

SIMULASI TWO WAY COUPLED BOUNDARY FLUID STRUCTURE INTERACTION (FSI) DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

WIDYA ANDRIANI, SETIANTO*, SAHRUL HIDAYAT, LIU KIN MEN

*Departemen Fisika Fakultas MIPA Universitas Padjadjaran,
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363*

**email : setianto@phys.unpad.ac.id*

Abstrak. *Fluid-Structure Interaction (FSI)* merupakan interaksi antara benda padat yang terendam di dalam fluida atau dikelilingi oleh fluida. Dalam hal ini terdapat dua bidang penyelesaian yaitu bidang fluida dan bidang struktural. Salah satu jenis FSI adalah *Two-Way Coupled Boundary*, yaitu penyelesaian dilakukan secara terpisah untuk aliran fluida dan deformasi struktural, kemudian terjadi pertukaran informasi antar penyelesaian. Pada fenomena FSI, keadaan aliran fluida laminar akan menyebabkan terjadinya deformasi pada pelat. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan Metode Elemen Hingga untuk fluida Propylene Glycol dan *test-plate* Aluminium Alloy untuk melihat fenomena FSI yang ditandai dengan adanya nilai *strain* sebagai respon terhadap waktu. Model yang digunakan pada simulasi disesuaikan dengan eksperimen. Nilai *strain* hasil perbandingan simulasi dan eksperimen pada keadaan *settling time* menunjukkan bahwa 3 dari 6 nilai *strain* memiliki perbedaan paling kecil yaitu sebesar 44%, 15% dan 20%. Sedangkan untuk spesifikasi respon, diketahui bahwa *peak time* hasil simulasi lebih baik dari eksperimen, namun overshoot respon simulasi lebih tinggi dari eksperimen.

Kata kunci: FSI, deformasi, strain, metode elemen hingga

Abstract. *Fluid-Structure Interaction (FSI)* is an interaction between solid objects submerged in fluid or surrounded by fluid. In this case there are two areas of settlement, namely the fluid field and the structural field. One type of FSI is the *Two-Way Coupled Boundary*, where the solution is carried out separately for fluid flow and structural deformation, and then the exchange of information between solutions occurs. In the FSI phenomenon, the state of laminar fluid flow will cause plate deformation. In this study, simulations were carried out with the Finite Element Method for Propylene Glycol fluids and Aluminium Alloy test-plate to see the FSI phenomena marked by strain values in response to time. The model used in the simulation is adapted to the experiment. The value of the strain comparison results of simulations and experiments in the settling time state shows that 3 of the 6 strain values have the smallest difference of 44%, 15% and 20%. As for the response specifications, it is known that peak time simulation results are better than experiments, but overshoot simulation responses are higher than experiments.

Keywords: FSI, deformation, strain, finite element method

1. Pendahuluan

Aliran fluida dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis. Salah satu jenis aliran fluida adalah aliran fluida viskos. Aliran fluida viskos memiliki parameter yaitu viskositas, tegangan geser [1] serta transmisi dan tekanan [2], yang dialami oleh setiap partikel yang ada di dalam fluida. Gaya antar partikel pun bekerja pada aliran fluida viskos dan mempengaruhi kecepatan aliran fluida [3]. Viskositas juga mempengaruhi ketahanan fluida terhadap tegangan geser. Tegangan geser dan tekanan dapat mempengaruhi suatu struktur benda padat jika diletakkan dalam

medan kecepatan fluida [1]. Pengaruh ini dapat dianalisa dengan *Fluid-Structure Interaction* (FSI). FSI merupakan interaksi antara benda padat yang terendam di dalam fluida atau dikelilingi oleh fluida. Pada FSI akan terjadi peristiwa dimana struktur padat elastis yang berinteraksi dengan aliran fluida akan mengalami tekanan yang dapat menyebabkan deformasi pada struktur [4]. Deformasi yang dialami struktur akan bergantung pada besarnya gaya hidrodinamik dari aliran fluida, geometri dari struktur serta sifat material yang berhubungan dengan elastisitas. Material yang semakin elastis menyebabkan interaksi yang terjadi antara fluida dan struktur semakin besar [5]. Deformasi pada FSI paling mudah diamati pada material dengan geometri ramping seperti pelat. Eksperimen menjelaskan bahwa dalam keadaan aliran fluida *steady-state* terjadi deformasi pada pelat yang dibuktikan dengan adanya nilai *strain* atau regangan dari *test plate* aluminium [6]. Deformasi pada pelat akibat adanya aliran fluida tak-mampu-mampat juga telah diamati, dimana deformasi ini terjadi karena pelat mengalami ketidakstabilan, dimana semakin besar kemungkinannya terjadi ketika aliran tak-mampu-mampat, karena aliran ini menyebabkan fluida bersifat sebagai massa tambahan (*added mass*) pada struktur dan menyebabkan ketidakstabilan [7]. FSI terdiri dari dua bidang penyelesaian yaitu fluida dan struktur. Salah satu jenis FSI adalah *Two-Way Coupled* melakukan perhitungan secara terpisah untuk aliran fluida dan deformasi struktural padatan, kemudian terjadi pertukaran informasi antar penyelesaian [8]. Untuk menyelesaikan masalah FSI dapat dilakukan eksperimen atau simulasi dengan menggunakan Metode Elemen Hingga [9].

Pada penelitian ini, akan dibuat simulasi FSI antara fluida Propylene Glycol dan *test plate* Aluminium Alloy. Aliran fluida akan digambarkan dengan Persamaan Navier-Stokes tak-mampu-mampat sedangkan *test plate* akan dianggap mengalami deformasi elastis [10]. Pada simulasi akan dilakukan pengambilan data nilai *strain* yang akan menjelaskan bagaimana terjadinya fenomena FSI, yang kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen sebagai validasi program.

2. Metode Penelitian

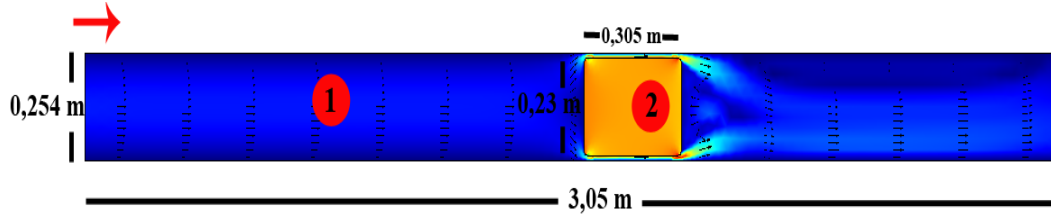
Model yang akan dibuat pada penelitian menyesuaikan dengan eksperimen yang telah dilakukan. Sebuah eksperimen dilakukan pada saluran berbahan *Polymethyl Methacrylate* (PMMA, Plexyglass). Fluida yang digunakan adalah *Propylene Glycol* dan logam yang digunakan sebagai *test plate* adalah aluminium alloy.

Tabel 1. Karakteristik Logam dan Fluida yang digunakan

Karakteristik Logam	
Modulus Young	68,9 GPa
Poisson's Ratio	0,33
Massa Jenis	2710 kg/m ³
Karakteristik Fluida	
Bilangan Reynolds	<2300
Massa Jenis	965,3 kg/m ³
Viskositas Dinamik	0,06 kg/m

Model yang dibuat pada percobaan adalah dua dimensi dengan tampak atas (*top view*). Maka ukuran yang digunakan pada model untuk keseluruhan saluran serta *test plate* seperti yang digambarkan pada Gambar 1.

Pada simulasi, kecepatan fluida untuk keadaan *steady* diinput sebesar 1 m/s^2 . Pada Gambar 1, Domain 1 adalah fluida dan Domain 2 adalah Alluminium Alloy. Sedangkan pada tepi domain 2 merupakan daerah batas antara fluida dan alluminium. Mesh yang digunakan adalah Triangular (Segitiga). Ukuran maksimum elemen adalah 0,0221 m, sedangkan ukuran minimumnya 0.00102 m. Jumlah domain elemen adalah 3249.



Gambar 1. Geometri yang digunakan pada simulasi

Persamaan yang akan digunakan meliputi persamaan untuk aliran fluida, persamaan untuk material padat elastis, dan persamaan untuk daerah batas antara fluida dan material padat. Persamaan yang digunakan untuk aliran fluida adalah Persamaan Navier-Stokes tak-mampu-mampat 2D yang terdiri dari Persamaan Kontinuitas Persamaan (1) dan Persamaan Momentum pada Persamaan (2) dan Persamaan (3) sebagai berikut.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (1)$$

Arah-x

$$-\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} - P \right] + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] = 0 \quad \dots (2)$$

Arah-y

$$-\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial u_y}{\partial x} - P \right] + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] = 0 \quad \dots (3)$$

Sedangkan Persamaan yang digunakan untuk material padat elastis adalah Persamaan (4) yang merupakan persamaan untuk padatan elastis tak-mampu-mampat dan Persamaan (5).

$$\rho_s \left(\frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial t} + (\mathbf{v}_s \cdot \nabla) \mathbf{v}_s \right) = \nabla \cdot \sigma_s \quad \dots (4)$$

$$\sigma = E \varepsilon \quad \dots (5)$$

Pada daerah batas fluida dan struktur material padat, akan terjadi kondisi terkopel, dimana kecepatan harus memenuhi keadaan *no-slip* [10].

$$\mathbf{v}_f = \mathbf{v}_s \quad \dots (6)$$

gaya-gaya yang bekerja harus bersifat kontinyu pada seluruh daerah batas fluida dan struktur material padat.

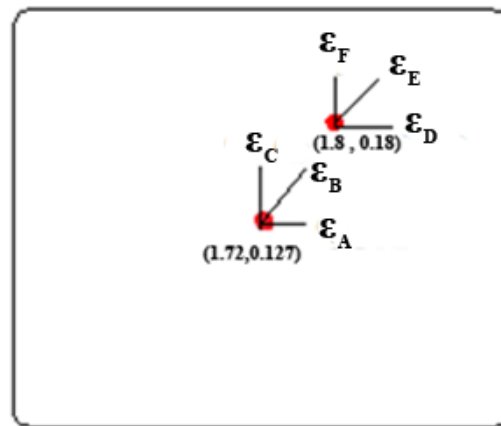
$$\sigma_f \cdot \hat{n} = \sigma_s \cdot \hat{n} \quad \dots (7)$$

dimana $\hat{n}$ adalah vektor satuan pada daerah batas fluida dan struktur material padat.

3. Hasil dan Pembahasan

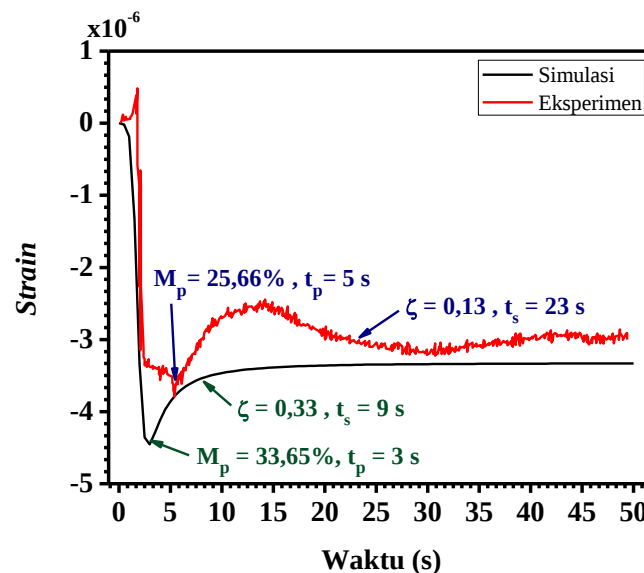
Simulasi model FSI dibuat untuk menggambarkan bagaimana fenomena FSI yang terjadi, yang kemudian diambil nilai *strain* sebagai data. Nilai *strain* dianggap sebagai respon transien akibat adanya fenomena FSI [6]. Nilai *strain* dari simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen sebagai bentuk validasi program.

Terdapat 2 titik uji untuk pengambilan data hasil simulasi yang disesuaikan dengan eksperimen yaitu A(1.72 , 0.127) dan B(1.8 , 0.18). Untuk setiap titik uji diambil 3 data *strain* yaitu dalam arah x, arah y, dan arah resultan xy.



Gambar 2. Titik Uji pada simulasi

Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen. Untuk hasil eksperimen, data diolah menggunakan Web Plot Digitizer dan waktu disesuaikan dengan simulasi agar dapat dibandingkan.



Gambar 3. Perbandingan strain Hasil simulasi dan Eksperimen

Perbandingan antara *strain* ε_E hasil simulasi dan eksperimen yang dijelaskan oleh Gambar 3 menunjukkan bahwa keduanya memiliki respon transien yang berbeda.

Perbedaan dapat dilihat dari jenis respon yang berbeda, untuk eksperimen mengalami respon transien *underdamped* sedangkan simulasi mengalami respon transien *critical damped* [11]. Perbedaan ini dikarenakan dimensi yang berbeda antara simulasi dan eksperimen. Simulasi dilakukan dengan model 2D sedangkan eksperimen yang merupakan keadaan nyata bersifat 3D. Respon simulasi mengalami osilasi yang lebih teredam dibandingkan respon eksperimen.

Selain itu, spesifikasi respon seperti nilai *peak time* (t_p) dan *settling time* (t_s) yang dialami oleh hasil simulasi dan eksperimen juga berbeda. *Peak time* atau waktu puncak adalah waktu yang dibutuhkan agar respon mencapai nilai maksimum atau *overshoot*. Sedangkan *settling time* adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan tetap berada di sekitar nilai akhir (*set point*) dengan persentase eror tertentu. Dalam penelitian ini persentase *error* yang digunakan adalah 0,05 dari *set point* pada eksperimen [11].

Respon untuk nilai *strain* ε_E hasil eksperimen mencapai nilai *peak time* yang lebih lama jika dibandingkan simulasi. *Peak time* untuk eksperimen adalah 5 s sedangkan simulasi adalah 3 s. *Peak time* yang lebih lama pada hasil eksperimen menunjukkan bahwa respon hasil eksperimen mengalami *delay* yang lebih lama jika dibandingkan respon hasil simulasi. Selanjutnya *settling time* pada respon eksperimen adalah pada 23 s dan untuk simulasi adalah 9 s. *Settling time* menunjukkan seberapa cepat nilai pada simulasi maupun eksperimen mencapai keadaan stabil. Jika melihat nilai *settling time* yang ada, maka simulasi lebih cepat mencapai nilai stabil. Hal ini juga didukung oleh faktor *damping* (ζ) pada simulasi lebih besar dari eksperimen, yaitu $\zeta = 0,33$. Sedangkan untuk eksperimen $\zeta = 0,13$.

Selain *peak time* dan *settling time*, spesifikasi respon lainnya adalah nilai *Maximum (percent) Overshoot* (M_p). *Maximum Overshoot* adalah nilai puncak maksimum dari kurva respons yang diukur dari nilai akhir atau *set point*. Nilai *Maximum Overshoot* untuk respon hasil eksperimen lebih baik dibandingkan simulasi, untuk eksperimen adalah 25,66% sedangkan untuk simulasi adalah 33,65%.

Tabel 2. Perbandingan nilai strain untuk hasil simulasi dan hasil eksperimen pada *settling time*

<i>strain</i>	$\varepsilon_{\text{simulasi}}$	$\varepsilon_{\text{eksperimen}}$	$t_s(s)$
ε_A	$- 2,16 \times 10^{-6}$	$- 1,50 \times 10^{-6}$	7,00
ε_B	$- 0,02 \times 10^{-6}$	$0,74 \times 10^{-6}$	24,50
ε_C	$- 2,17 \times 10^{-6}$	$1,63 \times 10^{-6}$	45,50
ε_D	$- 1,54 \times 10^{-6}$	$4,04 \times 10^{-6}$	49,50
ε_E	$- 3,35 \times 10^{-6}$	$- 2,92 \times 10^{-6}$	23,00
ε_F	$- 3,65 \times 10^{-6}$	$- 4,58 \times 10^{-6}$	6,00

Perbedaan nilai strain untuk eksperimen dan simulasi yang dijelaskan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perbedaan nilai strain yang sangat jauh terjadi pada 3 dari 6 titik, yaitu ε_C , ε_D dan ε_E . Jika dibandingkan, ketiga nilai ini memiliki perbedaan tanda antara nilai pada simulasi dan pada eksperimen. Hal ini dapat dikarenakan adanya permukaan yang tidak rata pada test plate yang digunakan pada eksperimen [6]. Selain itu perbedaan nilai strain dapat dikarenakan adanya boundary condition pada eksperimen yang tidak diketahui seperti tekanan dan kecepatan inlet/outlet. Sehingga boundary condition yang ada pada simulasi berbeda dengan eksperimen.

Dengan melihat nilai *strain* yang dihasilkan dari simulasi, dapat dilihat bahwa nilai *strain* pada titik yang semakin dekat dengan ujung *test plate* lebih besar dari titik lainnya. Hasil tersebut juga sama dengan nilai *strain* dari eksperimen. Hal ini dikarenakan pengaruh dari aliran fluida yang lebih besar terjadi pada ujung-ujung *test plate* (atau disebut daerah batas).

4. Kesimpulan

Simulasi FSI dengan Metode Elemen Hingga untuk aliran fluida berupa Propylene Glycol yang berinteraksi dengan sebuah *test plate* telah dilakukan. Respon dan nilai *strain* hasil simulasi dibandingkan dengan eksperimen. *Peak time* dan *settling time* respon hasil simulasi lebih cepat dibandingkan respon hasil eksperimen, namun *overshoot* hasil simulasi lebih tinggi dibandingkan eksperimen. Selanjutnya, untuk nilai *strain* hasil perbandingan simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa 3 dari 6 nilai memiliki perbedaan paling kecil yang sebesar 44%, 15% dan 20%.

DaftarPustaka

1. N. Garga, G.K.W. Kenway, J.R.R.A. Martins, Y. L. Younga. *High Fidelity Multipoint Hydorstructural optimization of a 3-D hydrofoil*. Journal of Fluids and Structure (2017) pp. 15-39.
2. R.S. Mitishita, G. M. Oliveira, T.G.M. Santos, C.O.R. Negrao. *Pressure transmission in yield stress fluids - An experimental analysis*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics (2018) pp. 50-59.
3. X. Ting, Z. Xinzhuo, S. A. Miedema, C. Xiuhan. *Study of the characteristics of the flow regimes and dynamics of coarse particles in pipeline transportation*. Powder Technology, Vol. 347 (2019) pp. 148-158.
4. Jo, J. Chull. *Pressure Vessels and Piping Systems - Fluid-Structure Interaction*. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) (2004).
5. H.A. Stone. *Drop Deformation and Breakup in Viscous Fluid Fluid and Mechanics*, Vol. 26 (1994).
6. Wong, C. Chew. *Experimental Study of Fluid Structure Interaction Effects on Metal Plates Under Fully Developed Laminar Flow*. California : Naval Postgraduates School (2011).
7. C.J. Jesse, J.C. Kennedy, G.L. Solbrekken. *Fluid-Structure Interaction (FSI) Modeling of Thin Plates*. 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), Chicago 2015.
8. Rao, Achuth. *Fluid-solid interaction analysis using ANSYS/multiphysics*, Computational Fluid and Solid Mecha (2003) pp. 1492-1496.
9. Jiajan, Wanchai. *Solution to Incompressible Navier-Stokes Equations by Using Finite Element Method*. Texas : University of Texas (2010).
10. T, Gao, H. H. Hu. *Deformation of elastic particles in viscous shear flow*. Journal of Computational Physics, Vol. 228 (2009) pp. 2132-2151.
11. Ogata, Katsuhiko. *Modern Control Engineering Fifth Edition*. New Jersey: Pearson Education, Inc, (2010).
12. P.A. Kelly. *Solid mechanics part I: An introduction to solid mechanics*. Solid mechanics lecture notes. Auckland : University of Auckland, (2013).