

## Pengembangan *Under Water Remotely Operated Vehicle* (UWROV) untuk Eksplorasi Lingkungan Bawah Air Kedalaman Rendah

Christiand<sup>\*\*</sup>, Hulio Caesko<sup>a</sup>, Filian Arbiyani<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya  
Kampus III BSD Atma Jaya, Tangerang, Banten, Indonesia

\*E-mail: christiand@atmajaya.ac.id

### Abstract

Observation activities in the underwater environment can be conducted directly through human diving and using a vehicle known as an underwater remotely operated vehicle (UWROV). This vehicle can be controlled remotely and has various sensors and mechanisms to substitute human functions during exploration activities. The research presented in this article shows the development of a UWROV designed for relatively confined underwater environments, such as shallow freshwater and artificial lakes in specific areas. The UWROV is compact and uses readily available materials, making it cost-effective. The UWROV demonstrates maneuverability with a maximum speed of 0.2 m/s and a turning speed of 1.21 rad/s. Furthermore, the UWROV can maintain a stable floating position within 0.015 meters position deviation range along its workspace's vertical (z-axis).

**Keywords:** ROV, exploration, under-water, lake, diving

### Abstrak

Aktifitas observasi pada lingkungan bawah air selain dapat dilakukan secara langsung dengan penyelaman manusia, dapat juga dilakukan dengan sebuah kendaraan yang disebut sebagai *under water remotely operated vehicle* (UWROV). Kendaraan tersebut dapat dikendalikan dari jarak jauh dan dilengkapi dengan berbagai sensor dan mekanisme untuk menggantikan fungsi manusia pada kegiatan eksplorasi. Kerja penelitian yang dipaparkan pada artikel ini telah mengembangkan sebuah UWROV yang ditujukan untuk lingkungan bawah air yang tidak terlalu besar, seperti danau air tawar dengan kedalaman rendah serta danau-danau buatan pada area tertentu. UWROV yang telah dikembangkan berukuran kecil dan mengutamakan pemilihan material yang mudah didapat di pasaran sehingga berbiaya murah. Pada eksperimen yang telah dilakukan, UWROV dapat melakukan maneuver dengan kecepatan 0.2 m/detik untuk gerak linear dan 1.2 rad/detik untuk gerak putar atau berbelok. UWROV juga mampu mempertahankan posisi diam melayang dengan deviasi posisi sebesar 0.015 meter pada sumbu-z (vertikal) ruang kerja.

**Kata kunci:** ROV, eksplorasi, bawah-air, danau, penyelaman

### 1. Pendahuluan

Aktifitas observasi pada lingkungan bawah air dilakukan untuk pengamatan maupun pemeriksaan terhadap objek-objek yang berada di dalam air. Salah satu contohnya adalah kegiatan eksplorasi dasar danau yang ditujukan untuk mempelajari lingkungan bawah air danau [1][2][3]. Manfaat dari kegiatan eksplorasi tersebut salah satunya adalah sebagai usaha untuk menjaga dan melestarikan kualitas sumber air bersih bagi warga yang tinggal di sekitar danau. Contoh lain dari aktifitas observasi bawah air adalah kegiatan pengecekan berkala komponen kapal, pengecekan berkala kondisi pipa-pipa bawah air [4][5], sampai pencarian korban bencana atau tenggelam di lingkungan bawah air [6].

Untuk melakukan berbagai aktifitas observasi bawah air tentunya diperlukan suatu cara maupun metode yang sesuai. Metode paling umum untuk aktifitas observasi pada lingkungan bawah air adalah dengan melakukan penyelaman ke dalam air oleh manusia. Metode tradisional ini memiliki keterbatasan kedalaman air yang bisa dilakukan. Hal itu dikarenakan penyelam hanya mampu menahan tekanan air hanya sampai pada tingkat kedalaman tertentu. Selain itu, visibilitas objek yang diobservasi akan semakin menurun seiring kedalaman air dikarenakan penurunan penetrasi cahaya alami dari matahari di dalam air. Hal tersebut tentunya mengurangi kualitas observasi yang dapat dilakukan oleh penyelam manusia. Lebih jauh lagi, seorang penyelam sangat bergantung pada ketersediaan oksigen yang dibawanya. Hal tersebut tentunya membuat hasil eksplorasi dan observasi tidak maksimal akibat waktu penyelaman yang terbatas.

Aktifitas observasi bawah air dapat juga dilakukan dengan menggunakan *under water remotely operated vehicle* (UWROV) [7]. Dengan metode ini, aktifitas penyelaman dilakukan oleh sebuah kendaraan bawah air tanpa awak yang dapat menyelam dan beroperasi secara otonom maupun melalui kendali jarak jauh. UWROV awalnya dikembangkan untuk aktifitas-aktifitas bawah air untuk eksplorasi pada laut dalam, seperti industri perminyakan, industri pemipaan

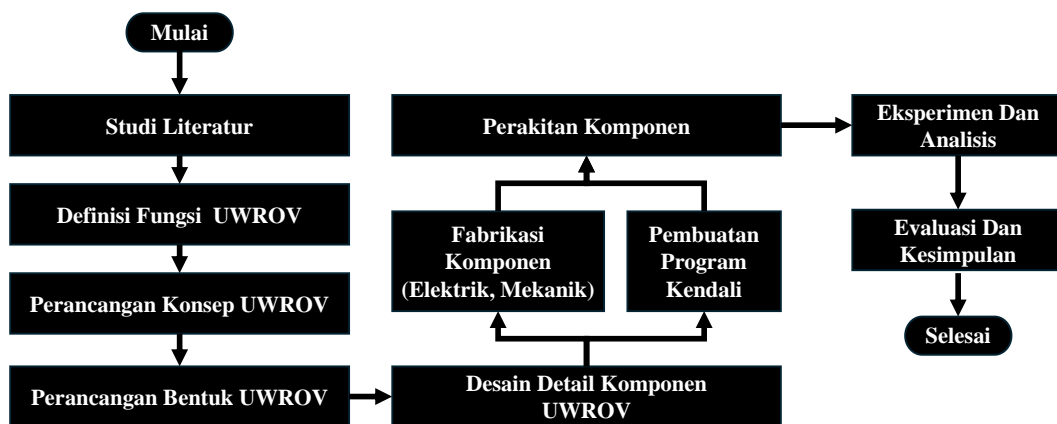
bawah laut, industri transportasi bawah laut, dan industri lainnya yang berhubungan dengan eksplorasi bawah laut. Faktor keselamatan, kepraktisan, nir-awak, dan kendali jarak jauh menjadi kelebihan utama penggunaan UWROV pada lingkungan dimana manusia sangat terbatas dalam menjalankan aktifitas observasi [8]. Walaupun begitu, UWROV untuk laut dalam memiliki spesifikasi, fitur, harga, dan biaya pengoperasian yang terlalu berlebih untuk digunakan pada lingkungan bawah air dengan kedalaman air rendah seperti danau. Danau sendiri merupakan sebuah perairan yang dicirikan memiliki arus yang sangat lambat (0.001-0.01 m/detik) atau tidak ada arus sama sekali [9]. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan tersendiri untuk pengembangan UWROV untuk lingkungan bawah air kedalaman rendah dengan memperhatikan masalah over-spesifikasi jika menggunakan UWROV laut dalam.

Paradigma pengembangan UWROV untuk kedalaman air rendah tentunya berbeda dengan pengembangan UWROV untuk laut dalam. Secara khusus, UWROV memiliki konstruksi yang lebih sederhana dan juga mengoptimalkan penggunaan bahan yang berbiaya rendah dan tersedia secara luas di pasaran. UWROV yang pernah dilakukan pada kerja penelitian-penelitian sebelumnya umumnya memiliki desain *open* ROV menggunakan rangka pejal dengan pelampung atau *buoyant* pada bagian atasnya [10]. Hal tersebut membuat ROV memiliki ukuran yang cukup besar. Pada kerja penelitian yang dipaparkan pada artikel ini, UWROV yang dikembangkan memiliki desain konstruksi yang sederhana dengan pemanfaatan rangka PVC berongga yang bertujuan secara tidak langsung untuk menggantikan fungsi pelampung. Konstruksi UWROV yang sederhana membuka peluang untuk fabrikasi dengan skala manufaktur yang kecil untuk berbagai keperluan. Sifat mudah “ditiru-dan-dikembangkan” merupakan salah satu tujuan utama pengembangan UWROV ini. Dengan penggunaan rangka PVC, UWROV hanya membutuhkan biaya yang rendah serta mudah untuk diwujudkan dengan ketersediaan material yang mudah ditemukan di pasaran.

Artikel ini memaparkan pengembangan UWROV untuk aktifitas observasi lingkungan bawah air dengan kedalaman rendah (sekitar 1.2 m). Pemaparan kerja penelitian yang telah dilakukan pada artikel ini dibagi menjadi lima bagian. Bagian pertama menjelaskan latar belakang serta motivasi pengembangan UWROV. Bagian kedua memaparkan metodologi penelitian yang digunakan dalam melakukan pengembangan UWROV. Desain dan fabrikasi dijelaskan pada bagian tiga pada artikel ini. Bagian keempat menampilkan karakterisasi dan analisis berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada lingkungan bawah air dengan kedalaman rendah. Pada akhirnya, artikel ini memberikan kesimpulan terhadap pengembangan UWROV yang telah dilakukan pada bagian kelima.

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1 Diagram Alir Kerja Penelitian

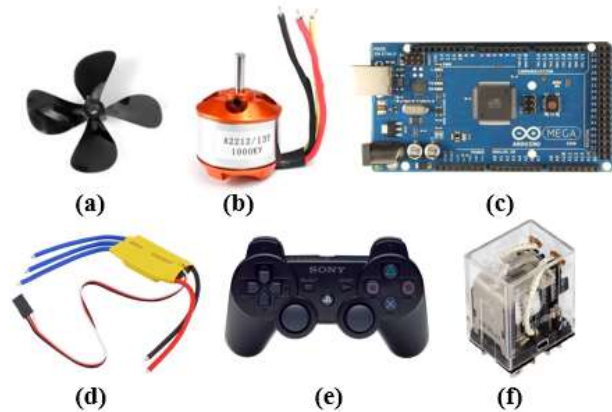


Gambar 1. Diagram alir kerja penelitian.

Sebuah metodologi penelitian dirancang untuk mewujudkan UWROV yang digagas. Gambar 1 menunjukkan diagram alir dari metodologi penelitian yang dilakukan. Kerja penelitian dimulai dengan studi literatur yang dilakukan untuk melihat kerja pengembangan maupun penelitian terdahulu terkait UWROV. Utamanya, studi literatur merangkum tipe, konstruksi, maupun spesifikasi dari UWROV yang pernah dikembangkan untuk lingkungan-lingkungan kerja tertentu yang spesifik. Selanjutnya, fungsi maupun konsep UWROV didefinisikan secara jelas sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Proses desain bentuk dari UWROV dilakukan dengan memperhatikan konsep serta fungsi yang telah ditetapkan. Setelah itu, komponen-komponen dari UWROV didesain menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) sehingga desain UWROV hadir dalam bentuk model 3D digital. Realisasi dari UWROV dilakukan melalui dua tahap besar, yaitu fabrikasi komponen-komponen yang terkait (mekanik, elektrik) dan juga pembuatan program kendali yang akan mengatur fungsionalitas UWROV secara keseluruhan. Setelah dua tahap kerja tersebut selesai, maka proses perakitan komponen-komponen dilakukan untuk membentuk satu UWROV yang lengkap. Fungsionalitas dan kinerja dari UWROV dianalisis berdasarkan data-data dari eksperimen yang dilakukan. Karakterisasi terhadap UWROV yang dikembangkan diambil dari hasil analisis tersebut. Pada akhirnya, kerja penelitian pengembangan UWROV dievaluasi dan disimpulkan.

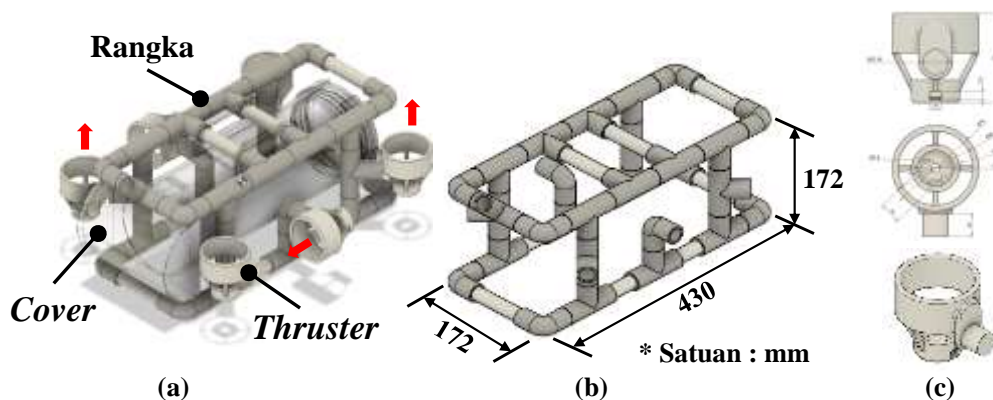
## 2.2 Pendefinisian Konsep dan Fungsi UWROV

UWROV memiliki desain yang sederhana dengan mengutamakan penggunaan material berbiaya rendah serta mudah ditemukan di pasaran, gambar 3.(a). Motor listrik digunakan sebagai penggerak utama dari UWROV. Motor listrik tersebut dikendalikan melalui *motor driver* dengan pengatur kecepatan (*electronic speed controller*). Pergerakan maju, mundur, putar kiri, dan putar kanan direalisasikan dengan menggunakan dua buah motor. Sedangkan untuk pergerakan naik dan turun (menyelam) menggunakan empat buah motor. Dengan demikian UWROV memiliki total enam buah motor untuk menghasilkan gerakan pada lingkungan kerja. Jenis motor yang digunakan adalah motor BLDC (*brush-less DC*), gambar 2.(b). ESC (*electronic speed control*) tipe *unidirectional* digunakan untuk mengendalikan motor yang dikombinasikan dengan penggunaan relay, gambar 2.(d) dan 2.(f). Sebuah *joystick* digunakan sebagai antar-muka untuk operator mengendalikan gerak UWROV dari jarak jauh, gambar 2.(e). Pusat kendali operasional (*command and sense*) UWROV dilakukan pada sebuah *microcontroller board* Arduino Mega 2560 (gambar 2.(c)).



**Gambar 2.** (a) Baling (b) motor BLDC, (c) Arduino Mega 2560, (d) ESC, (e) joystick, (f) relay.

Rangka UWROV menggunakan pipa PVC (*polyvinyl chloride*) berukuran 1.5 inch, gambar 3.(b). Penggunaan pipa PVC sebagai rangka selain berbiaya murah juga secara tidak langsung juga dapat menggantikan fungsi *buoyant* yang ada pada umumnya desain *open ROV*. Pipa PVC tentunya sangat mudah didapatkan di pasaran karena merupakan salah satu material umum yang digunakan pada kegiatan konstruksi sipil. Penggunaan pipa PVC merupakan realisasi paradigma desain yang dikedepankan dalam kerja penelitian ini. Bagian permukaan luar (*cover*) UWROV dibuat dari bahan akrilik dengan ketebalan 5 mm.

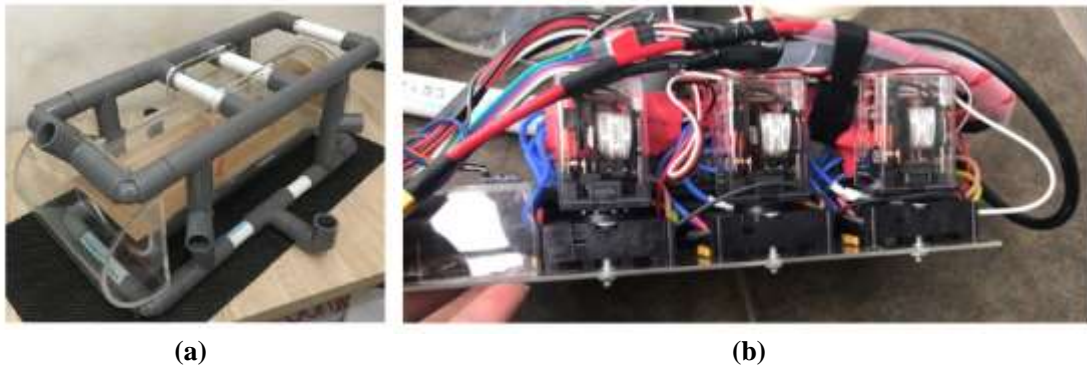


**Gambar 3.** (a) Desain UWROV (b) desain rangka berbasis PVC, (c) desain thruster housing.

Gerak UWROV pada ruang kerja dihasilkan oleh baling (*propeller*) yang ditenagai motor BLDC. Untuk melindungi baling dari gangguan putar yang mungkin terjadi maka dibuat sebuah pelindung baling yang dinamakan *thruster housing*, gambar 3.(c). Komponen penting ini menjadi kedudukan (*mounting*) dari hasil pemasangan baling pada motor BLDC. Desain *thruster housing* mengikuti desain Kort-Nozzle atau disebut juga *ducted propeller* [11][12][13]. Fabrikasi *thruster housing* dilakukan dengan teknik *3D printing* menggunakan material yang umum di pasaran, yaitu *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) yang memiliki kekuatan lebih baik ketimbang *poly lactic acid* (PLA). Secara khusus, ABS lebih baik dalam menahan beban kejut (*impact*).

## 2.2 Fabrikasi dan Perakitan UWROV

Fabrikasi komponen UWROV dilakukan untuk dua bagian besar, yaitu komponen mekanik dan elektronik yang ditunjukkan oleh gambar 4. Fabrikasi komponen mekanik dilakukan dengan mencetak komponen *housing thruster* dengan 3D printer, pemotongan pipa PVC dan akrilik sehingga pada akhirnya membentuk rangka dan *cover* sesuai desain. Fabrikasi komponen elektronik dilakukan dengan menghubungkan relay dan ESC ke setiap motor BLDC yang kemudian dihubungkan ke *microcontroller* Arduino Mega 2560.



Gambar 4. (a) Komponen mekanik, (b) komponen elektronik.

## 2.3 Pembuatan Program Kendali UWROV

Program kendali UWROV dibuat dengan menggunakan Arduino IDE. Pada prinsipnya, program UWROV secara mendasar menggerakkan motor BLDC sehingga menghasilkan daya dorong maju atau mundur melalui komunikasi dengan ESC dan relay. Di lain sisi, program kendali ini juga menerima data masukan dari pengguna (*user*) dengan antarmuka berupa *joystick*. Arah UWROV dikendalikan dengan menekan tombol arah panah yang tersedia pada *joystick*. Sinyal-sinyal terkait dari *joystick* dibaca oleh *microcontroller* untuk menjadi dasar kendali motor-motor UWROV.

## 2.4 Perakitan Komponen

Komponen elektronik dari UWROV dipasang ke bagian dalam dari *cover* akrilik yang kemudian akan ditutup pada bagian belakangnya dengan penutup kedap air. Pada penutup tersebut terdapat *cable glands* yang merupakan jalur kabel kedap air agar dapat berfungsi pada mode *tethering* (gambar 5.(a)) sehingga kendali maupun sumber tenaga dapat dilakukan dari jarak jauh. Tiga jalur kabel yang tersedia adalah untuk ESC, Arduino, dan motor BLDC. Setelah penutup *cover* bagian belakang terpasang, selanjutnya *cover* keseluruhan dimasukkan ke bagian dalam rangka. Gambar 5.(b) menunjukkan hasil perakitan semua komponen sehingga menjadi UWROV yang lengkap.



Gambar 5. (a) Penutup *cover* bagian belakang, (b) hasil akhir perakitan UWROV.

## 2.5 Massa Tambahan (*Ballast*)

Salah satu fitur yang diinginkan dari UWROV yang dikembangkan adalah mampu melayang pada kedalaman air tertentu dengan kerja tambahan dari *thruster* yang minimal (atau nol). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengaturan supaya berat UWROV cukup untuk mengatasi gaya apung (*bouyant force*) akibat desain konstruksi UWROV itu sendiri, misal akibat adanya rongga-rongga pada rangka maupun *cover*. Gaya apung ( $F_b$ ) dan berat ( $W$ ) dari UWROV dihitung melalui persamaan (1) dan (2), dengan  $g$  percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ),  $\rho$  massa jenis air tawar sebesar  $1000 m^3/kg$ ,  $m$  massa total

UWROV ( $kg$ ), dan  $V$  volume air yang terpindahkan akibat volume UWROV ( $m^3$ ). Dalam keadaan thruster pada kerja minimal setara nol ( $F_{th} \approx 0$ ) maka persamaan (3) dapat digunakan sebagai syarat kondisi UWROV melayang pada kedalaman air tertentu.

$$F_b = \rho g V \quad (1)$$

$$W = mg \quad (2)$$

$$W + F_{th} = F_b \quad (3)$$

Dari hasil pengukuran manual menggunakan timbangan, berat total ( $W$ ) UWROV adalah  $4.6 \text{ kg}$ . Kemudian, volume total UWROV ( $V$ ) didapat dengan menggunakan fitur pengukuran volume yang terdapat di *software* CAD yang digunakan untuk mendesain bentuk UWROV. Volume total UWROV adalah  $0.009429 \text{ m}^3$ . Dengan demikian gaya apung masih lebih besar dari berat UWROV ( $4.6 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 < 1000 \text{ m}^3/\text{kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 0.009429 \text{ m}^3$ ). Oleh karena itu sebuah massa tambahan (*ballast*) diperlukan untuk mencapai kondisi melayang. Massa tambahan yang diperlukan dapat dihitung dengan persamaan (4). Massa tambahan ( $m_t$ ) yang diperlukan adalah sebesar  $4.829 \text{ kg}$ . Berat tambahan ini hadir dalam bentuk batang silinder yang dibuat sedemikian rupa seberat yang diperlukan dan kemudian ditambahkan pada bagian bawah UWROV.

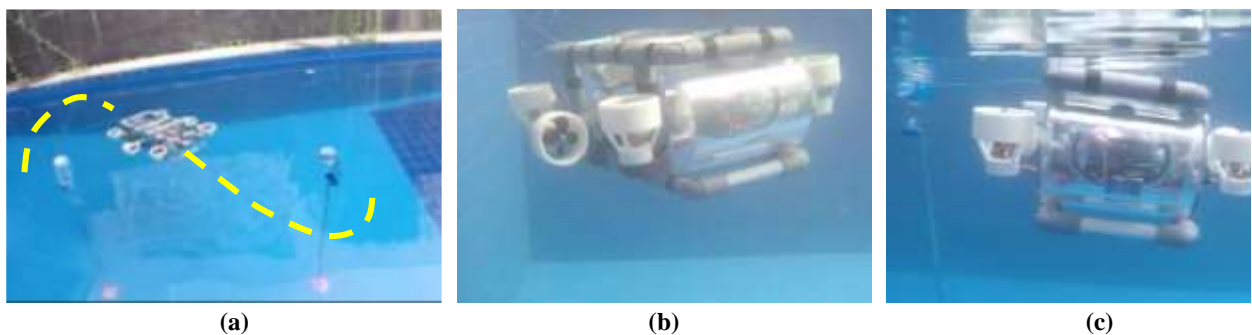
$$m_t = \rho V - m \quad (4)$$

### 3. Eksperimen dan Analisis

#### 3.1 Desain Eksperimen

Eksperimen dilakukan untuk mengevaluasi hasil pengembangan UWROV yang telah dilakukan. Beberapa hal yang difokuskan dalam eksperimen adalah kecepatan gerak UWROV ke berbagai arah, kemampuan UWROV bermanuver di dalam air, kemampuan UWROV mempertahankan posisi di kedalaman, dan juga konsumsi energi untuk mengetahui lama pengoperasian maksimal dari UWROV. Eksperimen dilakukan pada sebuah kolam renang dalam ruangan dengan kedalaman  $1.2 \text{ m}$ . Enam jenis gerakan dilakukan UWROV pada eksperimen, yaitu maju, mundur, naik, turun (menyelam), berbelok kiri, dan berbelok kanan.

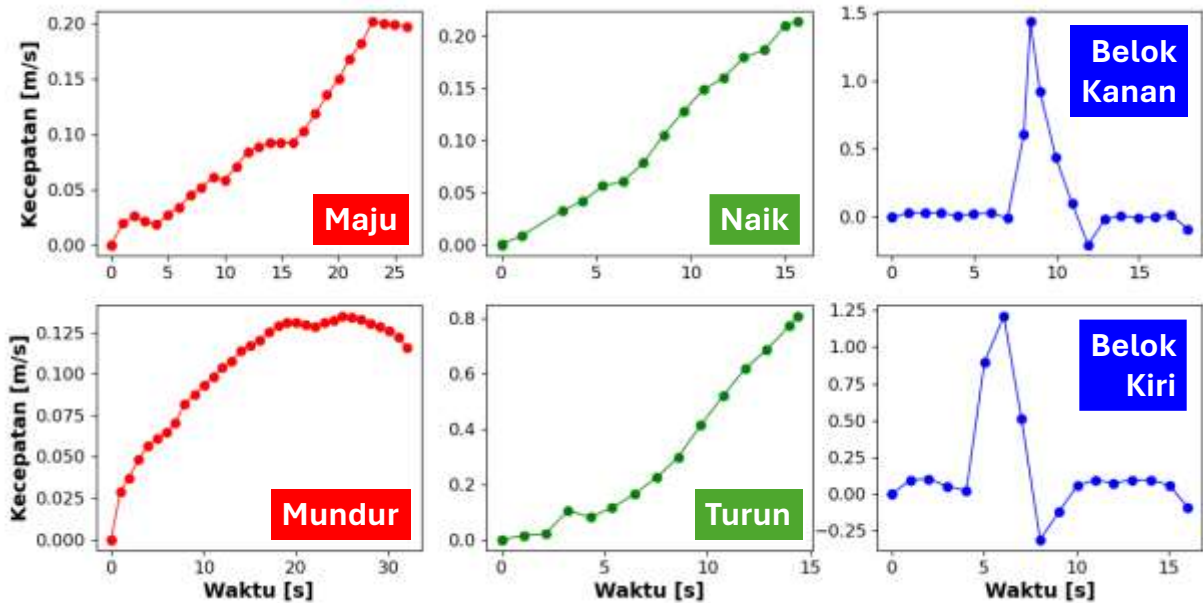
Data kecepatan direkam untuk tiap interval waktu tertentu. Sensor berupa akselerometer 3-axis digunakan sebagai sensor untuk mendapatkan data kecepatan, kemampuan bermanuver, dan mempertahankan posisi di suatu kedalaman. Sedangkan, multimeter digunakan untuk mendapatkan data konsumsi energi dengan cara mengetahui besarnya arus yang keluar dari baterai. Akselerometer 3-axis yang digunakan adalah MPU-6050 [14] sedangkan multimeter yang digunakan adalah DT830 [15]. Untuk keperluan eksperimen, sistem perekam data menggunakan *microcontroller* Arduino yang terpisah dari Arduino utama UWROV. Seluruh data dari sensor disimpan pada sebuah *micro-SD* yang selanjutnya diproses pada aplikasi Microsoft untuk proses analisis data lebih lanjut.



**Gambar 6.** (a) Lintasan manuver, (b) dan (c) UWROV dalam keadaan seimbang pada kedalaman tertentu.

### 3.2 Hasil dan Analisis

Eksperimen dilakukan untuk mengevaluasi hasil pengembangan UWROV yang telah dilakukan. Untuk pengambilan data kecepatan, ROV akan diletakan di dalam kolam dan akan dikendalikan untuk bergerak maju, mundur, putar kiri, putar kanan, naik, dan turun. Kecepatan dihitung berdasarkan integrasi dari nilai percepatan yang diberikan oleh sensor *accelerometer*. Gambar 7 menunjukkan profil kecepatan UWROV untuk enam jenis gerakan yang mungkin. Dari eksperimen diketahui kemampuan bergerak maksimum UWROV adalah 0.2 m/s arah maju, 0.13 m/s arah mundur, 0.2 m/s arah naik, 0.8 m/s arah turun (menyelam), 1.44 rad/s belok kanan, dan 1.21 rad/s belok kiri. Terjadinya perbedaan kemampuan maksimum kecepatan pada sumbu gerak yang sama (misal, maju-mundur, naik-turun) disebabkan oleh ketidaksimetrisan bentuk cover dari UWROV. Bentuk bagian depan yang lebih *streamline* dikarenakan ada bentuk setengah lingkaran membuat UWROV lebih mudah bergerak arah maju ketimbang arah mundur. Hal tersebut terlihat dari data kecepatan maksimal UWROV yang lebih cepat pada arah maju ketimbang arah mundur.



Gambar 7. Data kecepatan untuk tiap gerakan dalam eksperimen.

Kemampuan melayang diujicobakan dengan memposisikan UWRO pada kedalaman tertentu dalam waktu 17 detik. UWROV diposisikan pada kedalam 0.05 m dikarenakan merupakan area yang masih dapat dipegang oleh operator eksperimen. Dari data eksperimen diketahui bahwa UWROV mengalami deviasi posisi dibawah 0.015 m selama 17 detik percobaan. Data eksperimen kemampuan melayang UWROV dapat dilihat pada gambar 8.

Penggunaan energi listrik pada UWROV diukur pada empat mode yang dibuat, yaitu mode *stand by*, 2 motor, 4 motor, dan 6 motor. Setelah konsumsi listrik diketahui, nilai tersebut digunakan untuk menghitung perkiraan waktu operasional UWROV. Energi listrik tersebut dianggap diambil dari sumber listrik berupa baterai LiPo 2S dengan kapasitas 2200 mAh. Konsumsi listrik dan ketahanan baterai pada berbagai mode ditunjukkan oleh gambar 8. Konsumsi listrik ketika enam buah motor beroperasi semua merupakan konsumsi listrik yang paling besar. Namun perlu diperhatikan bahwa pada operasional nyata UWROV, maneuver yang sering dilakukan jarang sekali menggunakan enam motor secara bersamaan. UWROV mencapai lokasi tertentu dengan urutan gerak pada sumbu tertentu, bukan kombinasi gerakan semua



Gambar 8. Data deviasi posisi pada posisi melayang, konsumsi listrik, dan ketahanan baterai.

sumbu secara bersamaan. Oleh karena itu, penggunaan konsumsi listrik pada operasional nyata sebagian waktu besar adalah mode dua motor bekerja.

#### 4. Kesimpulan

UWROV telah berhasil diwujudkan dengan paradigma pengembangan yaitu berbahan murah dan mudah ditemui di pasaran. Penggunaan material PVC berongga membantu mewujudkan UWROV dengan mudah dan menjadi alternatif yang baik dalam hal menghasilkan efek apung (*bouyant*) untuk konstruksi UWROV keseluruhan. Dari eksperimen yang dilakukan, UWROV mampu bergerak secara maksimum pada kecepatan gerak linear 0.2 m/s dan kecepatan gerak belok 1.21 rad/s. UWROV juga mampu untuk mempertahankan kondisi melayang pada kedalaman air tertentu dengan deviasi posisi maksimal dalam rentang 0,015 m. Mode dua motor beroperasi dianggap sebagai mode operasional yang representatif dengan konsumsi listrik kurang lebih sebesar 5 ampere dan mampu untuk bertahan selama 0.35 jam pada penggunaan baterai LiPo 2S 2200 mAh. Pengembangan UWROV ini pada akhirnya diharapkan dapat membantu aktivitas-aktivitas observasi lingkungan bawah air, terutama lingkungan bawah air yang tidak besar seperti danau laut air tawar, dengan biaya yang tidak besar.

#### Daftar Pustaka

- [1] Kawamura S., “Underwater Robot Development for Manipulation Task and Their Uses in Biwa Lake”, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 48, Issue 2, p. 14-19, 2015.
- [2] Lawrence, J., Castelnovo, N. and Bettinetti, R., “Monitoring Aquatic Debris in a Water Environment Using a Remotely Operated Vehicle (ROV): A Comparative Study with Implications of Algal Detection in Lake Como (Northern Italy)”, *Environments*, Volume 12, Issue 1, p.3, MDPI, 2024.
- [3] Kungwani, B. and Misal, N., “Design and fabrication of a Low Cost Submersible ROV for Survey of Lakes”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, Volume 4, Issue 9, p.718-724, 2017.
- [4] Ho, M., El-Borgi, S., Patil, D. and Song, G., “Inspection and Monitoring Systems Subsea Pipelines: A Review Paper”, *Structural Health Monitoring*, Volume 19, Issue 2, p.606-645, 2020.
- [5] Yin, F., “Inspection robot for submarine pipeline based on machine vision. In *Journal of Physics: Conference Serie*, Volume 1952, No. 2, p. 022034, IOP Publishing, June 2021.
- [6] Fattah, S.A., Abedin, F., Ansary, M.N., Rokib, M.A., Saha, N. and Shahnaz, C., “R3Diver: Remote Robotic Rescue Diver for Rapid Underwater Search and Rescue Operation”, *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, p. 3280-3283, IEEE, November 2016.
- [7] Irawan, F., Yulianto, A., “Perancangan Prototype Robot Observasi Bawah Air Dan Kontrol Hovering Menggunakan Metode PID Control”, *Jurnal Sains dan Informatika*, Volume 1, Nomor 1, Juni 2015.
- [8] Ayob, M., Hanafi, D., Johari, A., “Dynamic Leveling Control of a Wireless Self-Balancing ROV Using Fuzzy Logic Controller”, *Intelligent Control and Automation*, Volume 4, Issue 2, p. 235-243, May 2013.
- [9] Effendi, H., “*Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya Dan Lingkungan Perairan*”, Penerbit Kanisius, Yogyakarta, 2003.
- [10] Capocci, R., Dooly, G., Omerđić, E., Coleman, J., Newe, T., Toal, D., “Inspection-class remotely operated vehicles—A review”, *Journal of Marine Science and Engineering*, Volume 5, Issue 1, p.13, 2017.
- [11] Odetti, A., Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Spirandelli, E. and Bruzzone, G., “e-URoPe: A reconfigurable AUV/ROV for man-robot underwater cooperation”, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 50, Issue 1, p.11203-11208, 2017.
- [12] Hope, T.P., “The Characterisation of Magnetic Couplings and the Development of a Thruster Module for an ROV”, *Master Thesis*, Department of Mechanical Engineering University of Cape Town, 2015.
- [13] Darmawan, S., Raynaldo, K. and Halim, A., “Investigation of Thruster Design to Obtain the Optimum Thrust for ROV (Remotely Operated Vehicle) Using CFD”, *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, Volume 9, Issue 1, p. 115-125, March 2022.
- [14] TDK InvenSense , “MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4”, *Product Technical Sheet*, tersedia secara online : <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>, diakses terakhir 5 Januari 2025.
- [15] Aveelectronics , “DT830 Series 3 1/2 Digital Multimeter”, *Product Technical Sheet*, tersedia secara online : <https://aveelectronics.cc/wp-content/uploads/2023/08/DT830.pdf>, diakses terakhir 5 Januari 2025.