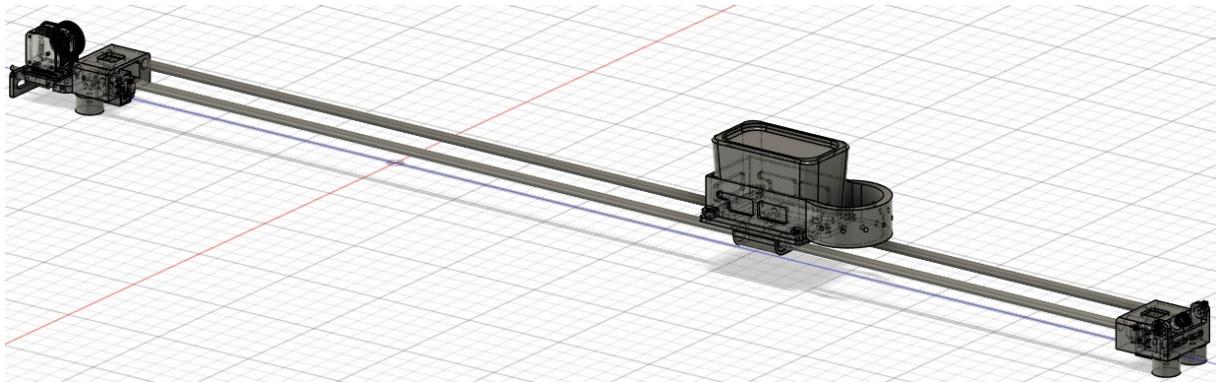
Berikut adalah gambar desain 3D dari DPSS yang dibuat menggunakan *software* Fusion360. Gambar desain mekanik DPSS terlihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Desain 3D DPSS

3.1.6.2 Desain Mekanik Platform Penggerak

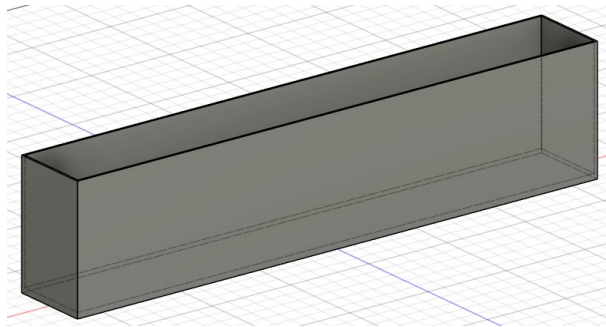
Berikut adalah gambar desain 3D dari platform penggerak yang dibuat menggunakan *software* Fusion360. Gambar desain mekanik platform penggerak terlihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Desain 3D Platform Penggerak Keseluruhan

3.1.6.3 Desain Mekanik Kolam Pengujian

Berikut adalah gambar desain 3D dari kolam pengujian yang dibuat menggunakan *software* Fusion360. Gambar desain mekanik kolam pengujian terlihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Desain 3D Kolam Pengujian

3.1.7 Pemrograman

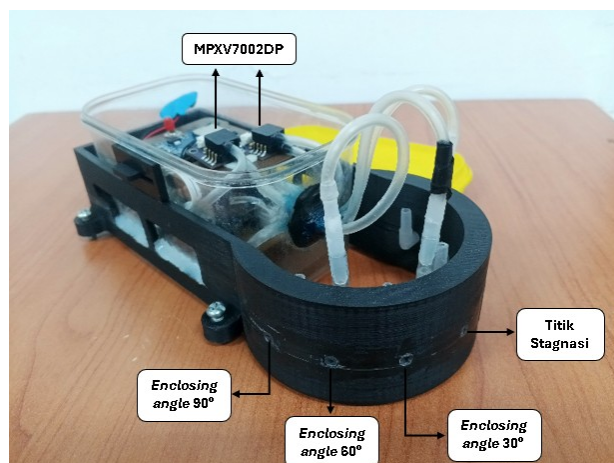
Program diunggah pada mikrokontroller Arduino Nano dengan bantuan *software* Arduino IDE. Pada sistem DPSS, program yang dimasukkan adalah perintah untuk melakukan pembacaan data oleh sensor dan perekaman data oleh modul SD Card, seperti pada Program B.1. Sedangkan program pada sistem platform penggerak, merupakan program untuk menyalakan motor, sedangkan untuk kecepatan motor diatur langsung pada tegangan keluaran dari *power supply*, seperti pada Program B.2. Kedua program ini akan berjalan secara bersamaan saat proses pengambilan data dilakukan.

3.1.8 Pembuatan Alat

Proses pembuatan alat dibagi menjadi 3 bagian, yakni pembuatan DPSS, pembuatan platform penggerak, dan pembuatan kolam pengujian.

3.1.8.1 Pembuatan DPSS

Proses pembuatan DPSS dimulai dari perangkaian sistem elektrik. Semua komponen elektronik disatukan pada PCB dan dimasukkan ke dalam wadah kedap air. Hasil desain 3D dari Fusion360 dicetak dengan menggunakan 3D print, lalu disatukan dengan wadah DPSS. Hasil dari pembuatan alat DPSS terlihat pada Gambar 3.10.

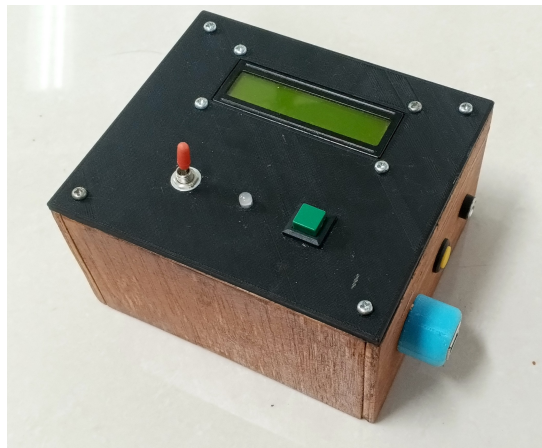


Gambar 3.10. Foto DPSS

Dari Gambar 3.10 dapat di lihat bahwa selang kecil yang menghubungkan sensor di pasang pada salah satu variasi *enclosing engle* yakni pada sudut 90 derajat. Ketika ingin dilakukan variasi *enclosing engle* yang lain, maka selang dapat dipindahkan secara manual.

3.1.8.2 Pembuatan Platform Penggerak

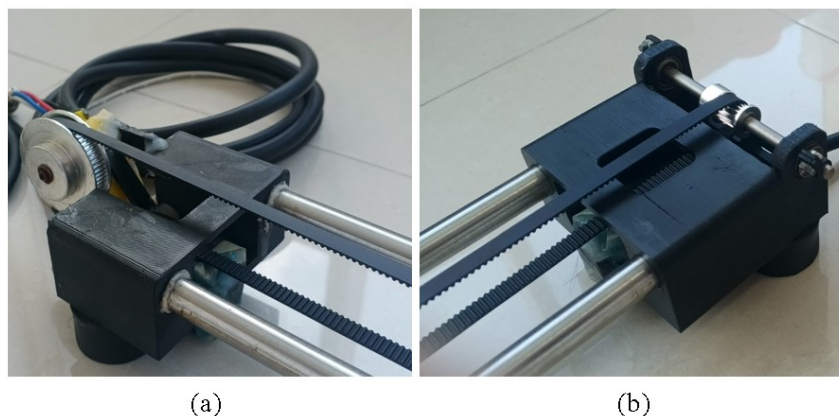
Proses pembuatan platform penggerak dimulai dari perangkaian sistem elektrik. Semua komponen elektronik disatukan pada PCB lalu dimasukkan ke dalam kotak yang terbuat dari tripleks. Beberapa komponen seperti LDC, LED, *button*, dan *toggle switch* diletakkan pada bagian tutup kotak seperti Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Foto Box Elektrik Platform Penggerak

Gambar 3.11 menunjukkan box elektrik platform penggerak yang berfungsi mengendalikan pergerakan motor dan menampilkan kecepatan platform.

Dari segi mekanik, dipasang sebuah rel dengan panjang 1,5m dan *bracket* sebagai dudukan motor dan *limit switch*. Karena komponen *limit switch* ini harus bekerja pada bawah air, maka perlu dilakukan *waterproofing* dengan menambahkan *grease* dan membungkus komponen dengan plastik, seperti Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Foto *Bracket* Platform Penggerak (a) Bagian Depan dan (b) Bagian Belakang

Gambar 3.12 menunjukkan penempatan DC motor dan *limit switch* pada ujung-ujung rel. Secara keseluruhan sistem platform penggerak terlihat pada Gambar 3.13.

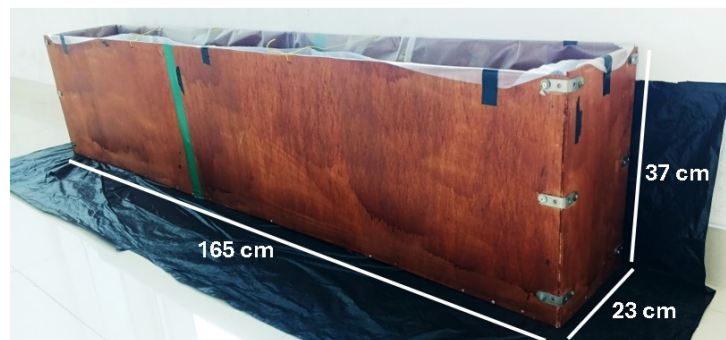


Gambar 3.13. Foto Platform Penggerak

Gambar 3.13 menunjukkan pada tengah rel terdapat sebuah platform untuk meletakkan DPSS, sehingga DPSS dapat dibawa oleh platform penggerak.

3.1.8.2 Pembuatan Kolam Pengujian

Proses pembuatan kolam pengujian dilakukan dengan merencanakan terlebih dahulu dimensi dari kolam yang dibutuhkan. Kemudian dilakukan pemotongan dari tripleks sesuai dengan dimensi tersebut. Potongan tripleks yang dihasilkan kemudian disatukan dengan paku, baut, dan tali. Selanjutnya plastik besar dimasukkan ke dalam wadah tersebut dan diisi air. Kolam pengujian terlihat pada Gambar 3.14.

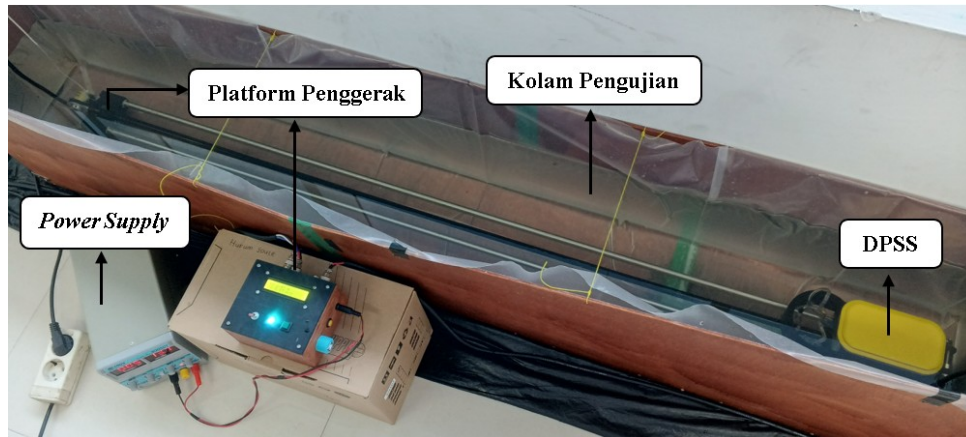


Gambar 3.14. Foto Kolam Pengujian

Gambar 3.14 menunjukkan dimensi dari kolam pengujian meliputi panjang 165cm, lebar 23cm, dan tinggi 37cm, serta diisi air dengan ketinggian 18cm. Air pada kolam pengujian tidak diisi hingga penuh, tetapi cukup sampai alat DPSS tenggelam sepenuhnya, hal ini bertujuan untuk mengurangi tekanan hidrostatis pada bagian dasar kolam.

3.1.9 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan meletakkan DPSS pada platform penggerak, kemudian dimasukkan ke dalam kolam pengujian seperti Gambar 3.15.



Gambar 3.15. Foto DPSS dan Platform Penggerak di Dalam Kolam Pengujian

Pada Gambar 3.15 menunjukkan DPSS dan platform penggerak sepenuhnya terendam di dalam air. Pengujian sistem dibagi menjadi 2 bagian, yakni pengujian sistem platform penggerak dan sistem DPSS.

3.1.9.1 Pengujian Sistem Platform Penggerak

Pengujian sistem platform penggerak diawali dengan mengunggah program ke Arduino Nano. Setelah sistem elektronik terhubung dengan (*power supply*), layar LCD akan menyala dan lampu indikator akan menunjukkan warna putih, menandakan sistem telah aktif. Apabila *button* ditekan, motor akan mulai berputar sehingga platform bergerak yang di mana arah pergerakan ini diatur menggunakan *toggle switch*. Ketika platform mencapai batas ujung rel, *limit switch* yang berada di ujung rel akan ditekan. LCD akan menampilkan catatan waktu dan kecepatan platform saat itu.

Sebelum platform penggerak siap digunakan untuk pengambilan data, hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan aktual platform harus ditentukan terlebih dahulu. Untuk itu, dilakukan serangkaian pengukuran kecepatan platform pada berbagai variasi tegangan masukan yang diberikan. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk membuat grafik yang menggambarkan korelasi antara kecepatan platform (sumbu y) terhadap tegangan masukan (sumbu x). Dari persamaan linear yang diperoleh dari grafik ini, kecepatan platform dapat ditentukan atau diatur secara akurat berdasarkan nilai tegangan tertentu.

3.1.9.2 Pengujian Sistem DPSS

Pengujian sistem DPSS diawali dengan mengunggah program yang telah dikembangkan ke Arduino Nano. Setelah baterai dipasang pada sistem, lampu indikator akan menyala hijau,

menunjukkan daya baterai cukup. Sebaliknya, jika lampu indikator menyala merah, ini menunjukkan bahwa daya baterai habis. Proses perekaman data ke kartu SD akan dimulai ketika magnet digeser hingga posisinya tepat di atas sensor medan magnet 49E. Saat perekaman aktif, lampu indikator akan berubah warna menjadi biru. Kemudian, ketika magnet digeser kembali menjauh dari sensor medan magnet 49E, proses perekaman data secara otomatis akan berhenti.

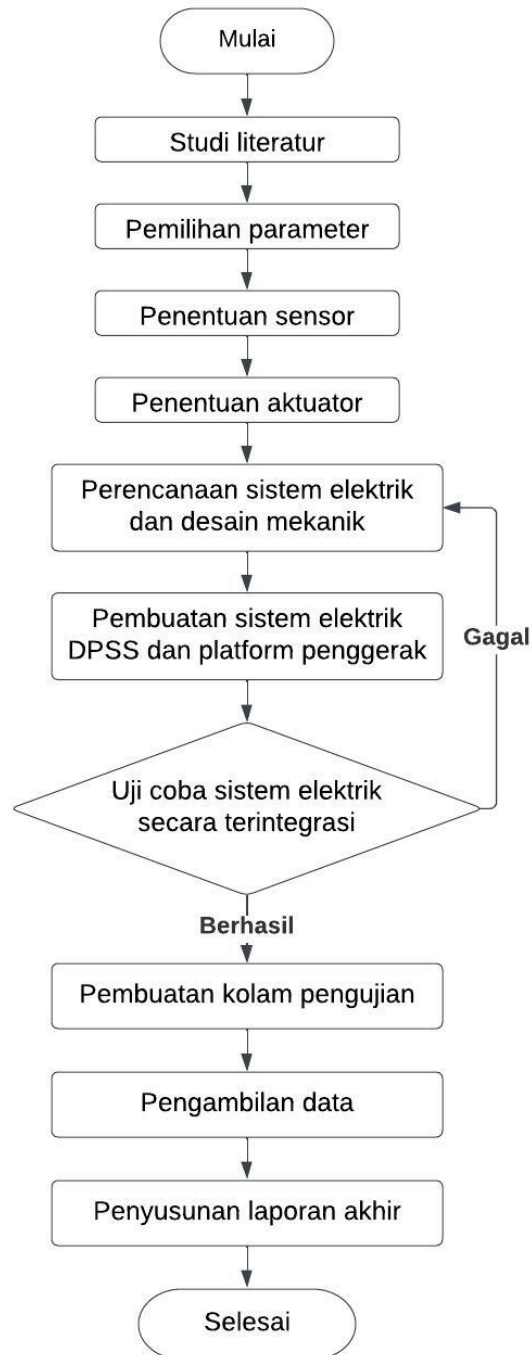
Sebelum dilakukan pengambilan data utama, langkah penting pertama adalah menentukan nilai sensitivitas untuk setiap sensor MPXV7002DP. Proses penentuan sensitivitas ini dilakukan dengan cara meletakkan sistem DPSS, yang telah terpasang sensor tersebut, di atas platform penggerak. Platform kemudian digerakkan pada variasi kecepatan yang berbeda. Selama platform bergerak, data tegangan keluaran dari sensor MPXV7002DP akan disimpan ke dalam kartu SD. Secara bersamaan, berdasarkan kecepatan yang diterapkan pada platform, nilai perbedaan tekanan perhitungan yang terdeteksi oleh sensor dapat ditentukan. Dengan memvariasikan kecepatan platform ini, akan diperoleh beragam nilai tegangan keluaran sensor. Data pasangan antara tegangan keluaran sensor dan perbedaan tekanan perhitungan yang bersesuaian kemudian digunakan untuk membuat grafik. Gradien dari garis pada grafik hubungan antara tegangan keluaran sensor (sumbu y) terhadap perbedaan tekanan (sumbu x) inilah yang akan menunjukkan nilai sensitivitas aktual dari sensor tersebut.

3.2 Bahan dan Peralatan yang digunakan

Bahan dan peralatan yang digunakan dibagi menjadi 2, yaitu untuk sistem DPSS dan sistem platform penggerak. Pada sistem DPSS, Arduino digunakan sebagai mikrokontroler untuk mengolah seluruh proses. Data utama berupa perbedaan tekanan yang diperoleh dari sensor MPXV7002DP, sinyal analognya dibaca terlebih dahulu pada ADS1115 sebagai ADC 16-bit eksternal, kemudian baru dikirim ke Arduino. Untuk keperluan penyimpanan data selama sistem berjalan, digunakan modul kartu SD yang dilengkapi dengan kartu memori. Sistem perekaman ini diaktifkan secara otomatis oleh sensor medan magnet 49E yang akan aktif ketika mendeteksi keberadaan magnet neodimium di dekatnya. Keseluruhan sistem DPSS ini mendapatkan sumber daya portabel dari baterai 9V. Di sisi lain, sistem platform penggerak menggunakan aktuator motor DC, yang dikendalikan oleh sebuah relay. Untuk menjamin pasokan daya yang stabil dan memadai bagi pergerakannya, sistem platform penggerak ini menggunakan sumber daya dari *power supply*, nilai tegangan dari *power supply* akan menentukan kecepatan dari DC motor.

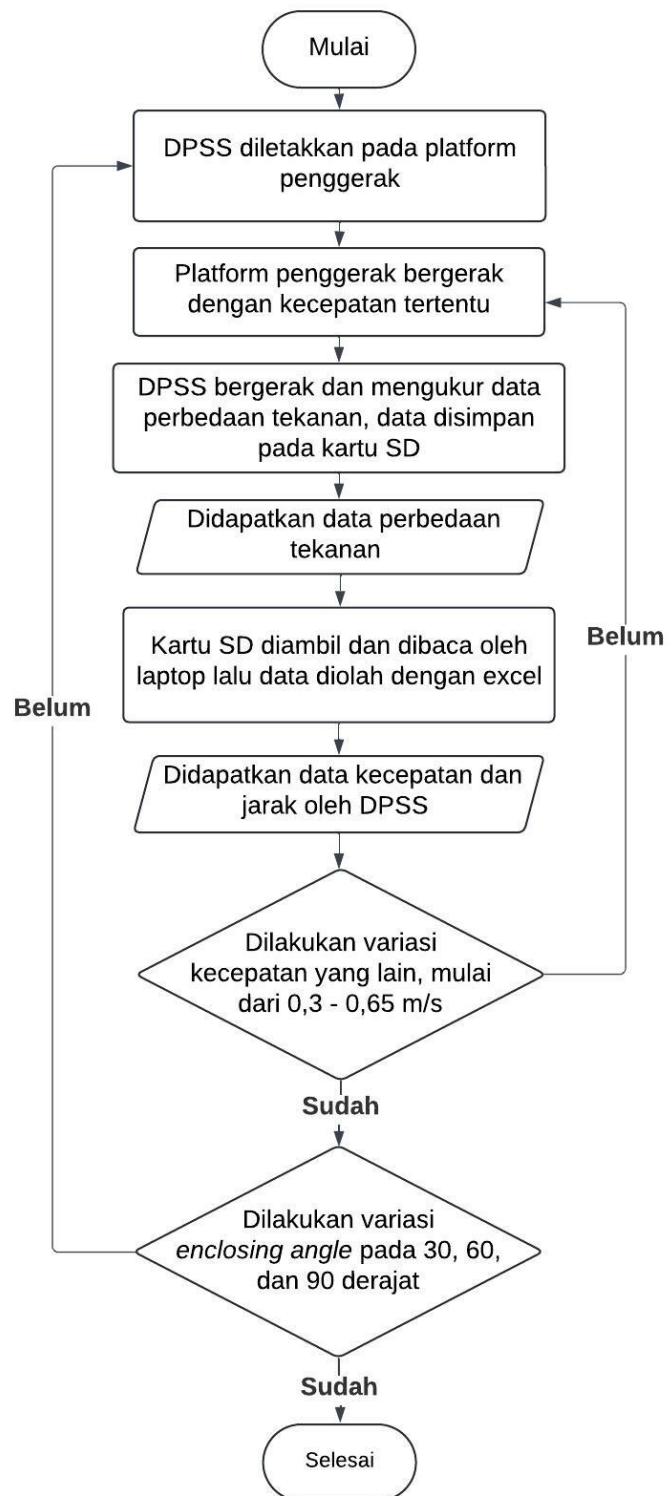
3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian

Dari metode penelitian yang telah ditentukan, maka dapat dibuat diagram alir penelitian seperti Gambar 3.16.



Gambar 3.16. Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.16 menunjukkan proses secara lengkap penelitian yang dilakukan. Sedangkan untuk diagram alir pengambilan data terlihat pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17. Diagram Alir Pengambilan Data

Gambar 3.17 menunjukkan secara khusus proses pengambilan data yang dilakukan pada penelitian.

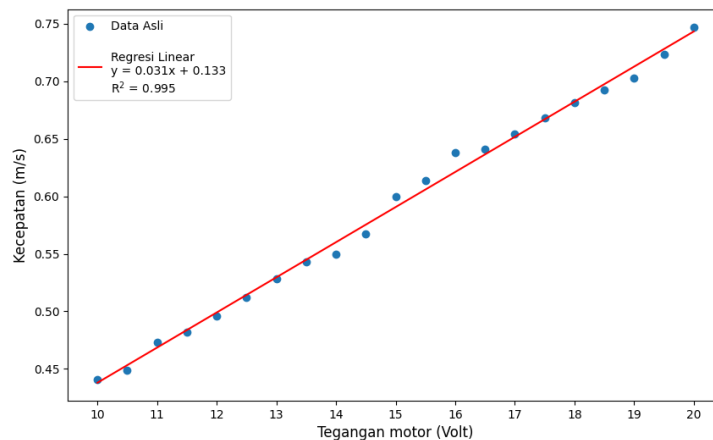
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Hasil Pengujian Sistem Platform Penggerak

Pengujian telah dilakukan dengan memvariasikan tegangan masukan dari 10V hingga 20V, dengan kenaikan setiap 0,5V. Data lengkap mengenai kecepatan platform penggerak yang diperoleh dari serangkaian pengujian ini terlihat pada Tabel A.1. Hasil data tersebut kemudian diplot menjadi grafik untuk visualisasi hubungan antara tegangan dan kecepatan, yang terlihat pada Gambar 4.1.



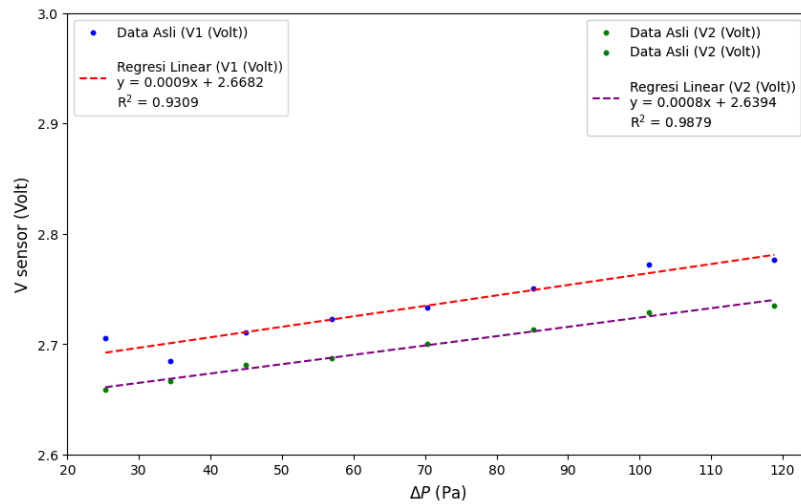
Gambar 4.1. Grafik Kecepatan Platform Terhadap Tegangan Motor

Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara kecepatan platform penggerak dengan tegangan motor adalah linear. Persamaan regresi linear yang dihasilkan dari data grafik tersebut adalah $y = 0.031x + 0.133$. Gradien sebesar 0,031 menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 Volt pada tegangan akan meningkatkan kecepatan platform rata-rata sebesar 0,031 m/s, sementara intersep 0,133 m/s merepresentasikan perkiraan kecepatan teoretis platform saat tegangan motor 0 Volt, meskipun titik data aktual dimulai dari 10V.

4.1.2 Hasil Pengujian Sistem DPSS

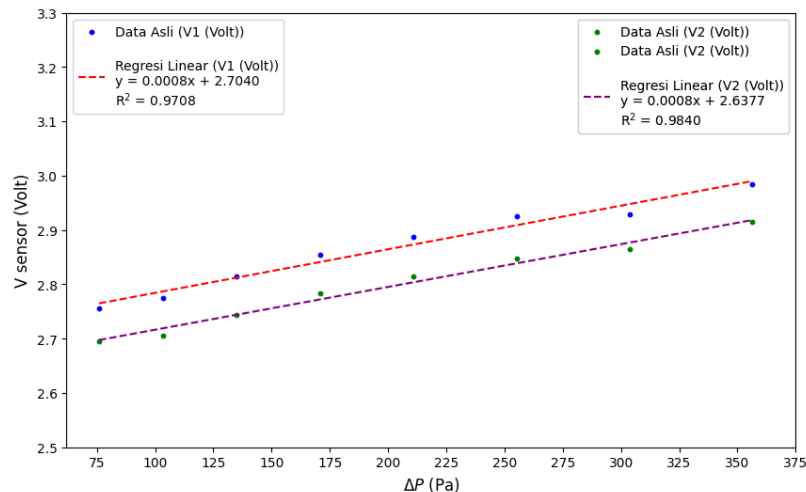
Hasil pengujian sistem DPSS difokuskan pada penentuan nilai sensitivitas sensor perbedaan tekanan MPXV7002. dilakukan pengambilan data tegangan keluaran dari kedua sensor dengan melakukan variasi pada dua parameter, yakni variasi kecepatan platform yang diatur mulai dari 0,3 m/s hingga 0,65 m/s dengan interval kenaikan 0,05 m/s, perlakuan variasi kecepatan ini akan menimbulkan perbedaan tekanan yang dirasakan oleh sensor, dan variasi *enclosing angle* pada 30, 60, dan 90 derajat. Data tegangan yang diperoleh dari kedua sensor pada berbagai kondisi tersebut dapat dirujuk pada Tabel A.2, Tabel A.3, dan Tabel A.4. Berdasarkan data ini, selanjutnya dibuat grafik yang menggambarkan hubungan antara

tegangan keluaran sensor dan perbedaan tekanan pada variasi *enclosing angle* 30° terlihat Gambar 4.2.



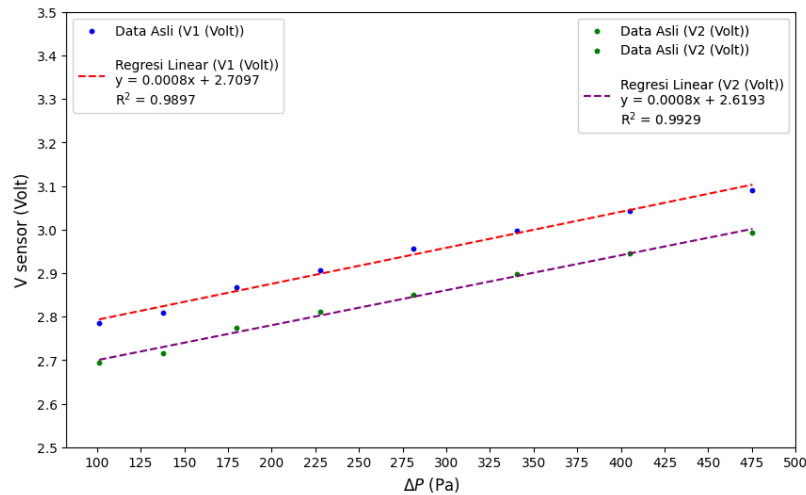
Gambar 4.2. Grafik Sensitivitas Sensor Pada Sudut 30°.

Gambar 4.2 menunjukkan pada sudut 30°, sensor 1 memiliki sensitivitas sebesar 0,0009 V/Pa (0,9 V/kPa) dan sensor 2 sebesar 0,0008 V/Pa (0,8 V/kPa). Sensitivitas sensor ini secara langsung direpresentasikan oleh nilai gradien dari garis regresi linear yang terbentuk pada setiap grafik. Selanjutnya, grafik yang menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran sensor dan perbedaan tekanan pada variasi *enclosing angle* 60° terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik Sensitivitas Sensor Pada Sudut 60°.

Gambar 4.3 menunjukkan sensitivitas untuk Sensor 1 sebesar 0,0008 V/Pa (0,8 V/kPa), dan Sensor 2 juga menunjukkan sensitivitas yang sama yaitu 0,0008 V/Pa (0,8 V/kPa). Selanjutnya, grafik yang menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran sensor dan perbedaan tekanan pada variasi *enclosing angle* 60° terlihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Grafik Sensitivitas Sensor Pada Sudut 90°.

Gambar 4.4 menunjukkan sensitivitas Sensor 1 sebesar 0,0008 V/Pa (0,8 V/kPa) dan Sensor 2 juga 0,0008 V/Pa (0,8 V/kPa). Nilai sensitivitas sensor pada tiap variasi tidak jauh berbeda, berkisar antara 0,8 V/kPa hingga 0,9 V/kPa, dan nilai ini mendekati dengan spesifikasi *datasheet* sensor yang menyatakan sensitivitas sekitar 1V/kPa. Untuk mendapatkan satu nilai tunggal yang akan digunakan dalam pengambilan data selanjutnya, sensitivitas dari ketiga variasi sudut tersebut dirata-ratakan untuk tiap sensor. Rata-rata sensitivitas untuk sensor 1 sekitar 0,833 V/kPa dan untuk sensor 2 sebesar 0,8 V/kPa. Nilai rata-rata sensitivitas inilah yang kemudian akan dijadikan acuan dalam proses pengambilan data.

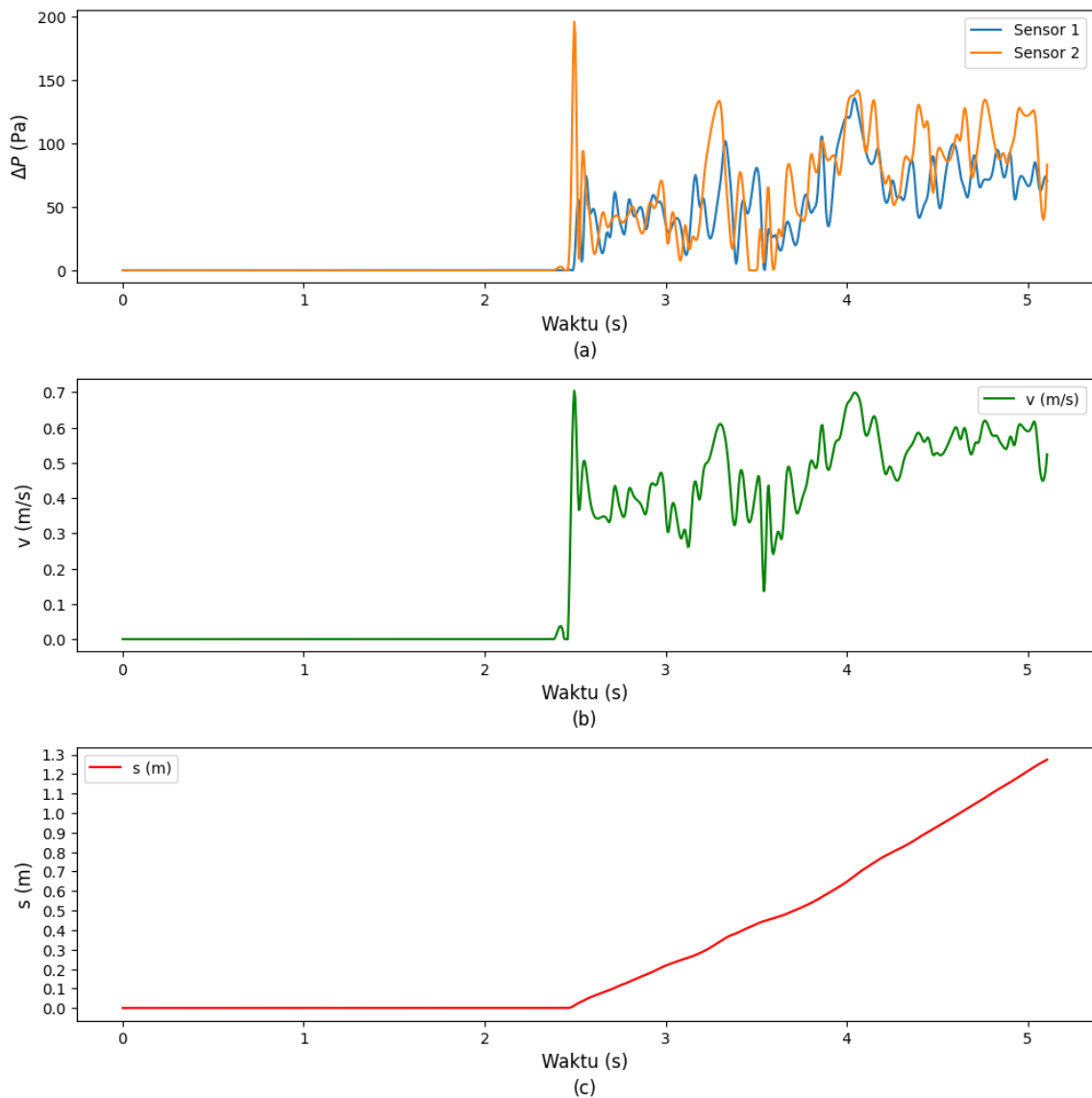
4.1.3 Hasil Pengukuran Kecepatan dan Jarak

Hasil data yang diperoleh DPSS adalah data perbedaan tekanan (ΔP) dari masing masing sensor di sepanjang waktu. Data rata-rata ΔP sensor 1 dan 2 pada setiap pengulangan, terlihat pada Tabel A.5 hingga A.10. Dari data ΔP ini, kemudian dihitung menjadi data kecepatan dengan menggunakan Persamaan 2.15 dan 2.16. Hasil perhitungan kecepatan ini terlihat pada Tabel A.11. Kemudian dapat dibandingkan nilai kecepatan yang didapat dari hasil perhitungan DPSS ini dengan kecepatan referensi dari platform penggerak, sehingga dapat dihitung nilai errornya. Tabel hasil perhitungan error ini terlihat pada Tabel A.12. Hasil rata-rata error pada variasi sudut 30° adalah 4,22%, pada 60° adalah 2,53%, dan pada 90° adalah 3,28%. Nilai error yang kecil ini menunjukkan bahwa nilai kecepatan yang diukur oleh DPSS sudah cukup sesuai dengan kecepatan referensi oleh platform penggerak.

Perhitungan jarak tempuh DPSS dilakukan melalui integrasi numerik metode trapesium, yang mengaproksimasi integral kecepatan terhadap waktu dengan membagi area di bawah kurva *velocity-time* menjadi segmen-segmen trapesium. Prinsipnya, jarak (S) adalah akumulasi luas area di bawah kurva kecepatan, seperti yang dirumuskan pada Persamaan A.11. Pada data diskret (pengambilan sampel kecepatan pada interval waktu Δt), metode trapesium menghitung

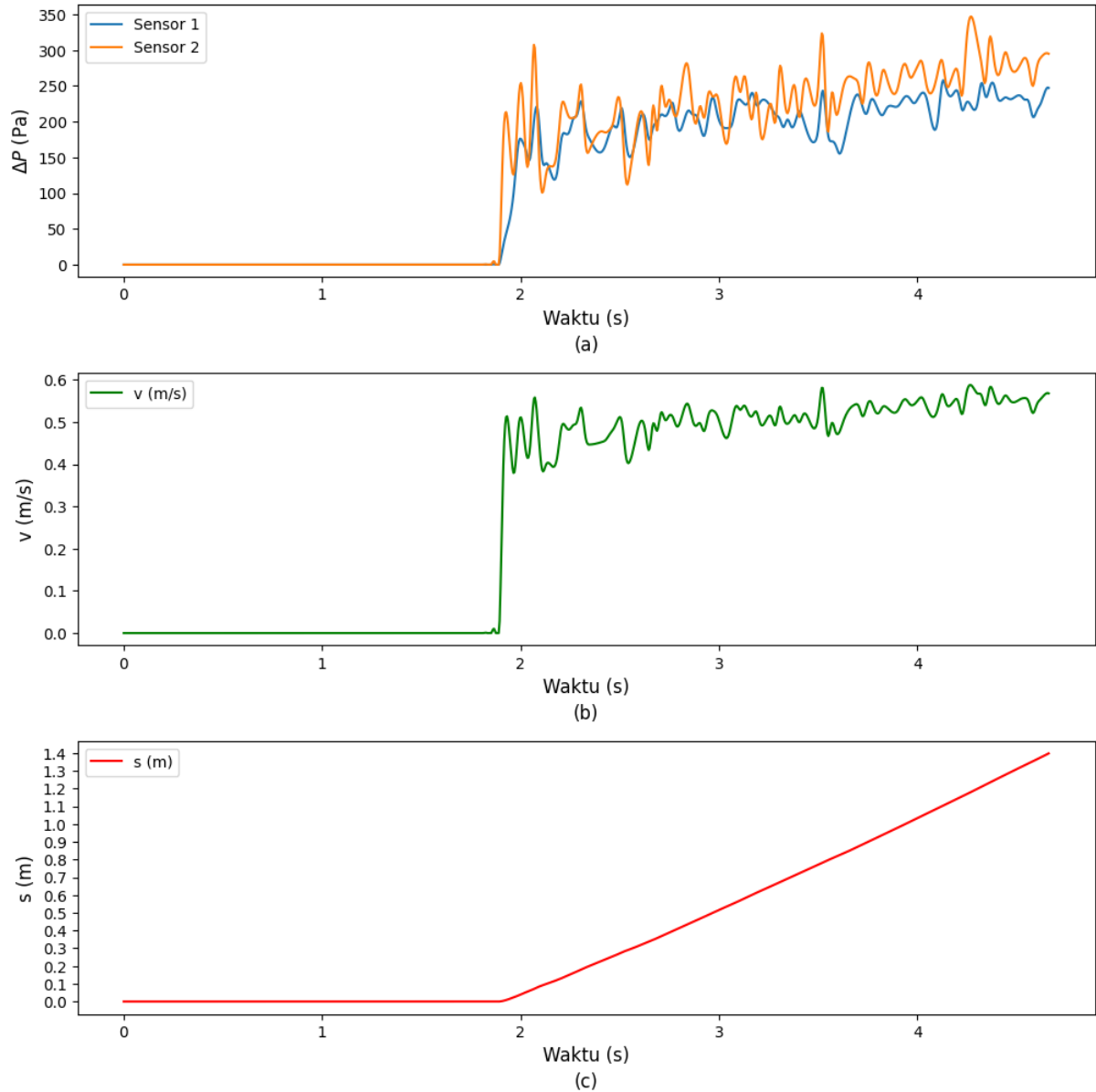
luas setiap segmen antara dua titik data kecepatan dengan menggunakan Persamaan A.12. Total jarak tempuh diperoleh dengan menjumlahkan seluruh ΔS_i dari awal hingga akhir pergerakan seperti pada Persamaan A.13. Metode ini cukup akurat dan cocok untuk data eksperimen DPSS yang diambil secara kontinu dengan interval waktu seragam.

Perhitungan dilakukan pada salah satu pengulangan yang dianggap merupakan data terbaik pada masing-masing variasi kecepatan dan sudut. Tabel data perhitungan jarak terdapat pada lampiran. Dari tabel tersebut, dapat dibuat 3 grafik, yakni grafik perbedaan tekanan terhadap waktu, grafik kecepatan terhadap waktu, dan grafik jarak terhadap waktu. Berikut merupakan salah satu gambar grafik dari variasi *enclosing angle* 30° , yang dianggap terbaik dari semua variasi kecepatan, terlihat pada Gambar 4.5.



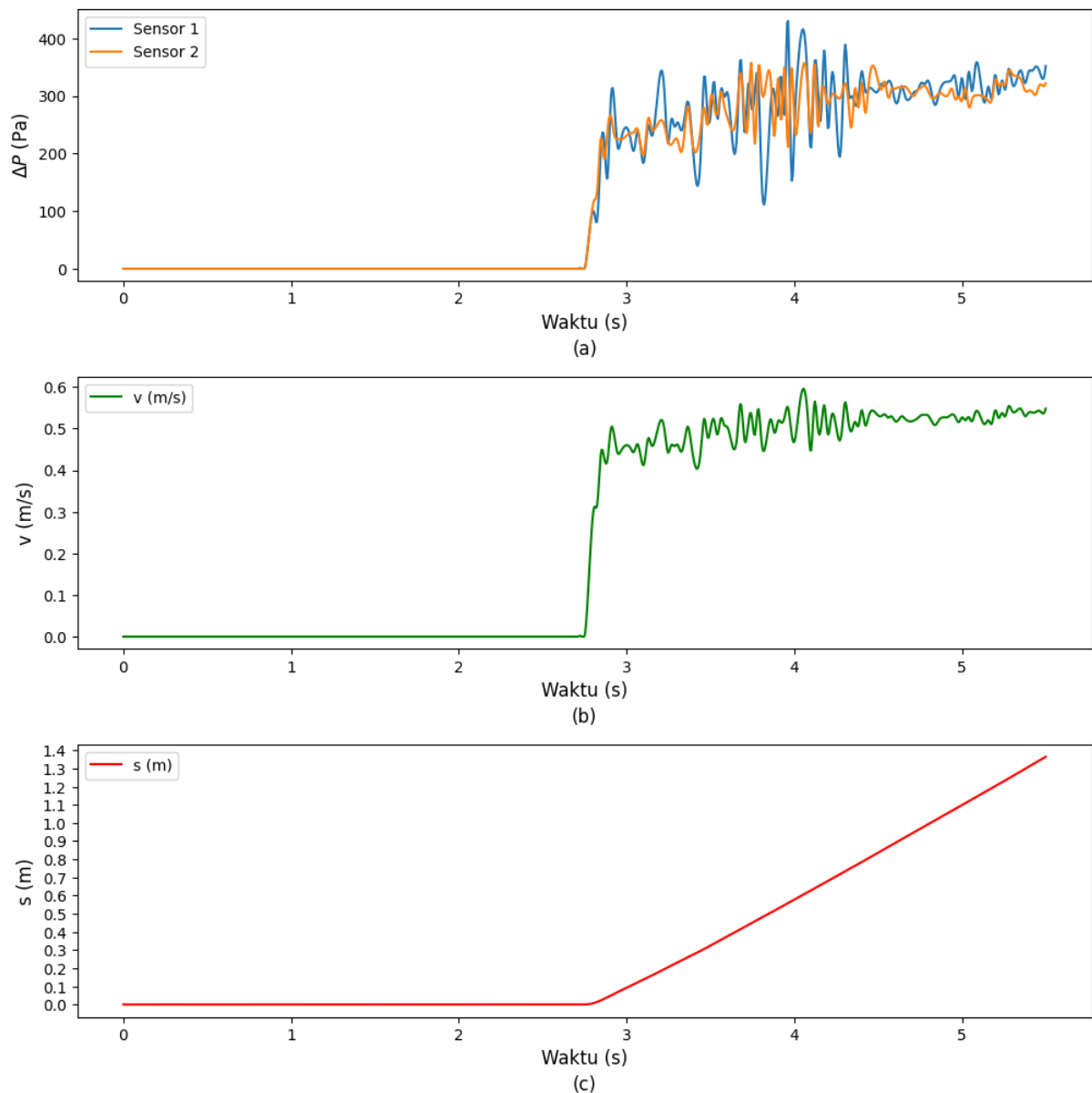
Gambar 4.5. Grafik Data Pada Sudut 30° Kecepatan 0,5 m/s (a) Grafik ΔP Terhadap Waktu, (b) Grafik Kecepatan Terhadap Waktu, dan (c) Grafik Jarak Terhadap Waktu

Gambar 4.5 menunjukkan grafik perbedaan tekanan terhadap waktu, kecepatan terhadap waktu, dan jarak terhadap waktu pada variasi kecepatan 0,5 m/s. Selanjutnya gambar grafik dari variasi *enclosing angle* 60° terlihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Grafik Data Pada Sudut 60° Kecepatan 0,5 m/s (a) Grafik ΔP Terhadap Waktu, (b) Grafik Kecepatan Terhadap Waktu, dan (c) Grafik Jarak Terhadap Waktu

Gambar 4.6 menunjukkan grafik perbedaan tekanan terhadap waktu, kecepatan terhadap waktu, dan jarak terhadap waktu pada variasi kecepatan 0,5 m/s. Selanjutnya gambar grafik dari variasi *enclosing angle* 90° terlihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.7. Grafik Data Pada Sudut 90° Kecepatan 0,5 m/s (a) Grafik ΔP Terhadap Waktu, (b) Grafik Kecepatan Terhadap Waktu, dan (c) Grafik Jarak Terhadap Waktu

Gambar 4.7 menunjukkan grafik perbedaan tekanan terhadap waktu, kecepatan terhadap waktu, dan jarak terhadap waktu pada variasi kecepatan 0,5 m/s. Gambar grafik pada variasi kecepatan yang lain dapat dilihat pada lampiran. Hasil perhitungan jarak tiap variasi disajikan pada Tabel A.13. Dapat dibandingkan hasil perhitungan jarak ini dengan jarak tempuh dari DPSS yang sebenarnya, yakni sebesar 1,315 m, sehingga dapat dihitung nilai errornya. Tabel perhitungan error untuk jarak ini disajikan pada Tabel A.14. Dari hasil tersebut, didapatkan rata-rata error pada variasi sudut 30° adalah 2,3%, pada 60° adalah 2,65%, dan pada 90° adalah 2,3%. Nilai error yang kecil ini menunjukkan bahwa nilai jarak yang diukur oleh DPSS sudah cukup akurat dengan jarak tempuh sebenarnya.

4.2 Pembahasan

Pada Tugas akhir ini, dirancang alat DPSS sederhana yang terdiri dari dua sensor perbedaan tekanan MPXV7002DP dan Arduino Nano. Alat ini diuji pada tiga variasi *enclosing angle*, yaitu 30°, 60°, dan 90°. DPSS diletakkan pada platform yang dapat bergerak di atas rel lintasan sepanjang 1,315 m. Sebelum proses pengambilan data, ditentukan terlebih dahulu hubungan antara tegangan masukan motor dengan kecepatan aktual yang dihasilkan oleh platform penggerak. Selanjutnya adalah menentukan nilai sensitivitas dari kedua sensor MPXV7002DP. DPSS digerakkan oleh platform pada kecepatan tertentu. Secara teoretis, perbedaan tekanan (ΔP) yang dirasakan sensor pada tiap kecepatan dapat dihitung. Dengan memvariasikan kecepatan platform, akan diperoleh tegangan keluaran dari masing-masing sensor. Gradien dari plot grafik yang menggambarkan hubungan antara tegangan keluaran sensor terhadap nilai ΔP perhitungan ini yang menunjukkan nilai sensitivitas sensor. Nilai sensitivitas sensor 1 sebesar 0,833 V/kPa dan sensor 2 sebesar 0,8 V/kPa. Pada proses pengambilan data, data yang didapatkan adalah ΔP dari sensor 1 dan 2 di sepanjang waktu. Data ΔP ini kemudian dihitung menjadi kecepatan, dan di integralkan secara numerik dengan metode trapesium untuk mencari jarak tempuh dari DPSS.

Dari semua data dan grafik yang ada, dipilih salah satu grafik yakni Gambar 4.6, untuk dilakukan analisis. Dari grafik tersebut, pada fase awal, dari $t=0$ hingga sekitar $t=1,9$ detik, sistem berada dalam kondisi diam, yang ditandai dengan nilai ΔP dari kedua sensor yang sama dengan nol, kecepatan yang juga nol, dan tidak ada perubahan jarak. Sekitar $t=1,9$ detik, terjadi sebuah inisiasi gerakan atau aliran yang jelas, ditunjukkan oleh lonjakan tajam dan signifikan pada nilai ΔP kedua sensor, yang menyebabkan kenaikan drastis pada kecepatan dari nol menjadi sekitar 0,4-0,5 m/s, dan pada saat yang sama jarak tempuh mulai bertambah. Memasuki fase dinamis setelah $t>1,9$ detik, data ΔP dari kedua sensor menunjukkan fluktuasi yang berkelanjutan, dengan Sensor 2 (oranye) menunjukkan nilai ΔP sedikit lebih tinggi dan dengan puncak yang lebih menonjol (rata-rata berkisar 200-300 Pa) dibandingkan Sensor 1 (biru), yang mengindikasikan aliran atau gerakan yang terus berlangsung. Fluktuasi pada ΔP ini berakibat pada grafik kecepatan, yang meskipun berosilasi diantara 0,4 m/s hingga mendekati 0,6 m/s, nilai kecepatan rata-ratanya di sekitar 0,5 m/s, sesuai dengan kecepatan referensi dari platform penggerak. Grafik jarak menunjukkan peningkatan yang kontinu dan cenderung linear, mencapai total jarak tempuh sekitar 1,4 meter pada akhir periode pengamatan (sekitar $t=4,8$ s). Grafik-grafik ini menjelaskan sistem pengukuran DPSS mulai dari deteksi perubahan tekanan (ΔP) akibat gerakan, konversinya menjadi data kecepatan, hingga perhitungan jarak tempuh, sekaligus memperlihatkan adanya fluktuasi yang merupakan karakteristik umum dalam pengukuran fluida dinamis.

Gambar 4.5 dan 4.7 merupakan grafik data dari variasi sudut 30° dan 90° pada variasi 0,5 m/s. Kita dapat dilakukan perbandingan dan analisis pengaruh dari *enclosing angle* terhadap perbedaan tekanan pada variasi kecepatan yang sama. Ketika membandingkan karakteristik sinyal perbedaan tekanan (ΔP) dari kedua sensor pada kecepatan 0,5 m/s untuk tiga variasi *enclosing angle* yang berbeda, teramati tren yang jelas dalam hal nilai dan stabilitas sinyal. Pada sudut 30° nilai ΔP yang terukur menunjukkan fluktuasi paling tinggi dan paling tidak stabil, dengan rata-rata ΔP yang juga cenderung paling rendah. Pada sudut 60° grafik ΔP menunjukkan peningkatan signifikan baik dalam hal nilai ΔP (dengan sensor 2 misalnya, rata-rata ΔP berkisar 200-300 Pa dan sensor 1 sedikit di bawahnya) maupun dalam hal stabilitasnya. Sedangkan pada konfigurasi sudut 90° , di mana nilai ΔP yang dihasilkan adalah yang paling tinggi di antara ketiga variasi sudut. Kedua sensor pada sudut 90° ini secara konsisten mencatat ΔP dalam rentang 200-350 Pa, bahkan Sensor 1 mampu mencapai puncak ΔP di atas 400 Pa. Secara keseluruhan, untuk kecepatan platform yang sama, dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata ΔP meningkat seiring dengan bertambahnya *enclosing angle*. Nilai ΔP pada *enclosing angle* 30° lebih rendah dibandingkan 90° pada kecepatan aliran yang sama. Hal ini dikarenakan pada sudut 30° fluida belum mengalami akselerasi sebesar pada sudut 90° ketika mengalir melewati permukaan sensor. Akselerasi fluida yang lebih besar di sekitar sisi-sisi sensor (yang diwakilkan oleh konfigurasi sudut 90°) menyebabkan penurunan tekanan yang lebih drastis dari titik stagnasi, sehingga perbedaan tekanan yang diukur oleh menjadi lebih besar.

Kemampuan DPSS untuk mengukur kecepatan dan jarak ini memiliki manfaat yang penting, terutama untuk navigasi robot bawah air seperti AUV. Dengan data kecepatan dan jarak tersebut, AUV bisa lebih baik dalam memperkirakan posisinya saat bergerak di dalam air. Ini membantunya menjalankan misi sesuai jalur yang ditentukan dan kembali ke titik awal dengan lebih akurat. Selain untuk AUV, potensi penggunaan DPSS juga cukup terbuka untuk aplikasi lain yang berhubungan dengan aliran fluida. Contohnya adalah untuk mengukur kecepatan aliran air di sungai atau saluran irigasi, yang datanya berguna untuk pemantauan lingkungan atau kebutuhan pertanian. Dengan penyesuaian tertentu pada desain dan materialnya, DPSS dapat berguna untuk mengukur jenis aliran lain dalam skala tertentu, atau bahkan bisa menjadi alat bantu praktis yang bagus untuk pembelajaran tentang prinsip dasar bagaimana pengukuran aliran fluida.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem DPSS berhasil dikembangkan dengan menggunakan dua sensor perbedaan tekanan MPXV7002DP yang terintegrasi dengan Arduino Nano dan diuji dengan variasi *enclosing angle* (30° , 60° , dan 90°), dan berbagai variasi kecepatan (0,3 m/s hingga 0,65 m/s). Pengembangan ini menunjukkan bahwa prinsip perbedaan tekanan dapat diimplementasikan secara efektif untuk menghasilkan data kecepatan.
2. Analisis terhadap kinerja sensor perbedaan tekanan dalam kondisi lingkungan bawah air, khususnya pada kecepatan rendah yang diuji, telah berhasil dilakukan. Konfigurasi *enclosing angle* berpengaruh terhadap besar ΔP , di mana pada sudut 90° menghasilkan nilai ΔP yang lebih tinggi dibandingkan sudut 30° atau 60° pada kecepatan yang sama. Telah berhasil ditentukan juga nilai sensitivitas untuk sensor 1 sekitar 0,833 V/kPa dan sensor 2 sekitar 0,8 V/kPa.
3. Sistem DPSS berhasil digunakan untuk mengukur kecepatan gerak dan jarak tempuh. Hasil perbandingan antara kecepatan yang diukur oleh DPSS dengan kecepatan referensi menunjukkan nilai error rata-rata, yaitu 4,22% pada sudut 30° , 2,53% pada 60° , dan 3,28% pada 90° . Sedangkan untuk pengukuran jarak tempuh, hasil perbandingan dengan jarak sebenarnya menunjukkan error yang kecil, yaitu 2,3% pada variasi sudut 30° , 2,65% pada 60° , dan 2,3% pada 90° .

5.2 Saran

Saran penelitian ke depan yang dapat dipertimbangkan dari hasil Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Optimasi Desain dan Pemrosesan Sinyal DPSS
Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada optimasi desain fisik DPSS, termasuk eksplorasi bentuk kepala sensor dan konfigurasi *enclosing angle* yang paling ideal untuk berbagai kondisi aliran. Selain itu, penerapan metode pemrosesan sinyal dapat diterapkan untuk mengurangi derau (*noise*), meningkatkan akurasi, serta stabilitas pengukuran kecepatan.
2. Validasi Kinerja DPSS pada AUV di Lingkungan Sebenarnya
Untuk menguji kelayakan praktis dan keandalan sistem, penelitian selanjutnya sangat disarankan untuk melakukan integrasi dan validasi kinerja DPSS secara langsung pada AUV. Pengujian dalam lingkungan operasional yang realistis akan mengevaluasi respons sistem terhadap manuver dinamis AUV, serta memungkinkan perbandingan performa yang komprehensif dengan sensor navigasi standar lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariza Ramirez, W., Leong, Z. Q., Nguyen, H. D. dan Gamini Jayasinghe, S. 2020. "Machine learning post processing of underwater vehicle pressure sensor array for speed measurement". **Ocean Engineering** 213: 107771.
- A'imah, H. 2016. "Rancang Bangun Sistem Monitoring Laju Aliran Dengan Metode Perbedaan Tekanan Pada Pitot Tube Menggunakan Sensor Mpx2010dp Berbasis Arduino". Disertasi. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Berkenbusch, J. 2015. "Development of a control system for automated cab roof deflectors for articulated trucks". Tesis. University of Huddersfield, School of Computing and Engineering. Masters Thesis.
- Freitas, M. L. B., Freitas, W. L. B. dan Stevan Jr, S. L. 2020. "Knee joint goniometer prototype using Hall effect sensors". **Journal of Applied Instrumentation and Control** 7, 1: 1–8.
- Fuentes-Pérez, J. F., Kalev, K., Tuhtan, J. A. dan Kruusmaa, M. 2016. "Underwater vehicle speedometry using differential pressure sensors: Preliminary results". **2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)**156–160.
- Fuentes-Pérez, J. F., Meurer, C., Tuhtan, J. A. dan Kruusmaa, M. 2018. "Differential Pressure Sensors for Underwater Speedometry in Variable Velocity and Acceleration Conditions". **IEEE Journal of Oceanic Engineering** 43, 2: 418–426.
- Iqbal, M. T. dan Faisal, Z. 2018. "Studi Kecepatan Aliran Air dengan Menggunakan Tabung Pitot". **INTEK: Jurnal Penelitian** 5, 1: 14–21.
- J. Anderson, J. 1985. **Fundamentals of Aerodynamics**. Edisi 3rd. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Junaidin, B., Kusumaningrum, A., Prayogih, W. dan Reo, Y. 2022. "Rancang Bangun Pengukur Kecepatan Angin Berbasis Arduino untuk Terowongan Angin Low Subsonic". **Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, Controls** 4, 2: 187–196.
- Meurer, C., Francisco Fuentes-Pérez, J., Palomeras, N., Carreras, M. dan Kruusmaa, M. 2020. "Differential Pressure Sensor Speedometer for Autonomous Underwater Vehicle Velocity Estimation". **IEEE Journal of Oceanic Engineering** 45, 3: 946–978.
- Neves, J. A. C. dan da Silva, A. D. L. 2022. "Magnetic Field Imaging Prototype". **International Conference on Multidimensional Sustainability: Transitions and Convergences** Springer Nature Switzerland77–95.

- Package, T. P. S. M. dan Gauge, P. S. S. S. S. 2017. **MPXV7002 Integrated Silicon Pressure Sensor**, www.logosfoundation.org/instrumentation/robo/Datasheets/MPXV7002.pdf. Accessed : 2025 – 03 – 17.
- Pritchard, P. 2010. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition**. John Wiley & Sons.
- Say, M. M. L. 2021. "TA: Pengembangan Modul Galvanic Skin Response (GSR) Berbasis Arduino untuk Pengukuran Tingkat Stress pada Manusia". Doctoral dissertation. Institut Teknologi Nasional.
- Suari, M. 2017. "Pemanfaatan arduino nano dalam perancangan media pembelajaran fisika". **Natural Science Journal** 3, 1: 474–480.
- Villa, M. P., Ferreira, B. M. dan Matos, A. C. 2021. "Differential Pressure Speedometer for Autonomous Underwater Vehicle". **OCEANS 2021: San Diego – Porto** 1–6.
- Zhu, Q., Zhong, K. dan Xie, G. 2014. "Speed estimation for robotic fish based on pressure sensor". **The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)** 2714–2718.

LAMPIRAN A

Penurunan persamaan pada aliran potensial dilakukan dengan mensubstitusikan Persamaan 2.4 ke Persamaan 2.9, akan didapat Persamaan A.1.

$$\begin{aligned}
 V_r &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(-Ur \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \right) \\
 V_r &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(-Ur \cos \theta - Ur \cos \theta \frac{R^2}{r^2} \right) \\
 V_r &= \left(U \cos \theta - U \cos \theta \frac{R^2}{r^2} \right) \\
 V_r &= U \cos \theta \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan 2.4 ke Persamaan 2.10, akan didapat Persamaan A.2.

$$\begin{aligned}
 V_\theta &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-Ur \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \right) \\
 V_\theta &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-Ur \cos \theta - Ur \cos \theta \frac{R^2}{r^2} \right) \\
 V_\theta &= -\frac{1}{r} \left(Ur \sin \theta + Ur \sin \theta \frac{R^2}{r^2} \right) \\
 V_\theta &= -U \sin \theta \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \tag{A.2}
 \end{aligned}$$

Persamaan A.1 adalah komponen kecepatan yang bergerak menjauh atau mendekat dari pusat silinder, menunjukkan seberapa cepat fluida bergerak dalam arah radial. Sedangkan Persamaan A.2 merupakan komponen kecepatan yang bergerak sejajar dengan permukaan silinder, menunjukkan seberapa cepat fluida bergerak di sekitar permukaan silinder (J. Anderson, 1985). Apabila $R = r$, maka didapatkan nilai V_r dan V_θ sesuai pada Persamaan A.3 dan A.4.

$$V_r = 0 \tag{A.3}$$

$$V_\theta = -2U \sin \theta \tag{A.4}$$

Tanda negatif pada Persamaan A.4 menunjukkan arah pergerakan V_θ berlawanan dengan arah aliran fluida U . Kecepatan total dari fluida pada permukaan silinder dituliskan pada Persamaan A.5.

$$V = \sqrt{v_r^2 + v_\theta^2} \tag{A.5}$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan A.3 dan A.4 pada A.5, maka didapatkan persamaan 2.11.

Penurunan rumus kecepatan DPSS, dilakukan dengan mensubstitusikan Persamaan 2.13 ke persamaan 2.14, akan didapat Persamaan A.6 dan Persamaan A.7.

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{4\Delta p}{9 \sin^2(\varphi_B)}} \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta p = \frac{9 \sin^2(\varphi_B) \cdot \rho \cdot v_{\infty}^2}{8} \quad (\text{A.7})$$

Karena digunakan 2 titik pengukuran, yakni titik B dan B*, maka terdapat 2 persamaan Δp yang digunakan, seperti pada Persamaan A.8 dan A.9.

$$\Delta p_1 = P_A - P_B \quad (\text{A.8})$$

$$\Delta p_2 = P_A - P_{B^*} \quad (\text{A.9})$$

Digunakan rata-rata kuadrat pada persamaan A.8 dan A.9, serta mensubstitusikan Persamaan A.7, sehingga didapatkan Persamaan A.10

$$\sqrt{\frac{\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2}{2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{9 \sin^2(\varphi_B) \cdot \rho \cdot v_{\infty}^2}{8}\right)^2 + \left(\frac{9 \sin^2(\varphi_{B^*}) \cdot \rho \cdot v_{\infty}^2}{8}\right)^2}{2}} \quad (\text{A.10})$$

Karena titik B* adalah cerminan dari titik B, maka $\varphi_{B^*} = \varphi_B = \varphi$, sehingga bisa ditulis ulang Persamaan A.10 menjadi Persamaan 2.15 dan 2.16.

Penurunan rumus untuk menghitung jarak tempuh dari kecepatan DPSS dilakukan dengan integrasi numerik metode trapesium pada persamaan A.11, A.12, dan A.13.

$$S = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (\text{A.11})$$

$$\Delta S_i = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \times \Delta t \quad (\text{A.12})$$

$$S_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta S_i \quad (\text{A.13})$$

- v_i dan v_{i+1} adalah kecepatan (m/s)
- Δt adalah selang waktu antar pengukuran (s)
- ΔS_i adalah jarak tempuh (m) selama Δt

Tabel A.1. Data kecepatan pada berbagai variasi tegangan motor

Tegangan motor (Volt)	Kecepatan (m/s)
10	0,441
10,5	0,449
11	0,473
11,5	0,482
12	0,496
12,5	0,512
13	0,528
13,5	0,543
14	0,550
14,5	0,567
15	0,600
15,5	0,614
16	0,638
16,5	0,641
17	0,654
17,5	0,668
18	0,681
18,5	0,692
19	0,703
19,5	0,723
20	0,747

Tabel A.2. Data tegangan keluaran sensor pada variasi tekanan dengan sudut 30°

v (m/s)	ΔP (Pa)	V1 (Volt)	V2 (Volt)
0,3	25,313	2,705	2,659
0,35	34,453	2,685	2,666
0,4	45	2,711	2,681
0,45	56,953	2,723	2,687
0,5	70,313	2,733	2,7
0,55	85,078	2,75	2,713
0,6	101,25	2,772	2,729
0,65	118,828	2,776	2,735

Data lengkap perhitungan jarak pada tiap variasi, berserta grafiknya dapat dilihat pada link berikut:

- <https://its.id/m/DataSudut30derajat>
- <https://its.id/m/DataSudut60derajat>
- <https://its.id/m/DataSudut90derajat>

Tabel A.3. Data tegangan keluaran sensor pada variasi tekanan dengan sudut 60°

v (m/s)	ΔP (Pa)	V1 (Volt)	V2 (Volt)
0,3	75,938	2,756	2,696
0,35	103,359	2,774	2,705
0,4	135	2,815	2,744
0,45	170,859	2,854	2,784
0,5	210,938	2,888	2,815
0,55	255,234	2,926	2,847
0,6	303,75	2,929	2,865
0,65	356,484	2,984	2,915

Tabel A.4. Data tegangan keluaran sensor pada variasi tekanan dengan sudut 90°

v (m/s)	ΔP (Pa)	V1 (Volt)	V2 (Volt)
0,3	101,25	2,786	2,695
0,35	137,813	2,808	2,716
0,4	180	2,867	2,774
0,45	227,813	2,907	2,812
0,5	281,25	2,957	2,85
0,55	340,313	2,998	2,898
0,6	405	3,042	2,945
0,65	475,313	3,091	2,992

Tabel A.5. Data ΔP kedua sensor pada sudut 30° variasi kecepatan 0,3-0,45 m/s

Pengulangan	v (m/s)							
	0,3		0,35		0,4		0,45	
	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$
1	26,75	36,053	39,972	53,217	46,053	72,047	55,797	67,115
2	25,804	28,666	31,25	38,023	46,009	53,136	66,947	62,701
3	30,272	30,205	37,509	51,071	40,831	55,371	61,593	64,64
4	32,894	32,928	38,332	39,098	38,699	45,243	59,47	60,697
5	31,229	32,813	34,71	47,124	39,737	51,111	55,235	72,907
6	22,264	29,207	38,212	47,015	41,578	58,335	50,813	57,748
7	25,247	28,847	32,147	37,486	40,191	53,697	45,407	58,307
8	22,029	34,821	32,977	41,713	45,407	54,589	60,1	71,451
9	29,889	32,619	35,736	39,149	41,667	49,205	58,135	76,437
10	23,088	37,093	42,564	50,827	47,837	52,374	56,305	71,261
rata-rata	26,946	32,325	36,340	44,472	42,800	54,510	57,055	66,326

Tabel A.6. Data ΔP kedua sensor pada sudut 30° variasi kecepatan 0,5-0,65 m/s

Pengulangan	v (m/s)							
	0,5		0,55		0,6		0,65	
	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$
1	74,295	89,949	88,705	87,64	168,818	119,81	106,794	135,995
2	67,053	77,013	108,785	97,409	118,251	93,023	121,79	126,918
3	68,031	86,427	80,846	95,779	104,777	88,16	81,034	116,844
4	62,355	89,431	83,807	95,08	115,345	93,335	109,486	126,426
5	65,889	79,144	85,868	88,826	99,06	114,627	101,703	130,13
6	71,301	83,434	103,749	88,579	92,79	108,182	96,041	113,727
7	66,924	77,703	83,008	87,026	97,629	88,352	134,497	149,055
8	61,622	73,902	78,522	95,961	84,272	106,088	97,034	140,232
9	74,267	84,928	75,773	93,162	116,688	89,458	106,452	127,477
10	70,963	75,067	78,183	95,101	84,273	114,717	101,779	127,626
rata-rata	68,27	81,699	86,724	92,456	108,190	101,575	105,661	129,443

Tabel A.7. Data ΔP kedua sensor pada sudut 60° variasi kecepatan 0,3-0,45 m/s

Pengulangan	v (m/s)							
	0,3		0,35		0,4		0,45	
	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$
1	54,707	62,621	81,753	110,087	124,569	167,052	148,442	173,697
2	53,438	72,104	93,328	105,924	102,371	150,556	140,155	188,868
3	52,422	84,29	87,316	118,81	98,317	145,568	151,94	186,696
4	64,185	81,92	85,996	100,683	108,172	135,103	127,856	173,115
5	58,237	72,955	77,971	109,634	106,875	135,688	158,205	170,61
6	58,286	78,119	87,278	122,356	99,699	134,919	159,609	187,094
7	57,64	74,13	105,838	113,475	113,558	137,618	156,052	183,155
8	62,308	72,94	89,239	129,256	107,703	144,176	198,537	209,064
9	61,455	76,369	92,623	111,879	123,733	138,2	142,16	155,887
10	57,604	73,861	85,171	110,347	95,277	145,763	155,028	165,693
rata-rata	58,028	74,931	88,6513	113,245	108,027	143,464	153,798	179,389

Tabel A.8. Data ΔP kedua sensor pada sudut 60° variasi kecepatan 0,5-0,65 m/s

Pengulangan	v (m/s)							
	0,5		0,55		0,6		0,65	
	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$
1	170,945	193,039	255,42	268,229	325,096	346,148	346,263	409,849
2	182,601	207,987	238,568	244,243	313,911	330,012	366,342	415,823
3	178,817	211,844	264,519	268,522	292,431	305,299	403,239	425,847
4	182,051	222,606	243,885	240,577	301,040	308,638	413,156	422,768
5	178,512	205,223	254,379	256,888	303,544	304,92	424,560	455,552
6	185,398	217,843	243,416	240,422	314,498	314,211	387,357	408,711
7	197,36	225,708	245,823	246,239	305,501	311,069	391,846	425,004
8	224,156	233,761	266,277	272,434	299,276	286,248	384,198	431,866
9	206,335	217,434	259,182	262,25	280,381	278,409	379,418	415,649
10	212,597	226,332	256,626	256,205	301,042	338,712	374,880	442,371
rata-rata	191,877	216,177	252,809	255,600	303,672	312,366	387,125	425,344

Tabel A.9. Data ΔP kedua sensor pada sudut 90° variasi kecepatan 0,3-0,45 m/s

Pengulangan	v (m/s)							
	0,3		0,35		0,4		0,45	
	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$
1	123,342	138,832	123,792	132,472	176,555	178,313	139,779	220,057
2	133,415	149,368	121,857	125,099	157,046	173,912	197,852	228,485
3	128,789	145,619	115,096	117,090	161,065	170,977	209,758	234,846
4	119,583	136,362	119,158	120,003	164,620	175,468	215,274	242,641
5	111,467	125,596	120,026	120,886	163,887	168,988	227,947	243,583
6	109,792	129,855	130,155	128,148	150,764	155,713	248,272	292,479
7	109,372	109,388	124,181	127,996	177,631	187,233	283,921	291,152
8	107,509	109,030	108,742	117,159	193,633	227,373	204,075	226,486
9	109,167	116,499	110,685	129,997	169,154	186,859	284,094	259,828
10	102,078	113,173	95,257	114,011	166,918	185,998	301,402	276,543
rata-rata	115,451	127,372	116,895	123,286	168,127	181,083	223,441	251,610

Tabel A.10. Data ΔP kedua sensor pada sudut 60° variasi kecepatan 0,5-0,65 m/s

Pengulangan	v (m/s)							
	0,5		0,55		0,6		0,65	
	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P1$	$\Delta P2$
1	290,874	292,083	297,579	318,695	395,970	409,857	453,527	495,468
2	269,243	269,210	292,859	314,663	387,357	408,951	437,970	476,363
3	288,638	281,439	319,984	334,097	379,777	427,032	471,661	509,059
4	289,775	297,131	316,965	335,296	387,983	428,499	471,045	516,368
5	258,925	268,178	318,301	336,899	399,993	435,041	474,963	520,860
6	272,184	284,899	344,804	360,483	391,945	423,182	510,890	553,695
7	252,611	270,820	319,328	335,682	401,656	434,576	495,888	542,451
8	244,435	264,113	324,018	344,114	387,108	429,963	518,791	566,201
9	348,697	310,789	339,127	362,980	381,945	418,285	521,293	568,756
10	355,599	309,300	321,902	337,712	390,054	425,702	507,086	560,157
rata-rata	287,098	284,796	319,487	338,062	390,379	424,109	486,311	530,938

Tabel A.11. Data perhitungan kecepatan rata-rata DPSS semua variasi

Kecepatan referensi (m/s)	Kecepatan DPSS (m/s)		
	30°	60°	90°
0,3	0,325	0,282	0,329
0,35	0,380	0,347	0,327
0,4	0,417	0,388	0,394
0,45	0,469	0,445	0,460
0,5	0,517	0,492	0,504
0,55	0,565	0,549	0,541
0,6	0,611	0,604	0,602
0,65	0,648	0,694	0,673

Tabel A.12. Data perhitungan error kecepatan DPSS semua variasi

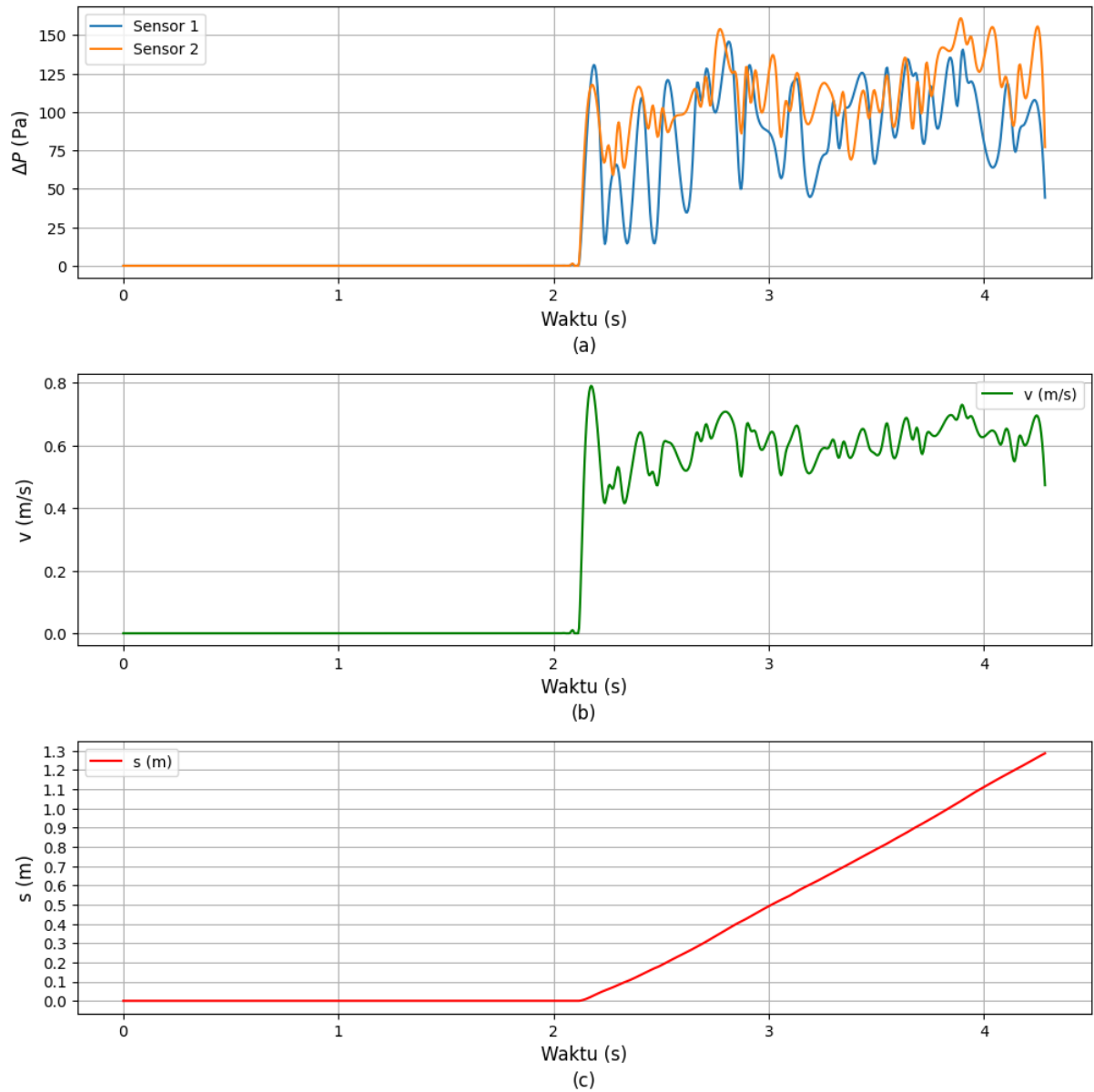
Kecepatan referensi (m/s)	Error (%)		
	30°	60°	90°
0,3	8,426	6,058	9,571
0,35	8,569	0,809	6,634
0,4	4,357	3,013	1,476
0,45	4,223	1,111	2,199
0,5	3,476	1,564	0,832
0,55	2,644	0,201	1,690
0,6	1,803	0,705	0,320
0,65	0,285	6,809	3,495
Rata-rata	4,223	2,534	3,277

Tabel A.13. Data perhitungan jarak tempuh DPSS semua variasi

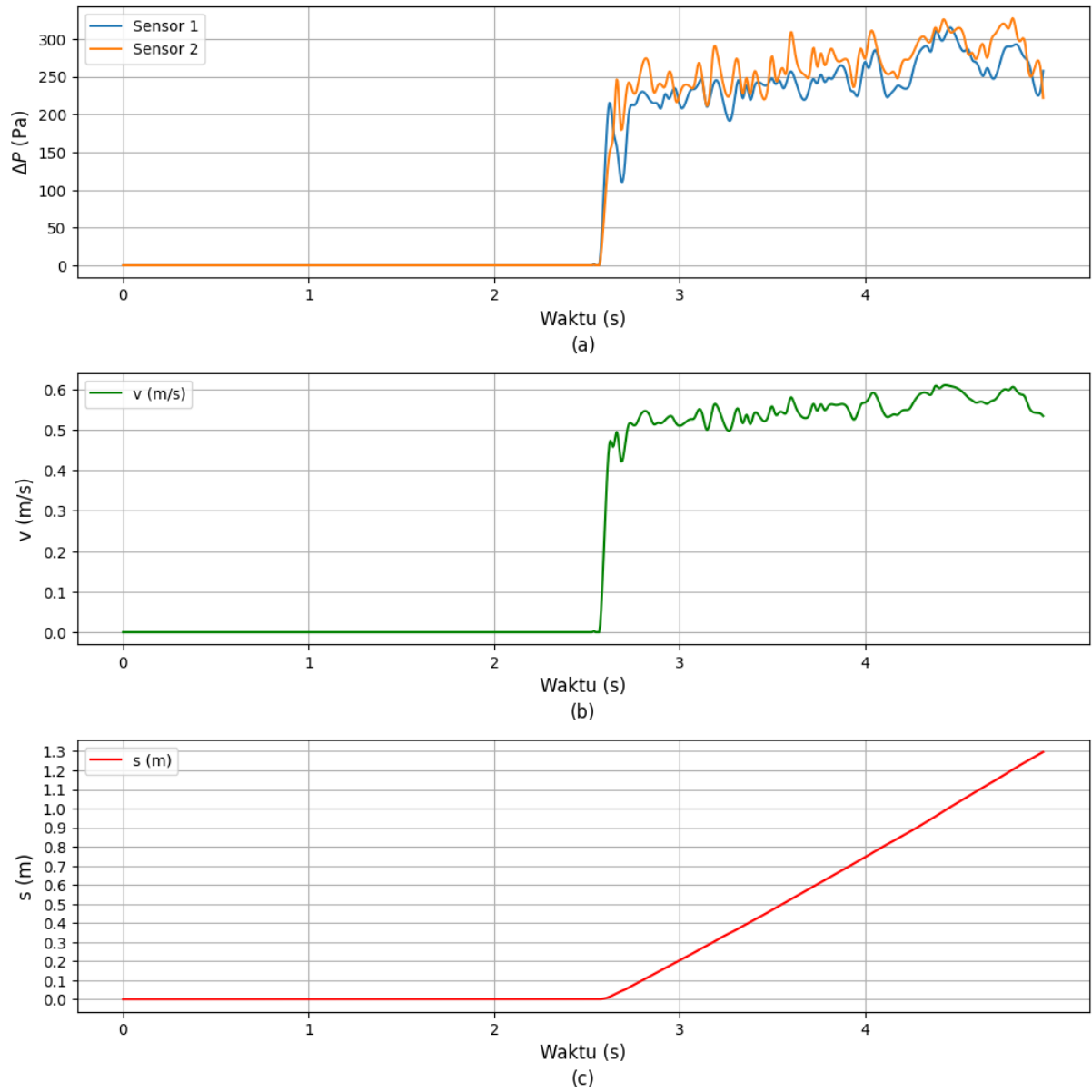
Kecepatan referensi (m/s)	Jarak asli (m)	Jarak DPSS (m)		
		30°	60°	90°
0,3	1,315	1,371	1,257	1,267
0,35	1,315	1,343	1,328	1,356
0,4	1,315	1,292	1,288	1,343
0,45	1,315	1,296	1,381	1,314
0,5	1,315	1,274	1,314	1,365
0,55	1,315	1,276	1,353	1,375
0,6	1,315	1,286	1,296	1,313
0,65	1,315	1,322	1,259	1,302
Rata-rata		1,307	1,309	1,329

Tabel A.14. Data perhitungan error jarak DPSS semua variasi

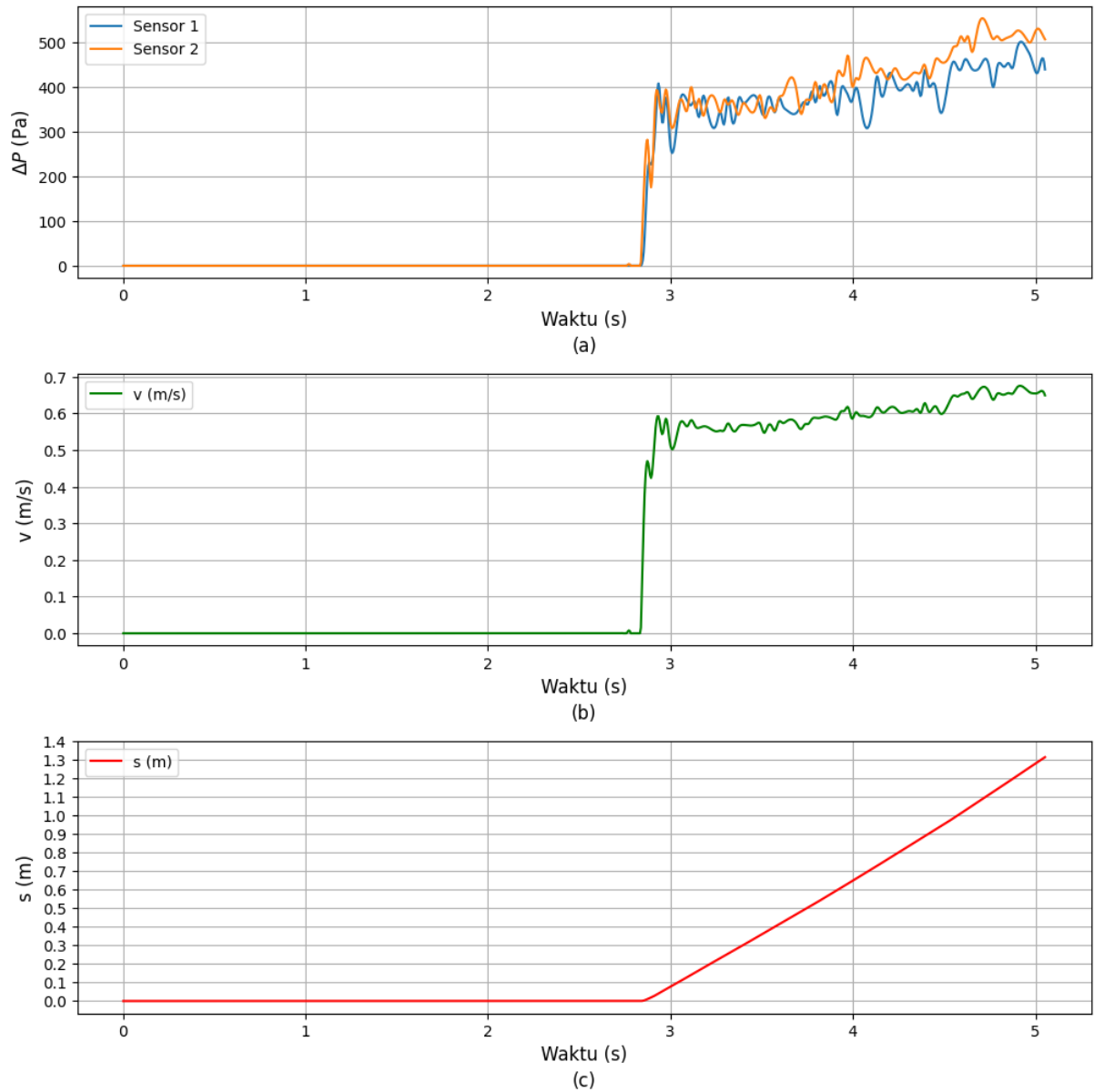
Kecepatan referensi (m/s)	Jarak asli (m)	Error (%)		
		30°	60°	90°
0,3	1,315	4,248	4,395	3,635
0,35	1,315	2,119	1,014	3,148
0,4	1,315	1,774	2,087	2,151
0,45	1,315	1,456	5,041	0,038
0,5	1,315	3,150	0,106	3,772
0,55	1,315	2,939	2,871	4,526
0,6	1,315	2,206	1,421	0,162
0,65	1,315	0,506	4,273	0,988
Rata-rata		2,300	2,651	2,302



Gambar A.1. Grafik data pada sudut 30° kecepatan 0,6 m/s (a) grafik ΔP terhadap waktu, (b) grafik kecepatan terhadap waktu, dan (c) grafik jarak terhadap waktu



Gambar A.2. Grafik data pada sudut 60° kecepatan 0,6 m/s (a) grafik ΔP terhadap waktu, (b) grafik kecepatan terhadap waktu, dan (c) grafik jarak terhadap waktu



Gambar A.3. Grafik data pada sudut 90° kecepatan 0,6 m/s (a) grafik ΔP terhadap waktu, (b) grafik kecepatan terhadap waktu, dan (c) grafik jarak terhadap waktu

LAMPIRAN B

Program B.1. Program Arduino DPSS

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_ADS1X15.h>
3 #include <SD.h>
4 #include <math.h>
5 #define SD_CS_PIN 10      // Pin CS untuk SD card
6 #define THRESHOLD 600     // Nilai batas untuk memulai/berhenti merekam
7 #define VOLTMETER 640     // Nilai ambang batas untuk voltase baterai
8 // Pin untuk LED RGB
9 #define RED_PIN 4
10 #define GREEN_PIN 2
11 #define BLUE_PIN 3
12 // Buat objek ADS1115
13 Adafruit_ADS1115 ads;    // Alamat I2C ADS1115 biasanya 0x48
14 File dataFile;
15 bool recording = false;
16 int fileIndex = 1;
17 // Variabel untuk mengatur waktu kedipan LED
18 unsigned long previousMillis = 0;
19 const long interval = 200; // Interval kedipan (100 ms)
20 bool ledState = false;    // Status LED
21 // Variabel untuk mengatur waktu stopwatch
22 unsigned long startTime = 0;
23 unsigned long currentTime = 0;
24 // Variabel global untuk sensitivitas sensor (1V/kPa)
25 float sensorSensitivity1 = 0.00085; // Sensitivitas sensor1 dalam V/Pa
26 float sensorSensitivity2 = 0.000818; // Sensitivitas sensor2 dalam V/Pa
27 // Variabel koreksi error yang akan dihitung secara dinamis
28 float correctionValueMPX1 = 2.72;
29 float correctionValueMPX2 = 2.62;
30 void setup() {
31     // Inisialisasi serial monitor
32     Serial.begin(9600);
33     // Inisialisasi ADS1115
34     ads.begin();
35     // Inisialisasi SD card
36     if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
37         Serial.println("Gagal menginisialisasi SD card!");
38         // Menyalakan LED kuning berkedip
39         while (1) {
40             unsigned long currentMillis = millis();
41             if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
42                 previousMillis = currentMillis;
43                 ledState = !ledState; // Toggle LED state
44                 if (ledState) {
45                     setColor(255, 255, 0); // Kuning
46                 } else {
47                     setColor(0, 0, 0); // Matikan LED
48                 }
49             }
50         }
51     }
52 }
```

Program B.2. Program Arduino Platform Penggerak

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 // Definisi pin
4 #define BUTTON_PIN A2           // Pin untuk tombol
5 #define POT_PIN A6              // Pin untuk potensiometer
6 #define LIMIT_SWITCH_1_PIN A0   // Pin untuk limit switch 1
7 #define LIMIT_SWITCH_2_PIN A1   // Pin untuk limit switch 2
8 #define SPEED_SENSOR_PIN 2      // Pin untuk sensor kecepatan
9 #define RELAY_MOTOR_PIN 6       // Pin untuk sensor kecepatan
10 // Definisi pin untuk LED RGB
11 #define RED_PIN 13              // Pin untuk LED Merah
12 #define GREEN_PIN 11           // Pin untuk LED Hijau
13 #define BLUE_PIN 12            // Pin untuk LED Biru
14 // Inisialisasi LCD
15 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
16 void setup() {
17     Serial.begin(9600);
18     pinMode(BUTTON_PIN, INPUT);
19     pinMode(LIMIT_SWITCH_1_PIN, INPUT);
20     pinMode(LIMIT_SWITCH_2_PIN, INPUT);
21     pinMode(SPEED_SENSOR_PIN, INPUT);
22     //inisiasi PIN RELAY motor
23     pinMode(RELAY_MOTOR_PIN, OUTPUT);
24     // Inisialisasi pin LED RGB
25     pinMode(RED_PIN, OUTPUT);
26     pinMode(GREEN_PIN, OUTPUT);
27     pinMode(BLUE_PIN, OUTPUT);
28     // Inisialisasi LCD
29     lcd.init();
30     lcd.backlight();
31     digitalWrite(RELAY_MOTOR_PIN, HIGH);
32     lcd.setCursor(0, 0);
33     lcd.print(" Atur kecepatan ");
34     lcd.setCursor(0,1);
35     lcd.print(" motor dari PSU ");
36     delay (2500);
37     lcd.clear();
38 }
```

Kode program Arduino DPSS dan platform penggerak secara lengkap, dapat di lihat pada link berikut:

- its.id/m/ProgramArduinoDPSS
- its.id/m/ProgramArduinoPlatformPenggerak

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Antonius Wijaya, lahir pada 11 Agustus 2003 di Kota Surabaya. Penulis adalah anak pertama dari 2 bersaudara. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan Strata-1 di Departemen Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan Nomor Regristasi Pokok 5001211068. Sebelumnya penulis menempuh pendidikan sekolah dasar di SD Negeri Wadung Asri. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di sekolah di SMPK Santo Yusup Tropodo dan SMA Santo Carolus. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai kegiatan akademik dan non akademik di luar jam kuliah. Di

ranah kegiatan akademik penulis aktif menjadi Asisten dan Koordinator Asisten di Laboratorium Fisika Dasar. Untuk kegiatan non-akademik penulis aktif berorganisasi di tim robotik Banyubramanta yakni salah satu tim robotik ITS yang berfokus pada riset dan inovasi robot bawah air, dengan jabatan terakhir sebagai ketua tim tahun 2024.

Email: 5001211068@student.its.ac.id