

Evaluation Of Force And Torque Measurement Uncertainties Of The Three-Component Dynamometer Of The Biomimetic Fin Propulsion System

Arie Sukma Jaya^{1,*}, Muljo Widodo Kartidjo², Lavi Rizki Zuhal³, dan Irsan Soemantri Brodjonegoro⁴

¹ Program Studi Doktor Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung – Bandung

² Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung - Bandung

³ Aeronautika dan Astronautika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung - Bandung

⁴ Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung - Bandung

*Corresponding author: arie.sukmajaya@gmail.com

Abstract. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) have become more attractive due to its potential applications in industry and research fields such as maintenance of underwater facilities, underwater surveillance, and underwater exploration of the new source of energy. However, by using the present screw propeller, efficiency of the UUV is very low, hence a shorter the mission duration. Biomimetic fin is an alternative underwater propulsion system which is very promising to enhance the efficiency of the UUV. To measure the performance of the developed biomimetic fin, a three-component dynamometer was made to measure thrust, lateral force and torque. The dynamometer utilized a full-bridge configuration of strain gauges. The present study evaluates the uncertainties contained in the dynamometer through a calibration process. A linear equation of the calibration curve was obtained by using Weighted Least Square method. From the evaluation results, the maximum uncertainty of the thrust and lateral force measurement was ± 0.04 N ($\pm 0.4\%$ Full Scale Operation (FSO)) and the uncertainty of torque measurement was ± 0.019 Nm ($\pm 1\%$ FSO). The evaluation results indicate that the developed three-component dynamometer has a fairly high level of accuracy.

Abstrak. Wahana bawah air tanpa awak semakin banyak dikembangkan karena banyaknya aplikasi potensial pada bidang industri dan penelitian seperti perawatan fasilitas bawah air, pengamatan bawah air, dan penjelajahan bawah air untuk mencari sumber energi yang baru. Namun demikian, dengan menggunakan sistem propulsi propeler yang ada saat ini, efisiensi dari wahana ini sangat rendah, sehingga mempersingkat durasi dari misi wahana. Sirip biomimetik merupakan salah satu sistem propulsi bawah air alternatif yang sangat menjanjikan untuk peningkatan efisiensi kendaraan bawah air. Untuk mengukur kinerja dari sirip biomimetik yang dikembangkan, telah dibuat suatu dinamometer tiga-komponen yang mengukur gaya dorong, gaya lateral, dan torsi. Dinamometer menggunakan *strain gauge* yang disusun dengan konfigurasi full-bridge. Penelitian ini mengevaluasi ketidakpastian yang terdapat pada dinamometer melalui proses kalibrasi. Persamaan linier kurva kalibrasi diperoleh dengan menggunakan metode *Weighted Least Square*. Dari hasil evaluasi diperoleh bahwa ketidakpastian pengukuran gaya dorong dan gaya lateral yaitu $\pm 0,04$ N ($\pm 0,4\%$ dari skala penuh) dan ketidakpastian pengukuran torsi yaitu $\pm 0,019$ Nm ($\pm 1\%$ dari skala penuh). Hasil evaluasi tersebut menunjukkan bahwa dinamometer tiga-komponen yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi.

Keywords: ketidakpastian, biomimetik, gaya, torsi, propulsi, bawah air

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Pengembangan kendaraan bawah laut tanpa awak telah menjadi salah satu kemajuan teknologi masa kini. Contoh pengembangan yang berkaitan dengan wahana tanpa awak bawah air diantaranya adalah desain dan pengujian penggerak untuk *Remotely Operated Vehicle (ROV)* [1] dan sistem pengujian maneuver pada *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)* Sotong-ITB [2]. Potensi pemanfaatan wahana ini masih terbuka lebar untuk

keperluan industri, penelitian, dan pertahanan keamanan.

Salah satu faktor penting dalam pengoperasian wahana bawah air adalah durasi misi di dalam air, yang secara signifikan ditentukan oleh efisiensi dari sistem penggeraknya. Sistem penggerak wahana bawah air yang umum digunakan saat ini adalah propeler. Namun propeler memiliki efisiensi yang rendah pada kecepatan rendah [3-5]. Hal ini menjadi salah satu permasalahan penting dalam

pengoperasian kendaraan bawah air tanpa awak yang umumnya beroperasi di daerah kecepatan rendah yaitu 1 L/s , dimana L adalah panjang dari wahana [6].

Sistem propulsi dengan sirip biomimetik menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi propulsi kendaraan bawah air tanpa awak [7]. Hal ini memungkinkan pengoperasian wahana bawah air untuk misi dengan durasi yang panjang seperti penjelajahan laut untuk mencari sumber energi, makanan, dan mineral yang baru [8]. Sebagai bagian awal dari pengembangan sistem propulsi bawah air yang efisien dengan sirip biomimetik, diperlukan suatu alat ukur gaya dan torsi. Oleh karena itu, pada penelitian sebelumnya telah dibangun sebuah dinamometer tiga-komponen yang akan digunakan untuk mengukur gaya dan torsi pada sirip biomimetik pada fasilitas terowongan air [9]. Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan ketidakpastian total dari alat ukur dinamometer tiga-komponen dengan struktur yang telah diperbaharui. Pada dinamometer dalam penelitian ini, pengukuran gaya maksimum, baik longitudinal (Gaya-X) dan lateral (Gaya-Y), adalah 9.76 N, sedangkan pengukuran torsi maksimum adalah 1.84 Nm.

Metode Penelitian

Sensor regangan. Pengukuran gaya dan torsi dengan dinamometer tiga-komponen pada penelitian ini memanfaatkan *strain gauge* KFC-5-C1-11 pada penelitian sebelumnya [9]. Beberapa nilai spesifikasi dari sensor regangan ini dapat dilihat pada Tabel 1. Sensor regangan ini ditempelkan dengan menggunakan perekat jenis *Cyanoacrylate* pada batang silinder berbahan dasar duralumin. Pemasangan sensor regangan menggunakan skema *full-bridge* dimana untuk mengukur satu komponen gaya digunakan 4 buah sensor regangan. Pemasangan sensor regangan pada batang dinamometer dapat dilihat pada Gambar 1.

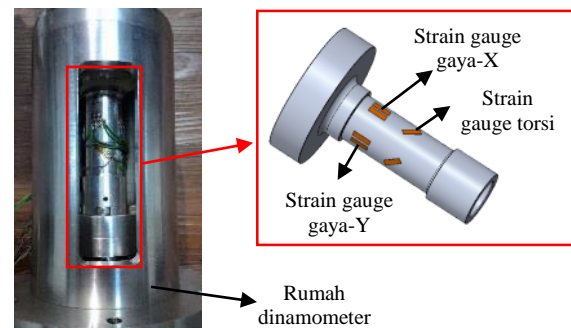
Tabel 1. Spesifikasi sensor regangan KFC-5-C1-11

Spesifikasi	Nilai
Resistansi	$120,2 \pm 0,3 \text{ Ohm}$
Faktor <i>Gage</i>	$2,09 \pm 1\%$
Keluaran termal	$\pm 1,8 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$

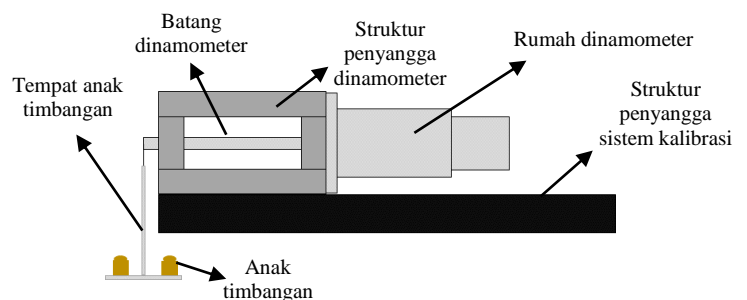
Pengukuran. Pengukuran ketidakpastian alat ukur gaya dan torsi pada penelitian ini dilakukan dengan metode pembebanan bertahap. Pembebanan dilakukan dengan menambahkan beban (pembebanan naik) kemudian mengurangi beban (pembebanan turun) dengan tujuan untuk melihat

histeresis pada alat ukur. Proses kalibrasi ini menggunakan beban berupa anak timbangan yang sebelumnya telah dihitung ketidakpastiannya. Pembebanan naik dan turun ini diulang sebanyak sepuluh kali. Pada setiap awal pengulangan pembebanan, nilai keluaran tegangan listrik ditentukan sebagai 0 Volt (*zero setting*).

Anak timbangan diletakkan pada tempat anak timbangan yang terhubung dengan batang dinamometer dalam arah sejajar dengan sensor regangan yang dikalibrasi. Batang dinamometer berada dalam suatu rumah dinamometer. Rumah dinamometer ini terhubung dengan suatu struktur penyangga yang diklem pada struktur alas yang kaku dan statik. Skematik penempatan beban pada proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Konfigurasi *strain gauge* pada batang dinamometer



Gambar 2. Skematik penempatan beban pada dinamometer

Sinyal berupa tegangan keluaran dari alat ukur regangan sangat kecil sehingga diperlukan suatu sistem pengkondisi sinyal. Pada sistem pengkondisi sinyal, sinyal tegangan diperkuat kemudian disaring dengan menggunakan *low-pass filter*. Sinyal yang telah dikondisikan kemudian direkam dan ditransfer ke komputer dengan menggunakan *Picolog ADC20*.

Persamaan linier kalibrasi. Setelah pengukuran dilakukan, data yang telah direkam kemudian diproses untuk mendapatkan persamaan

linier antara data massa anak timbangan sebagai masukan dan data tegangan listrik keluaran dari perekam data. Data ini kemudian didekati dengan persamaan linier menggunakan metode *Weighted Least Square* (WLS) untuk masing-masing pembebanan naik dan turun. Metode WLS tidak hanya dapat mendekati persamaan linier dengan lebih akurat untuk jumlah data yang tidak banyak, tetapi juga dapat secara langsung menghitung ketidakpastian dari parameter yang diukur [10].

Persamaan linier yang menghubungkan antara massa dari pembebanan dan keluaran tegangan listrik yang direkam adalah sebagai berikut

$$m_c = b + aV_D \quad (1)$$

dimana m_c adalah massa anak timbangan (gr), b adalah nilai konstan titik potong kurva, a adalah nilai gradient dari kurva kalibrasi, dan V_D adalah tegangan keluaran yang direkam oleh pengambil data. Kemudian untuk mendapatkan nilai gaya normal dalam arah pembebanan, F_c , dan torsi, Q_c , digunakan Pers. 2 dan Pers. 3 di bawah ini

$$F_c = m_c \times g \quad (2)$$

$$Q_c = F_c \times l_Q \quad (3)$$

Nilai percepatan gravitasi, g , pada Pers. 2 diasumsikan $9,81 \text{ m/s}^2$. Untuk lengan gaya pada perhitungan torsi dengan Pers. 3, digunakan lengan klem dari material baja dengan panjang, $l_Q = 0,104 \text{ m}$.

$$(X^T \cdot X) \cdot C = X^T \cdot Y \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{j,1} & x_{j,2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y = \begin{bmatrix} m_{c,1} \\ w_1 \\ \vdots \\ m_{c,j} \\ w_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$w = \sum_1^j \sqrt{(\sigma_{Vj}^2 + \sigma_{mj}^2 \times S_c)} \quad (7)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{\text{var}_V}{\text{var}_m}} \quad (8)$$

$$W = (X^T \cdot X)^{-1} \quad (9)$$

Dengan metode WLS, vektor koefisien kurva kalibrasi, C , dapat diperoleh melalui Pers. 4. Pada Pers. 5, X adalah matriks dengan ukuran $j \times 2$

dengan besaran nilai $x_{j,1} = 1/w_j$ dan $x_{j,2} = V_{Di}/w_j$. Vektor Y pada Pers. 6 merupakan nilai massa anak timbangan, m_c , yang dibagi terhadap setiap faktor pembobot, w . Faktor pembobot, w , pada Pers. 7 ditentukan dari jumlah nilai varian massa anak timbangan, σ_m , yang dikalikan dengan faktor skala, S_c dan varian tegangan listrik, σ_V [11]. Faktor skala diperlukan untuk menyamakan varian dari variabel masukan dan keluaran sehingga dapat dilakukan optimasi pada fungsi *fitting* [12]. Pers. 9 merupakan matriks W yang elemennya diagonalnya terdiri dari varian dari koefisien persamaan linier a dan b , serta elemen luar diagonalnya adalah kovarian dari kedua koefisien tersebut.

Ketidakpastian. Ketidakpastian merupakan suatu parameter dari hasil pengukuran yang menyatakan sebaran dari suatu kuantitas yang diukur [13]. Pada standar acuan yang digunakan dalam penelitian ini, terdapat dua tipe ketidakpastian yaitu tipe A dan tipe B. Ketidakpastian tipe A dihitung melalui pengukuran langsung yang dilakukan secara berulang kali, sedangkan ketidakpastian tipe B dihitung berdasarkan informasi yang telah tersedia sebelumnya seperti spesifikasi manufaktur dan data dari buku referensi. Penentuan ketidakpastian tipe A dari gaya dan torsi berdasarkan nilai-nilai kalibrasi, u_{Dc} , mengikuti hukum perambatan ketidakpastian yaitu

$$u_{Dc} = (a^2 u_{VD}^2 + u_b^2 + V_D^2 u_a^2 + 2V_D \text{Cov}(b, a))^{0.5} \quad (10)$$

dimana u_{VD} merupakan ketidakpastian akibat perubahan nilai bacaan tegangan keluaran, u_b dan u_a adalah ketidakpastian dari koefisien persamaan kurva kalibrasi (a dan b), V_D adalah tegangan keluaran sensor regangan, dan $\text{Cov}(b, a)$ adalah nilai kovarian dari koefisien kurva kalibrasi.

$$u_{VD} = u_V^2 + u_R^2 \quad (11)$$

$$u_V = \frac{s_V}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

$$u_R = \frac{r}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

Pers. 11, 12, dan 13 merupakan komponen ketidakpastian dari pembacaan keluaran tegangan dimana u_V adalah standar deviasi dari nilai rata-rata pengukuran, s_V adalah standar deviasi dari pengulangan pengukuran, n adalah

jumlah pengulangan pengukuran, u_R adalah ketidakpastian dari resolusi pengambil data, dan r adalah nilai resolusi terkecil dari pengambil data.

dimana u_F dan u_{Fr} masing-masing adalah ketidakpastian absolut dan relative dari pengukuran gaya, dan F_R adalah nilai gaya

Tabel 2. Hasil penentuan ketidakpastian pengukuran gaya melalui proses kalibrasi

Gaya yang diberikan	Hasil perhitungan persamaan linear dengan metode WLS							
	Gaya-X pembebanan naik		Gaya-X pembebanan turun		Gaya-Y pembebanan naik		Gaya-Y pembebanan turun	
$F_R = m_c \times g$ (N)	F_X (N)	u_{FX} (\pm N)	F_X (N)	u_{FX} (\pm N)	F_Y (N)	u_{FY} (\pm N)	F_Y (N)	u_{FY} (\pm N)
0,000	0,000	0,00	0,001	0,02	0,000	0,00	0,006	0,02
0,491	0,479	0,01	0,486	0,02	0,485	0,01	0,490	0,02
0,973	0,972	0,01	0,972	0,02	0,971	0,01	0,975	0,02
1,454	1,454	0,01	1,457	0,02	1,456	0,01	1,461	0,02
1,936	1,933	0,01	1,937	0,02	1,935	0,01	1,934	0,02
2,421	2,418	0,01	2,424	0,02	2,416	0,01	2,418	0,02
2,902	2,903	0,01	2,905	0,02	2,902	0,01	2,904	0,02
3,386	3,386	0,02	3,388	0,02	3,386	0,02	3,389	0,02
3,871	3,872	0,02	3,873	0,02	3,877	0,02	3,866	0,02
4,358	4,355	0,02	4,356	0,02	4,356	0,02	4,351	0,02
4,848	4,843	0,02	4,840	0,02	4,842	0,02	4,838	0,02
9,763	9,768	0,03	9,765	0,04	9,766	0,03	9,772	0,04

Tabel 3. Hasil penentuan ketidakpastian pengukuran torsi melalui proses kalibrasi

Torsi yang diberikan	Hasil perhitungan persamaan linear dengan metode WLS			
	Torsi (pembebanan naik)		Torsi (pembebanan turun)	
$Q_R = F_R \times l_Q$ (Nm)	Q (Nm)	u_Q (\pm Nm)	Q (Nm)	u_Q (\pm Nm)
0,000	0,000	0,000	-0,015	0,013
0,203	0,201	0,003	0,197	0,011
0,405	0,404	0,004	0,405	0,010
0,606	0,610	0,005	0,612	0,009
0,809	0,809	0,006	0,824	0,009
1,013	1,011	0,008	1,030	0,010
1,862	1,862	0,013	1,844	0,019

Ketidakpastian bentangan gabungan dengan tingkat keyakinan 95,45% dari dinamometer tiga-komponen dengan kalibrasi menggunakan anak timbangan adalah

$$u_C = k \times \left(\sqrt{(u_{Dc}^2 + u_{Dm}^2)} \right) \quad (14)$$

dimana u_{Dc} adalah ketidakpastian kalibrasi dari Pers. 10, u_{Dm} adalah ketidakpastian massa anak timbangan yaitu 0.5%, dan k adalah faktor cakupan ketidakpastian dengan nilai 2.

Dari Pers. 14, maka ketidakpastian pengukuran gaya dapat ditentukan melalui

$$u_F = u_C \times g \quad (15)$$

$$u_{Fr} = (u_F/F_R) \times 100\% \quad (16)$$

yang diberikan pada saat kalibrasi.

Untuk ketidakpastian pengukuran torsi dapat ditentukan melalui perhitungan ketidakpastian relatif dari gaya, u_{Fr} , dan panjang lengan torsi, u_{lr} .

$$u_Q = u_{Fr} + u_{lr} \quad (17)$$

$$u_{lr} = \left(\frac{u_l}{l_Q} \right) \times 100\% \quad (18)$$

dimana u_l adalah resolusi tekecil dari micrometer pengukur lengan torsi yaitu 0,00005 m dan l_Q adalah panjang dari lengan torsi sama seperti pada Pers. 3.

Hasil dan Pembahasan

Hasil perkiraan gaya dan torsi beserta nilai ketidakpastiannya dengan menggunakan persamaan

linier yang diperoleh melalui metode *WLS* dapat dibandingkan dengan nilai gaya dan torsi yang diberikan. Hasil perhitungan ketidakpastian absolut pada Gaya-X (gaya dalam arah longitudinal) dan Gaya-Y (gaya dalam arah lateral) dapat dilihat pada Tabel 2, sedangkan perhitungan ketidakpastian absolut pada torsi disajikan pada Tabel 3.

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai ketidakpastian pengukuran gaya meningkat seiring dengan peningkatan beban, baik untuk pembebanan naik maupun turun. Perbedaan pola peningkatan ketidakpastian antara pembebanan naik dan turun dapat terjadi karena adanya *zero setting* di setiap awal proses kalibrasi. Perbedaan ini terjadi secara signifikan pada pembebanan antara 0-3N. Peningkatan ketidakpastian seiring dengan penambahan beban juga terjadi pada pengukuran torsi, seperti dapat dilihat pada Tabel 3. Pada pembebanan turun, pada torsi <0.4 Nm terjadi peningkatan ketidakpastian, dibandingkan dengan torsi 0.4-1 Nm, akibat pengaruh dari penentuan persamaan linear dengan metode *WLS*. Adanya *zero setting* juga menyebabkan histeresis pada rentang torsi ini menjadi besar.

Nilai maksimum dari histeresis dan ketidakpastian untuk masing-masing pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa meskipun ketidakpastian maksimum antara pengukuran Gaya-X dan Gaya-Y sama, tetapi pengukuran Gaya-Y memiliki histeresis yang lebih besar dibandingkan dengan Gaya-X. Pada dynamometer yang dikembangkan, pengukuran torsi memiliki nilai histeresis yang terbesar. Namun demikian, nilai histeresis tersebut masih didalam rentang ketidakpastian yang telah dihitung. Tabel 5 menunjukkan sensitivitas dari hasil pembebanan turun dynamometer tiga komponen yang telah dikembangkan.

Tabel 4. Nilai maksimum dari ketidakpastian absolut dan histeresis

Komponen	Histeresis maksimum	Ketidakpastian Maksimum
Gaya-X (N)	0,007 (0,08%)	$\pm 0,04$ ($\pm 0,4\%$)
Gaya-Y (N)	0,011 (0,12%)	$\pm 0,04$ ($\pm 0,4\%$)
Torsi (Nm)	0,019 (1%)	$\pm 0,019$ ($\pm 1\%$)

Tabel 5. Sensitivitas dynamometer tiga komponen

Komponen	Sensitivitas	Unit
Gaya-X	0,0094	N/mV
Gaya-Y	0,0092	N/mV
Torsi	0,0018	Nm/mV

Hasil pengukuran ketidakpastian dalam penelitian ini mendukung untuk pengukuran gaya dorong sirip biomimetik yang akurat melalui komponen Gaya-X pada dynamometer. Sedangkan

untuk pengukuran torsi, perlu dilakukan pada sirip biomimetik yang menghasilkan torsi >0.2Nm untuk tingkat akurasi yang lebih baik. Jika hal ini terpenuhi, maka tingkat akurasi pengukuran gaya dan torsi dengan ketidakpastian dibawah 1% dapat tercapai. Hasil ini sangat baik mengingat hampir keseluruhan komponen dynamometer didesain dan dibangun sendiri. Namun demikian, analisis ketidakpastian pada penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memasukkan nilai ketidakpastian dari lingkungan seperti temperatur, kelembaban, dan percepatan gravitasi.

Kesimpulan

Perhitungan ketidakpastian dari dynamometer tiga-komponen telah dilakukan melalui proses kalibrasi. Dengan menggunakan metode *Weighted Least Square*, dapat diperoleh persamaan linier kalibrasi untuk masing-masing pembebanan naik dan turun. Selain persamaan kurva linier, ketidakpastian dari pengukuran juga dapat diperoleh dengan metode ini. Dari kalibrasi yang dilakukan, nilai maksimum dari ketidakpastian absolut untuk Gaya-X adalah $\pm 0,04$ N ($\pm 0,4\%$ skala penuh), Gaya-Y adalah $\pm 0,04$ N ($\pm 0,4\%$ skala penuh) dan Torsi adalah $\pm 0,019$ Nm ($\pm 1\%$ skala penuh). Dynamometer tiga-komponen yang telah dikembangkan dapat digunakan untuk pengukuran gaya dan torsi pada sirip biomimetik dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Penghargaan

Pemakalah berterima kasih kepada pihak CentrUMS-ITB yang telah memberikan dukungan finansial dan teknis untuk penelitian ini. Penulis pertama berterima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) untuk beasiswa program doktoral yang diterimanya.

Referensi

- [1] Kartidjo, M. dkk., 2009. Testing of Underwater Thruster for SHRIMP ROV-ITB. *Indian J Mar Sci.*, 38(3):338-345
- [2] Kartidjo, M. dan Nugroho, S.A., 2007. Heading Lock Maneuver Testing of Autonomous Underwater Vehicle: Sotong – ITB. *Proceedings International Conference on Intelligent Unmanned Systems 2007*.
- [3] Mohammadshahi, D. dkk., 2008. Design, fabrication and hydrodynamic analysis of a biomimetic robot fish. *Proceedings Mathematics and Computers in Science and Engineering*, World Scientific and Engineering Academy and Society.

- [4] Rufo, M. dan Smithers, M., 2011. GhostSwimmer™ AUV: applying biomimetics to underwater robotics for achievement of tactical relevance. *Marine Technology Society Journal*, 45, 24-30.
- [5] Masoomi, S.F. dkk., 2013. The Kinematics and Dynamics of Undulatory Motion of a Tuna-mimetic Robot. *International Journal of Advanced Robotics Systems*.
- [6] Haroutunian, M., 2014. A holistic bio-inspired approach for improving the performance of Unmanned Underwater Vehicles. PhD Thesis, Newcastle University.
- [7] Fish, F.E., 2013. Advantages of natural propulsive systems. *Marine Technology Society Journal*, 47, 37-44.
- [8] Fish, F.E. dan Kocak, D.M., 2011. Biomimetics and marine technology: An introduction. *Marine Technology Society Journal*, 45, 8-13.
- [9] Sangaji, D., 2015. Perancangan, pembuatan, dan pengujian load cell untuk pengukuran gaya dan torsi pada pengujian robot ikan, Tugas Akhir Sarjana, Institut Teknologi Bandung.
- [10] Ferreira, J.L. dkk., 2010. Maximum respiratory pressure measuring system: calibration and evaluation of uncertainty. *Control Autom.* 21(6):588-97.
- [11] Ferreira, J.L. dkk., 2011. A Case Study of Applying Weighted Least Squares to Calibrate a Digital Maximum Respiratory Pressures Measuring System, *Applied Biomedical Engineering*, Dr. Gaetano Gargiulo (Ed.), ISBN: 978-953-307-256-2, InTech.
- [12] Press, W. dkk., 2002. Numerical recipes in C: the art of scientific computing, (2nd. ed), University Press Cambridge, ISBN 0-521-43108-5, Cambridge, England.
- [13] JCGM 100:2008, 2008. GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM.