



Identifikasi dan Klasifikasi Variabel Untuk Desain Lokasi dan Rute Pipa Bawah Laut

Benyamin Sadira¹, Wiwin Windupranata², dan Samsul Bachri³

^{1,2,3}Kelompok Keahlian Sains dan Sistem Kerekayasaan Wilayah Pesisir dan Laut,
Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi
Kebumian, Institut Teknologi Bandung

Abstrak. Pipa bawah laut merupakan salah satu metode transportasi minyak dan gas bumi yang efektif dan efisien. Namun dalam pemasangan pipa bawah laut terdapat beberapa tantangan. Tantangan itu sendiri tak lain adalah dari kondisi laut yang sangat dinamis dan variabel lainnya. Identifikasi terhadap variabel apa saja yang ada diperlukan untuk kepentingan pertimbangan dalam penentuan desain lokasi dan rute pipa bawah laut. Penelitian ini dilakukan untuk memberi informasi variabel yang mempengaruhi dan harus dipertimbangkan dalam penentuan desain lokasi dan rute pipa bawah laut. Metode yang dilakukan pada penelitian ini yaitu kajian berdasarkan literatur dan mempelajari penelitian terdahulu yang berhubungan dengan pipa bawah laut. Dalam pemasangan pipa bawah laut ditemukan bahwa banyak variabel yang dapat mempengaruhinya. Variabel tersebut diklasifikasikan menjadi 2 yaitu variabel alam dan variabel manusia. Variabel alam adalah variabel yang muncul akibat kondisi alam sekitar seperti aspek kimiawi dan fisis lautan. Variabel manusia adalah variabel yang muncul akibat manusia seperti aspek ekonomi, hukum, sosial, dan politik. Variabel alam dan manusia tersebut nantinya akan dianalisis sehingga didapatkan implikasi dari masing-masing variabel yang terjadi. Implikasi yang terjadi digolongkan menjadi 2 yaitu implikasi pemasangan (yang terjadi ketika perencanaan sampai pemasangan) dan implikasi operasional (yang terjadi ketika pipa sedang beroperasi). Salah satu contoh variabel alam yaitu gempa bumi yang mempunyai pengaruh terhadap ketahanan dan kestabilan pipa. Salah satu contoh variabel manusia yaitu aturan lokal yang mempengaruhi dalam instalasi pipa.

Kata kunci: *pemasangan pipa bawah laut, variabel manusia, variabel alam, lokasi dan rute.*

1 Pendahuluan

Salah satu sumber daya yang berperan penting dalam kehidupan manusia adalah minyak dan gas bumi. Minyak dan gas bumi merupakan sumber energi yang sering digunakan. Di Indonesia, konsumsi minyak dan gas bumi mencapai 53%, sedangkan batubara dan energi terbarukan lainnya 47% (EIA, 2014). Karena Indonesia memiliki wilayah lautan yang lebih luas daripada daratan, maka banyak dilakukan eksploitasi minyak dan gas bumi di wilayah lautan

Kebutuhan energi di Indonesia sendiri tersebar merata di seluruh pulau-pulau Indonesia, sehingga diperlukan proses pendistribusian minyak dan gas bumi yang efektif dan efisien. Pendistribusian minyak dan gas bumi biasa dilakukan dengan menggunakan kapal-kapal tanker. Kapal tanker biasanya akan mendatangi anjungan minyak (*oil rig*) yang berada di tengah lautan, mengambil minyak bumi dan kemudian mendistribusikannya ke daerah tempat penyimpanan minyak bumi. Namun demikian dengan dilakukannya hal ini, membutuhkan waktu yang cenderung cukup lama dan menggunakan biaya besar karena harus membiayai bahan bakar pada kapal tanker tersebut. Saat ini, sudah dikembangkan cara pendistribusian minyak dan gas bumi yang lebih efisien dan lebih efektif yaitu dengan menggunakan pipa bawah laut.

Pipa bawah laut merupakan cara pendistribusian yang efektif dan efisien karena pipa bawah laut akan tetap berada di bawah laut dengan jalur tertentu yang menghubungkan oil rig dengan tempat penyimpanan minyak tersebut, sehingga tidak perlu ada biaya bahan bakar seperti pada kapal tanker dan waktu pendistribusian akan lebih cepat dan pendistribusian dapat dilakukan terus menerus tanpa harus menunggu kapal tanker datang.

Namun dalam pemasangan pipa bawah laut banyak hal yang harus diperhatikan. Hal ini dikarenakan laut mempunyai sifat yang sangat dinamis. Beberapa hal yang harus diperhatikan contohnya yaitu, kepadatan lalu lintas pelayaran di wilayah tersebut, aktivitas di wilayah tersebut (penangkapan ikan), keberadaan bangunan atau instalasi yang sudah ada, kondisi permukaan dasar perairan, jenis lapisan tanah dasar perairan, kedalaman perairan, kecepatan & arah angin, dan hidrodinamika laut (pasang surut, kecepatan arus, dan ketinggian gelombang). Dengan mengetahui hal-hal tersebut nantinya dapat dipilih metode yang terbaik untuk melakukan pemasangan pipa bawah laut sehingga sangat penting untuk melakukan identifikasi variabel-variabel apa saja yang mempengaruhi pemasangan pipa bawah laut. Variabel-variabel yang mempengaruhi tidak hanya dari variabel fisik (hidrodinamika laut), namun ada berbagai variabel lain seperti variabel biaya, sosial, dan hukum. Hasil dari identifikasi variabel ini nantinya bisa dijadikan dasar untuk menentukan desain lokasi dan rute pemasangan pipa bawah laut sehingga menjadi efisien dan tidak merugikan.

2 Proses Pemasangan Pipa Bawah Laut

Pemasangan pipa bawah laut mempunyai beberapa proses tahapan yang masing-masingnya memiliki tujuan tertentu untuk dicapai. Tahapan-tahapan tersebut terdiri dari *Pre-Lay Survey*, *Pipeline Installation*, dan *As-Laid Survey* (Lekkerkerk et al., 2006).

Pre-lay Survey merupakan tahapan yang dilakukan lebih dahulu sebelum instalasi pipa bawah laut dimulai untuk menyediakan konfirmasi data geofisika (batimetri dasar laut) dan identifikasi variabel lainnya yang mempengaruhi pemasangan pipa bawah laut

Pipeline Installation merupakan tahapan dimana pipa bawah laut diletakkan di dasar laut menggunakan metode dan juga proteksi yang tepat berdasarkan variabel yang ada di area survei tersebut.

As-laid Survey merupakan tahapan yang biasanya dilakukan pada saat proses peletakkan pipa atau segera setelah pipa diletakkan di dasar laut untuk mencatat status dan posisi pipa setelah diletakkan (Lekkerkerk et al., 2006).

3 Identifikasi Variabel Untuk Desain Lokasi Dan Rute Pipa Bawah Laut

Angin (*Wind Loads*) menyebabkan getaran dan ketidakstabilan karena beban terus menerus yang disebabkan angin contohnya *vortex shedding* (DNV, 2013). Angin juga merupakan penyebab terjadinya arus dan gelombang laut sehingga angin memang harus diperhatikan.

Pasut (*Tide*) adalah gerakan periodik air laut akibat perbedaan gaya gravitasi benda angkasa (yaitu Matahari dan Bulan) pada Bumi yang sedang berputar (De Jong et al., 2003). Pasut bisa menyebabkan terjadinya arus pasut yang berpengaruh pada laut dengan kedalaman dangkal.

Gelombang (*Waves*) terjadi pada permukaan laut karena perpindahan energi dari udara (angin) kepada air laut (De Jong et al., 2003). Gelombang mempunyai pengaruh yang lebih besar pada laut dangkal dibandingkan pada laut dalam. Gelombang internal (*Internal Waves*) bisa terjadi di bawah permukaan laut ketika perbedaan densitas terjadi (laut terdiri dari lapisan dengan densitas yang berbeda-beda yang menyebabkan adanya tekanan gravitasi atau hidrostatik) (De Jong et al., 2003). Gelombang internal bisa terjadi di permukaan dan bisa menyebabkan kecepatan tinggi di dasar laut.

Arus (*Current*) terdiri dari dua yaitu arus permukaan (*Surface Currents*) dan arus termohalin (*Thermohaline Currents*) (De Jong et al., 2003). Arus permukaan digerakkan oleh angin dan terjadi pada lapisan teratas lautan, yaitu pada kedalaman 1000 meter pertama. Arus termohalin merupakan pergerakan badan air akibat perubahan densitas yang terjadi karena perubahan pada temperatur dan juga salinitas. Es (*Ice Loads*) memungkinkan terjadinya es dan hanyutnya es, maka tabrakan es dan juga penggesekan (*scouring*) yang disebabkan es bisa terjadi (DNV, 2013). Pada kedalaman dangkal, es bisa bergerak sepanjang dasar

laut (ABS, 2006). Gempa Bumi (*Earthquake*) merupakan beban yang diklasifikasikan sebagai beban secara kebetulan (*accidental*) sehingga harus dilakukan evaluasi periode gempa bumi selama 100 tahun, 1000 tahun, maupun 10000 tahun (DNV, 2013).

Kondisi Lapisan Tanah (*Soil Conditions*) mempunyai beberapa karakteristik yang masing-masing sangat mempengaruhi dalam pemasangan pipa bawah laut. Dasar laut yang sempurna yaitu mempunyai permukaan yang rata dan halus sehingga tidak ada rentang (*span*) yang terjadi dan juga terkomposisi dari medium lempung (*clay*) yang stabil (Palmer & King, 2004). Jika dasar laut tidak halus, tidak rata, dan berbatu, akan ada banyak rentang bebas (*free span*) yang terjadi dimana pipa terbentang di atas lembah. Jika lembah sangat dalam, gaya yang terkonsentrasi antar pipa dan dasar laut bisa menyebabkan rusaknya lapisan luar (*external coating*) pipa. Dasar laut yang keras (*hard seabed*) akan memiliki tingkat kesulitan dan biaya yang lebih tinggi untuk dilakukan proses pembuatan parit (*trenching*). Di sisi lain, dasar laut yang sangat lunak (*very soft seabed*) dan tidak stabil, akan membuat pipa menjadi tenggelam.

Subsidence atau penurunan permukaan dasar laut bisa terjadi karena beberapa hal. Di lautan, permukaan dasar laut bisa turun karena habisnya cadangan (*reservoir*) minyak/gas bumi (ABS, 2006). *Obstructions* adalah halangan yang ada di dasar laut dalam bentuk singkapan batuan (*Rock Outcrops*) dan batu besar (*Large Boulders*). *Depressions* adalah suatu kondisi dimana ada rentang yang rendah (perbedaan ketinggian di dasar laut) pada jalur pipa (Mousselli, 1981). *Erosion* terjadi karena pergerakan air (arus) yang tinggi di dasar laut sehingga partikel sedimen ada yang tersuspensi dan ada juga yang hanya bergerak di dasar laut (Mousselli, 1981).

Penggerusan (*Scouring*) terjadi akibat arus pada dasar laut sangat tinggi sehingga partikel sedimen terbawa arus dan menggesek pipa secara terus menerus (Mousselli, 1981). Kontur dasar laut dapat berubah seiring waktu akibat proses penggesekan/penggosokan ketika erosi (*scour erosion*) (ABS, 2006). *Seabed Movement* bisa terjadi akibat erosi dan longsor pada kemiringan terjal dan pergerakan drastis gelombang pada permukaan dasar laut. *External Corrosion* adalah reaksi kimia atau elektro-kimia antara permukaan logam dengan lingkungan sekitarnya (DNV, 2004). Reaksi tersebut menyebabkan permukaan logam berubah menjadi karat.

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang terjadi pada kedalaman tertentu akibat berat kolom cairan seperti air laut (Mian, 1992). Setiap penambahan 10 m kedalaman, tekanan hidrostatik bertambah sebesar 1 atm (De Jong et al., 2003). Bisa menyebabkan proses Buckling (lekukan) yang terjadi karena gaya tekanan terlalu besar (Mousselli, 1981). *Hydrodynamic Forces* merupakan beban aliran

yang disebabkan oleh gerakan relatif antara pipa terhadap air di sekitar sehingga menyebabkan ketidakstabilan pada pipa (DNV, 2013). *Offshore Installations* merupakan beberapa bangunan lepas pantai seperti anjungan minyak yang sudah ada. Pipa bawah laut sebaiknya tidak dipasang dekat dengan anjungan minyak karena akan ada resiko kerusakan dari penjatuhan benda seperti jangkar oleh kapal suplai (*supply vessels*) dan kapal konstruksi (*construction vessels*) maupun kemungkinan terjadi kebakaran, ledakan, atau kerusakan struktur bangunan pada anjungan minyak yang dapat melibatkan pipa bawah laut (Palmer & King, 2004).

Existing Pipelines and Cables merupakan salah satu masalah yang paling sering terjadi (Palmer & King, 2004). Pipa bisa saling bersilangan satu sama lain, namun beberapa hal harus diperhatikan seperti tidak boleh ada satupun pipa yang merusak pipa lainnya, sehingga tidak ada gangguan yang tidak diinginkan pada sistem proteksi yang ada antar masing-masing pipa, dan juga agar tidak ada pipa yang terkena tekanan yang berlebihan atau menjadi tidak stabil akibat kekuatan hidrodinamika. *Dumping Areas*. Pada masa lalu, dasar laut digunakan sebagai tempat pembuangan untuk berbagai macam material seperti limbah lumpur, limbah kimia, limbah nuklir, amunisi peninggalan masa perang, hingga barang yang sudah tidak terpakai seperti kapal maupun reaktor nuklir (Palmer & King, 2004). *Mining Activities*. Dasar laut merupakan sumber potensial untuk menemukan mineral. Aktivitas pertambangan di dasar laut yang paling penting yaitu pengerukan pasir dan batu kerikil.

Military Exercise Areas. Kegiatan militer menggunakan dasar laut dalam bervariasi cara. Ranjau dipasang sewaktu perang dan tidak diambil kembali ataupun di-nonaktifkan setelah perang selesai (Palmer & King, 2004). Bahan peledak dan pemicu tetap sensitif dan ranjau mungkin bisa terbawa arus dan bertabrakan dengan pipa. Beberapa area digunakan untuk latihan artileri dan pengeboman. Semua hal ini membuat resiko pada pipa menjadi lebih tinggi sehingga sebaiknya daerah ini dihindari. *Natural Conservation Areas*. Terumbu karang (*Coral Reef*) menjadi salah satu variabel juga karena terumbu karang mempunyai resistensi terhadap keretakan yang besar sehingga sulit untuk dilakukan pembuatan parit (*trenching*) pada daerah ini (Palmer & King, 2004). Selain itu terumbu karang memiliki peranan penting dalam sistem ekologis sehingga harus dikonservasi. Aturan lokal mempengaruhi dalam pemasangan pipa bawah laut. Di Indonesia, hal tersebut diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 68 Tahun 2011 tentang Alur Pelayaran di Laut. *Environmental Sensitive Areas*. Gerakan pelestarian lingkungan mulai kuat dan aktif sehingga banyak keluhan yang ditujukan akibat kebisingan pembangunan pipa, gangguan terhadap mamalia laut, kerusakan terhadap terumbu karang, kerusakan terhadap kehidupan di dasar laut (meskipun kerusakan lebih sedikit dibandingkan kerusakan yang dihasilkan oleh pukat penangkapan ikan) (Palmer & King, 2004).

Fishing Trawl. Penangkapan ikan yang hidup di dasar laut merupakan aktivitas yang penting di banyak laut dangkal (Palmer & King, 2004). Dengan meningkatnya tingkat eksploitasi ikan, para nelayan memperlebar daerah tangkapannya yaitu ke laut dalam sehingga menyebabkan penggunaan alat berat seperti pukat. *Anchoring*. Kapal jarang sekali untuk menjatuhkan jangkar di laut terbuka, tapi menjatuhkan jangkar sewaktu mendekati pelabuhan, terkadang pada area yang sudah ditetapkan, tetapi terkadang pula pada area yang tidak seharusnya (Palmer & King, 2004). *Sunken Vessel Impact* beberapa kapal pernah tenggelam dan menabrak pipa bawah laut sehingga pipa tersebut rusak. Kejadian ini setidaknya sudah di 2 negara yaitu Singapura dan Belanda (Palmer & King, 2004). *Economic Condition* mempengaruhi dalam pemilihan ketebalan pipa, panjang pipa, dan metode proteksi pipa terhadap bahaya sehingga mempengaruhi rute pipa (Mousselli, 1981).

4 Metode Proteksi Pipa Bawah Laut

Untuk melindungi pipa bawah laut dari bahaya yang telah teridentifikasi, maka diperlukan beberapa metode perlindungan untuk melindungi pipa pada saat pipa beroperasi.

4.1 Trenching

Merupakan metode pada pipa bawah laut yang dapat didefinisikan sebagai proses pembuatan parit dimana nantinya pipa akan diletakkan di dalamnya (Mousselli, 1981). Parit itu pada akhirnya bisa terisi kembali secara alamiah. Proses pemendaman (*burial*) pipa bisa didefinisikan sebagai proses pembuatan parit (*trenching*) untuk pipa dan kemudian mengisi kembali parit tersebut. Pengisian kembali parit dapat dilakukan secara alami atau dengan menggunakan peralatan mekanik. Metode ini digunakan untuk melindungi pipa dari beberapa variabel yaitu seperti efek hidrodinamika, keberadaan *obstruction*, aktivitas penangkapan ikan, penjatuhan jangkar dan variabel lainnya yang bisa membahayakan bagi pipa.

4.2 Cathodic Protection

Merupakan metode untuk melindungi pipa dari fenomena korosi. (Lee, 2007). Prinsip dari metode ini yaitu dengan melakukan pelapisan pada pipa menggunakan senyawa anode seperti zinc, magnesium, dan alumunium sehingga pada nantinya lapisan tersebut yang akan menerima karat, bukan pipa utamanya sehingga seringkali metode ini disebut metode *sacrificial anodes*.

4.3 Buckle Arrestor

Merupakan suatu pelindung pipa terhadap fenomena *buckling* (pelekukan pipa). Pada prinsipnya, *buckle arrestor* adalah bagian dari pipa dengan material yang lebih kuat daripada pipa utama sehingga dibutuhkan energi lebih besar untuk membuatnya menjadi pipih akibat penyebaran buckle (Mousselli, 1981).

4.4 Concrete Weight Coating

Merupakan metode yang digunakan untuk membuat pipa stabil di dalam laut khususnya di dasar laut (Lee, 2007). Lapisan *concrete* yang bisa dipasang pada pipa minimum memiliki ketebalan 1 inchi. Metode ini akan meminimalisir efek dari variabel berbahaya seperti gaya hidrodinamika yang dapat menggeser pipa bila pipa tidak dipendam di dalam dasar laut.

5 Survei Hidrografi Dalam Pemasangan Pipa Bawah Laut

Hidrografi mempunyai informasi utama yang ditujukan untuk navigasi dan keselamatan pelayaran, penetapan batas wilayah atau daerah di laut, dan studi dinamika pesisir dan pengelolaan sumberdaya laut (Poerbandono & Djunarsjah, 2005). Dalam perencanaan pipa bawah laut, dibutuhkan peta laut dengan akurasi yang tepat untuk keperluan navigasi agar dapat mempelajari rute alternatif yang bisa dipakai (Blankenburgh, 1987). Selain itu, dalam pemasangan pipa, diperlukan data hidrodinamika seperti arus, jenis material dasar laut, batimetri atau morfologi dasar laut sepanjang rute pipa yang akan dipakai.

Untuk mendapatkan data arus, bisa dilakukan dengan menggunakan *current meter* (metode mekanik) ataupun *acoustic doppler current profiler* (metode akustik) pada stasiun lokal yang telah ditentukan di sepanjang rute pipa bawah laut. Untuk mendapatkan sampel lapisan tanah bisa menggunakan *grab sampler*. Kedalaman laut bisa diukur dengan menggunakan *echosounder*. Prinsip dari *echosounder* yaitu pemancaran dari transduser berupa sinyal akustik berfrekuensi tinggi atau rendah ke dasar laut (Mousselli, 1981). Pada saat sinyal dipantulkan oleh permukaan dasar laut dan diterima kembali oleh transduser, perbedaan waktu dari pemancaran pertama dengan penerimaan sinyal diukur secara akurat. Setelah proses kalibrasi dan koreksi sehubungan dengan kecepatan sinyal akustik di air, kedalaman transduser, dan kondisi lainnya dilakukan, maka perbedaan waktu kemudian bisa digunakan untuk menghitung kedalaman pada suatu stasiun lokal yang ada di sepanjang rute pipa. *Side scan sonar* merupakan alat yang bisa memetakan dasar laut dan mendapatkan beberapa informasi yang penting yaitu identifikasi dari beragam ciri dasar laut yang ada di rute pipa, seperti adanya singkapan batu, aliran lumpur, *depressions*, *obstructions*, dan *sandwaves*, lalu posisi pipa di dalam parit (*trench*) bisa diketahui, dan tanda-tanda aktivitas penurunan jangkar dan penggunaan pukat bisa juga diketahui. *Sub bottom*

profiler berguna untuk mendapatkan data mengenai struktur geologi dan komposisi sedimen di bawah permukaan dasar laut sehingga bisa diketahui kondisi lapisan tanah yang ada di sepanjang rute pipa bawah laut.

6 Analisis Variabel Untuk Desain Lokasi Dan Rute Pipa Bawah Laut

Berikut akan diperlihatkan analisis variabel yang sudah teridentifikasi sehingga bisa didapat implikasi dari setiap variabel.

6.1 Hidrodinamika Laut (Arus & Gelombang)

Merupakan gabungan dari arus dan gelombang yang terjadi pada pipa sehingga bisa menyebabkan getaran, dan pergeseran akibat gerakan relatif pipa terhadap air di sekitarnya. Sebaiknya daerah dengan gelombang dan arus yang tinggi dihindari karena efeknya yang merugikan pada kestabilan pergerakan air dan juga karena gelombang tinggi dapat memperlambat atau menghentikan proses pemasangan pipa bawah laut dan menyapu pipa dari samping. Kecepatan gelombang semakin tinggi seiring dengan berkurangnya kedalaman, oleh karena itu lebih baik menghindari daerah laut dangkal. Untuk mengurangi efek hidrodinamika ini, bisa dengan melakukan pembuatan parit (*trenching*) atau pemendaman (*burial*) atau membuat ketebalan pipa menjadi lebih besar sehingga menjadi stabil.

6.2 Badai (Storm)

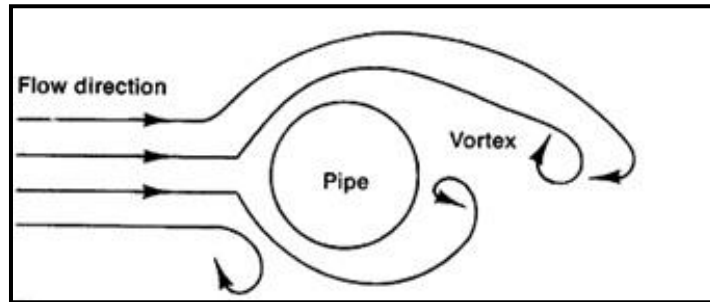
Badai terjadi akibat ketidakstabilan cuaca atau angin. Peristiwa ini mempengaruhi ketika proses pemasangan pipa yaitu pada saat akan melakukan peletakkan pipa menjadi lebih sulit karena ketika terjadi badai, gelombang dan arus semua menjadi kencang dan tak terkendali. Selain itu badai dapat mempengaruhi lapisan tanah secara vertikal dan horizontal sehingga dapat mengganggu kestabilan pipa ketika sedang beroperasi.

6.3 Pusaran (Vortex Shedding)

Pusaran terjadi akibat turbulensi air yang disebabkan angin dan juga ketidakstabilan di daerah pipa. *Vortex Shedding* menyebabkan perubahan periodik pada kekuatan hidrodinamika sehingga menyebabkan bentangan pipa bergetar. Dampak dari peristiwa ini akan lebih sering terjadi ketika pipa sudah dipasang di dasar laut dan beroperasi namun pipa tidak menggunakan metode proteksi parit (*trenching*) atau pemendaman (*burial*). Implikasi *Vortex Shedding* dapat dilihat pada **Gambar 1**.

6.4 Pasut (*Tide*)

Pasut bisa menyebabkan terjadinya arus pasut yang berpengaruh pada laut dengan kedalaman dangkal. Bisa menyebabkan *storm surge* sehingga dapat mengganggu stabilitas pipa dan juga proses pemasangan pipa pada laut dangkal sehingga sebaiknya rute dengan fenomena ini dihindari.



Gambar 1 Fenomena *vortex shedding* (Mouselli, 1981)

6.5 Es (*Ice Loads*)

Di area yang memungkinkan terjadinya es dan hanyutnya es, maka tabrakan es dan juga penggesekan (*scouring*) yang disebabkan es bisa merusak pipa. Pipa di kedalaman dangkal bisa terpotong dan rusak akibat es yang bergerak sepanjang dasar laut.

6.6 Gempa Bumi (*Earthquake*)

Ketika sering terjadi gempa bumi (aktivitas seismik aktif), maka gaya yang terjadi di dalam lapisan tanah (*soil*) akan lebih besar sehingga lebih baik pemasangan pipa tidak dipendam di dalam tanah.

6.7 Dasar laut yang keras (*Very Hard Seabed*)

Very hard seabed akan memiliki tingkat kesulitan dan biaya yang lebih tinggi untuk dilakukan proses pembuatan parit (*trenching*). Bila kekuatan hidrodinamika yang berada di sekitar daerah dengan dasar laut yang sangat keras, maka metode proteksi *trenching* akan mengeluarkan biaya yang lebih mahal daripada dasar laut yang lunak.

6.8 Dasar laut yang sangat lunak (*Very Soft Seabed*) dan tidak stabil

Very soft seabed akan membuat pipa menjadi tenggelam dan nantinya akan membuat kesulitan jika ingin melakukan inspeksi ataupun perbaikan.

Ketidakstabilan dasar laut terjadi karena lapisan sedimen yang kurang kuat atau tidak terkonsolidasi.

6.9 *Sandwaves*

Sandwaves sangat berpengaruh pada saat pengoperasian pipa karena bila pipa ditopang oleh *sandwaves* pada saat konstruksi, maka ketika gelombang datang, pipa tidak akan ditopang lagi. Pergerakan *sandwaves* ini sulit untuk diprediksi sehingga sebaiknya jalur *sandwaves* dihindari.

6.10 *Longsor (Landslides)*

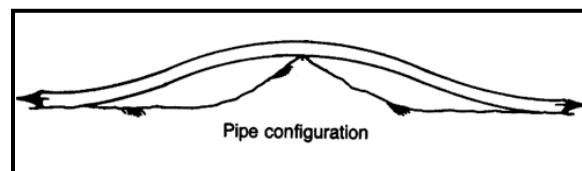
Longsor dapat terjadi di dasar laut ketika endapan yang sangat banyak bergerak dan memberi muatan yang lebih pada lereng dasar laut. Selain itu, longsor dapat terjadi juga karena adanya gempa bumi. Longsor yang berhadapan tegak lurus pada pipa bisa memberi tekanan yang sangat tinggi pada pipa sehingga bisa merusaknya. Sedangkan longsor yang sejajar dengan pipa tidak terlalu berbahaya karena tekanan yang diberikan lebih kecil.

6.11 *Subsidence*

Subsidence bisa menyebabkan penurunan dasar laut dengan laju yang berbeda-beda di setiap daerah. Apabila dasar laut menjadi tidak rata, bisa menyebabkan sambungan pada pipa teregang dan terkena tekanan tinggi sehingga bisa menyebabkan kerusakan seperti terjadinya patah pada pipa.

6.12 *Obstructions*

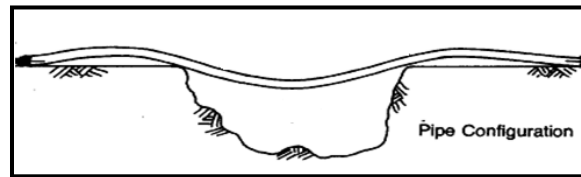
Obstructions menyebabkan pipa menjadi bengkok ke atas karena ada rentang yang lebih tinggi yang disebabkan oleh singkapan batu ataupun batu besar pada jalur pipa. Pada **Gambar 2**, bisa dilihat fenomena *Obstructions*.



Gambar 2 Fenomena *obtructions* (Mousselli, 1981)

6.13 *Depressions*

Depressions menyebabkan pipa bengkok ke bawah karena ada rentang yang rendah karena penopang pipa sudah hilang (bisa jadi terbawa arus). Pada **Gambar 3**, bisa dilihat fenomena *Depressions*.



Gambar 3 Fenomena *depressions* (Mousselli, 1981)

Kedua fenomena ini bisa menyebabkan pipa menjadi rusak sehingga diperlukan pemilihan metode proteksi, ketebalan, dan diameter pipa yang tepat sehingga pipa bisa menahan tekanan yang terjadi. Selain itu, bila terdapat banyak *obstruction* dan *depressions* yang teridentifikasi dari awal, sebaiknya rute ini dihindari.

Erosi yang terus menerus dapat mengganggu kestabilan pipa karena akan mengurangi atau menambah sedimen yang ada di dekat pipa. Selain itu erosi yang terus menerus dapat menyebabkan proses korosi terjadi pada pipa.

6.14 Penggerusan (*Scouring*)

Menyebabkan penggesekan pipa secara terus menerus dan dapat menyebabkan kerusakan pada pipa dan perubahan pada kontur dasar laut seiring dengan waktu akibat proses penggesekan ketika erosi (*scour erosion*).

6.15 Gerakan dasar laut (*Seabed Movement*)

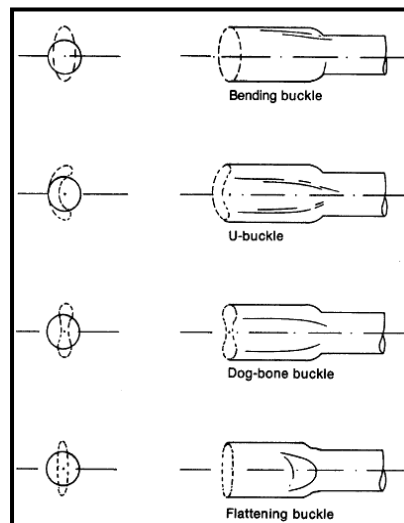
Menyebabkan tekanan di bawah lapisan dasar laut membesar sehingga bisa mengganggu ketahanan dan stabilitas pipa yang ditanam di dasar laut. Bila kondisi ini terjadi, sebaiknya pipa tidak ditanam di dasar laut dan pemilihan ketebalan pipa diatur agar bisa menahan tekanan.

6.16 *External Corrosion* pada logam

Pada dasarnya terjadi karena adanya air laut yang berfungsi sebagai elektrolit. Reaksi korosi tersebut menyebabkan permukaan logam berubah menjadi karat.

6.17 Tekanan hidrostatik (*Hydrostatic Pressure*)

Bisa menyebabkan proses *Buckling* (lekukan) yang terjadi karena gaya tekanan terlalu besar dan pipa tidak kuat menahan gaya tersebut sehingga bisa merubah struktur pipa yang tadinya bulat menjadi pipih, oval, dan tidak teratur seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Jenis buckling (Mousselli, 1981)

6.18 Offshore Installations

Pipa bawah laut sebaiknya tidak dipasang dekat dengan anjungan minyak dikarenakan akan ada resiko kerusakan dari penjatuhan benda seperti jangkar oleh kapal suplai (*supply vessels*) dan kapal konstruksi (*construction vessels*) serta resiko lainnya yaitu kemungkinan terjadi kebakaran, ledakan, atau kerusakan struktur bangunan pada anjungan minyak yang dapat melibatkan pipa bawah laut. Sebaiknya dicari rute alternatif untuk pemasangan pipa.

6.19 Existing Pipelines and Cables

Beberapa hal harus diperhatikan jika ingin meletakkan pipa secara bersilangan yaitu tidak boleh ada satupun pipa yang merusak pipa lainnya. Salah satu solusi untuk hal ini yaitu dengan membuat parit untuk pipa pertama kemudian pipa kedua bisa diletakkan bersilangan dengan pipa pertama. Keberadaan pipa atau kabel yang sudah lama mempengaruhi dalam hal instalasi pipa.

6.20 Dumping Areas

Karena dasar laut digunakan sebagai tempat pembuangan untuk berbagai macam material seperti limbah lumpur, limbah kimia, limbah nuklir, amunisi peninggalan masa perang, hingga barang yang sudah tidak terpakai seperti kapal maupun reaktor nuklir, maka sebaiknya daerah ini dihindari karena akan berpotensi untuk merusak pipa karena barang tersebut bisa terbawa arus dan menabrak pipa.

6.21 *Mining Activities*

Karena ada aktivitas pertambangan di dasar laut seperti pengerukan pasir dan batu kerikil, maka resiko pipa terkena dampak dari peralatan berat semakin bertambah. Bila pipa terkena oleh alat berat, bisa terjadi kerusakan seperti lekukan, goresan, ataupun penyok sehingga bila daerah ini sudah teridentifikasi dari awal, sebaiknya dihindari.

6.22 *Military Exercise Areas*

Akibat kegiatan militer yang berlangsung di dasar laut seperti ranjau yang dipasang sewaktu perang dan tidak diambil kembali ataupun di-nonaktifkan setelah perang selesai, kapal selam yang melakukan latihan dan bisa bernavigasi dekat dengan dasar laut untuk menghindari deteksi sonar, dan ada area yang digunakan untuk latihan artileri dan pengeboman menyebabkan resiko pada pipa menjadi lebih tinggi sehingga sebaiknya daerah ini dihindari.

6.23 *Natural Conservation Areas*

Terumbu karang (*Coral Reef*) menjadi salah satu variabel juga karena terumbu karang mempunyai resistensi terhadap keretakan yang besar sehingga sulit untuk dilakukan pembuatan parit (*trenching*) pada daerah ini. Selain itu terumbu karang memiliki peranan penting dalam sistem ekologis sehingga harus dikonservasi.

6.24 *Aturan lokal*

Di Indonesia, hal tersebut diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 68 Tahun 2011 tentang alur pelayaran laut. Pada pasal 45 diatur tentang bagaimana instalasi pipa yang diperbolehkan (metode proteksi seperti pemendaman).

6.25 *Environmental Sensitive Areas*

Gerakan pelestarian lingkungan mulai kuat dan aktif sehingga banyak keluhan yang ditujukan, oleh karena itu sudah ada tindakan yaitu untuk menghitung efek yang akan terjadi dan mengurangnya hingga menjadi minimum, selain itu, tindakan lainnya yaitu mencari rute alternatif dan mengatur waktu pembangunan pada musim yang tepat.

6.26 *Fishing Trawl*

Pukat yang menabrak pipa bisa menyebabkan lekukan pada pipa atau kerusakan pada lapisan (*coating*) pipa. Pukat yang ditarik setelah menabrak pipa juga bisa menyebabkan kerusakan yang lebih global pada pipa. Kemudian bila pukat

tersangkut di bawah pipa, kekuatan perusak akan sama besar dengan kekuatan untuk memutuskan kawat pukat.

6.27 Anchoring

Jika jangkar (*anchor*) jatuh dan ditarik (*dragged*), maka akan menyebabkan kerusakan pada bagian sepanjang permukaan pipa seperti kebocoran dan mungkin bisa terjadi hanya pada permukaan pipa. Dan jika jangkar langsung jatuh dan tidak ditarik langsung (*dropped*), kerusakan akan lebih dalam namun tidak lebih panjang. Pipa sebaiknya tidak diletakkan dekat dengan aktivitas penjatuhan jangkar (biasanya dekat dengan pelabuhan).

6.28 Sunken Vessel Impact

Beberapa kapal pernah tenggelam dan menabrak pipa bawah laut sehingga pipa tersebut rusak. Dasar laut di beberapa daerah masih dikotori oleh bagian kapal yang tenggelam, seringkali tidak ada catatan mengenai hal ini sehingga harus ditemukan melalui kegiatan survei. Hal ini akan membahayakan karena mungkin saja sisa reruntuhan kapal terbawa arus dan merusak pipa.

6.29 Economic Condition

Keadaan ekonomi dapat mempengaruhi dalam pemilihan ketebalan pipa, panjang pipa, metode pertahanan pipa terhadap bahaya (coating, trenching, dan burial), dan juga rute pipa karena semuanya memerlukan biaya.

7 Analisis Implikasi Pemasangan dan Operasional

Pada bagian ini akan dilakukan analisis implikasi sehingga dapat diklasifikasikan menjadi implikasi pada tahap pemasangan dan tahap operasional. Berikut akan diberikan tabel yang menunjukkan implikasi yang diakibatkan oleh setiap variabel yang telah dibahas sebelumnya (lihat **Tabel 1** dan **Tabel 2**).

7.1 Tahap pemasangan

Yaitu tahap ketika perencanaan pipa hingga pemasangan pipa terdiri dari pemilihan rute dan lokasi pipa, desain pipa (ketebalan, diameter, dan panjang pipa), instalasi pipa (pemilihan metode proteksi, metode pemasangan pipa, dan proses pemasangan pipa).

7.2 Tahap operasional

Yaitu tahap ketika pipa sudah beroperasi yaitu terdiri dari ketahanan pipa (regangan, goresan, dan lekukan pipa), stabilitas pipa (pergeseran dan ketidakstabilan pipa), dan korosi pipa (pengkaratan pipa).

Tabel 1 Keterangan Klasifikasi Implikasi dan Nilai

A	Rute dan lokasi pipa	0	Tidak Penting
B	Desain pipa	1	Kurang Penting
C	Instalasi pipa	2	Penting
D	Ketahanan pipa	3	Sangat Penting
E	Stabilitas pipa		
F	Korosi pipa		

Tabel 2 Tabel Variabel-Implikasi

NO	VARIABEL	IMPLIKASI					
		PEMASANGAN			OPERASIONAL		
	ALAM						
		A	B	C	D	E	F
1	<i>Hydrodynamic Forces</i>	1	2	2	1	3	0
2	<i>Storm</i>	0	0	2	0	2	0
3	<i>Vortex Shedding</i>	0	2	2	0	2	0
4	<i>Tide</i>	3	0	2	0	2	0
5	<i>Ice Loads</i>	0	0	0	1	0	0
6	<i>Earthquake</i>	0	0	0	1	1	0
7	<i>Very Hard Seabed</i>	0	0	3	0	0	0
8	<i>Very Soft Seabed</i>	0	3	0	0	2	0
9	<i>Sandwaves</i>	3	0	0	3	0	0
10	<i>Landslides</i>	0	0	0	2	0	0
11	<i>Subsidence</i>	0	0	0	2	0	0
12	<i>Obstructions dan Depressions</i>	3	2	2	3	0	0
13	<i>Erosion</i>	0	0	0	0	2	2
14	<i>Scouring</i>	0	0	0	2	0	0
15	<i>Seabed Movement</i>	0	2	2	3	2	0
16	<i>Sea Water</i>	0	0	0	0	0	3
17	<i>Hydrostatic Pressure</i>	0	3	2	3	0	0
	MANUSIA						
		A	B	C	D	E	F

18	<i>Offshore Installations</i>	3	0	0	1	0	0
19	<i>Existing Pipelines and Cables</i>	0	0	3	0	0	0
20	<i>Dumping Areas</i>	3	0	0	1	0	0
21	<i>Mining Activities</i>	3	0	0	1	0	0
22	<i>Military Exercise Areas</i>	3	0	0	1	0	0
23	<i>Natural Conservation Areas</i>	3	0	2	0	0	0
24	Aturan Lokal	0	0	3	0	0	0
25	<i>Environmental Sensitive Areas</i>	3	0	2	0	0	0
26	<i>Fishing Trawl</i>	0	2	0	2	0	0
27	<i>Anchoring</i>	3	2	0	2	0	0
28	<i>Sunken Vessel Impact</i>	0	0	0	1	0	0
29	<i>Economic Condition</i>	3	3	3	0	0	0

Nilai-nilai tersebut dibagi menjadi 4 yaitu nilai nol, satu, dua, dan tiga. Nilai nol yaitu tidak penting yang berarti variabel tidak mempunyai pengaruh, kemudian nilai satu yaitu kurang penting yang berarti variabel mempunyai pengaruh namun tidak besar, nilai dua yaitu penting yang berarti variabel mempunyai pengaruh, dan nilai tiga yaitu sangat penting yang berarti variabel mempunyai pengaruh yang sangat besar sehingga sangat penting untuk diperhatikan.

Meskipun dari beberapa variabel diatas ada yang mempunyai implikasi yang banyak seperti hidrodinamika laut, tidak berarti bahwa variabel tersebut paling penting karena ada juga variabel yang hanya mempunyai satu implikasi namun harus diperhatikan juga seperti aturan lokal karena bila tidak dipatuhi, dapat memberikan hambatan dalam pemasangan pipa bawah laut seperti larangan untuk pemasangan ataupun pembongkaran kembali setelah pipa dipasang.

Penilaian antara variabel dan implikasi dilakukan secara subjektif (tanpa wawancara dengan ahli) dengan tujuan untuk mempermudah melihat pengaruh dari masing-masing variabel terhadap masing-masing kelas implikasi. Untuk menentukan variabel mana yang paling penting, perlu dilakukan studi lebih lanjut dan dengan melakukan pembobotan.

8 Kesimpulan dan Saran

Pada bab ini, dituliskan kesimpulan yang merupakan jawaban terhadap tujuan penelitian yaitu tentang identifikasi variabel apa saja yang mempengaruhi dalam penentuan desain lokasi dan rute pipa bawah laut.

8.1 Kesimpulan

Variabel yang harus diperhatikan diklasifikasikan menjadi 2 yaitu variabel alam (merupakan variabel yang terjadi karena alam sekitar) dan variabel manusia (merupakan variabel yang terjadi akibat aktivitas manusia). Variabel alam diantaranya hidrodinamika laut, badai, *vortex shedding*, pasut, *ice loads*, gempa bumi, *very hard seabed*, *very soft seabed*, *sandwaves*, longsor, *subsidence*, *obstructions and depressions*, erosi, *scouring*, *seabed movement*, air laut, dan tekanan hidrostatik. Variabel manusia diantaranya *offshore installations*, *existing pipelines and cables*, *dumping areas*, *mining activities*, *military exercise areas*, *natural conservation areas*, aturan lokal, *environmental sensitive areas*, *fishing trawl*, *anchoring*, *sunken vessel impact*, dan *economic condition*.

Implikasi variabel terhadap pipa bawah laut terbagi dua yaitu implikasi pemasangan dan implikasi operasional. Tahap pemasangan yaitu tahap ketika perencanaan pipa hingga pemasangan pipa terdiri dari pemilihan rute and lokasi pipa, desain pipa (ketebalan, diameter, dan panjang pipa), instalasi pipa (pemilihan metode proteksi, metode pemasangan pipa, dan proses pemasangan pipa). Tahap operasional yaitu tahap ketika pipa sudah beroperasi yaitu terdiri dari ketahanan pipa (regangan, goresan, dan lekukan pipa), stabilitas pipa (pergeseran dan ketidakstabilan pipa), dan korosi pipa (pengkaratan pipa). Setiap variabel mempunyai nilai-nilai terhadap setiap implikasi yang didapatkan secara subjektif agar dapat mempermudah dalam melihat pengaruh variabel yang ada terhadap tahap pemasangan maupun operasional.

Adapun kesimpulan lain yang didapat setelah dilakukan pembahasan yaitu variabel yang telah teridentifikasi dan dianalisis merupakan informasi dasar untuk melakukan penentuan desain lokasi dan rute pipa bawah laut.

8.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya dengan ruang lingkup serupa adalah:

- 1) Menambah informasi secara detail pada setiap implikasi yang terjadi, agar dapat dilakukan penanganan khusus pada setiap implikasi yang ada.
- 2) Mencari korelasi antara variabel yang ada dan apakah korelasi tersebut dapat membuat implikasi baru atau tidak.

9 Daftar Pustaka

- [1] ABS. (2006). *ABS: Guide For Building And Classing Subsea Pipeline Systems*. American Bureau of Shipping, Houston, USA.
- [2] Blankenburgh, J. C. (1987). *Marine Geodetic Contributions to Ocean Industry*. University of Trondheim, Norway.

- [3] De Jong, C. D., Lachapelle, G., Skone, S., and Elema, I. A. (2003). *Hydrography*. Delft University Press, Delft, Netherlands.
- [4] DNV. (2004). *Guidelines DNV-GL-15: Erosion and Corrosion in Piping Systems for Sea Water*. Det Norske Veritas, Norway.
- [5] DNV. (2013). *Offshore Standard DNV-OS-F101: Submarine Pipeline Systems*. Det Norske Veritas, Norway.
- [6] EIA. (2014). *Indonesia Analysis Brief*. USA Energy Information Administration, Department of Energy, Washington DC.
- [7] Kementerian Perhubungan. (2011). *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 68 Tahun 2011 tentang Alur Pelayaran di Laut*. Jakarta.
- [8] Lee, J. (2007). *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*. JYL Pipeline Consultant, Houston, Texas.
- [9] Lekkerkerk, H. J., Velden, R. V. D., Haycock, T., Jansen, P., Vries, R. D., Waalwijk, P. V., Beemster, C. (2006). *Handbook of Offshore Surveying Book One*. Clarkson Research Service, London.
- [10] Mian, M. A. (1992). *Petroleum Engineering: Handbook for the Practicing Engineer*. PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma. Pp 365.
- [11] Mousselli, A. H. (1981). *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Penwell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma.
- [12] Palmer, A. C. & King, R. A. (2004). *Subsea Pipeline Engineering*. Penwell Corporation, Tulsa, Oklahoma.
- [13] Poerbandono & Djunarsjah, E. (2005). *Survei Hidrografi*. Refika Aditama, Bandung.