



# Optimasi Desain Pipa Hisap pada Kapal TSHD Freeway Melalui Aplikasi Pipa Spiral untuk Reduksi Penurunan Tekanan Aliran Lumpur Air-Pasir

Muhamad Afrizal<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, Program Studi S1 Teknik Perkapalan, Jl. Limo Raya, Depok 16514, Indonesia

## Abstract

This study aims to evaluate and optimize the suction piping system on a dredger through a comparative analysis of pressure drop between a conventional pipe and a spiral pipe. The simulation was conducted using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, by varying the flow velocity (0.5–2.5 m/s), the volume fraction of solids (5%, 15%, and 25%), and the pipe slope of 7°, which represents a dredging depth of 5 meters. The simulation results show that at a velocity of 0.5 m/s and a volume fraction of 5%, the pressure drop of the spiral pipe is only 30.56 Pa, lower than that of the conventional pipe which reaches 55.83 Pa. However, at a velocity of 2.5 m/s and a volume fraction of 25%, the pressure drop of the spiral pipe increases to 966.18 Pa, while that of the conventional pipe is 805.39 Pa. After adding slope, the spiral pressure drop value decreased to 676.33 Pa, indicating the positive influence of the geometric configuration. In addition, the power-law index (*n*) value of the spiral pipe reaches 1.63, higher than the conventional pipe with (*n*) 1.30, indicating dilatant fluid properties. These results indicate that the selection of pipe design and slope configuration greatly affects the flow efficiency and overall performance of the dredging system.

**Keywords:** Spiral pipe; Conventional pipe; Non-Newtonian fluid; Pressure drop

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan sistem perpipaan hisap pada kapal keruk melalui analisis perbandingan penurunan tekanan (*pressure drop*) antara pipa konvensional dan pipa spiral. Simulasi dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dengan memvariasikan kecepatan aliran (0.5–2.5 m/s), fraksi volume padatan (5%, 15%, dan 25%), serta kemiringan pipa sebesar 7°, yang merepresentasikan kedalaman pengeringan 5 meter. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kecepatan 0.5 m/s dan fraksi volume 5%, *pressure drop* pipa spiral hanya sebesar 30.56 Pa, lebih rendah dibandingkan pipa konvensional yang mencapai 55.83 Pa. Namun, pada kecepatan 2.5 m/s dan fraksi 25%, *pressure drop* pipa spiral meningkat hingga 966.18 Pa, sedangkan pipa konvensional sebesar 805.39 Pa. Setelah ditambahkan kemiringan, nilai *pressure drop* spiral menurun hingga 676.33 Pa, menandakan pengaruh positif dari konfigurasi geometris. Selain itu, nilai *power-law index* (*n*) pada pipa spiral mencapai 1.63, lebih tinggi dari pipa konvensional dengan (*n*) 1.30, menunjukkan sifat fluida dilatant. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan desain pipa dan konfigurasi kemiringan sangat memengaruhi efisiensi aliran dan kinerja sistem pengeringan secara keseluruhan.

**Kata kunci:** Pipa spiral; Pipa konvensional; Fluida non-Newtonian; Penurunan tekanan

## 1. Pendahuluan

Kapal keruk, atau *dredger*, didefinisikan sebagai kapal yang secara primer berfungsi untuk mengangkat dan mentransfer material dari dasar laut, seperti pasir, lumpur, atau kerikil. Kapal ini krusial dalam mendukung dan mengembangkan infrastruktur kelautan, termasuk pemeliharaan pelabuhan, navigasi alur, serta upaya reklamasi lahan (Vlasblom, 2003). Di Indonesia, perannya terilustrasi dalam proyek reklamasi di pesisir Pantai Manado, di mana kapal keruk digunakan untuk memfasilitasi akuisisi dan pemindahan material demi perluasan daratan, yang merupakan bagian integral dari pengembangan wilayah tersebut (Radio Republik Indonesia, 2024). Inti dari operasi pengeringan

\* Email Penulis Koresponden: 2110313066@mahasiswa.upnvj.ac.id

yang efektif adalah sistem pipa hisap (*suction pipe system*), yang bertanggung jawab untuk mengangkut material dari dasar laut ke kapal (Miedema, 2017).

Sudut kemiringan pipa hisap (*suction pipe angle*) merupakan faktor signifikan yang memengaruhi kinerja sistem perpipaan (Lee et al., 2015). Kemiringan ini memainkan peran vital dalam distribusi padatan pada aliran fluida parsial; sudut optimal akan meningkatkan distribusi, mengurangi pengendapan, dan memperbesar efektivitas penggerakan (Matoušek et al., 2019). Parameter kunci yang terpengaruh oleh kemiringan ini adalah *pressure drop*, yakni kehilangan tekanan akibat gesekan dan elevasi sepanjang pipa (Matoušek, 2005). Oleh karena itu, studi tentang hubungan antara sudut kemiringan pipa hisap dan *pressure drop* sangat krusial untuk optimalisasi desain dan operasional kapal keruk. Dalam sistem pipa hisap kapal keruk, penggunaan pipa spiral dengan sudut kemiringan yang tepat diprediksi akan secara signifikan menurunkan *pressure drop* dibandingkan pipa konvensional. Optimalisasi kemiringan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggerakan, tetapi juga berkontribusi pada *drag reduction*. Simulasi menggunakan Ansys akan mengonfirmasi hubungan ini, dengan hasil yang konsisten dengan teori dan penelitian terdahulu.

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1. Persamaan aliran fluida

Aliran fluida dalam pipa secara garis besar dikategorikan menjadi laminar dan turbulen. Aliran laminar terjadi pada kecepatan rendah, dicirikan oleh gerakan fluida yang teratur dan sejajar. Sebaliknya, aliran turbulen, yang muncul pada kecepatan tinggi, ditandai oleh pergerakan fluida yang tidak beraturan dan acak. Penentuan transisi antara kedua rezim aliran ini dikendalikan oleh bilangan Reynolds, sebuah parameter tak berdimensi yang merepresentasikan rasio gaya inersia terhadap gaya viskositas fluida (White, 2011) dan berfungsi sebagai indikator perilaku aliran.

Untuk geometri aliran non-sirkular seperti pipa spiral atau saluran persegi, penentuan bilangan Reynolds memerlukan penggunaan diameter hidraulik. Parameter ini memungkinkan ekivalensi perhitungan bilangan Reynolds pada penampang aliran yang kompleks. Persamaan untuk menghitung diameter hidraulik adalah sebagai berikut:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (1)$$

Dimana  $D_h$  adalah diameter hidraulik [m],  $A_c$  adalah luas penampang aliran fluida [ $m^2$ ], dan  $p$  adalah keliling basah atau keliling dari bagian pipa yang bersentuhan dengan fluida [m].

Pada pipa sirkular, diameter hidraulik direduksi menjadi diameter biasa ( $D$ ) karena hubungan ini mengeliminasi faktor keliling basah menjadi diameter pipa yang dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4(\pi D^2 / 4)}{\pi D} = D \quad (2)$$

### 2.2. Persamaan daya pompa

Dalam mengevaluasi performa pompa, daya merupakan salah satu parameter krusial yang perlu dipertimbangkan secara cermat. Perhitungan daya pompa didasarkan pada persamaan fundamental berikut:

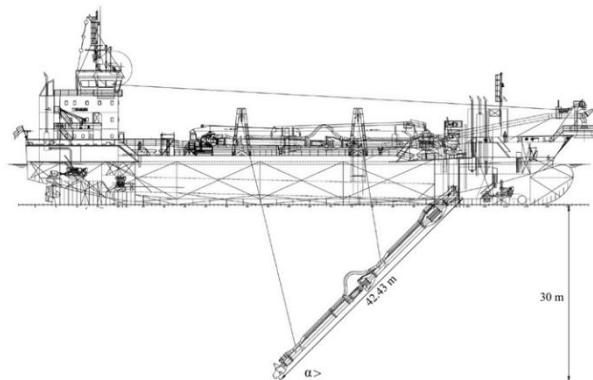
$$P = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta} \quad (3)$$

## 3. Tinjauan Pustaka

Penelitian ini diawali dengan identifikasi dan perumusan masalah, dilanjutkan dengan studi literatur komprehensif untuk membangun kerangka teoritis. Tahap selanjutnya melibatkan pengumpulan data yang relevan, diikuti oleh perancangan model pipa bulat dan spiral sebagai inti studi. Setelah perancangan, simulasi aliran fluida dilaksanakan,

dan hasilnya divalidasi. Apabila hasil validasi menunjukkan ketidaksesuaian, proses simulasi diulang untuk perbaikan. Jika validasi berhasil, penelitian berlanjut dengan memvariasikan tiga parameter kunci: kecepatan fluida, kemiringan pipa, dan diameter hidrolik. Dari variasi ini, tiga jenis data utama—penurunan tekanan (*pressure drop*), tegangan geser (*shear stress*), dan regangan geser (*shear strain*)—diperoleh. Data-data ini kemudian diaplikasikan untuk simulasi aliran fluida pada kapal *Trailing Suction Hopper Dredger*.

### 3.1. Desain umum kapal



Gambar 1. General arrangement TSHD Freeway

Desain Kapal Keruk TSHD Freeway, yang berfungsi untuk pengeringan dasar laut, sungai, atau danau, diilustrasikan dalam gambar ini. Kapal tersebut dilengkapi sistem pipa hisap sepanjang 42.43 meter, dengan sudut kemiringan ( $\alpha$ ) yang dapat diatur, memungkinkannya beroperasi hingga kedalaman 30 meter.

Tabel 1. Ukuran geometri pipa

Pipa	D <sub>h</sub> (mm)	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	D <sub>3</sub> (mm)	$\Delta D$
Konvensional	900	-	889	914	-
Spiral	900	778	1011	1110	117

Tabel ini memuat karakteristik geometri vital untuk pipa spiral dan sirkular. Parameter yang dicantumkan meliputi jenis pipa yang dievaluasi, diameter hidraulik (D<sub>h</sub>), diameter dalam (D<sub>1</sub>), diameter tengah (D<sub>2</sub>), diameter luar (D<sub>3</sub>), dan kedalaman alur ( $\Delta D$ ), yang merupakan selisih antara diameter dalam dan Tengah.

### 3.2. Variasi

Tabel 2. berisi informasi mengenai rentang nilai parameter geometri yang diaplikasikan dalam desain dan analisis pipa. Setiap parameter terdaftar dengan nilai atau kisaran yang relevan dengan karakteristik dan fungsi pipa.

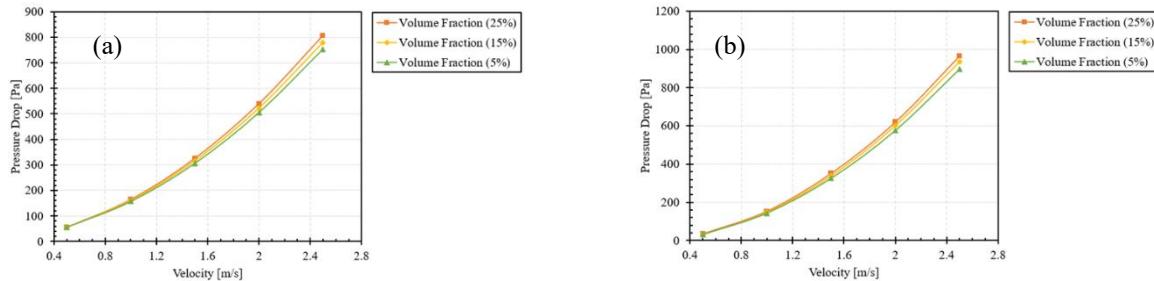
Tabel 2. Parameter geometri pipa

Parameter	Nilai
Sudut kemiringan pipa	7°
Jenis fluida	Lumpur dan Pasir
Kecepatan fluida	0.5 – 2.5 m/s
Hidraulik diameter pipa	900 mm
Rezim aliran fluida	Laminar

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Pressure Drop

Efisiensi energi dalam transportasi fluida pada sistem perpipaan sangat ditentukan oleh penurunan tekanan (*pressure drop*), menjadikannya parameter hidrodinamika yang vital. Penelitian ini secara khusus menganalisis *pressure drop* dengan membandingkan pipa konvensional (sirkular) dan pipa spiral, serta meninjau pengaruh sudut kemiringan pipa terhadap efisiensi pengangkutan fluida campuran. Data penurunan tekanan untuk kedua jenis pipa pada kondisi tanpa kemiringan dapat ditemukan pada Gambar 2.a (konvensional) dan Gambar 2.b (spiral).



Gambar 2. (a) Pressure drop pipa konvensional; (b) Pressure drop pipa spiral

### 4.2. Pengaruh Geometri Pipa Terhadap Pressure Drop

Geometri pipa terbukti memainkan peran yang sangat penting dalam menentukan besarnya *pressure drop* dalam sistem perpipaan hisap kapal keruk. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa spiral dengan konfigurasi alur yang melingkar mampu menciptakan distribusi aliran yang lebih merata, terutama pada kondisi kecepatan rendah dan fraksi volume padatan kecil. Fenomena ini menyebabkan berkurangnya akumulasi material padat di dasar pipa, sehingga mengurangi nilai *pressure drop* secara signifikan. Sebagai contoh, pada kecepatan 0.5 m/s dan fraksi volume 5%, *pressure drop* pada pipa spiral hanya sebesar 30.56 Pa, jauh lebih rendah dibandingkan pipa konvensional yang mencapai 55.83 Pa.

Namun, pada kondisi kecepatan tinggi (1.5–2.5 m/s), efek geometris spiral justru memicu peningkatan *pressure drop*. Hal ini disebabkan oleh dominasi gaya sentrifugal dan peningkatan turbulensi akibat interaksi kompleks antar partikel padat yang bergerak dalam alur spiral. Pada kondisi ini, aliran cenderung tidak stabil dan menyebabkan akumulasi gaya hambat yang lebih besar dibandingkan pipa konvensional. Contohnya, pada kecepatan 1.5 m/s dan fraksi volume 25%, *pressure drop* pada pipa spiral tercatat sebesar 351.06 Pa, lebih tinggi dibandingkan pipa konvensional yang hanya sebesar 324.96 Pa.

Selain pengaruh geometri internal pipa, faktor eksternal seperti sudut kemiringan juga memperkuat atau melemahkan efek geometris terhadap *pressure drop*. Pada pipa spiral, penambahan sudut kemiringan sebesar 7° memberikan pengaruh positif dengan menurunkan nilai *pressure drop* secara signifikan, dari 966.18 Pa menjadi 676.33 Pa pada kecepatan 2.5 m/s dan fraksi volume 25%. Ini menunjukkan bahwa geometri spiral bekerja lebih efektif ketika dikombinasikan dengan konfigurasi kemiringan yang sesuai, karena membantu memperlancar aliran dengan memanfaatkan gaya gravitasi.

Secara keseluruhan, desain spiral memberikan keuntungan yang jelas dalam kondisi operasi tertentu, khususnya pada aliran dengan kecepatan rendah dan padatan ringan. Namun pada kondisi ekstrem, seperti aliran cepat dan padatan tinggi, geometri spiral bisa menjadi kurang efisien dibandingkan pipa konvensional. Oleh karena itu, pemilihan desain pipa harus mempertimbangkan keterkaitan antara geometri, kondisi operasi, dan konfigurasi sistem secara menyeluruh untuk memperoleh efisiensi hidrolik yang optimal.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis terhadap aliran multiphase (campuran air laut, lumpur, dan pasir) pada pipa konvensional dan spiral, ditemukan bahwa geometri pipa memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pola aliran serta nilai pressure drop. Pipa spiral menunjukkan distribusi aliran yang lebih merata dan pembentukan pola turbulen yang lebih kompleks dibandingkan pipa konvensional. Pada kondisi kecepatan rendah dalam rentang 0.5–1 m/s untuk berbagai fraksi volume, pressure drop pada pipa konvensional cenderung lebih tinggi dibandingkan pipa spiral. Sebagai contoh, pada fraksi volume 5% dengan kecepatan 0.5 m/s, pipa konvensional menunjukkan pressure drop sebesar 55.83 Pa, sedangkan pada pipa spiral hanya sebesar 30.56 Pa.

Namun, pada kecepatan tinggi dalam rentang 1.5–2.5 m/s, terjadi fenomena sebaliknya di mana pressure drop pada pipa konvensional lebih rendah dibandingkan dengan pipa spiral. Hal ini terjadi akibat dominasi gaya sentrifugal, panjang lintasan aliran, serta interaksi partikel yang lebih kompleks pada pipa spiral. Sebagai ilustrasi, pada fraksi volume 25% dengan kecepatan 1.5 m/s, pressure drop pada pipa konvensional sebesar 324.96 Pa, sedangkan pada pipa spiral mencapai 351.06 Pa.

Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa sudut kemiringan pada pipa hisap turut berperan penting dalam mengurangi pressure drop dalam sistem perpipaan hisap. Misalnya, pada fraksi volume 25% dengan kecepatan 2.5 m/s, pipa spiral dalam kondisi horizontal menghasilkan pressure drop sebesar 966.18 Pa, sedangkan dengan kemiringan tertentu nilai tersebut berkurang menjadi 676.33 Pa. Terakhir, penggunaan model non-Newtonian power law terbukti efektif dalam merepresentasikan perilaku viskositas fluida lumpur secara realistik, terutama pada variasi shear rate tinggi dalam sistem aliran dengan geometri yang kompleks.

## Nomenklatur

$D_h$	Diameter hidraulik [m]
$A_c$	Luas penampang aliran fluida [ $m^2$ ]
p	Keliling basah atau keliling dari bagian pipa yang bersentuhan dengan fluida [m]
P	Daya nyata pada pompa [Watt]
Q	Laju aliran yang dipompa atau debit aliran [ $m^3/s$ ]
$\Delta P$	Perbedaan tekanan yang dihasilkan oleh pompa [N/m <sup>2</sup> atau Pa]
$\eta$	Efisiensi total pompa [%]

## Referensi

- Lee, Y., Kim, K.-Y., Chen, Z., & Choi, Y.-D. (2015). The effect of suction pipe leaning angle on the internal flow of pump sump. Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 39(8), 849–855. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.8.849>
- Matoušek, V. (2005). Research developments in pipeline transport of settling slurries. Powder Technology, 156(1), 43–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.054>
- Miedema, S. A. (2017). The Delft Sand, Clay & Rock Cutting Model 3rd Edition.
- Radio Republik Indonesia. (2024). Reklamasi Pesisir Pantai Manado. Retrieved August 2024, from <https://rri.co.id/index.php/indepth/298/reklamasi-pesisir-pantai-manado>
- Vlasblom, W. J. (2003). Chapter 1 Introduction to Dredging Equipment.
- White, F. M. (2011). Fluid Mechanics (7th ed.).