

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya mengenai aliran fluida melewati pipa sehingga terjadi VIV sudah dilakukan oleh C.H.K Williamson (2004). Ia melakukan penelitian tentang *vortex-induced vibration*. Dari penelitian ini, dirangkum hasil dan penemuan fundamental dari *vortex-induced vibration* yang telah dilakukan 2 dekade terakhir dengan mengungkap konsep terbaru mengenai *vortex-induced vibration* dengan memfokuskan secara khusus pada dinamika *vortex* dan perpindahan energi yang menimbulkan getaran.

Susan B. Swithenbank (2008) melakukan penelitian mengenai pengaruh bilangan Reynold pada silinder yang fleksibel dengan respon data yang didapat dari *vortex-induced vibration*. Respon dari amplitudo dan frekuensi non-dimensional pada silinder terhadap *vortex-induced vibration* dari eksperimen laboratorium dan eksperimen lapangan, menunjukkan tren yang signifikan dengan peningkatan bilangan Reynold dari  $10^3$  menjadi  $2 \times 10^5$ . Dari perbedaan eksperimen tersebut, dilakukan analisa menggunakan data yang kompleks dengan lebar variasi dalam parameter fisik dan sistem, termasuk panjang hingga diameter rasio dari 82 menjadi 4236, dengan tegangan dan kekakuan lentur mendominasi frekuensi alami pada pipa, sub-kritis dan kritisnya bilangan Reynold, koefisien redaman yang berbeda, ombak yang tenang dan ombak yang besar dan menyebabkan getaran, *mode number* dari 1-25 dan juga rasio massa yang berbeda.

Shade Rahmawati (2012) melakukan penelitian Studi Numerik Interaksi *Vortex-Induced Vibrations* (VIV) Antara Empat Silinder Tegak Fleksibel dengan Konfigurasi *In-Line Square* dalam Aliran Uniform. Dalam penelitian ini ditemukan bahwa VIV dapat menyebabkan berkurangnya umur operasi suatu *equipment* dan dapat berakibat pada kegagalan operasi. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami mekanisme terjadinya VIV dan rangkaian interaksi fluida-struktur dalam rangka meningkatkan kualitas desain *equipment*. Penelitian ini menyajikan studi numeris tiga dimensi (3-D) aliran laminar di sekitar empat silinder tegak fleksibel dalam konfigurasi *in-line square*. Penelitian difokuskan pada pengaruh spacing ratio ( $S^*x$  dan  $S^*y$ ), aspect ratio ( $L/D$ ), dan Reynold number ( $Re$ ) terhadap karakteristik aliran tiga dimensi di sekitar silinder. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa pada *small spacing ratio*, nilai koefisien gaya

*lift* ( $C_L$ ) dan koefisien gaya *drag* ( $C_D$ ) cenderung mengecil karena mendapat pengaruh redaman dari silinder lain, namun kemudian kembali normal pada konfigurasi di atas *critical spacing ratio* 3.5D. Perpindahan silinder yang terjadi sangat kecil dengan A/D maksimum searah aliran sebesar 0.00053, dan A/D maksimum tegak lurus aliran sebesar 0.0003. Variasi *aspect ratio* memberikan efek penurunan nilai  $C_L$  pada *downstream cylinder* pada *spacing ratio* 3.5-5. Sedangkan pengaruh variasi *Reynold number* yang semakin besar memberikan nilai  $C_D$  dan  $C_L$  yang semakin menurun, dan sebaliknya besarnya *displacement* silinder yang terjadi semakin meningkat. Pada  $Re=100$  dan  $Re=200$ , VIV yang terjadi pada *upstream cylinder* adalah *in-line vibrations*, sedangkan *downstream cylinder* mengalami *cross-flow vibrations*. Pada  $Re=300$ , baik *upstream* maupun *downstream cylinder* mengalami *in-line vibrations*.

Ming Zhao et al (2013) melakukan penelitian pada silinder 2D yang kemudian terdapat aliran yang melaluinya dengan metode numerik. Aliran tersebut berupa aliran gabungan antara aliran tetap dan aliran osilasi (*transient*). Pada penelitian ini disimpulkan bahwa rasio aliran mempengaruhi silinder secara signifikan. Dengan meningkatnya *keugelant-carpenter number* aliran di sekitar silinder, menyebabkan peningkatan amplitudo getaran pada silinder.

Hong Jun Zhu et al (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh aliran numerik di sekitar pipa bawah laut dengan bantuan *spoiler* dan arus yang menyebabkan terjadinya pengikisan tanah di bawah pipa. Diameter pipa bawah laut yang digunakan  $D = 0.51$  m. Hasilnya *vortex* yang terjadi akibat aliran arus tidak mengenai pipa melainkan melewati bagian dari *spoiler* yang dipasang di atas pipa, sehingga *vortex* yang timbul tidak signifikan.

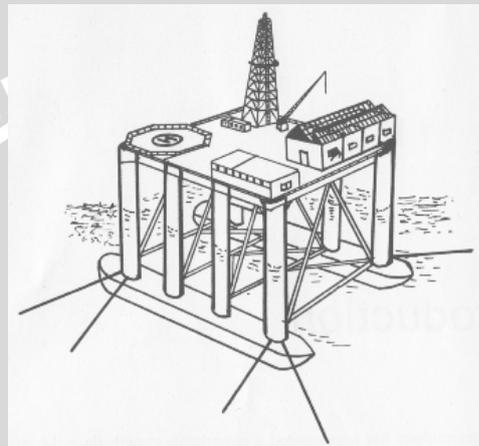
M. Mobasher Tofa et al (2013) melakukan penelitian tentang studi experimental dan studi numerik terhadap *vortex-induced vibration* pada silinder. Penelitian ini membandingkan perhitungan secara numerik dan experimental semu dengan ANSYS CFX. Hasilnya puncak amplitudo dari CFD lebih kecil nilainya dibandingkan dengan eksperimen nyata.

## 2.2 Anjungan (Platform)

Anjungan lepas pantai adalah struktur yang dibangun di lepas pantai untuk mendukung proses eksplorasi bahan tambang. Biasanya anjungan lepas pantai memiliki sebuah *rig* pengeboran yang berfungsi untuk menganalisa sifat geologis *reservoir* maupun untuk membuat lubang yang memungkinkan pengambilan cadangan minyak

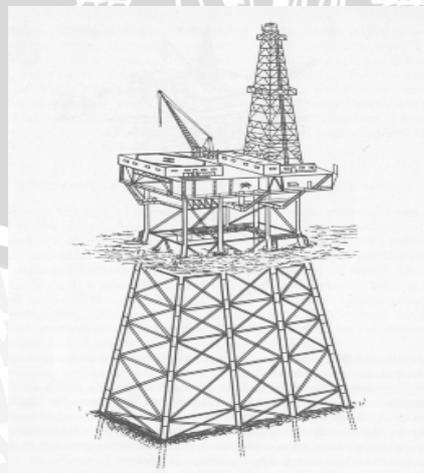
bumi atau gas alam dari *reservoir* tersebut.

Struktur anjungan yang digunakan dibagi dalam beberapa bagian besar yaitu anjungan *mobile* dan anjungan *fixed drilling*. Eksplorasi pengeboran biasanya disertai dengan *mobile drilling rigs*. *Mobile drilling rigs* dilengkapi dengan anjungan *submersible* yang biasanya terbatas pada daerah perairan dangkal, anjungan *jackup*, kapal pengebor atau kapal tongkang dan anjungan *semisubmersible drilling*. Pada gambar 2.1 menjelaskan anjungan *semisubmersible* yang mampu beroperasi pada kedalaman 1000 kaki dan mampu bertahan pada beberapa kondisi cuaca dengan baik.



Gambar 2.1 *Semisubmersible Platform*  
Sumber : Turgut Sarpkaya (1981:2)

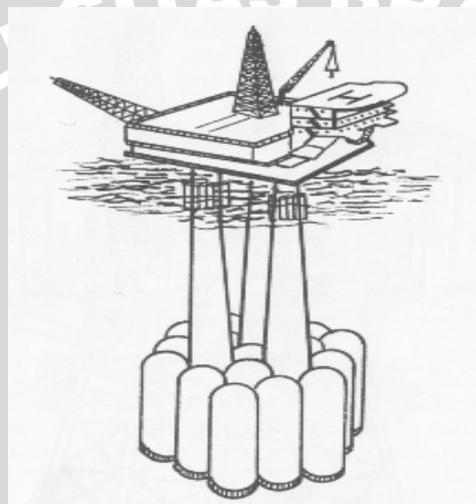
Beberapa anjungan menggunakan perpanjangan kaki untuk memberikan gaya apung selama pemasangan instalasi. Anjungan *jacket* biasanya digunakan di laut selatan yang biasanya terdapat ombak mencapai tinggi 100 kaki.



Gambar 2.2 Anjungan *Jacket*  
Sumber : Turgut Sarpkaya (1981:3)

Gambar 2.2 merupakan anjungan *jacket* yang terdiri dari bidang rangka struktur dengan tiang – tiang yang terpancang sebagai penopang. Konsep ekstensi ini mencakup bidang rangka struktur yang menjadi gabungan tiang–tiang pelindung.

Anjungan *gravity* adalah jenis lain dari anjungan yang menggunakan prinsip *fixed structure* yang bergantung pada berat yang sangat besar sebagai penyeimbang alih-alih menggunakan tiang-tiang pancang sebagai penyeimbangannya. Gambar 2.3 merupakan konstruksi anjungan *gravity*, biasanya terbuat dari beton yang memiliki ruangan terbuka yang luas, dimana memiliki kapasitas penyimpanan minyak yang sangat signifikan. Anjungan *gravity* dikategorikan berdasarkan besar dimensi secara horizontal.



Gambar 2.3 Anjungan *Gravity*  
Sumber : Turgut Sarpkaya (1981:4)

## 2.3 Pipa

Pipa adalah media tempat mengalirnya fluida dari satu unit ke unit lainnya. Secara umum karakteristik pipa ditentukan berdasarkan material penyusunnya. Peletakannya pun dilihat dari kebutuhan fluida tersebut. Pipa dapat diletakan di tempat terbuka, di dalam tanah maupun di dalam perairan. Dengan demikian material dari pipa juga sangat penting sebagai penentu peletakan pipa serta fluida yang dialirkan.

### 2.3.1 Macam - Macam Pipa

Berdasarkan material penyusunnya, pipa dapat dibedakan sebagai berikut :

#### 1. Pipa GIP (*Galvanized Iron Pipe*)

GIP atau pipa besi galvanis adalah pipa baja yang telah dilapisi dengan lapisan logam seng dengan proses yang disebut *Galvanizing*. Selama proses *galvanizing*, baja

direndam dalam Zinc cair untuk memastikan kekerasan material dan permukaan yang halus di atasnya. Ketahanan korosi alami dari Zinc dapat mencegah korosi dalam jangka panjang baik dalam lingkungan *indor* ataupun *outdor*. Pipa GIP digunakan untuk instalasi air bersih dingin saja, tidak dianjurkan untuk pipa air panas.



Gambar 2.4 *Galvanized Iron Pipe*  
Sumber : *Anonymous 1* (2014)

## 2. Pipa PVC (*Polyvinyl Chloride*)

Pipa PVC adalah pipa plastik yang terbuat dari gabungan materi *vinyl* yang menghasilkan pipa ringan, kuat, tidak berkarat, dan tahan lama. Pipa ini hanya digunakan untuk instalasi air dingin saja.



Gambar 2.5 Pipa *Polyvinyl Chloride*  
Sumber : *Anonymous 2* (2014)

## 3. Pipa HDPE (*High-Density-Polyethylene*)

Pipa HDPE adalah pipa yang terbuat dari bahan *polyethylene* dengan kepadatan tinggi sehingga jenis pipa yang dihasilkan dapat menahan daya tekan yang tinggi. Karakteristik pipa HDPE adalah kuat, lentur atau fleksibel, dan tahan terhadap bahan kimia.



Gambar 2.6 Pipa *High-Density-Polyethylene*  
Sumber : *Anonymous 3* (2014)

#### 4. Pipa Baja (*Steel Pipe*)

Pipa baja digunakan sebagai jalur pipa untuk hasil penambangan energi dari alam, sebagai contoh : air, gas, minyak, dan cairan mudah terbakar lainnya. Pipa jenis ini juga biasanya digunakan untuk menyalurkan energi alam dari bawah laut yang biasa disebut dengan *riser*.



Gambar 2.7 Pipa Baja  
Sumber : *Anonymous 4* (2014)

#### 5. Pipa Tembaga

Pipa tembaga tahan lama dan tahan terhadap korosi, dan karena itu pipa jenis ini biasa digunakan untuk menyuplai air. Ada dua jenis umum pipa tembaga yaitu tembaga kaku dan tembaga fleksibel.



Gambar 2.8 Pipa Tembaga  
Sumber : *Anonymous 5* (2014)

## 6. Pipa Beton

Pipa beton berupa beton *precast*, biasa digunakan sebagai drainase. Pipa beton terbagi menjadi 2 tipe yaitu *heavy duty* dan *light duty*.



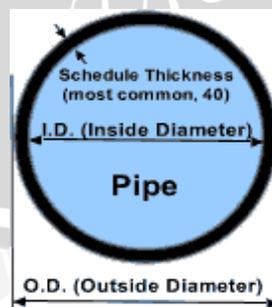
Gambar 2.9 Pipa Beton  
Sumber : *Anonymous 6* (2014)

### 2.3.2 Dimensi Pipa

Pipa memiliki banyak ukurn tergantung pada tempat dan penggunaannya. Satuan ukurannya pun juga beragam. Terdapat 2 jenis metode yang sering digunakan untuk menentukan satuan pipa:

1. NPS (*Nominal Pipe Size*) : merupakan ukuran standar Amerika Utara, dengan ukurannya berdasarkan *inch*.
2. DN (*Diameter Nominal*) : merupakan penunjukkan ukuran Eropa, dengan ukurannya berdasarkan *millimeter*.

Hal lain yang perlu diperhatikan pada saat pemilihan pipa selain satuan yang berbeda pada setiap negara, adalah *schedule*. *Schedule* merupakan suatu penunjukkan untuk mengetahui ukuran ketebalan dinding pipa atau biasa disebut dengan *thickness*.



Gambar 2.10 Diagram Penentuan Ukuran Pipa  
Sumber : Mohindar L. Nayyar, P.E, (2002:32)

Macam – macam ukuran pipa yang biasa digunakan pada industri :

1. *Large bore pipe* : pipa dengan ukuran lebih dari 2 *inch*.

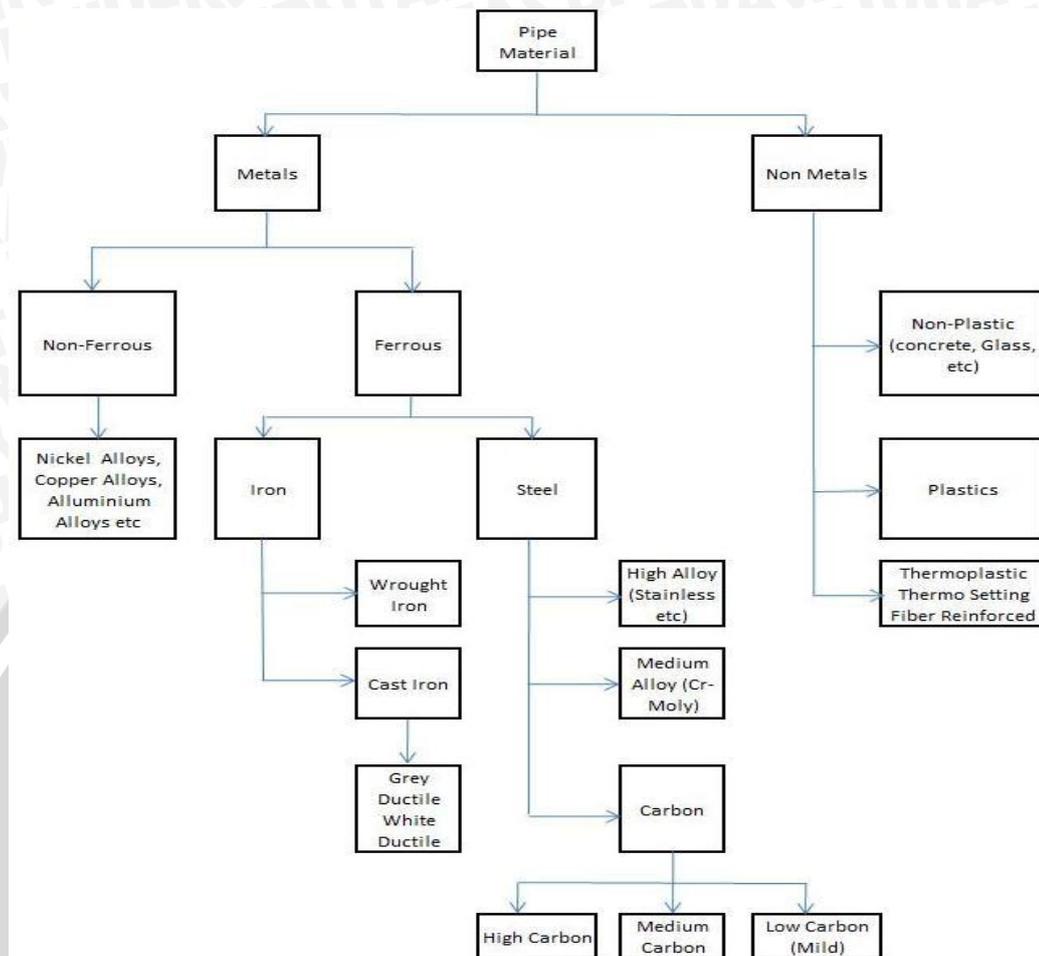
2. *Small bore pipe* : pipa dengan ukuran kurang dari 2 inch.
3. *Tubing* : pipa yang mempunyai ukuran sampai dengan 4 inch, tetapi mempunyai ukuran ketebalan dinding pipa yang lebih kecil jika di bandingkan dengan *large bore* dan *small bore*.

Tabel 2. 1 Konversi satuan pipa dan wall

Diameter							
Nominal Size		Outside Diameter		Nominal Size		Outside Diameter	
Millimetres	Inches	Millimetres	Inches	Millimetres	Inches	Millimetres	Inches
6	¼	10.3	0.405	350	14	355.6	14.000
8	¼	13.7	0.540	400	16	406.4	16.000
10	⅜	17.1	0.675	450	18	457.2	18.000
15	½	21.3	0.840	500	20	508.0	20.000
20	¾	26.7	1.050	550	22	558.8	22.000
25	1	33.4	1.315	600	24	609.6	24.000
32	1¼	42.2	1.660	650	26	660.4	26.000
40	1½	48.3	1.900	700	28	711.2	28.000
50	2	60.3	2.375	750	30	762.0	30.000
65	2½	73.0	2.875	800	32	812.8	32.000
80	3	88.9	3.500	850	34	863.6	34.000
90	3½	101.6	4.000	900	36	914.4	36.000
100	4	114.3	4.500	950	38	965.2	38.000
125	5	141.3	5.563	1000	40	1016.0	40.000
150	6	168.3	6.625	1050	42	1066.8	42.000
200	8	219.1	8.625	1100	44	1117.6	44.000
250	10	273.0	10.750	1150	46	1143.0	46.000
300	12	323.8	12.750	1200	48	1219.2	48.000
Millimetres	Inches	Millimetres	Inches	Millimetres	Inches	Millimetres	Inches
1.73	.068	5.16	.203	8.74	.344	21.95	.864
2.24	.088	5.49	.216	9.27	.365	22.23	.875
2.31	.091	5.54	.218	9.53	.375	23.01	.906
2.41	.095	5.56	.219	10.31	.406	23.83	.938
2.77	.109	5.74	.226	10.97	.432	24.61	.969
2.79	.110	6.02	.237	11.07	.436	25.40	1.000
2.87	.113	6.35	.250	11.13	.438	26.19	1.031
2.90	.114	6.55	.258	11.91	.469	27.79	1.094
3.02	.119	7.01	.276	12.70	.500	28.58	1.125
3.07	.121	7.04	.277	14.02	.552	29.36	1.156
3.20	.126	7.09	.279	14.27	.562	30.96	1.219
3.38	.133	7.11	.280	15.09	.594	32.54	1.281
3.56	.140	7.14	.281	15.88	.625	33.32	1.312
3.68	.145	7.62	.300	16.66	.656	35.71	1.406
3.91	.154	7.80	.307	17.12	.674	38.10	1.500
3.96	.156	7.92	.312	17.48	.688	44.45	1.750
4.55	.179	8.08	.318	18.26	.719	50.80	2.000
4.78	.188	8.18	.322	19.05	.750		
4.85	.191	8.38	.330	20.62	.812		
5.08	.200	8.56	.337	21.44	.844		

Sumber : Louis Gary Lemit (1981:21)

### 2.3.3 Baja



Gambar 2.11 Bagan Klasifikasi Material Pipa  
Sumber : George A. Antaki (2005:50)

Baja merupakan paduan kristal dari besi, karbon, beberapa elemen lain. Baja mengeras pada saat didinginkan secara cepat di atas temperatur kritisnya. Hal ini menyebabkan baja tidak mengandung terak dan dapat dicor, digiling ataupun ditempa. Karbon merupakan bahan yang sangat penting karena memiliki kemampuan untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan dari baja. Sudah banyak baja yang digunakan untuk bahan gabungan pada logam. Meskipun baja dapat dicor menjadi cetakan untuk menyesuaikan bentuk tertentu dengan ukuran yang kompleks, kebanyakan baja dicor untuk logam batangan yang biasa digunakan untuk pembuatan pipa, lembaran baja, atau bentuk yang terstruktur.

Baja diklasifikasikan menurut unsur paduan yang dikandung. Karbon merupakan unsur yang paling penting, oleh karena itu, baja diklasifikasikan dari karbon yang dikandung. Baja karbon biasa, mengandung besi dan karbon sebagai bahan utama dan diklasifikasikan sebagai baja 10XX. Dua angka pertama sebagai kode bahwa itu

merupakan baja karbon biasa. Angka ketiga dan keempat merupakan kandungan karbon dalam persen. Sebagai contoh, 1035 adalah baja karbon biasa dengan kandungan karbon 35%. Terdapat variasi dari jumlah karbon yang dikandung dari baja karbon lainnya, namun kandungannya sangat sedikit sehingga tidak mempengaruhi properti fisik dari baja karbon itu sendiri.

Baja paduan (alloy steel) diklasifikasikan oleh *Society of Automotive Engineers* (SAE) dan *American Iron and Steel Institute* (AISI). Beberapa petunjuk mengenai standar yang ditetapkan terdapat pada tabel. Baja secara luas dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. *Carbon steel*
  - a. *Low carbon* – kurang dari 0.30%
  - b. *Medium carbon* – 0.30% - 0.70%
  - c. *High carbon* – 0.70% - 2% (nominal kandungan tertinggi biasanya 1.4%)
2. *Alloy steel*
  - a. *Low alloys* – jumlah total unsur paduan khusus kurang dari 8.0%
  - b. *Hight alloys* – jumlah total unsur paduan khusus lebih dari 8.0%

*Low-carbon steels* biasa digunakan untuk pembuat kabel, bentuk yang terstruktur, dan mesin pembuat sekrup, contoh sekrup, *nut*, dan baut. *Medium-carbon steels* biasa digunakan untuk pembuatan rel, poros, *gear* dan bagian yang membutuhkan kekuatan yang tinggi dengan rata-rata kekerasan tinggi pula. *High-carbon steels* biasa ditemukan sebagai alat pemotong seperti pisau, mata bor, tap, dan untuk properti yang membutuhkan ketahanan abrasi.

Microstruktur dari *medium-carbon cast steel* dapat dilihat dari gambar 2.12. Area yang terang merupakan area dari *ferrite* dan area yang gelap merupakan *pearlite*. Butir struktur dari baja cor kebanyakan berbentuk besar karena temperatur pengecoran dengan logam pada temperatur tinggi dilanjutkan dengan pendinginan yang relatif lambat.



Gambar 2.12 Struktur *Medium-Carbon-Steel*. Pembesaran X 200  
Sumber : Mohinder L. Nayyar (2000:52)

Lebih dari 50% baja cor adalah *medium-carbon steel*. Baja cor digunakan pada industri transportasi, industri permesinan, dan industri konstruksi karena memiliki keuletan dan kekuatan tarik yang baik pada kondisi normal berkisar antara 60.000–100.000 psi (400 – 690 MPa). Unsur kimia pada *medium-carbon steel* adalah sebagai berikut: karbon, 0.21%-0.46%, :magnesium, 0.55%-0.73%; silicon, 0.28%-0.45%; *phosphorus* dan sulfur secara bersamaan, kurang dari 0.1% dan juga *ferrite*.

Baja paduan (*alloy steel*), dalam produksi baja hanya tehitung sekitar 15%, banyak digunakan karena memiliki karakteristik yang lebih unggul dibandingkan dengan baja karbon biasa. Meskipun tidak semua baja paduan memiliki karakteristik yang unggul tersebut, keuntungan dari penggunaan baja paduan (*alloy steel*) perlu dipertimbangkan.

1. Perbaikan pada keuletan tanpa memperkecil kekuatan tariknya.
2. Kemampuan untuk mengeras dengan pendinginan cepat menggunakan minyak atau udara yang mengandung air, dapat mengurangi kemungkinan retak ataupun melengkung.
3. Kemampuan untuk mempertahankan propertis fisik pada temperature yang tinggi.
4. Kerentanan yang rendah pada korosi dan pemakaian yang berlebih, tergantung pada paduannya.

#### 2.4 Arus Laut

Arus laut merupakan gerakan massa air yang sangat luas yang terjadi pada seluruh lautan di dunia. Berdasarkan temperturnya air laut dibagi menjadi arus panas dan arus dingin. Arus panas terjadi bila temperatur air laut tersebut lebih tinggi dari pada temperatur air laut yang didatanginya atau arus laut yang bergerak dari daerah panas ke daerah dingin. Arus dingin terjadi bila temperatur air laut itu lebih rendah dari temperatur air laut yang didatanginya atau arus yang bergerak dari daerah dingin ke daerah panas.

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya arus adalah angin, perbedaan permukaan air laut, perbedaan temperatur, perbedaan salinitas dan kepadatan air, pasang surut dan bentuk pantai.

##### 1. Arus Yang Disebabkan Karena Tiupan Angin

Arus yang disebabkan karena tiupan angin merupakan arus permukaan yang disebut *drift*. Karena rotasi bumi dan bentuk bumi yang bulat, arah arus biasanya menyimpang kearah kanan untuk belahan bumi utara dan kekiri untuk belahan bumi

selatan. Arah arus membentuk sudut  $45^\circ$  dengan arah angin yang mendorongnya.

## 2. Arus Yang Disebabkan Perbedaan Ketinggian Permukaan Air Laut

Arus laut yang disebabkan perbedaan ketinggian permukaan air laut bisa juga disebabkan karena perbedaan curah hujan, dan penguapan antara lautan dan lautan pedalaman, misalnya arus dari Samudera Atlantik ke Laut Tengah, atau dari Samudra Hindia ke Laut Merah

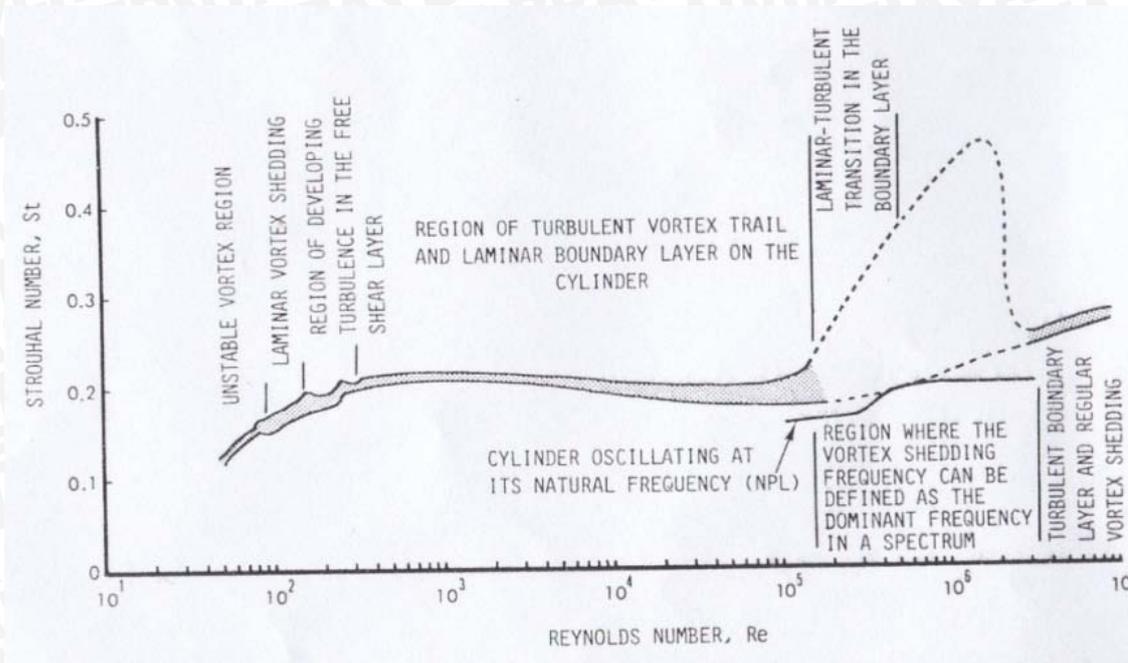
## 3. Arus Yang Disebabkan Karena Perbedaan Temperatur, Salinitas Dan Kepadatan Air.

Perbedaan temperatur menyebabkan perbedaan kepadatan air, yang mengakibatkan perbedaan salinitas. Selain menyebabkan terjadinya arus, air yang lebih padat dan besar salinitasnya akan turun dan mengalir dibagian bawah sebagai arus bawah. Sebaliknya air yang ringan dan kurang padat akan muncul dan bergerak dibagian permukaan sebagai arus permukaan.

Dari daerah kutub arus bawah mengalir ke daerah ekuator, sebaliknya dari daerah ekuator arus permukaan mengalir ke daerah kutub sehingga terjadi kesetimbangan hidrostatik yang menyebabkan kepadatan dan temperatur air hampir sama untuk seluruh perairan.

### 2.5 *Vortex-Induced Vibration* (VIV)

*Vortex-Induced Vibration* (VIV) adalah fenomena bergetarnya suatu struktur yang disebabkan adanya pelepasan *vortex* yang frekuensinya sama atau hampir sama dengan frekuensi natural struktur yang dilewati oleh fluida tersebut. *Vortex* adalah pusaran fluida tertutup yang berputar terhadap suatu titik sebagai pusatnya. Jadi *Vortex-Induced Vibration* bergantung pada frekuensi *vortex* yang terbentuk. Bentuk aliran *vortex* ditentukan oleh bilangan Reynold. Bilangan Reynold berbanding lurus dengan kecepatan fluida yang melewati struktur. Bilangan Strouhal menunjukkan hubungan antara frekuensi pelepasan *vortex*, diameter silinder, dan kecepatan aliran yang berada disekitar silinder. Gambar 2.13 menunjukkan hubungan bilangan Strouhal dengan bilangan Reynold.



Gambar 2.13 Hubungan Bilangan Strouhal - Reynold Untuk Silinder Bulat  
 Sumber : Turgut Sarpkaya (1981:58)

Fenomena VIV yang terjadi di sekitar struktur dapat dari nilai parameternya.

Parameter terjadinya VIV adalah sebagai berikut (A. H. Techet, 2004) :

1. Bilangan Strouhal (A. W. Ariyanti 2010:11) (2-1)

$$St = \frac{f_s d}{U}$$

Keterangan :  $f_s$  = Frekuensi Pelepasan *Vortex* (Hz)  
 $St$  = Strouhal Number  
 $U$  = Kecepatan Partikel (m/s)  
 $D$  = Diameter Struktur (m)

2. Bilangan Reynold (A. W. Ariyanti 2010:11) (2-2)

$$Re = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu}$$

Keterangan :  $v_s$  = kecepatan fluida (m/s)  
 $L$  = panjang karakteristik (m)  
 $\mu$  = viskositas absolut fluida dinamis  
 $\nu$  = viskositas kinematik fluida:  $\nu = \mu / \rho$   
 $\rho$  = kerapatan (densitas) fluida (kg/m<sup>3</sup>)

3. Frekuensi pelepasan *vortex* (A. W. Ariyanti 2010:11) (2-3)

$$f_s = \frac{St U}{D}$$

Keterangan :  $f_s$  = Frekuensi Pelepasan *Vortex* (Hz)  
 $St$  = Strouhal *Number*  
 $U$  = Kecepatan Partikel (m/s)  
 $D$  = Diameter Struktur (m)

4. *Kaulegan-Carpenter* (A. W. Ariyanti 2010:11) (2-4)

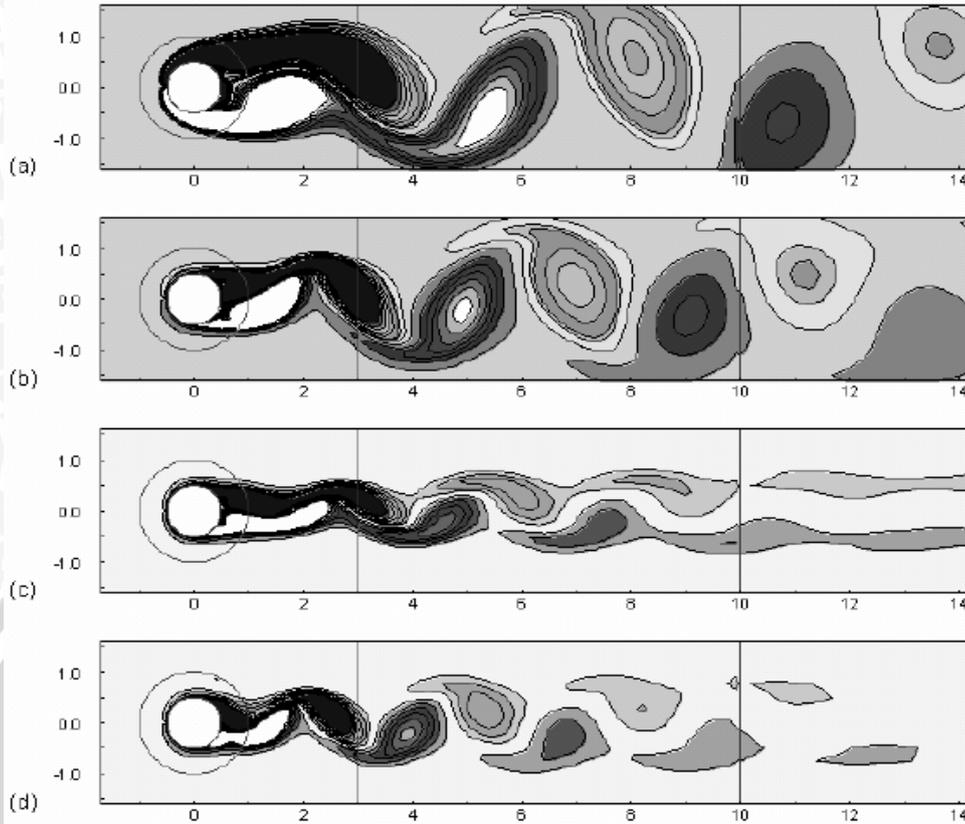
$$K_c = \frac{UT}{D}$$

Keterangan :  $K_c$  = *Kaulegan-Carpenter Number*  
 $U$  = Kecepatan Partikel (m/s)  
 $T$  = Periode (s)  
 $D$  = Diameter Struktur (m)

*Kaulegan-Carpenter* harus diketahui harganya untuk mengetahui signifikan tidaknya VIV yang terjadi. Jika  $K_c > 5$  maka VIV yang terjadi cukup signifikan dan sebaliknya jika  $K_c < 5$  maka VIV yang terjadi tidak signifikan. Jika  $K_c > 30$  dan kecepatan arusnya lebih besar dibandingkan kecepatan gelombang maka pelepasan *vortex* terjadi pada saat aliran arusnya *steady*. (A. W. Ariyanti 2010)

#### 2.4.1 *Vortex*

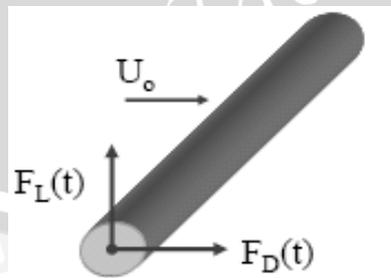
Ketika suatu aliran fluida membentur permukaan suatu struktur, maka tekanan aliran fluida yang berupa tekanan aliran bebas meningkat menjadi tekanan stagnan pada suatu nilai titik tertentu. Tekanan tinggi yang terpusat pada permukaan struktur yang dilewati mendorong aliran fluida untuk mengikuti kontur dari struktur dan membentuk lapisan batas pada kedua sisi. Gaya tekan ini disebabkan oleh viskositas fluida yang tidak dapat mengikuti bentuk permukaan struktur hingga ke bagian belakang secara utuh, sehingga terpisah pada kedua sisi struktur dan menjadi dua lapisan yang bergerak bergeser. Dua lapisan yang bergeser ini memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan aliran fluida disekitarnya, sehingga lapisan ini menggulung berubah menjadi pusaran. Bentuk dari aliran fluida dipengaruhi oleh bilangan Reynold. Gambar 2.14 menjelaskan bagaimana fenomena bentuk aliran terbentuk berdasarkan bilangan Reynoldnya.



Gambar 2.14 (a) Bentuk vortex pada tahap *steady* untuk  $Re = 100$ ; (b) Bentuk vortex pada tahap *steady* untuk  $Re = 1 \times 10^5$ ; (c) Bentuk vortex pada tahap *steady* untuk  $Re = 1 \times 10^6$ ; (d) Bentuk vortex pada tahap *steady* untuk  $Re = 1 \times 10^7$

Sumber : Ching Chen, (2004), Purwanti (2008), A. W. Ariyanti (2010:10)

Pelepasan *vortex* dapat menimbulkan gaya gesek yang mempunyai arah sejajar dengan silinder. Karena pergantian *vortex wake* (*Karman street*) maka gaya gesek terjadi pada dua kali frekuensi pelepasan *vortex*. (A. W. Ariyanti 2010)



Gambar 2.15 Gaya Angkat dan Gesek Pada Silinder  
 Sumber : A. H. Techet (2004), A. W. Ariyanti (2010:15)

Persamaan untuk menghitung gaya gesek adalah sebagai berikut (Mousseli, 1981)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho AV^2 C_D \quad (\text{A. W. Ariyanti 2010:15}) \quad (2-5)$$

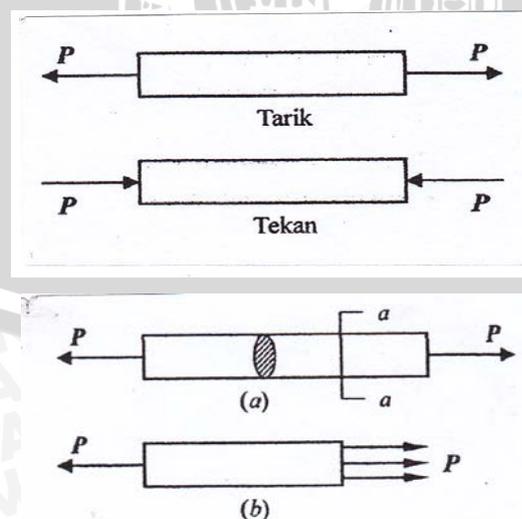
Keterangan :  $F_D$  = Gaya gesek per satuan panjang pipa (N)  
 $C_D$  = Koefisien gesek  
 $A$  = Luas penampang riser ( $m^2$ )  
 $\rho$  = Densitas fluida ( $kg/m^3$ )  
 $V$  = Kecepatan fluida mengalir (m/s)

## 2.6 Tegangan-Regangan

Gaya (*force*) yang bekerja pada suatu bagian struktur disebut beban (*load*). Gaya yang melawan (*counteracting*) efek dari beban tersebut disebut reaksi (*reactions*). Beban dan reaksi secara umum dikategorikan sebagai eksternal dan internal, statis atau dinamis. Kemudian didefinisikan lebih lanjut terhadap penampang yang bersentuhan. Gaya atau beban tersebut menyebabkan tegangan dan regangan sebagai bentuk reaksi bagian struktur atau struktur secara keseluruhan yang bersentuhan.

### 2.5.1 Tegangan (*Stress*)

Konsep dasar tegangan dan regangan dapat diilustrasikan dalam bentuk yang paling mendasar dengan meninjau sebuah batang prismatis yang mengalami gaya aksial. Batang prismatis adalah sebuah elemen struktur lurus yang mempunyai penampang konstan di seluruh panjangnya. Gaya aksial adalah beban yang mempunyai arah yang sama dengan sumbu elemen, sehingga mengakibatkan terjadinya tarik atau tekan pada batang. Pembebanan batang secara aksial dapat dilihat pada gambar 2.16 di bawah ini.



Gambar 2.16 Pembebanan Batang Secara Aksial  
 Sumber : James M. Gere, Timoshenko (1990:3)

Sebuah batang dengan luas penampang konstan, dibebani pada kedua ujungnya dengan sepasang gaya linier dengan arah saling berlawanan yang berimpit pada sumbu longitudinal batang dan bekerja melalui pusat penampang melintang masing-masing. Agar memenuhi keseimbangan statis, besarnya gaya-gaya harus sama. Gaya-gaya diarahkan menjauhi batang maka batang tersebut ditarik, sedangkan gaya-gaya yang diarahkan pada batang maka batang tersebut ditekan.

Intensitas gaya (gaya per satuan luas) disebut tegangan dan diberi notasi sigma ( $\sigma$ ). Jadi gaya aksial P yang bekerja pada penampang adalah resultan dari tegangan yang terdistribusi kontinyu.

Dengan mengasumsikan bahwa tegangan terbagi rata di seluruh potongan, dapat kita lihat bahwa resultannya harus sama dengan intensitas  $\sigma$  dikalikan dengan luas penampang A dari batang tersebut. Dengan demikian besarnya tegangan dapat dinyatakan dengan rumus :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{(James M. Gere, Timoshenko, 1990:3)} \quad (2-6)$$

Keterangan :  $\sigma$  = Tegangan ( $\text{N/m}^2$ )

P = Beban (N)

A = Luas penampang ( $\text{m}^2$ )

Jadi dapat didefinisikan bahwa tegangan normal adalah intensitas gaya normal per unit luasan, yang dinyatakan dalam satuan  $\text{N/m}^2$  disebut juga Pascal (Pa) atau  $\text{N/mm}^2$  disebut juga megapascal (MPa).

Persamaan berikut untuk mengetahui besar tegangan akibat momen bending:

$$\sigma = \frac{M.y}{I} \quad \text{(John T. Easley 1981)} \quad (2-7)$$

Keterangan : M = Momen bending (N.m)

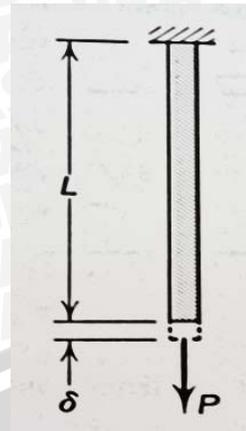
y = Jarak sumbu netral ke titik yang diperhatikan (m)

I = Momen inersia riser ( $\text{m}^4$ )

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

### 2.5.2 Regangan

Suatu batang lurus akan mengalami perubahan panjang apabila dibebani secara aksial, yaitu menjadi panjang jika mengalami tarik dan menjadi pendek jika mengalami tekan. Sebagai contoh ditunjukkan pada gambar 2.17, perpanjangan dari batang tersebut adalah hasil kumulatif dari perpanjangan semua elemen bahan di seluruh volume batang.



Gambar 2.17 Regangan Normal Pada Balok  
Sumber: John N. Cernica (1966:18)

Pertambahan panjang pada batang dinotasikan dengan  $\delta$  dimana satu satuan panjang dari batang akan mempunyai perpanjangan yang sama dengan  $1/L$  kali perpanjangan total. Perpanjangan pada batang dapat diukur untuk setiap kenaikan tertentu dari beban aksial. Berdasarkan penjelasan tersebut maka konsep perpanjangan per satuan panjang atau disebut regangan yang diberi notasi epsilon ( $\epsilon$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (\text{James M. Gere, Timoshenko, 1990:3}) \quad (2-8)$$

Keterangan :  $\epsilon$  = Regangan normal  
 $\delta$  = Perubahan panjang (m)  
 $L$  = Panjang awal (m)

Jadi perpanjangan per satuan unit panjang disebut regangan normal, dinyatakan tidak berdimensi, artinya regangan tidak mempunyai satuan. Jika batang mengalami tarik maka regangannya disebut regangan tarik yang menunjukkan perpanjangan bahan. Jika batang mengalami tekan maka regangannya disebut regangan tekan yang menunjukkan bahwa bahan tersebut memendek.

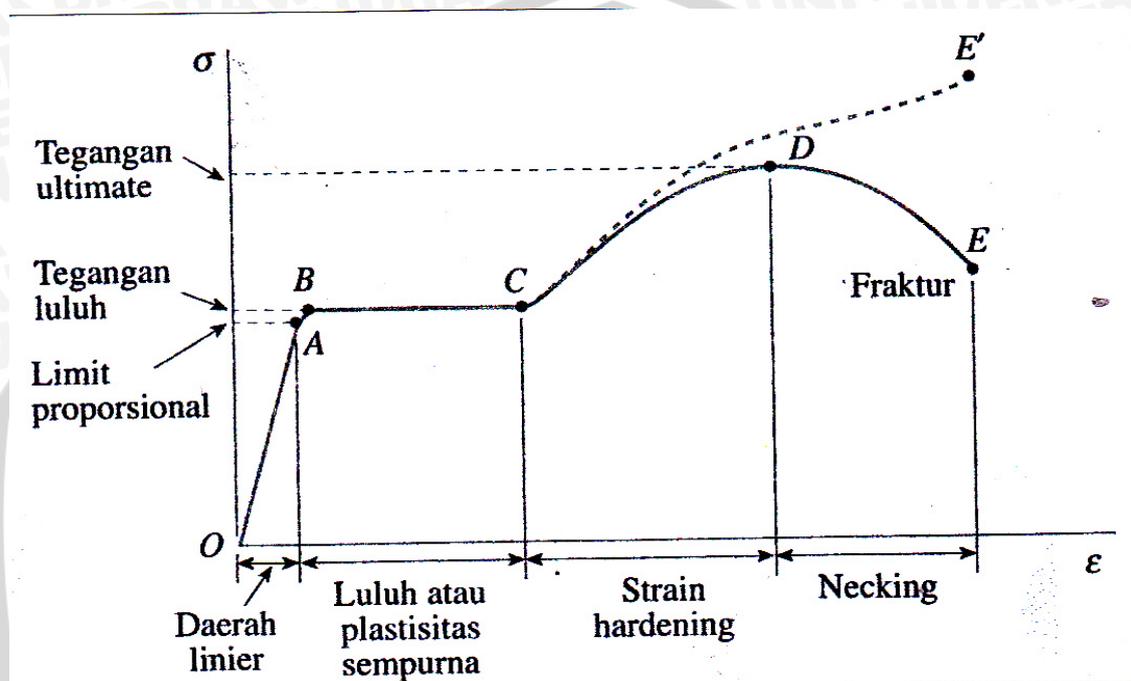
### 2.5.3 Diagram Tegangan-Regangan (*Strain-Stress Diagram*)

Hasil pengujian biasanya tergantung pada benda uji. Untuk menyatakan hasil pengujian dalam bentuk yang dapat diterapkan pada elemen struktur yang berukuran berapapun digunakan cara pengkonversian hasil pengujian tersebut ke tegangan regangan.

Setelah melakukan uji tarik atau tekan dengan menentukan tegangan dan regangan pada berbagai tingkatan beban, kita dapat membuat diagram tegangan dan regangan.

Diagram tegangan regangan merupakan karakteristik dari bahan yang diuji dan memberikan informasi tentang besaran mekanis dan jenis perilaku.

Baja struktural adalah salah satu bahan metal yang paling banyak digunakan untuk gedung, jembatan, menara, dan jenis struktur lain. Diagram tegangan-regangan untuk baja struktural tipikal yang mengalami tarik diperlihatkan pada gambar 2.18



Gambar 2.18 Diagram Tegangan-Regangan Baja Struktural  
Sumber : (James M. Gere, Timoshenko, 1990:3)

Diagram dimulai dengan garis lurus dari pusat sumbu 0 ke titik A, yang berarti bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah ini linier dan proporsional, dimana titik A adalah tegangan maksimum, dan tidak terjadi perubahan bentuk. Jadi tegangan di titik A disebut *limit proporsional*, dan OA disebut daerah elastis. Seiring meningkatnya tegangan hingga melewati *limit proporsional*, maka regangan mulai meningkat secara cepat untuk setiap pertambahan tegangan. Dengan demikian kurva tegangan regangan memiliki kemiringan yang berangsur-angsur semakin kecil sampai pada titik B, lalu kurva tersebut menjadi horizontal.

Dari titik B terjadi perpanjangan yang cukup besar pada benda uji tanpa adanya pertambahan gaya tarik titik C, fenomena ini disebut fenomena luluh dari bahan dan titik B merupakan titik luluh. Di daerah antara C dan D, bahan menjadi plastis yang menunjukkan bahwa bahan terdeformasi tanpa adanya pertambahan beban. Setelah mengalami regangan besar yang terjadi selama peluluan di daerah BC, baja mulai

mengalami pengerasan regang (*strain hardening*). Perpanjangan benda di daerah ini membutuhkan peningkatan beban tarik, sehingga diagram tegangan-regangan mempunyai kemiringan positif dari C ke D, dan beban pada akhirnya mencapai harga maksimum di titik D yang disebut *tegangan ultimate*. Penarikan batang lebih lanjut akan disertai dengan pengurangan beban dan akhirnya terjadi putus/patah di suatu titik yaitu pada titik E.

## 2.7 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga (*finite element method*) menggunakan prinsip yang sama dengan struktur sederhana, dengan setiap struktur yang akan dianalisa dibagi terlebih dahulu menjadi elemen-elemen kecil. Analisa untuk struktur tersebut dapat dilakukan dengan mengetahui terlebih dahulu bagaimana perilaku setiap elemen individual tersebut, kemudian elemen-elemen tersebut dihubungkan sedemikian rupa sehingga gaya-gaya kesetimbangannya dan kompatibilitas dari perubahan posisi-posisi struktur tersebut sesuai dengan nodalnya.

Setelah kedua hal tersebut dipenuhi, baru analisa dapat dilakukan dengan menerapkan perhitungan numerik yang berdasarkan analisa struktur sederhana pada setiap elemen-elemen struktur tersebut. Perhitungan numerik tersebut direpresentasikan dengan menggunakan metode matriks untuk menganalisis struktur secara kesinambungan. Karena analisis dilakukan pada setiap elemen, maka kedekatan hasil analisis terhadap kondisi sebenarnya sangat bergantung dengan jumlah elemen yang dibagi pada struktur yang dianalisa tersebut.

Secara umum proses analisa dengan metode elemen hingga terdiri dari beberapa langkah utama yaitu:

1. Diskritisasi domain menjadi beberapa subdomain (elemen)
2. Pemilihan fungsi interpolasi
3. Pengembangan matriks elemen untuk tiap elemen
4. Penggabungan (*assembly*) tiap matriks elemen untuk memperoleh matriks global untuk seluruh domain.
5. Penentuan kondisi batas (*boundary condition*)
6. Penyelesaian persamaan

Beberapa contoh program FEM yang tersedia di pasaran antara lain: ANSYS, ABAQUS, FEMAP, LS-DYNA, MSC. PATRAN, NASTRAN, dan lain-lain.

### 2.6.1 ANSYS

ANSYS adalah program paket yang dapat memodelkan elemen hingga untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan mekanika, termasuk di dalamnya masalah statik, dinamik, analisis struktural (baik linier maupun nonlinier), masalah perpindahan panas, masalah fluida dan juga masalah yang berhubungan dengan akustik dan elektromagnetik.

ANSYS awalnya berasal dari nama produk komersial ANSYS Mechanical atau ANSYS Multiphysic, keduanya adalah peralatan *software* analisis elemen hingga dengan bantuan komputer yang dikembangkan oleh ANSYS Inc. Perusahaan tersebut sebenarnya mengembangkan produk *software* untuk teknik dengan bantuan komputer, akan tetapi lebih dikenal dengan produk komersial ANSYS Mechanical & ANSYS Multiphysic. Untuk pengguna tingkat akademik ANSYS Inc menyediakan versi nonkomersial ANSYS Multiphysic seperti ANSYS University Advanced dan ANSYS University Research. ANSYS Mechanical, ANSYS Multiphysic and variasi nonkomersialnya secara umum yang digunakan dalam akademik adalah alat analisis yang berisi *pre-processing* (pembuatan bentuk geometrik, *meshing*), *solver* dan modul *post-processing* dalam satu kesatuan Graphic User Interface. Dalam aplikasinya ANSYS dapat dibagi menjadi dua menurut dimensinya, yaitu :

#### 1. ANSYS Classic

ANSYS ini menyelesaikan problem dalam dua dimensi seperti sistem *solid* dalam bidang dua dimensi dan perpindahan panas dalam dua dimensi.

#### 2. ANSYS Workbench

ANSYS ini menyelesaikan problema dalam tiga dimensi seperti sistem *solid* dalam tiga dimensi dan masalah aliran fluida pada pipa dalam tiga dimensi.

## 2.8 Bilangan Reynold (Reynold Number)

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynold adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Namanya diambil dari Osborne Reynolds (1842–1912) yang mengusulkannya pada tahun 1883.

Bilangan Reynold merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida dan digunakan, seperti halnya dengan bilangan tak berdimensi lain, untuk memberikan kriteria untuk menentukan *dynamic similitude*. Jika

dua pola aliran yang mirip secara geometris, mungkin pada fluida yang berbeda dan laju alir yang berbeda pula, memiliki nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, keduanya disebut memiliki kemiripan dinamis.

Rumus bilangan Reynold umumnya diberikan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya viskos}} \quad (\text{Rolf H. Sabersky 1989:20}) \quad (2-9)$$

Keterangan :  $v_s$  = kecepatan fluida (m/s)

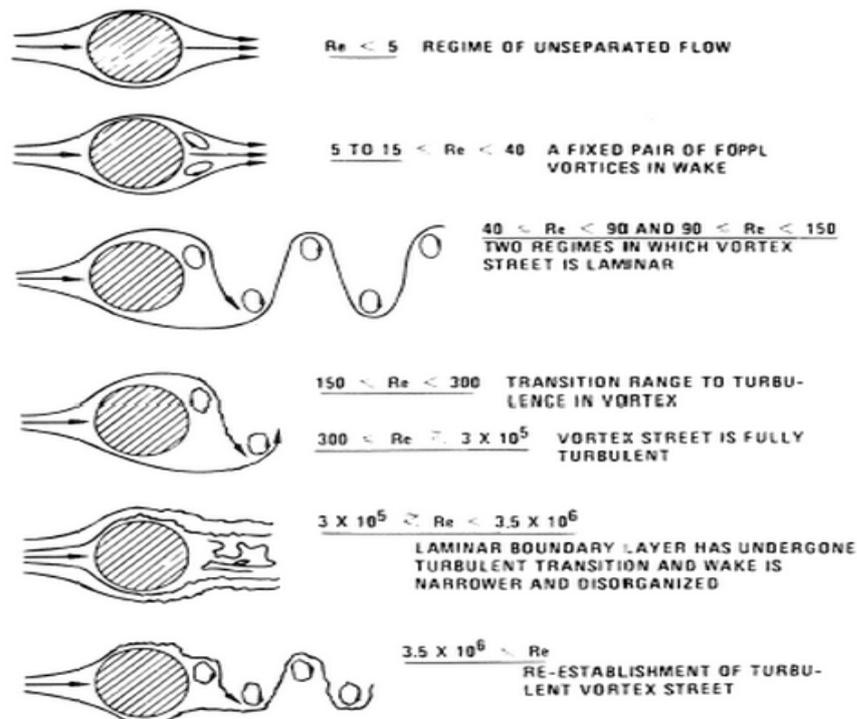
$L$  = panjang karakteristik (m)

$\mu$  = viskositas absolut fluida dinamis

$\nu$  = viskositas kinematik fluida:  $\nu = \mu / \rho$

$\rho$  = kerapatan (densitas) fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

Pada aliran external yang melewati pipa, panjang karakteristik adalah diameter pipa jika penampang pipa bulat, atau diameter hidraulik untuk penampang tak bulat. Pada setiap bilangan Reynold pada aliran external akan menghasilkan aliran yang berbeda-beda. Aliran laminar terjadi pada bilangan Reynold kurang dari  $5 \times 10^5$ , untuk bilangan yang lebih besar dari  $5 \times 10^5$ , memungkinkan terbentuk aliran turbulen. Pada gambar 2.19 menjelaskan bentuk *vortex* yang dihasilkan pada bilangan Reynold ( $Re$ ) tertentu yang melewati penampang silinder pada kasus *external flow*.



Gambar 2.19 Daerah Aliran Melewati Silinder

Sumber : Blevins, R. D. 1990

Pada gambar 2.19 dapat diketahui fenomena terbentuknya *vortex* pada setiap bentuk aliran ketika melewati silinder sebagai berikut :

1. Pada bilangan  $Re < 5$ , daerah aliran tidak terpisahkan, aliran yang melewati silinder tidak terpisahkan, tidak terbentuk lapisan batas di kedua sisi silinder. Pada bilangan  $Re$  ini tidak terbentuk *vortex* sama sekali di belakang silinder.
2. Pada bilangan  $5 < Re < 4$ , terdapat sepasang *vortex* dalam aliran gelombang dibelakang silinder, pada bilangan  $Re$  ini aliran fluida mulai terpisah menjadi dua pada sisi silinder.
3. Pada bilangan  $40 < Re < 90$  dan  $90 < Re < 150$ , aliran fluida menjadi dua daerah aliran dan menghasilkan *vortex* dari kedua daerah aliran dengan aliran *vortex*nya laminar.
4. Pada bilangan  $150 < Re < 300$  merupakan jarak transisi aliran *vortex* berubah menjadi turbulen, sedangkan pada bilangan  $300 < Re < 3.10^5$  aliran *vortex* menjadi turbulen sepenuhnya dan *vortex shedding* menjadi kurang teratur.
5. Pada bilangan  $3.10^5 < Re < 3.5.10^6$  *laminar boundary layer* telah melewati transisi turbulen, aliran fluida menjadi turbulen, sehingga alirannya semakin tidak teratur dan akan terbentuk gelembung.
6. Pada bilangan  $Re > 3.5.10^6$  pengkondisian kembali aliran *vortex* turbulen dan aliran *vortex shedding* kembali menjadi laminar.

## 2.9 Hipotesa

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, maka hipotesanya adalah sebagai berikut : semakin besar kecepatan air laut, maka semakin tinggi bilangan Reynoldnya. Semakin tinggi bilangan Reynold maka pembebanan pada *riser* semakin besar. Semakin besar pembebanannya maka tegangan yang terjadi pada *riser* semakin besar.