

**ANALISIS OPTIMASI JARAK DAN BOBOT BETON PEMBERAT PIPA HIGH
DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) BAWAH LAUT DIAMETER 10, 20 DAN 30 INCI**
Analysis of Optimization of Distance and Weight of Ballast Weight Under Sea High Density
Polyethylene (HDPE) Pipelines 10,20 and 30 inches Diameter

Artikel Ilmiah
Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat Sarjana S-1 Program Studi Teknik Sipil



Oleh:

**HERWIN AEROPLAN SAPUTRA
F1A 016 057**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MATARAM
2023**

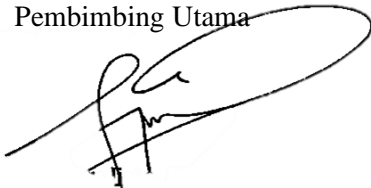
ARTIKEL ILMIAH

ANALISIS OPTIMASI JARAK DAN BOBOT BETON PEMBERAT PIPA HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) BAWAH LAUT DIAMETER 10, 20 DAN 30 INCI
Analysis of Optimization of Distance and Weight of Ballast Weight Under Sea High Density Polyethylene (HDPE) Pipelines 10,20 and 30 inches Diameter

Oleh:
HERWIN AEROPLAN SAPUTRA
F1A 016 057

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

1. Pembimbing Utama



Eko Pradijoko, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19701205 199702 1 001

Tanggal: 14 Juli 2023

2. Pembimbing Pendamping



Atas Pracovo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19710717 199803 1 0005

Tanggal: 14 Juli 2023

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Mataram



Hariyadi, ST., M.Sc. (Eng.), Dr. Eng.
NIP. 19731027 199802 1 001

ANALISIS OPTIMASI JARAK DAN BOBOT BETON PEMBERAT PIPA HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) BAWAH LAUT DIAMETER 10, 20 DAN 30 INCI

Herwin Aeroplan Saputra¹, Eko Pradjoko², Atas Pracoyo².

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Mataram

²Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Mataram

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

INTISARI

Pipa HDPE merupakan pipa termoplastik bertekanan dengan massa jenis yang lebih rendah dari pada massa jenis air laut, sehingga pipa akan terapung ketika berada di air laut. Pipa ini umumnya digunakan untuk keperluan transportasi fluida air dan gas dengan wilayah operasional di darat maupun di dasar laut. Pipa HDPE yang beroperasi di bawah laut, akan menerima beban/gaya-gaya lingkungan akibat gelombang dan arus. Adapun gaya-gaya lingkungan tersebut antara lain ialah gaya statis dan gaya dinamis. Gaya apung (F_B) pipa merupakan gaya statis (hidrostatik) sedangkan gaya seret (F_D), gaya angkat (F_L), gaya inersia (F_I) merupakan gaya-gaya dinamis (hidrodinamis). Besar kecilnya gaya-gaya tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain adalah kedalaman laut (d), tinggi gelombang (H), diameter pipa (D) dan ketebalan dinding pipa (t).

Kestabilan pipa HDPE bawah laut bergantung pada kemampuan pipa dalam mempertahankan kondisi semula, terhadap potensi kegagalan struktur akibat pengaruh gaya-gaya lingkungan tersebut. Karena bobot pipa HDPE yang ringan, pipa memerlukan bobot tambahan dengan besaran yang cukup untuk menjamin stabilitas pipa. Pemberat pipa diharapkan bukan hanya dapat memberikan bobot yang cukup bagi pipa untuk stabil tenggelam di dasar laut, namun pemberat pipa juga diharapkan dapat menjamin kestabilan pipa terhadap gaya dinamis yang bekerja pada pipa ketika pipa berada di dasar laut. Umumnya, pemberat pipa HDPE di desain dengan bentuk yang disesuaikan dengan kebutuhan di lapangan (simetris atau asimetris), dan pemberat pipa HDPE biasanya berbentuk blok-blok (berjarak satu sama lain).

Jarak dan bobot pemberat tersebut harus di optimasi, sehingga potensi terjadinya kegagalan struktur (*buckling*) pada pipa dapat di minimalisir. Optimasi jarak dan bobot pemberat pipa HDPE bertujuan untuk memperoleh jarak dan bobot pemberat pipa yang optimal, pada kondisi gaya statis dan dinamis. Jarak dan bobot pemberat tersebut harus di kalkulasikan dengan baik untuk menjamin ke-stabil-an pipa HDPE bawah laut. Untuk mendapatkan jarak dan bobot pemberat yang optimal, dapat dilakukan analisis optimasi jarak dan bobot pemberat pipa HDPE terhadap gaya-gaya lingkungan yang bekerja.

Berdasarkan hasil analisis optimasi jarak dan bobot pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diperoleh sebesar 25,8 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 1.220 kg, untuk pipa HDPE diameter 10 inci. Pipa HDPE diameter 20 inci, diperoleh jarak maksimal sebesar 36,8 m dengan bobot minimal yang diperlukan sebesar 6.950 kg. Sedangkan untuk pipa dengan diameter 30 inci diperoleh jarak maksimal sebesar 46 m dengan bobot minimal yang diperlukan sebesar 22.350 kg.

Kata kunci: Pipa HDPE, pemberat pipa, *buckling*, hidrostatik, hidrodinamis

ABSTRACT

HDPE pipe is a pressurized thermoplastic pipe with a lower density than seawater, so the pipe will float when in seawater. This pipe is generally used for water and gas fluid transportation purposes with operational areas on land and the seabed. HDPE pipes operating under the sea will receive loads/environmental forces due to waves and currents. The environmental forces include static forces and dynamic forces. The buoyancy force (F_B) of the pipe is a static (hydrostatic) force while the drag force (F_D), lift (F_L), and inertial force (F_I) are dynamic (hydrodynamic) forces. The magnitude of these forces is influenced by several factors, including the depth of the sea (d), pipe wave height (H), pipe diameter (D), and pipe wall thickness (t).

The stability of underwater HDPE pipes depends on the ability of the pipes to maintain their original condition, against the potential for structural failure due to the influence of these environmental forces. Due to the lightweight HDPE pipes, the pipes require additional weight with sufficient size to ensure the stability of the pipes. Pipe ballast is expected not only to provide enough weight for the pipe to sink stably on the seabed, but pipe ballast is also expected to guarantee the stability of the pipe against dynamic forces acting on the pipe when the pipe is on the seabed. Generally, HDPE pipe ballast is designed in a shape that is adjusted to the needs of the field (symmetrical or asymmetrical), and HDPE pipe ballast is usually in the form of blocks (spaced apart).

The distance and weight of the ballast must be optimized so that the potential for structural failure (buckling) in the pipe can be minimized. Optimization of HDPE pipe ballast distance and weight aims to obtain optimal pipe ballast distance and weight, under conditions of static and dynamic forces. The distance and weight of the ballast must be well calculated to ensure the stability of the underwater HDPE pipe. To obtain the optimal ballast distance and weight, an analysis of optimization of HDPE pipe ballast distance and weight optimization can be carried out against the working environmental forces.

Based on the results of the optimization of the distance and ballast weight optimization of HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 pipes, it was obtained 25,8 m with a maximum ballast weight of 1.220 kg, for HDPE pipes with a diameter of 10 inches. HDPE pipe with a diameter of 20 inches, with a maximum distance of 36,8 m is obtained with a maximum weight of 6.950 kg. Meanwhile, for pipes with a diameter of 30 inches, a maximum distance of 46 m is obtained with a maximum weight of 22,350 kg.

Keywords: HDPE pipe, pipe ballast, buckling, hydrostatic, hydrodynamic

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tahun 2021, Universitas Mataram melalui Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil, melakukan pekerjaan terkait jasa Kajian dan Perencanaan Modifikasi Sea water intake Pipe PLTU Sumbawa Barat yang selanjutnya disingkat KPM SWIP pada dokumen ini. Pekerjaan ini diusung atas dasar gangguan yang terjadi pada water intake pond, yang berfungsi untuk menampung air laut yang digunakan sebagai air pendingin pada sistem pendingin utama unit pembangkit. Gangguan ini berupa terjadinya sedimentasi pasir, yang menyebabkan berkurangnya volume air yang dapat ditampung oleh water intake pond. Kondisi tersebut juga dapat mengganggu kinerja sistem pendingin, jika pasir yang tertampung masuk terbawa aliran air melalui pipa pendingin ke kondensor. Untuk mengatasi hal tersebut, pihak pengelola unit pembangkit mengurus pasir yang ada di dalam water intake pond. Pengurusan tersebut membutuhkan waktu minimal 49 jam dan unit harus di shutdown pada saat pengurusan berlangsung. Solusi ini dianggap tidak efektif dan merugikan, karena menyebabkan unit pembangkit berpotensi kehilangan produksi sebesar 8,278,71 kWh. (Anonim, 2021)

Solusi yang dapat dilakukan terhadap kondisi tersebut ialah, dengan melakukan modifikasi pada *sea water intake pipe* agar terhindar dari gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan sedimentasi pada *water intake pond*. Pada dokumen laporan akhir KPM SWIP tahun 2021, termuat beberapa alternatif perbaikan/modifikasi pada *sea water intake pipe*. Dari beberapa alternatif tersebut solusi yang dipilih, ialah dengan melakukan perpanjangan pada pipa *intake* dan membuat bak endap sedimen sebelum bak penampungan (*water intake pond*). Pada kasus ini pipa rencana yang

digunakan, ialah pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 dengan diameter 10 inci. Pipa *High Density Polyethylene/HDPE* merupakan pipa plastik bertekanan dengan tingkat elastisitas yang tinggi dan tingkat keretakan yang rendah. Umumnya digunakan untuk distribusi fluida air dan gas. Karena keunggulan yang dimilikinya, pipa HDPE dipilih sebagai material bahan pipa pada proyek ini. Selain itu, sebelumnya sudah terdapat pipa eksisting dengan jenis pipa yang sama (HDPE), sehingga dapat mempermudah pengerjaan penyambungan pipa. *Sea water intake pipe* ini beroperasi di dasar laut dengan kedalaman dan rute pipa yang telah ditentukan.

Massa jenis pipa HDPE (958 kg/m³) lebih kecil dibandingkan massa jenis air laut (1025 kg/m³), sehingga ketika pipa berada di air, pipa akan mengapung. Kondisi tersebut akan menyulitkan proses instalasi pipa, oleh karena itu agar pipa dapat berada di dasar laut selama waktu layannya, maka pipa diberikan berat tambahan dengan cara memberikan pemberat pada pipa. Umumnya material/bahan yang digunakan sebagai pemberat pada pipa ialah beton, yang didesain dan direncanakan sesuai dengan kebutuhan. Perencanaan tersebut meliputi pemilihan dimensi/bentuk yang sesuai dan perhitungan lainnya. Pemberat ini berfungsi untuk memberikan berat benam (*submerged weight*) yang cukup bagi pipa, sehingga pipa memiliki bobot yang cukup untuk tenggelam. Proses instalasi menjadi lebih mudah untuk dilakukan sehingga pipa dapat beroperasi pada lokasi yang diinginkan sebagaimana mestinya. Kemampuan pipa untuk mempertahankan posisinya saat masa layannya, merupakan pengertian dari stabilitas pipa. Stabilitas pipa dipengaruhi oleh beban/gaya-gaya yang bekerja pada pipa saat berada di dasar laut. Gaya-gaya tersebut terbagi menjadi 2 (dua) yaitu gaya statis dan gaya dinamis.

Perencanaan stabilitas pipa merupakan parameter yang sangat penting untuk diperhatikan saat merencanakan konstruksi pipa bawah laut, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti berat pipa di dalam air, gaya-gaya lingkungan yang bekerja, resistensi tanah di dasar laut dan tentunya jarak dan bobot antar blok pemberat pipa. Pipa yang mengapung akibat berat benam (*submerged weight*) yang tidak cukup, merupakan salah satu bentuk kegagalan struktur pada pipa bawah laut. Selain untuk menjamin pipa stabil tenggelam di dasar laut, perencanaan stabilitas pipa juga berguna untuk mengurangi/menghindari resiko terjadinya kegagalan struktur lainnya pada pipa. Kegagalan struktur lainnya tersebut dapat berupa *buckling* (tekuk) pada pipa. Soegiono (2007), *buckling* pada sebuah pipa terjadi jika gaya efektif di dalam pipa menjadi sedemikian besar, yang mengakibatkan pipa melengkung (*defleksi*).

Pada penelitian ini, penulis akan meninjau potensi terjadinya kegagalan struktur (*buckling*) pada pipa HDPE, mengingat konsistensi pipa selama umur layannya sangat penting untuk keberlangsungan fungsi operasionalnya. Tinjauan tersebut dilakukan terhadap pipa HDPE dengan kriteria pipa dengan diameter tertentu, Untuk mengetahui potensi tersebut, dapat dilakukan analisis pada blok pemberat dengan cara menghitung kebutuhan jarak maksimal dan bobot minimal blok pemberat pipa HDPE dengan variabel batasan perhitungannya ialah tegangan maksimal pipa HDPE (20 MPa). Analisis jarak maksimal blok pemberat menghasilkan gambaran kondisi keamanan pipa terhadap kegagalan struktur (terapung, *buckling*). Sedangkan analisis bobot minimal blok pemberat menghasilkan gambaran kondisi pelaksanaan instalasi pipa, yang berkaitan dengan *workability*, *time* dan *cost*. Untuk hasil yang lebih baik, maka dapat dilakukan

analisis optimasi jarak dan bobot blok pemberat. Analisis optimasi tersebut, memberikan beberapa keuntungan pada perencanaan pipa HDPE jalur bawah laut. Salah satu keuntungan tersebut ialah penggunaan blok pemberat pada pipa dapat dioptimalkan. Sehingga, optimasi jarak dan bobot blok pemberat pipa HDPE menjadi sedemikian penting untuk dilakukan.

Karno (2016), pernah melakukan penelitian terkait analisis optimasi jarak dan ukuran pemberat pipa HDPE jalur bawah laut. Penelitian tersebut dilakukan terhadap pipa HDPE dengan diameter 4, 6 dan 8 inci, yang difungsikan sebagai pipa distribusi air bersih. Air bersih tersebut diperoleh dari PDAM Kabupaten Lombok Utara, yang kemudian dialirkan menuju ke 3 (tiga) gili yaitu Sire, Meno dan Trawangan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa, analisis optimasi jarak dan bobot blok pemberat pipa HDPE sangat perlu dilakukan. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis bermaksud untuk mengusung topik Tugas Akhir dengan judul "**Analisis Optimasi Jarak dan Bobot Beton Pemberat Pipa *High Density Polyethylene* (HDPE) Bawah Laut Diameter 10, 20 dan 30 Inchi**".

1.2. Permasalahan

1. Berapakah jarak dan bobot maksimal blok pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci saat menerima gaya statis, sehingga pipa dapat dikategorikan aman dari potensi terjadinya kegagalan struktur?
2. Berapakah jarak dan bobot maksimal blok pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci saat menerima gaya dinamis, sehingga pipa dapat dikategorikan aman dari potensi terjadinya kegagalan struktur?
3. Berapakah jarak dan bobot optimum blok beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci saat menerima gaya gabungan (statis dan dinamis), sehingga pipa dapat

dikategorikan aman dari potensi terjadinya kegagalan struktur?

1.3. Batasan Masalah

1. Analisis optimasi dilakukan terhadap Pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci
2. Pemberat yang di analisis adalah pemberat dengan bentuk asimetris (tidak menyelimuti pipa) yang tersebar di sepanjang pipa dengan jarak tertentu (blok-blok)
3. Tidak merencanakan gambar kerja (*shop drawing*) blok beton pemberat dan pipa
4. Tidak merencanakan jadwal pekerjaan instalasi pipa
5. Tidak mempertimbangkan metode instalasi pipa
6. Material bahan blok pemberat tersusun dari beton bertulang
7. Analisis jarak dan bobot dilakukan saat pipa berada di bawah laut/kondisi operasional
8. Kedalaman laut diperhitungkan dari kedalaman 1 - 20 m
9. Tinggi gelombang diperhitungkan dari ketinggian 0,5 - 3 m
10. Tidak menganalisis gaya gesek (F_r) pipa dan pemberat
11. Perhitungan kecepatan dan percepatan partikel air dihitung berdasarkan pengaruh gelombang laut
12. Tidak memodelkan bentuk kegagalan struktur yang terjadi pada pipa
13. Tidak menghitung umur rencana/umur layan blok beton pemberat dan pipa
14. Tidak memperhitungkan tekanan internal pipa akibat fluida yang dialirkan
15. Fluida yang dialirkan berupa air laut
16. Tidak menghitung rencana anggaran biaya (RAB) maupun rencana anggaran pelaksanaan (RAP)

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui jarak dan bobot maksimal dari blok beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci, saat menerima gaya statis
2. Untuk mengetahui jarak dan bobot maksimal dari blok beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci, saat menerima gaya dinamis
3. Untuk mengetahui jarak dan bobot optimum dari blok beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci, saat menerima gaya gabungan (statis dan dinamis)

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Mengetahui jarak maksimal dan bobot minimal blok beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci, saat menerima gaya statis dan gaya dinamis.
2. Mengetahui jarak dan bobot optimal blok beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 diameter 10, 20 dan 30 inci, saat menerima gaya statis dan dinamis secara bersamaan.
3. Menghasilkan sejumlah grafik yang dapat dijadikan panduan praktis dalam perencanaan blok beton pemberat pipa HDPE. Grafik tersebut dapat digunakan untuk menentukan jarak (maksimal dan optimal) dan bobot (minimal dan optimal) blok beton pemberat pipa HDPE tersebut.
4. Meningkatkan efisiensi (biaya) dan kualitas (stabilitas pipa) perencanaan blok beton pemberat pipa HDPE tersebut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Karno (2016), melakukan penelitian optimasi jarak dan ukuran pemberat pipa

HDPE untuk distribusi air bersih jalur bawah laut pada sejumlah diameter pipa yakni diameter 4,6 dan 8 inci. Optimasi tersebut dilakukan dengan melakukan Analisis stabilitas pipa terhadap gaya-gaya lingkungan yang bekerja pada pipa, seperti gaya statis/hidrostatik (gaya apung), gaya dinamis/hidrodinamis (gaya seret, gaya inersia dan gaya angkat) serta gabungan dari kedua gaya tersebut (gaya statis dan dinamis). Berdasarkan Analisis yang dilakukan jarak dan ukuran pemberat yang optimal terhadap gaya statis dan dinamis yang bekerja pada pipa HDPE diperoleh sebesar 14,2 meter dengan ukuran beton pemberat sebesar 130 kg untuk pipa diameter 4 inci dan jarak optimal sebesar 17,2 meter dengan ukuran beton pemberat sebesar 340 kg untuk pipa diameter 6 inci, sedangkan untuk pipa diameter 8 inci diperoleh jarak optimal sebesar 19,2 meter dengan ukuran beton pemberat sebesar 600 kg.

Ridlwan dkk (2017), telah melakukan analisis *on-bottom stability* pada kondisi operasi studi kasus pipa gas dari platform SP menuju platform B2C Cimalaya Jawa Barat milik PT. Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java*. Analisis *on-bottom stability* pipa bawah laut diperhitungkan untuk mengetahui apakah pipa stabil secara vertikal dan secara lateral didasar laut karena efek gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa. Besar gaya hidrodinamis arah horizontal gaya *drag* sebesar 145,49 N/m. Besar gaya hidrodinamis arah horizontal gaya inersia sebesar 0 N/m. Besar gaya hidrodinamis arah vertikal gaya angkat sebesar 167,67 N/m. Faktor keamanan stabilitas vertikal pipa adalah $4,1 \geq 1,1$. Faktor keamanan stabilitas lateral pipa adalah $1,6 \geq 1,1$. Sehingga hasil analisis *on-bottom stability* menunjukkan bahwa tebal minimum *concrete coating* adalah sebesar 33 mm.

Nugroho dkk (2010), Karakteristik pipa *polyethylene* adalah beratnya yang ringan sehingga mudah mengapung di permukaan. Untuk mendapatkan stabilitas pipa *polyethylene*, ditambahkan *concrete weight* pada pipa *polyethylene* dengan berat dan jarak tertentu. Apabila *concrete weight* terlalu ringan, jaringan pipa tidak akan stabil di dasar laut. Tetapi apabila beton pemberat terlalu berat, maka jaringan pipa tersebut akan sulit untuk diinstalasi. Oleh karena itu, Analisis mengenai kestabilan pipa *polyethylene* bawah laut pada saat operasi dan instalasi dipilih menjadi inti pembahasan pada tugas akhir ini. Dari hasil Analisis didapatkan bahwa *concrete weight* desain 1 dengan berat 28.318 kg dan jarak antar *concrete weight* 3 m lebih unggul dalam stabilitas *span* dan memberikan tegangan yang kecil pada pipa saat instalasi, desain 2 dan 3 dengan berat 100 kg dan jarak antar *concrete weight* 5 m lebih unggul dalam stabilitas vertikal dan horizontal tetapi memberikan tegangan yang besar pada pipa saat instalasi.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pipa

Pipa adalah suatu alat berbentuk tabung/silinder yang digunakan untuk mengalirkan fluida (air/gas) dari satu tempat ke tempat lainnya. Disamping itu pipa juga merupakan sebuah saluran tertutup yang digunakan sebagai sarana transportasi fluida di darat maupun di bawah permukaan laut. Dalam sistem instalasi pipa, khususnya untuk minyak dan gas alam, digunakan dua istilah, yaitu perpipaan (piping) dan transportasi pipa (pipeline). Perpipaan digunakan sebagai istilah untuk instalasi pipa yang mengalirkan fluida dari satu tempat ke tempat lain dalam jarak yang berdekatan dengan pipa yang digunakan berukuran relatif kecil.

Sedangkan transportasi pipa digunakan sebagai istilah untuk instalasi pipa yang mengalirkan fluida dari satu

fasilitas (plant) ke plant yang lain, dan biasanya ukurannya sangat besar. Sebagai media pengantar, pipa akan dipengaruhi oleh tekanan dari dalam pipa maupun tekanan dari luar pipa. Tekanan dari dalam pipa tergantung pada jenis fluida yang mengalir pada pipa. Sedangkan tekanan dari luar pipa tergantung pada kondisi gaya lingkungan yang bekerja pada pipa. Dalam sistem perpipaan, kita akan mengenal istilah NPS. NPS yang memiliki kepanjangan dari Nominal Pipe Size adalah istilah yang menunjukkan diameter nominal (bukan ukuran sebenarnya) dari sebuah pipa. Maksudnya nominal disini adalah hanya angka standar yang digunakan sebagai satuan umum. Contohnya adalah ketika kita menyebutkan pipa 2” (dua inci), maka pipa tersebut memiliki ukuran sekitar dua inci, tetapi ukuran aslinya bila di ukur tidak tepat dua inci. Nilai 2 (dua) inci tersebut hanya nominal yang di gunakan untuk menyebutkan jenis pipa agar baik penjual atau pemakai sama-sama tahu, tetapi bukan ukuran sebenarnya.

Dewasa ini, pemanfaatan pipa semakin beragam baik di kehidupan sehari-hari maupun untuk kepentingan industri. Pada kehidupan sehari-hari untuk memenuhi kebutuhan air bersih pada suatu wilayah, pipa dapat digunakan sebagai alat mendistribusikannya. Pada bidang industri kelautan, pipa digunakan sebagai alat transportasi fluida (air dan gas) dari satu platform ke platform lainnya yang memiliki jarak tempuh yang sangat jauh dan debit yang relatif besar serta berkelanjutan. Fluida yang dialirkan tersebut biasanya merupakan fluida hasil pertambangan minyak bumi seperti solar, gas dan jenis minyak bumi lainnya dan juga fluida berupa air bersih ataupun air laut. Secara umum, pipa yang rute kerjanya berada di bawah permukaan air laut disebut dengan pipa laut.

2.3 Pipa PE (*Polyethylene*)

1. Pendahuluan

Pipa HDPE merupakan pipa bertekanan tinggi yang terbuat dari termoplastik, yang banyak digunakan untuk pipa air dan pipa gas, Sejak awal 1960-an, hanya beberapa tahun setelah diperkenalkan pertama kali, pipa *High Density Polyethylene* (HDPE) semakin banyak digunakan untuk berbagai aplikasi kelautan seperti pembuangan limbah, sungai dan danau penyeberangan, *intake* air tawar dan air asin. Ketebalan terhadap korosi galvanik adalah alasan utama untuk memilih HDPE. Kombinasi dari udara dan air, tetapi terutama air laut, bisa sangat korosif terhadap bahan pipa logam biasa. Pipa HDPE memiliki kuat lentur izin hingga 20 MPa, ketahanan temperature rendah hingga temperature air beku dan tergolong pipa ramah lingkungan. Pipa HDPE juga dapat bertahan pada temperatur tinggi hingga 120°C dan memiliki fleksibilitas yang tinggi, terbuat dari bahan yang relatif ringan bahkan dapat digulung.

Fitur bermanfaat lainnya, yang membuat pipa HDPE sangat cocok untuk aplikasi kelautan adalah sebagai berikut:

- a. Ringan, untuk diameter pipa tertentu dan kinerja yang setara persyaratan, berat pipa HDPE sekitar sepersepuluh dari pipa beton dan setengah dari besi tuang. Penanganan HDPE membutuhkan alat berat yang minim.
- b. Mengapung, karena kepadatan HDPE sekitar 96% dari air tawar, dan sekitar 94% dari air laut, pipa HDPE mengapung saat berada di air.
- c. Fleksibilitas, fleksibilitas pipa HDPE memungkinkannya secara bertahap tenggelam dan beradaptasi dengan topografi alami permukaan bawah air. Ini menghasilkan prosedur penenggelaman yang lebih sederhana, dan itu juga berarti bahwa pipa fleksibel biasanya dapat ditempatkan langsung di dasar alami tanpa pembuatan parit atau bentuk lain dari persiapan dukungan tingkat berkelanjutan.

d. Daktilitas (kemampuan regangan), karena kapasitas regangannya yang relatif tinggi, pipa HDPE dapat dengan aman menyesuaikan dengan kekuatan eksternal variabel yang dihasilkan oleh gelombang dan arus. Kapasitas regangan tinggi juga memungkinkan perpipaan HDPE bergeser atau menekuk dengan aman untuk mengakomodasi dirinya sendiri untuk mengubah posisi yang diakibatkan oleh gelombang kuat dan arus.

Bahan konvensional dan tidak fleksibel seperti beton atau pipa besi hanya mampu melakukan deformasi yang relatif kecil sebelum mengalami kebocoran atau kegagalan struktur. Penggunaan pipa konvensional untuk instalasi kelautan membutuhkan “faktor keamanan” yang besar, seperti pemuatan yang relatif berat atau pembuatan parit di dasar laut untuk menstabilkan pipa terhadap gerakan yang disebabkan oleh gaya-gaya di laut. Teknik konstruksi seperti itu cenderung lebih sulit, memakan waktu dan relatif mahal.

Sebaliknya, fleksibilitas dan keuletan HDPE memungkinkannya beradaptasi dengan dasar sungai dan laut yang tidak terkonsolidasi. Dengan memilih pipa HDPE, banyak proyek telah dicapai yang tidak akan terjadi realistis ekonomis dengan bahan perpipaan konvensional (beton, besi, etc). Semakin rendah biaya keseluruhan instalasi perpipaan, memungkinkan opsi menginstal beberapa konstruksi kecil lainnya. Hal ini menghasilkan instalasi yang lebih mudah dan lebih murah serta dalam sistem perpipaan terendam pipa HDPE mampu memberikan layanan yang sangat andal dan tahan lama. Instalasi pipa laut mungkin melibatkan risiko yang cukup besar untuk pipa baik selama instalasi dan saat dalam pelayanan. Sehingga, analisis stabilitas pipa terhadap gaya-gaya lingkungan yang bekerja mesti diutamakan.

2. Pemberat pipa HDPE

Sebagian besar instalasi laut, pipa HDPE hanya perlu cukup berbobot untuk menyimpannya di lokasi yang diinginkan dan untuk mencegahnya mengambang. Bobot pipa HDPE relatif ringan, untuk memberikan bobot tambahan pada pipa tersebut biasanya digunakan pemberat tambahan. Umumnya pemberat tersebut terbuat dari beton dan dibuat menyelimuti pipa ataupun berjarak (blok-blok), dengan bentuk yang bervariasi sesuai kebutuhan (simetris atau asimetris). Untuk mencegah keretakan pemberat saat instalasi pipa HDPE, biasanya pemberat terbuat dari beton bertulang.

Pemberat dapat dibuat dalam berbagai bentuk, meskipun desain simetris seperti bulat, persegi, atau heksagonal lebih baik untuk menghindari puntiran selama perendaman. Pemberat beralas datar lebih baik jika pipa cenderung mengalami arus, pasang surut, atau gaya gelombang yang signifikan karena membantu mencegah gerakan puntir pada pipa. Berikut ini adalah salah satu contoh bentuk pemberat pipa HDPE bawah laut:



Grafik 2.1 Salah satu bentuk pemberat pipa HDPE bawah laut (Plastic Pipe)

2.4 Pipa Laut (Offshore Pipeline)

1. Pendahuluan

Upaya pertama membangun pipa untuk mengalirkan minyak dengan gravitasi dilakukan di Pennsylvania menggunakan pipa yang terbuat dari kayu. Kemudian pada 1863 dipergunakan pipa yang terbuat dari besi tuang, namun kemudian ditinggalkan karena terlalu banyak kebocoran. Pada 1865 dipergunakan besi tempa untuk mengatasi

masalah kebocoran pada besi tuang. Dengan penggunaan *pipeline* maka biaya transportasi berkurang menjadi seperlima, dan kemudian semakin banyak *pipeline* dibangun. Sejarah *offshore pipeline* mengikuti sejarah pengembangan penambangan hidrokarbon dilepas pantai yang berkembang pada akhir 1940-an. Sampai sekarang *pipeline* berukuran 1 inci (25 mm) sampai 56 inci (1.422 mm) telah dipasang pada kedalaman 0 sampai 600 meter. Umumnya diameter pipa laut adalah dari 31/2 inci (89 mm) sampai 54 inci (1.372 mm), dan kadang-kadang sampai 72 inci (1.829 mm). Diseluruh dunia ukuran diameter pipa masih menggunakan satuan inci karena teknologi pipa laut berkaitan erat dengan sejarah industri minyak Amerika Serikat. Di Indonesia, pemasangan pipa gas (laut) yang pertama antara lain adalah sumur Parigi (Laut Jawa) ke Cilamaya sepanjang 42 km dengan diameter 24" pada tahun 1975. (Soegiono, 2007)

Pipa yang diletakkan di dasar laut mendapat beban fluida baik gelombang maupun arus yang *steady*. Untuk daerah-daerah dasar laut yang bisa menyebabkan kerusakan pipa terjadi akibat gerak vertikal dan lateral pipa, maka menjadi persyaratan agar berat pipa cukup untuk menjamin stabilitas dalam keadaan lingkungan yang paling buruk. Berat ini dibuat dengan pemasangan *concrete weight coating* pada pipa. Dalam beberapa keadaan pipa masih boleh bergerak secara lateral akan tetapi tidak melampaui batas tegangan atau regangan (*stress* or *strain*). (Soegiono, 2007)

2. Gaya-gaya lingkungan yang bekerja pada pipa (F)

Stabilitas pipa bawah laut meliputi stabilitas dalam dua arah yaitu arah vertikal dan horizontal. Stabilitas ini diperhitungkan terhadap gaya yang diterima oleh pipa yang berasal dari gaya-gaya lingkungan (hidrostatik dan hidrodinamis) yang bekerja pada pipa dan resistensi tanah di dasar laut.

Gaya-gaya lingkungan tersebut terdiri dari gaya hidrostatik (gaya apung (F_B)), gaya hidrodinamis (gaya seret (F_D), gaya inersia (F_i), gaya angkat (F_L) dan gaya gesek (F_r)). Gaya hidrodinamis ini dipengaruhi oleh kedalaman dan gelombang laut, sedangkan gaya gesek (F_r) dipengaruhi oleh resistensi tanah di dasar laut.

a. Gaya statis (Hidrostatik)

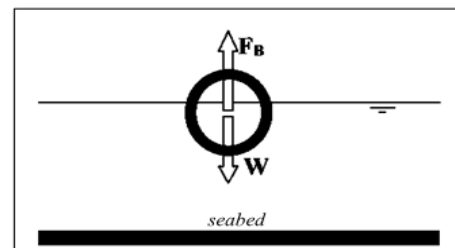
1) Gaya apung (*buoyancy force*), (F_B)

Menurut Hukum Archimedes, jika suatu benda masuk ke dalam fluida akan mendapat gaya ke atas (*buoyancy force*) sebesar volume fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Apabila gaya ke atas/gaya apung (F_B) lebih besar dari berat benda (W) maka benda akan mengapung di permukaan fluida. Apabila sama ($F_B = W$) maka benda akan melayang di dalam fluida dan apabila lebih kecil ($F_B < W$) benda akan tenggelam. Gaya apung pipa didapatkan dengan mengalikan volume tabung pipa dengan massa jenis fluida di luar pipa, lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan berikut ini:

$$F_B = V_P \times \rho_w \quad (2-1)$$

dengan,

- F_B = Gaya apung pipa, kg/m
- V_P = Volume tabung pipa, m^3/m
- ρ_w = Massa jenis fluida di luar pipa, kg/m^3



Gambar 2. 1 Ilustrasi gaya apung dan berat pipa yang berada di dalam fluida (Anonim)

2) Berat kering pipa (W_P)

Berat kering pipa diperoleh dengan mengalikan volume dinding pipa (V_{DP}) dengan massa jenis pipa (ρ_P). Volume pipa yang dihitung ialah volume pipa per meter panjang (m^3/m). Berikut ini persamaan yang

digunakan untuk menghitung berat kering pipa:

$$W_P = V_{DP} \times \rho_P \quad (2-2)$$

dengan,

W_P = Berat kering pipa, kg/m

V_{DP} = Volume dinding pipa, m³/m

ρ_P = Massa jenis pipa, kg/m³

3) Bobot terendam pipa yang diperlukan (W_S)

Bobot terendam (*submerged weight*) pipa merupakan bobot yang diperlukan pipa untuk dapat tenggelam, dapat juga diartikan sebagai bobot pipa di dalam air yang diperlukan agar pipa dapat stabil tenggelam di dasar laut. Bobot terendam pipa yang diperlukan dipengaruhi oleh gaya ke atas atau gaya apung (*buoyancy force* (F_B)) pipa. Bobot terendam pipa merupakan dasar untuk merencanakan bobot pemberat yang diperlukan oleh pipa.

Berikut ini merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung bobot terendam pipa yang diperlukan (W_S):

$$W_S = W_P - F_B \quad (2-3)$$

dengan,

W_S = Berat terendam pipa yang diperlukan, kg/m

W_P = Berat kering pipa, kg/m

F_B = Gaya apung, kg/m

b. Gaya dinamis (Hidrodinamis)

Secara konsep, bobot terendam pipa atau bobot pipa di dalam air yang diperlukan harus lebih besar daripada gaya-gaya yang bekerja pada pipa. Agar stabilitas pipa saat berada di dasar laut dapat terjamin selama masa operasional atau masa layannya. Karena, suatu benda yang berada di dalam fluida yang bergerak (fluida mengalir/*hidrodinamik*) akan mendapat gaya-gaya akibat gerakan fluida tersebut. Gaya-gaya *hidrodinamika* tersebut adalah gaya seret (*drag force*), gaya inersia (*inertia force*), gaya angkat (*lift force*). Gaya-gaya ini memberikan dampak yang mengakibatkan pipa dapat mengalami pergeseran/perpindahan posisi semula dan

mengakibatkan pipa berpotensi mengalami kegagalan struktur (*buckling*).

1) Gaya seret (*drag force*), (F_D)

Gaya seret adalah gaya hambat yang bekerja dalam arah horizontal (searah terhadap aliran). Gaya seret terjadi karena adanya gesekan antara fluida dengan dinding pipa atau yang dikenal sebagai *skin friction* dan adanya *vortex* yang terjadi dibelakang pipa. Sketsa terjadinya gaya friksi pada pipa dapat dilihat pada gambar 2.3, terjadinya gaya seret sangat terpengaruh oleh kecepatan aliran. Berdasarkan Mousselli A. H., (1981), nilai dari gaya seret didapatkan melalui persamaan sebagai berikut:

$$(2-4)$$

dengan,

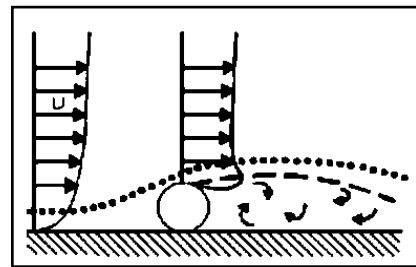
F_D = Gaya seret, N/m

C_D = Koefisien gaya seret, *tak berdimensi*

ρ = Masa jenis fluida, kg/m³

D = Diameter luar pipa, m

U_e = Kecepatan efektif partikel air, m/det



Gambar 2.3 Sketsa terjadinya gaya seret (F_D) pada pipa (Anonim)

2) Gaya inersia (*Inertial force*), (F_I)

Gaya inersia yang terjadi pada struktur silinder (pipa) diakibatkan oleh perubahan/perpindahan massa fluida/air yang disebabkan oleh keberadaan pipa. Gaya inersia menunjukkan adanya massa fluida yang dipindahkan oleh pipa, nilainya dipengaruhi oleh percepatan partikel air. Sehingga gaya inersia juga dapat diartikan sebagai gaya yang disebabkan oleh percepatan partikel air. Menurut Mousselli, A. H., (1981) nilai gaya inersia yang terjadi

pada suatu pipa dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$F_I = \rho C_M (\pi D^2/4) (du/dt) \quad (2-5)$$

dengan,

$$du/dt = \frac{g \pi H}{L} \frac{\cosh [2 \pi (z + d)/L]}{\cosh (2 \pi d/L)} \sin \left(\frac{-2 \pi t}{T} \right) \quad (2-6)$$

dengan,

F_I = Gaya inersia, N/m

C_M = Koefisien gaya inersia ($C_M = 1,5 - 2,5$), tak berdimensi

du/dt = Percepatan partikel air, m/det

H = Tinggi gelombang, m

L = Panjang gelombang, m

T = Periode gelombang, m

g = Percepatan gravitasi, m/det²

z = Koordinat partikel air yang ditinjau terhadap muka air diam, m

D = Diameter luar pipa, m

3) Gaya angkat (*Lift force*), (F_L)

Gaya angkat adalah gaya hidrodinamis dalam arah vertikal, gaya ini terjadi apabila terdapat konsentrasi *streamline* pada pipa. Konsentrasi *streamline* terjadi di atas silinder pipa yang mengakibatkan gaya angkat ke atas. Jika terjadi celah sempit antara silinder dan *seabed*, konsentrasi *streamline* di bawah silinder pipa akan mengakibatkan gaya angkat *negative* kearah bawah. Berdasarkan Mousselli, A. H., (1981) nilai gaya angkat ini didapatkan melalui persamaan berikut:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2 \quad (2-7)$$

dengan,

F_L = Gaya angkat (*lift force*), N/m

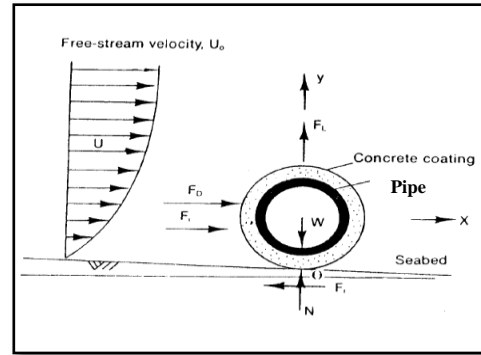
C_L = Koefisien gaya angkat, tak berdimensi

ρ = Masa jenis fluida, kg/m³

D = Diameter luar pipa, m

U_e = Kecepatan efektif partikel air, m/det

Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada pipa saat berada di dasar laut dapat dilihat pada gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.6 Gaya-gaya hidrodinamis pada pipa bawah laut (Mousselli, A. H., 1981)

3. Stabilitas pipa bawah laut (On-bottom stability)

Kestabilan pipa di dasar laut, baik kestabilan arah vertikal maupun horizontal, sangat dipengaruhi oleh berat *pipeline* di dalam air pada saat kondisi statis dan dinamis, serta resistensi tanah di dasar laut. Kestabilan ini diperhitungkan terhadap gaya-gaya lingkungan yang bekerja pada pipa, gaya-gaya tersebut adalah gaya apung/*buoyancy force* (F_B) pada kondisi statis, sedangkan pada kondisi dinamis adalah gaya inersia/*inertia force* (F_I), gaya seret/*drag force* (F_D) dan gaya angkat/*lift force* (F_L).

Sedangkan resistensi permukaan dasar laut merupakan gaya gesek (F_f) antara pipa dengan permukaan tanah laut/*seabed*. Gaya seret, gaya gesek dan gaya inersia adalah gaya yang secara bersama-sama bekerja dalam arah horizontal/lateral pipa, sedangkan gaya angkat dan gaya apung bekerja secara vertikal, kedua gaya ini adalah gaya yang mengurangi berat pipa dalam air yang mempengaruhi kestabilan pipa. gaya vertikal tersebut di analisis berdasarkan kondisi gaya yang berbeda, gaya apung dianalisis berdasarkan kondisi gaya statis sedangkan gaya angkat berdasarkan kondisi gaya dinamis.

1) Kontrol stabilitas gaya statis

Kontrol stabilitas statis pipa digunakan untuk memastikan bobot pipa cukup untuk menjaga pipa agar tidak mengapung di dalam air. Sehingga, pipa

memiliki bobot yang cukup untuk stabil tenggelam di dasar laut. Persamaan yang menjadi parameter kestabilan tersebut menurut DNV RP F109 adalah:

$$\gamma \cdot \frac{F_B}{W_S + F_B} = \frac{\gamma_w}{s_g} \leq 1.00 \quad (2-8)$$

dengan.

$$s_g = (W_S + F_B) / F_B \quad (2-9)$$

keterangan:

S_g : Kerapatan spesifik pipa, *tak berdimensi*

γ_w : Faktor keamanan, (digunakan nilai $\gamma_w = 1,1$)

W_S : Bobot terendam pipa yang diperlukan, kg/m

Apabila nilai γ_w/S_g lebih besar dari 1,00 maka berat pipa tidak cukup untuk dapat stabil tenggelam di dasar laut. Sehingga kondisi ini mengindikasikan pipa memerlukan pemberat tambahan, dengan memberikan beton pemberat pada pipa. Sehingga, kontrol stabilitas pipa pada kondisi gaya statis ini dilakukan untuk memastikan apakah pipa memerlukan pemberat tambahan atau tidak. Jika pipa memerlukan pemberat tambahan, maka perhitungan kebutuhan pemberat untuk kondisi gaya statis dapat dihitung menggunakan persamaan (2-19) pada pembahasan selanjutnya.

2) Kontrol stabilitas gaya dinamis

Bobot kering beton pemberat harus mampu menahan pipa agar tetap stabil tenggelam saat menerima gaya-gaya hidrodinamik ketika pipa berada di dasar laut. Konstruksi pipa bawah laut harus memenuhi syarat stabilitas berikut:

Stabilitas vertikal:

$$\frac{W_{AD}}{F_L} > FS \quad (2-10)$$

Stabilitas horizontal:

$$\frac{(W_{AD} - F_L)}{(F_D + F_I - F_r)} > FS \quad (2-11)$$

dengan,

FS = *Safety Factor* (Faktor Keamanan), digunakan 1,1.

W_{AD} = Bobot kering pemberat yang diperlukan, kondisi gaya dinamis, kg

4. Penentuan koefisien hidrodinamik

(C_D , C_M , C_L)

Sebelum melakukan perhitungan gaya-gaya hidrodinamika nilai dari koefisien-koefisien hidrodinamik harus ditentukan terlebih dahulu. Mousselli, A. H., (1981) memberikan nilai koefisien gaya seret (C_D) dan gaya angkat (C_L) berdasarkan grafik yang bergantung pada nilai bilangan *Reynolds* (Re) dan koefisien kekasaran pipa (*pipe roughness*) (k). Kemudian nilai dari koefisien hidrodinamika *drag* (C_D) dan *lift* (C_L) dapat ditentukan dengan melihat grafik 2.1 dan 2.2. Sedangkan untuk nilai koefisien inersia (C_M) Mousselli, A. H., (1981) menentukan kisaran nilainya antara 1,5 – 2,5. Berikut ini merupakan persamaan untuk bilangan *Reynolds* (Re) dan koefisien kekasaran pipa (k):

Persamaan bilangan *Reynolds* :

$$Re = \frac{U_e D}{\nu} \quad (2-12)$$

Persamaan koefisien kekasaran pipa:

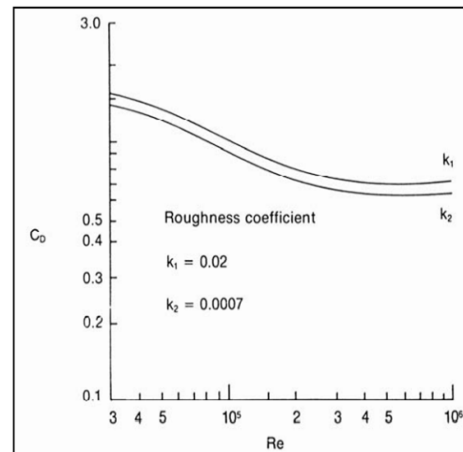
$$k = \frac{e}{D} \quad (2-13)$$

dengan,

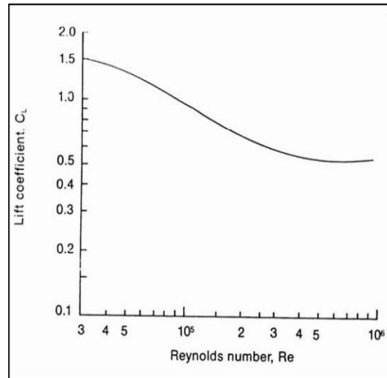
ν = Kekentalan kinematik, m²/det

e = Tinggi kekasaran pipa, *tak berdimensi*

D = Diameter luar pipa, m



Grafik 2.3 Koefisien seret vs Reynolds number (Mousselli, A. H., 1981)



Grafik 2.6 Koefisien angkat vs Reynold number (Mousselli, A. H., 1981)

2.5 Gelombang

1. Pendahuluan

Gelombang adalah gejala rambatan dari suatu getaran/usikan, gelombang akan terus terjadi apabila sumber getaran ini bergetar terus menerus. Gelombang membawa energi dari satu tempat ke tempat lainnya. Sedangkan Gelombang laut adalah pergerakan naik dan turunnya air laut secara tegak lurus dengan permukaan air laut dan membentuk kurva/grafik sinusoidal (Holthuijsen, 2007).

Gelombang laut timbul akibat adanya gaya pembangkit yang bekerja pada laut. Gelombang yang terjadi di lautan dapat di klasifikasikan menjadi beberapa macam berdasarkan gaya pembangkitnya. Gaya pembangkit tersebut terutama berasal dari angin, gaya tarik menarik bumi-bulan-matahari atau yang di sebut dengan gelombang pasang surut dan gempa bumi (Nichols et al., 2009). Gelombang merupakan faktor yang penting dalam pelayanan informasi meteorologi kelautan (*marine meteorological services*). Pada umumnya gelombang laut dibangkitkan oleh angin (*sea wave*) sehingga sifat-sifat gelombang tertentu dipengaruhi oleh angin, misalnya semakin kencang atau tinggi kecepatan angin maka kecepatan dan panjang gelombang semakin besar (Azis, 2006).

Menurut BMKG, ada beberapa kriteria tingkat bahaya gelombang laut yaitu

1,25 – 2 meter berbahaya bagi perahu nelayan, 2-3 meter berbahaya bagi perahu nelayan dan tongkang, 3-4 meter berbahaya bagi perahu nelayan, tongkang dan kapal feri, diatas 4 meter berbahaya bagi semua kapal. Gelombang yang menjalar dari laut dalam menuju pantai mengalami perubahan bentuk karena adanya pengaruh perubahan kedalaman laut. Pengaruh kedalaman laut mulai terasa pada kedalaman kecil dari setengah kali panjang gelombang. Di laut dalam profil gelombang adalah sinusoidal, semakin menuju ke perairan yang lebih dangkal puncak gelombang semakin tajam dan lembah gelombang semakin datar. Selain itu kecepatan dan panjang gelombang berkurang secara berangsur-angsur sementara tinggi gelombang bertambah.

Gelombang juga dapat dibedakan menurut gaya pembangkitnya, salah satu gelombang tersebut adalah gelombang angin yang dapat dibangkitkan oleh tiupan angin di permukaan. Gelombang angin dapat menimbulkan energi untuk membentuk pantai, menimbulkan arus dan angkutan sedimen dalam arah tegak lurus dan sepanjang pantai, serta menyebabkan gaya-gaya yang bekerja pada bangunan pantai. Jaringan pipa yang terletak di dasar laut adalah objek yang dikenai gaya gelombang dan arus baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Ketika beban yang diterima cukup besar, maka gaya tersebut akan dapat membuat pipa tidak stabil terhadap pergerakan vertikal maupun lateral. Pipa bawah laut akan dikatakan stabil apabila pipa dapat menahan gaya yang bekerja dalam arah vertikal maupun horizontal yang di sebabkan oleh gaya gelombang dan arus.

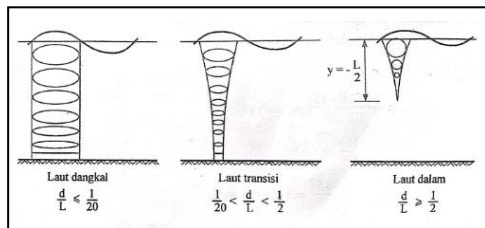
2. Klasifikasi gelombang menurut kedalaman relatif

Dalam proses disain pipa bawah laut data lingkungan yang dipakai adalah data gelombang dan data arus laut. Gelombang yang bergerak pada permukaan air akan memberikan percepatan pada patikel air

yang dilaluinya. Pergerakan partikel air yang terjadi akan membentuk orbit, selama penjalaran gelombang dari laut dalam menuju laut dangkal, orbit partikel ini akan mengalami perubahan bentuk seperti pada gambar 2.6 di bawah ini. Orbit perpindahan partikel berbentuk lingkaran pada seluruh kedalaman pada laut dalam sedangkan di laut transisi dan dangkal lintasan partikel akan mengalami perubahan bentuk menjadi elips, semakin dangkal kedalamannya bentuk elips ini semakin pipih dan di dasar gerak partikel adalah horizontal.

Gelombang menjar dari laut dalam menuju laut dangkal, hal ini akan mempengaruhi kecepatan dan panjang gelombang. Berdasarkan kedalaman relatif, yaitu perbandingan antara kedalaman air (d) dan panjang gelombang (L), gelombang dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- Gelombang di laut dangkal, jika ; $d/L \leq 1/20$
- Gelombang di laut *intermediet*, jika ; $1/20 \leq d/L \leq 1/2$
- Gelombang di laut dalam, jika ; $d/L \geq 1/2$

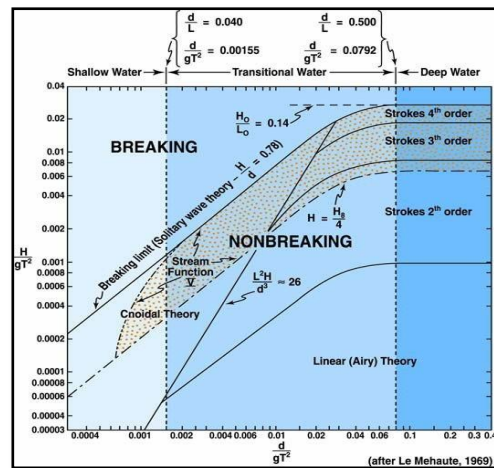


Gambar 2.9 Gerak orbit partikel zat cair di laut dangkal, transisi dan dalam (Triatmodjo, B., 1999)

Terjadinya gelombang seperti yang telah dijelaskan di atas akan mempengaruhi kecepatan dan percepatan partikel air, oleh karena itu perhitungan panjang gelombang, kecepatan dan percepatan juga didekati dengan sesuai jenis perairannya. Dengan mengetahui panjang gelombang pada perairan dalam, maka dapat dihitung panjang gelombang untuk perairan dengan kedalaman yang lain.

3. Grafik wilayah validitas teori gelombang

Untuk dapat menghitung kecepatan partikel air yang disebabkan oleh gelombang, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan teori yang sesuai untuk menghitung kecepatan tersebut. Penentuan teori ini ditentukan dengan menghitung nilai d/gT^2 dan H/dT^2 kemudian memasukkan nilai tersebut ke dalam gambar berikut ini yang merupakan grafik wilayah validitas teori gelombang menurut Dean dan Mehaute, Le (1970):



Gambar 2.12 Grafik wilayah validitas teori gelombang (Mehaute, L., 1969)

4. Teori Gelombang Stokes

Pada umumnya bentuk gelombang di alam adalah sangat kompleks dan sulit digambarkan secara matematis karena ketidak-linieran, tiga dimensi dan mempunyai bentuk yang random (suatu deret gelombang mempunyai tinggi dan periode berbeda). Beberapa teori yang ada hanya menggambarkan bentuk gelombang yang sederhana dan merupakan pendekatan gelombang alam. Ada beberapa teori dengan derajat kekompleksan dan ketelitian untuk menggambarkan gelombang di alam, diantaranya adalah teori gelombang Airy, Stokes, Gerstner, Mich, Knoidal dan Tunggal. Masing-masing teori tersebut mempunyai batasan keberlakuan yang berbeda. Teori gelombang Airy merupakan

gelombang amplitude kecil, sedangkan teori yang lain adalah gelombang amplitude terbatas (finite amplitude waves). (Triatmodjo, B. 1999)

Teori gelombang Stokes adalah salah satu dari teori gelombang amplitude terbatas/hingga yang memperhitungkan besaran dengan orde yang lebih tinggi daripada teori gelombang amplitude kecil (Airy). Teori gelombang Stokes memberikan persamaan untuk perhitungan kecepatan partikel air (U), panjang gelombang (L) dan cepat rambat gelombang (c) seperti berikut ini:

a. Cepat rambat gelombang (c)

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai cepat rambat gelombang untuk teori gelombang Stokes yang diberikan oleh Chakrabarti (2005), adalah sebagai berikut:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (2-14)$$

dengan,

c = Cepat rambat gelombang, m/det
 T = Periode gelombang, det
 g = Percepatan gravitasi, m/det²
 d = Kedalaman dasar laut, m
 k = Angka gelombang ($k = 2\pi/L$), *tak berdimensi*
 L = Panjang gelombang, m

b. Panjang gelombang (L)

Khusus untuk perhitungan nilai L, untuk mendapatkan nilai L yang akurat penulis memutuskan untuk menghitungnya menggunakan cara. Cara pertama ialah menggunakan tabel fungsi d/L untuk penambahan nilai d/L₀ (lihat lampiran). Cara ini diberikan oleh Triatmodjo, B (1999) pada bukunya “Teknik Pantai” pada contoh 1 dan beberapa contoh perhitungan lainnya. Cara ini dirasa lebih efektif ketimbang menggunakan cara kedua yaitu dengan menghitung nilai L menggunakan persamaan (2-16). Karena pada beberapa kasus perhitungan cara tersebut memerlukan proses perhitungan iterasi yang relatif panjang. Akan tetapi, pada penelitian ini

penulis akan memanfaatkan fitur dari Microsoft Excel untuk melakukan perhitungan dengan cara kedua (Iterasi). Fitur tersebut ialah “goal seek” atau iterasi, sehingga kesulitan yang dipaparkan sebelumnya dapat di atasi. Nilai L diambil dari nilai rata-rata dari hasil perhitungan nilai L berdasarkan kedua cara tersebut, sehingga didapatkan nilai L yang akurat. Berikut ini merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai panjang gelombang (L) yang diberikan oleh Triatmodjo, B (1999):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2-15)$$

dengan,

L = Panjang gelombang, m
 L₀ = Panjang gelombang di laut dalam ($L_0 = 1,56T^2$)
 T = Periode gelombang, det
 g = Percepatan gravitasi, m/det²
 d = Kedalaman dasar laut, m

c. Kecepatan partikel air pada teori gelombang Stokes orde-2 (U)

Komponen kecepatan partikel dalam arah x dan y mempunyai bentuk persamaan berikut yang diberikan oleh Chakrabarti (2005):

$$u = \frac{\pi H \cosh ks}{T \sinh kd} \cos(kx - \omega t) - \frac{3}{4c} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2-16)$$

dengan,

U = Kecepatan horizontal partikel air, m/det
 k = Angka gelombang, ($k = 2\pi/L$)
 s = Kordinat partikel air yang ditinjau ($s = d + y$), m
 d = Jarak antara muka air rerata dan dasar laut (kedalaman dasar laut), m
 H = Tinggi gelombang, m
 T = Periode gelombang, det
 x = Kordinat horizontal partikel air terhadap muka air diam ($x = L / 2$), m
 y = Kordinat vertikal partikel air terhadap muka air diam ($y = 1 - d$), m
 ω = Frekuensi gelombang, ($\omega = 2 \pi/T$)

L = Panjang gelombang (jarak antara dua puncak gelombang yang berurutan), m

C = Cepat rambat gelombang, m/det

t = waktu, det

5. Kecepatan efektif partikel air (U_e)

Mousselli, A. H. (1981), memberikan persamaan yang digunakan untuk menghitung kecepatan efektif partikel air (U_e) sebagai berikut:

$$U_e^2 = 0,778 \times U_o^2 \times (D/y_o)^{0,286} \quad (2-17)$$

dengan,

U_e = Kecepatan efektif partikel air, m/det

U_o = Kecepatan maksimal partikel air, m/det (kecepatan partikel air pada $y = y_o$ dan $t = 0$)

y_o = Kordinat vertikal partikel air pada kedalaman 1 meter dari dasar laut ($y = 1$ m)

2.6 Beton

1. Pengertian beton

Beton adalah material yang telah banyak digunakan sebagai bahan konstruksi. Bahan tersebut diperoleh dengan cara mencampurkan tiga komponen dasar yaitu semen *portland*, agregat dan air. Selain itu, ada sejumlah bahan lainnya yang disebut *additivies*, yang ditambahkan untuk memperoleh perlakuan khusus (Kett, 2000).

Secara sederhana, beton dibentuk oleh pengerasan campuran antara semen, air, agregat halus (pasir) dan agregat kasar (batu pecah atau kerikil). Kadang-kadang ditambahkan pula campuran bahan lain (*admixture*) untuk memperbaiki kualitas beton. Campuran dari bahan susun (semen, pasir, batu pecah dan air) yang masih plastis ini dicor ke dalam acuan dan dirawat untuk mempercepat reaksi hidrasi campuran semen, air yang menyebabkan pengerasan beton. Campuran antara semen dan air akan membentuk pasta semen, yang berfungsi sebagai bahan ikat.

Sedangkan pasir dan kerikil merupakan bahan pengisi dan sekaligus sebagai bahan yang diikat oleh pasta semen. Ikatan antara

pasta semen dengan agregat ini menjadi satu kesatuan yang kompak dan akhirnya dengan berjalannya waktu akan menjadi keras serta padat yang disebut beton (Asroni, 2010). Beton adalah bahan yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi, bila dibuat dengan perbandingan campuran yang baik kuat tekannya akan menyamai batuan alam (Tjokrodimuljo, 1996).

2. Kebutuhan beton pemberat (W)

a. Kebutuhan beton pemberat, kondisi gaya statis (W_{AS})

Pipa HDPE memiliki berat jenis (958 kg/m³) lebih kecil dari pada berat jenis air laut (1025 kg/m³). Meskipun pipa ini terisi penuh dengan air tetap akan mengapung sehingga memerlukan pemberat supaya tetap stabil berada di dasar laut. Karno (2016: 13), memberikan persamaan untuk menghitung bobot kering pemberat yang diperlukan oleh pipa sebagai berikut:

$$W_{AS} = \frac{0,85(\rho_w V - W_P)}{1 - \frac{\rho_w}{\rho_c}} \quad (2-18)$$

dengan,

W_{AS} = Bobot kering minimal pemberat, kondisi gaya statis, kg

ρ_w = Massa jenis air di luar pipa, kg/m³

ρ_c = Massa jenis air di dalam pipa, kg/m³

V = Volume tabung pipa, m³/m

W_P = Berat kering pipa, kg/m

b. Kebutuhan beton pemberat, kondisi gaya dinamis (W_{AD})

Karno (2016:34), menggunakan persamaan berikut untuk menghitung kebutuhan bobot pemberat yang diperlukan oleh pipa (W_{AD}) pada kondisi dinamis:

$$W_{AD} = 110\% \times \Sigma F \times L \quad (2-19)$$

dengan,

W_{AD} = Bobot kering pemberat, kondisi gaya dinamis, kg

ΣF = Total gaya dinamis (F_D, F_L, F_I), N/m

L = Jarak antar pemberat, m

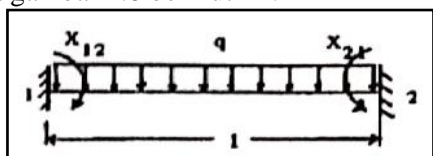
Meninjau persamaan (2-19) diatas, angka 110% tersebut merupakan angka yang mengakumulasikan kebutuhan bobot

pemberat pipa pada saat gaya dinamis. Angka tersebut berupa asumsi penulis dengan pertimbangan bahwa jumlah tersebut dapat memberikan nilai bobot pemberat pipa 10% lebih besar dari yang diperlukan. Pada prakteknya, bobot pemberat dengan biaya konstruksi yang lebih murah lebih disukai daripada yang lebih mahal. Sehingga, pemilihan angka tersebut (110%) sudah tepat karna syarat stabilitas dan efisiensi biaya konstruksi dapat terpenuhi.

2.7 Statika

Persamaan statika, menyatakan suatu batang struktural akan diam apabila dalam keadaan seimbang, artinya gaya-gaya yang bekerja pada batang itu resultannya sama dengan nol ($R = 0$). Maksudnya tidak hanya jumlah gaya-gaya vertikal dan horizontal saja yang nol, tetapi juga jumlah momen-momen terhadap titik manapun harus nol pula (Umar, 2009).

Bila suatu batang mengalami pembebanan dari luar yang bekerja sejajar sumbu batang tersebut, maka di dalam batang tersebut akan timbul gaya-gaya lawan yang dihasilkan oleh gaya antar molekul itu sendiri. Gaya-gaya yang timbul di dalam batang ini secara umum adalah: Gaya Normal, dengan arah tegak lurus penampang batang. Dengan menganggap bahwa gaya-gaya yang timbul ini terbagi rata pada seluruh luas penampang, maka gaya-gaya yang bekerja pada suatu luasan penampang, disebut dengan (σ), yaitu perbandingan antara gaya (F) yang bekerja pada suatu batang dengan luasan penampang (A) batang tersebut, apabila sebuah batang dibebani dengan beban merata (q) seperti pada gambar 2.8 berikut ini:



Gambar 2.15 Suatu batang dengan kondisi beban terbagi merata (Anonim)

Gambar 2.8 tersebut memberikan gambaran arah momen lengkung yang terjadi pada sebuah batang ketika diberikan beban merata (q). Momen lengkung (M_{max}) tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\left. \begin{aligned} X_{12} &= (1/12) q l^2 \\ X_{21} &= -(1/12) q l^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-20)$$

dengan,
 X_{12} : Momen lengkung atau momen maksimal (M_{max}), kg.m

q : Beban merata, kg/m

L : Panjang bentang, m

Untuk keperluan analisis tegangan maksimum pipa, diperlukan nilai momen maksimal tersebut dan nilai momen lawan dari pipa. Dengan asumsi sebuah batang sederhana sebagai pipa, nilai tegangan maksimum pipa atau tegangan lengkung pipa (σ_b) dari suatu batang dapat diperoleh dengan terlebih dahulu menentukan nilai momen lawan yang terjadi pada batang. Momen lawan tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$W_x = W_y = \frac{\pi t d^2}{4}$$

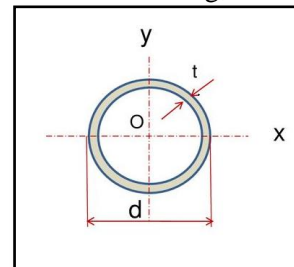
(2-21)

dengan,

W : Momen lawan, m^3

t : Tebal batang, m

d : diameter luar batang, m



Gambar 2.18 Potongan melintang sebuah batang silinder berongga (Anonim)

Dengan membandingkan antara momen lengkung/momen maksimal (M_{max}) dengan momen lawan (W) yang terjadi, maka diperoleh tegangan lengkung/bengkok (σ_b) yang terjadi pada suatu batang tersebut dalam hal ini batang adalah pipa. Kemudian

selanjutnya besaran tegangan tersebut digunakan untuk dibandingkan dengan tegangan ijin dari pipa HDPE (σ_a) sebesar 20 MPa untuk dijadikan sebagai batasan perhitungan jarak antar pemberat pipa HDPE. Tegangan lengkung (σ_b) tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_b = M_{\max} / W \quad (2-22)$$

dengan,

σ_b : Tegangan lengkung pipa, MPa

M_{\max} : Momen maksimal, kgm

W : Momen lawan, m^3

III METODE PENELITIAN

3.1 Prosedur Penelitian

3.1.1 Pengumpulan data

Untuk keperluan analisis, dibutuhkan sejumlah data yang harus dilengkapi, adapun data-data yang digunakan dalam penyusunan dokumen usulan tugas akhir ini antara lain:

1. Data propertis pipa
2. Data gelombang
3. Data pendukung

3.1.2 Analisis data

Analisis data jarak dan bobot beton pemberat pipa HDPE PE 100 SDR 11/PN 16 yang selanjutnya disebut PE-01 (DN 250), PE-02 (DN 500) dan PE-03 (DN 800), dilakukan dengan 3 (tiga) tahapan yaitu pertama menganalisis jarak dan bobot pemberat pada saat pipa menerima gaya statis (analisis stabilitas gaya statis) dan kedua menganalisis jarak dan bobot pemberat pada saat pipa menerima gaya dinamis. Tahap terakhir adalah analisis optimasi jarak dan bobot blok beton pemberat berdasarkan dari hasil analisis tahap 1-2, untuk mendapatkan jarak dan

bobot optimal blok beton pemberat pipa PE-01, PE-02 dan PE-03.

1. Analisis stabilitas gaya statis

Analisis jarak dan bobot pemberat pada kondisi gaya statis dilakukan untuk mengetahui jarak maksimal dan bobot minimal dari beton pemberat yang dibutuhkan oleh pipa, sehingga pipa dapat stabil tenggelam atau berada di dasar laut saat menerima gaya statis selama masa layannya. Berikut ini merupakan urutan langkah melakukan analisis tersebut:

- a. Langkah pertama, adalah menentukan data propertis pipa dan data lainnya yang akan digunakan untuk melakukan analisis.
- b. Langkah ke-dua, menghitung bobot terendam pipa yang diperlukan (W_s). Nilai tersebut didapatkan dengan terlebih dahulu menghitung nilai berat kering pipa (W_p) dan nilai gaya apung (F_B) pipa. W_p dapat dicari menggunakan persamaan (2-2) dan F_B dicari menggunakan persamaan (2-1). Kemudian setelah mendapatkan nilai W_p dan F_B , selanjutnya mengecek kriteria pipa. Kriteria pipa antara lain mengapung ($W_p < F_B$), melayang ($W_p = F_B$) dan tenggelam ($W_p > F_B$). Kemudian, nilai W_s dapat dihitung dengan mengurangi nilai W_p dengan nilai F_B ($W_p - F_B$). Nilai W_s yang bernilai negatif menandakan pipa tidak memiliki berat yang cukup untuk dapat tenggelam ($W_p < F_B$) atau pipa mengapung di air, sehingga pipa membutuhkan berat tambahan (beton pemberat).
- c. Langkah ke-tiga, melakukan kontrol stabilitas pipa dengan mengecek nilai

(γ_w/S_g) terhadap faktor keamanan (FS) dengan nilai FS sama dengan 1,00. Hal ini dilakukan untuk memastikan apakah pipa membutuhkan pemberat tambahan atau tidak. Pipa akan stabil apabila nilai $(\gamma_w/S_g) \leq 1,00$, jika sebaliknya maka pipa tidak stabil yang berarti bahwa pipa tersebut memerlukan berat tambahan. Berat tambahan ini dapat diperoleh dengan memberikan pemberat pada pipa dan umumnya pemberat ini terbuat dari beton.

d. Langkah ke-empat, menghitung jarak maksimal antar blok beton pemberat (L). L ditentukan dengan mencari nilai tegangan lentur pipa (σ_b) pada jarak tertentu ($L = \text{trial error}$) hingga mencapai/melebihi tegangan lentur yang diizinkan (σ_a) pipa HDPE, dengan nilai σ_a sama dengan 20 MPa. σ_a merupakan batasan tegangan lentur pipa yang diperbolehkan bagi pipa agar tidak mengalami kegagalan struktur (*buckling*).

Ketika tegangan lentur pipa lebih besar atau sama dengan tegangan lentur yang diizinkan pipa HDPE ($\sigma_b \geq \sigma_a$), maka jarak antar blok beton pemberat telah mencapai jarak maksimal (L_{maks}). Tegangan lentur pipa didapatkan dengan menghitungnya menggunakan persamaan (2-22). M_{max} merupakan momen maksimal pipa, dihitung berdasarkan persamaan (2-20). Dengan nilai beban merata (q) adalah bobot dari $[W_s]$ ($W_{\text{Sabsolute}}$). Sedangkan W merupakan momen lawan dari pipa, yang dihitung berdasarkan persamaan (2-21).

e. Langkah ke-lima, menghitung nilai bobot kering minimal blok beton pemberat yang diperlukan (W_{AS}) oleh pipa. Pada penelitian ini, blok beton pemberat pipa direncanakan dengan memiliki jarak tertentu antar blok beton pemberat (tidak menyelimuti pipa). Maka W_{AS} pada masing-masing jarak memiliki nilai yang berbeda-beda. Berdasarkan teori yang ada, nilai W_{AS} didapatkan dengan menghitungnya menggunakan persamaan (2-18). S adalah notasi untuk jarak antar pemberat, dalam hal ini penulis merubah notasi tersebut menjadi L untuk menyesuaikan dengan notasi yang sudah ada.

f. Selesai.

2. Analisis stabilitas gaya dinamis

Seperti analisis sebelumnya, analisis stabilitas pipa terhadap gaya dinamis juga memiliki tujuan yang sama, yaitu untuk mengetahui jarak maksimal dan bobot minimal dari beton pemberat yang dibutuhkan oleh pipa, sehingga pipa dapat stabil tenggelam atau berada di dasar laut selama masa layannya. Namun, analisis ini meninjau kondisi pipa saat menerima gaya-gaya lingkungan atau gaya dinamis yang terjadi pada saat pipa berada di dasar laut. Berikut ini merupakan urutan langkah melakukan perhitungan tersebut:

a. Langkah pertama, menentukan data-data yang dibutuhkan dalam perhitungan. Data tersebut antara lain data propertis pipa, data gelombang (H, T, d, x, y) dan beberapa data tambahan lainnya. Detail dari data-data

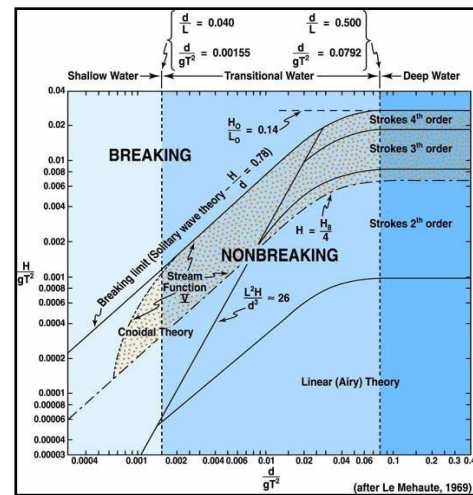
tersebut dapat dilihat pada contoh perhitungan.

b. Langkah ke-dua, menghitung nilai kecepatan maksimal partikel air (U_{maks}) akibat gelombang. Perhitungan tersebut dapat dilakukan dengan menentukan teori gelombang yang sesuai untuk menghitung nilai kecepatan partikel air. Adapun penentuan teori tersebut ditentukan berdasarkan grafik wilayah validitas teori gelombang, grafik tersebut tertera pada gambar 4.1 di bawah ini.

Untuk menggunakan grafik tersebut, terlebih dahulu dicari nilai d/gT^2 dan H/gt^2 . Kemudian menarik garis tegak lurus sumbu grafik, sampai kedua garis bertemu pada titik yang sama dalam area grafik tersebut. Pertemuan garis tersebut merupakan titik yang menentukan teori gelombang yang sesuai untuk menghitung nilai kecepatan partikel air tersebut. Berdasarkan nilai d/gT^2 dan H/gt^2 , penulis menyimpulkan teori gelombang yang digunakan untuk menghitung nilai U_{maks} untuk seluruh variasi kedalaman (d) dan tinggi gelombang (H) ialah teori gelombang stokes orde-2.

Menurut teori tersebut U_{maks} dihitung menggunakan persamaan (2-16). Untuk dapat menghitung U_{maks} menggunakan persamaan tersebut, maka perlu dicari terlebih dahulu parameter persamaan yang belum diketahui. Adapun parameter persamaan tersebut ialah panjang gelombang (L) dan cepat rambat gelombang (C). Nilai C dihitung menggunakan

persamaan (2-14) dan khusus untuk nilai L dihitung menggunakan 2 (dua) cara berbeda. Hal ini sudah diterangkan pada BAB sebelumnya. Adapun persamaan untuk menghitung nilai L adalah menggunakan persamaan (2-15).



Gambar 4.1 Grafik wilayah validitas teori gelombang (Mehaute, L., 1969)

c. Langkah ke-tiga, menghitung kecepatan efektif partikel air (U_e) akibat gelombang menggunakan persamaan (2-17). U_e digunakan untuk mencari angka *Reynolds* (Re) dan juga merupakan parameter persamaan gaya-gaya dinamis khususnya gaya seret (F_D) dan gaya angkat (F_L).

d. Langkah ke-empat, menghitung nilai percepatan partikel air (d_u/d_t) akibat gelombang. Nilai d_u/d_t akan digunakan untuk mencari nilai gaya dinamis khususnya gaya inersia (F_I) yang dialami oleh pipa. Perhitungan d_u/d_t dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-6).

e. Langkah ke-lima, menghitung nilai angka *Reynolds* dengan menggunakan persamaan (2-12). Angka *Reynolds* digunakan untuk menentukan nilai

koefisien gaya dinamis khususnya koefisien gaya seret (F_D) dan koefisien gaya angkat (F_L).

f. Langkah ke-enam, menentukan nilai koefisien gaya-gaya dinamis yaitu koefisien gaya seret (C_D), koefisien gaya angkat (C_L) dan koefisien gaya inersia (C_I). C_D dan C_I ditentukan berdasarkan nilai R_e dan k (koefisien kekasaran pipa). Untuk mendapatkan nilai R_e sudah diuraikan pada langkah sebelumnya, sedangkan nilai k dihitung dengan persamaan (2-13). Berdasarkan persamaan k tersebut, nilai k diperoleh dengan memasukkan nilai D (diameter luar pipa) ke dalam grafik (2.3) sehingga didapatkan nilai e/D . Setelah mendapatkan nilai R_e dan k , nilai C_D dan C_L ditentukan dengan memasukkan nilai R_e dan k ke dalam grafik 2.1 dan 2.2. Sedangkan untuk nilai C_M , Mousselli, A. H. (1981) memberikan kisaran nilai mulai dari 1,5 - 2,5.

g. Langkah ke-tujuh, menghitung nilai gaya-gaya dinamis pada pipa, yaitu gaya seret (F_D), gaya angkat (F_L) dan gaya inersia (F_I). F_D dihitung menggunakan persamaan (2-4), F_L dihitung menggunakan persamaan (2-7) dan F_I dihitung menggunakan persamaan (2-6).

h. Langkah ke-delapan, menghitung jarak antar blok beton pemberat (L) pipa. L tersebut ditentukan dengan mencari nilai tegangan lentur pipa (σ_b) pada jarak tertentu ($L = \text{trial error}$) hingga mencapai tegangan lentur yang diizinkan (σ_a) pipa

HDPE, dengan nilai σ_a sama dengan 20 MPa. Tegangan lentur yang diizinkan (σ_a) merupakan batasan tegangan lentur pipa yang diperbolehkan bagi pipa agar tidak mengalami kegagalan struktur (*buckling*). Ketika tegangan lentur pipa lebih besar atau sama dengan tegangan lentur yang diizinkan pipa HDPE ($\sigma_b \geq \sigma_a$), maka jarak antar blok beton pemberat telah mencapai jarak maksimal (L_{maks}). Tegangan lentur pipa didapatkan dengan menghitungnya menggunakan persamaan (2-22). M_{max} merupakan momen maksimal pipa, dihitung berdasarkan persamaan (2-20). Dengan beban merata (q) merupakan total gaya (ΣF) yang terjadi pada pipa. Sedangkan momen lawan (W) dihitung berdasarkan persamaan (2-21).

Pada kasus ini, penulis memberikan variasi pembebanan terhadap ΣF untuk beban merata (q) yang akan diterapkan dalam perhitungan M_{max} . Hal ini dikarenakan total gaya dinamis (F_D, F_L, F_I) yang sebelumnya telah dihitung memberikan nilai yang acak secara berulang, karna ditinjau berdasarkan variasi kedalaman (d) dan tinggi gelombang (H). Sehingga data yang dihasilkan menjadi sangat banyak dan tidak seragam. Perlu dilakukan simplifikasi terhadap data tersebut untuk mempercepat proses perhitungan dan memberikan keseragaman data yang baik. Variasi pembebanan (q) atau ΣF dapat dilihat pada lampiran.

- i. Langkah ke-sembilan, menghitung bobot pemberat (W_{AD}) yang dibutuhkan oleh pipa. W_{AD} dihitung menggunakan persamaan (2-19).
- j. Langkah ke-sepuluh, kontrol stabilitas vertikal dan horizontal pipa menggunakan persamaan (2-10) dan (2-11).
- k. Selesai.

3. Analisis optimasi jarak dan bobot pemberat

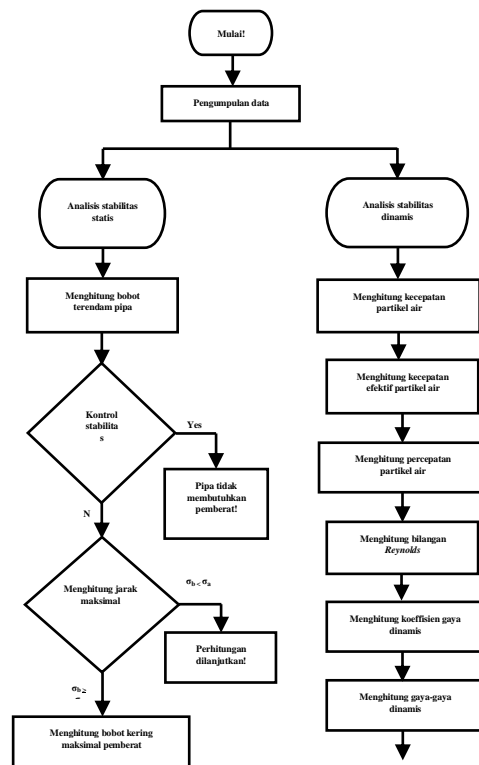
Analisis ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai jarak dan bobot pemberat pipa yang optimal, pada kondisi gaya statis dan dinamis. Jarak dan bobot optimal tersebut merupakan jarak terbesar yang diperbolehkan untuk keperluan perencanaan pipa HDPE bawah laut dan bobot minimal yang diperlukan pada saat pipa menerima gaya statis dan dinamis. Pemberat pipa diharapkan bukan hanya dapat memberikan bobot yang cukup bagi pipa untuk stabil tenggelam di dasar laut. Namun lebih dari itu, pemberat pipa harus dapat menjamin kestabilan pipa terhadap gaya dinamis ketika pipa beroperasi di dasar laut.

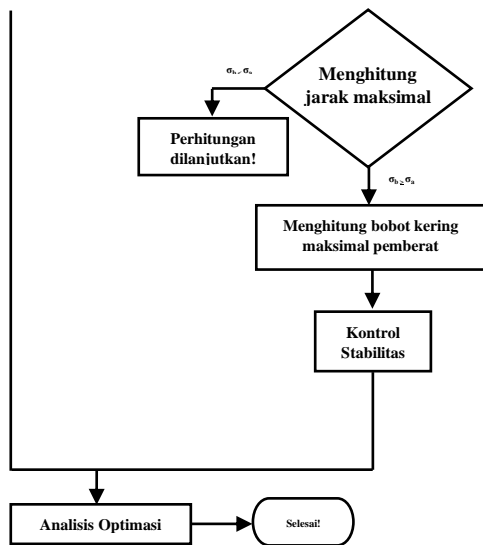
Analisis ini dapat dilakukan dengan cara menggabungkan grafik hasil perhitungan jarak maksimal dan bobot minimal kondisi statis dan dinamis. Penggabungan kedua grafik tersebut akan memberikan titik perpotongan antara dua kurva (statis dan dinamis). Titik perpotongan tersebut merupakan jarak dan bobot optimal pemberat. Pada titik tersebut pipa memiliki bobot yang cukup untuk tidak

terapung dan stabil terhadap gaya dinamis dengan kemampuan menahan gaya dinamis yang variatif tergantung pada gaya dinamis yang ditunjukkan oleh titik perpotongan tersebut. Untuk lebih jelas, dapat dilihat pada BAB selanjutnya.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir merupakan diagram yang digunakan untuk menyampaikan tahapan-tahapan pelaksanaan penelitian. Diagram alir memiliki bentuk yang beragam yang memiliki kategori masing-masing sesuai peruntukannya. Dua bentuk persegi yang paling umum digunakan dalam diagram alir, yaitu persegi panjang yang sering disebut dengan tindakan atau langkah pemrosesan. Belah ketupat disebut dengan keputusan. Berdasarkan uraian pada sub-bab sebelumnya, maka diagram alir dari penelitian ini ialah sebagai berikut:



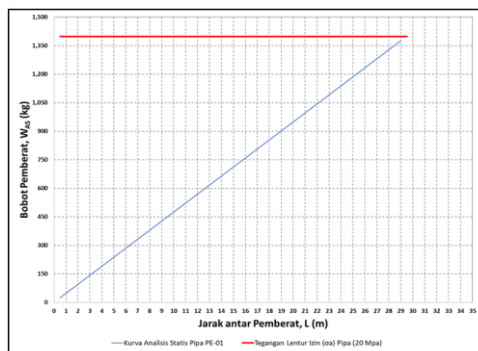


IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Optimasi

4.1.1 Analisis berdasarkan gaya statis

Untuk keperluan analisis, data hasil perhitungan pada tabel 4.3 di atas ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



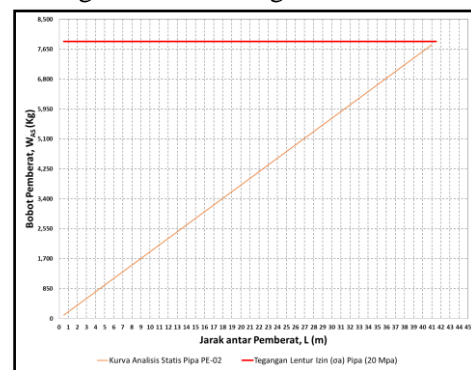
Gambar 4.4 Jarak dan bobot maksimal pemberat pipa PE-01 (Hasil perhitungan, 2023)

Gambar 4.4 di atas menunjukkan bahwa jarak maksimal antar blok beton pemberat (L_{maks}) pipa PE-01 adalah sebesar 29 m dengan bobot kering blok beton pemberat (W_{AS}) yang diperlukan minimal sebesar 1.375 kg. Bila ditentukan jarak antar pemberat sebesar 10 m maka bobot kering blok beton pemberat yang dibutuhkan adalah minimal sebesar 474 kg sesuai dengan grafik tersebut. Apabila bobot

tersebut dikurangi tanpa merubah jarak antar pemberat tersebut (10 m) maka pipa akan mengangap.

Dengan jarak yang sama (10 m) bobot pemberat dapat diperbesar bila diinginkan, namun bobot pemberat yang terlalu besar mengakibatkan tegangan pipa (σ_b) menjadi relatif besar sehingga mesti dipastikan nilai tegangan pipa tersebut masih di bawah tegangan izin pipa (σ_a). Peningkatan bobot pemberat tanpa merubah jarak pemberat juga menyebabkan terjadinya peningkatan kebutuhan biaya pembuatan pemberat dan pemberat semakin sulit untuk dibuat dan di instalasi. Sehingga diperlukan pertimbangan yang baik apabila diinginkan untuk memperbesar bobot pemberat tanpa merubah jarak antar pemberat seperti penjelasan di atas.

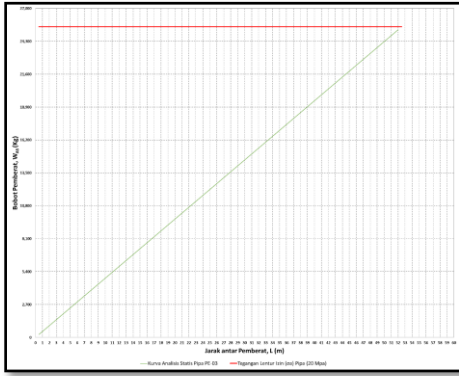
Grafik hasil perhitungan untuk pipa PE-02 dan PE-03 dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 sebagai berikut:



Gambar 4.5 Jarak dan bobot pemberat pipa PE-02 (Hasil perhitungan, 2023)

Gambar 4.5 di atas menunjukkan bahwa jarak maksimal antar blok beton pemberat (L_{maks}) pipa PE-02 adalah sebesar 41 m dengan bobot kering blok beton pemberat (W_{AS}) yang diperlukan minimal sebesar 7.775 kg.

Grafik perhitungan jarak dan bobot pemberat pipa untuk PE-03 dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



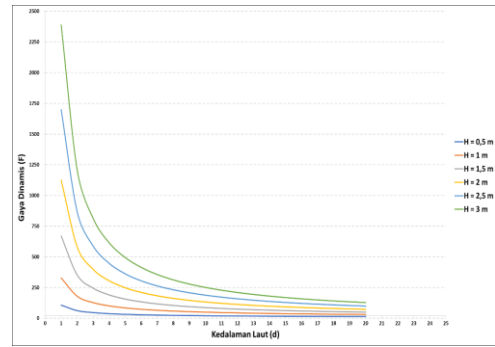
Gambar 4.6 Jarak dan bobot pemberat pipa PE-03 (Hasil perhitungan, 2023)

Gambar 4.6 diatas menunjukkan bahwa jarak maksimal antar blok beton pemberat (L_{maks}) pipa PE-03 adalah sebesar 52 m dengan bobot kering blok beton pemberat (B_A) yang diperlukan minimal sebesar 25.251 kg.

Diameter dan ketebalan pipa adalah faktor utama yang mempengaruhi jarak dan bobot maksimal pemberat pipa, semakin besar diameter dan ketebalan pipa, maka jarak dan bobot maksimal pemberat juga semakin besar. Hal ini ditunjukkan oleh kurva linear pada grafik tersebut di atas.

4.1.2 Analisis berdasarkan gaya dinamis

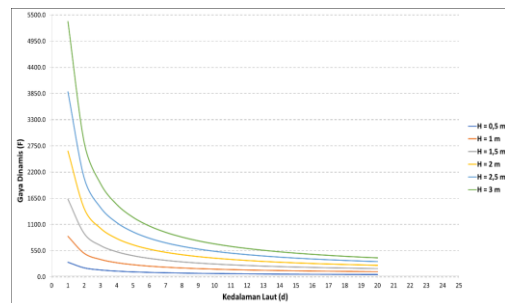
Berdasarkan perhitungan jarak dan bobot pemberat pada kondisi gaya dinamis tersebut di atas yang ditampilkan pada tabel 4.15, dapat diambil kesimpulan bahwa kedalaman laut (d) dan tinggi gelombang (H) berperan besar terhadap besarnya gaya yang bekerja pada pipa. Semakin besar kedalaman laut (d) maka gaya dinamis akan semakin kecil dan semakin besar tinggi gelombang (H) maka gaya dinamis akan semakin besar. Hal ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.7 Grafik Hubungan d dan H terhadap gaya dinamis pada Pipa PE-01 (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan gambar di atas, pada kedalaman laut (d) 1 m dengan tinggi gelombang (H) 0,5 m, gaya dinamis pada pipa PE-01 adalah sebesar 106,6 ~ 107 N/m (pembulatan ke atas), signifikan turun seiring bertambahnya kedalaman laut hingga pada kedalaman (d) 20 m gaya dinamis tersebut mencapai 13,7 ~ 14 N/m. Gaya dinamis pada kedalaman (d) 1 m dengan tinggi gelombang (H) 0,5 m, signifikan naik seiring bertambahnya tinggi gelombang hingga pada tinggi gelombang (H) 3 m gaya dinamis tersebut mencapai 2.388,4 ~ 2.388 N/m.

Berdasarkan kesimpulan tersebut, gaya dinamis (F) yang terjadi pada pipa PE-02 dapat dilihat pada gambar berikut:

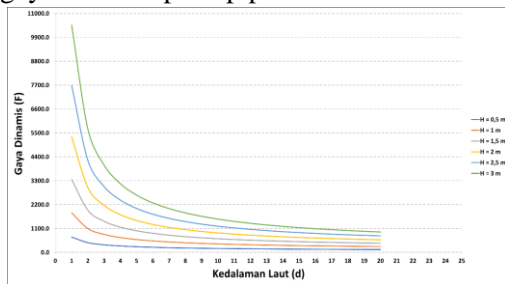


Gambar 4.8 Grafik Hubungan d dan H terhadap gaya dinamis pada Pipa PE-02 (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan gambar di atas, pada kedalaman laut (d) 1 m dengan tinggi gelombang (H) 0,5 m, gaya dinamis pada pipa PE-01 adalah sebesar 310,1 ~ 311 N/m, signifikan turun seiring bertambahnya kedalaman laut hingga pada kedalaman (d)

20 m gaya dinamis tersebut mencapai 51,7 ~ 52 N/m. Gaya dinamis pada kedalaman (d) 1 m dengan tinggi gelombang (H) 0,5 m, signifikan naik seiring bertambahnya tinggi gelombang hingga pada tinggi gelombang (H) 3 m gaya dinamis tersebut mencapai 5.363,3 ~ 5.364 N/m.

Berikut ini adalah grafik hasil perhitungan hubungan antara kedalaman laut (d) dan tinggi gelombang (H) terhadap gaya dinamis pada pipa PE-03.



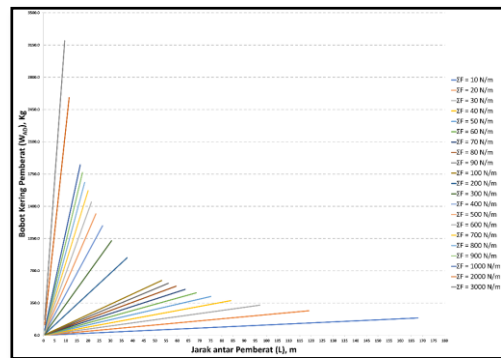
Gambar 4.8 Grafik Hubungan d dan H terhadap gaya dinamis pada Pipa PE-03 (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan gambar di atas, pada kedalaman laut (d) 1 m dengan tinggi gelombang (H) 0,5 m, gaya dinamis pada pipa PE-03 adalah sebesar 703,1 ~ 704 N/m, signifikan turun seiring bertambahnya kedalaman laut hingga pada kedalaman (d) 20 m gaya dinamis tersebut mencapai 130,1 ~ 131 N/m. Gaya dinamis pada kedalaman (d) 1 m dengan tinggi gelombang (H) 0,5 m, signifikan naik seiring bertambahnya tinggi gelombang hingga pada tinggi gelombang (H) 3 m gaya dinamis tersebut mencapai 10.461,9 ~ 10.462 N/m.

Secara keseluruhan, dengan variasi tinggi gelombang (H) 0,5 – 3 m pada kedalaman laut (d) yang kecil atau dangkal gaya dinamis pada pipa PE-03 relatif besar, sedangkan pada kedalaman laut (d) yang besar atau dalam gaya dinamis relatif kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gaya dinamis pada sebuah pipa bersifat variatif, besar dan kecilnya gaya tersebut tergantung

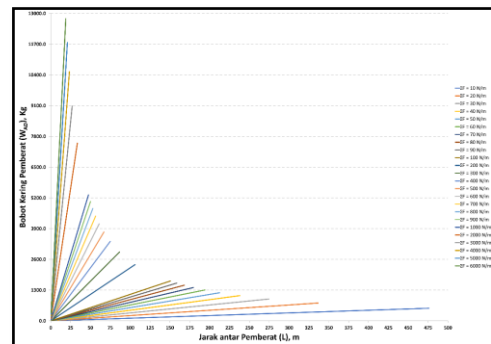
dari tinggi dan rendahnya kedalaman laut (d) dan tinggi gelombang (H) pada pipa.

Berikutnya dilakukan analisis terhadap jarak maksimal dan bobot minimal pemberat yang diperlukan pada saat pipa menerima gaya-gaya dinamis seperti yang telah di analisis di atas. Untuk memudahkan dalam menganalisis hasil perhitungan pada tabel 4.17 di atas, perhitungan tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik seperti berikut ini:

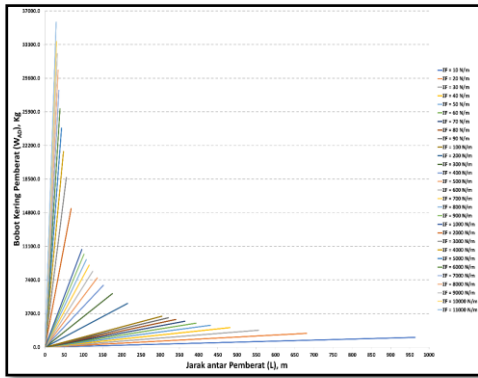


Gambar 4.10 Hasil perhitungan jarak dan bobot pemberat pipa PE-01 pada kondisi dinamis (Hasil perhitungan, 2023)

Untuk grafik hasil perhitungan jarak dan bobot pemberat pipa PE-02 dan PE-03 pada kondisi dinamis, dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.11 Hasil perhitungan jarak dan bobot pemberat pipa PE-02 pada kondisi dinamis (Hasil perhitungan, 2023)



Gambar 4.12 Hasil perhitungan jarak dan bobot pemberat pipa PE-03 pada kondisi dinamis (Hasil perhitungan, 2023)

Meninjau gambar 4.7 diatas, pada grafik tersebut terdapat garis-garis yang menunjukkan kordinat jarak dan bobot pemberat pipa yang pada kondisi gaya yang paling besar (3000 N/m), garis tersebut memiliki sudut kemiringan yang besar (mendekati 90°) yang menunjukkan kordinat jarak yang kecil dengan bobot pemberat yang besar. Sedangkan pada kondisi gaya yang paling kecil (10 N/m), sudut kemiringan garis tersebut mengecil bahkan hampir sama dengan sumbu x grafik tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa pipa membutuhkan bobot minimal pemberat yang kecil dengan jarak maksimal yang besar. Perubahan sudut kemiringan tersebut disebabkan oleh penurunan gaya dinamis yang bekerja pada pipa, karena pada dasarnya gaya dinamis merupakan fungsi kedalaman (d).

Semakin besar kedalaman laut (d) maka gaya dinamis semakin kecil, mengakibatkan bobot pemberat yang diperlukan oleh pipa juga semakin kecil dan jarak antar pemberat semakin besar. Sehingga pada akhirnya pipa tidak lagi

membutuhkan pemberat tambahan pada kedalaman laut (d) yang sangat besar karena gaya dinamis sama dengan nol. Akan tetapi, mempertimbangkan pengaruh gaya apung pada pipa, menyebabkan pipa harus tetap memiliki bobot yang cukup untuk tenggelam menuju ke dasar laut. Sebaliknya, semakin kecil kedalaman laut maka gaya yang bekerja semakin besar, mengakibatkan bobot minimal pemberat yang di butuhkan semakin besar dan jarak maksimal antar pemberat semakin kecil. Pada kondisi kedalaman laut yang kecil, pemberat pipa HDPE tidak lagi dapat di desain berjarak satu dengan yang lainnya atau jarak antar pemberat sama dengan nol ($L = 0$). Namun kondisi tersebut ($L = 0$) dapat di abaikan, mengingat gaya dinamis yang besar tersebut bekerja pada daerah yang mendekati pesisir pantai, yang pada titik tertentu pengaruh gaya tersebut akan menghilang. Akan tetapi, bobot pemberat pada besaran gaya tersebut harus tetap dipenuhi.

Berdasarkan penjelasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa bobot maksimal pemberat pipa berbanding lurus dengan peningkatan gaya dinamis yang bekerja pada pipa. Sedangkan jarak maksimal antar pemberat berbanding terbalik dengan gaya dinamis yang bekerja pada pipa. Sehingga ketika sebuah gaya dinamis yang bekerja pada pipa signifikan naik maka jarak maksimal antar pemberat signifikan turun, sedangkan bobot maksimal pemberat signifikan naik seperti yang terlihat pada

gambar tersebut di atas (Gambar 4.8, Gambar 4.9 dan Gambar 4.10).

4.1.3 Analisis optimasi jarak dan bobot pemberat pipa HDPE

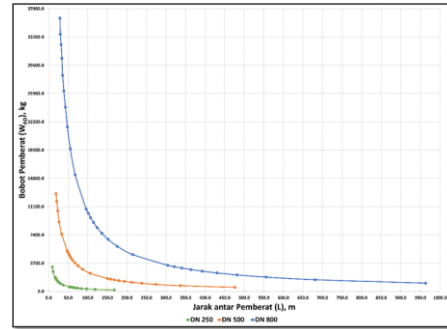
Berdasarkan kondisi gaya dinamis, untuk keperluan optimasi jarak dan bobot pemberat pipa HDPE, digunakan jarak maksimal antar pemberat pipa dari masing-masing gaya yang bekerja sesuai dengan variasi gaya yang telah ditentukan pada penelitian ini. Hal ini dipertimbangkan atas dasar meningkatkan efisiensi (waktu dan biaya) dan *workability* pekerjaan konstruksi pipa bawah laut, yang dinilai akan lebih cepat, murah dan mudah pengerjaannya dibandingkan dengan jarak yang lebih kecil yang cenderung lebih lama, mahal dan sulit untuk dikerjakan. Jarak maksimal pemberat pada masing-masing gaya yang bekerja, berdasarkan gaya dinamis tersebut dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4.1 Rekapitulasi jarak dan bobot maksimal pemberat pipa PE-01 untuk masing-masing gaya dinamis

No	Gaya	Jarak Maksimal	Bobot Minimal
	N/m	m	Kg
1	10	168.0	188.4
2	20	119.0	266.9
3	30	97.0	326.3
4	40	84.0	376.8
5	50	75.0	420.5
6	60	68.5	460.9
7	70	63.5	498.4
8	80	59.5	533.7
9	90	56.0	565.1
10	100	53.0	594.3
11	200	37.5	841.0
12	300	30.5	1026.0
13	400	26.5	1188.6
14	500	23.5	1317.5
15	600	21.5	1446.5
16	700	20.0	1569.8
17	800	18.5	1659.5
18	900	17.5	1766.1
19	1000	16.5	1850.2
20	2000	11.5	2579.0
21	3000	9.5	3195.7

(sumber: hasil perhitungan, 2023)

Berikutnya, tabel 4.18 di atas ditampilkan dalam bentuk grafik untuk memudahkan dalam menganalisis data tersebut. Dengan prosedur yang sama untuk pipa PE-02 dan PE-03 dapat dilihat pada gambar berikut ini:

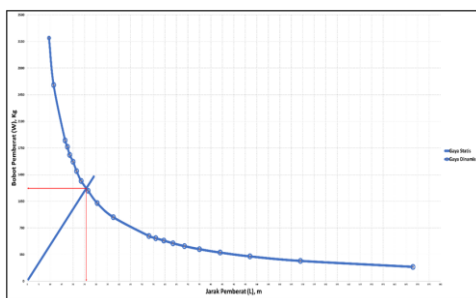


Gambar 4.13 Grafik jarak maksimal dan bobot minimal untuk masing-masing gaya pada pipa PE-01, PE-02, PE-03. (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan grafik tersebut di atas, memperlihatkan bahwa kemampuan pipa dalam mempertahankan tegangan lentur (σ_b) di bawah tegangan izin pipa (σ_a), terhadap gaya dinamis yang bekerja pada pipa dipengaruhi oleh diameter dan ketebalan pipa tersebut. Hal ini berarti bahwa semakin besar diameter dan ketebalan pipa, gaya dinamis yang bekerja pada pipa juga semakin besar. Jarak maksimal dan bobot minimal pemberat yang diperlukan juga semakin besar untuk setiap unit gaya yang bekerja. Kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.10 di atas, pada pipa PE-01 pada gaya dinamis tertinggi sebesar 3.000 N/m diperoleh jarak maksimal antar pemberat sebesar 9,5 m dan bobot maksimal pemberat sebesar 3.195,7 ~ 3.196 kg. Pipa PE-02 pada gaya dinamis tertinggi

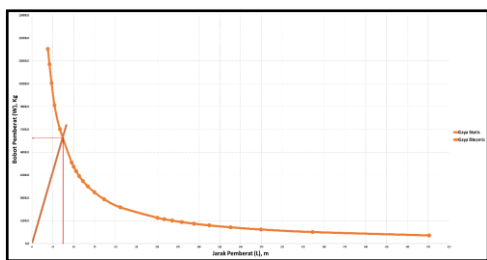
sebesar 6.000 N/m diperoleh jarak maksimal sebesar 19 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 12.782,9 ~ 12.783 kg. Pipa PE-03 pada gaya dinamis tertinggi sebesar 11.000 N/m diperoleh jarak maksimal sebesar 29 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 35.769,6 ~ 35.770 kg. Besaran gaya dinamis, jarak dan bobot maksimal pemberat tersebut akan terus meningkat, seiring bertambah besarnya diameter dan ketebalan pipa.

Berdasarkan penjelasan tersebut di atas, hasil penggabungan ke-dua grafik hasil perhitungan jarak dan bobot maksimal pemberat pada kondisi gaya statis dan dinamis, untuk pipa PE-01, PE-02 dan PE-03 dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



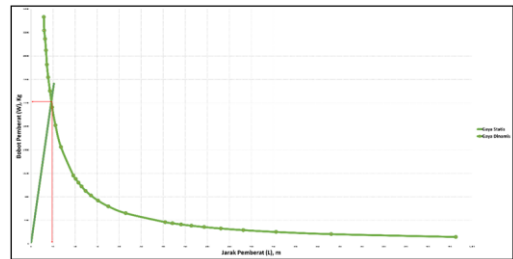
Gambar 4.14 Grafik analisis optimasi jarak dan bobot pemberat pipa PE-01 (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan grafik tersebut, jarak dan bobot optimal untuk pipa PE-01 diperoleh jarak sebesar 25,8 m dan bobot pemberat sebesar 1.220 kg.



Gambar 4.15 Grafik analisis optimasi jarak dan bobot pemberat pipa PE-02 (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan grafik tersebut, jarak dan bobot optimal untuk pipa PE-02 diperoleh jarak sebesar 36,8 m dan bobot pemberat sebesar 6.950 kg.



Gambar 4.3 Grafik analisis optimasi jarak dan bobot pemberat pipa PE-03 (Hasil perhitungan, 2023)

Berdasarkan grafik tersebut, jarak dan bobot optimal untuk pipa PE-02 diperoleh jarak sebesar 46 m dan bobot pemberat sebesar 22.350 kg. Grafik-grafik tersebut di atas, terbagi menjadi 2 (dua) bagian. Bagian pertama yakni area yang berada di bawah garis analisis statis dan analisis dinamis. Bagian tersebut adalah area yang tidak diperkenankan untuk dijadikan dasar perencanaan pipa HDPE bawah laut. Karena, pada area tersebut pipa HDPE akan mengapung. Sedangkan bagian kedua yakni area yang berada di atas garis analisis statis dan di bawah garis analisis dinamis. Area tersebut merupakan area yang di sarankan untuk digunakan sebagai dasar perencanaan pipa HDPE bawah laut.

Praktisnya, dengan menggunakan grafik tersebut perencanaan jarak dan bobot pemberat dapat di tentukan secara random pada titik tertentu. Sehingga dihasilkan jarak dan bobot pemberat sesuai kebutuhan di lapangan, dengan syarat titik yang ditentukan tersebut masih berada di dalam area bagian kedua pada grafik tersebut.

Optimalnya, jarak dan bobot pemberat ditunjukkan oleh garis merah tegak lurus dan melintang pada gambar di atas. Jarak dan bobot optimal pemberat tersebut dapat menjamin stabilitas pipa terhadap gaya statis dan dinamis sekaligus. Selain itu penggunaan jarak dan bobot optimal pada perencanaan pipa HDPE bawah laut berdasarkan grafik tersebut, juga dapat meminimalisir biaya pekerjaan konstruksi pipa HDPE bawah laut dibandingkan dengan penggunaan jarak dan bobot pemberat yang lebih kecil. Sedangkan jika perencanaan pemberat pipa direncanakan berdasarkan jarak dan bobot maksimal yang ditunjukkan oleh garis/kurva linear di atas (analisis statis) pada grafik tersebut, hal ini merupakan pemborosan biaya konstruksi. Karena bobot pemberat yang dihasilkan pada jarak maksimal tersebut, lebih besar ketimbang bobot pemberat pada jarak optimal. Sehingga, untuk perencanaan jarak dan bobot pemberat pipa HDPE bawah laut, di sarankan menggunakan jarak dan bobot pemberat yang optimal.

Untuk gambar yang lebih jelas, dapat dilihat pada lampiran. Berdasarkan hasil analisis optimasi tersebut di atas, di dapatkan jarak dan bobot optimum pemberat untuk masing-masing pipa yaitu PE-01, PE-02, dan PE-03. Berikut ini disajikan Tabel 4.2 Rekapitulasi jarak dan bobot optimal pemberat pipa HDPE bawah laut

No	Kode	Jarak optimal	Bobot optimal
		m	kg
1	PE-01	25,8	1.220
2	PE-02	36,8	6.950
3	PE-03	46	22.350

(sumber: Hasil perhitungan, 2023)

V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Jarak maksimal untuk pipa HDPE bawah laut pada kondisi gaya statis diperoleh sebesar 16,5 m dengan bobot pemberat maksimal sebesar 990 kg untuk pipa dengan diameter 10 inci. Pipa HDPE dengan diameter 20 inci diperoleh jarak maksimal sebesar 23,5 m dengan bobot pemberat maksimal sebesar 5.645 kg. Sedangkan pipa HDPE diameter 30 inci diperoleh jarak maksimal sebesar 30 m dengan bobot pemberat maksimal sebesar 18.444 kg.
2. Pada kondisi gaya dinamis jarak dan bobot maksimal pemberat pipa HDPE jalur bawah laut diperoleh nilai yang variatif, tergantung dari gaya dinamis yang diterima oleh pipa saat berada di dasar laut. Gaya tersebut dipengaruhi oleh kedalaman laut (d), tinggi gelombang (H), ketebalan pipa (t) dan diameter pipa (D).

Berdasarkan variasi gaya dinamis yang terkecil, diperoleh jarak maksimal sebesar 109 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 122 kg untuk pipa dengan diameter 10 inci. Pipa dengan diameter 20 inci, diperoleh jarak maksimal sebesar 308,5 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 346 kg. Sedangkan pipa dengan diameter 30 inci diperoleh jarak maksimal sebesar 625,5 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 701 kg.

Berdasarkan variasi gaya dinamis yang terbesar, diperoleh jarak maksimal sebesar 6 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 2.018 kg untuk pipa dengan diameter 10 inci. Pipa dengan diameter 20 inci, diperoleh jarak maksimal sebesar 12,5 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 8.410 kg. Sedangkan pipa dengan diameter 30 inci diperoleh jarak maksimal sebesar 18,5 m dengan bobot maksimal pemberat sebesar 22.819 kg.

3. Jarak dan bobot optimal pemberat pipa HDPE bawah laut diperoleh sebesar 14,5 m dengan bobot sebesar 875 kg, untuk pipa HDPE diameter 10 inci. Pipa HDPE diameter 20 inci, diperoleh jarak maksimal sebesar 20,8 m dengan bobot maksimal sebesar 4.975 kg. Sedangkan untuk pipa dengan diameter 30 inci diperoleh jarak maksimal sebesar 26,2 m dengan bobot maksimal sebesar 16.250 kg.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka dapat di sampaikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan analisis gaya dinamis terhadap blok beton pemberat.
2. Perlu dilakukan analisis biaya konstruksi pemberat pipa HDPE tersebut.
3. Perlu dilakukan analisis tekanan hidrostatik pipa.
4. Perlu dilakukan analisis pengaruh bentuk pemberat terhadap kestabilan pipa pada kondisi operasi dan instalasi.
5. Perlu dilakukan analisis jarak dan bobot pemberat kumulatif terhadap kedalaman laut (d) dan tinggi gelombang (H).