

# **MATERIAL TEKNIK PERMINYAKAN**

**OLEH :**

**Dr. Ing. Ir. H. KRT. Nur Suhascaryo, B.Eng., M.Eng.**



**PRODI TEKNIK PERMINYAKAN FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL**

**UPN "VETERAN" JOGJAKARTA**

**2015**

# Daftar Isi

<b>Kata Pengantar</b>	.....
<b>Halaman Persembahan</b>	.....
<b>Daftar Isi</b>	.....
<b>Daftar Gambar</b>	.....
<b>Daftar Tabel</b>	.....
<b>Modul I. Pendahuluan</b>	.....
<b>Modul II. Material Peralatan Migas</b>	.....
<b>Modul III. Material Lumpur Pemboran</b>	.....
<b>Modul IV. Material Semen Pemboran</b>	.....
<b>Modul V. Material Kepala Sumur</b>	.....
<b>Pustaka Acuan</b>	.....

## Daftar Gambar

- Gambar 2.1. Diagram Komponen Penyusun Batuan .....**
- Gambar 2.2. Skema Perbandingan Porositas Efektif, Non-Efektif dan Porositas Absolut Batuan**
- Gambar 2.3. Pengaruh Susunan Butir terhadap Porositas Batuan**
- Gambar 2.4. Diagram Percobaan Pengukuran Permeabilitas**
- Gambar 2.5. Kurva Permeabilitas Efektif untuk Sistem Minyak dan Air**
- 1. Gambar 2.6. Hubungan Permeabilitas Efektif Minyak dan Gas dimana Gas dan Minyak terdapat sebagai Fasa yang Terpisah dan Nyata/Jelas**
  - 2. Gambar 2.7. Kurva Permeabilitas Efektif untuk Sistem Minyak dan Gas**
  - 3. Gambar 2.8. Gaya-Gaya Setimbang didalam Sistem Air-Minyak-Zat Padat**
  - 4. Gambar 2.9. Kurva Tekanan Kapiler**
  - 5. Gambar 2.10. Kurva Distribusi Fluida**
  - 6. Gambar 2.11. Tekanan dalam Pipa Kapiler**
  - 7. Gambar 2.12. Distribusi dan Pengukuran Radius Kontak antara Fluida Pembasah dengan Padatan**
  - 8. Gambar 2.13. Variasi  $P_c$  terhadap  $Sw$  Kiri : Untuk Sistem Batuan yang sama dengan Fluida yang Berbeda Kanan : Untuk Sistem Fluida**
  - 9. Gambar 2.14.  $R_s$  sebagai Fungsi Tekanan yang sama dengan Batuan yang Berbeda**

10. **Gambar 2.15. Grafik Hubungan Viscositas Minyak terhadap Tekanan**
11. **Gambar 2.16. Viscositas Minyak Reservoir pada Tekanan 1 Atmosfir dan Temperatur Reservoir**
12. **Gambar 2.17. Perbedaan Ideal Flash dengan Differential Faktor Volume Formasi**
13. **Gambar 2.18. Faktor Volume Formasi Minyak ( $B_o$ ) sebagai Fungsi dari Tekanan**
14. **Gambar 2.19. Viskositas dari Gas Alam**
15. **Gambar 2.20. Faktor Volume Formasi vs Tekanan**
16. **Gambar 2.21. Compresibility Factor untuk Gas Alam**
17. **Gambar 2.22. Grafik Penentuan Gas Gravity bila Diketahui  $R_s$  dan  $^{\circ}API$**
18. **Gambar 2.23. Viskositas Air Formasi sebagai Fungsi Temperatur dan Tekanan**
19. **Gambar 2.24. Hubungan Faktor Volume Air Formasi sebagai Fungsi Tekanan**
20. **Gambar 2.25.  $\Delta V_{wt}$  sebagai Fungsi Suhu Reservoir**
21. **Gambar 2.26.  $\Delta V_{wp}$  sebagai Fungsi Tekanan Reservoir**
22. **Gambar 2.27. Kelarutan Gas dalam Air Formasi sebagai Fungsi Temperatur dan Tekanan**
23. **Gambar 2.28. Kompresibilitas Air Formasi sebagai Fungsi Tekanan dan Temperatur**
24. **Gambar 2.29. Grafik Koreksi Kelarutan Gas di dalam Larutan**
25. **Gambar 2.30. Grafik Pengaruh Temperatur dan Tekanan terhadap Kompresibilitas Air**
26. **Gambar 2.31. Gradient Temperatur Rata-rata untuk Suatu Lapangan**

27. **Gambar 3.1. Susunan Atom dalam a), Struktur Kubik Muka-Pusat. b), Struktur Close-Packed Heksagonal dan c), Struktur-Body Centered Kubik**
28. **Gambar 3.2. Hubungan antara Ukuran Butir dan Yield Strength pada Dua Besi Paduan Rendah**
29. **Gambar 3.3. Gaya yang Diperlukan untuk Memindahkan Atom**
30. **Gambar 3.4. Diagram Skematik Pergerakan Dislokasi dibawah Pengaruh Gaya**
31. **Gambar 3.5. Kurva Tegangan-Regangan Logam Ulet dibawah 0.6 Tm**
32. **Gambar 3.6. Dua Macam Dislokasi dalam Sisi Kubus**
33. **Gambar 3.7. Lup Dislokasi Prismatic**
34. **Gambar 3.8. Dislokasi Ujung dan Dislokasi Sekerup**
35. **Gambar 3.9. Cara Pencegahan Perambatan Retak Mikro dengan Membentuk Permukaan Antara Secara Penguatan Serat**
36. **Gambar 3.10. Difusi Kekosongan Menyebabkan Dislokasi Bergerak Meninggalkan Bidang Luncur**
37. **Gambar 3.11. Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Logam Terdeformasi, Selama Proses Rekrystalisasi**
38. **Gambar 3.12. Diagram Fasa Cair (Air)**
39. **Gambar 3.13. Diagram Fasa Timah Putih**
40. **Gambar 3.14. Diagram Fasa Sistem Timbal-Timah Putih**
41. **Gambar 3.15. Pengkristalan Larutan Padat oleh Pendinginan**
42. **Gambar 3.16. Pengkristalan Larutan Padat oleh Pendinginan**

43. **Gambar 3.17. Komposisi Diagram Fasa Terner**
44. **Gambar 3.18. Diagram Fasa Diproyeksikan dari Gambar 3.16**
45. **Gambar 3.19. Potongan Diagram Fasa Gambar 3.16 pada Temperatur T1-T4**
46. **Gambar 3.20. Potongan Diagram Fasa Gambar 3.16 Menurut Komposisi**
47. **Gambar 3.21. Diagram Fase Sistem Tembaga-Seng**
48. **Gambar 3.22. Diagram Fase Sistem Besi-Karbon**
49. **Gambar 3.23. Struktur Mikro Perlit, Pembesaran 300 >**
50. **Gambar 3.24. Struktur Mikro Baja Karbon. a: 0,06%C, Besar Butir Medium (ASTM No. 7) x 100; b: 0,25%C Baja Dinormalkan pada 930°C X 500; c: 0,30%C Baja Diaustenitkan pada 930°C Ditransformasikan Isotermal Pada 700°C, Ferrit dan Perlit Kasar x 1000; d: 0,45%C Baja Dinormalkan pada 840°C, Ferrit dan Perlit x 500; e: 0,80%C Baja Diaustenitkan pada 1150°C, Didinginkan di Tungku x 2000; f: 1,0%C Baja Dirol Panas pada 1050°C, Pendinginan Udara, Matriks Perlit, Sementit pada Batas Butir (Garis Putih) x 500.**
51. **Gambar 3.25. Struktur Ingot yang Melukiskan Berbagai Gambaran Makrostruktur**
52. **Gambar 3.26. Penampang Besi Cor Kecil dengan Segregasi Gravitasi Kubus Sb-Sn. Pembesaran 5 >**
53. **Gambar 3.27. Segregasi Elemen Paduan Baja dengan Bentuk "Banding" atau Struktur Lapisan. Pembesaran 300 >**
54. **Gambar 3.28. Diagram Time-Temperatur-Transformation untuk Besi AISI 1040**

55. **Gambar 3.29. Contoh Mikrostruktur Perlite dari Drill-Pipe**
56. **Gambar 3.30. Continuous Cooling Transformation Diagram untuk Besi 1040 Dimodifikasi dengan 50% Molybdenum**
57. **Gambar 3.31. Mikrostruktur dari Besi Baja Stainless Duplex yang Menunjukkan Fasa Austenit (Terang) dan Fasa Ferrite (Gelap). Diperbesar 400 >**
58. **Gambar 3.32. Diagram Fasa Fe-Cr**
59. **Gambar 3.33. Diagram Struktur dari Baja Tahan Karat yang Dideposisikan**
60. **Gambar 3.34. Kekerasan sebagai Fungsi dari Pengerjaan Dingin pada Berbagai Paduan**
61. **Gambar 3.35. Kekerasan sebagai Fungsi dari Waktu Aging dan Suhu untuk Paduan Nickel Mampukeras-Aging**
62. **Gambar 3.36. Logam Titanium**  
**Gambar 3.37. Mikrostruktur dari Ti-6Al-4V Diperbesar 100 >.**  
**Fasa Putih adalah Alpha dan yang Gelap adalah Beta**
48. **Gambar 3.38. Pengaruh dari Tekanan H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> terhadap pH dari Kondensat Cairan pada Tekanan 20 psi dan Temperatur 60°C**
49. **Gambar 3.38. Pengaruh dari Tekanan H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> terhadap pH dari Kondensat Cairan pada Tekanan 20 psi dan Temperatur 60°C**
50. **Gambar 3.39. Penyerapan-H, Pipa Besi Baja H<sub>2</sub>S Grade X-60, Air Laut Synthetic, 20°C, Bebas Korosi**
51. **Gambar 3.40. Kurva Perpanjangan-Regangan bagi : Besi Tak Murni, b) Tembaga, c) Transisi Duktal-Rapuh pada Baja Lunak**

32. **Gambar 3.41. Berbagai Macam Pengujian Kekerasan Logam**
33. **Tabel III-9. Karakteristik Berbagai Pengujian Kekerasan**
34. **Gambar 3.42. Pengujian Impak Charpy**
35. **Gambar 3.43. Kurva Pemuluran yang Khas**
36. **Gambar 3.44. Bentuk Alternatif Pengulangan Regangan : a) Reversed, b) Alternating (Regangan rata-rata  $\neq 0$ ), c) Fluctuating, d) Repeated**
37. **Gambar 3.45. Kurva S-N untuk Baja Komersial pada Kondisi yang Dinormalkan**
38. **Gambar 3.46. Pengaruh Kekerasan Permukaan pada Kekuatan Kelelahan**
39. **Gambar 3.47. Kurva Waktu Patah Terlambat Baja AISI 4340 dengan Hidrogen Sisa yang Berbeda oleh Pemanasan pada 194°C dalam Waktu Berbeda bila setelah Diberi Hidrogen secara Elektrolitik.**
40. **Gambar 3.48. Kurva S-N untuk Baja Komersial pada Kondisi yang Dinormalkan**
41. **Gambar 3.49. Skema (a) Nikel Paramagnetik, (b) Nikel Ferromagnetik**
42. **Gambar 3.50. (a) Perubahan Suseptibilitas Magnetik dengan Temperatur untuk Bahan Anti ferromagnetik, (b) Pola Difraksi Neutron yang Berasal dari Serbuk Antiferromagnetik MnO (Atas) dan Temperatur Kritis untuk Penataan (Bawah)**
43. **Gambar 3.51. Bagian-Bagian Peralatan BOP Stack pada Sistem Pemboran**
44. **Gambar 3.52. Blind Ram, Pipe Ram, dan Shear Rams**



45. **Gambar 3.53. Tipikal Rangkaian Peralatan Drillstem**
46. **Gambar 3.54. Tekanan pada Drillstring yang Berputar**
47. **Gambar 3.55. Retakan Akibat Kelelahan pada Pipa dengan Arah Melintang**
48. **Gambar 3.56. Washout pada Drillpipe**
49. **Gambar 3.57. Corrosion Fatigue Failure (Twist-Off) pada Peralatan Drillpipe yang Disebabkan oleh Internal Pitting**
50. **Gambar 3.58. Grafik dari Charpy Impact Grade E dan X pada Drillpipe dan Tool Joints**
51. **Gambar 3.59. Grafik dari Charpy Impact Grade E dan X pada Drillpipe dan Tool Joints**
52. **Gambar 3.60. Pengaruh Ketahanan Kekuatan Fatigue pada Baja**
53. **Gambar 3.61. Keuntungan dari Penggunaan Panjang Internal Upset yang Tepat pada Umur Kelelahan Pipa 5 inch IEU, 19,5 pon per feet Grade E**
54. **Gambar 3.62. Pengaruh pH pada Corrosion Fatigue di dalam Aerated Saltwater**
55. **Gambar 3.63 Kerusakan SSC pada Pipa S-135**
56. **Gambar 3.64. Grafik dari Klroida yang dapat Menyebabkan Pitting yang Parah**
57. **Gambar 3.65. Fatigue Strength pada Aluminium Drillpipe pada Elevated Temperatur**

- 58. Gambar 4.1. Mud Balance (Chilingarian, G, V. 1981)**
- 59. Gambar 4.2. Marsh Funnel (Chilingarian, G.V, 1981)**
- 60. Gambar 4.3. Fann V-G Meter (Chilingarian, G.V, 1981)**
- 61. Gambar 4.4. Filter Press (Chilingarian, G.V, 1981)**
- 62. Gambar 4.5. Peralatan Sand Content (Chilingarian, G.V, 1981)**
- 63. Gambar 4.6. Pengaruh Kandungan Padatan Terhadap Laju Pemboran (Chilingarian, G.V, 1981)**
- 64. Gambar 4.7. Pengaruh Kuantitas Kandungan Padatan Terhadap Laju Pemboran (Gatlin, C, 1960)**
- 65. Gambar 6. 1. Komponen dari Sel Elektrokimia yang Menyebabkan Terjadinya Korosi**
- 66. Gambar 6.2. Proses Oksidasi / Reduksi pada Permukaan Besi**
- 67. Gambar 6.3. Laju Korosi pada Besi sebagai Fungsi dari Adanya Kandungan Oksigen pada Larutan**
- 68. Gambar 6.4. Bagian dari Baja yang Kekurangan Oksigen**
- 69. Gambar 6.5. Korosi Erosi pada Pipa Pemboran yang Disebabkan Aliran Gas dengan Kecepatan yang Tinggi**
- 70. Gambar 6.6. Korosi Intergranular pada Drillpipe yang Mengandung Stainless Steel Austenitic**
- 71. Gambar 6.7. Korosi Galvanic**

72. **Gambar 6.8. Crevice Corrosion**
73. **Gambar 6.9. Pitting Corrosion pada Drillpipe dari Minyak Mentah yang Mengandung H<sub>2</sub>S**
74. **Gambar 6.10. Pengaruh Lingkungan Korosif terhadap Ketahanan Fatigue**
75. **Gambar 6.11. Nomograph untuk Perhitungan Kehilangan Besi**
76. **Gambar 6.12. Peralatan Test Coupon**
77. **Gambar 6.13. Bagian dari Hidrogen Probe**
78. **Gambar 6.14. Pengaruh kandungan Nickel pada Stainless Steel Iron-Chromium-Nickel pada Penurunan Kemampuan Terhadap Stress-Corrosion-Cracking Pendidihan Mg<sub>2</sub>C<sub>1</sub>**
79. **Gambar 6.15. Cathodic Protection pada Drillpipe dengan Menggunakan Anoda Galvanik**
80. **Gambar 6.16. Galvanic Cell**
81. **Gambar 7.1. Jenis Prime Mover**
82. **Gambar 7.2. Sistem Transmisi Mekanik**
83. **Gambar 7.3. Sistem Transmisi Elektrik**
84. **Gambar.7.4. Standart Rig; b. Portable Rig**
85. **Gambar.7.5. Menara Bor Standar Derrick**
86. **Gambar.7.6. Mobile / Trailer Mounted Type Mast**
87. **Gambar.7.7. Skema Instalasi Drawwork**

88. **Gambar.7.8. Over-head Tools**
89. **Gambar.7.9. Drilling Line**
90. **Gambar.7.10. Sistem Pengangkatan**
91. **Gambar.7.11. Drag Bit**
92. **Gambar.7.12. Roller-Cone (Rock Bit)**
93. **Gambar.7.13. Skema Penampang Diamond Bit**
94. **Gambar 7.14. Skema Rotary Table dengan Master Bushing**
95. **Gambar.7.15. Skema Sistem Putar dengan Rotary Table**
96. **Gambar.7.16. Skema Sistem Putar dengan Top Drive**
97. **Gambar.7.17. Sistem Sirkulasi**
98. **Gambar.7.18. Skema Recondition Area**
99. **Gambar.7.19. Aliran Pompa Lumpur**
100. **Gambar.7.20. Skema Penampang Desander**
101. **Gambar.7.21. Skema Penampang Desilter**
102. **Gambar.7.22. Skema Penampang Swivel**
103. **Gambar.7.23. Skema Penampang BOP**
104. **Gambar 7.24. Truck Mounted Cementing Unit**
105. **Gambar.7.25. Marine Cementing Unit**
106. **Gambar.7.26. Skit Mounted Cementing Unit**

107. **Gambar.7.27. *Cementing Head***
108. **Gambar.7.28. *Susunan Casing***
109. **Gambar.7.29. *Centralizer***
110. **Gambar.7.30. *Scratchers***
111. **Gambar.7.31. *Casing Shoe***
112. **Gambar.7.32. *Float Shoe***
113. **Gambar.7.33. *Float Collar***
114. **Gambar.7.34. *Shoe Trach***
115. **Gambar.7. 35. *Penampang Top Plug (a) dan Bottom Plug (b).***
116. **Gambar.7.36. *Posisi Top Plug pada Bottom Plug***
117. **Gambar.7.37. *Power Tongs***
118. **Gambar.7.38. *Casing Hanger***
119. **Gambar.7.39. *Fishing Tools***
120. **Gambar.7.40. *Junk Basket***
121. **Gambar.7.41. *Boot Junk Basket***
122. **Gambar.7.42. *Fishing Magnet***
123. **Gambar 7.43. *Kondisi Kesetimbangan antara Clay Montmorillonite dengan Partikel Air***
124. **Gambar.7.44. *Beberapa Fungsi Lumpur Pemboran***
125. **Gambar 7.45. *Pembelokan Terhadap Drillstring.***

126. **Gambar.7.46. Pembebanan Burst**
127. **Gambar 7.47. Pembebanan *Collapse***
128. **Gambar 7.48. Beban *Tension* Pada Rangkaian *Casing*.**
129. **Gambar.7.49. Pembebanan Tension**
130. **Gambar 7.50. Kurva Ellips Beban Biaksial**
131. **Gambar 7.51. Beban Burst Pada Surface Casing**
132. **Gambar 7.52. Beban Collapse Pada Surface Casing**
133. **Gambar 7.53. Beban Burst pada Intermediate Casing**
134. **Gambar 7.54. Beban Collapse pada Intermediate Casing**
135. **Gambar 7.55 Beban *Burst* Pada *Production Casing***







- 58. Gambar 3.66. Yield Strength pada Aluminium Drillpipe , (a) pada Elevated Temperatur, (b) setelah Elevated Temperatur**
- 59. Gambar 3.67. Tingkat Keausan dari Dua Jenis Drillpipe Titanium (Ti-6-4 dan Beta C) terhadap Casing Baja P110 jika Dibandingkan dengan Drillpipe Baja pada Penggunaan Lumpur Jenis Water-Base Mud dan Oil-Base Mud**
- 60. Gambar 3.68. Grafik Penambahan Tungsten Carbide**
- 61. Gambar 3.69. Retakan pada Partikel Tungsten Carbide pada Pengerasan yang Menyebabkan Kerusakan pada Drill Collar**

62. **Gambar 3.70. Perbandingan Tingkat Keausan dari Casing terhadap Mesh Kasar, Mesh Halus, dan Tool Joint yang Tidak Dilapisi Pengeras.**
63. **Gambar 3.71. Retak Lelah pada Ulir 8-Round Casing pada Casing K-55**
64. **Gambar 3.72. Titik pada Bagian Ujung Tombak pada Gigi Bit**
65. **Gambar 3.73.Pengerasan pada Gigi Bit**
66. **Gambar 3.74.Teeth Interfit**
67. **Gambar 3.75.Desain Teeth dapat Meliputi Desain T, L atau Bentuk Jaring**
68. **Gambar 3.76.Penamaan Milled Tooth Bit**
69. **Gambar 3.77.Tungsten Carbide Insert**
70. **Gambar 3.78.Tungsten Carbide Insert**
71. **Gambar 3.79.Pelapisan pada Gigi Bit**
  
72. **Gambar 3.80.Bearing Capacity**
73. **Gambar 3.81.. Material yang Ditanamkan di Cone Seperti pada Bagian #7 (Special Alloy)**
74. **Gambar 3.82.Penamaan pada Diamond Bit ;(a) Untuk Formasi yang Keras dan Lunak**
75. **Gambar 3.83.((b),(c)) Turbine Drilling Bit ; (d) Courtesy NL Hycalog**







## **Daftar Tabel**

**Tabel II-1. Komposisi Kimia Orthoquartzite (%) .....**

**Tabel II-2. Komposisi Kimia Graywacke (%)**

**Tabel II-3. Komposisi Kimia Batupasir Arkose (%)**

**Tabel II-4. Komposisi Mineral Batupasir Arkose (%)**

**Tabel II-5. Komposisi Kimia dari Limestone (%)**

**1. Tabel II-6. Komposisi Kimia dari Dolomit (%)**

**2. Tabel II-7. Komposisi Kimia dari Batuan Shale (%)**

**3. Tabel II-8. Skala Kekerasan Mineral (Mohs)**

**4. Tabel II-9. Alkana ( $C_nH_{2n+2}$ )**

**5. Tabel II-10. Hasil Analisa Air Formasi dalam ppm**

**6. Tabel III-1. Struktur Kristal Beberapa Logam Biasa pada Suhu Ruang**

**7. Tabel III-2. Penomoran Sesuai Desain AISI**

**8. Tabel III-3. Sistem Penomoran Penggabungan ASTM**

**9. Tabel III-4. Komposisi dari Besi Baja Stainless dengan Grade Standar AISI**

**10. Tabel III-5. Penemperan pada Fasa Austenitic**

**11. Tabel III-6. Komposisi dari Paduan Dasar Nickel**

**12. Tabel III-7. Beberapa Paduan Titanium yang Lazim Digunakan**

**13. Tabel III-8. Skala Kekerasan Rockwell**

**14. Tabel III-10. Jenis Material yang Digunakan Tergantung dari Tekanan Kerja Peralatan**

15. **Tabel III-11. Jenis-Jenis Material yang Berbeda**
16. **Tabel III-12. Berbagai Grade Drillpipe Menurut API**
17. **Tabel III-13. Corrosion Fatigue pada Drillpipe**
18. **Tabel III-14. Corrosion Fatigue pada Drillpipe**
19. **Tabel III-15. Kemungkinan-Kemungkinan Masalah Penggunaan Lumpur Lignosulfonate pada Suhu Tinggi**
20. **Tabel III-16. Sulfide yang dapat Berubah karena Dekomposisi dari Lumpur**
21. **Tabel III-17. Kemampuan Material Kawat Terhadap Stress-Corrosion-Cracking**
22. **Tabel III-18. Kemampuan Material Kawat Terhadap Stress-Corrosion-Cracking**
23. **Tabel III-19. Hubungan antara Beberapa Tipe Bit dengan Bearing Capacity**
24. **Tabel III-20. Pemilihan Diamond Bit Berdasarkan Tipe Formasi dan Tipe Roller Bit**
25. **Tabel III-21. IADC Diamond Drill Bit Classification Chart**
26. **Tabel V-1. Komposisi Kimiawi Komponen Penyusun Semen**
27. **Tabel V-2. Klasifikasi Semen Berdasarkan API.**
28. **Tabel V-3. Kandungan Air Normal Pada Suspensi Semen.**
29. **Tabel V-4. *Accelerator* untuk semen Klas A, B, C, G dan H.**
30. **Tabel V-5. *Retarder*.**
31. **Tabel V-6. *Extender*.**
32. **Tabel V-7. Additif Penambah Berat Semen.**

- 33. Tabel V-8. Dispersants.**
- <sup>34.</sup> **Tabel V-9. *Filtration Control Additives*.**
- 35. Tabel V-10. Additives Untuk Semen Loss Circulation.**
- 36. Tabel V-11. Additif Spesial Untuk Semen.**
- 37. Tabel VI -1. Deret Volta dengan Standart Potensial Berbagai Logam**
- 38. Tabel VI -2. Konversi dari Unit Laju Korosi**
- 39. Tabel VI-3. Kombinasi dari Paduan dan Lingkungan serta Elemen yang  
Dipindahkan**
- 40. Tabel VII-1 Perbedaan Jenis Pahat untuk Formasi Lunak dan Keras**
- <sup>41.</sup> **Tabel VII-2. Komponen Lumpur Pemboran**
- 42. Tabel VII-3 Bentonite Spesifikasi *API***
- 43. Tabel VII-4. Additif Lumpur Pemboran**
- 44. Tabel VII-5 Spesifikasi Casing Berdasarkan Average Yield**
- 45. Tabel VII-6. Klasifikasi Semen Berdasarkan API.**







## PENDAHULUAN

Di dalam industri Migas, khususnya dalam operasi pemboran dan produksi atau pengembangan lapangan, perlu disadari bahwa terdapat suatu ilmu yang mempelajari logam serta paduannya yang dapat digunakan untuk membuat peralatan seperti *bit, drillpipe, drillcollar, casing, tubing, tool joints, well head, flow line, tangki, dll.* Peralatan tersebut telah melalui suatu standarisasi berdasarkan kemampuannya terhadap situasi kerja (*tekanan dan temperatur*) dan adanya ketahanan terhadap kontaminasi fluida reservoir. Ilmu tersebut adalah *ilmu material teknik perminyakan*, dimana pada ilmu tersebut memberikan pengetahuan terhadap bahan-bahan logam dan paduan serta komponen-komponen penyusun suatu logam terhadap paduannya. Dengan adanya perlakuan yang diperlukan terhadap bahan tersebut, kemudian kita akhirnya mendapatkan peralatan yang mampu bekerja pada *tekanan, temperatur dan kondisi fluida* yang sesuai dengan kondisi lapangan.

Selama operasi pemboran khususnya dengan metode *underbalanced drilling*, fluida pemboran yang disirkulasikan dapat bercampur/terkontaminasi dengan fluida reservoir karena tekanan hidrostatik lumpur pemboran yang disirkulasikan lebih rendah daripada tekanan formasi, hal ini akan mengakibatkan fluida reservoir yang mengandung air formasi masuk ke dalam sumur pemboran dan bercampur dengan lumpur pemboran (kontaminasi). Campuran tersebut selama proses pemboran berlangsung sudah tentu memiliki *komposisi kimia, sifat-sifat fisik* serta *laju aliran* yang berbeda-beda, maka peralatan pemboran harus didesain sesuai dengan faktor yang ada.

Berdasarkan *komposisi kimia*, fluida reservoir khususnya air formasi dapat mengandung unsur-unsur penyebab korosi seperti  $H_2S$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  maupun unsur lainnya dimana masing-masing unsur memiliki kandungan ion serta deret volta

(*besarnya kemampuan unsur untuk memberikan arus*) yang berbeda, sehingga dalam penanganan pada proses untuk mencegah terjadinya pembentukan korosi dapat dilakukan pembedaan pada unsur logamnya. Laju aliran juga akan memberikan kontribusi terhadap pembentukan korosi yaitu bila laju aliran melebihi bilangan Reynolds diatas 4000 maka aliran akan berbentuk turbulen dan terjadi pengikisan pada peralatan pemboran, sehingga lapisan pelindung pada logam akan menjadi tipis dan akan terbentuk korosi pada daerah pengikisan tersebut. *Kedua*, pada bentuk aliran tersebut juga akan menyebabkan terbentuknya endapan padatan (*scale*) yang menempel pada logam dimana akhirnya dapat menimbulkan korosi dengan reaksi sama seperti akibat laju aliran. Dengan beberapa pengertian diatas, dapat dilakukan pencegahan munculnya korosi yaitu *dengan memisahkan gas atau unsur yang menyebabkan korosi, mengatur laju aliran kritis, serta melakukan pencegahan terhadap pembentukan endapan padatan pada seluruh rangkaian pemboran.*

Dalam hal ini, material teknik perminyakan punya peranan sangat penting terhadap jalannya proses pemboran dimana suatu peralatan yang telah didesain ternyata tidak dapat bertahan sesuai dengan perhitungan awal, tentunya harus diganti dengan peralatan baru dan ini akan menyebabkan proses pemboran terhenti. Selain itu untuk mengganti peralatan lama dengan yang baru diperlukan biaya tambahan yang nilainya tidak sedikit. Oleh karena itu, perlu dilakukan pendesainan terhadap peralatan pemboran agar mampu bertahan dan dapat dipergunakan selama masa pemboran berlangsung. Dengan mengetahui *kemampuan dari bahan-bahan logam terhadap gaya yang diberikan kepadanya, perlakuan pada saat pembentukan, penambahan unsur-unsur paduan untuk mendapatkan material yang diinginkan serta melakukan pelapisan terhadap bahan dengan menggunakan unsur maupun metoda yang sesuai* maka kita dapat menentukan bahan logam yang diperlukan untuk mendapatkan kualitas material yang tepat. Unsur utama dalam pembuatan besi baja adalah besi dan karbon dimana semakin banyak kandungan karbon dari suatu baja maka semakin kuat pula baja terhadap tekanan yang diberikan, namun akan semakin rentan pula baja itu terhadap serangan korosi.

Untuk mengatasi hal tersebut, maka kandungan karbon dapat dikurangi lalu diganti dengan unsur lain seperti *nickel*, *chrom*, maupun *molybdenum* untuk mendapatkan *baja stainless*. Selain itu fasa dari pembentukannya-pun akan mempengaruhi terhadap kekuatan tekanan dan korosi yang terjadi yaitu pembentukan pada fasa austenit akan lebih baik dibanding pada fasa martensit maupun feritik. Namun perlu disadari bahwa selain korosi, logam juga memiliki kelemahan terhadap kelelahan kerja akibat siklus yang dihadapinya. Oleh karena itu dilakukan penguatan terhadap bahan dengan pembentukan struktur serat. \*\*\*

## **MODUL III**

### **MATERIAL PERALATAN MIGAS**

Metallurgi atau ilmu logam, saat ini merupakan elemen penting dalam setiap bidang industri. Hampir di seluruh bidang industri menggunakan logam, baik yang didesain sangat khusus maupun barang logam jadi yang dapat langsung dipergunakan.

Dalam industri perminyakan, diperlukan pula pengetahuan khusus dalam penentuan peralatan dengan bahan logam yang akan digunakan selama masa pemboran. Penentuan bahan logam dan perlakuannya pada akhirnya akan ditujukan untuk memberikan hasil pemboran yang maksimal dimana peralatan yang sudah didesain dapat bertahan selama umur dari suatu sumur migas tanpa perlu penggantian yang tentunya akan menghambat jalannya proses pemboran.

Dibawah ini akan dijelaskan mengenai konsep-konsep metallurgi dalam pembuatan peralatan pemboran pada industri migas.

#### **3.1. Konsep Dasar Metallurgi**

Metallurgi adalah suatu ilmu yang mempelajari semua bahan logam, baik susunan, bentukan, maupun ketahanannya. Ilmu ini sangat membantu dalam semua proses kehidupan manusia saat ini. Dari bentuk logam mikrochip pada komputer sampai dengan peralatan tempur modern selalu menggunakan bahan logam. Adapun sifat – sifat dari logam yang perlu dipelajari yaitu :

1. Malleability / dapat ditempa.
2. Ductility / dapat ditarik.
3. Toughness / sifat ulet.
4. Hardness / sifat kekerasan.
5. Strength / kekuatan.

6. Weldability / kemampuan suatu logam untuk dapat dilas, baik dengan las listrik maupun dengan las karbid.
7. Corrosion resistance / tahan korosi.
8. Machinability / kemampuan suatu logam untuk dikerjakan dengan mesin, misalnya dengan mesin bubut, mesin frais dan lain – lain.

Semua logam dalam temperatur kamar akan membentuk padatan atau kristal kecuali merkuri. Kristal terdiri dari atom-atom yang mempunyai susunan yang teratur dan disebut dengan crystal lattice atau kisi-kisi kristal. Inti dari atom-atom tersebut menggambarkan nilai kisi (lattice point) dan loncatan elektron akan semakin kuat saat dekat dengan pusat atom. Valensi dari elektron yang semakin jauh, akan semakin kehilangan ikatan elektron, dan bergerak mudah melalui kisi. Sangat besarnya perbedaan konduktivitas antara logam dan bukan logam adalah karena pada logam mengalami beda potensial elektron-elektron yang dapat bergerak bebas. Kelistrikan, daya penghantar panas, gaya magnet dan kekuatan adalah hasil dari kelakuan valensi elektron.

### 3.1.1. Struktur Logam

Logam adalah bahan yang disusun oleh atom-atom yang memiliki kemampuan dapat hantar listrik, panas, dapat tempa dan ulet. Logam juga memiliki sifat kilap, dimana bahan tersebut mampu memantulkan cahaya yang diterimanya.

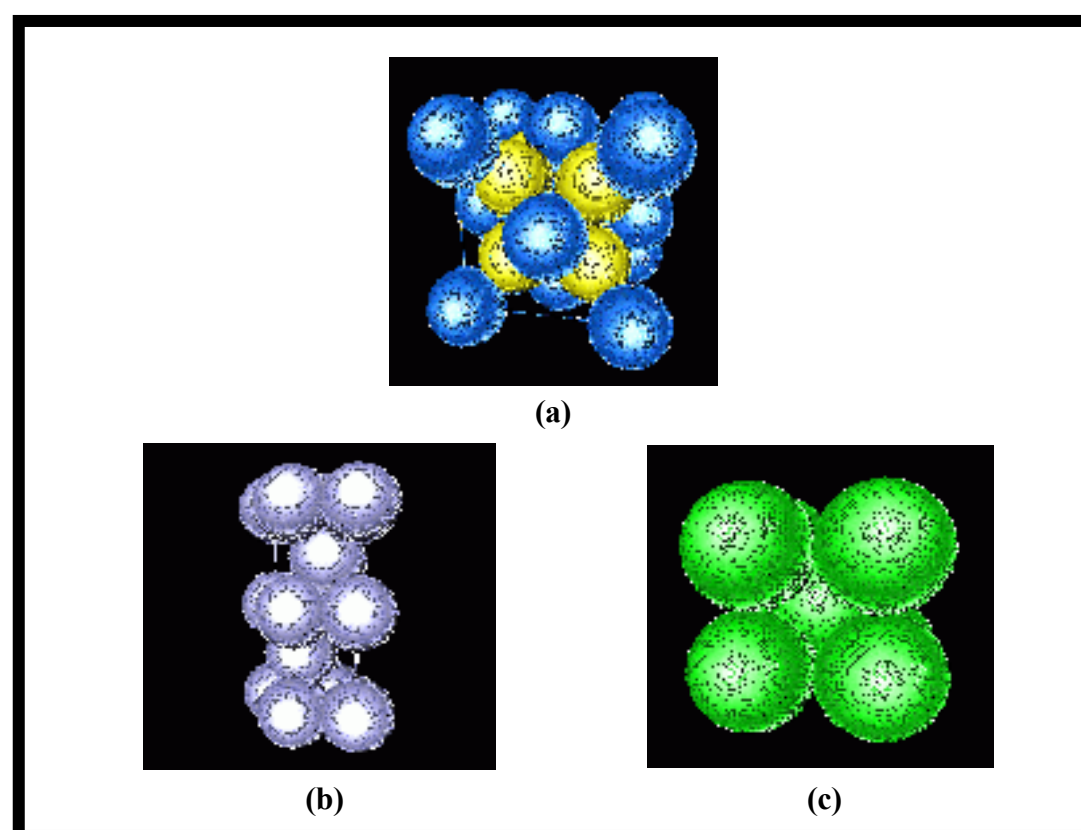
Ion-ion dalam logam padat tersusun seolah-olah dipak secara beraturan. Pada kebanyakan logam, ion-ion mengelompok sedemikian rupa sehingga volume yang dibutuhkan sesedikit mungkin. Pada semua logam, termasuk yang ion-ionnya agak renggang, penataan ion-ion ternyata mengikuti suatu pola tertentu dan karena itu struktur logam dicirikan menurut satuan (unit) pola sederhana yang disebut sel struktur yang kalau diulang-ulang secara beraturan diseluruh badan logam akan menentukan posisi semua ion dalam kristal logam bersangkutan.

Saat ini dikenal dua cara penataan bola-bola berukuran sama yang memungkinkan volume menjadi minimum, yaitu penataan kubus pusat sisi atau *face-centered cubic arrangement (f.c.c.)* dan penataan heksagonal susunan rapat atau *close packed hexagonal arrangement (c.p.h.)*. Sel struktur lain yang meskipun

tidak rapat namun dianut oleh banyak logam adalah penataan kubus pusat ruang atau *body-centered cubic arrangement (b.c.c.)*. Bentuk-bentuk susunan atom tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.

Disamping ketiga struktur kristal yang telah disebutkan, struktur-struktur lain seperti orthorombus (misalnya : gallium, uranium), tetragonal (misalnya : indium, palladium), dan rhombohedral (misalnya : arsenikum, hidrargirum, bismuth) juga ada.

Untuk menetapkan secara lengkap struktur suatu logam tertentu, kita perlu mempelajari bukan saja struktur kristal yang dimiliki, namun juga ukuran (dimensi) sel strukturnya. Banyaknya besaran yang dibutuhkan untuk menentukan suatu sel struktur bergantung sekali pada derajat keteraturan geometrik yang ditunjukkan oleh sel. Jadi dalam sel-sel struktur kubus kita hanya perlu mengukur panjang salah satu rusuk, sementara pada sel heksagonal kita perlu mengetahui panjang a dan c.



**Gambar 3.1.**  
**Susunan Atom dalam a), Struktur Kubik Muka-Pusat.**  
**b), Struktur Close-Packed Heksagonal dan c), Struktur-Body Centered Kubik<sup>3)</sup>**



Seperti dalam **Gambar 3.1**. Bagaimanapun, struktur yang ideal adalah susunan rapat, kedua besaran  $a$  dan  $c$  harus memiliki perbandingan  $c/a = 1,633$ . Dalam struktur logam, perbandingan  $c/a$  yang sering disebut nisbah menyumbu (axial ratio) tidak pernah tepat 1,633 dan karena itu struktur logam tidak pernah betul-betul tersusun secara rapat; untuk seng misalnya,  $c/a = 1,86$  dan untuk titanium,  $c/a = 1,58$ . Besaran yang menunjukkan ukuran sel struktur itu disebut parameter kisi (lattice parameter). Beberapa logam ternyata menganut lebih dari satu struktur kristal, yang masing-masing hanya stabil pada rentang temperatur tertentu. Contoh paling baik untuk gejala yang disebut polimorfisme (*allotropes*) adalah seperti yang ditunjukkan oleh besi, yang berstruktur kubus pusat ruang pada temperatur di bawah 910 °C serta di atas 1400 °C, namun berstruktur kubus pusat sisi bila di antara 910 °C dan 1400 °C. Contoh lain yang umum antara lain adalah titanium dan zirkonium yang berubah dari kubus susunan rapat ke kubus pusat ruang berturut-turut pada temperatur 882 °C dan 815 °C. Atau untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel III-1**. Pada tabel tersebut, dapat dijelaskan mengenai unsur logam dengan struktur kristal f.c.c., b.c.c., c.p.h., orthorhombic dengan jarak antar-atom yang terdekat (Å). Misalnya aluminium dengan struktur kristal face centered cubic ( f.c.c.) dan dengan jarak antar-atom terdekatnya 2,862.

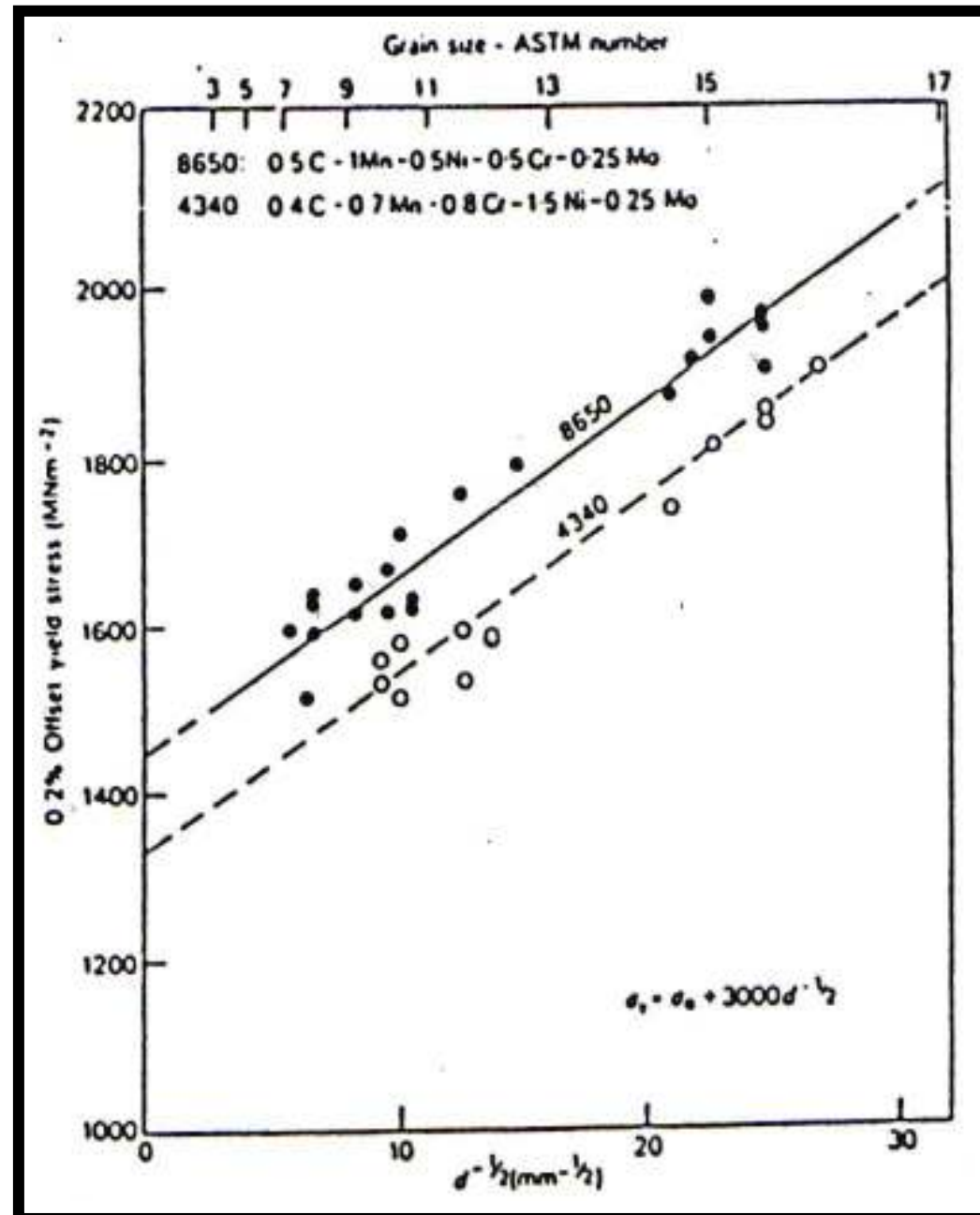
Sifat-sifat mekanik seperti *strength* (kekuatan, definisi : ukuran besar gaya yang diperlukan untuk mematahkan atau merusak bahan), *ductility* (keuletan, definisi : dikaitkan dengan besar regangan permanen sebelum terjadi perpatahan) dan *toughness* (ketangguhan, definisi : dikaitkan dengan jumlah energi yang diserap bahan sampai terjadi perpatahan) dari logam dan paduan sangat dipengaruhi oleh struktur kristalnya. Logam c.p.h. kekuatannya (*strength*) akan lebih lemah dibanding logam f.c.c. dan b.c.c.

Guna melengkapi gambaran tentang logam, perlu ditekankan bahwa sepotong logam yang dijumpai sehari-hari bukan terbentuk dari sebuah kristal tunggal berukuran besar, melainkan terdiri atas kristal-kristal kecil saling taut yang banyak sekali (polycrystalline). Dalam keseluruhan massa logam, tiap kristal atau butir dibatasi dari sesamanya oleh suatu permukaan tiga dimensi yang disebut batas butir (*grain boundary*), yang bentuknya tidak ada hubungan dengan tatanan atom dalam kristal.

Ketika ukuran butir dkecilkan (yang akan menyebabkan bertambahnya nilai batas butir), strength dan ductility dari logam tersebut akan bertambah seperti terlihat pada **Gambar 3.2.** dibawah ini, dimana kekuatan luluh (yield strength, def. : ketahanan suatu bahan terhadap deformasi plastik) pada keadaan biasa dari besi paduan rendah, 8650 dan 4340 sebagai fungsi dari ukuran butir.

**Tabel III-1.**  
**Struktur Kristal Beberapa Logam Biasa pada Suhu Ruang <sup>3)</sup>**

Unsur	Struktur kristal	Jarak antaratom terdekat (Å)
Aluminium	f.c.c.	2.862
Berilium	c.p.h. ( $c/a = 1.568$ )	2.225
Kadmium	c.p.h. ( $c/a = 1.886$ )	2.979
Kromium	b.c.c.	2.498
Kobalt	c.p.h. ( $c/a = 1.623$ )	2.506
Tembaga	f.c.c.	2.556
Emas	f.c.c.	2.884
Besi	b.c.c.	2.481
Timbal	f.c.c.	3.499
Litium	b.c.c.	3.039
Magnesium	c.p.h. ( $c/a = 1.623$ )	3.196
Molibdenum	b.c.c.	2.725
Nikel	f.c.c.	2.491
Niobium	b.c.c.	2.859
Platinum	f.c.c.	2.775
Kalium	b.c.c.	4.627
Rodium	f.c.c.	2.689
Rubidium	b.c.c.	4.88
Perak	f.c.c.	2.888
Natrium	b.c.c.	3.715
Tantalum	b.c.c.	2.860
Torium	f.c.c.	3.60
Titanium	c.p.h. ( $c/a = 1.587$ )	2.89
Tungsten	b.c.c.	2.739
Uranium	orthorhombic	2.77
Vanadium	b.c.c.	2.632
Seng	c.p.h. ( $c/a = 1.856$ )	2.664
Zirkonium	c.p.h. ( $c/a = 1.592$ )	3.17

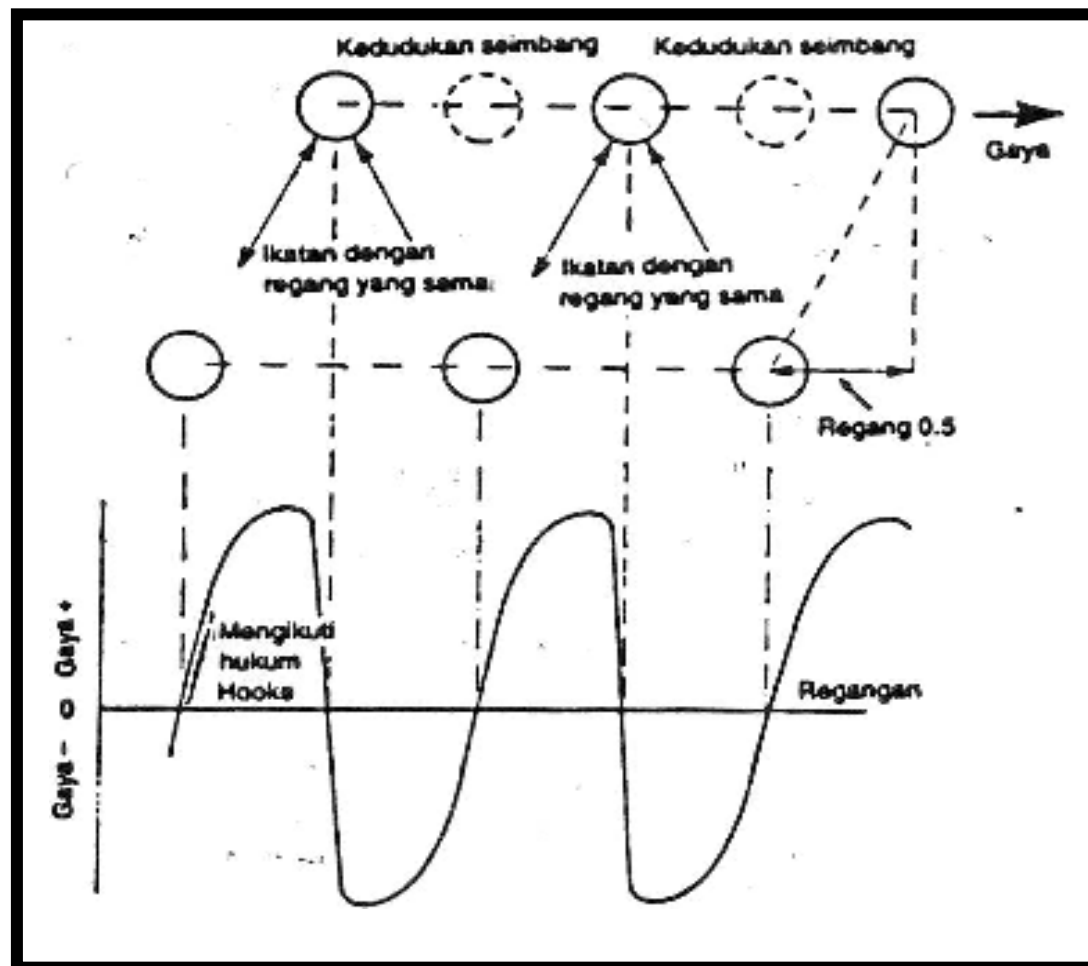


**Gambar 3.2.**  
**Hubungan antara Ukuran Butir**  
**dan Yield Strength pada Dua Besi Paduan Rendah<sup>3)</sup>**

Orientasi poros kristal dalam suatu butir biasanya berbeda dari orientasi pada butir lain, yang seringkali antara 30° dan 40°, sehingga batas butir boleh dibayangkan sebagai suatu daerah sempit (sekitar dua kali tebal atom). Lewat dari batas itu orientasi kisi butir yang satu berbeda dari yang lain.

### 3.1.2. Dislokasi

Dislokasi adalah sejenis cacat dalam struktur kristal yang bersifat planar dengan penambahan setengah bidang sisipan atau dengan kehilangan bidang tertentu dalam struktur kristal itu. Ini akan menyebabkan terjadinya penyimpangan logam pada ujung bidang tambahan atau bidang yang hilang. Pada **Gambar 3.3.** dapat dilihat bahwa bila suatu gaya memindahkan bidang atom ke posisi ditengah dua posisi stabil, maka atom-atom dengan mudah dapat kembali ke posisi awal atau ke posisi berikutnya. Oleh karena itu, bila atom berada dalam keseimbangan pada posisi tengah, cukup gaya kecil yang diperlukan untuk mendorongnya ke posisi berikutnya atau kembali ke posisi awal .



**Gambar 3.3.**  
Gaya yang Diperlukan untuk Memindahkan Atom<sup>7)</sup>

Dua baris atom pada **Gambar 3.4.** merupakan irisan dua bidang atom yang terletak tegak lurus dengan halaman buku dan ketidak-teraturan digambarkan oleh perpotongan garis ketidak-teraturan yang vertikal pada halaman buku. Gaya yang bekerja pada bidang atom dapat memindahkan garis ketidak-teraturan dalam bentuk linier yang tidak sempurna. Daerah terdistorsi ini disebut dislokasi dan bentuk linier yang baru dilukiskan hanya salah satu konfigurasi yang dapat dimiliki oleh dislokasi. Geometri kristal mungkin sangat kompleks, tetapi gagasan bahwa pada waktu tertentu beberapa atom bergeser bersama-sama karena pengaruh gaya adalah sangat sederhana. Meskipun demikian, gagasan ini dapat dimanfaatkan guna menjelaskan kenyataan mengapa bahan tak mungkin mencapai kekuatan teoritisnya.

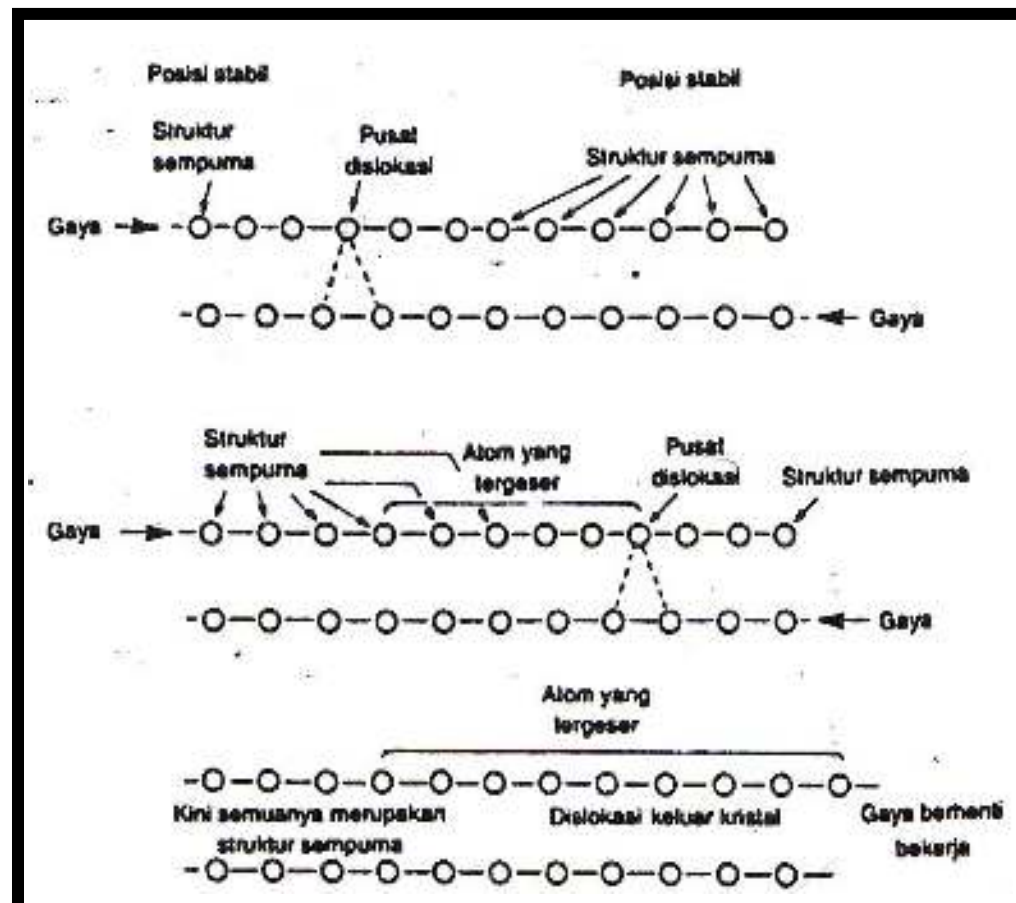
Dislokasi merupakan bagian dari kristal dan pada logam yang belum mengalami deformasi mekanik terdapat sekitar  $10^6$  dislokasi per-sentimeter persegi. Setelah mengalami deformasi mekanik, jumlah tersebut berlipat ganda menjadi  $10^{12}$  per-sentimeter persegi.

Pada sebagian besar logam, dislokasi bergerak bila gaya mencapai nilai tertentu hingga menimbulkan deformasi.

Dislokasi dapat bergerak bebas dalam kisi kristal atau terpaku di suatu tempat. Atom asing dengan ukuran berbeda ditambahkan pada kristal khusus untuk menimbulkan distorsi tambahan disamping distorsi yang sudah ada. Distorsi tersebut mempersulit pergerakan dislokasi sehingga diperlukan gaya yang lebih besar untuk menggerakkannya dalam kristal. Ini berarti sifat elastisitas meningkat. Kita katakan bahwa bahan diperkuat. Menambahkan atom asing dalam kristal logam disebut perpaduan atau alloying dan efek penguatan yang dihasilkannya disebut pengerasan komposisi atau pengerasan larutan padat.

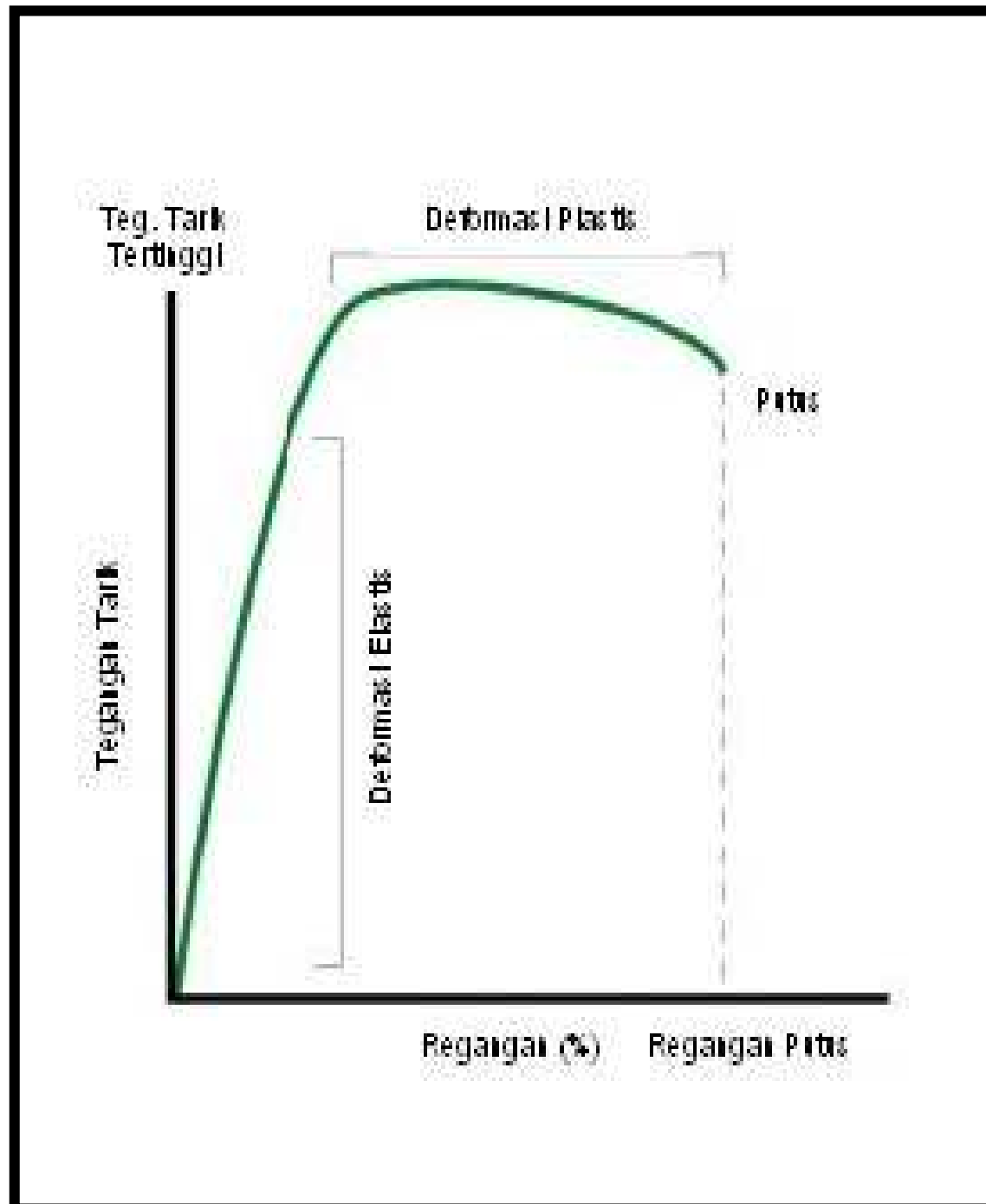
Contoh lain mengenai pentingnya dislokasi adalah pengerasan kerja sewaktu logam mengalami deformasi plastik. Pada diagram tegangan-regangan (**Gambar 3.5**) terlihat deformasi plastik mulai terjadi pada saat hubungan garis lurus tegangan-regangan berakhir. Dengan perkataan lain, logam yang mengalami deformasi plastik tidak dapat kembali ke bentuk semula sewaktu tegangan ditiadakan. Deformasi plastik terjadi karena dislokasi bergerak dan berlipat ganda selama pergerakan dalam kisi. Penggandaan ini menambah ketidak-teraturan serta distorsi kristal dan menghambat

pergerakan dislokasi selanjutnya. Dengan meningkatnya deformasi plastik, bertambah pula level tegangan yang diperlukan untuk menggerakkan dislokasi. Logam bertambah keras dan kuat. Hal ini disebut dengan pengerasan kerja.



**Gambar 3.4.**  
**Diagram Skematik Pergerakan Dislokasi dibawah Pengaruh Gaya <sup>7)</sup>**

Pengaruh temperatur terhadap dislokasi juga penting. Pada suhu tinggi, difusi mempercepat pergerakan atom dan pergerakan dalam kisi kristal dapat meniadakan dislokasi dan mengurangi kekusutan yang timbul akibat deformasi. Setelah perlakuan panas, yang dapat mengurangi dislokasi, gaya yang diperlukan untuk menggerakkan dislokasi yang masih ada berkurang. Mekanisme tersebut yang mencakup pemanasan benda yang telah mengalami pengerasan kerja agar lunak dan ulet kembali disebut anil.



**Gambar 3.5.**  
**Kurva Tegangan-Regangan Logam Ulet dibawah  $0.6 T_m$  <sup>7)</sup>**

Sedangkan dislokasi dalam kristal berkisi kubus ditunjukkan oleh **Gambar 3.6**, yang bergerak dalam kisi kristal dan keluar. Pergerakan dislokasi menyebabkan satu tahap karena adanya pergeseran (*slip*)  $b$ . Arah dan ukuran  $b$  adalah tetap menurut

geometri kristal,  $b$  dinamakan vektor Burgers. Seperti dijelaskan pada gambar (a), kalau pada dislokasi tersebut garis dislokasinya tegak lurus pada  $b$ , dislokasi ini disebut dislokasi ujung. Sedangkan pada gambar (b) garis dislokasi sejajar dengan  $b$ , dislokasi ini disebut dengan dislokasi sekerup. Jenis dislokasi lain adalah garis dislokasinya membentuk sudut tertentu dengan  $b$  yang disebut dengan dislokasi campuran. Seperti dijelaskan dalam gambar kadang-kadang dislokasi melintas kristal, tetapi pada umumnya merupakan suatu lup dan garis dislokasi tidak berakhir dalam kristal. Oleh karena itu, lup dislokasi berubah sifatnya dari dislokasi sekerup ke dislokasi campuran ke dislokasi ujung, atau vektor burgernya serupa di setiap bagian. Yang terakhir dinamakan lup dislokasi prismatic yang terdiri dari kekosongan kisi dan atom interstisi ( **Gambar 3.7** ).

Kisi kristal di sekitar garis dislokasi mengalami deformasi sehingga terdapat tegangan – regangan. Hal ini mudah dimengerti dengan membayangkan dislokasi di sekitar / didalam kisi kristal. Dislokasi bergerak pada bidang slip. Umpamakan bidang slip dipotong, bagian atas dan bawah kristal bidang slip dapat bergerak sejauh  $b$  dan kristal bersatu lagi pada bidang slip itu, akhirnya menghasilkan dislokasi yang bergerak sampai ke ujung kristal. Keadaan akhir pergerakan tersebut dilukiskan pada **Gambar 3.8** untuk dislokasi ujung dan dislokasi sekerup. Pada bagian kristal yang lebih dekat kepada dislokasi tegangannya makin tinggi, untuk memudahkan, pada gambar dibuat lubang.

Komponen tegangan pada dislokasi ujung ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -\frac{Dy(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad , \quad \sigma_{yy} = -\frac{Dy(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad , \quad \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \sigma_{xz} = \sigma_{zx} = 0 \\ \dots\dots\dots(3-1) \end{aligned}$$

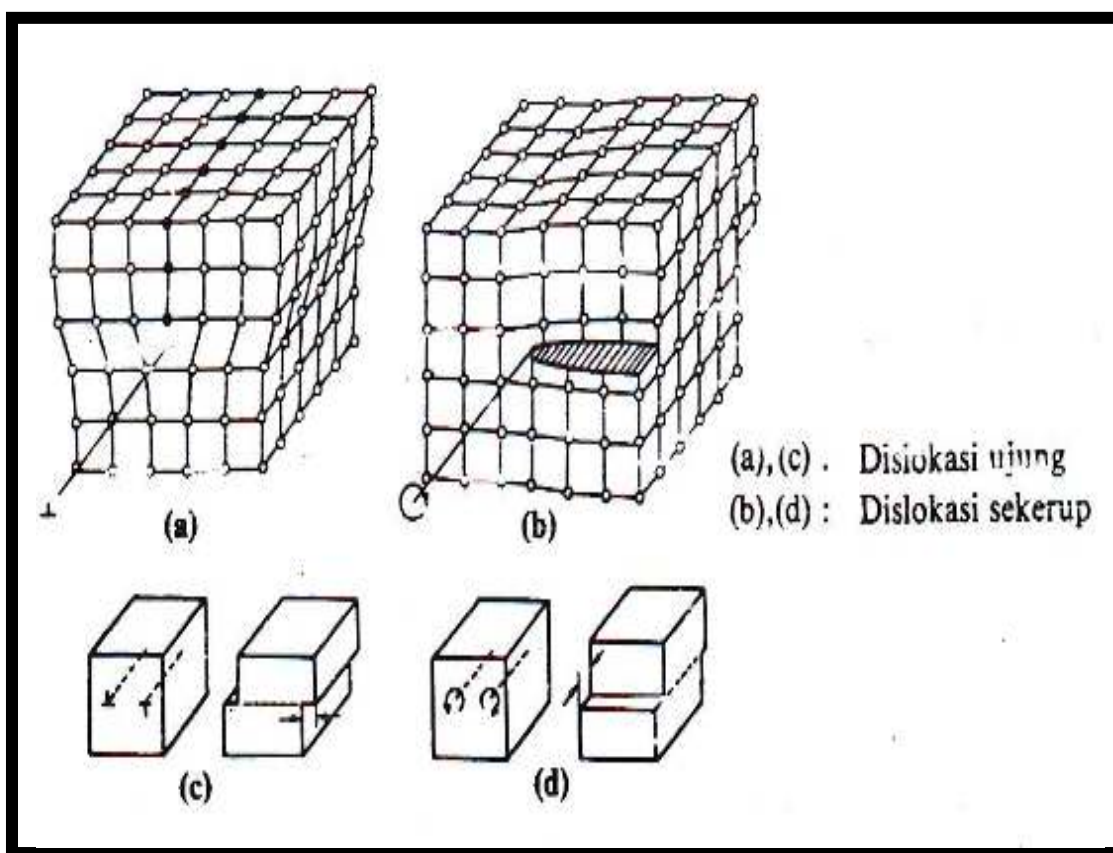
$$\sigma_{xy} = \frac{D(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad , \quad \sigma = \frac{\mu b}{2\pi(1 - \nu)}$$

Dan dalam hal dislokasi sekerup ditentukan dari persamaan berikut :

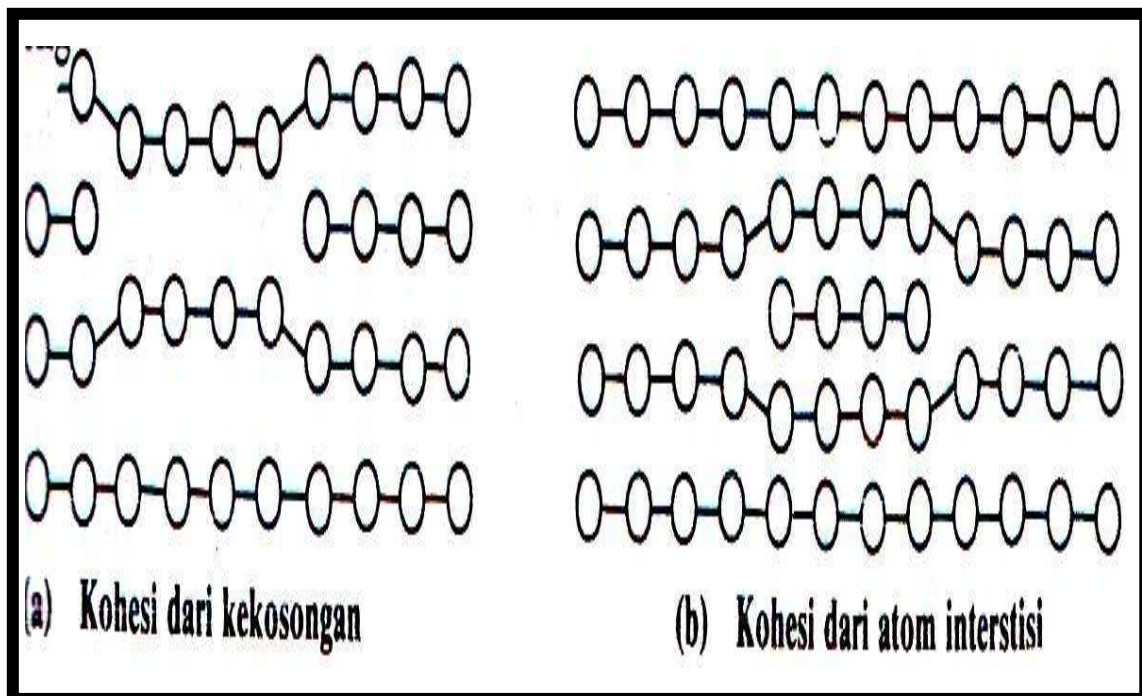


$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} &= 0 \\ \sigma_{xz} = \sigma_{zx} &= -\frac{\mu b}{2\pi} \frac{y}{(x^2 + y^2)} \\ \sigma_{yz} = \sigma_{zy} &= \frac{\mu b}{2\pi} \frac{y}{(x^2 + y^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3-2)$$

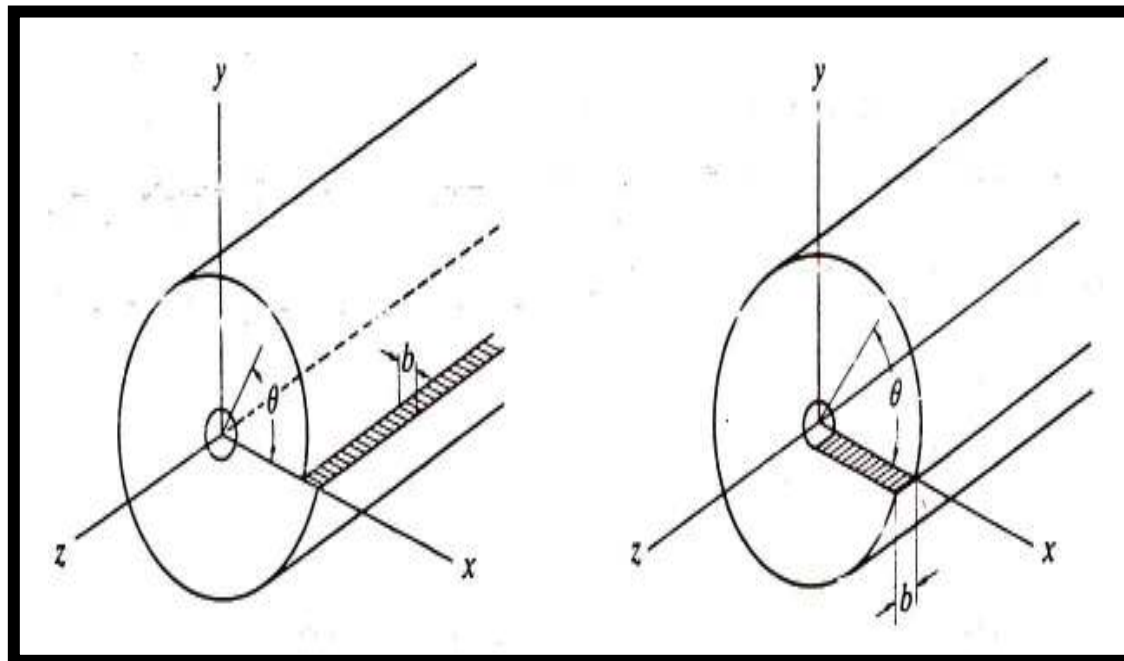
Persamaan ini menyatakan bahwa makin jauh dari titik dislokasi, tegangan menurun sebanding dengan jarak yang akhirnya menjadi nol pada jarak tak terhingga dan pada titik tengah tegangannya tak terhingga. Hal ini disebabkan karena peranan tersebut diturunkan dengan perumpamaan benda kontinyu. Oleh karena itu perlu ada penyelesaian lain, yang disebut inti dislokasi.



Gambar 3.6. Dua Macam Dislokasi dalam Sisi Kubus <sup>7)</sup>



Gambar 3.7.  
Lup Dislokasi Prismatik <sup>7)</sup>



Gambar 3.8.  
Dislokasi Ujung dan Dislokasi Sekerup <sup>7)</sup>

Energi regangan yang dimiliki per-satuan panjang garis dislokasi disebut energi dislokasi, yang dikemukakan sebagai berikut :

- 1) Dislokasi sekerup  $\xi = (\mu b^2 / 4\pi) \log(R / 5b)$
  - 2) Dislokasi ujung  $\xi = (\mu b^2 / 4\pi(1 - \nu)) \log(R / 5b)$
  - 3) Dislokasi campuran  $\xi = (\mu b^2 / 4\pi(1 - \nu))(1 - \cos^2 \theta) \log(R / 5b)$
- .....(3-)

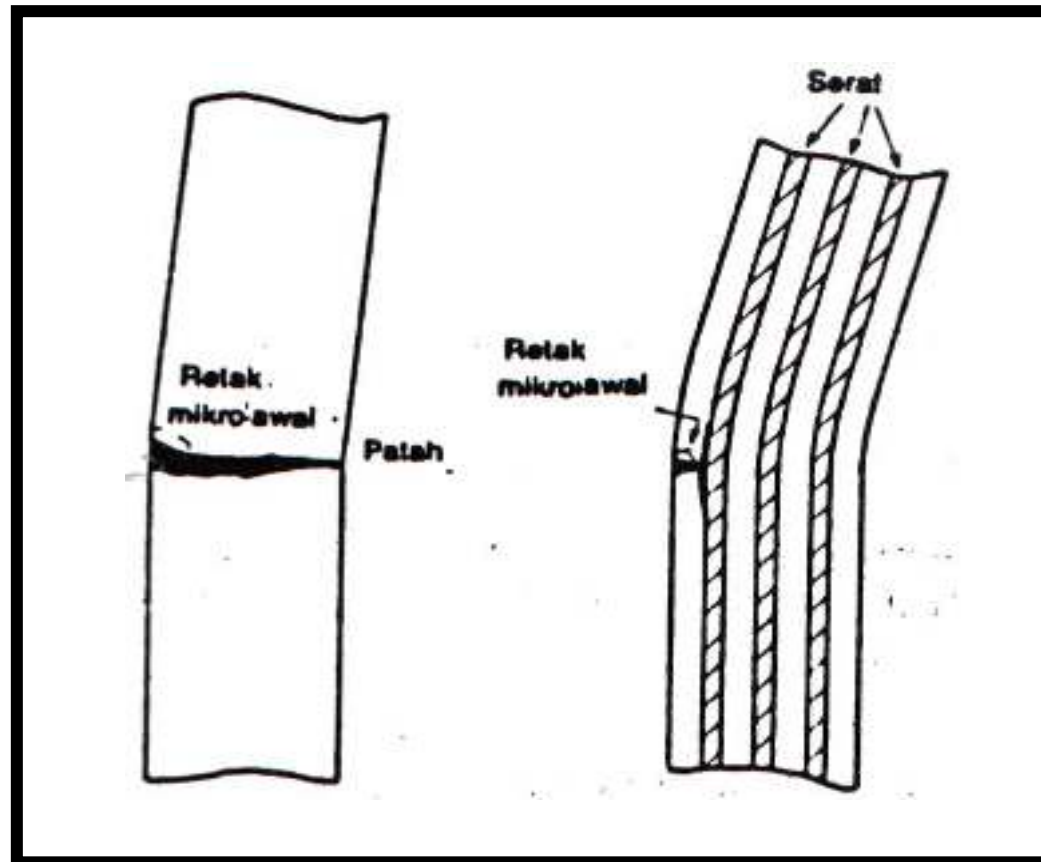
Dimana R adalah jari-jari kristal. Tidak berguna menentukan medan dislokasi yang besar karena secara kasar  $\log(R / 5b)$  kira-kira  $4\pi$ . Jadi, energi dislokasi sekerup adalah  $\mu b^2$ , energi dislokasi ujung  $\mu b^2 / (1 - \nu)$  dan energi dislokasi campuran adalah  $\mu b^2 / (1 - \nu) (1 - \cos^2 \theta)$ . Sudut  $\theta$  adalah sudut antara garis dislokasi dan vektor burgers, dan energi dislokasi campuran adalah jumlah energi dislokasi ujung dengan vektor burgers  $b \sin \theta$  dan dislokasi sekerup dengan vektor burgers  $b \cos \theta$ .

### 3.1.3. Retak Mikro

Retak mikro dapat dianggap sebagai diskontinuitas yang terletak dalam bidang, dengan ukuran mulai beberapa puluh atom hingga retak yang dapat dilihat dibawah mikroskop.

Retak mikro menimbulkan pemusatan tegangan pada ujung-ujungnya dan bertambah besar bila dipengaruhi gaya yang jauh lebih kecil daripada gaya yang diperlukan untuk merusak bahan yang tidak cacat.

Dalam semua benda padat dijumpai retak mikro, tetapi pada logam pengaruh gaya luar dapat diimbangi oleh pergerakan dislokasi dekat ujung retak. Biasanya, dislokasi ini bergerak dan menghasilkan deformasi plastik yang mengurangi tegangan pada ujung retak sehingga retak tidak merambat. Akan tetapi, jika dislokasi terhenti, retak merambat dan terjadilah kepatahan. Kejadian semacam ini disebut patah rapuh. Disini tidak terdapat deformasi plastik dan peristiwa ini terjadi sewaktu logam masih berperilaku elastik. Akan tetapi, dalam bahan mungkin terdapat permukaan antara yang justru menghalangi perambatan retak. Bila retak mencapai cacat ini, perambatan retak akan terhenti dan retak akan berubah arah, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.9** dibawah.



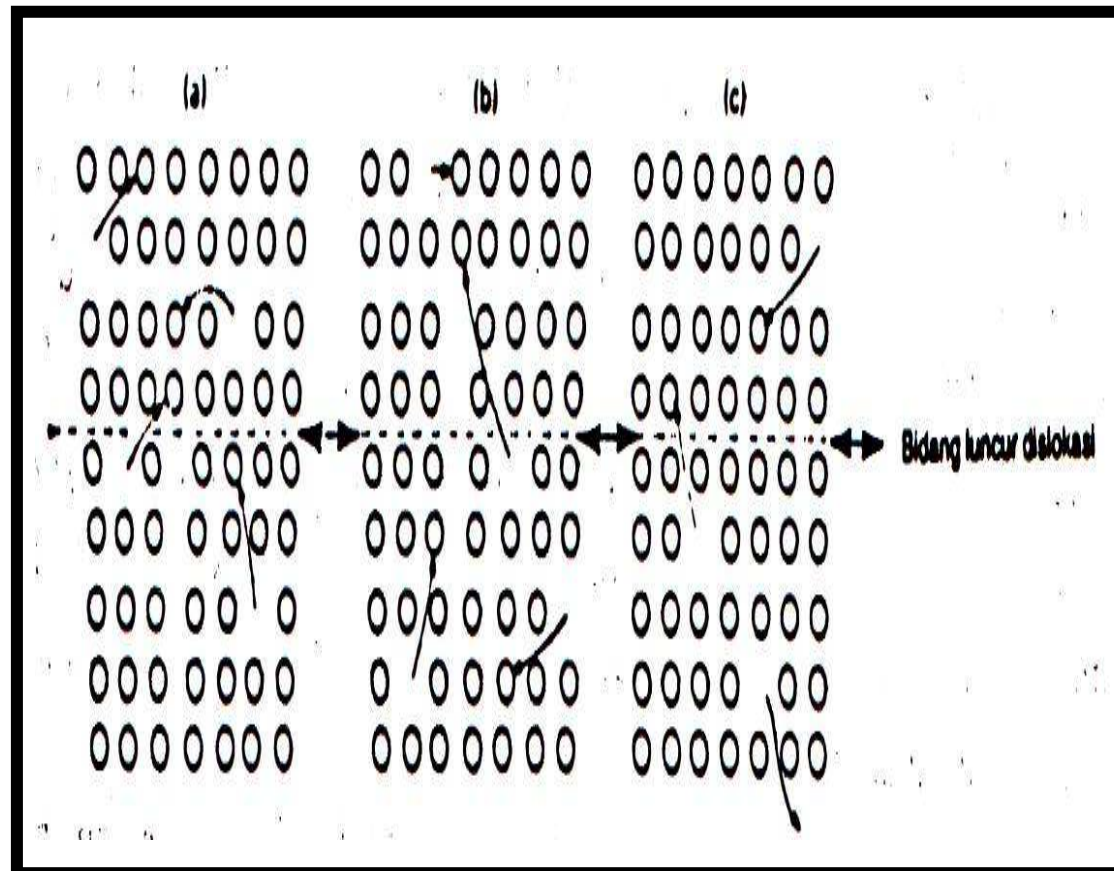
**Gambar 3.9.**  
**Cara Pencegahan Perambatan Retak Mikro**  
**dengan Membentuk Permukaan Antara Secara Penguatan Serat <sup>7)</sup>**

#### 3.1.4. Kekosongan

Selain dislokasi dan retak mikro, masih dijumpai cacat lain pada kisi logam. Kadang-kadang, ada atom yang kurang atau terdapat kekosongan atom pada kisi. Meskipun pengaruh kekosongan terhadap sifat mekanik tidak seberapa besar, kekosongan turut menentukan perilaku bahan padat pada suhu tinggi atau difusi. Pada setiap suhu terdapat keseimbangan jumlah kekosongan agar kristal stabil secara termodinamika. Sedikit di bawah titik cair, jumlah kekosongan seimbang adalah satu per  $10^7$  atom atau  $10^{-7}$ .

Kekosongan dapat meniadakan dislokasi dan menghapus kekusutan yang terjadi akibat deformasi berlebihan. Pada **Gambar 3.10** terlihat bahwa aliran kekosongan dapat meniadakan ujung bidang sisipan dislokasi; dislokasi memanjat

keluar bidang asalnya. Oleh karena itu, tidak terdapat lagi hambatan untuk dislokasi lain pada bidang tadi, yang berarti bahwa deformasi dapat berkelanjutan.



**Gambar 3.10.**  
**Difusi Kekosongan Menyebabkan**  
**Dislokasi Bergerak Meninggalkan Bidang Luncur<sup>7)</sup>**

Aliran kekosongan ke dislokasi juga terjadi pada peristiwa mulur atau creep. Mulur adalah deformasi plastik logam yang terjadi bila bahan dibebani dengan tegangan konstan yang jauh lebih rendah daripada tegangan putus biasa. Beban di daerah elastik menimbulkan regangan pada dislokasi, hingga dislokasi akan mulai bergerak. Jika pada keadaan ini kekosongan berdifusi ke ujung garis dislokasi sehingga garis dislokasi akan memanjat meninggalkan bidang awal dan dislokasi tidak akan menjadi penghambat lagi. Untuk waktu yang cukup lama, pergerakan dislokasi yang luas akan menimbulkan deformasi tetap atau mulur. Deformasi lambat terjadi bila tegangan lebih kecil daripada batas bagian linier kurva tegangan-regangan. Makin

tinggi temperatur, makin banyak kekosongan pada isi, oleh karena itu, mulur merupakan cara deformasi utama pada temperatur di atas  $0,3 T_m$ .

### 3.1.5. Perpaduan Unsur-Unsur

Perpaduan unsur-unsur merupakan campuran antara dua unsur atau lebih yang membentuk struktur kristal yang memiliki sifat logam. Salah satu komponen campuran tersebut haruslah unsur logam, tetapi lainnya dapat logam maupun bukan logam asalkan ikatan utama dalam kristal adalah ikatan logam. Ada tiga kemungkinan, yaitu :

#### 1. *Unsur tidak saling mempengaruhi (atom indiferen)*

Bila atom tidak berpengaruh terhadap atom lainnya, atom tersebut akan terdispersi secara acak dalam struktur kristal. Jumlah atom asing yang mungkin terdapat dalam kisi kristal terbatas. Biasanya, bila perbedaan ukuran 15% atau lebih kecil dari itu, dapat terbentuk berbagai campuran. Bila kedua unsur murni dan mempunyai struktur kristal yang sama, terjadi kelarutan sempurna. Bila perbedaan ukuran melebihi 15%, daya larut salah satu unsur akan berkurang.

Susunan kristal semacam ini disebut larutan padat. Logam utama disebut pelarut dan unsur lainnya disebut logam yang larut. Paduan komersial umumnya mengandung lebih dari satu unsur paduan dan larutan padat biasanya mengandung lebih dari satu unsur larut.

Bentuk larutan padat yang paling sering dijumpai adalah larutan padat substitusional, dimana atom yang larut menggantikan tempat kedudukan atom pelarut. Jenis larutan padat lain adalah larutan padat interstisial dimana atom yang larut menempati ruang antara pelarut dan terjadi bila atom unsur yang larut lebih kecil, khususnya hidrogen, karbon, oksigen dan boron.

#### 2. *Unsur yang tolak-menolak*

Bila atom membentuk paduan cenderung tolak-menolak, pembentukan larutan padat agak sulit. Tiap atom unsur akan membentuk agregat yang besar dengan bentuk kristal tersendiri dalam bahan utuh itu. Agregat atom ini biasanya cukup besar dan dapat dilihat di bawah mikroskop optik dan merupakan unsur tersendiri dalam struktur mikro.

#### 3. *Unsur yang tarik-menarik*

Bila atom yang berbeda dalam paduan tarik-menarik, berbagai susunan dapat terbentuk. Bila gaya tarik-menarik besar, ikatan ion atau ikatan kovalen menghasilkan ikatan kimia yang tidak memiliki sifat logam. Pada kasus demikian hampir seluruh unsur tambahan yang bergabung dengan unsur utama membentuk senyawa tersendiri dalam struktur mikro berbentuk partikel diskret, dalam struktur kristal unsur utama.

Bila gaya tarik-menarik antar atom yang berbeda kurang kuat, ikatan logam tetap akan terjadi, tetapi kemungkinan akan terjadi efek yang disebut efek pengaturan. Ada kecenderungan bagi atom tak sejenis dalam paduan untuk mengatur diri membentuk pola teratur, sehingga setiap atom yang larut dikelilingi oleh atom pelarut yang menariknya. Struktur dasar kristal akan tetap (seperti unsur pelarut). Struktur yang diatur cenderung lebih kuat dan kurang ulet dibandingkan struktur acak karena distorsi dalam kristal yang ditimbulkannya. Diperlukan gaya luar yang lebih besar untuk menggerakkan dislokasi.

### **3.1.6. Pertumbuhan Struktur Butir**

Struktur kristal logam akan rusak pada titik cairnya. Batas butir akan lenyap dan kekuatan mekanik tidak berarti lagi. Struktur kristal akan terbentuk kembali jika logam didinginkan. Sewaktu membeku, energi dilepaskan dalam bentuk panas laten pembekuan dan laju pembekuan bergantung pada jumlah panas yang dilepaskan.

Satu-satunya cara untuk menghasilkan logam tanpa struktur kristal atau logam amorf adalah melalui pendinginan pita logam cair dengan laju sangat cepat melampaui  $3 \times 10^5$  derajat  $^{-1}$ . Proses lain akan menghasilkan bahan kristalin dengan struktur butir tertentu.

Bila pendinginan berlangsung perlahan-lahan, terbentuklah kelompok atom pada permukaan cairan yang kemudian menjadi inti butiran padat. Selama solidifikasi dengan laju pendinginan lambat, inti pertama bertambah besar akibat perpindahan atom dari cairan ke bahan padat. Akhirnya semua cairan bertransformasi dan butir bertambah besar. Batas butir merupakan titik pertemuan pertumbuhan berbagai inti. Bila pendinginan cepat, jumlah kelompok bertambah dan tiap-tiap kelompok tumbuh

dengan cepat hingga akhirnya saling bertemu. Sebagai hasil akhir, diperoleh logam dengan jumlah butir yang lebih banyak atau disebut logam padat berbutir halus.

Oleh karena itu, besar butir logam bergantung pada laju pendinginan. Bila laju pendinginan tidak dapat dikendalikan, seperti di bagian dalam suatu cor-an yang besar, butir halus dapat diperoleh dengan menambahkan inti-inti untuk memacu pertumbuhan butir di berbagai lokasi. Teknik pengintian ini disebut inokulasi atau penghalusan butir dan penting untuk menghasilkan benda cor-an yang langsung digunakan.

Bentuk butir benda, yang berasal dari cairan yang membeku tidak teratur dan dipengaruhi oleh empat faktor, yaitu :

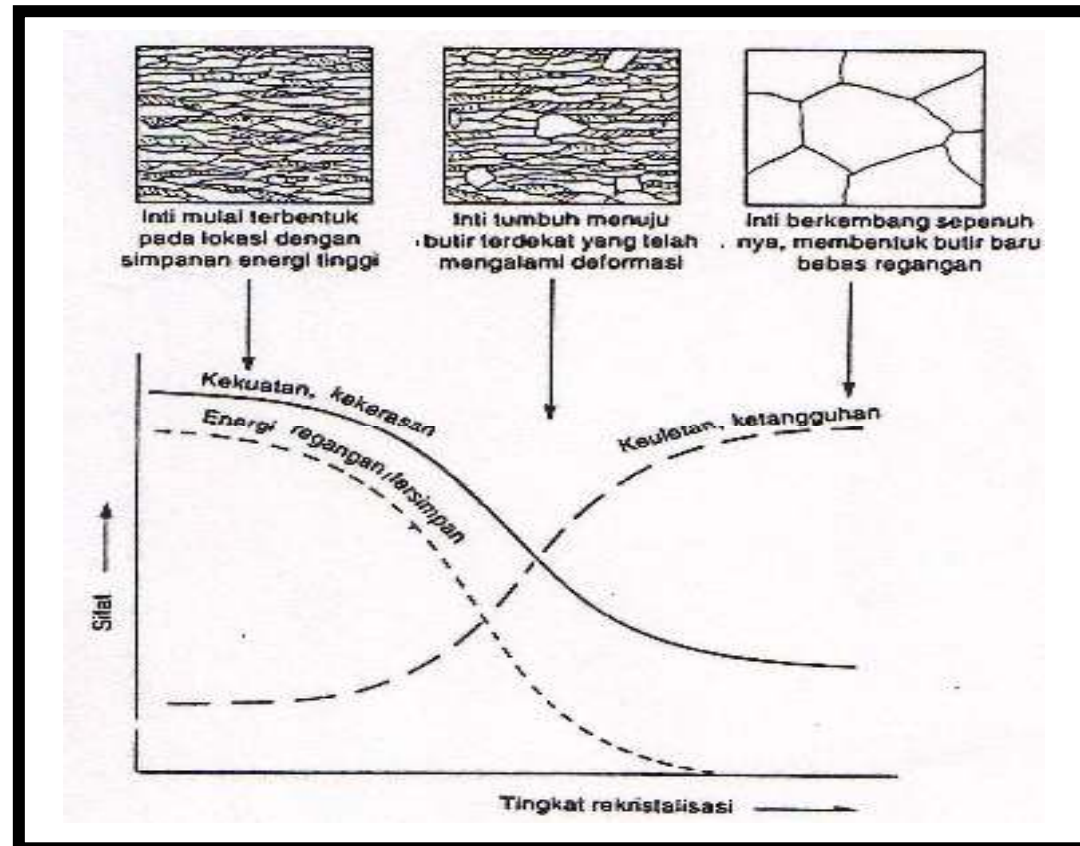
1. Efek kristalin yang cukup kuat akan mengatur pertumbuhan kristal dalam arah tertentu dan akan menghasilkan butir berbentuk kolom, angular atau berbentuk seperti jarum.
2. Tegangan permukaan padat-cair akan menentukan apakah zat padat yang tumbuh akan mempunyai permukaan bulat yang akan menghasilkan struktur polihedral.
3. Efek termal, akan mempercepat pertumbuhan butir dengan perbandingan permukaan : volume besar akan menghasilkan struktur berbentuk pohon cemara yang disebut dendrit.
4. Waktu akan mempengaruhi pertumbuhan butir dimana dengan pendinginan yang cepat akan diperoleh bentuk butir yang tidak merata sedangkan jika waktu pendinginan berjalan konstan akan terbentuk batas butir yang baik dan bentuk butirannya-pun akan baik.

### 3.1.7. Rekrystalisasi

Energi yang terhimpun dalam struktur pengerjaan dingin menjadikannya tidak stabil. Bila dipanaskan hingga suhu yang menyebabkan difusi berlangsung dengan cepat, rangkaian dislokasi terlepas dan terbentuk batas butir baru. Logam menjadi lunak atau dikatakan bahwa logam telah dianil. Proses tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.11**. Inti untuk butir baru terdapat di lokasi di dalam butir, kristal yang rusak. Daerah tersebut kemudian tumbuh, sehingga terjadi kristal baru bebas regangan. Proses itu disebut rekrystalisasi. Makin besar jumlah energi yang tersimpan dengan



perkataan lain, pengerjaan dingin logam lebih besar semakin besar pula jumlah lokasi inti dan makin halus butir akhir.



**Gambar 3.11.**  
**Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Logam Terdeformasi,**  
**Selama Proses Rekristalisasi <sup>7)</sup>**

Seperti telah diperlihatkan pada **Gambar 3.11.**, sifat bahan yang dianil berubah menjadi sifat keadaan bebas regangan, meskipun kekuatan dan keuletan meningkat (dibandingkan benda cor-an). Sesungguhnya, proses rekristalisasi tidak semudah itu. Terdapat tahap antara yang tidak dapat diamati dengan mikroskop optik. Pada tahap ini rangkaian dislokasi membentuk batas butir bersudut kecil dan disebut tahap pemulihan. Meskipun sifat mekanik hampir tak berubah, telah terjadi pengaturan kembali struktur pada skala atom, mendahului perubahan struktur mikro diatas.

Temperatur rekristalisasi biasanya sekitar  $0,4 T_m$ . Proses rekristalisasi bergantung pada waktu dan temperatur, biasanya dipilih suhu sekitar  $0,6 T_m$  agar proses berlangsung lebih cepat.

Pengerjaan mekanik mempunyai efek yang sangat berbeda bila dilakukan di atas atau dibawah daerah rekristalisasi. Bila dibawah suhu rekristalisasi, struktur yang dihasilkan terdistorsi, mengandung energi dan disebut struktur pengerjaan dingin. Bila deformasi dilakukan diatas suhu rekristalisasi, struktur yang dihasilkan lebih lunak, mempunyai sifat mekanik yang sama dengan logam awal dan disebut struktur pengerjaan panas. Perlu dicatat bahwa istilah "panas" atau "dingin" berkaitan dengan suhu kerja yang dihubungkan dengan  $0,6 T_m$  atau suhu rekristalisasi. Sebagai contoh, untuk timbal (Pb) pengerjaan pada suhu ruang termasuk pengerjaan panas, sedang untuk tungsten (W)  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  masih merupakan pengerjaan dingin.

### **3.1.8. Diagram Fasa Sebagai Dasar Metallografi**

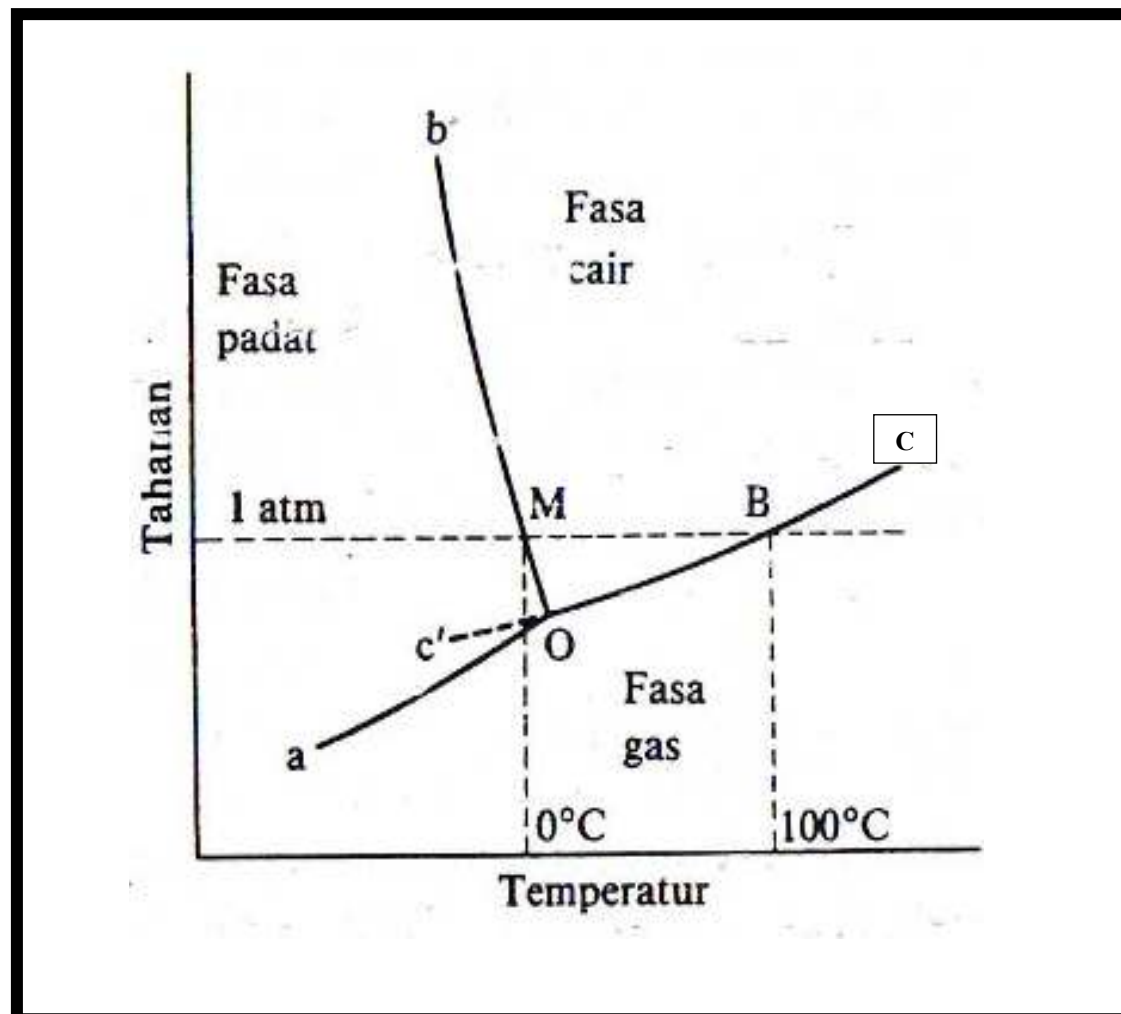
Struktur dan sifat logam murni sangat berubah apabila dipadu dengan unsur lain. Kelakuan bahan seperti itu dapat dilihat juga pada bahan cair dan gas, tetapi yang sangat menyolok terdapat pada bahan padat.

Kalau bahan (komponen A) menjadi sistem dua komponen dengan menambahkan komponen B, fasa baru tidak terbentuk apabila B larut dalam keadaan pada A. Tetapi apabila B dipadukan melebihi kelarutan maksimumnya maka terjadi campuran larutan padat jenuh dan berlebihan fasa B. Kadang-kadang A dan B bereaksi satu sama lain membentuk fasa lain. Dalam sistim tiga komponen atau sistem berkomponen banyak, maka sistem itu menjadi berfasa banyak yang rumit. Sifat bahan berubah yang disebabkan oleh perbandingan campuran dan kondisi campuran fasa yang ada. Hubungan antara jumlah setiap komponen dan fasa yang terjadi dapat dilihat dari diagram fasa yang dapat memberikan informasi mengenai sifat bahan.

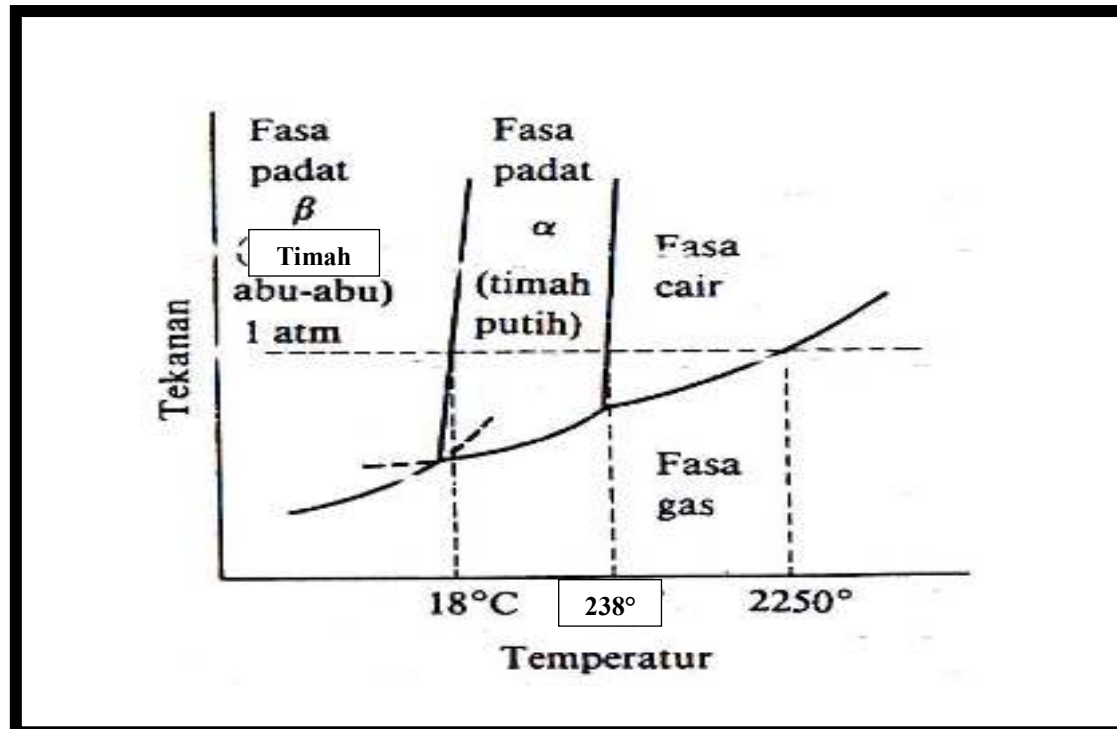
#### **3.1.8.1. Diagram Fasa Sistem Satu Komponen**

Keadaan sistem komponen dapat ditentukan dalam tekanan  $P$  dan temperatur tertentu. Persamaan fasa gas  $PV=RT$  mempunyai hubungan tertentu antara  $P$ ,  $T$  dan

$V$ , jadi apabila  $P$  dan  $T$  tertentu, volume  $V$  atau masa jenisnya juga tertentu. Hal serupa berlaku terhadap fasa cair dan fasa padat. Keadaan ini dinyatakan dalam diagram  $P, T$ . **Gambar 3.12** menunjukkan daerah keadaan gas, cair dan padat dengan berbagai kombinasi  $P$  dan  $T$ , dengan mengambil air sebagai contoh. Kalau pada tekanan tetap misalnya 1 atm, temperatur diubah, terjadi fasa padat (es) di bawah titik cair ( $0^{\circ}\text{C}$ ), fasa cair (air) dalam daerah temperatur antara titik cair dan titik didih ( $100^{\circ}$ ) dan fasa gas (uap) diatas titik didih. Ada dua fasa cair dan gas pada titik didih, **Gambar 3.13** menunjukkan bahwa diagram  $P-T$  untuk timah. Diagram yang menunjukkan fasa yang ada dalam keseimbangan disebut diagram fasa.



**Gambar 3.12.**  
Diagram Fasa Cair (Air) <sup>7)</sup>



Gambar 3.13.  
Diagram Fasa Timah Putih <sup>7)</sup>

### 3.1.8.2. Aturan Fasa

Aturan fasa berguna kalau sistem komponen banyak berada dalam keseimbangan. Kalau jumlah komponen dalam sistem adalah  $C$  dan fasa yang ada ialah  $P$ , dengan derajat kebebasan  $F$  yang merupakan jumlah variabel yang dapat berubah bebas tanpa memberikan pengaruh, membuat fasa ada dalam keadaan sama, maka:

$$F = C + 2 - P \dots\dots\dots (3-4)$$

Hubungan ini disebut aturan fasa (kaidah fasa Gibbs). Dalam **Gambar 3.12** dari sistim satu komponen,  $C=1$  dan  $F=3-P$ , jadi kalau  $P=a$ ,  $F=2$ , tidak dapat merubah temperatur dan tekanan secara bebas menahan keadaan berfasa tunggal (luas bidang dibatasi oleh garis  $Oa$ ,  $Ob$  dan  $Oc$  dalam gambar tersebut). Kalau  $P=2$ ,  $F=1$ , dan hanya temperatur atau tekanan dapat berubah bebas (garis  $Oa$ ,  $Ob$ , dan  $Oc$ ).

Sebagai contoh kalau tekanan ditentukan temperatur dalam keadaan dua fasa akan tetap. Atau kalau temperatur berubah sedikit naik atau turun, salah satu fasa mungkin hilang. Kalau  $P=3$ ,  $F=0$  dan keadaan 3 fasa terbatas pada temperatur tetap dan tekanan tetap (titik O).

### 3.1.8.3. Diagram Fasa dari Dua Komponen

#### 1. Bagaimana menyatakan diagram fasa dua komponen

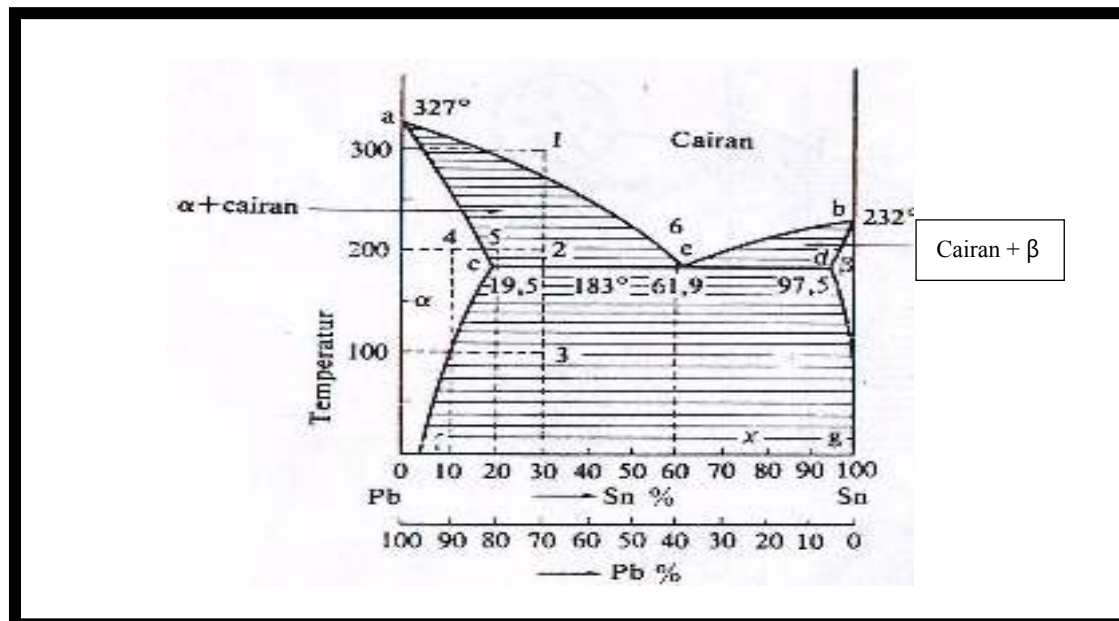
Dalam sistem dua komponen variabel dari keadaan adalah temperatur, tekanan itu komponen, jadi diperlukan tiga sumbu untuk menyatakan keadaan pada satu titik dalam ruang. Akan tetapi bagi bahan yang dipakai di industri yang umumnya berfasa padat dan tekanan uapnya sangat rendah, jadi keadaan gasnya dapat diabaikan. Dari **Gambar 3.12** dan **Gambar 3.13** temperatur keseimbangan fasa padat dengan fasa cair atau fasa padat dengan fasa padat menerima pengaruh kecil dari tekanan. Oleh karena itu dari ketiga variabel tersebut diatas tekanan dianggap tetap sehingga keadaan dapat dinyatakan dengan titik pada bidang dengan koordinat temperatur dan komponen. Aturan fasa dalam hal ini menjadi:

$$F = C - P + 1 \dots\dots\dots (3-5)$$

#### 2. Contoh diagram fasa dengan sistem dua komponen

**Gambar 3.14** menunjukkan diagram paduan timah dan timbal. Sumbu mendatar dipergunakan sebagai sumbu komponen 100% timbal dan 0% timah di salah satu ujung, 100% timah dan 0% timbal diujung lain. Dengan cara ini setiap komposisi dari komponen dapat dinyatakan oleh satu titik pada sumbu ini. Sebagai contoh, paduan 75% timbal adalah titik  $x$  dalam gambar tersebut. *Titik 1* menyatakan keadaan paduan 70% timbal 30% timah pada 300°C yang merupakan fasa cair. *Titik 2* menyatakan keadaan paduan yang sama pada 200°C yang terdiri dari kira-kira 55% fasa cair dan larutan padat  $\alpha$  dimana larut dalam timbal. *Titik 3* menyatakan keadaan paduan yang sama pada 100°C yang menunjukkan dua larutan padat  $\alpha$  dan larutan padat  $\beta$ . Pada larutan padat  $\beta$  sedikit timbal larut dalam timah. Paduan 10% timah dan 90% timbal pada 200°C di *titik 4* mempunyai fasa tunggal larutan padat  $\alpha$  dan

paduan 20% timah dengan 80% timbal, pada *titik 5* terdiri dari dua fasa yaitu larutan padat  $\alpha$  dan cairan, dan paduan 60% timah dengan 40% timbal pada *titik 6* hanya mempunyai satu fasa yaitu cair. Di atas garis a e b hanya terdiri dari fasa cair, garis ini dinamakan garis cair. Di bawah garis acedb hanya terdapat fasa padat, garis ini disebut garis padat. Daerah yang dilingkungi oleh cf, dg terdiri dari fasa padat. Garis fc, dg menunjukkan batas larutan padat yang disebut garis larutan.



**Gambar 3.14.**  
**Diagram Fasa Sistem Timbal-Timah Putih <sup>7)</sup>**

### 3. Hubungan komposisi

Kalau dua fasa dari sistem dua komponen berada dalam keseimbangan, maka aturan fasa dapat dipergunakan pada sistem ini,  $F=2+1-2=1$ , jadi dari dua variabel yaitu komposisi dan temperatur, hanya satu variabel yang bebas, sebagai contoh kalau temperatur ditentukan maka komposisi dari dua fasa dalam keseimbangan secara spontan tetap.

Dalam **Gambar 3.14** garis ac dan cf menyatakan kelarutan jenuh timah dalam timbal sedangkan garis cair ae menyatakan kelarutan jenuh timbal dalam cairan. Selanjutnya daerah dua fasa dalam keseimbangan dalam gambar dinyatakan dengan garis-garis sejajar absis. Garis ini dinamakan garis penghubung dimana masing-

masing fasa yang ada dalam keseimbangan pada suatu temperatur adalah fasa jenuh. Komposisi dari kedua fasa ditentukan oleh titik di kedua garis penghubung tersebut.

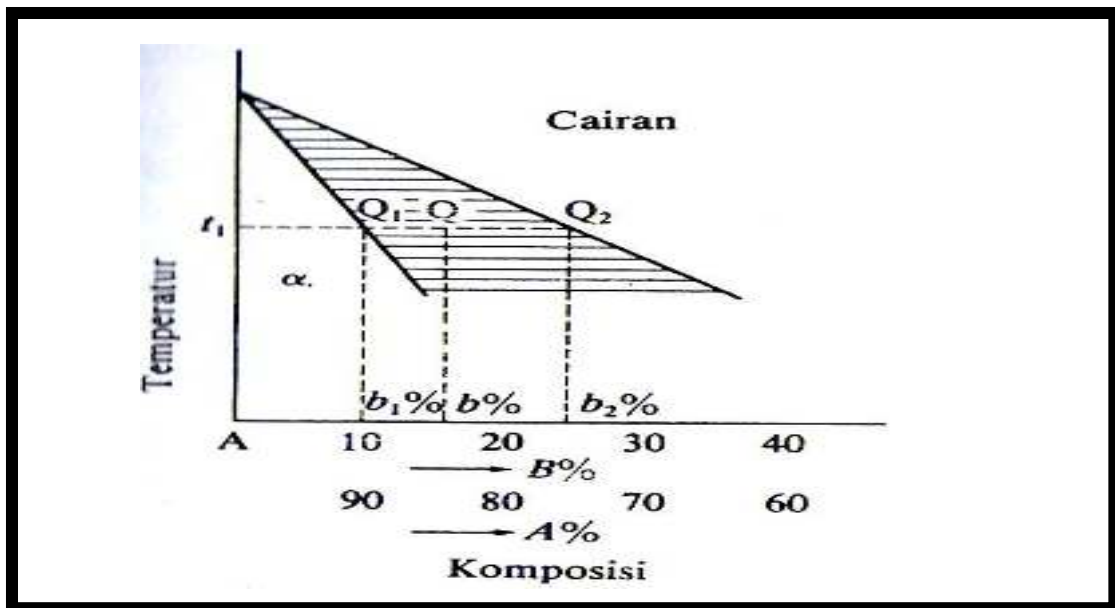
**4. Hubungan kuantitatif**

Diagram fasa menyatakan komposisi, fasa yang seimbang dan juga berat kedua fasa kalau komposisi asal ditentukan.

Dalam **Gambar 3.15** yang merupakan bagian dari **Gambar 3.14** menyatakan sistim dua komponen dengan komposisi total b%, B berada dalam keseimbangan pada temperatur t<sub>1</sub> dimana larutan padat α dengan komposisi b<sub>1</sub>% B dan cairan dengan komposisi b<sub>2</sub>% B berada bersama. Umpamakan jumlah berat adalah 100g. dari jumlah itu 100g adalah larutan padat α, berat dari cairan adalah (100-x) g, dan dari hubungan antara bahan yang ada dalam keseimbangan persamaan dibawah dapat ditetapkan.

$$100 \times \frac{b}{100} = x \frac{b_1}{100} + (100 - x) \frac{b_2}{100} \dots\dots\dots( 3-6 )$$

( volume B )    ( volume B    ( volume b  
 dalam la-            dalam cairan )  
 rutan padat )



**Gambar 3.15.****Pengkristalan Larutan Padat oleh Pendinginan <sup>7)</sup>**

Dari persamaan diatas:

$$100b = b_1x + 100b_2 - b_2x$$

$$x = \frac{100(b_2 - b)}{b_2 - b_1} \dots\dots\dots(3-7)$$

Demikian juga :

$$\frac{x}{100-x} = \frac{\text{berat } \alpha}{\text{berat cairan}} = \frac{\frac{100(b_2 - b_1)}{b_2 - b_1}}{100 - \frac{100(b_2 - b_1)}{b_2 - b_1}} = \frac{b_2 - b}{b - b_1} = \frac{Q_2Q}{Q_1Q} \dots\dots\dots(3-8)$$

Ini merupakan hubungan seperti halnya pada tuas pengungkit atau timbangan dimana Q sebagai tumpuan. Panjang lengan QQ<sub>1</sub> dikalikan dengan berat  $\alpha$ , sama dengan Q<sub>2</sub>Q dikalikan dengan berat cairan, hubungan ini dinamakan hubungan tuas dan Q<sub>2</sub>Q dapat dibaca dari sumbu komposisi. Kalau Q ada di tengah antara Q<sub>1</sub> dan Q<sub>2</sub>, larutan padat  $\alpha$  adalah 50% demikian juga cairan yang ada 50%. Kalau Q sama dengan Q<sub>1</sub>, tidak ada cairan dan kalau Q sama dengan Q<sub>2</sub> tidak ada larutan padat  $\alpha$ .

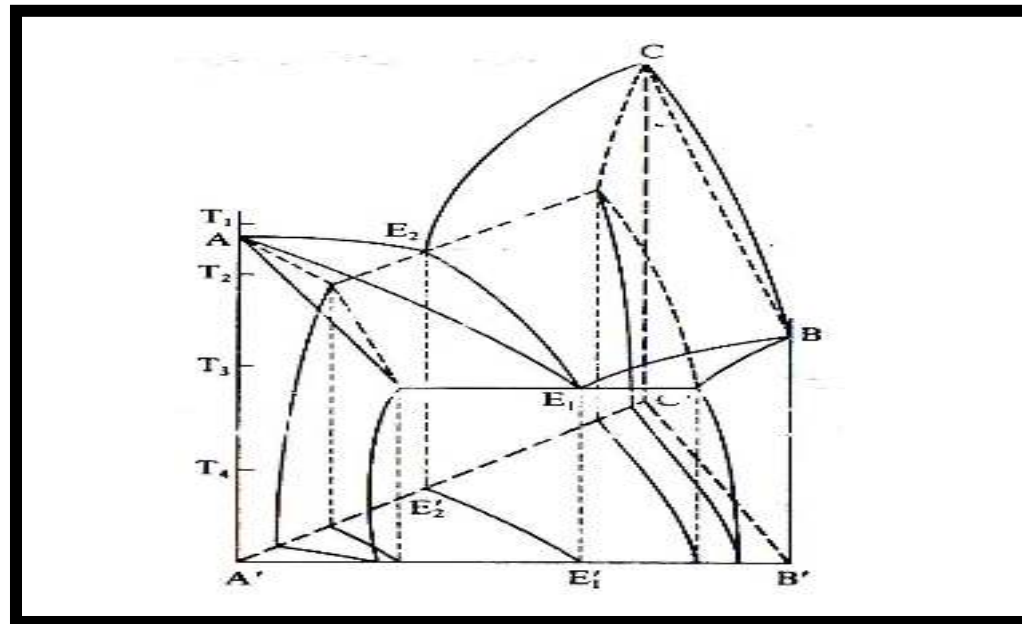
**3.1.8.4. Diagram Fasa Sistem Tiga Komponen****1. Diagram fasa sistem tiga komponen**

Bahan tidak selalu terdiri dari sistem dua komponen, sebagai contoh paduan tahan panas mempunyai 10 komponen. Bagi sistem komponen banyak tersebut diagram fasanya menjadi sangat rumit dan bentuk nyata yang memadai sukar diperoleh. Dari sistem komponen banyak yang rumit tersebut, sistem tiga komponen dipandang masih lebih sederhana.

**Gambar 3.16** menunjukkan contoh diagram fasa sistem tiga komponen. Diagram fasa tiga komponen A-B-C didasarkan kepada diagram fasa sistem dua komponen. Sistem dua komponen sering disebut sistem biner dan sistem tiga komponen disebut sistem terner dan seterusnya. Dalam gambar, diagram dua komponen dari A-B dan A-C membentuk diagram fasa dari komponen yang larut



sempurna dalam keadaan cair dan mempunyai eutektik dengan kelarutan padat yang terbatas, dan sistem dua komponen B-C membentuk diagram fasa yang komponennya larut sempurna dalam keadaan cair dan larut sempurna dalam keadaan padat. Segitiga sama sisi sebagai dasar, dinamakan segitiga komposisi, satu titik padanya menyatakan komposisi dari 3 komponen tersebut, dengan memberikan temperatur sebagai ordinat maka terbentuk gambar tiga dimensi.



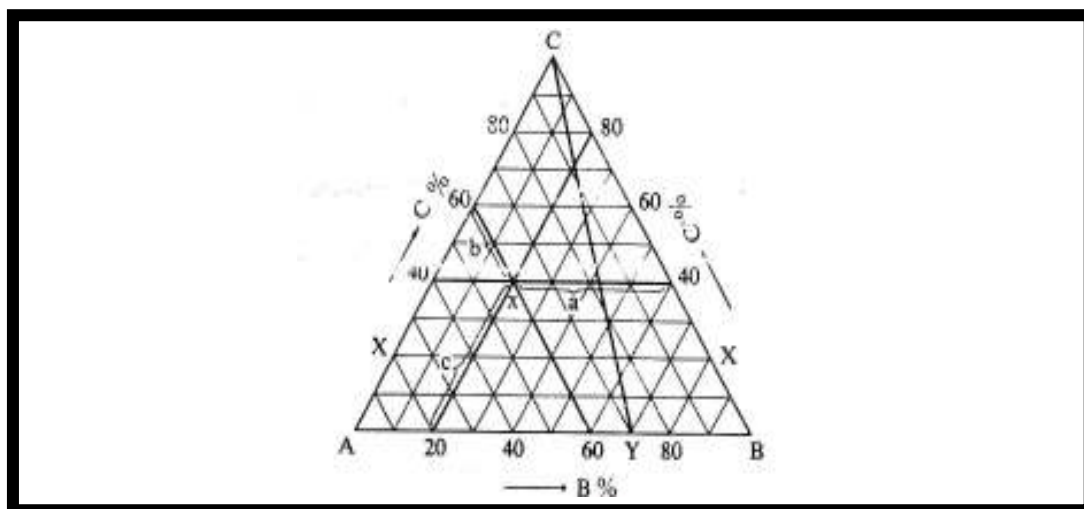
**Gambar 3.16.**  
**Pengkristalan Larutan Padat oleh Pendinginan <sup>7)</sup>**

## 2. Menyatakan komposisi sistem terner

Semua komposisi dari sistem biner dinyatakan dengan titik pada garis atas antara titik 100% A-0% B di satu ujung dan titik 0% A-100% B di ujung lain, tetapi pada sistem terner seperti dijelaskan dalam **Gambar 3.17** semua komposisi dari sistem ini dinyatakan oleh titik dalam segitiga sama sisi yang titik sudutnya merupakan 100% komponen.

Jumlah panjang garis a, b dan c yang ditarik dari titik  $x$  masing-masing sejajar dengan sisi segitiga itu, sama dengan panjang satu sisi yang dapat menyatakan 100%. Oleh karena itu panjang a, b dan c masing-masing dapat menyatakan prosentase

komponen A, B dan C. Hal itu serupa dengan hubungan tuas pada sistim biner, karena  $x$  sebagai tumpuan tuas a, b dan c dengan masing-masing komponen A B dan C yang menyeimbangkan. Dari penjelasan diatas, komposisi sistim dimana komposisi satu komponen tetap, umpamanya A 20%, maka komposisi A dan C yang berubah dapat dinyatakan pada garis XX yang sejajar dengan AC.



**Gambar 3.17.**  
**Komposisi Diagram Fasa Terner <sup>7)</sup>**

. Selanjutnya komposisi sistim di mana perbandingan A dan B tetap umpamanya 30 : 70 dan hanya C yang berubah dapat dinyatakan oleh garis lurus CY.

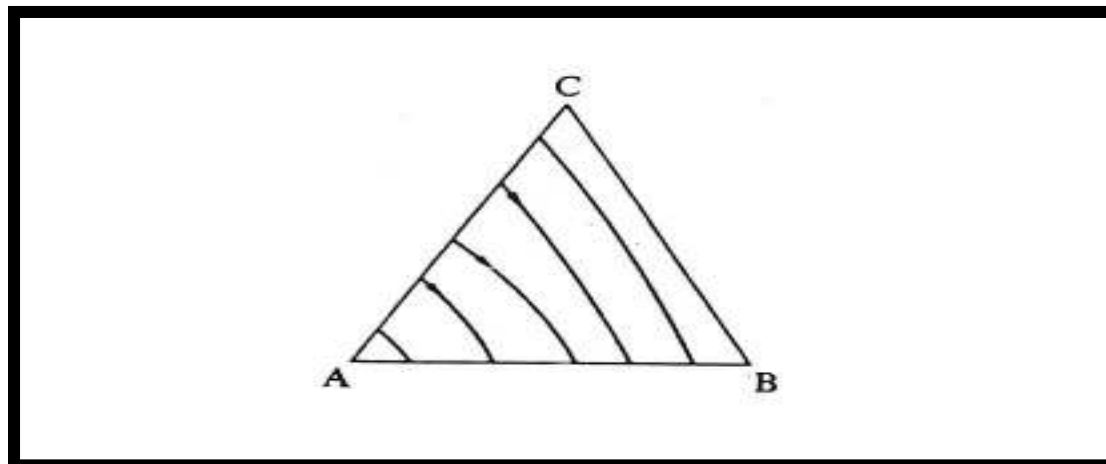
### **3. Diagram fasa yang diproyeksikan, diagram fasa temperatur tetap dan diagram fasa potongan.**

Diagram fasa terner merupakan bentuk tiga dimensi seperti dijelaskan pada **Gambar 3.16** Berbagai kurva yang tercantum pada gambar tiga dimensi itu diproyeksikan pada segitiga komposisi seperti dijelaskan pada **Gambar 3.18**. Dari gambar tersebut dapat diperoleh hubungan kuantitas.

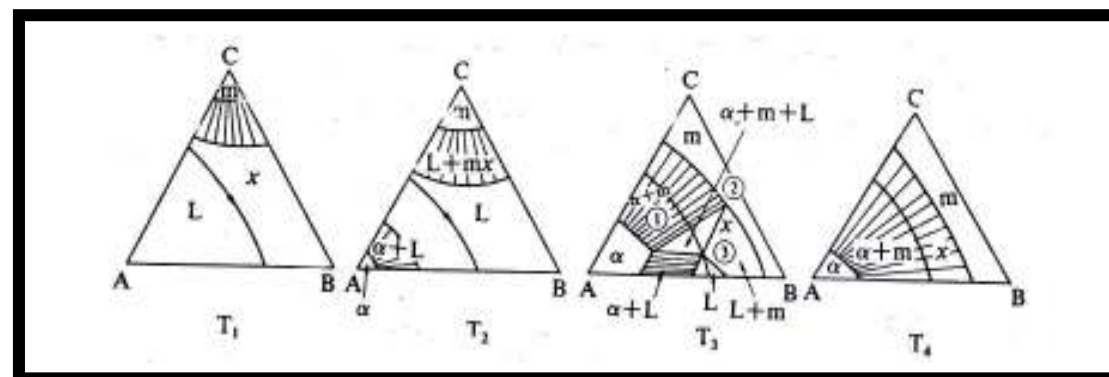
**Gambar 3.19**. adalah diagram temperatur tetap diperoleh dari **Gambar 3.16** yang dipotong oleh bidang temperatur tetap, dari diagram tersebut keadaan setiap komposisi pada temperatur yang bersangkutan dapat diketahui. Suatu paduan yang terdiri dari  $x$  adalah cair pada  $T_1$ , dan mempunyai keseimbangan dua fasa yaitu cairan dan larutan padat m pada  $T_2$  dan  $T_3$ . Yang masing-masing dinyatakan oleh

kedua ujung garis penghubung yang melalui  $x$  dan besarnya ditentukan oleh aturan tuas. Pada temperatur  $T_3$ , fasa  $\alpha + L + m$  berada dalam keseimbangan, komponen masing-masing dinyatakan dengan cara seperti yang telah dijelaskan diatas. Pada temperatur  $T_4$  terdiri dan  $\alpha + m$ , dan masing-masing komponen dinyatakan pada kedua ujung dari garis penghubung.

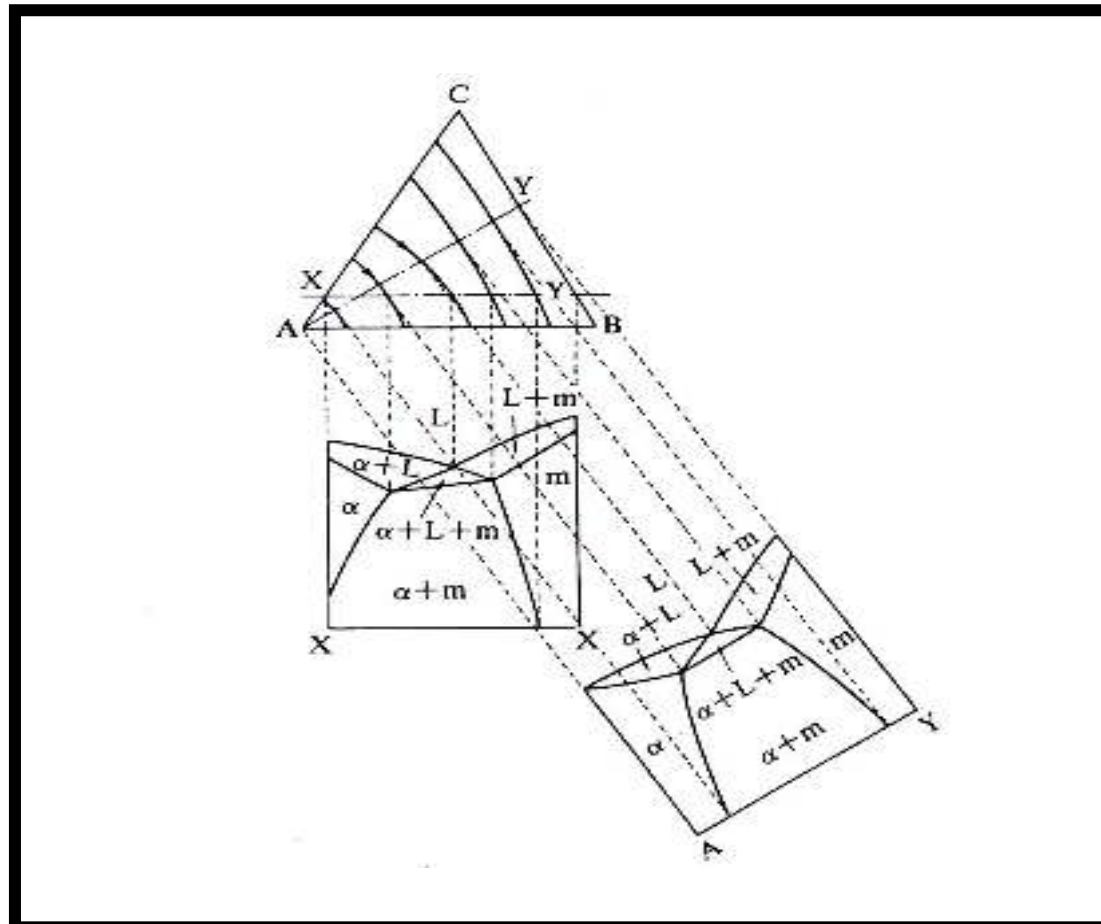
**Gambar 3.20** merupakan potongan diagram fasa yang menunjukkan perubahan temperatur kalau dipotong oleh bidang yang tegak lurus pada segitiga komposisi, dari diagram tersebut perubahan karena temperatur serupa seperti halnya pada diagram sistim biner. Tetapi perlu diperhatikan bahwa dari diagram potongan ini komposisi dan kuantitas tidak dapat diperoleh seperti pada keseimbangan dua fasa.



**Gambar 3.18.**  
Diagram Fasa Diproyeksikan dari Gambar 3.16 <sup>7)</sup>



**Gambar 3.19.**  
**Potongan Diagram Fasa Gambar 3.16 pada Temperatur T<sub>1</sub>-T<sub>4</sub> <sup>7)</sup>**



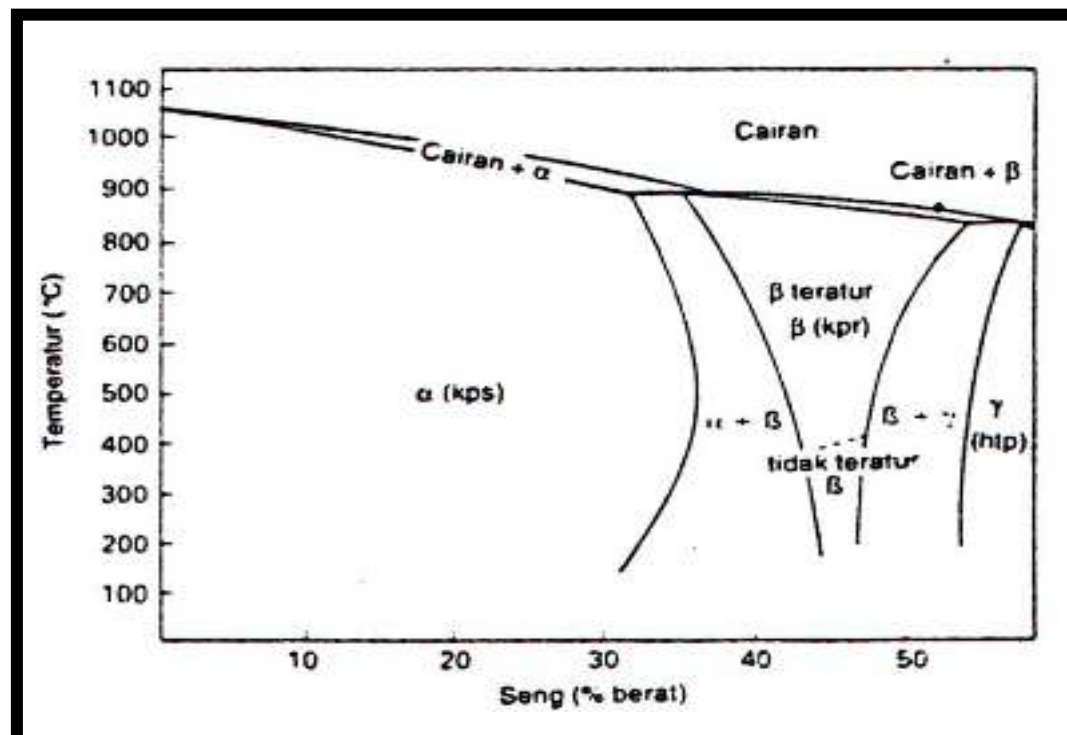
**Gambar 3.20.**  
**Potongan Diagram Fasa Gambar 3.16 Menurut Komposisi <sup>7)</sup>**

### 3.1.9. Struktur Mikro Paduan

Bila atom berbagai unsur logam dicampur, dapat terjadi paduan dan akan terbentuk bermacam-macam struktur mikro. Sebelumnya, telah dibahas interaksi yang mungkin terjadi antara zat larut dengan pelarut untuk membentuk larutan padat. Saat ini telah dikembangkan suatu diagram yang disebut diagram fase yang dapat memberikan informasi mengenai perubahan struktur yang mungkin terjadi bila berbagai unsur logam dan bukan logam dicampurkan. Diagram fase merupakan peta yang menunjukkan hubungan antara temperatur, komposisi dan struktur kristal yang mungkin terdapat dalam sistem pada keseimbangan tertentu. Dibawah ini akan

diterangkan mengenai diagram fase paduan tembaga dengan seng yang membentuk kuningan.

Paduan tembaga dengan seng yang disebut kuningan merupakan bahan teknik serba guna. Dikenal berbagai paduan seperti Red Brass, Gilding Metal maupun Clock Brass. Campuran tembaga-seng tersebut dapat digambarkan pada satu diagram fase untuk sistem tembaga-seng dengan kandungan seng hingga 50%. "Peta metallurgi" (**Gambar 3.21.**) menunjukkan bahwa pada suhu ruang dapat dijumpai kombinasi dua atau tiga bentuk kristal dalam campuran yang kaya tembaga. Bila ditambahkan seng dalam jumlah terbatas akan terdapat larutan padat yang biasa dilambangkan dengan simbol  $\alpha$ . Struktur ini hanya mungkin bila kadar seng tidak melebihi 35%. Bila kadar seng meningkat, akan terbentuk struktur kristal yang berbeda sekali yang disebut  $\beta$ . Kristal terjadi bila kadar seng berkisar antara 35% hingga 59% (kadar berat). Kadar seng antara 35% - 47% didapatkan struktur kristal campuran  $\alpha$  dan  $\beta$ , dan antara 47% - 51% hanya terbentuk kristal  $\beta$ . Struktur jenis ketiga disebut  $\gamma$  yang terjadi bila kadar seng antara 51% dan 79% serta bila kadar seng berkisar antara 51% dan 58% diperoleh campuran kristal  $\beta$  dan  $\gamma$ .



### Gambar 3.21.

#### Diagram Fase Sistem Tembaga-Seng <sup>9)</sup>

Diagram fase menunjukkan perbandingan struktur kristal yang terdapat pada komposisi tertentu. Akan tetapi tidak diketahui bentuk dan distribusinya, sedangkan keduanya berpengaruh terhadap sifat paduan. Bila campuran tembaga 60% dan seng 40%, diagram fase menunjukkan bahwa campuran ini terdiri atas campuran kristal  $\alpha$  dan  $\beta$  dalam jumlah yang hampir sama besarnya, tetapi bentuk dan distribusi yang mungkin diperoleh adalah :

- i) gugusan  $\beta$  dalam matriks  $\alpha$
- ii) gugusan  $\alpha$  dalam matriks  $\beta$
- iii) kristal  $\alpha$  dan  $\beta$  yang sesumbu
- iv) struktur cor-an berbutir kasar yang mengandung jarum jarum panjang  $\alpha$
- v) lapisan atau susunan terarah dari gugusan kristal  $\alpha$  dan  $\beta$
- vi) kristal  $\alpha$  yang terdeformasi oleh pengerjaan dingin, telah dianil atau bebas regangan

Perbandingan yang terdapat dalam sepotong paduan kuningan 60-40 bergantung pada riwayat termal dan mekanik bahan.

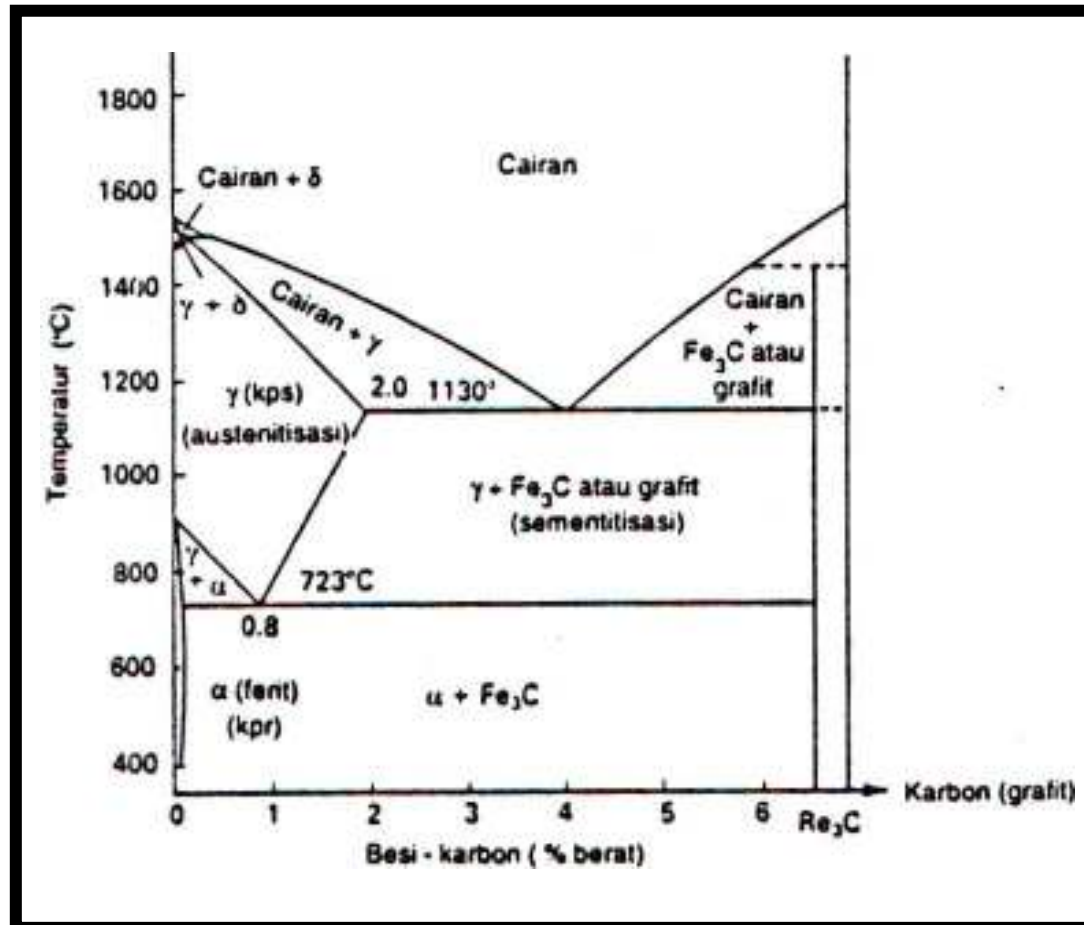
Garis miring yang menentukan daerah-daerah pada diagram fase tembaga-seng, pada **Gambar 3.21.** diatas , bertanda "cairan" menunjukkan bahwa titik cair paduan tembaga-seng berkurang dengan meningkatnya kadar seng.

#### 3.1.10. Transformasi Fase dalam Besi Cor dan Besi Baja

Telah diketahui bahwa besi mempunyai sifat allotrophe (polimorfisme), yaitu dapat berada dalam dua bentuk struktur kristal. Pada suhu rendah, besi mempunyai struktur kristal kubik pemusatan ruang. Pada suhu 910 °C, struktur ini berubah menjadi bentuk kubik pemusatan sisi (k.p.s./f.c.c.), kemudian agak dibawah titik cair struktur berubah bentuk menjadi kubik pemusatan ruang (k.p.r./b.c.c.). Struktur suhu rendah disebut ferrit atau *besi-a*, disekitar suhu 910 °C disebut *besi- $\gamma$*  atau *austenit*. Karbon merupakan unsur paduan khas. Atom karbon sangat kecil dan membentuk larutan padat interstisial dengan besi; dengan perkataan lain, karbon menempati ruang antara atom besi. Kelarutan maksimum dari karbon dalam besi- *a* sangat rendah yaitu 0,05%,

sedangkan daya larut dalam besi- $\gamma$  adalah 2%. Diagram fase untuk sisi yang kaya akan besi pada sistem besi karbon dapat dilihat pada **Gambar 3.22**.

**Ferit atau besi- $\alpha$ .** Modifikasi struktur dari besi murni pada suhu ruang disebut besi- $\alpha$  atau ferrit. Ferrit lunak dan ulet, dalam keadaan murni kekuatan tariknya kurang dari 310 Mpa. Bersifat ferromagnetik pada suhu dibawah 770 °C. Berat jenis dari ferrit adalah 7,88 mg/m<sup>3</sup> (=7,88 g/cm). Karena ferrit mempunyai struktur kubik pemusatan ruang, ruangan antar atom kecil dan pekat sehingga tidak dapat menampung atom karbon yang kecil sekalipun. Oleh sebab itu daya larut karbon dalam ferrit rendah (< 1 karbon per 1000 atom besi).



Gambar 3.22.  
Diagram Fase Sistem Besi-Karbon <sup>9)</sup>

**Austenit, atau besi- $\gamma$ .** Modifikasi besi dengan struktur pemusatan sisi disebut austenit, atau besi- $\gamma$ . Bentuk besi murni ini stabil pada suhu antara 912 °C dan 1394 °C. Perbandingan langsung antara sifat-sifat mekanis austenit dan ferrit sulit karena harus dibandingkan pada suhu berlainan. Akan tetapi pada suhu stabilnya austenit lunak dan ulet sehingga mudah dibentuk. Penempaan baja dan operasi pencairan dilakukan pada 1100 °C atau di atasnya ketika besi berbentuk kps. Austenit tidak bersifat ferromagnetik pada suhu manapun. Besi berstruktur kps mempunyai jarak antar atom yang lebih besar dibandingkan ferrit. Meskipun demikian lubang pada struktur kps hampir-hampir tidak dapat menampung atom karbon dan penyisipan ini menyebabkan regangan dalam struktur.

**Besi- $\delta$ .** Diatas 1394 °C, austenit bukan bentuk besi yang paling stabil karena struktur kristal berubah kembali menjadi fase kubik pemusatan ruang atau besi- $\delta$ . Besi- $\delta$  sama dengan besi- $\alpha$  kecuali daerah suhunya, oleh karena itu biasanya disebut ferrit- $\delta$ . Daya larut karbon dalam ferrit- $\delta$  kecil, akan tetapi lebih besar daripada dalam ferrit- $\alpha$ , karena suhu yang lebih tinggi.

**Karbida besi.** Pada paduan besi-karbon, karbon melebihi batas daya larut membentuk fase kedua yang disebut karbida besi (sementit). Karbida besi mempunyai komposisi kimia  $Fe_3C$ . Hal ini tidak berarti bahwa karbida besi membentuk molekul-molekul  $Fe_3C$ , akan tetapi kisi kristal mengandung atom besi dan karbon dalam perbandingan tiga lawan satu.  $Fe_3C$  mempunyai sel satuan orthorombik dengan 12 atom besi dari 4 atom karbon per-sel, jadi kandungan karbon : 6,7% (berat). Berat jenis bernilai 7,6  $mg/m^3$  ( $=7,6 g/cm^3$ ).

#### 3.1.10.1. Besi Cor

Besi cor mempunyai titik cair rendah dan fluiditas yang baik. Oleh karena itu, paduan tersebut dapat dituang langsung dalam cetakan yang rumit, hingga permesinan dapat ditekan. Berbagai jenis struktur dapat dihasilkan melalui pengaturan solidifikasi dan perlakuan panas sehingga dapat diperoleh produk dengan kombinasi sifat yang berbeda-beda.

Pada waktu besi cor membeku, karbon melebihi kadar 2% (gaya larut maksimum) meninggalkan larutan dan mengendap sebagai grafit atau sebagai senyawa



besi dan karbon dengan komposisi  $Fe_3C$  yang disebut sementit. Kristal sementit yang rapuh dan berbentuk jarum serta serpih grafit melemahkan struktur induknya oleh karena itu, besi cor biasanya rapuh. Namun, dengan menambahkan paduan lain, seperti serium atau magnesium, grafit akan mengendap dalam bentuk bulat yang memperkuat dan menambah keuletan bahan. Bila diperlukan dapat diusahakan agar endapan grafit terbatas dan diusahakan agar terjadi endapan sementit, sehingga bahan lebih keras dan lebih tahan terhadap aus. Besi cor bahkan dapat diproses lebih lanjut dengan perlakuan panas menghasilkan produk coran yang kuat dan ulet mendekati baja (sebagai contoh : besi cor mampu tempa).

Besi cor umumnya diklasifikasikan oleh kekuatan tariknya, besi cor yang mempunyai kekuatan tarik  $30 \text{ kgf/mm}^2$  disebut besi cor konstruksi yang berkekuatan tinggi. Dalam besi cor, grafit terdistribusikan dalam matriks, yang kalau ada tegangan terjadi konsentrasi tegangan disekitar grafit yang akan menyebabkan retak, jadi kekuatannya sangat dipengaruhi oleh jumlah, bentuk dan distribusi grafit. Jumlah grafit ditentukan oleh komposisi kimia sebagai berikut:

$$\text{Jumlah karbon eutektik} = 4,26 - 0,31(\%Si) - 0,33(\%P) + 0,27(\%Mn) \dots\dots\dots (3-9)$$

Jumlah karbon sebenarnya dibagi dengan karbon eutektik ini menyatakan sejauh mana komposisi kimia besi cor menyimpang dari pada komposisi komponen eutektik, ini yang disebut derajat eutektik  $S_c$ . Yang disederhanakan untuk bisa dipergunakan sbb:

$$S_c = \%C / \{ 4,3 - 1/3(\%Si + \%P) \} \dots\dots\dots (3-10)$$

Kalau  $S_c$  menjadi besar jumlah grafit meningkat dan sifat-sifat mekaniknya menjadi buruk. Hubungan itu adalah,

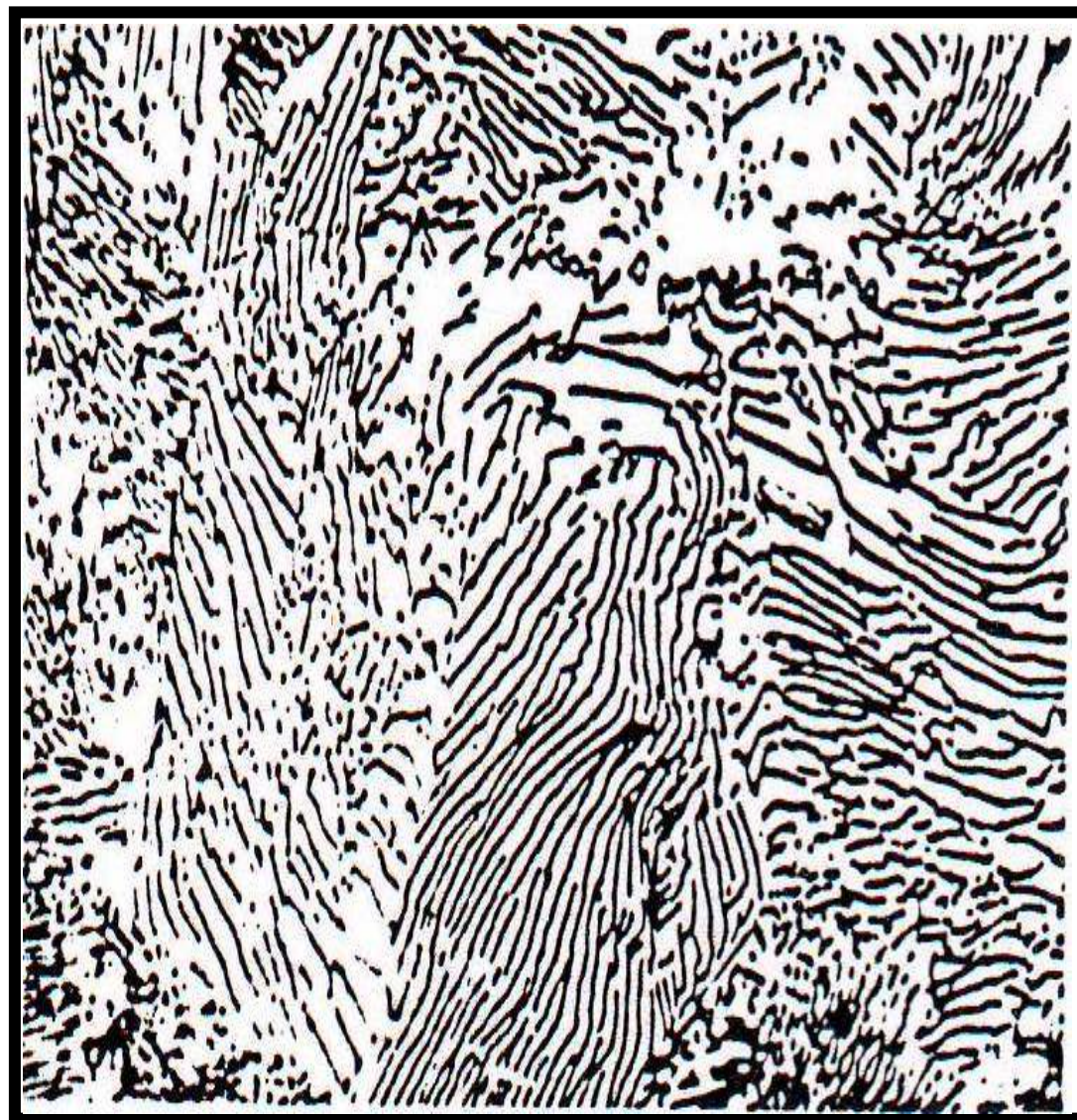
$$\text{Kekuatan tarik, } \sigma_B = 100 - 80S_c \text{ (kgf/mm}^2\text{) (untuk batang buat 30 mm) } \dots\dots\dots (3-11)$$

Untuk mendapat besi cor yang mempunyai kekuatan tarik tinggi dengan kekuatan tarik diatas  $30 \text{ kgf/mm}^2$ , harga  $S_c$  harus lebih kecil. Besi cor dengan  $S_c$  yang kecil mempunyai kecairan yang jelek dan mudah membentuk rongga-rongga, tegangan sisa, melenting, dan cacat-cacat lainnya atau mudah menjadi besi cor putih. Setelah diadakan studi yang lama mengenai hal ini untuk besi cor yang mempunyai kekuatan tarik tinggi, maka sekarang secara luas dipergunakan cara dengan menambahkan kepada cairan besi yang mempunyai  $S_c$  yang rendah sedikit kalsium silikon atau ferro silikon beberapa saat sebelum penuangan, yaitu untuk mencegah terjadinya besi cor putih, dengan demikian maka grafit yang halus terdistribusikan secara merata pada matriks perlit. Proses penambahan paduan tersebut dinamakan inokulasi, yang secara besar-besaran telah menghasilkan besi cor mehanit.

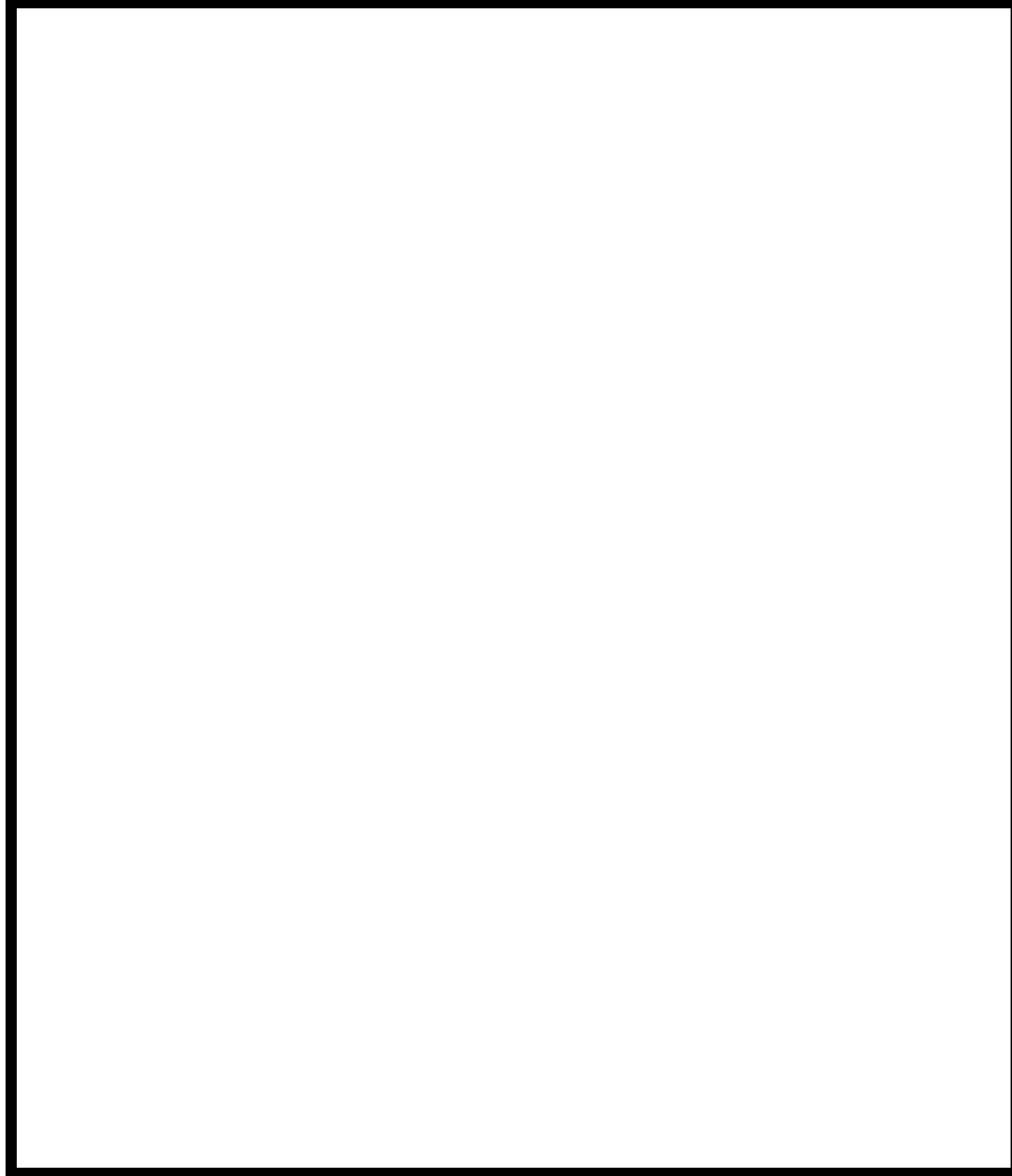
Besi cor cair yang mempunyai komposisi kimia yang cocok dituangkan dalam sebuah cetakan logam atau cetakan sebagian dari logam, bagian yang mengenai cetakan logam tersebut terdinginkan secara cepat menjadi besi cor putih yang sangat keras, sedangkan bagian lainnya menjadi besi cor kelabu yang memberikan keuletan lebih baik. Pengecoran ini dinamakan pengecoran cil. Unsur-unsur paduan ditambahkan pada besi cor untuk memperbaiki sifat-sifat mekanik dan untuk memberikan sifat-sifat khusus seperti ketahanan korosi, ketahanan panas dan kemagnetan. Sifat yang pertama umumnya didapat dengan paduan rendah sedangkan yang terakhir melibatkan beberapa unsur yang khusus. Besi cor dengan kekuatan tinggi mempunyai kekuatan tarik yang lebih baik dengan menambahkan Ni, Cr, Mo, dan sebagainya, pada 0,5-1,5% untuk memberikan struktur grafit dari struktur perlit yang halus. Besi cor ini dipakai untuk silinder motor, rol dan sebagainya. Besi cor yang mempunyai ketahanan terhadap asam dipadu dengan 10% atau lebih Si untuk mendapatkan ketahanan korosi, besi cor Nikel tinggi, besi cor Cr tinggi, dsb. Agar besi cor tahan panas, berbagai besi cor paduan dipadu dengan Cr, Mo, Si, Al, Ni, dan sebagainya. Selanjutnya besi cor yang tidak magnetik dipadu dengan 5-15% Ni dan 9%Mn.

### **3.1.10.2. Besi Baja**

Besi baja adalah paduan besi karbon dengan kadar karbon kurang dari 2%. Perhatikan batas  $\gamma$ -larutan padat dalam diagram fase paduan besi karbon pada **Gambar 3.22**. Tampak bahwa garis tersebut berawal dari titik 910 °C untuk besi murni hingga 723 °C untuk paduan dengan kadar karbon 0,8%, kemudian meningkat hingga 1130 °C untuk paduan dengan kadar karbon sebanyak 2%. Seandainya paduan besi-karbon yang mengandung karbon lebih dari 0,8% didinginkan hingga mencapai garis batas  $\gamma$ , Fe<sub>3</sub>C akan mengendap dengan laju sedemikian rupa hingga pada suhu 723 °C hanya tertinggal karbon sebanyak 0,8% sebagai larutan padat besi- $\gamma$  (austenit). Bila paduan besi-karbon dengan kadar karbon kurang dari 0,8% didinginkan sehingga garis batas besi- $\gamma$ , maka besi- $\alpha$  (ferit) akan memisahkan diri terlebih dahulu. Daya larut karbon dalam ferrit bernilai rendah, karbon akan larut dalam austenit sedemikian rupa hingga pada suhu 723 °C dicapai lagi larutan padat karbon 0,8%.



**Gambar 3.23.**  
**Struktur Mikro Perlit, Pembesaran 300 <sup>x</sup>**



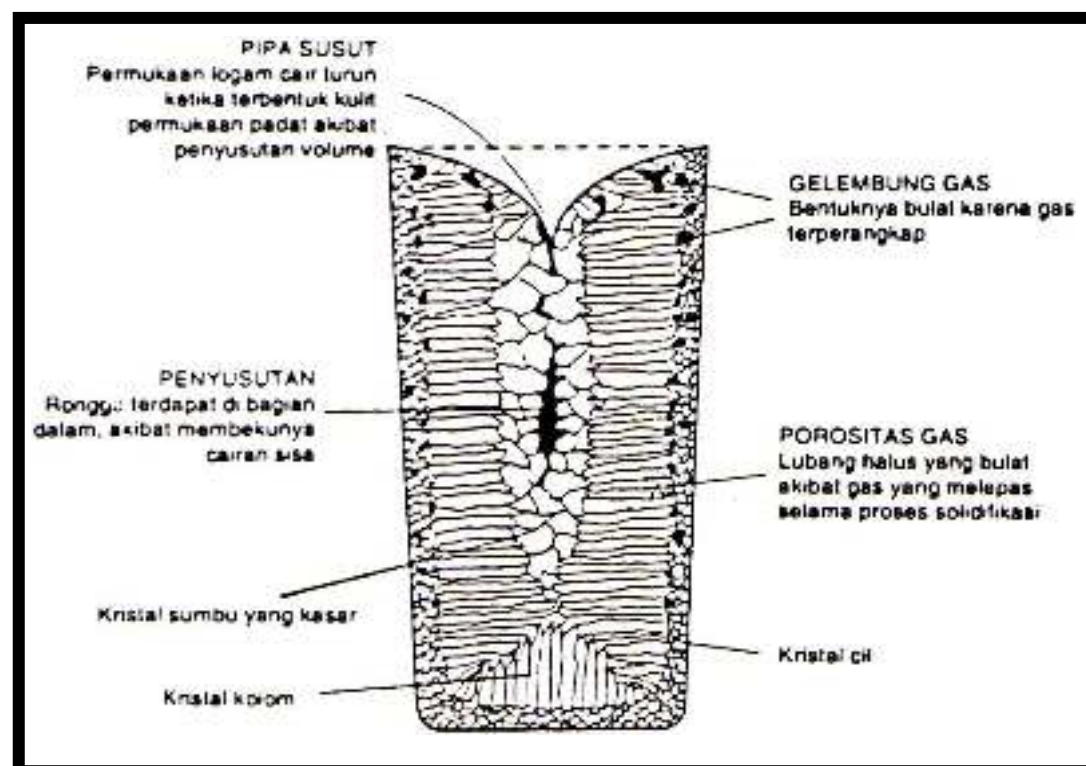
**Gambar 3.24.**  
**Struktur Mikro Baja Karbon.**

a: 0,06%C, Besar Butir Medium (ASTM No. 7) x 100; b: 0,25%C Baja Dinormalkan pada 930°C X 500; c: 0,30%C Baja Diaustenitkan pada 930°C Ditransformasikan Isotermal Pada 700°C, Ferrit dan Perlit Kasar x 1000; d: 0,45%C Baja Dinormalkan pada 840°C, Ferrit dan Perlit x 500; e: 0,80%C Baja Diaustenitkan pada 1150°C, Didinginkan di Tungku x 2000; f: 1,0%C Baja Dirol Panas pada 1050°C, Pendinginan Udara, Matriks Perlit, Sementit pada Batas Butir (Garis Putih) x 500.<sup>9)</sup>

Pada suhu 723 °C, austenit yang mengandung karbon 0,8% bertransformasi dalam keadaan seimbang membentuk campuran dengan kadar ferrit dan sementit tertentu yang disebut perlit (**Gambar 3.23**). Jumlah perlit meningkat dari 0 pada kadar karbon sangat rendah hingga 100%, yaitu bila baja mengandung karbon 0,8%. Setelah itu, ketika karbon naik mencapai 2%, kadar perlit turun karena kelebihan karbon hanya akan membentuk Fe<sub>3</sub>C. Kekerasan dan kekuatan naik dan keuletan turun berbanding lurus dengan jumlah perlit.

### 3.1.11. Struktur Makro

Struktur makro adalah ciri bahan yang dapat dilihat mata, meskipun dalam praktek kerap kali digunakan pembesaran hingga sepuluh kali. Tujuan utama pemeriksaan makro adalah untuk menampilkan : rongga, inklusi, segregasi komposisi, struktur serat, deformasi dan efek perlakuan panas setempat yang semuanya mempunyai pengaruh yang besar terhadap sifat teknik bahan atau benda.





**Gambar 3.25.**

**Struktur Ingot yang Melukiskan Berbagai Gambaran Makrostruktur <sup>7)</sup>**

3.1.11.1. Kekosongan

Ada dua penyebab utama terjadinya kekosongan, yaitu gelembung udara dan rongga susut. Gelembung udara (gas) mungkin terperangkap dalam logam yang dilebur atau yang dicor dan gas meninggalkan larutan sewaktu logam didinginkan tetapi tidak sempat keluar sebelum terjadi pengerasan (solidifikasi).

Keduanya menghasilkan rongga berdinding halus. Rongga susut terjadi karena logam susut sewaktu membeku. Cairan yang terdapat di tengah cetakan dapat mengisi kekosongan di tempat lainnya. Bila hal ini tidak mungkin, maka akan terbentuk rongga. Perbedaan kedua jenis kekosongan tersebut ialah bahwa rongga susut mempunyai permukaan yang kasar dan cenderung intergranular.

Kekosongan dalam benda cor-an akan mengurangi penampang efektif benda dan melemahkannya. Selain itu, jika kekosongan sambung-menyambung, cor-an akan bersifat poreus sehingga mudah menyerap gas atau cairan.

3.1.11.2. Inklusi

Ketika logam membeku, kotoran bukan logam yang terdapat didalamnya akan terperangkap. Kotoran tersebut dapat berupa partikel oksida halus yang terjadi selama pencairan atau gelembung ikatan mirip gelas yang digunakan untuk melindungi permukaan logam saat peleburan. Bahkan, kotoran dapat berbentuk kepingan keramik yang rontok dari atap atau dinding dapur. Inklusi ini dengan sendirinya melemahkan bahan karena mengurangi daya tahan beban atau karena bertindak sebagai takik yang merupakan awal retak.

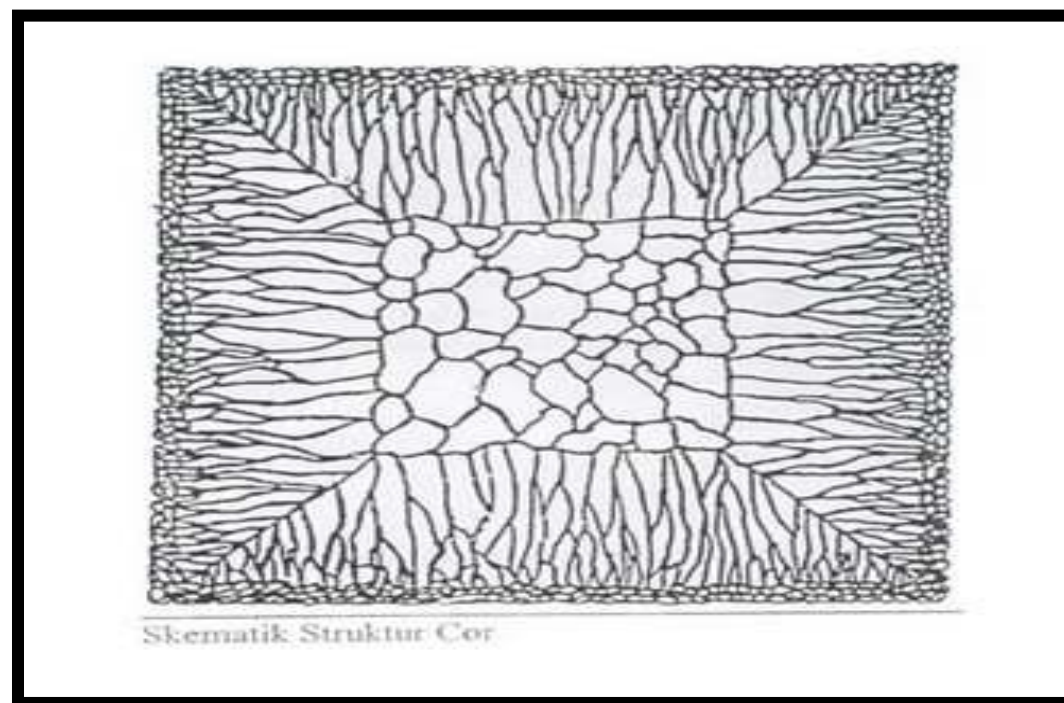
3.1.11.3. Segregasi

Segregasi adalah perubahan komposisi kimia secara bertahap pada penampang logam dan biasanya dijumpai pada besi cor. Pada skala makro, variasi komposisi

meliputi jarak beberapa milimeter bahkan sentimeter dan umumnya dijumpai dalam tiga jenis bentuk.

### 1. *Segregasi gravitasi*

Segregasi gravitasi didefinisikan sebagai pemisahan bertahap dari bahan akibat perbedaan berat jenis, sewaktu proses pembekuan berlangsung. Contoh terbaik yang dapat dikemukakan disini adalah pemisahan kubus-kubus Sb-Sn pada paduan timah-timbal-antimon yang digunakan untuk membuat bantalan logam putih (lihat **Gambar 3.26**). Paduan ini beku pada kisaran suhu yang luas. Pada kisaran ini kubus Sb-Sn terpisah dari cairan. Oleh karena berat jenisnya lebih rendah, kubus-kubus tersebut terapung. Perlu diketahui bahwa sifat bantalan bergantung pada dispersi yang merata dari kubus-kubus yang keras ini dalam matriks logam yang lebih lunak. Penyelesaian secara metallurgi diperoleh dengan menambahkan sejumlah kecil tembaga sebagai paduan tambahan.

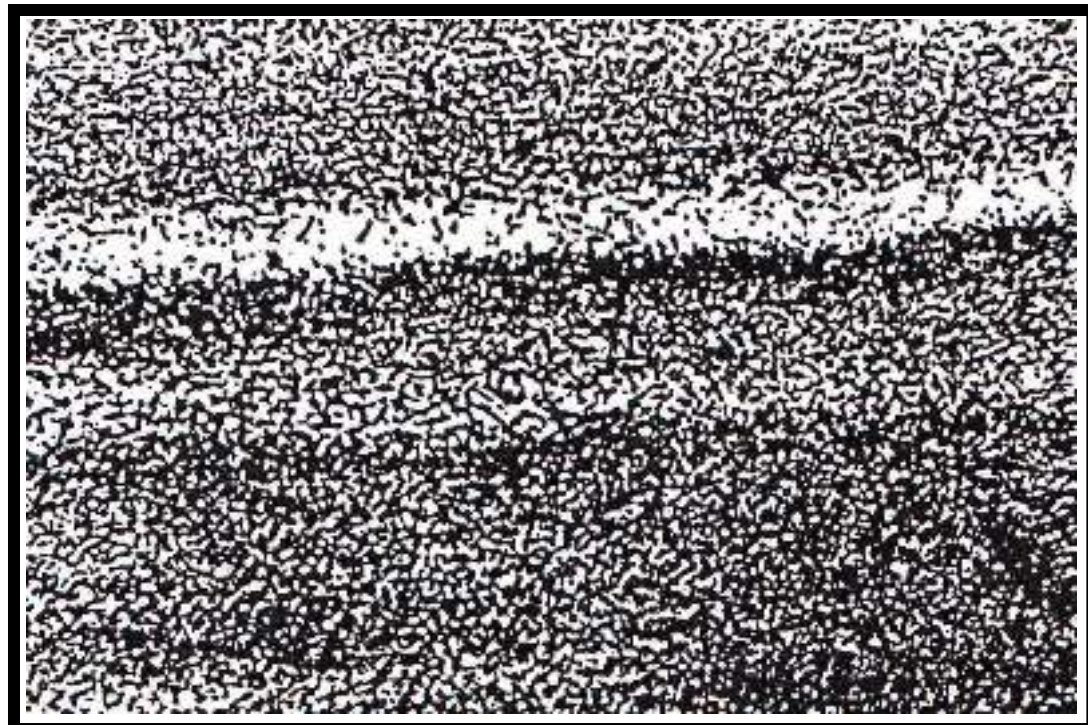


**Gambar 3.26.**  
**Penampang Besi Cor Kecil dengan**  
**Segregasi Gravitasi Kubus Sb-Sn. Pembesaran 5 > 9)**

Tembaga akan membentuk ikatan antar logam, yaitu  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ; yang kemudian memisahkan diri dan membentuk rangkaian halus berbentuk jaringan dalam cairan logam. Kubus-kubus Sb-Sn yang terbentuk tidak dapat terapung karena terhalang oleh jaringan sehingga tersebar dengan merata. Segregasi gravitasi juga terjadi pada cairan yang tidak dapat bercampur, misalnya timbal dan paduan tembaga. Timbal kita tambahkan untuk memperbaiki kemampuan pemesinan paduan tembaga. Timbal yang lebih berat tidak mungkin membentuk campuran merata. Akibatnya, selain kekuatan yang berkurang, kemampuan pemesinan yang didambakan juga tidak tercapai.

## 2. *Segregasi normal*

Segregasi normal adalah pertambahan bertahap bagian yang mempunyai titik cair rendah yang terhimpun dalam bagian terakhir besi cor yang akan membeku. Kristal padat yang pertama-tama membeku kaya akan unsur paduan dengan titik cair tinggi. Ketika solidifikasi meningkat, bagian padat yang membeku meninggalkan cairan dengan perbandingan kandungan bahan bertitik cair rendah yang semakin besar.





**Gambar 3.27.**  
**Segregasi Elemen Paduan Baja dengan Bentuk "Banding"**  
**atau Struktur Lapisan. Pembesaran 300  $\times$**

**3. Segregasi inversi**

Segregasi inversi merupakan kebalikan dari segregasi normal. Bagian bahan dengan titik cair rendah terdapat di bagian luar besi cor. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut : Ketika solidifikasi mulai terjadi, segregasi berlangsung secara normal. Tetapi, pada akhir solidifikasi, cairan yang kini kaya akan bahan dengan titik cair yang rendah terdesak keluar oleh butiran dendritik yang tumbuh. Ada beberapa penyebab, yaitu : tekanan di pusat yang bertambah menyebabkan pelepasan gas secara tiba-tiba pada sisa cairan; atau aksi kapiler dalam ruang antara kristal kolom yang menyusut; atau kontraksi termal kulit luar yang sudah padat sehingga terjadi peningkatan tekanan pada cairan yang masih tersisa. Bagian dengan titik cair rendah biasanya membentuk ikatan intermetalik yang rapuh, sehingga segregasi inversi pada permukaan ingot merupakan cacat yang sangat mengganggu. Akibatnya akan cukup parah apabila ingot dirol panas atau dingin. Bila segregasi tidak dihilangkan terlebih dahulu, mungkin akan terjadi retak selama pengerjaan lebih lanjut. Pada baja, segregasi unsur paduan dapat menghasilkan "banding" atau struktur lapisan. Pengaruh perlakuan panas menimbulkan struktur yang berbeda (**Gambar 3.27**).

**3.1.11.4. Struktur Serat**

Bila logam yang mengandung kekosongan, inklusi dan segregasi diubah bentuk melalui pengerjaan panas atau dingin, diskontinuitas atau cacat tersebut akan ikut tertarik dalam arah pembentukan dan terjadilah struktur serat yang mirip struktur serat kayu. Struktur serat tersebut tidak dapat dihilangkan sekaligus dengan perlakuan susulan.

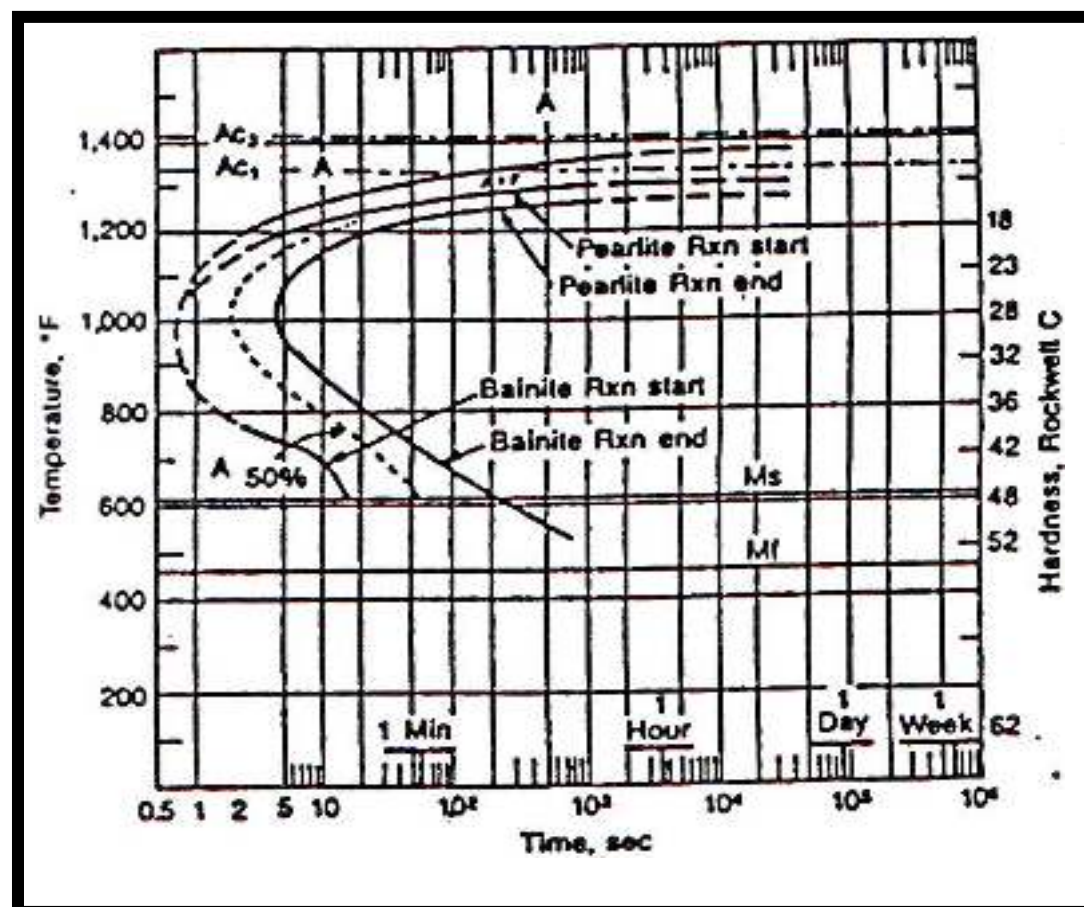
Ketangguhan, keuletan dan ketahanan fatik yang searah dengan serat lebih unggul daripada ketangguhan, keuletan tarik dan ketahanan fatik yang tegak lurus arah serat.

Serat merupakan ciri struktur yang penting pada komponen logam, baik komponen besar maupun kecil. Terjadinya serat selama proses pembentukan

merupakan salah satu penyebab mengapa produk tempa lebih unggul daripada coran. Pada coran tidak dijumpai struktur serat. Meskipun ciri serat ini penting untuk produk besar, kehadirannya pada produk kecil sangat berfaedah.

### 3.1.12. Perlakuan Panas pada Besi

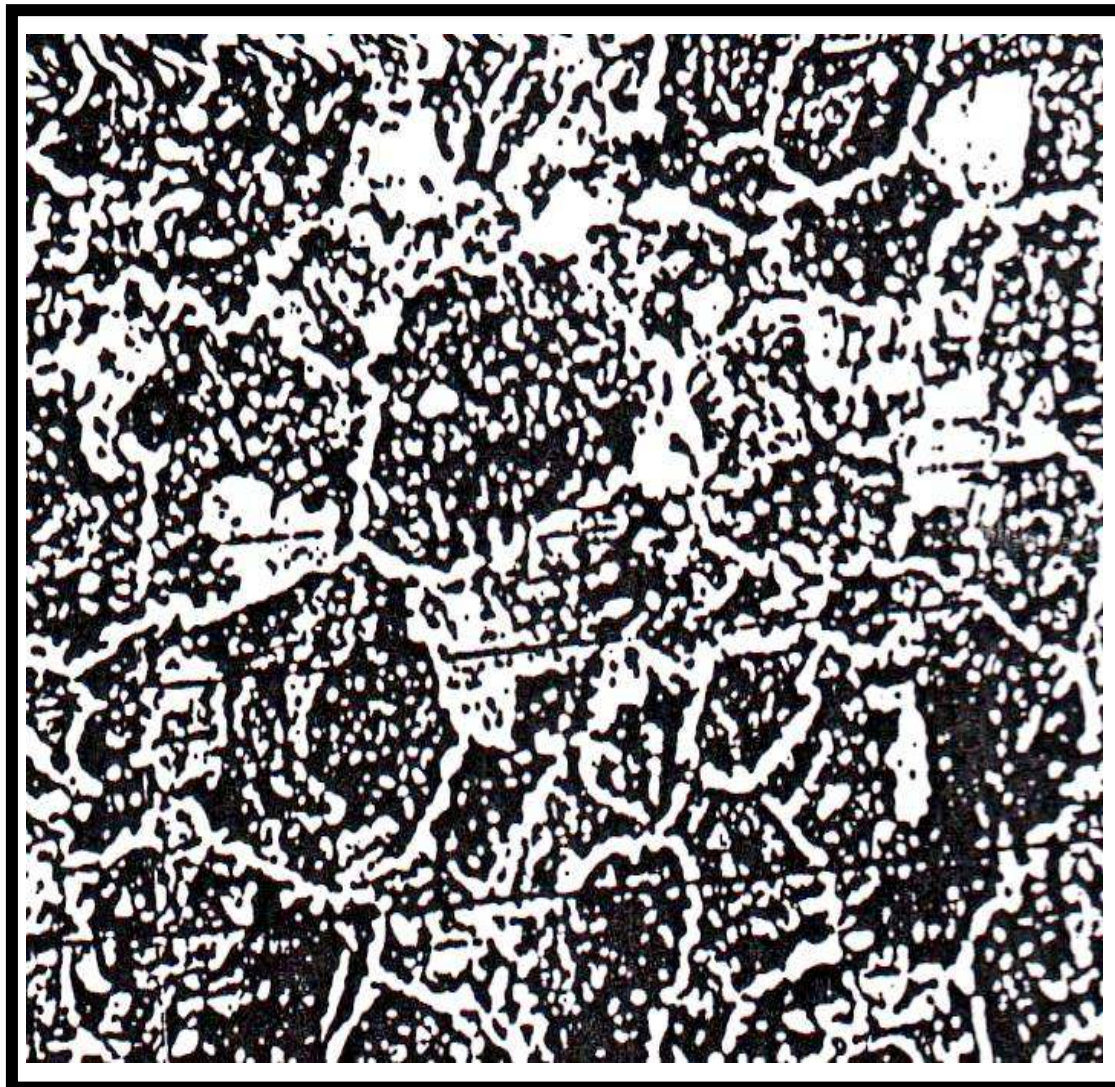
Perlakuan panas pada besi sebagian besar melibatkan panas austenic seperti yang terlihat pada **Gambar 3.28**. namun juga tergantung dari sifat-sifat bahan tersebut. Mikrostruktur yang baik dan kekuatan yang lebih tinggi didapatkan dengan pendinginan atau pemadaman yang cepat. Dengan penambahan kekuatan, menjadikan keuletan bahan menurun secara dramatis. Untuk mendapatkan keuletan yang lebih baik, besi karbon hendaknya dipanaskan sampai suhu dibawah 1360 °F dimana disebut suhu kritis bawah atau  $Ac_1$ . Bentuk dari perlakuan panas ini disebut *tempering*.  $Ac$ , bukanlah suatu temperatur yang konstan tetapi selalu berbeda di setiap sistem paduan dan sangat tergantung pada kecepatan pemanasannya. Diagram yang memperlihatkan karakteristik transformasi dari besi dan fase terbentuknya pada waktu suhu transformasi dinamakan diagram *Time-TemperaturTransformation* (TTT).



**Gambar 3.28.**

**Diagram Time-Temperatur-Transformation untuk Besi AISI 1040 <sup>7)</sup>**

**Gambar 3.28.** adalah salah satu contoh diagram tersebut. Diagram ini sangat berguna bagi penilaian praktis fase atau campuran terbentuknya besi pada kondisi ketidak-seimbangan. Hal tersebut menunjukkan pula kinetika transformasi dimana keseimbangan diagram fase tidak didapat. Dasar dari diagram TTT adalah transformasi pada keadaan dibawah kondisi isothermal dan besi harus dalam masa pendinginan pada suhu kritis secara tiba-tiba ke keadaan suhu yang diinginkan selalu dalam keadaan konstan. Garis-garis pada gambar mewakili awal dan akhir dari transformasi perlit, ferrit, bainit atau martensit.

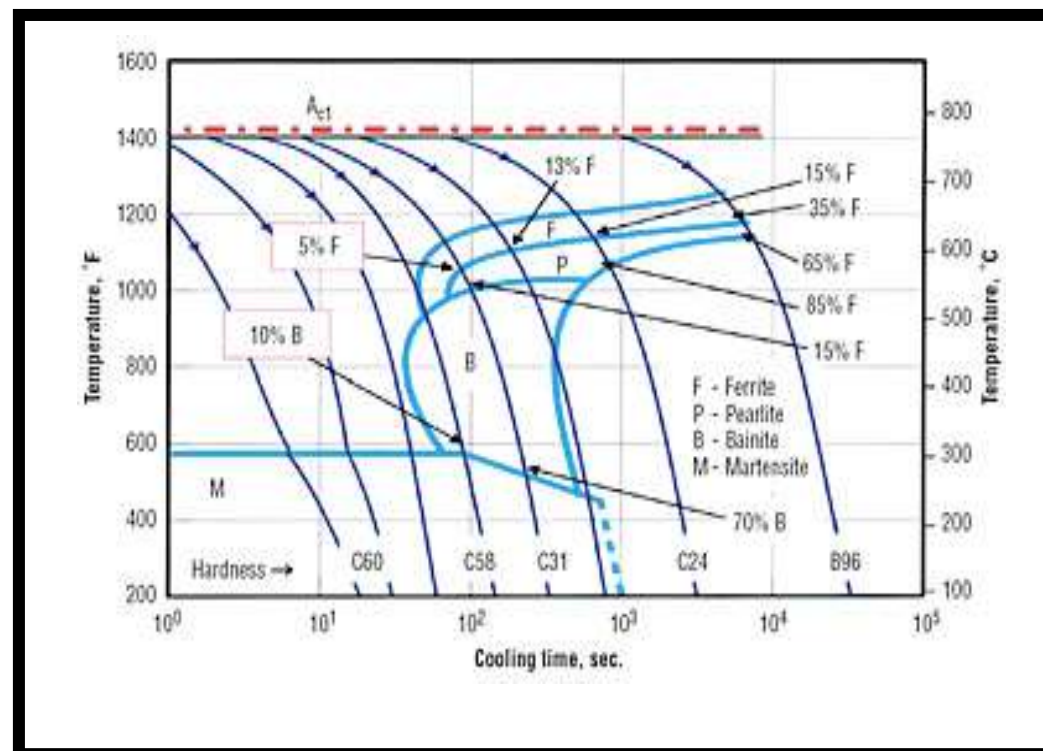




**Gambar 3.29.**

**Contoh Mikrostruktur Perlite dari Drill-Pipe <sup>7)</sup>**

Gambar-gambar yang ditunjukkan beranggapan besi tersebut didinginkan hingga 1200 °F dari bentuk austenit dan suhu dipertahankan selama 1 menit. Garis-garis yang bersilangan pada suhu tersebut dipertahankan secara konstan pada bentuk austenit hingga ferit sampai dengan awal perlit. Titik-titik garis menunjukkan 50% dari akhir transformasi perlit dan garis akhir adalah titik perlit terakhir dimana setelah satu menit keadaan austenit terbentuk sempurna pada keadaan perlit dan ferrit. Makrostruktur akan terlihat mirip seperti yang terlihat pada **Gambar 3.25** dimana ferrit pada bentuk awal austenit masih terlihat batas butir dan perlit masih membentuk butiran-butiran. Walaupun keadaan tersebut dengan beberapa kombinasi reaksi dapat juga menjelaskan diagram ini, kekurangan-kekurangan yang terjadi dikarenakan pendinginan yang tiba-tiba atau pemadaman yang diidealkan tidak sesuai dengan suhu yang diinginkan. Hal ini menjadikan tidak terbentuknya bahan dengan cara transformasi pada suhu rendah sehingga didapatkan produk seperti martensit.



**Gambar 3.30.**  
**Continuous Cooling Transformation Diagram**  
**untuk Besi 1040 Dimodifikasi dengan 50% Molybdenum <sup>7)</sup>**

Kegunaan lain dari diagram ini ialah untuk memperkirakan hasil dari perlakuan panas untuk mengganti bagian dari waktu pemadaman yang tidak diinginkan atau disebut CCT (Continuous Cooling Transformation) diagram. **Gambar 3.30.** memperlihatkan diagram untuk besi karbon medium. Disitu ada tiga bagian yaitu ferrit + perlit, bainit dan martensit. Bagian perlit dan ferrit terbagi pada sisi kanan dimana bagian bainit ada di tengah. Sisi bagian sebelah kiri yang terbuka adalah martensit. Dan yang satunya mewakili 1% dan 99% mewakili transformasi produk hasil spesifik. Nilai dari lingkaran-lingkaran kecil pada dasar diagram menunjukkan informasi yang jelas dari mikrostruktur tersebut. Ini adalah bukti dari DPH atau Diamond Pyramid Hardness nilai 620 yang turun dari austenit pada 1360 °F menghasilkan hampir 100% martensit, dimana pada pendinginan yang sangat lambat dihasilkan struktur ferrit dan perlit. Garis pendinginan mewakili DPH 351 seperti terlihat pada transformasi sebagian bainit dimana austenit kembali lagi kedalam bentuk martensit.

Seluruh definisi ini menunjukkan bahwa besi siap dipanaskan kedalam bentuk austenit. Jika pendinginan terukur pada tungku sangat lamban, perlakuan ini diistilahkan anil dan akan menghasilkan besi lunak dengan unsur karbid yang terlihat disekitar logam atau butiran kasar perlit. Normalisasi yang diinginkan adalah dengan memindahkan besi dari tungku dan membiarkannya didinginkan oleh udara. Pemadaman biasanya menghasilkan bahan yang lebih cepat dari pada menggunakan udara, biasanya digunakan, air maupun oksigen yaitu dengan jalan perendaman. Titik utama pembahasan dari diagram TTT dan CCT adalah fungsi transformasi dari bahan tersebut lewat kecepatan pendinginan dan proses kimiawi. Hal ini sangat penting dalam pengecoran pada ketebalan bahan untuk pembuatan bodi katup atau ketebalan pipa untuk sumur dalam. Untuk mendapatkan hasil yang baik, bahan paduan awalnya harus terbentuk pada keadaan martensit. Hal yang sangat penting adalah kecepatan pendinginan dimana dengan pendinginan tidak dapat menghasilkan produk dengan

ketebalan yang diinginkan, tetapi elemen paduan tersebut harus ditambahkan secara perlahan guna menghasilkan struktur martensit.

Kemampuan menghasilkan martensit dengan pendinginan yang cepat atau proses pepaduan tersebut dinamakan Hardenability (Kemampukerasan). Istilah ini jangan dikacaukan dengan pengerasan, dimana deformasi bahan itu terukur dari ketahanan bahan. Hubungan keduanya didalam kemampukerasan adalah menentukan distribusi kekerasan dari besi yang dihasilkan dengan proses pepadaman pada keadaan austenit. Kemampukerasan adalah fungsi dari isian karbon, paduan dan ukuran butir austenit, waktu dan suhu selama proses austenit hingga pendinginannya. Elemen-elemen yang ditambahkan untuk menambah kemampukerasan adalah mangan, molibdenum, chromium, silicon, nickel dan boron sebagai unsur utama.

### 3.1.13. Elemen Pencampur Besi Baja Paduan

Besi baja adalah paduan yang sering digunakan di lapangan minyak dan saat ini memperoleh perhatian yang serius karena kemampuannya yang lebih baik daripada besi baja murni. Besi baja adalah paduan dari karbon pada besi dengan besi sebagai elemen utama. Bentuk karbon sebagai larutan padatan pada besi. Paduan dengan karbon lebih besar dari 2,5% diistilahkan besi cor.

Berbagai elemen yang ditambahkan pada besi untuk mendapatkan paduan yang dikehendaki akan dibahas berikut ini. Oksigen, belerang, phosphorus, nitrogen, tin, antimony dan arsenit adalah elemen pengotor. Elemen ini menyebabkan penurunan kemampuan dari besi terhadap pembebanan yang terjadi., suhu yang tinggi, fatik dan sebagainya. Kadar karbon akan mempengaruhi kekerasan/kekuatan dan keuletan baja. Makin tinggi kadar karbon, kekuatan atau kekerasan makin tinggi, tetapi keuletan semakin rendah. Untuk memberikan kemampuan yang lebih terhadap aspek-aspek tersebut, elemen-elemen paduan ditambahkan. Berikut ini beberapa elemen yang ditambahkan kepada paduan dengan kemampuan yang dihasilkan.

- **Chrom (Cr)**

Merupakan unsur terpenting baja perkakas (baja paduan tinggi) dan baja konstruksi (baja paduan rendah). Cr ditambahkan untuk menanggulangi korosi dan oksidasi dan untuk menambah kekuatan. Pada konsentrasi tinggi, akan

memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dan abrasi. Baja yang ditambahkan unsur ini mempunyai mampu keras yang baik, jadi meskipun ukurannya besar, dapat dikeraskan dengan udara. Ketahanan pada temperatur tinggi sedikit kurang dibandingkan dengan baja yang diperkeras oleh W. Tapi mempunyai ketahanan yang baik terhadap pemanasan berulang, dan pendinginan berulang dan sangat ulet. Kalau V ditambah 1% ketahanan pelunakan karena penemperan menjadi lebih tinggi jadi ketahanan panas dan tahanan terhadap kerugian karena fusi logam yang cair dapat diperbaiki. Dengan menambahkan 1% W kekuatan panasnya dapat diperbaiki.

- ***Tungsten (Tu)***

Menyebabkan bertambahnya kekuatan jika dalam bentuk karbida dan mampu untuk penghalusan temper seperti molybdenum. Juga menambah kemampukerasan dan kekuatan pada temperatur tinggi dari besi baja.

- ***Mangan (Mn)***

Terkandung dalam semua bahan besi dan ditambahkan dalam jumlah tertentu, seperti baja keras mengandung 13% Mn, unsur Mn dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketahanan aus, dan penguatan pada pembentukan dingin serta dapat mengikat sulfur untuk mencegah terbentuknya sulfur murni atau besi sulfida.

- ***Wolfram (W)***

Merupakan paduan penting bagi baja karena titik leburnya tinggi, dapat digunakan pada kawat pijar dan logam keras. Wolfram dapat meningkatkan: kekerasan, kekuatan, batas rentang, kekuatan panas dan menurunkan sedikit regangan.

- ***Zat asam (O)***

Dalam bentuk oksida besi harus ada dalam jumlah kecil, jika dalam jumlah besar akan menjadikan baja mudah rapuh dalam keadaan pijar.

- ***Silikon (Si) dan Alumunium (Al)***

Adalah deoxidizer yang baik. Terkandung dalam sejumlah kecil bahan besi, tetapi jenis tertentu diperlukan dalam jumlah besar. Si dan Al dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, kekenyalan, ketahanan aus, ketahanan

terhadap panas dan menurunkan kemampuan regangan karena mencegah terjadinya pertumbuhan butir.

- ***Titanium (Ti)***

Adalah deoxidizer yang ditambahkan memperkuat matriks akibat pengendapan titanium carbide dan nitride.

- ***Nickel (Ni)***

Dapat dipadukan dengan baja dimana paduan tersebut dapat dilas atau di solder, dapat dibentuk dalam keadaan dingin atau panas dan dapat dipoles dan dimagnetisasikan. Ni dapat meningkatkan keuletan, kekuatan, pengerasan, ketahanan terhadap karat dan listrik (kawat pijar) serta menurunkan kecepatan pendinginan dan regangan panas. Ketika Ni ditambahkan pada besi baja high-chromium akan menstabilkan fasa austenit dibawah suhu ruang.

- ***Tembaga (Cu)***

Dengan kadar 0.2% akan menyebabkan baja lebih lambat berkarat, tetapi untuk baja yang lain atau baja murni yang tidak berkarat memakai campuran lain terutama nikel dan chrom.

- ***Molybdenum (Mo)***

Kebanyakan dipakai baja dalam ikatan dengan Cr, Ni, dan Vanadium. Mo dapat meningkatkan kekuatan tarik, batas renggang, ketahanan panas, kelelahan suhu pijar, perlakuan panas, menurunkan tegangan dan kerapuhan. Jika ditambahkan pada besi baja stainless austenic, akan memperkuat terhadap serangan pitting.

- ***Cobalt (Co)***

Digunakan sebagai tambahan baja dalam olah cepat. Magnet permanen juga mengandung unsur ini. Co dapat meningkatkan kekerasan, ketahanan panas dan karat, ketahanan aus dan daya hantar listrik.

- ***Vanadium (V) dan Columbium (Cb)***

Keduanya adalah bentuk karbid yang kuat dan karena penyebarannya yang baik dalam bentuk karbid akan membantu membentuk batas butir yang menghasilkan butiran yang baik. Hampir sama seperti Mo dalam baja, tetapi tanpa mengurangi regangan. Vanadium dapat meningkatkan batas rentan,



keuletan, kekuatan panas dan ketahanan leleh suhu pijar dan kelakuan panas, menurunkan kepekaan terhadap sengatan panas yang melewati bahan pada perlakuan panas.

- **Sulfur / Belerang (S)**

Dapat ditempa maupun dilas, unsur ini mengurangi sifat baja yaitu baja menjadi rapuh dalam keadaan pijar. Umumnya merugikan sehingga harus dalam keadaan tertentu.

- **Fosfor (F)**

Bersifat merapuhkan baja, tetapi memperlambat baja untuk berkarat. Baja lain atau murni yang tidak berkarat dipakai campuran lain terutama nikel dan chrom.

- **Silizium (Si)**

Terdapat pada setiap baja . Silizium baru dapat dinamakan elemen paduan jika kadarnya lebih besar daripada 0.5 %. Silizium menaikkan kekuatan baja, yaitu menaikkan batas mulur / batas plastis. Akibat adanya silizium, baja menjadi berbutir kasar dan berserat. Struktur ini cocok untuk baja pegas ( spring steel ). Silizium juga dapat menurunkan kecepatan pendinginan kritis. Baja paduan Silizium dapat dikeraskan sampai intinya dengan lebih baik.

**Tabel III-2.**  
**Penomoran Sesuai Desain AISI <sup>9)</sup>**

Kode AISI	Jenis Baja Paduan Beserta Unsur Paduannya ( % )
10XX	Plain carbon stell
11XX	Free cutting stell: high sulfur
12XX	Free cutting stell: high sulfur and/or phosphorous
13XX	Manganese stell: Mn 1.75 %
15XX	Plain carbon stell: Mn 0.75-1.65 %
23XX	Nickel stells: Ni 3.5-5.0 %
25XX	Nickel stells: Ni 3.5-5.0 %
31XX	Nickel-chromium stells: Ni 1.25-3.5 %, Cr 0.65-1.57 %
32XX	Nickel-chromium stells: Ni 1.25-3.5 %, Cr 0.65-1.57 %
33XX	Nickel-chromium stells: Ni 1.25-3.5 %, Cr 0.65-1.57 %
40XX	Molybdenum stells: Mo 0.20-0.30 %
41XX	Chromium-molybdenum stells: Cr 0.8-1.1 %, Mo 0.15-0.25 %
43XX	Ni 1.65-2.00, Cr 0.40-0.90, Mo 0.20-0.30
47XX	Ni 0.90-1.20, Cr 0.35-0.55, Mo 0.15-0.25
81XX	Ni 0.20-0.40, Cr 0.35-0.55, Mo 0.08-0.15
86XX	Ni 0.40-0.70, Cr 0.40-0.60, Mo 0.15-0.25
87XX	Ni 0.40-0.70, Cr 0.40-0.60, Mo 0.20-0.30
88XX	Ni 0.40-0.70, Cr 0.40-0.60, Mo 0.30-0.40
94XX	Ni 0.30-0.60, Cr 0.30-0.50, Mo 0.08-0.15
98XX	Ni 0.85-1.15, Cr 0.70-0.90, Mo 0.20-0.30
46XX	Nickel-molybdenum stells: Ni 1.55-3.5 %, Mo 0.20-0.30 %
48XX	Nickel-molybdenum stells: Ni 1.55-3.5 %, Mo 0.20-0.30 %
50XX	Chromium stells: Cr 0.25-1.05 %
51XX	Chromium stells: Cr 0.25-1.05 %
61XX	Chromium-vanadium stells: Cr 0.8-0.95 %, V 0.1-0.15 %
72XX	Tungsten-chromium stells: W 1.75 %, Cr 0.75%
92XX	Silicon-manganese stells: Si 1.2-2.2 %, Mn 0.65-0.87 %
XXBXX	Boron stells
XXLXX	Leaded stells

Penambahan elemen paduan (> 5% berat) dikategorikan besi baja dengan paduan rendah, dan jika berada diatas nilai tersebut diistilahkan dengan besi baja paduan.

Dengan bermacamnya elemen dan kemungkinan kombinasi yang berbeda, maka perlulah dibuat penyusunan kode-kode numerik untuk paduan yang sering digunakan. Telah dibuat bermacam penyusunan sistem paduan, namun hanya beberapa saja yang dipergunakan dalam industri perminyakan. Diantaranya American Society of Testing and Materials (ASTM), the American Iron and Steel Institute (AISI), dan Society of Automotive Engineers (SAE). Sebagai tambahan meskipun tidak memiliki sistem paduan, the American Petroleum Institute (API) telah memiliki seri yang banyak digunakan di industri perminyakan.

**Tabel III-3.**  
**Sistem Penomoran Penggabungan ASTM <sup>9)</sup>**

ASTM Code	Jenis Logam dan Paduannya
AXXXXX	Alumunium dan paduan alumunium
CXXXXX	Tembaga dan paduan tembaga
EXXXXX	Rare earth and similar metals and alloys
FXXXXX	Besi cor
GXXXXX	Karbon dan besi baja paduan AISI dan SAE
HXXXXX	Besi baja-H AISI dan SAE
JXXXXX	Besi baja cor (kecuali besi baja tool)
KXXXXX	Bermacam besi baja dan paduan ferrous
LXXXXX	Paduan dan metal dengan titik cair rendah
MXXXXX	Bermacam metal dan paduan non-ferous
NXXXXX	Nickel dan paduan nickel
PXXXXX	Logam dan paduam murni
RXXXXX	Metal dan paduan reaktif
SXXXXX	Besi baja tahan korosi dan panas (termasuk stainless), valve steels, dan paduan super dasar besi
TXXXXX	Besi tool, tempa dan cor
WXXXXX	metal pengisi pengelasan
ZXXXXX	Zinc dan paduan zinc

Untuk menjelaskan secara singkat, ASTM mendesain pipa A 106 Grade B atau lebih tepatnya A-106-80 Grade B. Untuk awalan A menunjukkan paduan ferrous; sedangkan B pada awalan berarti bukan paduan ferrous. Nilai 106 tidak memiliki arti khusus, sedangkan 80 adalah tahun terakhir pembuatan standar revisi. Sistem AISI memiliki desain yang lebih maju dibandingkan ASTM dimana indikasi dari komposisi bahan turut pula disertakan. Ada empat nomor untuk desain paduan AISI. Dua nomor pertama menunjukkan elemen utama paduan dan dua nomor berikutnya menunjukkan nominal berat karbon dengan penambahan 0,01%. Susunannya adalah **Tabel III-2** diatas.

Oleh karena itu, untuk besi yang sering digunakan pada lapangan minyak seperti AISI 4140 akan memiliki kandungan nominal 1% chromium, 0,2% molybdenum dan 0,4% karbon. Karena kemudahan penilaian kandungan paduan dari AISI, kemudian pengguna mulai mengkorelasikan produk API dengan AISI. Pada grade dari tubing, casing, drillpipe dan pipeline yang lebih rendah, hampir tidak mungkin mengkorelasikannya karena adanya kekurangan spesifikasi kimiawi yang diperlukan pada grade API.

Akhir-akhir ini, ASTM telah membuat Unified Numbering System (UNS) untuk menggabungkan bermacam sistem paduan kedalam satu kesatuan guna memudahkan penggunaan. Pada **Tabel III-3** adalah susunan dari sistem UNS.

Baja karbon didasarkan kandungan karbonnya, dapat dibedakan menjadi empat bagian yaitu :

#### **1. *Low carbon steel***

Kadar karbonnya 0,15%, baja ini sebagai ferrite yang lunak, kenyal dan ductile. Secara normal mempunyai tensile strength kecil tetapi karena kadar karbonnya rendah maka tidak baik jika dikerjakan dengan bantuan mesin karena cenderung menjadi robek karena adanya tekanan dari peralatan potong yang keras. Baja jenis

ini mempunyai kisaran yield point 16,8 - 26 ton/in<sup>2</sup> dan maksimum tensile strength 24,8 – 26,8 ton/in<sup>2</sup>.

**2. Mild carbon steel**

Kandungan karbonnya 0,15 – 0,20 %. Dengan bertambahnya kadar karbon maka kekerasan baja menjadi lebih besar bertambah.

**3. Medium carbon steel**

Kadar karbonnya 0,2 – 0,6 %, mempunyai tensile strength 20 - 40 ton/in<sup>2</sup>, banyak digunakan pada struktur jembatan, bangunan kapal, lokomotif dan mobil.

**4. High carbon steel**

Kadar karbonnya 0,61 – 1,4 %, baja dengan kandungan karbon tertinggi ini mempunyai kekerasan dan tensile strength yang tinggi pula. Baja jenis ini banyak digunakan untuk membuat rantai, valve spring untuk mesin, roda gigi dan lain-lain. Baja jenis ini mempunyai tensile strength 39.000 psi.

**3.1.14. Besi Baja Stainless (Besi Baja tanpa Pengotoran)**

Sampai dengan lima tahun terakhir ini, besi baja stainless belum digunakan luas dalam industri perminyakan kecuali pada aplikasi yang sangat khusus. Akhir-akhir ini, pemboran dan produksi pada lingkungan yang agresif telah menyebabkan digunakannya paduan material yang sangat tahan terhadap korosi seperti besi stainless, paduan dasar nickel, paduan dasar cobalt dan paduan titanium.

**Tabel III-4.  
Komposisi dari Besi Baja Stainless dengan Grade Standar AISI <sup>9)</sup>**

Jenis UNS	Karbon %	Mangan %	Phosphorus %	Sulfur %	Nitrogen %	Kromium %	Nickel %	Proporsi %	Nilai UNS
304	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	8-10,5	0	304
304L	0,025	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	8-10,5	0	304L
316	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	10-14	2-10	316
316L	0,025	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	10-14	2-10	316L
321	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	321
321H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	321H
347	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	347
347H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	347H
309S	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	22-24	0	0	309S
309H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	22-24	0	0	309H
310S	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	24-26	0	0	310S
310H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	24-26	0	0	310H
314	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	314
314H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	314H
312	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	312
312H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	312H
308	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	308
308H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	308H
307	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	307
307H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	307H
305	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	305
305H	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	305H
304N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	304N
304LN	0,025	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	304LN
316N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	316N
316LN	0,025	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	316LN
321N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	321N
321HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	321HN
347N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	347N
347HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	347HN
309N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	22-24	0	0	309N
309HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	22-24	0	0	309HN
310N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	24-26	0	0	310N
310HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	24-26	0	0	310HN
314N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	314N
314HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	314HN
312N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	312N
312HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	312HN
308N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	308N
308HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	308HN
307N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	307N
307HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	307HN
305N	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	305N
305HN	0,08	1,0	0,015	0,008	0,01	16-18	0	0	305HN

UNS Designation	AISI Type	C	Mn	P	S	Si	Cr	Xi	Mo	Others
Aunstenitic	Grad-en	0.15	5.60-7.50	0.06	0.03	1.00	16.00-18.00	3.50-5.50	...	0.25 N
S20100....	201	0.15	7.50-10.0	0.06	0.03	1.00	17.00-19.00	4.00-6.00	...	0.23 N
S20200....	202	0.12-0.25	14.00-15.50	0.03	0.03	0.50	16.50-18.00	1.00-1.75	...	0.32-0.40 N
S20500....	203	0.15	2.00	0.045	0.03	1.00	16.00-18.00	6.00-8.00	...	.
S30100....	301	0.15	2.00	0.045	0.03	1.00	17.00-19.00	8.00-10.00	...	..
S30200....	302	0.15	2.00	0.045	0.03	2.00-3.00	17.00-19.00	8.00-10.00	...	...
	302B	0.15	2.00	0.2	0.15	1.00	17.00-19.00	8.00-10.00	0.60	...
S30300....	303	0.15	2.00	0.2	0.06	1.00	17.00-19.00	8.00-10.00	...	0.155 e min
	303Se	0.15	2.00	0.045	0.03	1.00	17.00-19.00	8.00-10.00	...	...
S30100....	304	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	18.00-20.00	8.00-10.50	...	3.00-4.00C
S30103....	304L	0.03	2.00	0.045	0.03	1.00	18.00-20.00	8.00-12.00	...	0.10-0.16 N
S30430....	304H Q	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	17.00-19.00	8.00-10.00	...	...
	304N	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	18.00-20.00	8.00-10.50	...	...

**Tabel III-4  
( Lanjutan )**

Composition %

Tabel III.4  
(Lanjutan)

S30500....	305	0.12	2.00	0.045	0.03	1.00	17.00- 19.00	10.50- 13.00	...	...
S30800....	308	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	19.00- 21.00	10.50- 13.00	...	...
S30900....	309	0.2	2.00	0.045	0.03	1.00	22.00- 24.00	12.00- 15.00	...	...
	3095	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	22.00- 24.00	12.00- 15.00	...	...
S31000....	310	0.25	2.00	0.045	0.03	1.50	24.00- 26.00	19.00- 22.00	...	...
	310S	0.08	2.00	0.045	0.03	1.50	24.00- 26.00	19.00- 22.00	...	...
S31400....	314	0.25	2.00	0.045	0.03	1.50- 3.00	23.00- 26.00	19.00- 22.00	...	...
S31600....	316	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	16.00- 18.00	10.00- 14.00	2.00- 3.00	...
	316F	0.08	2.00	0.2	0.10 min	1.00	16.00- 18.00	10.00- 14.00	1.75- 2.50	...
S31603....	316L	0.03	2.00	0.045	0.03	1.00	16.00- 18.00	10.00- 14.00	2.00- 3.00	...
	316N	0.08	2.00	0.45	0.03	1.00	16.00- 18.00	10.00- 14.00	2.00- 3.00	0.10 - 0.15
S31700....	317	0.08	2.00	0.45	0.03	1.00	18.00- 20.00	11.00- 15.00	3.00- 4.00	...
S31700....	3171	0.03	2.00	0.45	0.03	1.00	18.00- 20.00	11.00- 15.00	3.00- 4.00	...
S32100....	321	0.08	2.00	0.45	0.03	1.00	17.00- 19.00	9.00- 12.00	...	Ti:5 XC m
	329	0.10	2.00	0.45	0.03	1.00	25.00- 30.00	3.00- 6.00	1.00- 2.00	...
	330	0.08	2.00	0.04	0.03	0.75- 1.50	17.00- 20.00	34.00- 37.00	...	0.10 Ta.0 .
S34700....	347	0.08	2.00	0.04	0.03	1.00	17.00- 19.00	9.00- 13.00	...	Nb: 10x C
S34800....	348	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	17.00- 19.00	9.00- 13.00	...	Nb: 10x C
	384	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	15.00- 17.00	17.00- 19.00	...	...

**Tabel III-4  
( Lanjutan )**

Ferritic grades										
S40500...	405	0.08	1.00	0.04	0.03	1.00	11.50-14.50	...	...	0.10-0.30
S40900...	409	0.08	1.00	0.045	0.45	1.00	10.50-11.75	...	...	Ti:6xC-0
S42900...	429	0.12	1.00	0.04	0.03	1.00	14.00-16.00	...	...	...
S43000...	430	0.12	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00-18.00	...	0.60	...
	430F	0.12	1.25	0.06	0.15	1.00	16.00-18.00	...	...	...
	430FSe	0.12	1.25	0.06	0.06	1.00	16.00-18.00	...	0.75-1.25	0.1551 min
	430FSe	0.12	1.25	0.06	0.06	1.00	16.00-18.00	...	0.75-1.25	0.1551 min
S43400...	434	0.12	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00-18.00	...	0.75-1.25	...
S43600...	436	0.12	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00-18.00	...	...	Nb:5xC-0
S44200...	442	0.20	1.00	0.04	0.03	1.00	18.00-23.00	...	...	...
S44400...	444	0.25	1.00	0.04	0.03	1.00	17.50-19.50	...	...	(Ti+Nb): 4(C+N)
S44600...	446	0.20	1.50	0.04	0.03	1.00	23.00-27.00	...	...	0.25N
Martensitic grades										
S40300...	403	0.15	1.00	0.04	0.03	0.50	11.50-13.00	...	...	...
S41000...	410	0.15	1.00	0.04	0.03	1.00	11.50-13.50	...	...	...
S41400...	414	0.15	1.00	0.04	0.03	1.00	11.50-13.50	1.25-2.50	...	...
S41600...	416	0.15	1.25	0.06	0.15m	1.00	12.00-14.00	...	0.60	...

**Tabel III-4  
( Lanjutan )**

	416Se	0.15	1.25	0.06	0.06	1.00	12.00-14.00	...	...	0.155e min
S42000 ....	420	0.15 min	1.00	0.04	0.03	1.00	12.00-14.00	...	...	...
	420F	0.15 min	1.25	0.06	0.15 min	1.00	12.00-14.00	...	0.60	...
S42200 ....	422	0.20 - 0.25	1.00	0.025	0.025	0.75	11.00-13.00	0.50-1.00	0.75-1.25	0.15-0.30
										0.75-1.00
S43100 ....	431	0.20	1.00	0.04	0.03	1.00	15.00-17.00	1.25-2.50	...	...
	440N	0.60 - 0.75	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00-18.00	...	0.75	...
	440B	0.75 - 0.95	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00-18.00	...	0.75	...
	440C	0.95 - 1.20	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00-18.00	...	0.75	...
Precipitation-hardening grades										
S13800 ....	S13800	0.05	0.20	0.010	0.008	0.10	12.25-13.25	7.50-8.50	2.00-2.50	0.90-135N
										0.01N
S15500 ....	S15500	0.007	1.00	0.04	0.03	1.00	14.00-15.50	3.50-5.50		2.50-4.50
										0.15-0
S17400 ....	S17400	0.007	1.00	0.04	0.03	1.00	15.50-17.50	3.00-5.00		3.00.5.00cu
										0.15-0
S17700 ....	S17700	0.009	1.00	0.04	0.04	0.04	16.00-18.00	6.50-7.75		0.75-1.50Al



Chromium adalah elemen yang menyebabkan besi baja stainless memiliki kualitas stainless. Untuk mendapatkan kualifikasi stainless, besi harus memiliki 12% atau lebih kandungan chromium.

Jika ditambahkan nickel sebanyak 6% akan menambah ketahanan terhadap korosi dan menambah ketahanan serat serta mekanik. Molybdenum akan menambah ketahanan terhadap pitting dan ketahanan terhadap temperatur tinggi.

Besi baja stainless telah diklasifikasikan oleh AISI berdasar struktur metallurgi seperti ditunjukkan pada **Tabel III-4**. Seri 200 dan 300 adalah seri austenitic dan 400 adalah seri martensitic atau ferritic. Seri-seri yang lain adalah seri besi baja stainless pengerasan endapan (Precipitation Hardening Stainless Steel). Besi-besi ini memiliki tanda yang berbeda seperti 17-4 pH, menunjukkan nilai nominal 17 % Cr – 4% Ni. Akhir-akhir ini telah dibuat kumpulan paduan-paduan berdasarkan penggabungan besi stainless pada fasa austenite dan ferrite.

Seri 200 dan 300 tidak dapat dikeraskan oleh perlakuan panas, namun hanya oleh pengerjaan dingin. Elemen-elemen mekanik dari austenitic diklasifikasikan berdasar kepada tensile dan yield strength minimum kedalam empat katagori yang disebut temper.

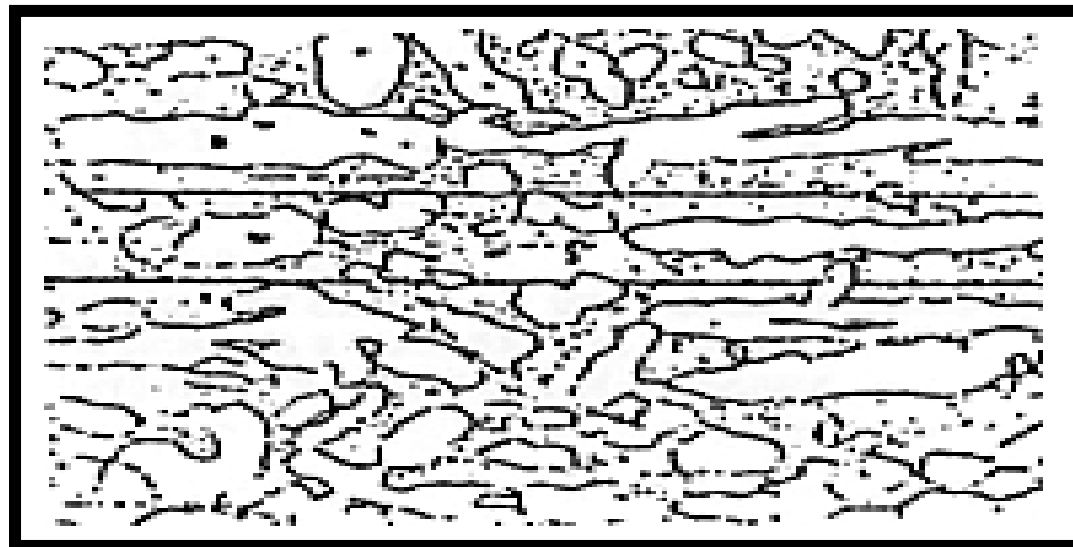
**Tabel III-5.**  
**Penemperan pada Fasa Austenic <sup>9)</sup>**

Tempers	Min. Tensile Strength,psi	Min Yield Strength,psi
1/4 hard	125.000	75.000
1/2 hard	150.000	110.000
3/4 hard	175.000	135.000
Fully hard	185.000	140.000

Secara umum seri austenitic memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik dibanding seri ferritic dan martensitic.

Besi baja stainless ferritic tidak dapat diperkeras dengan perlakuan panas tetapi lebih sering dengan perlakuan anil atau dengan perrgerjaan dingin. Paduan martensitic pada sisi yang lain memiliki derajat yang tinggi dalam kemampu-kerasan dan lazim digunakan pada saat strength dan ketahanan terhadap korosi diperlukan. Strength pada besi baja pengerasan endapan didapat melalui dua cara perlakuan panas, pertama adalah tranformasi martensitic dimana keduanya adalah aging yang menyebabkan presipitasi pada fasa kedua dan menambah kemampuan strength.

Besi baja stainless duplex tidak dapat diperkeras oleh perlakuan panas tetapi secara umum akan lebih kuat daripada austenitic. Yield strength pada besi baja stainless duplex dengan anil memiliki kekuatan berkisar 70.000 - 80.000 psi. Selain itu, besi baja tersebut memiliki ketahanan terhadap korosi yang baik dibanding besi ferrite ataupun austenite secara tunggal. Besi baja stainless duplex memiliki komposisi sekitar 22-15 % Cr, 5% Ni dan 3% Mo. Seringkali nitrogen ditambahkan untuk memperkuat besi terhadap pitting. **Gambar 3.31.** adalah contoh bentuk mikrostruktur dari besi baja stainless penggandaan.



**Gambar 3.31.**  
**Mikrostruktur dari Besi Baja Stainless Duplex yang Menunjukkan Fasa Austenit (Terang) dan Fasa Ferrite (Gelap). Diperbesar 400  $\times$** <sup>7)</sup>

**3.1.15. Baja Tahan Karat**

Salah satu cacat pada penggunaan baja adalah terjadinya karat, yang biasanya dicegah dengan mempergunakan pelapisan dan pengecatan. Baja tahan karat adalah semua baja yang tidak dapat berkarat. Banyak di antara baja ini yang digolongkan secara metallurgi menjadi baja tahan karat austenit, baja tahan karat ferrit, baja tahan karat martensit dan baja tahan karat tipe pengerasan presipitasi.

**3.1.15.1. Pengaruh Unsur-Unsur Paduan pada Ketahanan Karat dari Besi**

Kalau Cr dipadukan pada besi di atas 12-13%, karat yang berwarna merah tidak terbentuk, karena oleh adanya oksigen di udara terjadi permukaan yang stabil (permukaan pasif). Oleh karena itu, baja yang mengandung unsur tersebut dinamakan baja tahan karat. Kalau baja mengandung lebih dari 17% Cr akan terbentuk suatu lapisan yang stabil. Karat pada lasan dari baja tahan karat 17% Cr sering terjadi disebabkan karena presipitasi karbida Cr pada batas butir dan oksidasi Cr dari permukaan karenanya lapisan permukaan menjadi kekurangan Cr yang mengurangi ketahanan karatnya.

Kalau Ni dipadukan pada besi, kehilangan berat yang disebabkan korosi di dalam asam berkurang dan ketahanan korosi bisa diperbaiki.

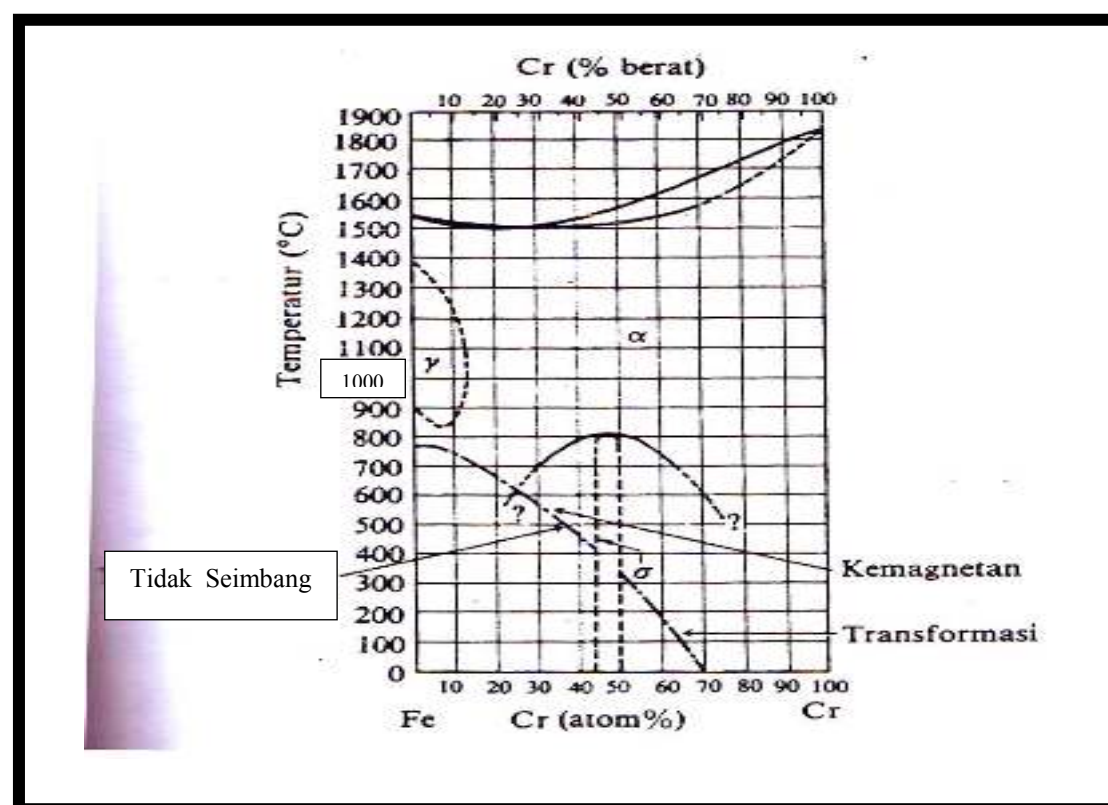
Baja tahan karat adalah baja paduan yang memanfaatkan keefektifan unsur paduan tersebut seperti Cr dan Ni dan dapat dibagi menjadi sistem Fe-Cr dan Fe-Cr-Ni. Yang pertama termasuk baja tahan karat martensit dan ferrit dan yang terakhir baja tahan karat austenit. Biasanya Mo, Cu, dsb. ditambahkan kepada baja ini untuk memenuhi maksud tertentu pada penggunaan.

**3.1.15.2. Struktur Baja Tahan Karat**

Memperhatikan unsur Cr, yang menjadi komponen utama pada baja tahan karat, diagram fasa Fe-Cr ditunjukkan dalam **Gambar 3.32** Cr dapat larut dalam besi memperluas daerah  $\alpha$  (ferrit). Dalam baja dengan 12%Cr pada temperatur diatas

900°C terjadi fasa  $\gamma$  (austenit). Dalam paduan yang nyata, C dan N juga terkandung jadi fasa  $\gamma$  diperluas ke daerah yang mempunyai konsentrasi Cr lebih tinggi. Baja tahan karat 12%Cr biasa dipakai, diaustenitkan dari 900°C sampai 1000°C tergantung kadar C-nya, dan dicelup dingin pada minyak. Sehingga mempunyai struktur martensit ia menjadi baja tahan karat.

Dari **Gambar 3.32** baja 18%Cr seharusnya mempunyai fasa  $\alpha$  dimulai dari temperatur pembekuan sampai temperatur kamar, tetapi karena sebenarnya mengandung 0,03-0,10%C dan 0,01-0,02%N, maka kira-kira diatas 930°C terbentuk fasa  $\gamma$ . Oleh karena itu perlakuan panas untuk mendapat fasa  $\alpha$  dilakukan dibawah 850°C, baja ini dinamakan baja tahan karat ferrit.

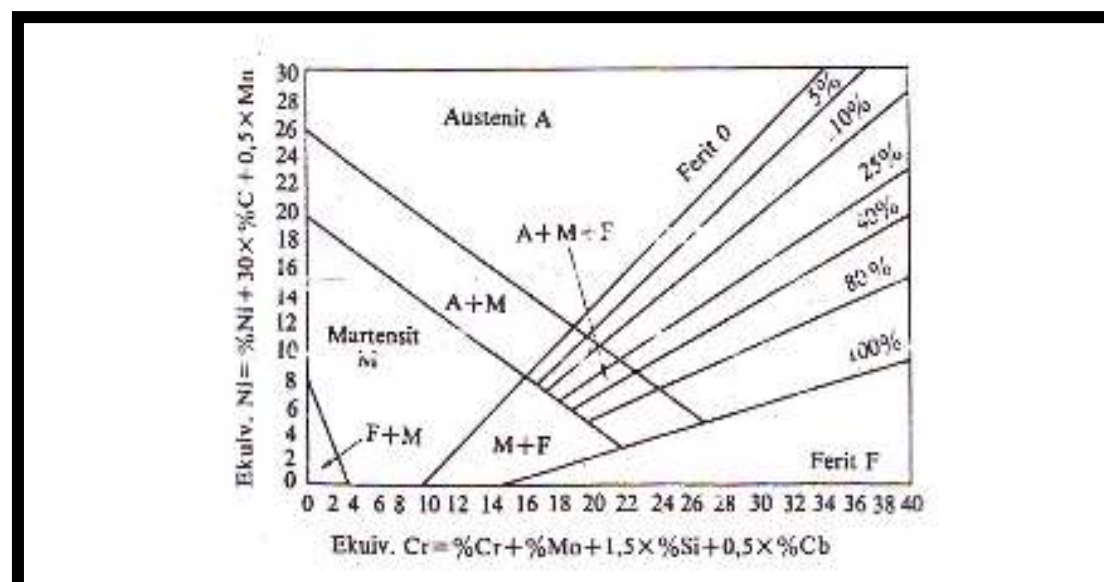


**Gambar 3.32.**  
**Diagram Fasa Fe-Cr <sup>13)</sup>**

Struktur baja 18%Cr-8%Ni adalah struktur dua fasa dari  $\alpha+\gamma$  dalam keseimbangan, tetapi kenyataannya pada kira-kira 1050°C seluruhnya menjadi austenit dan setelah pendinginan dalam air atau dalam udara fasa  $\gamma$  terbentuk pada temperatur

kamar sukar bertransformasi ke fasa  $\alpha$ , baja ini dinamakan baja tahan karat austenit. Fasa  $\gamma$  merupakan fasa metastabil, sebagai contoh kalau diadakan deformasi plastik bisa terjadi transformasi martensit. Kalau baja dipergunakan dalam bentuk austenit, maka perlu diadakan perlakuan panas untuk membentuk austenit tadi setelah dilakukan deformasi plastik, atau perlu dipakai baja yang mengandung lebih banyak Ni untuk memberikan kestabilan pada fasa austenit.

Untuk mengetahui hubungan dari fasa logam yang ada pada las-lasan, yang mempunyai pada kedua sumbu, diagram Schaeffer menunjukkan hubungan tersebut dan ditunjukkan pada **Gambar 3.33**.



**Gambar 3.33.**  
**Diagram Struktur dari Baja Tahan Karat yang Dideposisikan <sup>9)</sup>**

Cr ekuivalen= $\%Cr + \%Mo + 1,5X\%Si + 0,5X\%Nb$ , dan

Ni ekuivalen= $\%Ni + 30X\%C + 0,5\% Mn$

### 3.1.15.3. Pemilihan Baja Tahan Karat

#### 1) Baja tahan karat martensit

Komposisi baja tahan karat martensit adalah 12-13%Cr dan 0,1-0,3%C. Kadar Cr sebanyak ini adalah batas terendah untuk ketahanan asam karena itu baja ini sukar berkarat di udara, tetapi ketahanan karat dalam suatu larutan juga cukup.

Sampai 500°C, baja ini banyak dipakai karena mempunyai ketahanan panas yang baik sekali, dan dengan pengerasan dan penemperan dapat diperoleh sifat-sifat mekanik yang baik, oleh karena itu baja ini dapat dipakai untuk alat pemotong, perkakas, dan sebagainya.

## **2) Baja tahan karat ferrit**

Baja tahan karat ferrit adalah baja yang terutama mengandung Cr sekitar 16-18% atau lebih. Kebanyakan komponen dibuat dari pelat tipis, sebagai bahan untuk bagian dalam dari suatu konstruksi, untuk peralatan dapur, untuk komponen trim mobil bagian dalam, dan sebagainya. Perlu diperhatikan bahwa pada lingkungan korosi yang ringan tidak terjadi karat, tetapi berada pada air larutan yang netral, dapat terjadi korosi lubang atau krevis kalau terdapat sedikit ion klor, atau kalau ada struktur berbentuk krevis. Pelat tipis dari baja ini menyebabkan tanda regangan spesifik yang disebut *ridging* disebabkan oleh tarikan atau penarikan dalam, hal ini memberikan permasalahan pada pembuatan peralatan dapur, tetapi sekarang sebagai hasil dari berbagai studi, permasalahan tersebut mungkin dapat dipecahkan.

Sifat yang sangat menguntungkan dari baja tahan karat ferrit adalah bahwa tanpa kandungan Ni sukar untuk terjadi retakan korosi tegangan. Yaitu bahwa kalau ketahanan korosi baja tahan karat ferrit dibuat sama atau lebih baik daripada baja tahan karat austenit, akan lebih menguntungkan apabila dipakai baja tahan karat ferrit daripada baja tahan karat austenit, yang lebih mudah terjadi retakan korosi tegangan. Selanjutnya ketahanan korosi lubang bertambah kalau Cr dan Mo ditambahkan lebih banyak jadi sebagai pengganti Ni yang mahal maka dipakai baja 18%Cr-1%Mo, 18%Cr-2%Mo, dan sebagainya. Sedangkan untuk komponen trim bagian luar mobil atau komponen pemanas air. Untuk permintaan dengan persyaratan yang lebih tinggi dapat dipakai baja 26%Cr-1%Mo, dan sebagainya.

Selanjutnya baja tahan karat ferrit yang mengandung lebih dari 18%Cr adalah getas tetapi keuletannya tergantung kepada jumlah kadar C dan N. Sekarang berkat kemajuan teknik pembuatan baja dapat dibuat dengan mudah baja 18-19%Cr dengan

kadar  $C+N < 0,02\%$ , jadi perkembangan permintaan yang akan baja ini di masa datang telah pasti.

### **3) Baja tahan karat austenit**

Baja tahan karat austenit lebih baik pada ketahanan korosinya, mampu bentuk dan mampu lasnya, karena itu dipakai pada berbagai industri kimia. Selain itu, dipakai untuk bahan konstruksi, perabot dapur, turbin, mesin jet, mobil, komponen berputar, bangunan kapal, reaktor atom, dan seterusnya.

Baja tahan karat austenit meskipun lebih baik ketahanan korosinya tapi harus berhati-hati pada penggunaannya karena kekurangannya seperti dikemukakan di bawah ini.

- 1) Korosi antar-butir
- 2) Korosi lubang dan krevis
- 3) Retakan korosi tegangan

#### **(a) Korosi antar- butir**

Korosi antar butir disebabkan oleh presipitasi karbida Cr pada batas butir, yang menyebabkan daerah kekurangan Cr di dekatnya, dari daerah tersebut korosi dimulai. Dalam keadaan tertentu karbida Cr sendiri terkena korosi. Karbida Cr berpresipitasi pada daerah temperatur 500-900°C, pada 600-800°C paling tinggi. Sebagai contoh, derajat korosi antar butir dipelajari dengan pengujian korosi dari batang uji yang dipanaskan pada 600°C, yang disebut perlakuan sensitisasi. Korosi antar butir ini terjadi di daerah yang dipengaruhi panas pada lasan, yang menjadikan permasalahan. Karena hal tersebut disebabkan oleh terbentuknya karbida Cr, masalah tersebut dapat diatasi dengan mempergunakan baja berkadar karbon rendah yang dipadu dengan Ti atau Nb yang merupakan unsur pembentuk karbida yang kuat untuk menghindari terjadinya karbida Cr.

#### **(b) Korosi lubang dan krevis**

Korosi lubang disebabkan oleh retakan lapisan yang pasif. Bagian yang pecah dari lapisan menjadi rusak karena konsentrasi, yang membentuk lubang. Kerusakan pasif disebabkan oleh adanya ion klor. Dalam hal ini korosi yang terjadi pada permukaan logam tanpa suatu pertumbuhan spesifik disebut korosi lubang, dan korosi yang menyebabkan pecahnya lapisan pasif setempat karena pengurangan pH pada

permukaan kontak dengan benda lain, disebut korosi krevis. Agar tahan terhadap terjadinya lubang diperlukan kombinasi yang tepat dari Cr dan Mo. Dipandang dari sudut ini baja tahan karat ferit lebih menguntungkan. Baja tahan karat austenit yang mengandung 2-4%Mo banyak dipakai sebagai baja tahan yang tahan korosi lubang.

**(c) Retakan korosi regangan**

Retakan korosi regangan ialah retakan oleh korosi lokal dari lapisan pasif yang pecah karena tegangan tarik. Pada baja tahan karat austenit retakan korosi regangan sangat menyusahkan karena bersamaan dengan korosi lubang. Lingkungan yang utama adalah yang mengandung klorida, sulfida, air dengan temperatur dengan tekanan tinggi, dan soda kaustik.

Pengujian retakan korosi tegangan sering dilakukan dengan pembebanan pada kelarutan 42% magnesium klorida yang mendidih. Peningkatan Ni, C dan penambahan Si, dan sebagainya memberikan pengaruh efektif, dan dengan adanya P, N atau sedikit molibdenum memberikan pengaruh jelek. Kebanyakan memberikan patahan antar butir, dengan mengurangi kadar karbon dan penambahan unsur penyetabil karbid, memberikan pengaruh yang efektif.

**4) Baja tahan karat berfasa ganda**

Sekarang banyak dipakai baja tahan karat yang berfasa ganda yaitu terdiri dari fasa austenit dan ferrit. Umumnya mempunyai komposisi 25%Cr-5%Ni-1,5%Mo-0,03%C.

Dalam baja tahan karat berfasa ganda kekerasan mampu las dan kekurangan lainnya dari baja krom tinggi diperbaiki dengan penambahan Ni, N, dan sebagainya. Perkembangan baru-baru ini dalam teknik pembuatan baja memungkinkan pembuatan baja macam ini di mana pengurangan kadar karbon lebih mudah. Perbandingan antara fasa austenit dan ferrit biasanya 4-6 : 6-4 tergantung kepada komposisi dan perlakuan panasnya.

Baja tahan karat berfasa ganda mempunyai sifat bahwa fasa austenit dan ferrit masing-masing memberikan pengaruh saling menutupi. Sebagai contoh, tegangan mulur yang rendah dari fasa austenit dipertinggi dengan adanya fasa ferrit, dan keuletan rendah dari fasa ferrit diperbaiki oleh fasa austenit. Ketahanan korosi umumnya melebihi ketahanan korosi baja tahan karat 18-8 pH, terutama baja yang



mempunyai kadar Cr tinggi dan mengandung molybden Mo sangat baik dalam ketahanan korosi lubangnya; sehingga baja macam ini bisa dipakai untuk penukar panas yang mempergunakan air laut. Karena baja ini mempunyai kekurangan yaitu sifat pengerjaan panasnya yang kurang baik, maka perlu diadakan studi lebih lanjut mengenai teknik produksinya.

##### **5) Pengerasan presipitasi baja tahan karat**

Dengan mempergunakan ketahanan korosi yang baik dari baja tahan karat, kekuatannya telah diperbaiki dengan pengerasan presipitasi. Menurut struktur matriksnya baja tahan karat ini digolongkan menjadi macam martensit, macam semi austenit dan macam austenit. Salah satu macam yang umum adalah 17-4 pH (martensit, 17%Cr-4%Ni-4%Cu-0,06%C-0,35%Nb) dan 17-7 pH (semi austenit, 17%Cr-7%Ni-1,2%Al-0,07%oC).

Matriks dari kedua macam baja tersebut pada saat pengerasan presipitasi adalah martensit. Pada macam yang pertama martensit terbentuk oleh pendinginan setelah perlakuan pelarutan, sedangkan pada macam yang kedua martensit terbentuk dengan jalan transformasi plastis setelah perlakuan pelarutan atau dengan pendinginan di bawah temperatur kamar. Kalau dituakan pada 400-600°C, pada macam yang pertama diperkuat dengan adanya presipitat yang kaya oleh Cu dan dalam hal yang kedua oleh adanya senyawa Ni-Al. Baja ini sangat baik pada ketahanan korosinya dibandingkan dengan baja krom 18%Cr. Baja ini dipergunakan untuk roda gigi, poros, pompa-pompa untuk mengalirkan asam, katup, kulit luar dari pesawat terbang komponen mesin jet, pegas, dan sebagainya.

#### **3.1.16. Baja Tahan Panas dan Paduan Tahan Panas yang Super**

Penggunaan baja tahan panas sangat luas termasuk pada ketel uap untuk pembangkit tenaga listrik, turbin uap dan turbin gas, berbagai reaktor untuk industri kimia dan reaktor untuk tenaga atom, terutama penting untuk bahan konstruksi pembangkit tenaga. Karena bahan-bahan ini cenderung dipakai dalam temperatur tinggi dan tekanan tinggi dalam skala besar, atau dipakai dalam lingkungan yang khusus, umpamanya dalam pembangkit tenaga nuklir, dan sebagainya, banyak

diminta bahan yang mempunyai persyaratan tertentu dalam lingkup yang luas, jadi penyempurnaan dan pengembangan bahan tersebut maju pesat.

Pada umumnya sifat-sifat yang diminta bagi bahan yang tahan panas adalah sebagai berikut:

- 1) Sifat-sifat mekanis, yaitu kekuatan panas yang tinggi (kekuatan melar) untuk bisa bertahan pada temperatur tinggi dalam waktu yang lama, keuletan dan ketahanan yang lebih baik, mempunyai ketahanan yang kuat untuk kelelahan pada temperatur tinggi dan ketahanan terhadap kejutan termal dan mempunyai sensitivitas yang kurang terhadap takikan.
- 2) Sifat-sifat kimia, yaitu mempunyai ketahanan yang baik terhadap korosi dan oksidasi pada temperatur tinggi dan mempunyai stabilitas yang baik di dalam lingkungan di mana bahan ini dipergunakan.
- 3) Sifat-sifat fisik, koefisien pemuaian panas yang rendah dan berat jenis yang rendah, dan mempunyai konduktivitas termal yang besar.
- 4) Mudah dicairkan, mudah dicor, mudah ditempa dan juga lebih mudah dilas, dibengkokkan dan sebagainya.
- 5) Mempunyai harga yang murah. Sifat-sifat dasar pada 1) dan 2) adalah sifat-sifat yang diminta untuk dapat lebih baik, berdasarkan itu tegangan perencanaan dapat ditetapkan.

#### **3.1.16.1. Baja Tahan Panas Ferrit**

Baja tahan panas ferrit adalah baja Mo, Cr-Mo, Cr-Mo-V, Cr-Mo-V-W, 12% Cr, dan baja Si-Cr, dsb. Baja yang kedua pertama biasanya dipakai untuk ketel uap, dan baja Cr-Mo-V, dan Cr-Mo-W-V adalah untuk turbin uap, baja 12%Cr untuk sudu-sudu berputar dari turbin uap dan lain-lainnya. Baja Si-Cr dipergunakan untuk katup mobil.

#### **3.1.16.2. Baja Tahan Panas Austenit**

##### ***1) Baja tahan karat austenit***

Adalah baja tahan karat yang diperkuat oleh penambahan Ti, Nb, Mo, dsb, dan yang mempunyai ketahanan panas lebih tinggi dengan menambahkan lebih banyak Cr dan Ni.

### **2) Baja cor tahan panas**

Baja tahan panas harus mempunyai kekuatan tinggi pada temperatur tinggi, yang mengakibatkan pengerjaan panas lebih sukar, sehingga kebanyakan dari baja ini biasanya dicor. Baja Ni-Cr mengandung sampai 20%Ni dan baja paduan tinggi Ni-Cr kedua-duanya mempunyai ketahanan oksidasi sampai 1150°C, baja yang pertama mempunyai kekuatan pemelaran, dan perpanjangan yang tinggi, sedangkan baja yang terakhir kuat terhadap kejutan termal dan pemanasan berulang demikian juga pendinginan berulang.

### **3) Paduan super berkadar dasar besi**

Paduan Ni-Cr-Fe dan Ni-Co-Cr-Fe dapat dipergunakan pada kekuatan tinggi sampai kira-kira temperatur 750°C-800°C. Sedangkan paduan pengerasan presipitasi yang mengandung Ti dan Al mempergunakan fasa  $Ni_3(Ti, Al)$  (fasa  $\gamma'$ ) atau fasa  $Ni_3Ti$  (fasa  $\eta$ ) dari pengerasan presipitasi. Fasa-fasa ini adalah struktur teratur yang mempunyai kekuatan mulur lebih tinggi pada temperatur lebih tinggi. Kedua-duanya setelah perlakuan pelarutan pada 980-1150°C diberikan perlakuan penuaan pada kira-kira 130°C untuk memberikan kesempatan kepada fasa-fasa tersebut diatas berpresipitasi. Paduan yang mengandung Co memperkuat matriks austenitnya dengan Co. Di samping itu ada tiga macam paduan yaitu tipe pengerasan presipitasi dengan karbida, tipe pengerasan presipitasi dengan fasa  $\gamma'$  dan tipe pengerasan presipitasi dengan fasa  $Ni_3Nb$ .

#### **3.1.17. Paduan Dasar-Nickel**

Hanya pada besi baja stainless dipergunakan bahan paduan dasar nickel. Yang paling sering dibuat adalah Incolloys, Inconels, Monels dan Hastelloys. Paduan yang paling sering digunakan dapat dilihat pada **Tabel III-6**. dengan komposisi utama nickel, chromium, molybdenum, besi, alumunium dan titanium. Monels adalah paduan nickel-tembaga, Incolloys dari paduan nickel-besi-chromium dan Inconels adalah paduan nickel-chromium.

Hampir semua paduan ini tidak dapat diperlakukan panas dan harus dilakukan dengan pengerjaan dingin. Paduan lainnya dapat diperkeras dengan aging yang menghasilkan endapan yang disebut gamma utama,  $\gamma'$ .

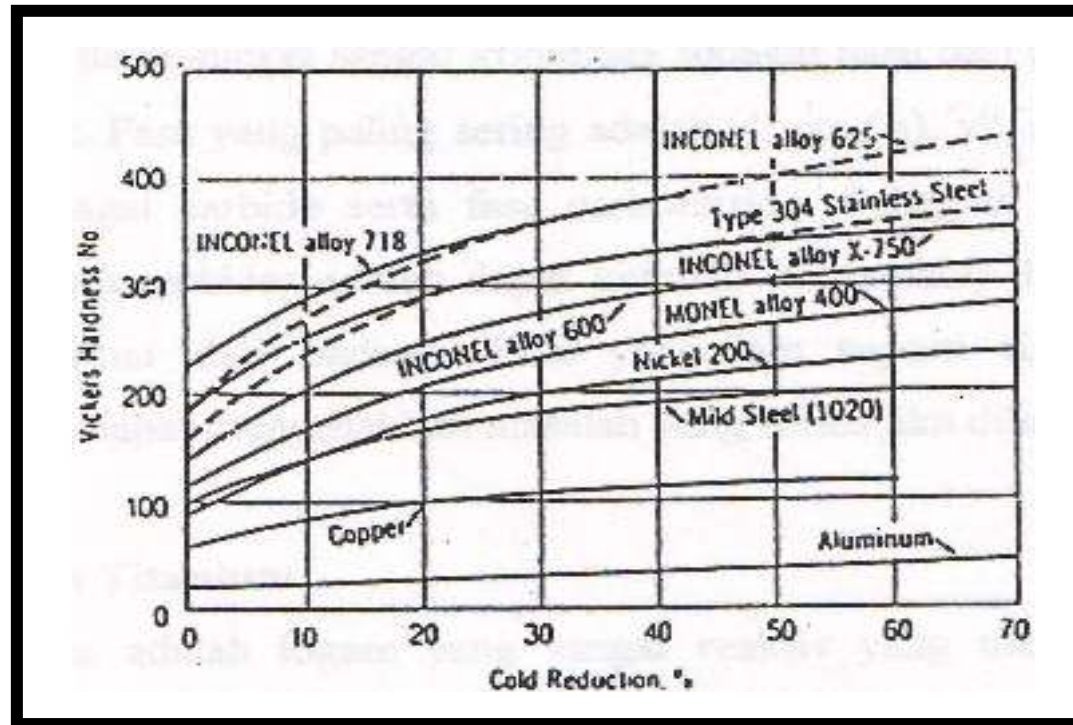
**Gambar 3.34.** menunjukkan pengaruh yang bervariasi terhadap paduan pada pengerjaan dingin. Derajat pengerjaan dingin yang lebih tinggi, menghasilkan kekerasan yang lebih baik pula.

**Tabel III-6**  
**Komposisi dari Paduan Dasar Nickel <sup>13)</sup>**

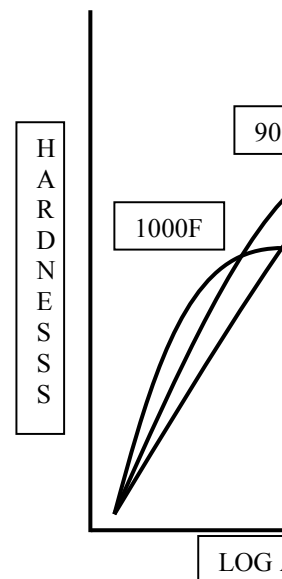
UNS No	Common Name	Cr	Mo	NI	Pe	Co	Cu	Nb	W	Al	C	TI	SI	Mn
N088 23	Alloy 28	26-28	3.0-4.0	29.5-32.5	bal	.	0.6-1.4	.	.	.	0.03	.	1.00	2.50
N088 25	Incoloy 825	19.5-23.5	2.5-3.5	38-45	bal	.	1.5-3.0	.	.	0.2	0.05	0.6-1.2	0.50	1.00
N077 25	Incoloy 725	19.0-22.5	7.0-9.5	55-59	bal	.	.	2.75-4.0	.	0.3-5	0.03	1.0-1.7	0.20	0.35
N099 25	Incoloy 925	19.5-23.5	2.5-3.5	38-46	220 min.	.	1.5-3.0	.	.	0.1-0.5	0.08	1.9-2.4	0.50	1.00
N077 18	Incoloy 718	17.0-21.0	2.8-3.3	50-55	bal	1.0	0.30	5.0	.	0.2-0.8	0.08	1.9-2.4	0.35	0.35
N077 50	Inconel X-750	14.0-17.0	.	70 min	5-9	.	0.50	0.7-1.2	.	0.4-1.0	0.10	0.65-1.15	0.50	1.00
N066 25	Inconel 625	20-23	8.0-10.0	bal	5.0	.	.	.	.	0.4-0	0.10	2.25-2.75	0.50	0.50
N044 00	Monel 400	.	.	63-70	2.5	.	bal	.	.	.	0.30	0.40	0.50	2.00
N055 00	Monel K-500	.	.	63-70	2.0	.	bal	.	.	2.3-3.5	0.25	.	0.50	1.50
N070 31	Pyromet 31	22.0-23.0	1.7-2.3	55-58	bal	.	0.6-1.2	.	.	1.0-1.7	0.03-0.06	0.35-0.85	0.50	0.20
N069 75	Alloy 2550	23.0-26.0	5.0-7.0	47-52	bal	.	0.7-1.2	.	.	.	0.03	2.1-2.6	0.20	1.00
N069 85	Hastelloy C-3	21.0-23.5	6.0-8.0	bal	18-21	5.0	1.5-2.5	0.5*	1.5	.	0.015	0.7-1.5	1.00	1.00
N069 50	Hastelloy C-50	19.0-21.0	8-10	bal	16-18	2.5	0.5	.	1.0	.	0.02	.	1.00	1.00
N102 76	Hastelloy C-276	14.5-16.5	15.0-17.0	bal	4.0-7.0	2.5	.	.	3.0-4.5	.	0.02	.	0.50	1.00
R300 35**	MP35N	19.0-21.0	9.0-10.5	33-37	1.0	bal	.	.	.	.	0.025	1.0	0.15	0.15

(a) maximum unless otherwise indicated  
\* Nb + Ta  
\*\* Actually Cobalt – base alloy

bal =- balance  
Incoloy and Inconel are trade names of INCO International  
Hastelloy is a trade name of Hyne  
Pyromet is a trade name of Carpenter



Gambar 3.34. Kekerasan sebagai Fungsi dari Pengerjaan Dingin pada Berbagai Paduan <sup>7)</sup>



**Gambar 3.35.**  
**Kekerasan sebagai Fungsi dari Waktu Aging dan Suhu untuk Paduan Nickel**  
**Mampukeras-Aging <sup>7)</sup>**

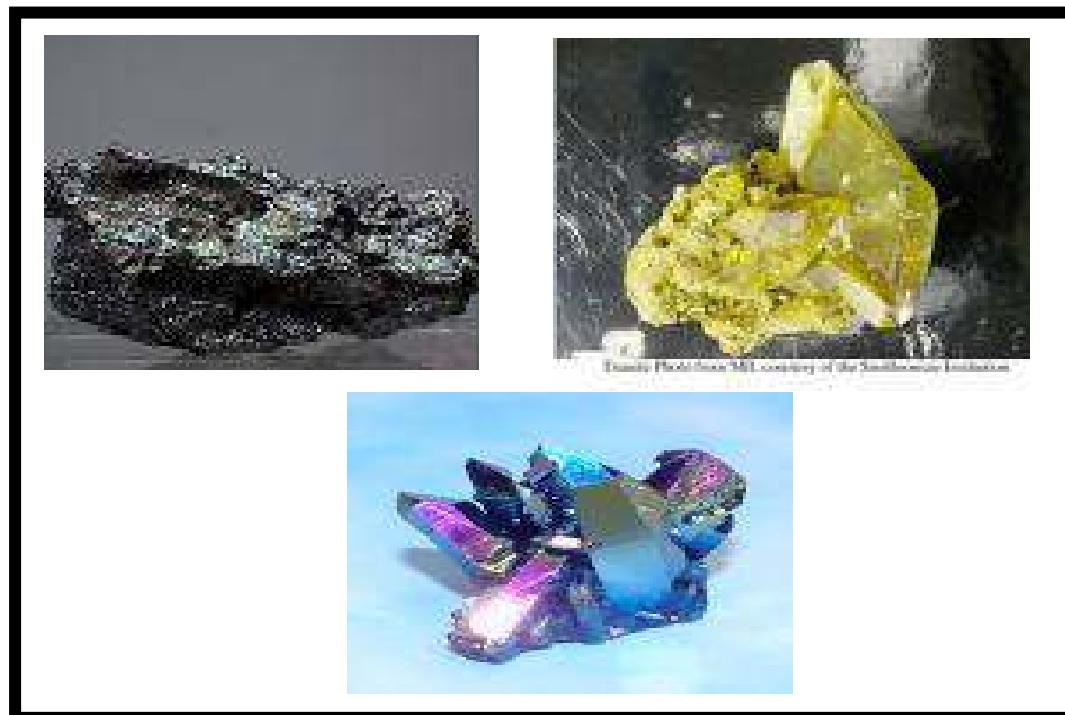
**Gambar 3.35** diatas adalah bentuk pengidealan dari perlakuan aging yang menunjukkan hubungan waktu dan suhu terhadap pengerasan. Pada saat suhu bertambah, waktu untuk mencapai kekerasan maksimum dikurangi.

Jika waktu dan temperatur optimum telah tercapai, akan terjadi overaging dan sejumlah endapan akan mengurangi efek kekuatannya.

Pengendapan  $\gamma'$  pada paduan tinggi-nickel seringkali terdiri dari  $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$  meskipun niobium dan titanium dapat pula menghasilkan  $\gamma'$ .

Paduan dasar-nickel sangat kompleks sebagai hasil dari sejumlah fasa yang dapat terbentuk. Fasa yang paling sering adalah  $\gamma'$ , eta ( $\eta$ ),  $\gamma''$ , mu ( $\mu$ ), sigma ( $\sigma$ ), laves dan berbagai carbide serta fasa carbonitride. Sebagian dari fasa tersebut seperti chromium carbides adalah dapat kembali (reversible) dan pada perlakuan panas akan keluar dari paduan. Fasa yang lain seperti sigma secara nyata irreversible dan dapat menyebabkan masalah yang serius jika dibiarkan terjadi.

### 3.1.18. Paduan Titanium



**Gambar 3.36.**  
**Logam Titanium <sup>7)</sup>**

Titanium adalah logam yang sangat reaktif yang memiliki kemampuan terhadap korosi sangat baik akibat adanya titanium oksida stabil (TiO<sub>2</sub>) yang terbentuk dipermukaan. Contoh dari logam ini dapat dilihat pada **Gambar 3.36.** diatas.

Titanium memiliki fasa pada temperatur tinggi yaitu fasa b.c.c. yang disebut beta dan temperatur rendah (ambient) fasa h.c.p. yang disebut alpha. Secara umum, paduan titanium dikategorikan sebagai alpha, dekat alpha, alpha + beta, dekat beta dan beta. **Tabel III-7.** menggambarkan beberapa paduan dari Ti. Elemen-elemen dan beta. **Tabel III-7.** menggambarkan beberapa paduan dari Ti. Elemen-elemen utama paduan tersebut adalah alumunium, nickel, vanadium, molybdenum, chromium, platinum dan tin. Alumunium dan tin menghasilkan fasa alpha stabil sedangkan Ni, V, Cr dan Cu pada fasa beta.

**Tabel III-7.**  
**Beberapa Paduan Titanium yang Lazim Digunakan <sup>9)</sup>**

UNS No.	Common Designation	Nominal composition, wt %					Impurity limits, wt %				
		Al	Sn	Zr	Mo	Others	N (max)	C (max)	H (max)	Fe (max)	O (max)
R50400	Unalloyed gradea	--	--	--	--	--	0.03	0.10	0.15	0.20	0.18
	ASTM Grade 1	--	--	--	--	--	0.03	0.10	0.15	0.30	0.25
	ASTM Grade 2	--	--	--	--	--	0.05	0.10	0.15	0.30	0.35
	ASTM Grade 4	--	--	--	--	--	0.05	0.10	0.15	0.50	0.40
	ASTM Grade 7	--	--	--	--	0.2Pd	0.03	0.10	0.15	0.30	0.25
R53400	Alpha and near-alpha alloys	--	--	--	0.3	0.8NI	0.03	0.10	0.15	0.30	0.25
	TI Code 12	--	--	--	0.3	0.8NI	0.03	0.10	0.15	0.30	0.25
	Ti-5Al-2.5Sn	5	2.5	--	--	--	0.05	0.08	0.02	0.50	0.20
	TI-5Al-2.5Sn-ELI	5	2.5	--	--	--	0.07	0.08	0.0125	0.25	0.12
	TI-8Al-1Mo-1V	8	--	--	1	1V	0.05	0.08	0.015	0.30	0.12
TI-6Al-2Sn-4Zr-	6	2	4	2	--	0.05	0.05	0.0125	0.25	0.15	

2Mo											
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	6	--	--	1	2Nb,1Ta	0.02	0.03	0.0125	0.12	0.10	
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo	2	11.0	5.0	1.0	0.2Si	0.04	0.04	0.008	0.12	0.17	

	Alpha beta alloys										
	Ti-6Al-4V	6.0	--	--	--	4.0V	0.05	0.10	0.0125	0.30	0.20
	Ti-6Al-4V-ELI	6.0	--	--	--	4.0V	0.05	0.08	0.0125	0.25	0.13
	Ti-6Al-6V-2Sn	6.0	2.0	--	--	0.75Cu,6.0V	0.04	0.05	0.015	1.0	0.20
R56260	Ti-7Al-4Mo	7.0	--	--	4.0	--	0.05	0.10	0.013	0.30	0.20
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	6.0	2.0	4.0	5.0	--	0.04	0.04	0.0125	0.15	0.15
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-4Mo-4Cu	5.0	2.0	2.0	4.0	4.0Cr	0.04	0.05	0.0125	0.30	0.13
	Ti-10V-2Fe-3Al	3.0	--	--	--	10.0V	0.05	0.05	0.015	2.5	0.16
	Ti-3Al-2.5V	3.0	--	--	--	2.5V	0.015	0.05	0.015	0.30	0.12
	Beta alloys										
	Ti-13V-11Cr-3Al	3.0	--	--	--	11.0Cr,13.0V	0.05	0.05	0.025	0.35	0.17
	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	3.0	--	--	8.0	8.0V	0.05	0.05	0.015	2.5	0.17
R58640	Ti-3Al-8V-6Cr-Mo-4Zr(Beta C)	3.0	--	4.0	4.0	6.0Cr,8.0V	0.03	0.05	0.020	0.25	0.12
	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn(Beta III)	--	4.5	6.0	11.5	--	0.05	0.10	0.020	0.35	0.18

Paduan titanium alpha tidak dapat diperkeras dengan perlakuan panas. Juga pada paduan alpha tidak memberikan respon pada perlakuan panas. Alpha + Beta, dekat beta dan paduan beta semuanya menunjukkan kemampukerasan oleh perlakuan panas.





**Gambar 3.37.**  
**Mikrostruktur dari Ti-6Al-4V Diperbesar 100 >.**  
**Fasa Putih adalah Alpha dan yang Gelap adalah Beta <sup>13)</sup>**

Paduan alpha + beta secara umum memerlukan pemadaman oleh air untuk pendinginan dimana akan memberikan pengaruh terhadap aging. Sedangkan paduan beta memerlukan udara untuk pendinginannya dari larutan pada suhu anil. Kedua tipe paduan tersebut kemudian di-aging dan diperkeras akibat adanya dekomposisi dari supersaturasi fasa beta. **Gambar 3.37.** diatas menunjukkan campuran fasa alpha dan beta pada Ti-6Al-4V.

Satu kelebihan dari paduan titanium dari paduan dasar nickel adalah kekerasan yang tinggi yang diperoleh oleh perlakuan panas. Sebagai contoh, pada besi paduan rendah dan paduan titanium dapat diperlakukan panas untuk menghasilkan kekerasan yield hingga 180.000 psi. Sedangkan paduan nickel pengerasan aging terbatas pada tekanan 130.000 psi.

### **3.1.19. Penentuan Ketebalan**

Ketebalan yang tepat dari diameter dalam pada pipa ditentukan berdasar penelitian hidrolis. Pada beberapa kasus, ketebalan ditentukan dengan pelapisan tegangan tetapi lebih sering didasarkan pada tekanan service, ketahanan terhadap korosi dan toleransi yang diberikan. Hal-hal tersebut untuk menentukan ketebalan pipa dengan °API yang lebih tinggi. Toleransi yang diberikan pada penentuan ketebalan pipa tanpa keliman dibandingkan pipa SAW menunjukkan bahwa pipa tanpa keliman berdiameter lebih tebal. Banyak perusahaan memasukkan toleransi yang lebih kecil dari API 5L dan juga mensyaratkan ketebalan yang mereka

perluan. Untuk sejumlah pipa hal ini tidak memberikan nilai ekonomik seperti ukuran standar API yang lebih murah daripada non-standar pada beberapa hal.

Ketahanan terhadap korosi ditentukan oleh perhitungan, dengan nilai tertentu seperti ditunjukkan pada bab selanjutnya. Untuk lingkungan yang non-korosi tidak diperlukan pipa yang memiliki ketahanan terhadap karat. Pada lingkungan dengan tingkat korosif ringan, ketahanan terhadap korosi dalam tingkat yang kecil. Sedangkan untuk lingkungan korosif yang kuat memerlukan ketahanan yang tinggi dan pencegahan yang menerus. Untuk lingkungan tersebut besi karbon mungkin bukan material yang cocok dan diperlukan material pengganti. Bukan hal yang mudah untuk perubahan perlakuan bahan tersebut. Penentuan masa pakai dari pipa, tekanan kerja dan bentuk aliran turut menentukan dalam perhitungan perubahan komposisi yang diperlukan. Faktor lain yang berpengaruh adalah kemudahan dalam pemeriksaan, mampu mencegah terjadinya korosi, tingkat kesulitan dalam pengoperasian dan aspek lingkungan hidup yang bertambah.

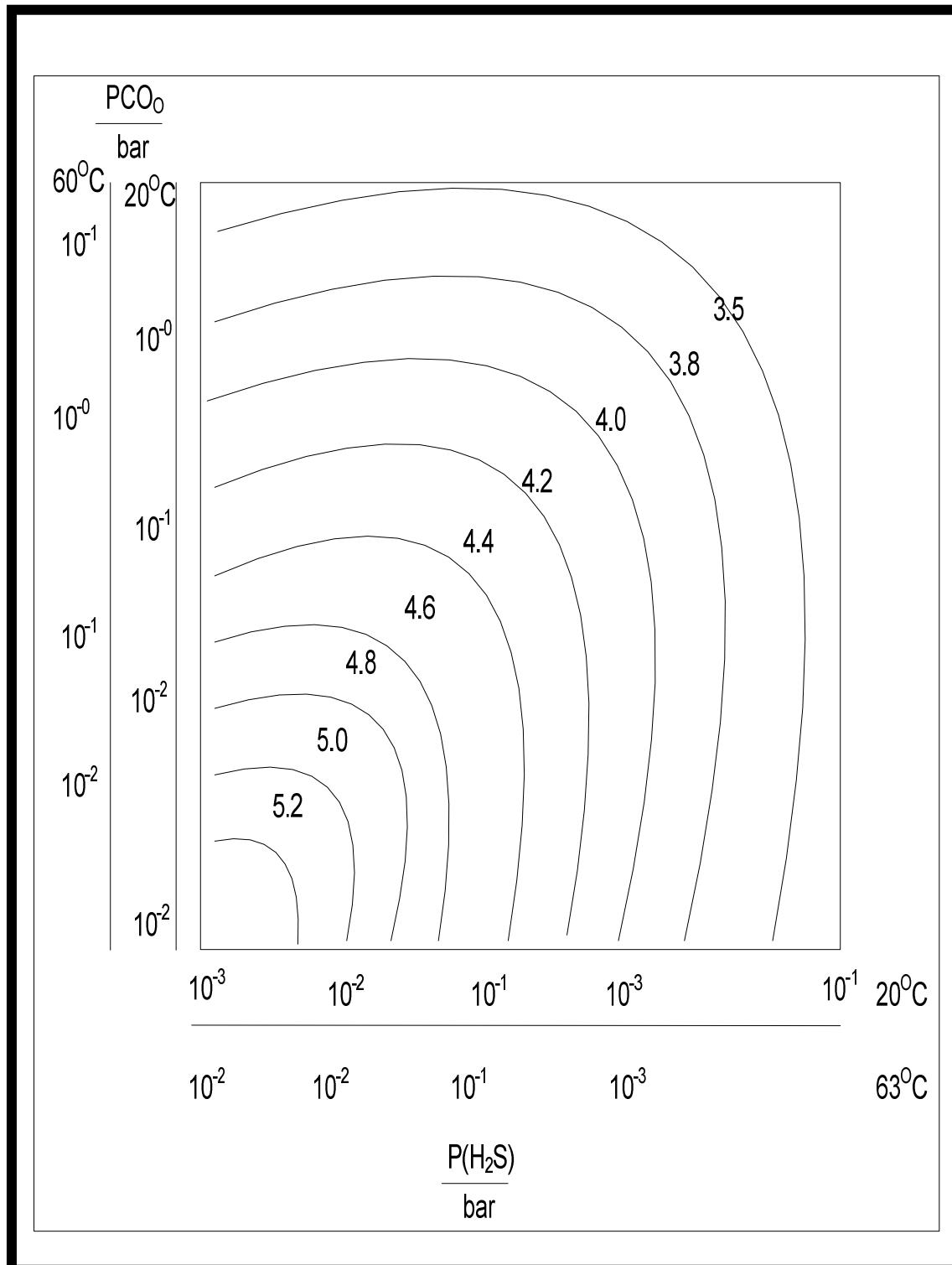
### **3.1.20. Ketahanan Terhadap Asam**

Cairan asam adalah cairan yang mengandung hydrogen sulphide. *Sulphide pertama* menyebabkan konvensional, seperti pitting. Masalah ini akan dibahas pada bab lebih lanjut. *Sulphide kedua* menyebabkan kerapuhan pada material yang memiliki kekerasan yang tinggi dan pada akhirnya menimbulkan keretakan akibat tegangan. Hal ini diistilahkan retakan korosi akibat tegangan sulphide (SSCC/Sulphide Stress Corrosion Cracking). *Sulphide ketiga*, lempengan besi dapat hancur akibat gas hydrogen dari formasi yang menyebabkan retakan (diistilahkan HIC, HPIC, retakan kapas). Serangan bentuk pertama dapat dikurangi oleh proses pencegahan kimiawi. Untuk mencegah SSCC diperlukan pembuatan pipa tanpa adanya spot pada pengelasan. Untuk mencegah korosi bentuk ketiga diperlukan pengetahuan metallurgi guna menentukan elemen yang diperlukan pada saat pembuatan besi.

Tingkat dari hydrogen sulphide pada cairan didefinisikan sebagai asam yang bergantung pada proses korosi yang terjadi. Korosi pitting oleh sulphide menjadi dominan pada kisaran 100 ppm meskipun hal ini masih bergantung pada campuran

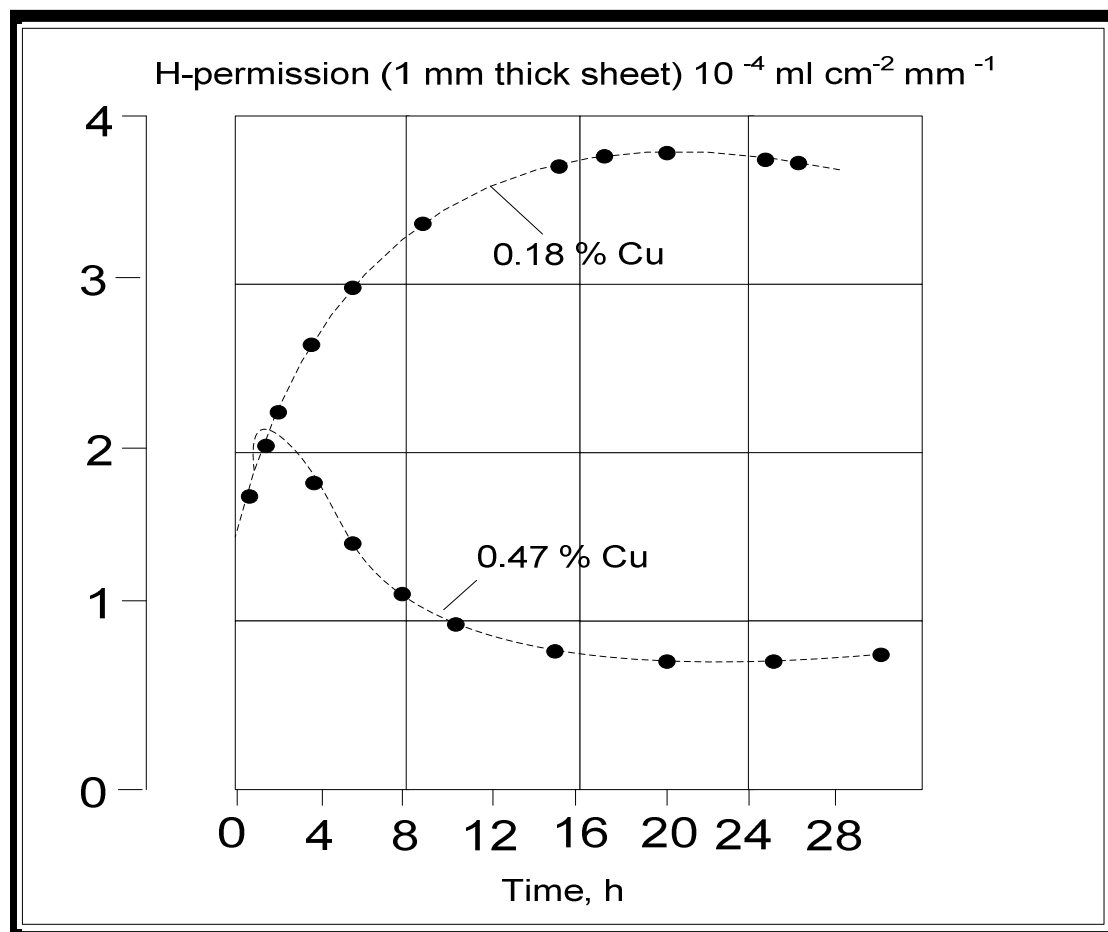
fluida lainnya. SSCC terjadi ketika sebagian tekanan dari hydrogen sulphide melebihi 0,05 psia dari tekanan operasi. HPIC akan terjadi pada kisaran tekanan hydrogen sulphide 0,1 psia meskipun ada lagi parameter kritis yaitu pH cairan yang ditetapkan oleh sebagian tekanan dari karbon dioxide.

HPIC akan terjadi pada kisaran tekanan hydrogen sulphide 0,1 psia meskipun ada lagi parameter kritis yaitu pH cairan yang ditetapkan oleh sebagian tekanan dari karbon dioxide. HPIC terbentuk pada jalur pipa minyak mentah tapi dewasa ini hanya terjadi pada pemipaan gas basah.



**Gambar 3.38.**  
**Pengaruh dari Tekanan H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> terhadap pH dari**  
**Kondensat Cairan pada Tekanan 20 psi dan Temperatur 60°C <sup>9)</sup>**

**Gambar 3.38.** menunjukkan interaksi antara karbon dioxide, hydrogen sulphide dan pH. Untuk pemipaan minyak mentah, pH tidak boleh lebih asam dari 4,4-4,5 dan hal ini dapat mencegah terbentuknya HPIC dengan penambahan tembaga.



**Gambar 3.39.**  
**Penyerapan-H, Pipa Besi Baja H<sub>2</sub>S Grade X-60,**  
**Air Laut Synthetic, 20°C, Bebas Korosi<sup>9)</sup>**

Pengaruh ini dapat dilihat pada **Gambar 3.39**. Meskipun hal ini tidak dapat mencegah secara umum HPIC terbentuk pada korosi internal. Pada gas basah asam dimana tingkat karbon dioxide dan hydrogen sulphide lebih tinggi, pH yang terbentuk akan turun menjadi 3 atau kurang. Untuk mencegah HPIC dilakukan perubahan secara kimiawi dari struktur metal pada besi baja.

Saat ini telah dibuat standar test untuk menentukan besi baja pada daerah asam; NACE (National Association of Corrosion Engineers) TM 0177 dan TM 0284. Sistem

ini mensimulasikan gas asam dan minyak mentah dengan pH 2,3 dan 4,5. Sebagian kecil dari material dibuka untuk dibasahi dengan asam dari hydrogen sulphide. Setelah 48 jam jumlah dan ukuran dari retakan yang terjadi dicatat. Test ini masih sangat sederhana dan masih memerlukan pemeriksaan pada saat bagaimana bila berada pada lingkungan yang ekstrim yang jarang-jarang terduga.

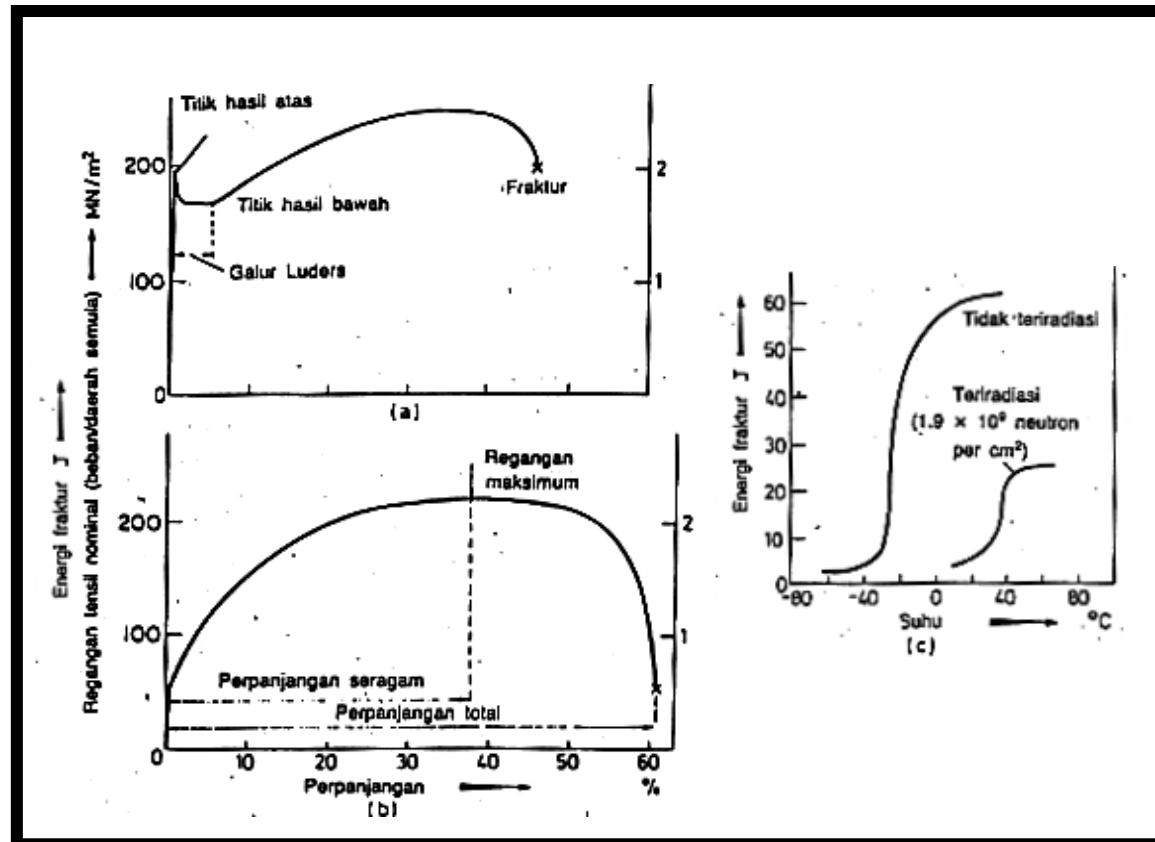
### **3.2. Sifat-Sifat Mekanik**

Bagaimanapun baiknya suatu kristal dipersiapkan, pasti memiliki cacat-cacat kisi yang akan mempengaruhi sifat-sifat yang berkaitan dengan struktur kristal tersebut. Dengan mengamati sifat mekanik logam, akan diperoleh informasi sifat-sifat cacat kisi tersebut. Selain itu, pengetahuan sifat-sifat mekanik digunakan untuk memeriksa kualitas produk yang dihasilkan berdasarkan suatu standard spesifikasi.

Sifat-sifat khas bahan industri perlu dikenal secara baik karena bahan tersebut dipergunakan untuk berbagai macam keperluan dalam berbagai keadaan. Sifat-sifat bahan yang diinginkan sangat banyak, termasuk: sifat-sifat mekanik (kekuatan, kekerasan, kekakuan, keliatan, keuletan, kepekaan takikan atau kekuatan impak dan sebagainya), sifat-sifat listrik (hantaran listrik dielektrisitas, dan sebagainya) sifat-sifat magnet (permeabilitas, histresis, dan sebagainya), sifat-sifat termal (panas jenis, pemuaian, konduktivitas, dan sebagainya), sifat-sifat kimia (reaksi kimia, kombinasi, segregasi, ketahanan korosi, dan sebagainya), sifat-sifat fisik (ukuran, masa jenis, struktur dan sebagainya), sifat-sifat teknologi (mampu mesin, mampu keras, dan sebagainya) dan masih banyak lainnya. Kebanyakan sifat-sifat tersebut ditentukan oleh jenis dan perbandingan atom yang membentuk bahan, yaitu unsur dan komposisinya. Sebagai contoh, kadar suatu unsur yang sangat rendah terabaikan dalam suatu ketakmurnian bahan memberikan pengaruh terhadap sifat-sifatnya, sifat-sifat mekanik yaitu kekuatannya demikian juga sifat ketahanan korosi termasuk reaksi kimianya, dipengaruhi oleh adanya sedikit ketakmurnian, inklusi atau cacat mikro. Sifat tersebut dinamakan struktur. Pembahasan yang didahulukan mengenai metoda dan evaluasi pengujian sifat-sifat mekanik.

### 3.2.1 Uji Tarik

Pada uji tarik, ujung-ujung benda uji dijepit dengan kuat dan salah satu ujungnya dihubungkan dengan alat pengukur beban, sedangkan ujung yang satu lagi dengan alat penarik. Regangan (elongasi) benda uji terlihat pada pergerakan relatifnya. Tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu *regangan* diukur dengan menggunakan metode hidraulik, optik atau elektromekanik.



Gambar 3.40.

Kurva Perpanjangan-Regangan bagi :

a) Besi Tak Murni, b) Tembaga, c) Transisi Duktal-Rapuh pada Baja Lunak <sup>9)</sup>

Kurva perpanjangan vs regangan untuk baja karbon biasa dengan kristal jamak serta tembaga diperlihatkan pada **Gambar 3.40.a** dan **3.40.b**. Kurva tegangan (beban persatuan luas,  $P/A$ ) vs regangan (pertambahan panjang persatuan *panjang*,  $dl/l$ ) diperoleh jika dimensi-dimensi benda uji diketahui. Pada tegangan yang rendah, terjadi deformasi elastis dan berlaku hukum Hooke dimana tegangan berbanding

linier dengan regangan. Konstanta perbandingan antara tegangan-regangan disebut modulus elastisitas dan besarnya dapat sama dengan :

a). modulus elastisitas atau modulus Young, E

b). modulus geser,  $\mu$ ; atau bulk modulus, K

semuanya bergantung pada regangan yang terjadi berupa regangan tarik, geser atau kompresif hidrostatis. Modulus Young, bulk modulus, modulus geser dan konstanta Poisson  $\nu$  ( perbandingan kontraksi lateral terhadap pertambahan panjang longitudinal pada tegangan uniaxial ) mempunyai hubungan berdasarkan persamaan berikut :

$$K = \frac{E}{2(1 - \nu)^2} \dots\dots\dots(3-$$

12)

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \dots\dots\dots(3-13)$$

$$E = \frac{9K\mu}{3K + \mu} \dots\dots\dots(3-14)$$

Keterangan : E = Modulus Young

$\mu$  = Modulus geser

$\nu$  = Konstanta Poisson

K = Bulk modulus

Dari pengujian tarik dapat diketahui kekuatan tarik maksimum ( UTS = beban maksimum per luas awal ) dan kelenturan ( persen reduksi luas atau persen regangan ) bahan. Tetapi jika digunakan sebagai metode penelitian bentuk kurva secara detail, variasi tegangan luluh dan tegangan patah dengan berubahnya temperature, penambahan paduan dan ukuran butir mungkin perlu mendapat perhatian.

### 3.2.2. Uji Kekerasan



Kekerasan suatu logam yang didefinisikan sebagai ketahanan terhadap penetrasi, memberikan indikasi sifat-sifat deformasinya. Alat penguji kekerasan menggunakan indentor berbentuk bola kecil, pyramid atau tirus untuk membuat jejak pada logam dengan pembebanan tertentu, nilai kekerasan diperoleh setelah diameter jejak diukur (jika menggunakan piramid intan Brinell atau Vickers). Nilai kekerasan berkaitan dengan kekuatan luluh atau tarik logam, karena selama penjejakan logam mengalami deformasi plastis sehingga terjadi regangan dengan persentase tertentu. Nilai kekerasan Vickers (VPN) didefinisikan sama dengan beban dibagi luas jejak piramida dalam  $\text{kg/mm}^2$  dan besarnya kurang lebih 3 kali besar tegangan luluh untuk logam-logam yang tidak mengalami pengerasan pekerjaan yang cukup berarti. Nilai kekerasan Brinell (BHN) didefinisikan sama dengan tegangan ( $P/A$ ) dalam  $\text{kg/mm}^2$  dimana  $P$  adalah beban dan  $A$  adalah luas permukaan jejak indentor yang berbentuk cekung, dengan demikian

$$BHN = P / (1/2 \pi D^2) \{1 - [1 - (d/D)^2]^{1/2}\} \dots \dots \dots (3-15)$$

Keterangan :

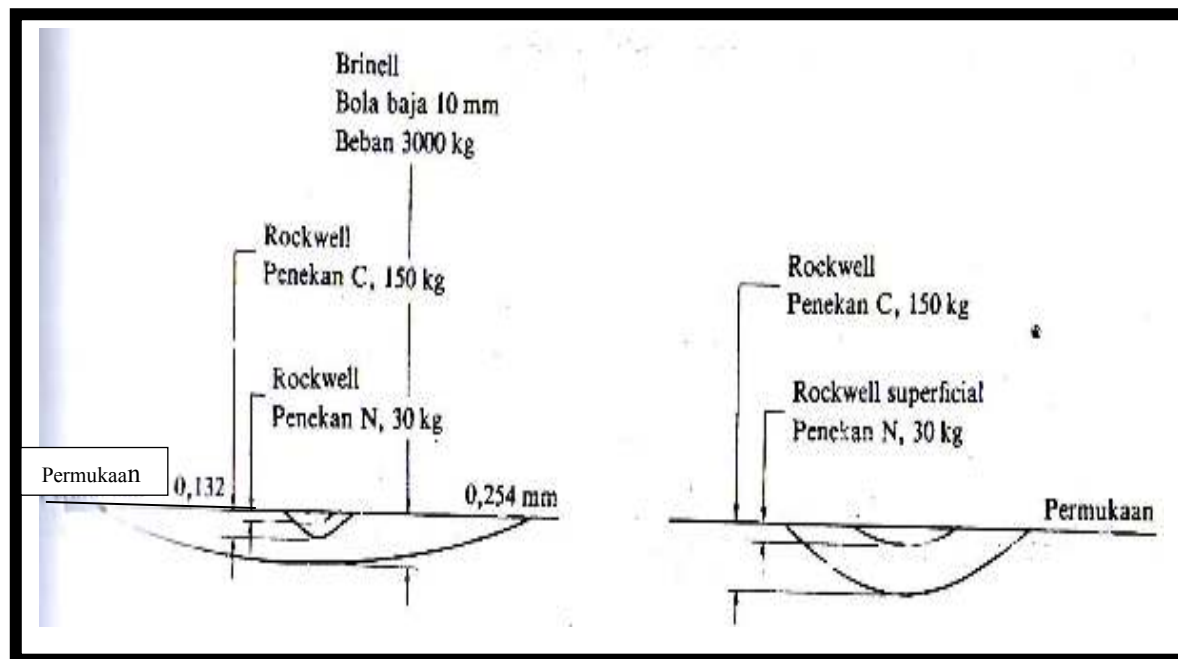
$d$  = diameter jejak

$D$  = diameter indentor

Untuk mendapatkan hasil yang konsisten, maka ratio  $d/D$  dipertahankan konstan dan kecil. Pada kondisi tersebut, logam lunak memiliki nilai BHN dan VHN yang sama. Pengujian kekerasan sangat penting, baik untuk pengendalian kualitas maupun penelitian, terutama jika diperlukan informasi logam-logam rapuh pada temperatur tinggi.

Pengujian kekerasan juga merupakan satu dari sekian banyak pengujian yang dipakai, karena dapat dilaksanakan pada benda uji yang kecil tanpa kesukaran mengenai spesifikasi.

Pengujian yang paling banyak dipakai ialah dengan menekankan penekan tertentu kepada benda uji dengan beban tertentu dan dengan mengukur ukuran bekas penekanan yang terbentuk di atasnya, cara ini dinamakan cara kekerasan penekanan.



Gambar 3.41.  
Berbagai Macam Pengujian Kekerasan Logam <sup>9)</sup>

Tabel III-8.  
Skala Kekerasan Rockwell <sup>9)</sup>

Skala	Penekan	Beban utama	Dial
B	Bola Baja 1/16"	100	Merah
C	Intan	150	Hitam
A	Intan	60	Hitam
D	Intan	100	Hitam
E	Bola baja 1/8"	100	Merah
F	Bola baja 1/16"	60	Merah
G	Bola Baja 1/16"	150	Merah
H	Bola baja 1/8"	60	Merah
K	Bola Baja 1/8"	150	Merah
L	Bola baja 1/4"	60	Merah
M	Bola Baja 1/4"	100	Merah
P	Bola Baja 1/4"	150	Merah
R	Bola Baja 1/2"	60	Merah
S	Bola Baja 1/2"	100	Merah
V	Bola baja 1/2"	150	Merah

Tabel III-9.  
Karakteristik Berbagai Pengujian Kekerasan <sup>9)</sup>

Rockwell ( $H_{RA}$ , $H_{RC}$ etc.)	Rockwell superficial ( $H_{R3GT}$ , $H_{R30N}$ dst)	Vickers ( $H_V$ )	Kekerasan mikro ( $H_V$ )	Shore ( $H_S$ )
Kerucut intan 120°; Bola baja 1/16"-1/2"	Kerucut intan 120°; Bola baja 1/16"-1/2"	Piramida intan sudut bidang berhadapan 136°	Jenis Vickers Jenis Knoop sudut 130°, 172°	Palu intan 3 g
Beban mula 10 kg beban total 60,100, 150 kg	Beban mula 3 kg, beban total 15,30 dan 45 kg	1-120 kg	1-500 g	
Dalamnya pene- kanan	Dalamnya penekanan	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekanan}}$	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekanan}}$	Tinggi pantulan 6,5" dari 10" tinggi pantulan asal adalah 100

Selanjutnya ada cara yang lain dengan menjatuhkan bola dengan ukuran tertentu dari ketinggian tertentu diatas benda uji dan diperoleh tinggi pantulannya. Pengujian kekerasan Brinell merupakan pengujian standar secara industri, tetapi karena penekannya dibuat dari bola baja yang berukuran besar dengan beban besar, maka bahan lunak atau keras sekali tidak dapat diukur kekerasannya. Pengujian kekerasan Rockwell cocok untuk semua material yang keras dan yang lunak, penggunaannya sederhana dan penekannya dapat dengan leluasa. Skala kekerasan B, C dan A adalah untuk bahan logam, skala A dapat dipakai untuk bahan sangat keras seperti karbida tungsten, skala D dan di bawahnya dipakai untuk batu gerinda sampai plastik. Pengujian Rockwell superfisial mempergunakan beban yang ringan untuk memperbaiki ketelitian dari penekan dengan cara penggunaan yang sama, juga dapat mengukur kekerasan permukaan dari bahan yaag dikeraskan kulitnya. Semua hal ini ditunjukkan pada gambar dan tabel diatas.

Tidak ada cara lain kecuali mendapat hubungan tersebut secara eksperimen, jadi kekerasan yang diperoleh dengan berbagai cara ditulis sebagai tabel konversi kekerasan. Tetapi hal yang diutarakan di atas berbeda menurut bahan, oleh karena itu

untuk baja atau paduan tembaga perlu memakai tabel yang berlainan, sesuai dengan paduan masing-masing.

Sejumlah data tersedia berkenaan dengan hubungan antara kekerasan dan kekuatan tarik atau kekuatan leleh. Hubungan ini sangat memudahkan penggunaannya untuk mengetahui kekuatan bahan dengan pengujian sederhana dari kekerasan. Tetapi karena hubungan itu memuat banyak faktor variabel, perlu berhati-hati dalam penggunaannya. Sebagai tambahan dalam penggunaan bagi bahan yang sama jenisnya, disarankan untuk memperhatikan metallografinya.

### 3.2.3. Pengujian Impak

Suatu bahan mungkin memiliki kekuatan tarik yang tinggi tetapi tidak memenuhi syarat untuk kondisi pembebanan kejut. Ketahanan impak biasanya diukur dengan menggunakan metode izod atau charpy yang bertakik maupun tidak bertakik. Pada pengujian ini beban diayun dari ketinggian tertentu untuk memukul benda uji, kemudian diukur energi yang diserap oleh perpatahan. Pengujian ini terutama berguna untuk memperlihatkan penurunan kelenturan dan kekuatan impak bahan dengan struktur b.c.c. pada temperatur rendah.

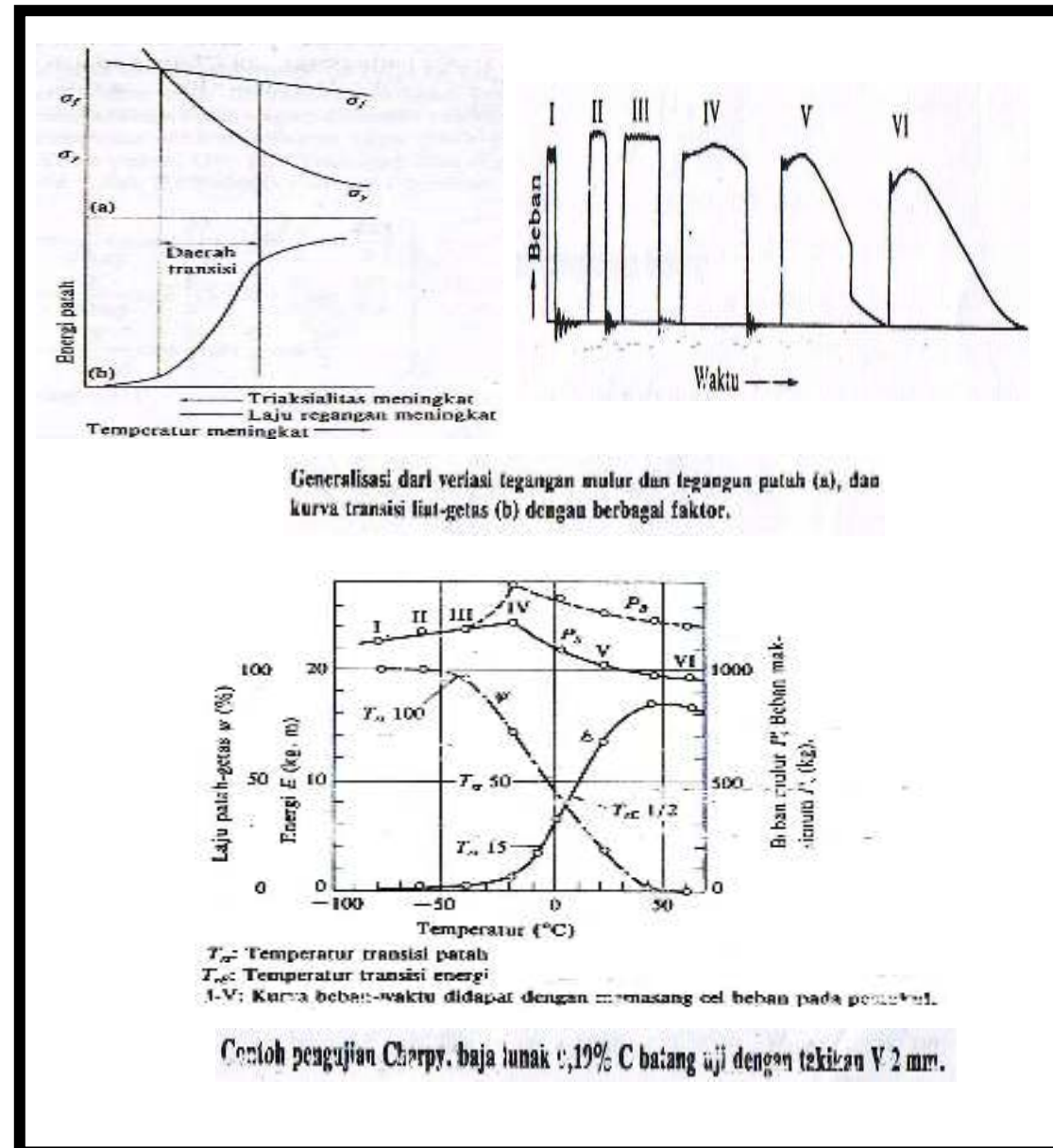
Pada pengujian ini diperoleh data tentang sifat bahan itu terhadap beban kejut. Dan ini penting artinya untuk bahan – bahan yang rapuh.

Benda uji yang telah dinormalisasi ditempatkan pada mesin uji sistem ayun. Pemukul kemudian diayunkan dari ketinggian tertentu sampai benda uji tersebut patah. ( Pesawat Charpy ).

$$\text{Harga Pukul Takik ; } a_k = \frac{\text{Tenaga untuk mematahkan (J)}}{\text{Luas penampang pada takik (cm}^2\text{)}} \dots\dots\dots(3-16)$$

Harga-harga dari percobaan ini tidak dapat digunakan sebagai dasar-dasar perhitungan pada perencanaan karena hasil percobaan masih terpengaruh beberapa faktor misal: temperature dimana percobaan itu dilakukan, bentuk-bentuk dari takikan.

### 1. Pengujian impak charpy



Gambar 3.42.  
Pengujian Impak Charpy <sup>9)</sup>

Pengujian impak charpy banyak dipergunakan untuk menentukan kualitas bahan. Batang uji dengan takikan 2 mmV, paling banyak dipakai. Disamping itu lebih dari 30 jenis diusulkan termasuk jenis yang memancing retak lelah. **Gambar 3.42** menunjukkan satu dari contoh hasil pengujian dengan mempergunakan batang

uji terbuat dari baja lunak dengan takikan 2 mmV. Hasil yang paling penting adalah temperatur transisi, menurut berbagai spesifikasi seperti ditunjukkan dalam **Gambar 3.42**. Gambar tersebut menunjukkan juga contoh khas pada perubahan kurva beban-waktu di setiap temperatur pengujian. Di masa silam, pada penggunaan bahan, sering menyatakan dengan energi yang diabsorb dan perbandingan patah getas pada satu temperatur yang mendekati temperatur kerja dari komponen mesin yang dipakai, sebagai contoh pada 0°C, hal ini hanya merupakan keuletan (secara eksperimen).

Pengujian patah yang umum biasanya ditentukan oleh tegangan yang diperlukan untuk mematahkan, tetapi pada pengujian charpy adalah energi yang diperlukan untuk mematahkan, jadi dipandang dari sudut ini pengujian charpy dapat dianggap cara pengujian yang maju.

## **2. Pengujian lebar, ukuran besar**

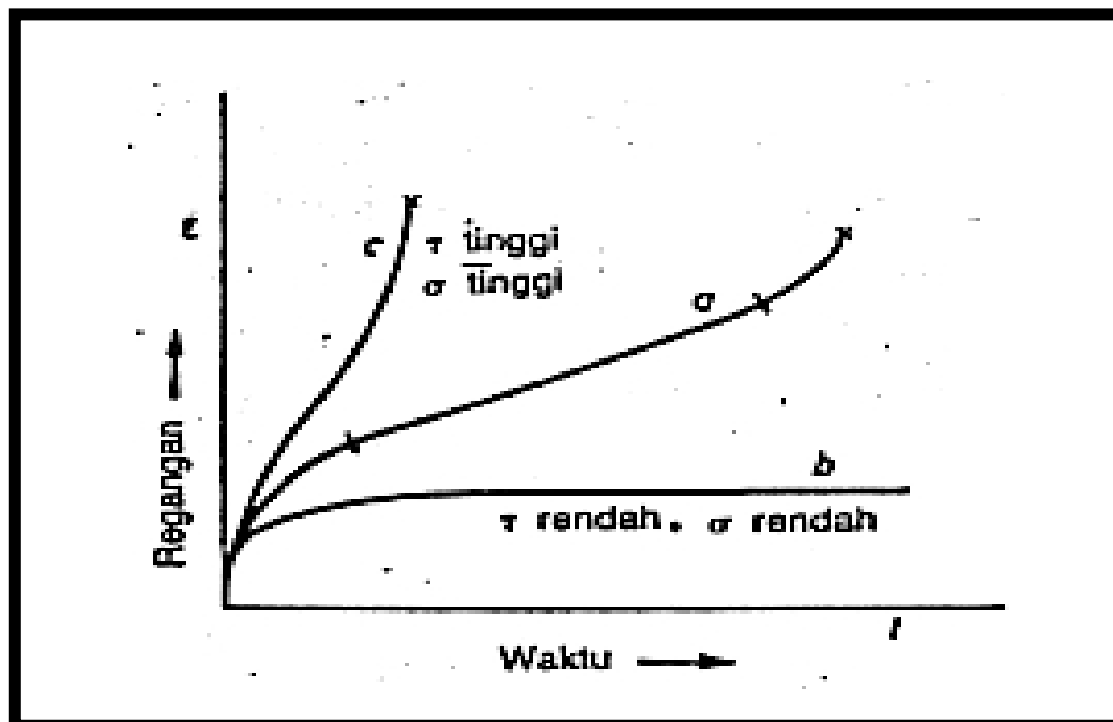
Walaupun kriteria dibuat berdasarkan pada hasil dari pengujian charpy dengan batang uji yang kecil tetapi patah getas mungkin saja terjadi pada satu konstruksi baja yang berukuran besar.

Maka telah banyak usulan diajukan dengan mempergunakan batang uji yang besar, tetapi pada saat ini belum ada yang secara internasional disahkan. Dalam metoda ini, pengujian patah dilakukan pada temperatur tetap dengan mempergunakan batang uji selebar 1 m. Pengujian ini memerlukan mesin uji berkapasitas 10.000 ton, yang menyebabkan pengujian tersebut menjadi mahal. Tetapi pengujian ini berguna karena terjadinya patah getas pada struktur yang sebenarnya dimungkinkan dan harga hasil pengujian dapat langsung dipergunakan pada desain sesungguhnya yaitu pembebanan, tegangan, dan sebagainya.

### **3.2.4. Creep (Pemuluran)**

Creep didefinisikan sebagai aliran plastis pada kondisi tegangan yang konstan, dan meskipun sebagian besar pengujiannya dilakukan dengan pembebanan konstan, suatu peralatan dipersiapkan untuk mereduksi pembebanan selama pengujian untuk mengkompensasi reduksi penampang benda uji. Pada temperatur relatif tinggi, creep terjadi pada tegangan yang berapapun besarnya, tetapi laju pemuluran (creep rate) meningkat dengan naiknya tegangan pada temperatur tertentu, untuk

mendapatkan sifat-sifat mulur yang akurat, benda uji harus dipertahankan pada temperatur konstan dan pengukuran perubahan dimensi harus mendapat perhatian yang besar, bagaimanapun kecilnya karena kenaikan temperatur sebesar beberapa puluh derajat cukup untuk melipat gandakan laju pemuluran sebagian besar logam. Kurva a **Gambar 3.43** memperlihatkan karakteristik kurva pemuluran yang umum terjadi dan berdasarkan regangan seketika yang disebabkan oleh pembebanan yang tiba-tiba, proses pemuluran dapat dibagi menjadi tiga tahap yaitu pemuluran primer (transient creep), tahap pemuluran sekunder (steady state creep) dan tahap pemuluran tersier (accelerating creep). Karakteristik kurva pemuluran dapat bervariasi dan tahap pemuluran tersier dapat lebih landai atau lebih curam jika temperatur dan tegangan pengujian tinggi atau rendah (**Gambar 3.43.b** dan **3.43.c**).



Gambar 3.43.  
Kurva Pemuluran yang Khas<sup>9)</sup>

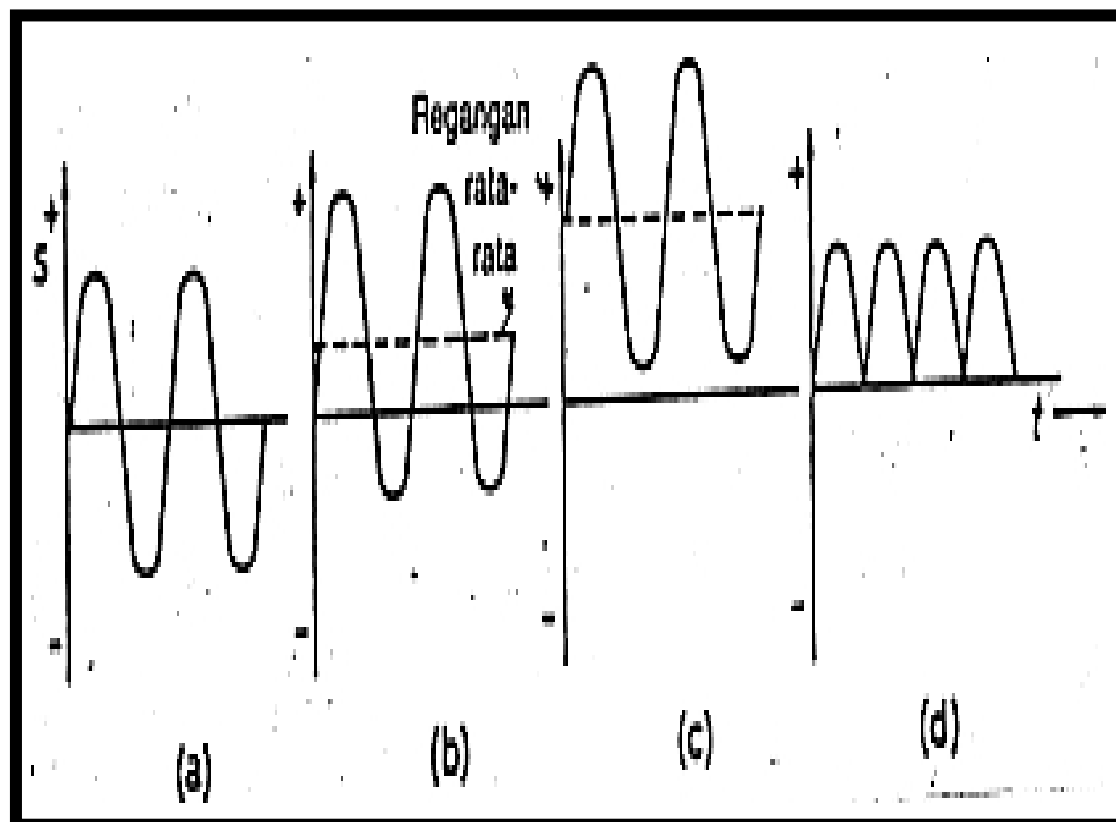
### 3.2.5. Fatik

Fenomena fatik berkaitan dengan perpatahan logam secara prematur karena tegangan rendah yang terjadi berulang kali terutama berperan penting dalam industri

perminyakan. Ada beberapa tipe mesin pengujian dimana tekanan diberikan melalui bending, tegangan (tension) atau kompresi, tetapi semuanya melibatkan prinsip yang sama yaitu memberikan siklus tegangan yang konstan terhadap logam. Untuk menyatakan karakteristik sistem tegangannya, ada tiga hal yang perlu diketahui, yaitu :

1. kurun tegangan maksimum
2. tegangan rata-rata
3. periode siklus tegangan

Empat penyusunan siklus tegangan yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 3.44**. Tetapi pada penelitian laboratorium yang paling sering digunakan adalah siklus balik (**Gambar.3.44.a**) dan berulang (**Gambar 3.44.b**) karena paling mudah dilakukan.

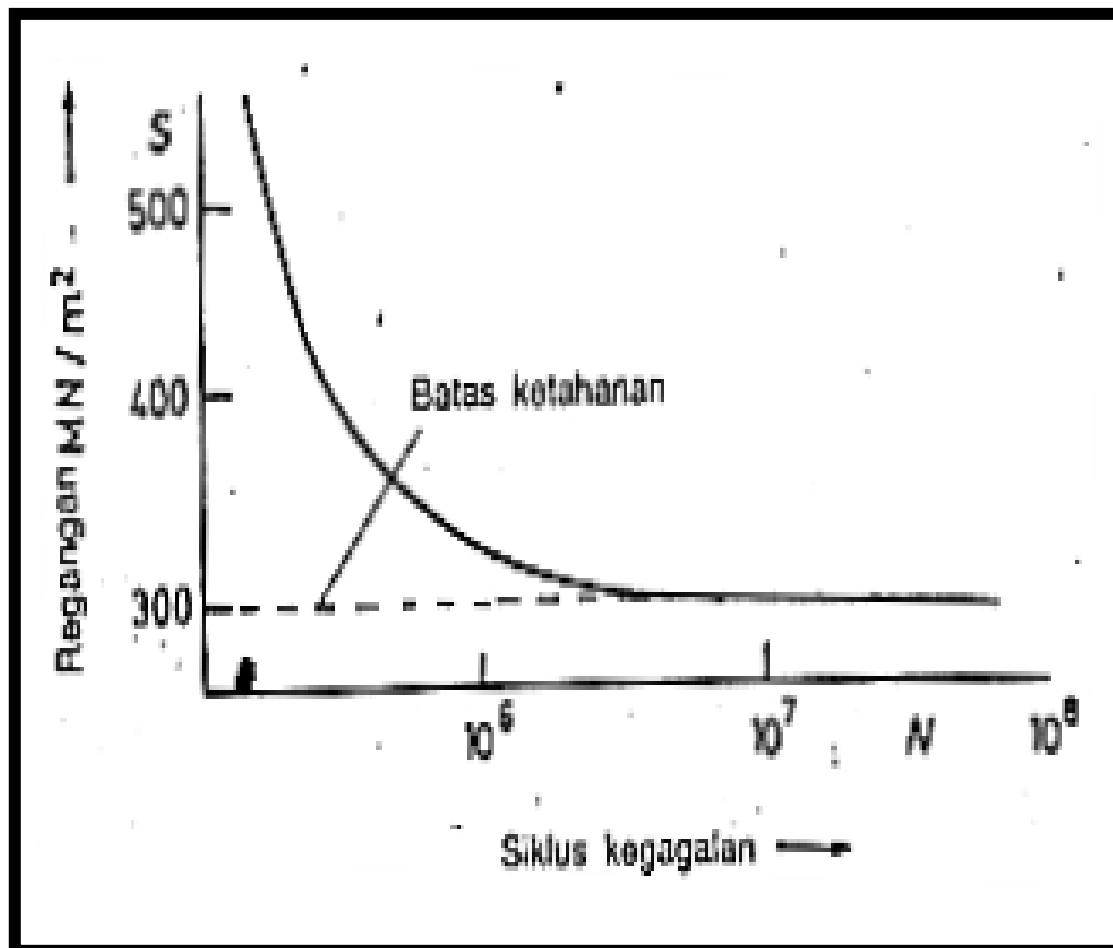


**Gambar 3.44.**  
**Bentuk Alternatif Pengulangan Regangan : a) Reversed, b) Alternating (Regangan rata-rata  $\neq 0$ ), c) Fluctuating, d) Repeated <sup>9)</sup>**

Metode standar pengujian fatik adalah mempersiapkan sejumlah besar benda uji yang bebas cacat kemudian dilakukan pengujian menggunakan kurun tegangan (S)



yang berbeda untuk setiap kelompok benda uji. Jumlah siklus regangan ( $N$ ) yang dialami oleh setiap benda uji pada besar tegangan tertentu kemudian dicatat dan diplot seperti terlihat pada **Gambar 3.45**. Diagram S-N ini bahwa beberapa logam mampu menahan siklus tegangan balik yang berulang tak terhingga jika besarnya tegangan lebih kecil dari tegangan batas yang disebut juga sebagai batas ketahanan. Untuk beberapa logam ferrous yang digunakan pada kondisi di mana korosi diabaikan, maka asumsi kurun tegangan kerja yang aman dapat digunakan, tetapi untuk logam non-ferrous dan baja digunakan pada kondisi yang korosif, maka batas ketahanan tidak dapat dipastikan.



**Gambar 3.45.**  
Kurva S-N untuk Baja Komersial pada Kondisi yang Dinormalkan <sup>9)</sup>

Patahan lelah juga disebabkan oleh tegangan berulang, dan juga dijumpai pada tegangan kurang dari  $1/3$  kekuatan tarik statik pada bahan struktur tanpa konsentrasi tegangan. Dalam keadaan di mana pemusatan tegangan diperhitungkan, mungkin bahan akan putus pada tegangan yang lebih rendah. Jadi kelelahan memegang peran utama dalam putusnya bahan secara mendadak pada penggunaan suatu struktur atau komponen.

Semua patahan yang disebabkan kelelahan melalui tahapan proses: (terjadinya retakan lelah) → (perambatan retakan lelah) → (patahan statik terhadap luas penampang sisa), oleh karena itu pencegahan masing-masing perlu dilakukan pada setiap tahapan proses tersebut di bagian yang paling efektif.

Menghindari patahan statik pada tahap akhir tidaklah efektif karena patahan tahap itu tidak stabil. Tetapi perlu dipelajari secara seksama pada titik mana terjadi pengalihan retakan menjadi patah yang tidak stabil, karena hal tersebut mempunyai arti penting secara teoritis dan secara praktis. Terjadinya retakan tidak dapat dielakkan apabila pemusatan tegangan didalam struktur dan komponen tidak terhindarkan, kalau sebelumnya ada sesuatu yang berhubungan dengan terjadinya retakan-retakan tak tampak atau inklusi dan presipitasi yang mengakibatkan pemusatan tegangan. Jadi hal tersebut perlu dipelajari dengan maksud memperlambat perambatan retakan. Dalam hal ini perlu memahami sifat khas perambatan retakan, terutama ketergantungan terhadap tegangan dan panjangnya retakan.

#### **3.2.5.1. Asal Retakan**

Kalau pengamatan dilakukan terhadap permukaan rata dari suatu batang uji tanpa takikan, yang dibebani berulang-ulang, perkembangan dari pita slip berbeda dibandingkan dengan yang terlihat pada batang uji percobaan tarik biasa. Kelanjutan lebih jauh dari tegangan berulang memperlebar sebagian pita slip, dimana tonjolan halus yang disebut intrusi dan ekstrusi terjadi yang perlahan-lahan berubah menjadi retakan kecil. Dalam hal ini patahan lelah terjadi sejajar dengan pita slip. Salah satu pencegahan kelelahan adalah mengendalikan retakan mikro tersebut. Menurut percobaan suatu retakan mikro berasal pada tahap yang sangat dini yaitu 0,1-0,5% dari umur kelelahan. Tidak benar menyatakan bahwa terjadinya retakan hanya

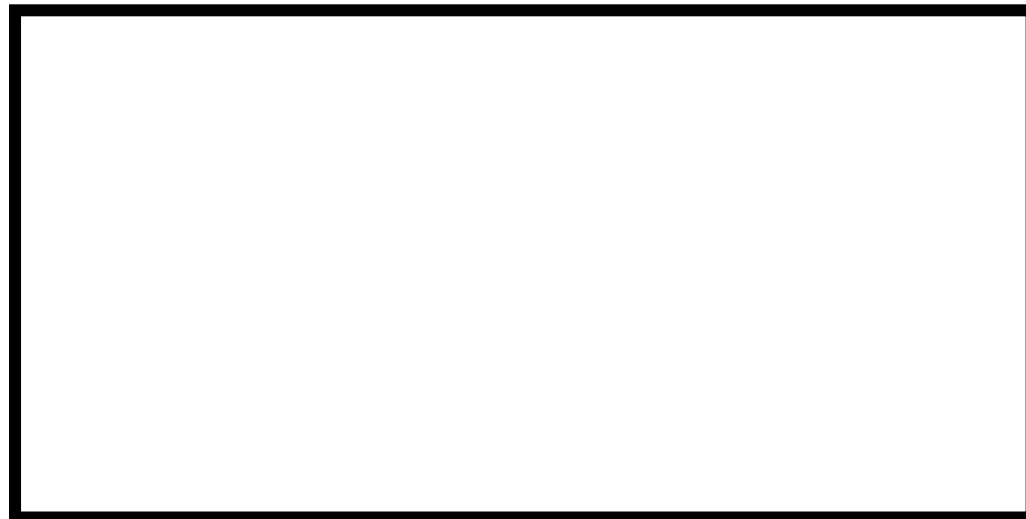
penting dengan 1/1000-5/1000, tetapi perlu dimengerti bahwa kalau terjadinya retakan dalam satu minggu dapat diperpanjang menjadi dua minggu, maka umurnya dapat diperpanjang 20 tahun.

Dalam kelelahan logam walaupun retakan lelah tergantung pada slip, retakan lelah tidak terjadi pada tegangan mulur yang tinggi. Mulur pada pengujian tarik dan regangan mulur yang disebabkan tegangan mulur uji, diteliti dari hasil pergerakan jarak panjang dari sejumlah banyak dislokasi, sedangkan slip yang diperlukan untuk pengembangan retakan mikro dalam kelelahan terjadi pada mulur mikro yang jauh lebih rendah. Salah satu dari alasan itu ialah pembentukan skala mikro dari dislokasi disekitar inklusi dan perambatannya. Sejalan dengan itu bahan yang bersih dari inklusi menunjukkan umur kelelahan yang sangat panjang.

Dalam hal beban lentur dan beban puntir telah dikenal jelas bahwa permukaan melingkar dari batang uji mempunyai tegangan maksimum dan retakan lelah terjadi pada permukaan dalam hal tarikan dan tekanan yang berulang-ulang pada tegangan yang merata, juga retakan lelah terjadi pada permukaan. Beberapa contoh telah dicatat bahwa kalau permukaan dengan pita slip yang diakibatkan oleh kelelahan di elektropolis setipis ukuran butir, maka umur kelelahan diperpanjang. Fakta terjadinya retak lelah pada permukaan bebas, menyatakan bahwa keadaan permukaan sangat mempengaruhi ketahanan lelah bahan.

Perlakuan permukaan seperti pengarbonan, penitridan memberikan peningkatan kekuatan pada lapisan permukaan, dan terjadi tegangan sisa berupa tegangan tekan pada permukaan, hal ini meningkatkan kekuatan kelelahan. Sebaliknya kalau terjadi pengurangan karbon pada permukaan, kekuatan kelelahan menurun. Tegangan sisa yang berupa tekan disebabkan oleh deformasi plastis dan perlakuan pelarutan (*pengerasan presipitasi*) meningkatkan kekuatan kelelahan, dengan penggeseran tegangan efektif pada permukaan. Sebaliknya tegangan sisa yang berupa tarik pada permukaan menurunkan kekuatan kelelahan. Pada permukaan yang dikerjakan dengan mesin ada tegangan sisa pada lapisan setebal 0,01-0,1 mm, setelah disemprot pasir (*sand blast*) dan disemprot mimis (*shot peening*) tegangan sisa selanjutnya ditingkatkan sehingga kekuatan kelelahan bertambah (**Gambar 3.46**). Sebagai tambahan terhadap kekuatan permukaan, makin halus permukaan

makin tinggi kekuatan kelelahan, karena pemusat tegangan pada permukaan menjadi hilang. Pelapisan permukaan memberikan hasil yang meskipun permukaan menjadi lebih keras dari logam induk karena pengaruh takikan, tegangan sisa tarik dan kegetasan hidrogen.



**Gambar 3.46.**  
**Pengaruh Kekerasan Permukaan pada Kekuatan Kelelahan <sup>9)</sup>**

#### **3.2.5.2. Pengaruh Lingkungan pada Kekuatan dan Patahannya Bahan**

Lingkungan yang bersifat korosi memberikan pengaruh besar pada patahnya dan mengurangi kekuatan putus. Korosi merupakan proses yang lama, yang tidak begitu efektif pengaruhnya kepada kekuatan dalam waktu yang singkat, seperti misalnya pada kekuatan tarik, tetapi lebih berpengaruh pada kekuatan kelelahan dan kekuatan melar.

Dibawah ini diutarakan mengenai patah terlambat. Satu macam yang kuat diberi beban statik selama waktu tertentu, tiba-tiba patah tanpa deformasi plastis, ini dinamakan patah terlambat. Dari pangkal takikan, hidrogen diabsorb karena pengaruh lingkungan, maka rekatan terjadi dan merambat perlahan-lahan, dan kalau dalamnya.lelah cukup untuk menyebabkan patahan yang tidak stabil, tiba-tiba patah terjadi. Karena gejala ini serupa dengan patah lelah berkenaan dengan adanya: tegangan, laju pertumbuhan retak, dan waktu yang diperlukan untuk patah, gejala ini juga disebut statik.



**Gambar 3.47.**  
**Kurva Waktu Patah Terlambat Baja AISI 4340 dengan Hidrogen Sisa yang Berbeda oleh Pemanasan pada 194°C dalam Waktu Berbeda bila setelah Diberi Hidrogen secara Elektrolitik. <sup>9)</sup>**

**Gambar 3.47** menunjukkan hasil pengukuran hubungan antara beban dan waktu patah dengan merubah hidrogen sisa dalam baja AISI 4340 (baja Ni-Cr-Mo), dimana hidrogen ditambahkan secara elektrolisa, dengan memanaskannya pada 50°C selama 0,5-24 jam. (Kurva tersebut dinamakan juga kurva S-N patah terlambat).

Disini dapat dikatakan bahwa batas tegangan patah terlambat berhubungan dengan batas leleh yang menurun, sesuai dengan meningkatnya kadar hidrogen, dan waktu patahnya menjadi singkat.

Permukaan patahan dari patah terlambat ditemukan dua keadaan yaitu antar butir dan melintas butir. Patahan kebanyakan disebabkan kegetasan hidrogen, tetapi ada juga yang disebabkan korosi tegangan, yang terjadi dalam suatu lingkungan elektrokimia. Perambatannya korosi melalui struktur logam yang aktif dipercepat oleh tegangan.

Bahan dipergunakan secara luas dalam atmosfer, maka dapat mengalami patah akibat atmosfer disebabkan oleh korosi dan adsorpsi hidrogen, yang bertindak sebagai pereduksi dari harga  $K_{Ic}$  keuletan patah.

### 3.3. Sifat-Sifat Fisik

Selain sifat-sifat mekanik, dalam pengetahuan logam perlu juga diketahui tentang sifat-sifat penting yang berhubungan dengan keadaan fisik dari logam. Sifat-sifat fisik yang perlu diketahui adalah kepadatan, sifat termal, konduktivitas listrik dan sifat magnetik. Dibawah ini akan diterangkan mengenai sifat-sifat fisik tersebut.

#### 3.3.1. Kerapatan (Densitas)

Sifat ini dapat didefinisikan sebagai berat per satuan volume bahan, dan mengalami kenaikan dengan bertambahnya bilangan atom pada setiap sub-kelompok. Kebalikan densitas ( $1/\rho$ ) adalah volume spesifik  $v$ , perkalian  $v$  dan berat atom  $W$  disebut volume atom  $\Omega$ . Densitas dapat ditentukan dengan metode kenaikan fluida dalam gelas ukur tetapi juga dapat menggunakan metode sinar-x.

#### 3.3.2. Sifat-sifat Termal

Kenaikan temperatur pada logam akan menaikkan getaran atom yang menyebabkan ekspansi termal kisi. Perubahan dimensi karena perubahan temperatur biasanya dinyatakan dalam koefisien linier ekspansi  $\alpha$  dengan persamaan berikut :

$$\alpha = (1/l)(dl/dT), \dots \dots \dots (3-17)$$

Keterangan :

$l$  = panjang mula-mula benda uji

$T$  = temperatur absolut.

Karena kristal logam bersifat anisotropik, nilai  $\alpha$  biasanya bervariasi tergantung arah pengukuran dalam kristal, bahkan dalam arah kristalografik tertentu, perubahan dimensi dengan berubahnya temperatur tidak selalu seragam. Perubahan dimensi benda uji ditransmisikan ke suatu transducer elektrik melalui batang silika.

Panas spesifik adalah sifat termal yang juga berperan penting dalam operasi metalurgi pengecoran atau perlakuan panas, karena menentukan jumlah panas yang dibutuhkan dalam proses. Hal ini berarti panas spesifik (ditandai dengan  $C_p$  jika

tekanan konstan) mengendalikan kenaikan temperatur  $dT$  yang disebabkan penambahan sejumlah panas  $dQ$  terhadap 1 gram logam, maka :

$$dQ = C_p dT \dots\dots\dots(3-18)$$

Jika logam dipasok dengan energi panas, dari pembahasan di atas jelas bahwa sebagian akan diserap oleh kisi untuk menaikkan amplitudo getaran ion, tetapi sebagian kecil akan diserap oleh elektron-elektron pada puncak lingkaran energi. Pengetahuan panas spesifik penting untuk mengetahui struktur elektronik dan struktur kisi metal.

Menurut teori lingkaran, kontribusi faktor elektronik terhadap panas spesifik adalah linier dalam temperatur dan konstanta perbandingannya ( $\eta$ ) diperoleh persamaan

$$\eta = \pi^2 k N(E) / 3 \dots\dots\dots(3-19)$$

Keterangan :

$k$  = konstanta Boltzmann

$N(E)$  = densitas elektron pada permukaan fermi

Tetapi karena panas spesifik total diperoleh dari persamaan :

$$C = C_{kisi} + C_{elektronik} \dots\dots\dots(3-$$

20)

$$C = const. T^3 + \mu T \dots\dots\dots(3-21)$$

maka persamaan kisi memiliki nilai rendah hanya pada temperatur rendah. Meskipun demikian, karena bervariasinya panas spesifik dengan perubahan temperatur pada

temperatur rendah tersebut (kurang lebih 4 °K),  $\eta$  didapat dengan memplot  $C/T$  vs  $T_2$  dengan mengekstrapolasikannya ke  $T = 0$ .

### 3.3.3. Konduktivitas, Superkonduktivitas dan Semikonduktivitas Listrik

Salah satu sifat logam yang paling penting adalah konduktivitas listrik ( $k$ ) dan kebalikannya (disebut juga resistivitas =  $\rho$ ) didefinisikan dengan persamaan :

$$R = \rho l/A \dots \dots \dots (3-22)$$

Keterangan :

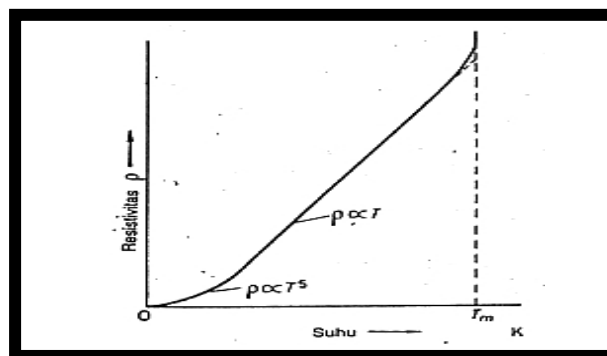
$R$  = resistensi benda uji

$l$  = panjang bidang benda uji

$A$  = luas penampang benda uji

Logam memiliki konduktivitas tinggi karena elektron-elektron dapat dengan mudah bermigrasi melalui kisi. Hukum Wiedmann-Franz menunjukkan bahwa ratio konduktivitas listrik dan panas adalah hampir sama untuk semua logam pada temperatur yang sama.

Karena konduktivitas terjadi akibat pergerakan elektron-elektron melalui kisi, maka resistensi disebabkan oleh penyebaran gelombang elektron dan ketidakaturan kisi. Ketidakaturan mungkin disebabkan oleh beberapa faktor antara lain temperatur, unsur paduan deformasi atau radiasi atom yang masing-masing dapat menyebabkan periodisitas kisi.



Gambar 3.48.

Kurva S-N untuk Baja Komersial pada Kondisi yang Dinormalkan <sup>11)</sup>



Pengaruh temperatur terlihat pada **Gambar 3.48**, dimana resistensi meningkat sebanding dengan temperatur di atas sekitar 100 °K sampai titik lebur. Pada peleburan, resistensi meningkat dengan tajam karena keadaan cair memiliki ketidakteraturan yang tinggi. Tetapi untuk beberapa logam seperti bismuth, resistensi mengalami penurunan karena struktur daerah khusus yang menyebabkan bismuth menjadi konduktor yang buruk dalam keadaan padat dihancurkan pada proses peleburan.

Untuk sebagian besar logam, resistensi mendekati nol pada temperatur nol absolut (**Gambar 3.48**). Tetapi beberapa logam (misalnya Pb, Sn dan Hg) resistensinya tiba-tiba turun sama dengan nol pada temperatur kritis tertentu dibawah nol °K, logam-logam ini disebut superkonduktor. Temperatur kritis masing-masing logam berbeda tetapi selalu mendekati nol °K. Temperatur kritis tinggi suatu unsur adalah 8 °K untuk niobium.

Insulator dapat menjadi konduktor pada temperatur tinggi jika cukup terjadi agitasi termal yang memungkinkan elektron melewati jurang energi untuk masuk ke daerah yang belum terisi di atas. Si dan Bi murni adalah bahan-bahan yang jurang energinya tidak terlalu besar sehingga dapat melewati dengan eksitasi panas. Mereka dinamakan semikonduktor di mana pembawa arus adalah electron-elektron lapisan konduksi yang jumlahnya sama dengan lubang-lubang lapisan valensi. Selain itu konduksi juga disebabkan oleh kehadiran unsur-unsur pengotor yang menambahkan elektron kedalam daerah yang masih kosong memindahkan elektron dari daerah yang penuh.

#### 3.3.4. Sifat Magnetik

Jika logam ditempatkan dalam daerah magnetik berkekuatan  $H$  daerah dalam logam yang terinduksi adalah

$$B = H + 4\pi I \dots\dots\dots(3-23)$$

Keterangan :

$I$  = intensitas magnetisasi.

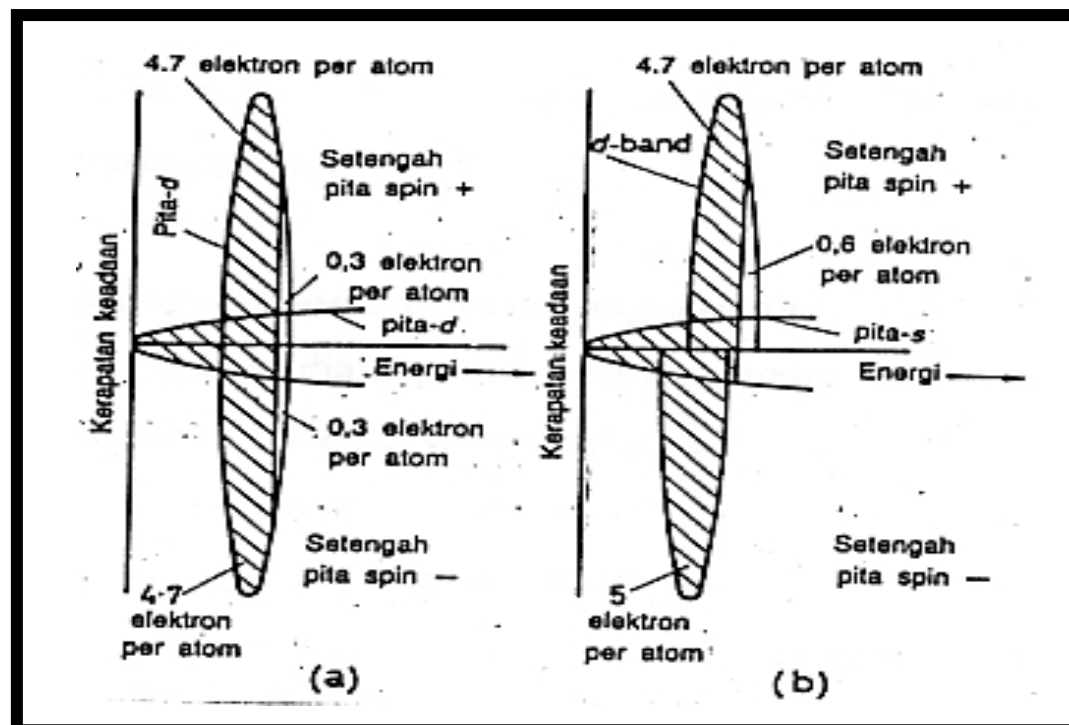
Besarnya  $I$  adalah karakteristik logam tersebut dan berhubungan dengan suseptibilitas persatuan volume yang didefinisikan dengan persamaan  $k = I/H$ .

Logam-logam dengan harga  $k$  negatif seperti tembaga, perak, emas dan bismuth tolak-menolak dengan daerah magnetik dan dinamakan material diamagnetik. Tetapi sebagian besar logam memiliki nilai  $k$  yang positif (tarik-menarik dengan daerah magnetik) dan bersifat paramagnetik (jika  $k$  kecil) atau ferromagnetik (jika  $k$  sangat besar). Hanya empat logam murni yaitu besi, cobalt, nickel dan gadolinium yang memiliki sifat ferromagnetik ( $k \approx 1000$ ) pada temperatur kamar, tetapi ada banyak paduan ferromagnetik dan beberapa paduan terdiri dari logam-logam yang dalam keadaan bebas tidak bersifat ferromagnetik, sebagai contoh paduan Heusler yang terdiri dari Mn, Cu dan Al.

#### 3.3.4.1. Diamagnetisme dan Paramagnetisme

Diamagnetisme merupakan sifat atom yang universal karena berasal dari pergerakan elektron dalam orbit yang mengelilingi inti. Dengan demikian elektron yang bergerak dapat dianggap sebagai rangkaian listrik. Berdasarkan hukum Lenz, pergerakan ini mengalami perubahan bila dipengaruhi oleh suatu medan sedemikian sehingga timbul gaya tolak-menolak. Kontribusi dari kulit tertutup sebanding dengan jumlah elektron didalamnya dan sebanding dengan akar jari-jari orbit. Pada berbagai logam efek diamagnetik diimbangi oleh kontribusi paramagnetik yang berasal dari spin elektron. Tiap elektron merupakan magnet kecil dan bila berada dalam medan magnet akan mengikuti salah satu dari dua orientasi yang ada, yaitu sejajar atau berlawanan arah dengan medan, bergantung pada arah spin elektron. Sehubungan dengan itu, energi elektron berkurang atau bertambah dan dapat digambarkan dengan mudah melalui teori pita. Jadi, pita level energi dianggap terdiri dari dua bagian, lihat **Gambar 3.49.(a)**, masing-masing bagian berasosiasi dengan spin yang berlawanan. Bila elektron berada dalam suatu medan, beberapa diantaranya akan berpindah dari satu pita lainnya hingga akhirnya level energi Fermi sama untuk kedua pita tersebut. Oleh karena itu jelas, bahwa pada posisi ini, lebih banyak elektron mengalami penyusutan energi oleh medan tersebut dan hanya sedikit saja yang mengalami peningkatan energi.

Kondisi ini disebut paramagnetisme, karena ada kelebihan spin tanpa pasangan hingga dihasilkan momen magnetik.



Gambar 3.49.

Skema (a) Nikel Paramagnetik, (b) Nikel Ferromagnetik <sup>9)</sup>

#### 3.3.4.2. Ferromagnetisme

Hingga kini teori ferromagnetik dianggap cukup sulit bahkan belum berkembang sepenuhnya. Meskipun demikian, berdasarkan teori elektron logam dapat dikembangkan suatu model pita untuk bahan ferromagnetik. Dengan demikian, di samping menjelaskan sifat ferromagnetik dapat pula dijelaskan nilai resistivitas dan panas jenis yang lebih tinggi daripada tembaga. Akhir-akhir ini telah dilakukan berbagai penelitian dalam bidang perilaku elektron unsur transisi dan dari sini dapat dijelaskan bahwa struktur besi agak berbeda dengan struktur cobalt atau nikel.

Ferromagnetisme, sama halnya dengan paramagnetisme yang berasal dari spin elektron. Akan tetapi pada bahan ferromagnetik, terjadi magnetisme permanen dan ini menandakan bahwa ada kecenderungan dari spin elektron untuk tetap berada dalam arah tertentu meski medan luar ditiadakan (**Gambar 3.49.(b)**). Ditinjau dari segi

struktur pita ini berarti bahwa setengah pita yang berkaitan dengan spin tertentu dengan sendirinya menyusut bila level kosong di atasnya diisi oleh elektron yang berasal dari bagian atas lainnya; perubahan energi potensial yang berkaitan dengan transfer ini disebut energi pertukaran. Hanya unsur besi, cobalt dan nikel dalam perioda panjang bersifat ferromagnetik pada temperatur ruang, gadolinium pada temperatur ruang ( $T_c=16\text{ }^\circ\text{C}$ ) dan mayoritas unsur lain mempunyai sifat paramagnetik yang kuat.

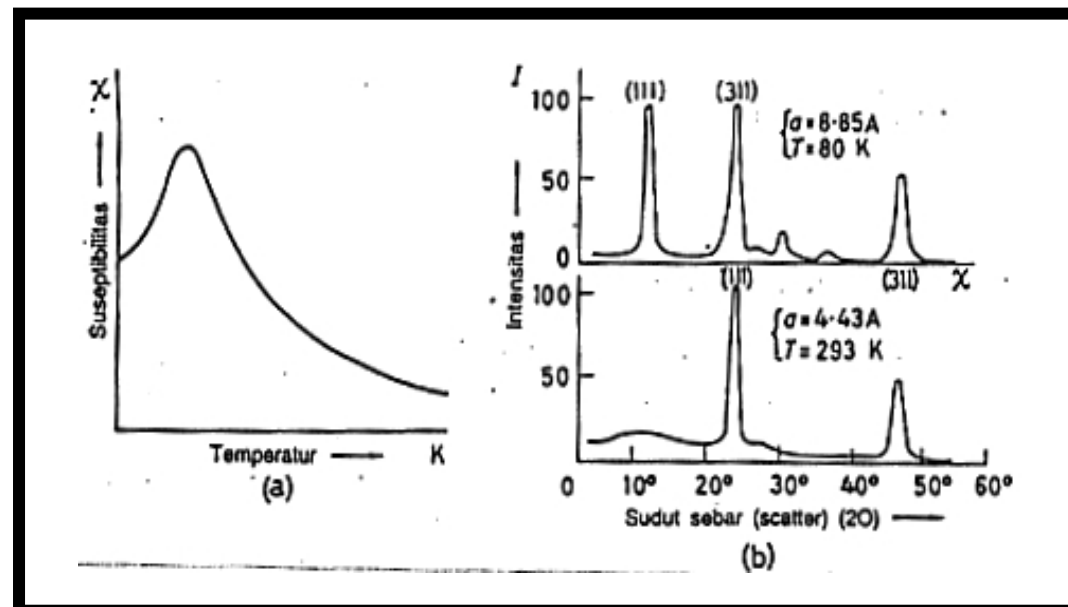
#### 3.3.4.3. Antiferromagnetisme dan Ferrimagnetisme

Di samping bahan diamagnetik, paramagnetik dan ferromagnetik yang biasa, dikenal pula bahan tertentu yang disebut anti-ferromagnetik; pada bahan ini momen atom yang berdekatan berada dalam arah yang berlawanan atau anti paralel. Sebagai contoh dapat dikemukakan oksida dan klorida logam transisi termasuk khromium dan mangan- $\gamma$  dan juga paduan tembaga-mangan. Beberapa ciri khas antiferromagnetisme mirip dengan ferromagnetisme sebagai berikut :

1. Umumnya, arah magnetisasi adalah paralel atau anti-paralel dengan sumbu kristalografi, pada MnI dan CoO momen dari ion  $\text{Mn}^{2+}$  dan  $\text{Co}^{2+}$  searah dengan sisi kubus sel satuan. Arah yang umum ini disebut arah antiferromagnetisme.
2. Tingkat tatanan antiferromagnetik rentang panjang berkurang secara teratur dengan naiknya temperatur dan menjadi nol pada temperatur kritis  $T_n$  yang disebut temperatur Neel; untuk antiferromagnetik ini adalah ekuivalen dengan temperatur Curie.
3. Domain antiferromagnetik adalah daerah dengan satu arah antiferromagnetisme; dan ini mungkin dipengaruhi oleh cacat dan regangan kisi.

Sifat karakteristik bahan antiferromagnetik ialah bahwa suseptibilitas  $\chi$  mempunyai nilai maksimum bergantung pada temperatur seperti diperlihatkan pada **Gambar 3.50.(a)**. Bila temperatur dinaikkan dari  $0\text{ }^\circ\text{K}$  interaksi yang menghasilkan spin yang anti-paralel menurun efektivitasnya sampai  $T_n$  di mana spin "bebas". Di atas temperatur ini bahan bersifat paramagnetik sehingga suseptibilitas berkurang dengan meningkatnya temperatur seperti biasa, sesuai dengan Hukum Curie-Weiss,  $\chi = \text{Konst.}/(T + \theta)$ , dimana  $\theta$  merupakan temperatur Neel.

Beberapa jenis bahan magnetik mempunyai sifat diantara bahan antiferromagnetik dan bahan ferromagnetik. Hal ini terjadi bila momen dalam arah tertentu tidak sama dengan momen dalam arah lainnya seperti yang dijumpai pada magnetit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , disini ion ferrous dan ferrit senyawa  $\text{FeOFe}_2\text{O}_3$  menduduki tempat tersendiri. Neel menyebut keadaan ini sebagai keadaan ferri-magnetisme dan bahannya disebut ferrit.



Gambar 3.50.

(a) Perubahan Suseptibilitas Magnetik dengan Temperatur untuk Bahan Anti ferromagnetik, (b) Pola Difraksi Neutron yang Berasal dari Serbuk Antiferromagnetik MnO (Atas) dan Temperatur Kritis untuk Penataan (Bawah)<sup>9)</sup>

### 3.4. Metallurgi pada Peralatan Pemboran Minyak dan Gas Bumi

Setelah kita mendapatkan gambaran tentang konsep-konsep metallurgi yang dilakukan terhadap logam, dibawah ini akan diberikan gambaran tentang perlakuan metallurgi terhadap peralatan-peralatan pemboran pada suatu proses pemboran minyak dan gas bumi.

Peralatan pemboran selalu menjadi suatu hal yang harus diperhatikan pada setiap proses pemboran minyak dan gas bumi dikarenakan keperluan akan penggunaan alat-alat tersebut adalah berumur sangat panjang, berkisar 20 tahun atau lebih. Dimana

perlu dicegah terjadinya kerusakan selama masa pemboran. Jika selama masa produksi peralatan tersebut mengalami kerusakan dan perlu untuk diganti, tentunya selain merugikan secara waktu (pemboran minyak dan gas bumi menjadi berhenti) juga diperlukan peralatan pengganti dan teknik penggantian dengan biaya yang tidak murah.

Pada bidang pemboran minyak dan gas bumi, peralatan yang digunakan akan berbeda antara peralatan bawah permukaan dan peralatan atas permukaan yang tergantung pada faktor lingkungan, tekanan, dan temperatur kerja.

Berbagai peralatan untuk pemboran minyak dan gas bumi menggunakan berbagai macam campuran baja. Metallurgi dari peralatan ini telah berevolusi selama beberapa tahun dan seringkali campuran itu belum ada didalam literatur atau-pun belum ada di pabrik. Pada sub-bab ini akan memberikan informasi pada peralatan-peralatan yang umum digunakan dalam rotary drilling seperti drill pipe, tool joints, drill collar, blowout preventer (BOP), Casing, Tubing, dan metallurgi pada bagian cone/kerucut pada bit.

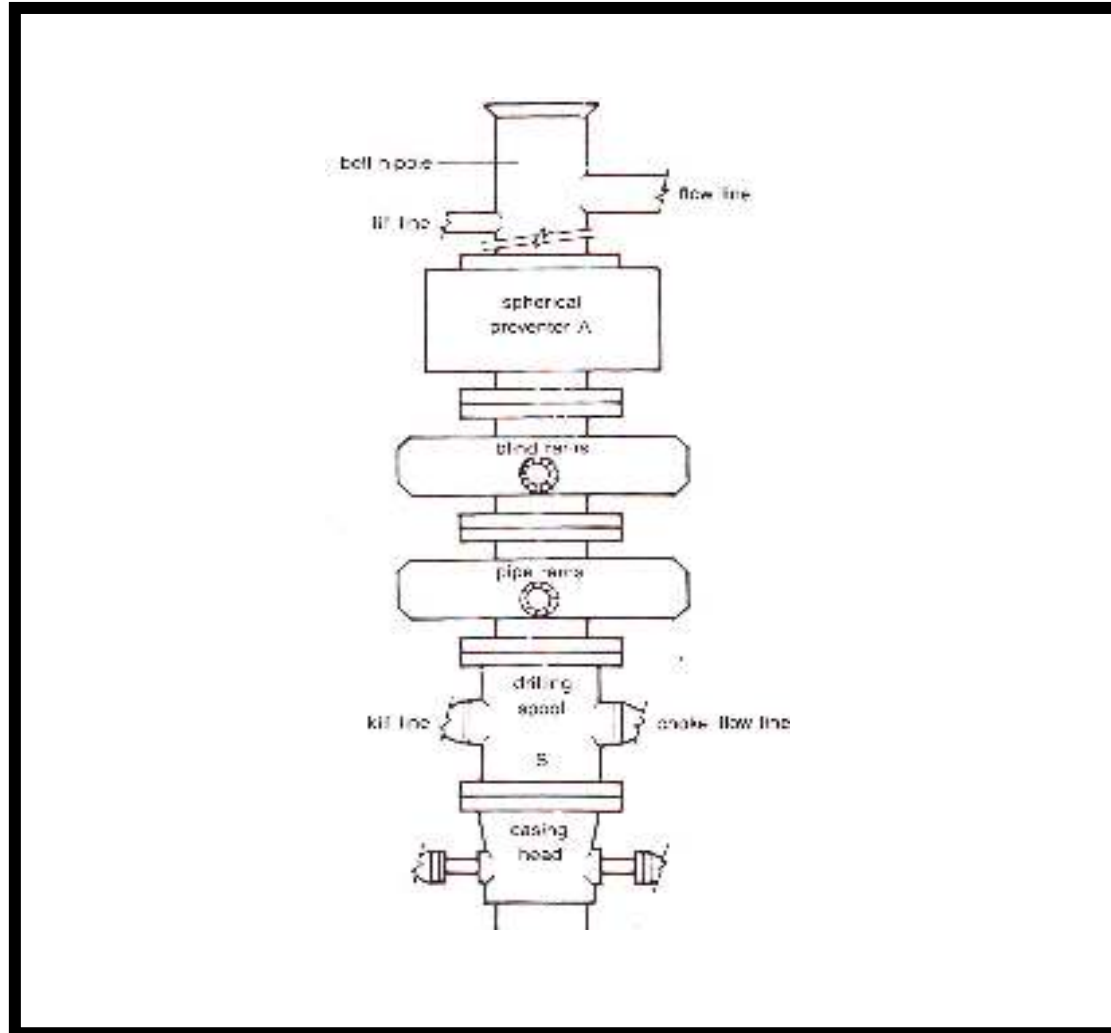
Meskipun diskusi ini dibatasi pada komponen-komponen ini saja namun masih menunjukkan preferensi material yang sangat luas bagi pabrikan. Karena itu, contoh-contoh yang ditampilkan tidak memberikan analisis yang lengkap dari semua campuran yang digunakan untuk alat-alat tersebut; namun lebih menunjukkan campuran yang umum digunakan dan beberapa alasan penggunaannya.

#### **3.4.1. Metallurgi Peralatan Pemboran**

Perhatian dalam peralatan pemboran adalah daya tahan terhadap tekanan dan retakan yang berkaitan dengan rekahan pada kondisi temperatur rendah pada peralatan permukaan, kelelahan komponen peralatan bawah permukaan, dan sulfide-stress cracking (SSC) pada peralatan permukaan dan bawah permukaan. Ukuran butir halus serta mikrostruktur martensitik yang bagus akan memberikan ketahanan yang terbaik terhadap rekahan dan memberikan ketahanan yang paling tinggi terhadap tekanan. Karenanya sebagian besar metallurgi peralatan dipilih berdasarkan fitur-fitur tersebut. Hal ini tentunya memerlukan kemampuan pengerasan komponen yang terkonstruksi dari bagian-bagian yang berat. Beberapa peralatan ini terkadang

memiliki ketebalan 6 inci atau lebih tebal dari sebuah tembok dan dengan berat beberapa ton. Oleh sebab itu, dapat digunakan baja campuran seri 4100 dan 4300 karena kemampuan pengerasannya yang baik, namun perlu untuk menjaga kandungan karbon serendah mungkin dari titik weldability karena mungkin sekali dilakukan beberapa perbaikan dengan cara mengelas pada sebagian besar komponen.

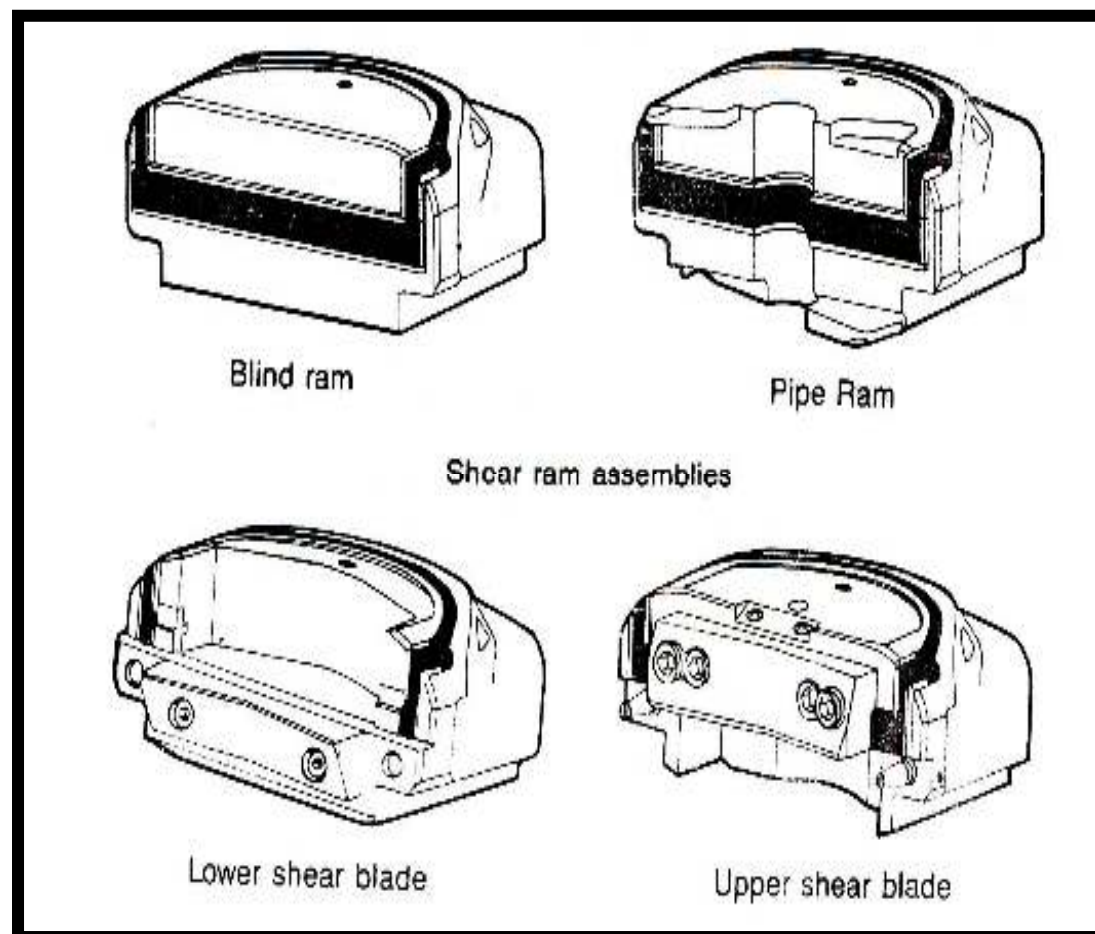
Pengatur tekanan di permukaan selama pemboran atau workover (kerja ulang) dilakukan dengan menggunakan blowout preventer (BOP). BOP stack terdiri dari spherical preventer, annular preventer, ram preventer, drilling spool dan casinghead.



**Gambar 3.51.**  
**Bagian-Bagian Peralatan BOP Stack pada Sistem Pemboran <sup>4)</sup>**

Spherical preventer menutup di sekitar bagian luar kelly, tool joint atau drillpipe didalam lubang bor serta dapat ditutup pada pemboran open hole. Penutupan itu diselesaikan dengan material elastomeric. Silinder operasi yang menggerakkan material penutup dibuat dari baja tempa 4130. Badan preventer biasanya ditempa dengan baja low-alloy seperti AISI-4130 atau 4140.

Ada tiga tipe dasar ram preventer: *shear ram*, *blind ram* dan *pipe ram*. Karena badan ram adalah universal, hanya saja ukurannya diubah-ubah untuk menyesuaikan dengan ukuran pipa yang sedang digunakan. Badan ram ini seringkali dibuat dengan tempaan low-alloy atau baja tipe 4130. Jenis-jenis ram ditunjukkan pada **Gambar 3.52**.



**Gambar 3.52.**  
**Blind Ram, Pipe Ram, dan Shear Rams <sup>4)</sup>**



Shear ram digunakan untuk memotong pipa sepenuhnya, menutup annulus dan drillpipe. Agar dapat melakukan pemotongan ini dengan cepat dan mudah, diperlukan tool joint berkekuatan tinggi (kekuatan tensile/ regang minimal 140.000 psi), mata pisau pemotong terbuat dari baja tipe 4340, 4140 atau 2 ¼ Cr-1 baja Mo yang ditempa sampai derajat kekerasan Rockwell C45. Blind ram digunakan untuk menutup lubang yang tidak ada pipa didalamnya, dan pipe ram menutup sekitar pipa pada lubang untuk mengisolasi annulus. Jika pemotongan tidak diperlukan pada ram ini, tingkat kekerasan itu dapat dikurangi namun masih harus melebihi persyaratan National Association of Corrosion Engineer (NACE) untuk ketahanan terhadap keretakan akibat tekanan sulfida. Piston-piston yang menggerakkan ram umumnya dibuat dari tempaan baja 4140 atau 4340.

**Tabel III-10.**  
**Jenis Material yang Digunakan Tergantung dari Tekanan Kerja Peralatan <sup>4)</sup>**

Part	Pressure Ratings (psi)					
	2000	3000	5000	10,000	15,000	20,000
Body	36K.45K.	36K. 45K.	36K. 45K.	36K. 45K.	45K. 60K.	60K. 75K
	60K. 75K.	60K. 75K.	60K. 75K.	60K. 75K.	75K.	
Integral End Connecton	60K	60K	60K	60K	75K	75K
Blind Flange	60K	60K	60K	60K	75K	75K
Blind Hub	60K	60K	60K	60K	75K	75K
(courtesy API)						

Material untuk komponen BOP yang berbeda ini ditetapkan oleh API dalam Spesifikasi API 16A "Peralatan Pemboran." Dan spesifikasi 6A "Peralatan Wellhead. **Tabel III-10** menunjukkan jenis material yang digunakan tergantung dari tekanan

kerja peralatan. Jenis-jenis material yang berbeda ditunjukkan pada **Tabel III-11**. Komposisi karbon dan baja low-alloy meliputi konstruksi alloy yang umum seperti 4130, 4140, 8620, 8630, dan 2 ¼ Cr-1 Mo. Stainless steel martensitik meliputi AISI 410, F6NM, CA6MN.

**Tabel III-11.**  
**Jenis-Jenis Material yang Berbeda <sup>4)</sup>**

Alloying Elements	Carbon and Low Alloy Steels	Martensitic Stainless Steels
	Composition Limits	Composition Limits
Carbon	0.45 Max	0.15 Max
Manganese	1.80 Max	1.00 Max
Silicon	1.00 Max	1.50 Max
Phosphorus	0.04 Max	0.04 Max
Sulfur	0.04 Max	0.04 Max
Nickel	1.00 Max	4.50 Max
Chromium	2.75 Max	11.0-14.0
Molybdenum	1.50 Max	1.00 Max
Vanadium	0.30 Max	NA

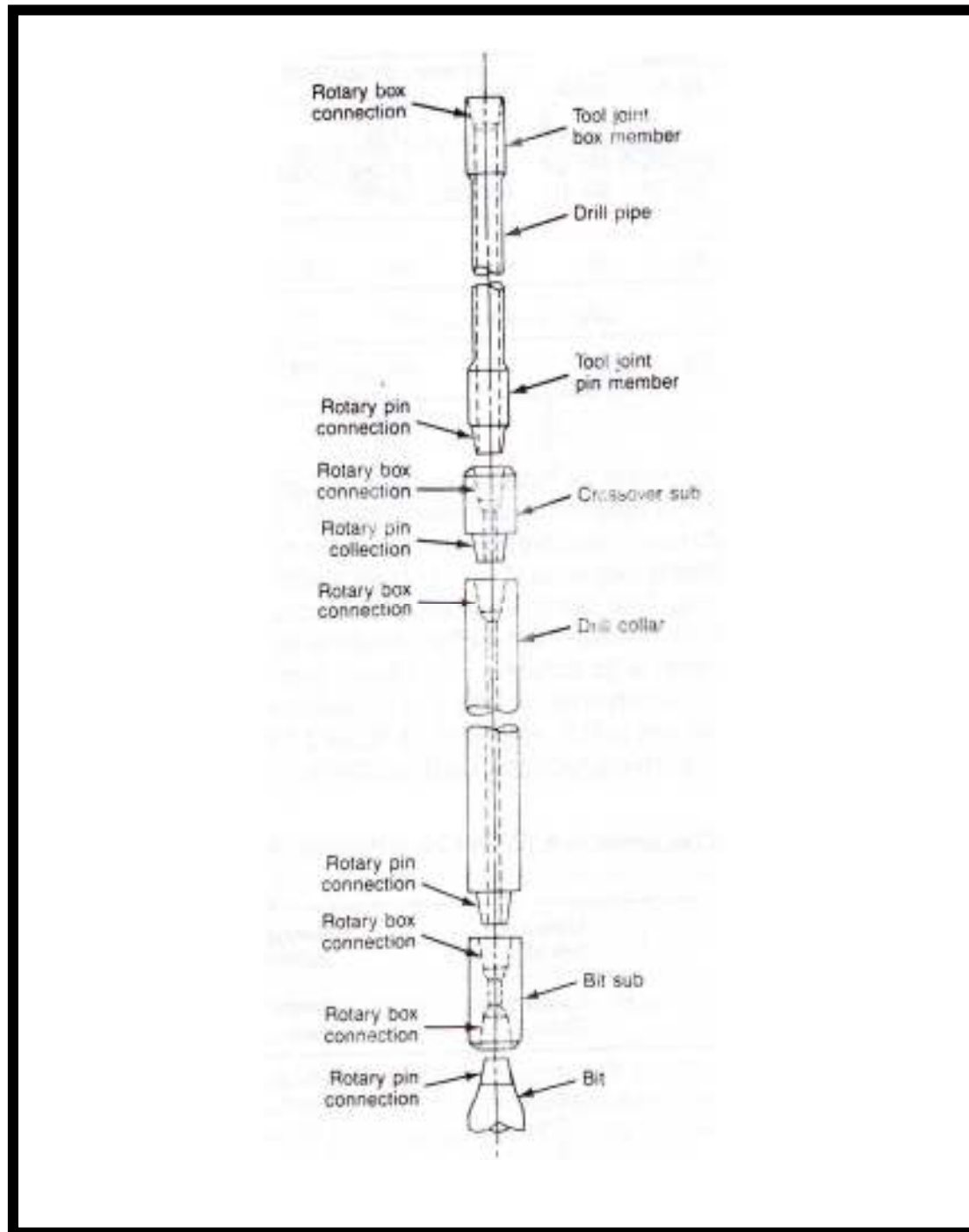
(courtesy API)

Pembautan pada preventer digunakan API Recommended Practice 53 dan tergantung dari jenis flange tipe 6B atau 6BX, sekrup dibuat dari ASTM A 194 grade 1 atau 2H. Pada kedua kasus tadi, baut yang digunakan dibuat dari ASTM A 193 grade B dan/atau A 354 grade BC.

Semua material BOP harus memiliki nilai minimal rata-rata charpy impact 15,0 ft-lb untuk susunan tiga specimen full-size, nilai minimal 10,0 lb-ft untuk satu susunan specimen. Pengguna perlu untuk menentukan temperatur yang digunakan -0 °F, -20 °F, -75 °F pada nilai yang harus dipenuhi.

Pada kondisi dimana lingkungan mengandung hydrogen sulfida, kekerasan maksimum preventer adalah HRC22, dan semua flange, dan baut harus dibuat dari

ASTM 193 grade B-7M dengan kekerasan HRC22 atau kurang dan sekrup dengan ASTM 194 grade 2M, sesuai dengan API RP53.



**Gambar 3.53.**  
**Tipikal Rangkaian Peralatan Drillstem <sup>4)</sup>**

API 6A juga membolehkan Monel K500 digunakan dalam kondisi hot-rolled dan age-hardened untuk memaksimalkan kekerasan HRC 35 dan ASTM A 453 grade 660 (A 286), dan age-hardened sampai maksimum HRC 35 untuk baut dan sekerup.

Flange dapat dibuat dari ASTM A 105, A 216-9Q, atau material API tipe 2 dan tipe 4.

Drilling spool dan casinghead sering dibuat dari API 5L, atau dari casing dengan API 5CT. Properti mekanik dari item (peralatan) ini seimbang dengan properti preventer dan casing. Kadang, casinghead dibuat dengan baja 4130 atau ASTM A 487-9Q dan ditempa pada lingkungan khusus seperti pada lingkungan hydrogen sulfida dan lingkungan bertemperatur rendah yang memerlukan properti khusus. Untuk lingkungan yang mengandung sulfida, kekerasan perlu diatur maksimal sampai HRC 22. Pada kondisi temperatur rendah, ketahanan terhadap takikan ditingkatkan dengan penempaan.

Drillstem, mungkin merupakan yang paling banyak dipelajari dalam pemboran. Tool joint, drill collar, subs, dan drillpipe menjadi dasar dari diskusi pada sub-bab ini. Bit tidak dibahas karena merupakan komponen yang sangat khusus dimana sangat sedikit pilihan material yang digunakan.

Tool joint adalah sambungan pada ujung drillpipe dan dibuat dengan penempaan (forging). Pada tool joint tersebut dilakukan heat-treated, yaitu ditempa dan dihaluskan, dilakukan *friction-welded*, *inertia-welded* atau *flash-welded* pada tubuh pipa. Pada friction welding dan inertia welding, pipa dibiarkan dalam kondisi diam, sedangkan tool joint diputar ke dalam pipa; kontak pressure (tekanan) itu akan menyebabkan elevasi suhu pada welding berikutnya. Pada flash-welding, pipa dan tool joint diam dan arus listrik dialirkan pada joint. Panas disebabkan tahanan listrik pada interface dan hasil welding. Setelah itu dilakukan treatment pemanasan post-weld pada zona welding untuk meningkatkan keseragaman struktur dan properti. Treatment panas/perlakuan panas ini dapat berupa pelepasan panas yang tinggi, atau dengan pemanasan induksi pada zona yang terpengaruh panas welding, liquid quench (biasanya menggunakan air), kemudian tempa induksi. Secara historisnya, welding semacam ini jarang sekali ditemukan kerusakan. Namun kerusakan pada welding tool joint telah diamati.

Material tool joint umumnya adalah baja low-alloy seri AISI 4100, biasanya 4135-4140, meski 4145 terkadang digunakan. Saat ini telah diperkenalkan baja seri 4100 dengan modifikasi molybdenum dan niobium dengan ketahanan yang lebih tinggi terhadap cracking pada lingkungan hydrogen sulfida. Tool joint umumnya dibuat sampai kekerasan 30-37 Rockwell C, dengan yield strength 120-150 ksi. Penempaan dilakukan selama 2 jam pada 1100-1200°F. API Specification 7 section 4, membutuhkan yield strength minimum 120.000 psi, kuat regang (tensile strength) 140.000 psi dan elongasi minimum 13% untuk semua tool joint baru dengan semua ukuran. Yield strength diukur dengan 0.2% metode offset dengan perbandingan 0,5% metode ekstensi yang digunakan untuk tubular. Sambungan kecil yang tidak memberikan pelepasan tensile-specimen yang mudah dapat dilakukan tes Brinell. Brinell Hardness Number (BHN) minimal 285 dapat digunakan untuk bagian box dan pin.

Drill collar dibuat dari baja 4135-4140 atau 4145 sampai range kekerasan BHN 285-341. Drill collar digunakan sebagai pemberat rangkaian dan untuk membuat rangkaian tetap regang sehingga efek kelelahan minimal. Kekuatan regang minimal drill collar pada API specification 7 untuk OD 3 1/8 in – 6 7/8 in. Yield strength 110.000 psi, kuat regang 140.000 psi dan elongasi 13%; untuk OD collar 7-10 I, yield strength 100.000 psi, kuat regang 135.000 psi dan elongasi minimal 13%. Sama dengan tool joint, yield strength diukur dengan 0,2% metode offset.

Drill-collar non-magnetic dipasang pada rangkaian selama pemboran direksional untuk menentukan lokasi aktual bit dan string. Collar ini dibuat dari berbagai macam logam alloy, yang paling umum adalah Monel K500, stainless steel 316L, stainless steel austenitic lainnya dan tembaga berilium. Collar dari stainless steel mengalami kerusakan pada lingkungan pemboran dengan klorida stress-corrosion, kerusakan disebabkan oleh stress residual dari pabrik atau sensitifisasi collar. Juga perlu berhati-hati apabila menggunakan collar stainless steel austenitic pada fluida pemboran hot-brine.

Drilling jar, stabilizer, sub dan core barrel dibuat dari baja 4140 atau 4145, dan dilakukan heat-treated seperti pada drill collar dan tool joint. Kadang baja AISI

4340 atau 4340H digunakan untuk metallurginya dan ditempa sampai tingkat kekerasan yang sama.

Drillpipe adalah bagian terakhir dari drillstem yang disebutkan disini, namun sebenarnya masih jauh dari kenyataannya. Pada hubungannya dengan penelitian dan pembuatan, komponen ini merepresentasikan komponen yang paling sering dipelajari dan merupakan area dengan permasalahan paling banyak dalam pemboran.

Berbagai grade drillpipe menurut API, ditunjukkan **Tabel III-12**. Baja yang digunakan untuk drillpipe adalah C-Mn atau Cr-Mo, yang belakangan adalah baja seri 4100. Untuk tingkat yang lebih rendah digunakan aluminium yang biasanya tipe 2014, aluminium-copper alloy. Baja ini dibuat pada kondisi normal dan penempaan atau kondisi quenched dan penempaan, sedangkan aluminium dilakukan heat-treated pada kondisi T6.

**Tabel III-12.**  
**Berbagai Grade Drillpipe Menurut API <sup>4)</sup>**

Grade	Yield Strength, ksi (MPa)		Tensile Strength, ksi (MPa)	Chemistry %		Heat Treatment**
	min.	max.	min.	P (max.)	S (max.)	
E	75 (517)	105 (724)	100 (689)	0.030	0.030	Heat Treated
X-95	95 (655)	125 (862)	105 (724)	0.030	0.030	Q&T/N&T
G-105	105 (724)	135 (931)	115 (793)	0.030	0.030	Q&T/N&T
S-135	135 (931)	165 (1,138)	145 (1,000)	0.030	0.030	Q&T/N&T

\* Elongation requirements depend on pipe thickness and therefore are not shown  
 \*\* Q&T — quenched and tempered  
 N&T — normalized and tempered  
 (From API Specification 5D)

Menurut persyaratan API specification 5D, drillpipe hanya berupa pipa tanpa kelim, dan harus dilakukan heat-treated (perlakuan panas) sepanjang pipa itu, atau dilakukan heat-treated ulang jika terganggu. Perlakuan panas untuk seri drillpipe berkekuatan tinggi ditetapkan untuk pembuatan pada kondisi normal dan penempaan

atau kondisi quenched dan penempaan. Satu-satunya komposisi kimia yang dibutuhkan adalah fosfor dan belerang yang tidak melebihi 0,030%.

Drillpipe grade E yang dinormalisasi dan ditempa memiliki unsur kimia yang serupa dengan baja 1041 atau 1045 yaitu mengandung 1,5% Mn dan 0,2% Mo. Grade G dan S biasanya ditempa dan di-quenching. Grade X dinormalisasi dan tempa serta memiliki range kimia 0,2-0,3% C, 1,2 – 1,5% Mn, 0,4-0,6% Cr dan 0,2-0,5% Mo. Grade G memiliki komposisi kimia sama dengan X, sedangkan S-135 biasanya mengandung 0,27-0,35% C, 1,5 – 1,6% Mn, 0,1-0,5% Cr, 0,3-0,4 % Mo dan 0,012-0,016% V. Drillpipe tebal dibuat dari baja tempa 4140 dan 4145. Kekerasan Rockwell C pada berbagai grade memiliki range 20-28 untuk grade E, 27-30 untuk X-95, 30-34 untuk grade G, dan 34-37 untuk S-135.

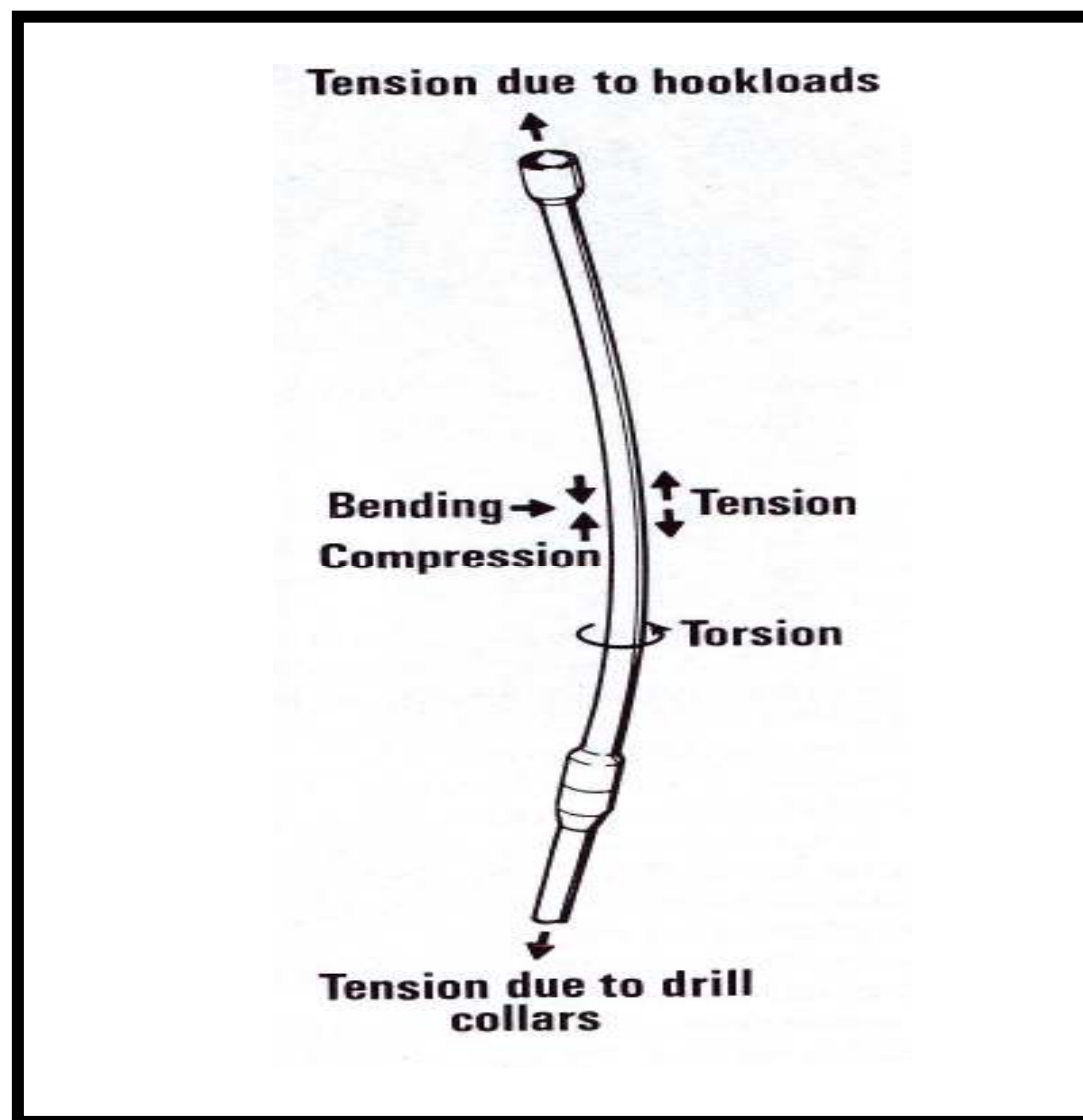
Drillpipe aluminium biasanya dibuat dari aluminium tipe 2014, yang memiliki komposisi 0,5-1,2% Si, maksimal Fe 1%, 3,9-5,0% Cu, 0,4-1,2% Mn, 0,2-0,8% Mg, Cr maksimal 0,10%, maksimal Zn 0,25% dan Ti maksimal 0,05%. properti mekanik khusus ketika dilakukan heat-treated pada kondisi T6 adalah tensile strength 64 ksi, yield strength 58 ksi, elongasi 7% dan BHN 135. Drillpipe aluminium biasanya dipasangkan dengan tool joint baja untuk memastikan kekuatan sambungan maksimum yang tidak dapat dicapai jika menggunakan tool joint aluminium.

#### **3.4.2. Penyebab dan Pencegahan Kerusakan Peralatan Pemboran**

Laporan di literatur mengenai kerusakan BOP sangat jarang, mungkin dikarenakan dua alasan. *Pertama*, karena unit ini merepresentasikan metode utama dari pencegahan kemungkinan blowout dengan kick yang tidak terkontrol pada sebuah sumur, maka alat ini dirancang secara lebih detail dan memiliki integritas struktural yang baik. *Kedua*, sedikit kerusakan yang terjadi pada peralatan permukaan dibandingkan pada drillstem. Namun masih dilaporkan adanya sulfide stress cracking (SSC) dan kerapuhan pada baut blowout preventer. Sebagian besar dikarenakan tidak masuk pada spesifikasi yang disyaratkan API dan NACE.

Tool joint dan drillpipe merepresentasikan area dengan konsentrasi paling tinggi pada beberapa dekade lalu, dan karenanya lebih banyak diketahui dan

terdokumentasi perilakunya. Karya ilmiah pertama mengenai subjek ini ditulis oleh *R.S Grant* dan *H. G. Texter*. Karya ini terakhir kali direvisi pada 1948. Tidak ada kerja komprehensif yang lain dari subjek ini semenjak karya tersebut dipublikasikan. Untuk memperkenalkan subjek multi-segi ini, hanya kerusakan mekanik saja yang akan dibahas sebelum memasuki kondisi pemboran yang sebenarnya.



**Gambar 3.54.**  
**Tekanan pada Drillstring yang Berputar <sup>4)</sup>**

Tekanan pada drillstring yang berputar pada saat pemboran sering terjadi pada lubang-lubang yang membelok pada dasarnya adalah empat, tiga diantaranya

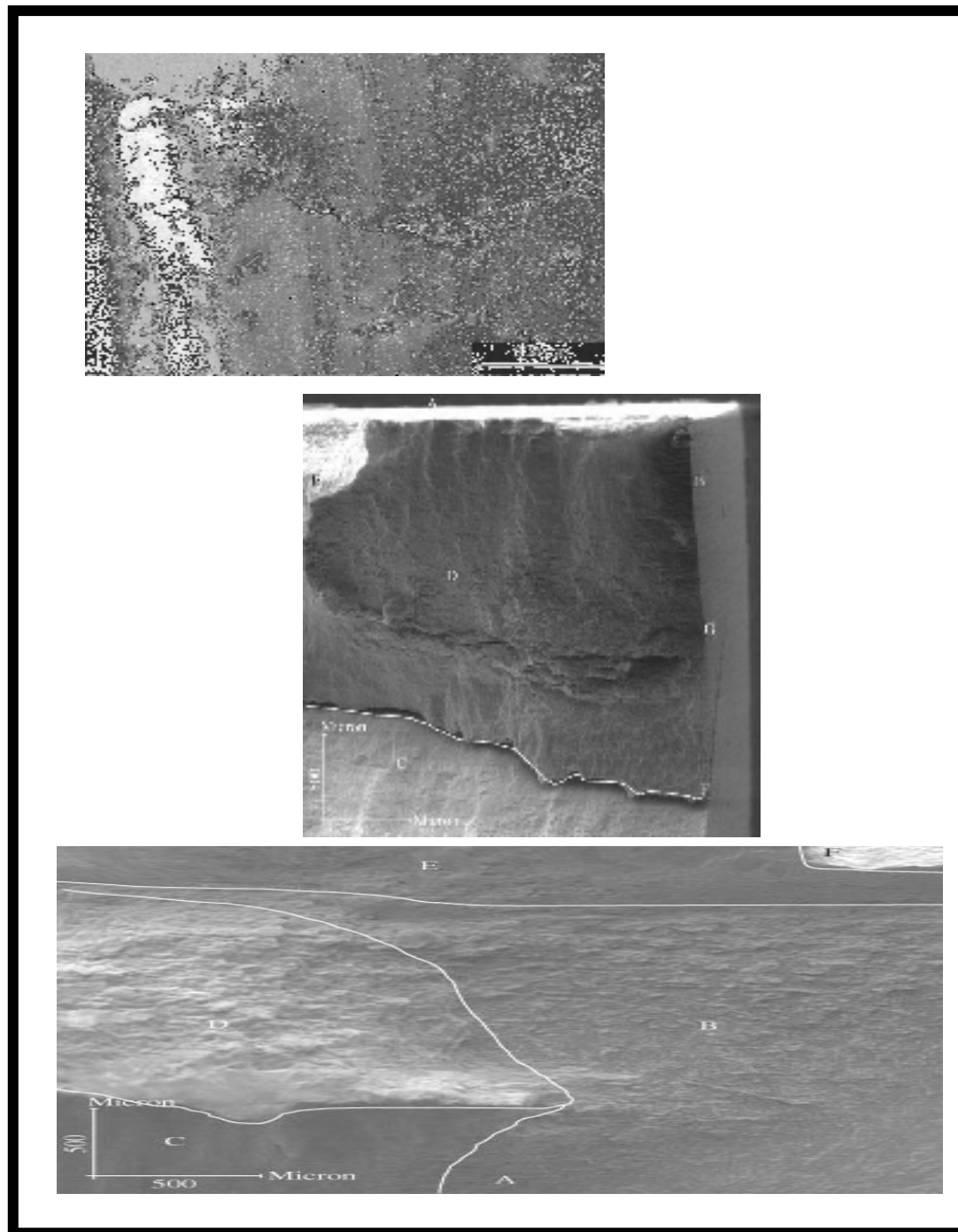


ditunjukkan secara sistematis pada **Gambar 3.54** yaitu tension load yang disebabkan oleh beban hook (berat pipa) dan dari drill collar didasar lubang. Semuanya tergantung dari jumlah drill collar yang digunakan, dan berat dari lumpur pemboran, dimana akan memberikan daya apung pada rangkaian pipa, sebagian dari drillstring akan berada dalam kompresi. Titik dimana terjadi perubahan pada rangkaian dari tension/regangan ke kompresi disebut "*titik netral*". Karena membor dalam kompresi akan mengurangi umur rangkaian lebih cepat daripada membor dalam keadaan tension/teregang, maka berat drill collar dirancang untuk memindahkan titik netral serendah mungkin dalam lubang, sehingga akan menyebabkan sebagian besar rangkaian pada kondisi regang/tension. Pengendalian tekanan yang disebabkan saat membor pada lubang yang berbelok akan menyebabkan kompresi dan tension siklis pada saat pipa berputar sehingga akan merubah dua kondisi tekanan tadi. Yang terakhir adalah tekanan torsional yang disebabkan oleh perputaran pipa ketika bit menembus batuan. Tekanan yang keempat ditunjukkan pada **Gambar 3.54**, yang disebabkan oleh getaran drillstem. Tekanan ini sulit untuk diukur dan sangat kompleks. Analisis getaran diluar lingkup buku ini, namun tekanan ini diperkirakan menjadi penyebab dari sangat sedikit kerusakan.

Twist-off adalah kerusakan mekanik pada pipa dalam torsi yang disebabkan karena pemberian tekanan yang berlebihan pada pipa, namun istilah ini sering sekali digunakan dengan salah untuk beberapa kerusakan drillpipe yang menyebabkan keretakan yang parah pada pipa. Twist-off biasanya digunakan untuk menggambarkan kerusakan akibat kelelahan pipa. Kerusakan torsional jarang terjadi namun akan terjadi jika pipa terjepit dan rotary table terus berputar.

Kerusakan yang lebih sering terjadi daripada twist-off adalah kerusakan tensile (regang). Kerusakan ini terjadi ketika pipa ditarik menjadi dua karena kelebihan tekanan pada pipa itu. Hal ini sering terjadi ketika pipa terjepit pada lubang dan pekerja pemboran berusaha untuk menarik pipa tersebut tanpa melakukan monitoring pada indikator berat. Kerusakan tegangan (tension) dapat diatasi dengan mudah dengan necking down (menurunkan) pada titik dimana terjadi gangguan. Pada retakan itu akan dilakukan pengelangan dan akan menghasilkan sudut 45° di

sepanjang permukaan. OD pipa di dekat retakan juga dikurangi. Kenampakan ini ditunjukkan pada **Gambar 3.55**.



**Gambar 3.55.**  
**Retakan Akibat Kelelahan pada Pipa dengan Arah Melintang <sup>4)</sup>**

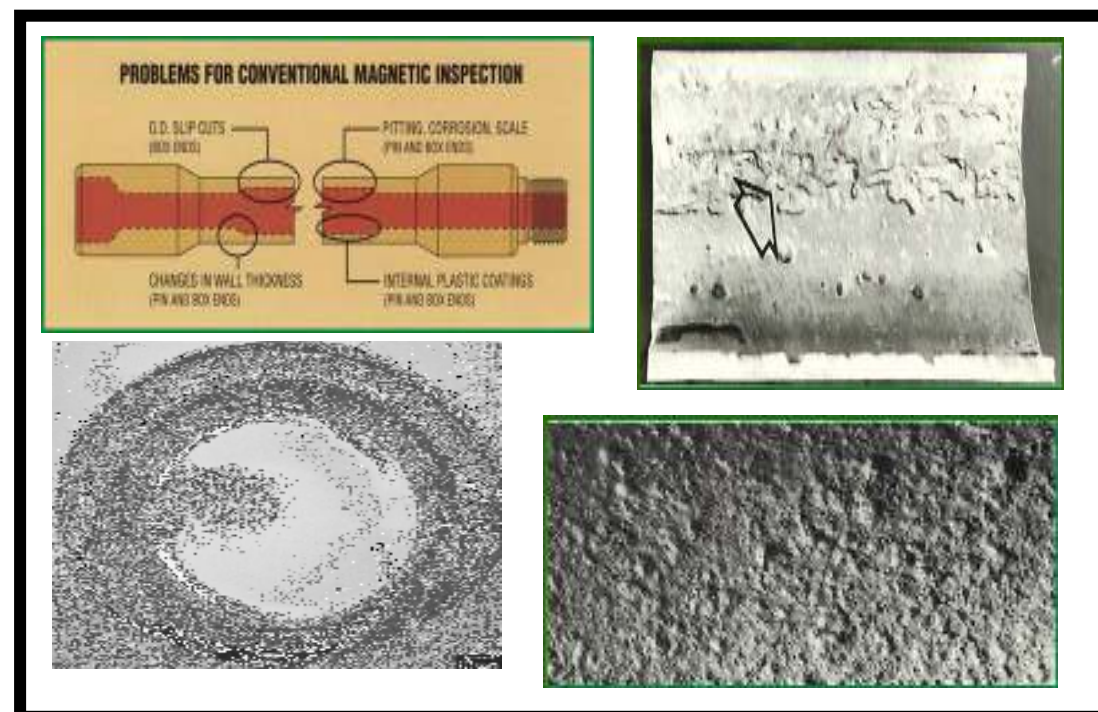
Kelelahan adalah kerusakan yang paling umum pada drillpipe dan disebut dengan *washout* atau *twist-off* di lapangan, tergantung dari kenampakan kerusakan itu. Retakan akibat kelelahan pada pipa pada arah melintang, menyebabkan fluida pemboran merembes ke dinding dan memotong lubang yang disebut washout. **Gambar 3.56** menunjukkan contoh washout pada drillpipe dilihat dari arah dalam permukaan. Jika retakan meluas dengan cepat dan pipa terpotong, kerusakan itu disebut twist-off (**Gambar 3.57**). Kedua istilah tadi sebenarnya tidak cocok namun telah menjadi sesuatu hal yang biasa terjadi pada lapangan minyak, namun pada kenyataannya keduanya disebabkan oleh karena kelelahan pipa. Saat ini telah ditunjukkan bahwa salah satu penyebab utama mengapa pada drillpipe terjadi washout adalah dikarenakan kekuatan retakan. Kekuatan retakan yang besar diukur menggunakan charpy impact akan menyebabkan washout, sedangkan kekuatan retakan yang kecil menyebabkan twist-off. **Gambar 3.58** menunjukkan charpy impact data dari contoh lapangan untuk tool joint, grade E dan X. Ditentukan dari penelitian ini, nilai charpy impact 40 ft-lbs pada 75°F sudah mencukupi untuk mencegah twist-off. Keuntungan dari washout daripada twist-off adalah waktu yang lebih singkat yang dibutuhkan untuk menarik rangkaian dibandingkan untuk melakukan fishing pada twist-off.



**Gambar 3.56.**  
**Washout pada Drillpipe <sup>4)</sup>**

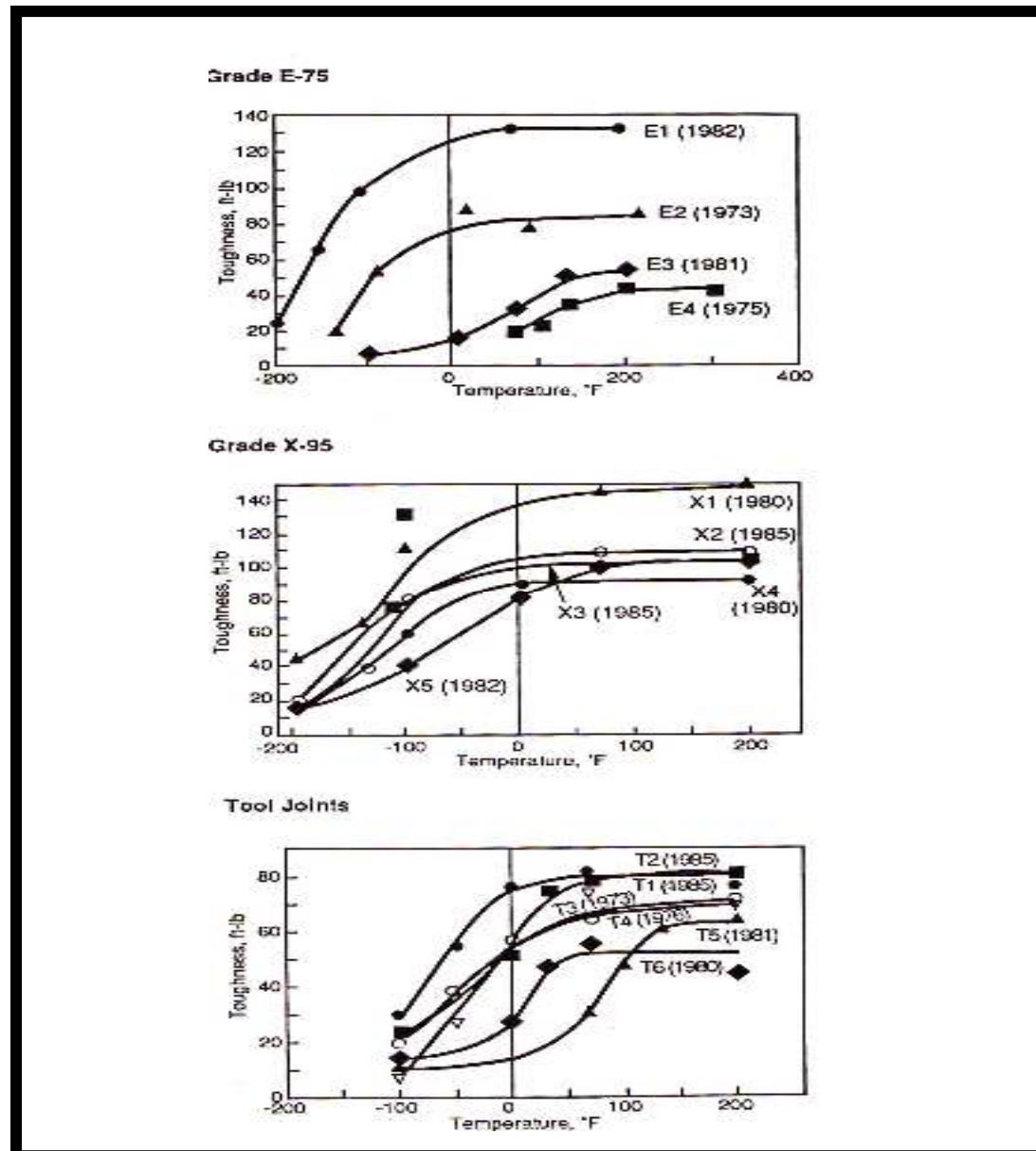
Terdapat tiga jenis kelelahan (fatigue): *pure fatigue*, *notch fatigue* dan *corrosion fatigue*. Ketiga jenis fatigue ini tidak dibedakan karena *corrosion fatigue* mengawali terjadinya lubang yang menjadi permulaan dari *notch fatigue*. Selanjutnya, perlu kita ketahui bahwa *pure fatigue* dimulai dari adanya lubang kecil (micronotch) pada logam. Untuk lebih jelasnya, masing-masing tipe tersebut akan diberikan keterangannya.

**Pure fatigue** tidak terjadi pada setiap alat di suatu lapangan minyak. Yang harus diingat adalah kerusakan akibat fatigue adalah kerusakan kumulatif, dan semua pipa akan terlihat baik sampai beberapa lubang yang mengawali terjadinya retakan dan kerusakan. Kenyataannya, seperti yang disebutkan Grant dan Texter, drillpipe berputar pada 100 rpm hanya untuk 10 hari berarti telah melakukan putaran 100 kali. Dan pada pemboran dalam waktu yang diperlukan bisa sampai berbulan-bulan atau bahkan lebih dari 1 tahun, yang akan membebankan ribuan siklus tekanan pada drillstring.



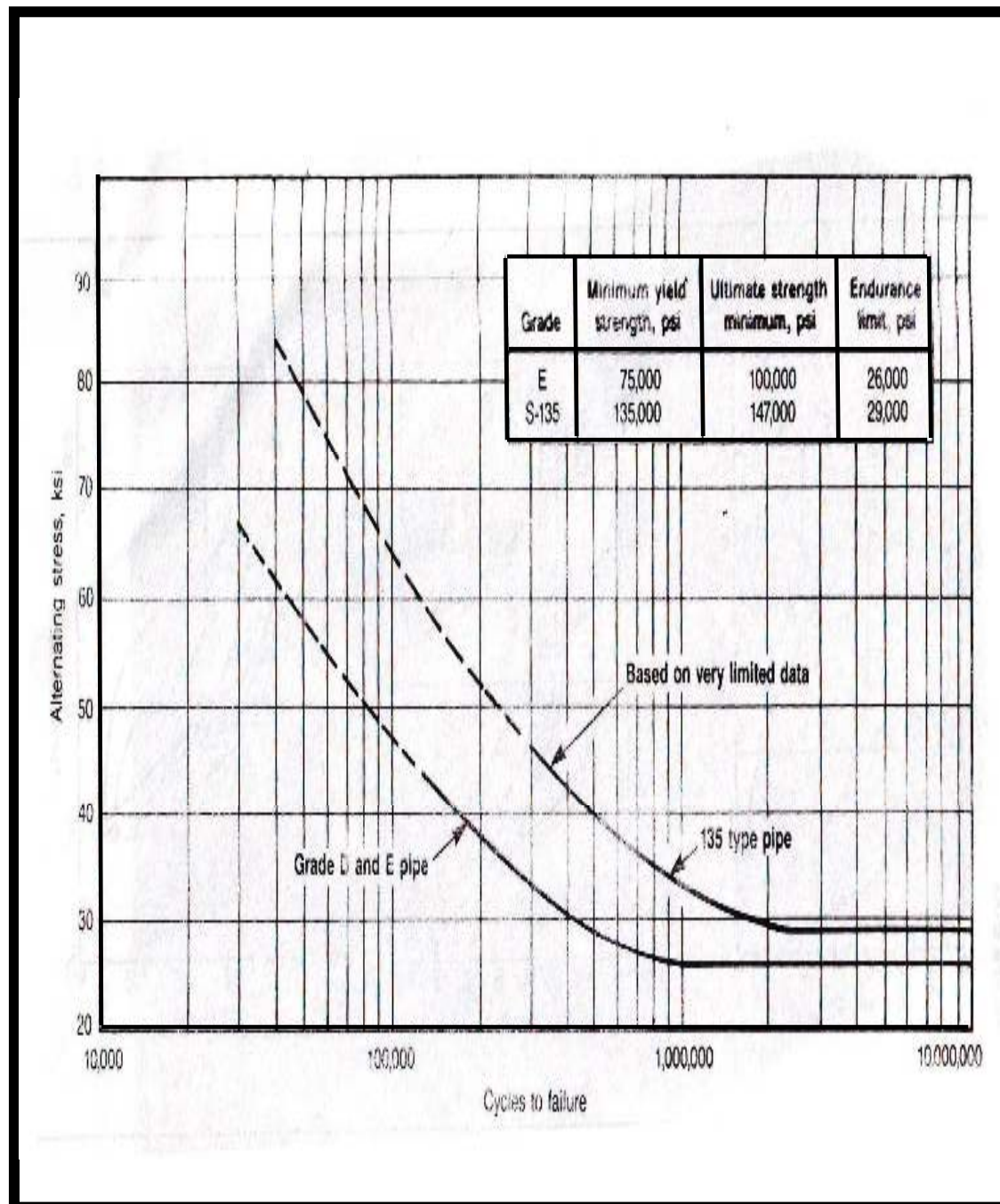
**Gambar 3.57.**  
**Corrosion Fatigue Failure (Twist-Off) pada Peralatan Drillpipe yang  
 Disebabkan oleh Internal Pitting <sup>4)</sup>**

Batas kelelahan atau ketahanan yang dipergunakan sebagai aturan dari pengalaman-pengalaman yang ada adalah sebesar  $\frac{1}{2}$  kekuatan tensile (regang). Biasanya meningkatkan kekuatan dari sebuah komponen yang akan meningkatkan kekuatan terhadap kelelahan. **Gambar 3.59** menunjukkan hal ini adalah benar, namun tidak terlalu signifikan dalam prakteknya.



**Gambar 3.58.**  
Grafik dari Charpy Impact Grade E dan X pada Drillpipe dan Tool Joints <sup>4)</sup>

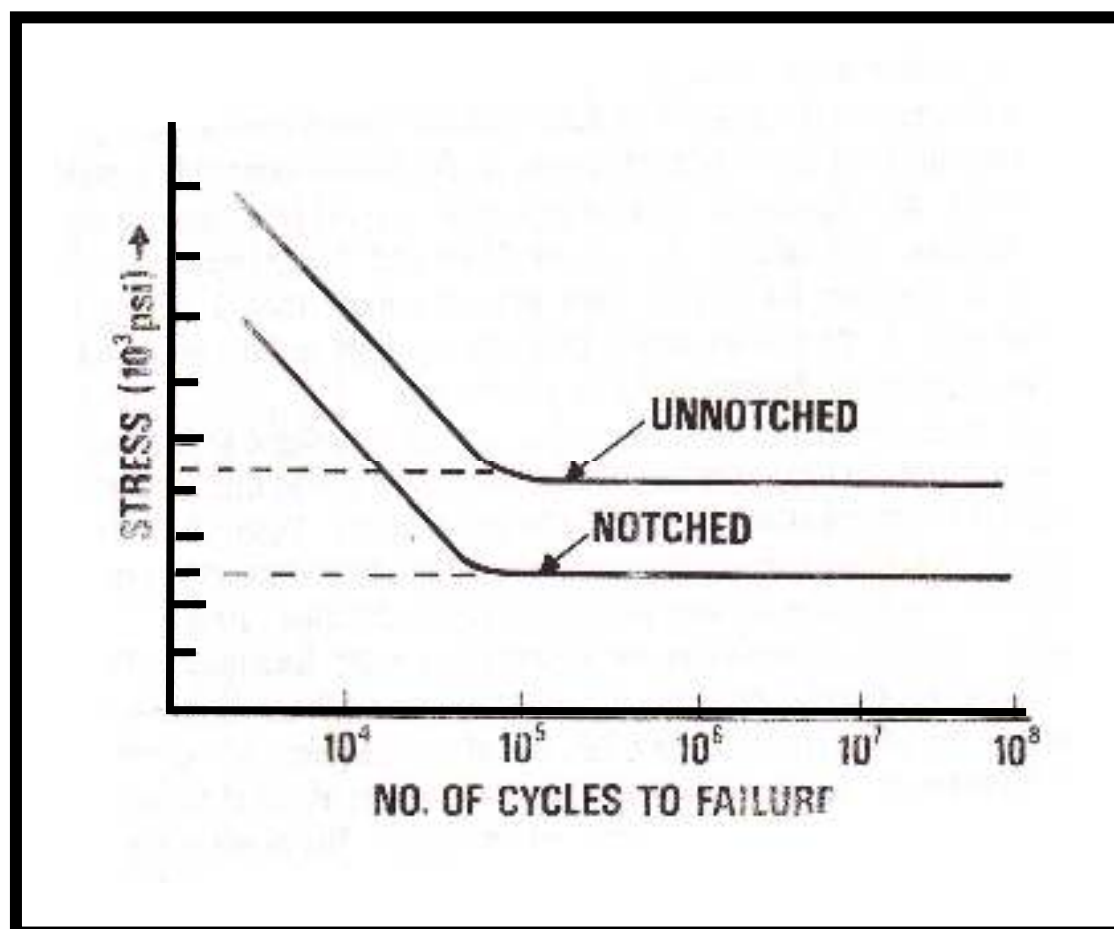
Kekuatan regang meningkat hampir 50%, sedangkan batas ketahanannya hanya meningkat sekitar 10%.



**Gambar 3.59.**  
**Grafik dari Charpy Impact Grade E dan X pada Drillpipe dan Tool Joints <sup>4)</sup>**

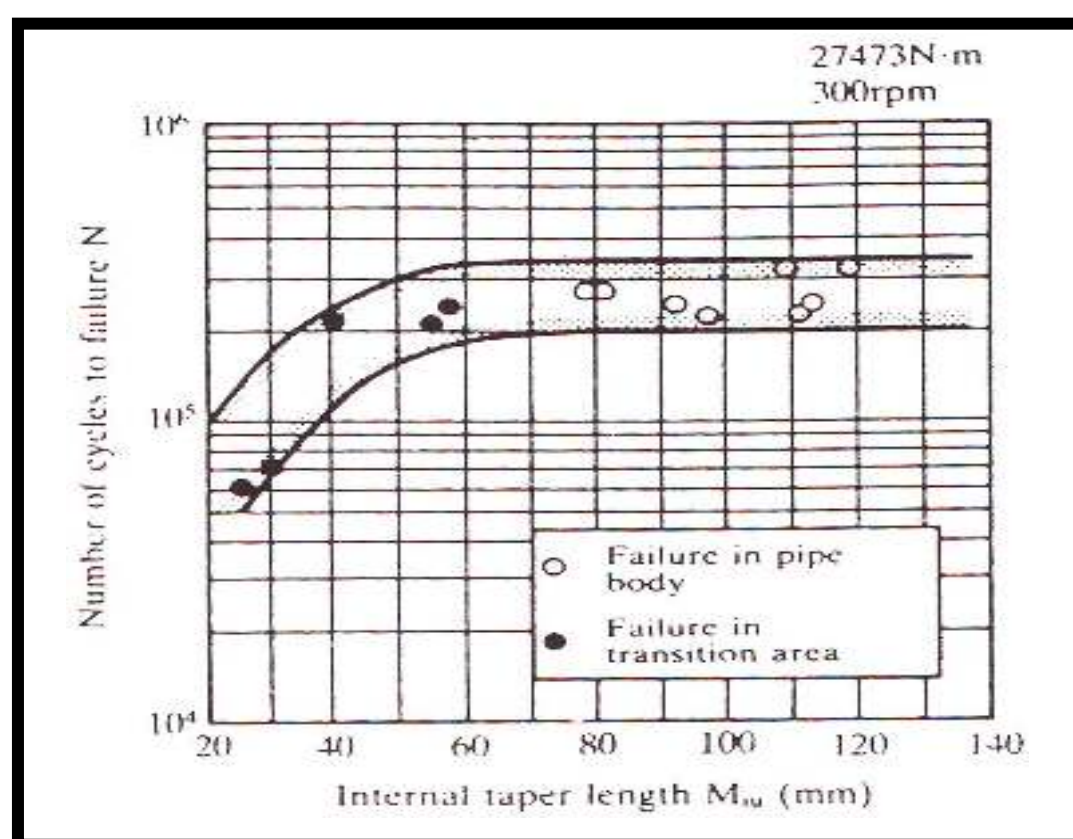


Kekuatan fatigue akan dikurangi jika ada lubang seperti pada **Gambar 3.60**. Lubang-lubang tersebut akan meningkatkan tekanan secara lokal, dan seringkali tekanan tersebut diatas yield strength material. Efek dari lubang tersebut merupakan fungsi dari ketajamannya dan orientasinya pada tekanan yang digunakan. Lubang yang lebih dalam dapat meningkatkan tekanan pada dasar lubang, membuat awalan retakan yang lebih mudah. Kedalaman dari lubang juga merupakan faktor yang mempengaruhi kelangsungan kelelahan, karena semakin dalam lubang maka akan secara signifikan mengurangi kelangsungan kelelahan dibandingkan pada lubang yang dangkal. Tergelincir atau terjepit adalah penyebab terjadinya lubang dan yang paling sering terjadi pada drillpipe dan akan menyebabkan kerusakan kelelahan, dan semuanya bermula dari permukaan luar pipa menuju ke dasar lubang.



**Gambar 3.60.**  
**Pengaruh Ketahanan Kekuatan Fatigue pada Baja <sup>4)</sup>**

Serupa halnya dengan terjadinya lubang, perubahan yang cepat antar bagian dari satu bagian yang berat ke bagian yang tipis dapat menyebabkan menurunnya umur kelelahan. Banyak kerusakan drillpipe terjadi pada industri pemboran pada pertengahan 1980 tanpa ada alasan jelas. Kerusakan kelelahan diawali pada area transisi dari upset internal dimana drillpipe melakukan transisi dari upset tool joint (bagian yang berat) ke drillpipe (bagian yang tipis). Penelitian selanjutnya menyatakan bahwa internal taper yang pendek  $M_{iu}$ , akan menurunkan umur kelelahan sedangkan taper yang panjang akan memperpanjang umur kelelahan. Karenanya dibutuhkan permodelan elemen dan pengujian kelelahan yang diperlukan untuk menentukan panjang optimum  $M_{iu}$  untuk setiap ukuran drillpipe, **Gambar 3.61** menunjukkan keuntungan dari penggunaan panjang internal upset yang tepat pada umur kelelahan pipa 5 inch IEU, 19,5 pon per feet grade E.



**Gambar 3.61.**  
Keuntungan dari Penggunaan Panjang Internal Upset yang Tepat pada Umur Kelelahan Pipa 5 inch IEU, 19,5 pon per feet Grade E <sup>4)</sup>



Kelelahan akibat korosi adalah penyebab utama dari kerusakan drillpipe. Kerusakan ini disebabkan oleh adanya efek kombinasi lubang-lubang yang disebabkan oleh korosi, yang menjadi pusat-pusat tekanan, dan kelelahan material yang juga didorong oleh lingkungan yang korosif. Seperti pada **Gambar 3.48** pada lingkungan korosif, kurva S-N memiliki slope yang berbeda dengan batas ketahanan dan kerusakan dimana akan terjadi ketika jumlah yang dibutuhkan untuk siklus tersebut tercapai. Seperti pada kasus *notch fatigue*, semakin tajam/dalamnya dasar lubang, maka semakin besar konsentrasi tekanan dan semakin pendek umur kelelahan material. Hal ini memperkuat konsep bahwa kelelahan korosi seringkali terjadi pada lingkungan yang berlubang. Karena adanya oksigen terlarut, klorida, hydrogen sulfide, dan karbon dioksida, semuanya dapat menyebabkan lubang, maka mudah dimengerti mengapa drillpipe dapat rusak karena mekanisme ini. Pada **Tabel III-13** Grant dan Texter menunjukkan contoh-contoh drillpipe yang diuji terhadap kelelahan, jumlah siklus terhadap kerusakan akan semakin berkurang dengan semakin meningkatnya dan kerasnya kondisi lingkungan. Tinjauan lain dari efek lingkungan ini ditunjukkan pada **Tabel III-14** yang berasal dari tulisan Mehdizadeh dimana melibatkan gas terlarut dalam air asin yang mempengaruhi kelelahan.

**Tabel III-13.**  
**Corrosion Fatigue pada Drillpipe <sup>4)</sup>**

Average Maximum Stress (psi)	Medium	Cycles to Failure (10 <sup>6</sup> )
31,500	Noncorrosive (air or distilled water)	2.20
31,500	Mildly corrosive (saltwater)	1.43
31,500	Corrosive (magnesium chloride)	0.86
31,500	Very corrosive (dilute HCl acid)	0.18

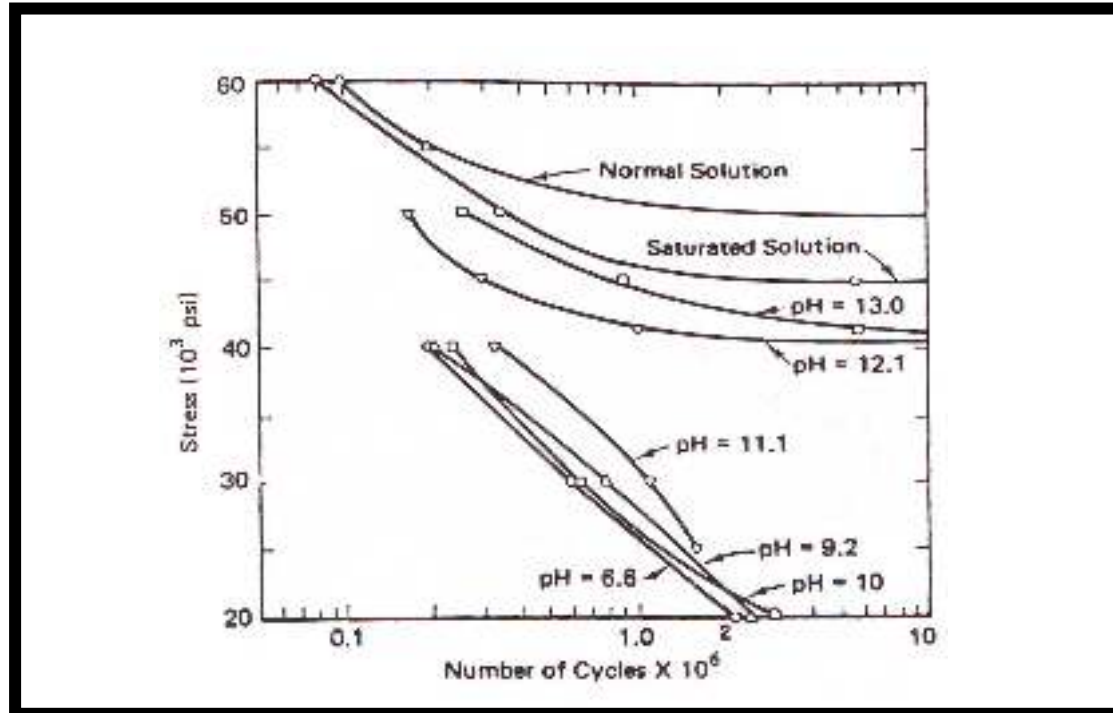
**Tabel III-14.**  
**Corrosion Fatigue pada Drillpipe <sup>4)</sup>**

Dissolved Gas In Saltwater	% Decrease from Air Endurance Limit
H <sub>2</sub> S	20
CO <sub>2</sub>	41
CO <sub>2</sub> + Air	41
H <sub>2</sub> S + Air	48
H <sub>2</sub> S + CO <sub>2</sub>	62
Aerated saltwater	65

Sebagaimana didiskusikan sebelumnya, contoh kelelahan korosi ditunjukkan pada **Gambar 3.57**. Permukaan yang panjang, datar di puncak pipa adalah tempat dimana retakan terjadi. Retakan itu diawali dengan adanya lubang besar di dalam permukaan pada pusat retakan. Setelah cukup banyak retakan pada pipa, bagian yang tersisa tidak cukup untuk mendukung beban regang (tensile load), jadi retakan terakhir pada pipa akan disebabkan oleh kelebihan beban regang. Retakan lelah yang serupa dapat terjadi dari luar jika korosi atau erosi dari cutting dalam lumpur dapat menyebabkan pitting yang akan menjadi awal dari retakan.

Keuntungan terbesar dalam pemboran untuk produksi minyak adalah dapat merubah lingkungan (yaitu dengan lumpur pemboran) dan mengurangi potensi permasalahan yang disebabkan oleh lingkungan. Dengan menggunakan inhibitor kimia dan scavenger, korosi dapat dikurangi, dan dapat pula meningkatkan umur kelelahan drillstring. Seringkali, kontrol pH yang sederhana dapat meningkatkan umur penggunaan drillstring. Peningkatan menggunakan pH ini ditunjukkan pada **Gambar 3.62**. Menaikan pH dari 6,6 yang merupakan karakteristik dari sebagian

besar air formasi menjadi 12,1 dan 13,0 serta mengembalikan threshold atau menguatkan batas ketahanan pipa pada larutan aerasi air asin. Dengan membuang oksigen terlarut dalam lumpur pemboran, pH 10 – 11 cukup untuk menaikkan umur lelah pipa.



**Gambar 3.62.**  
**Pengaruh pH pada Corrosion Fatigue di dalam Aerated Saltwater <sup>4)</sup>**

Saat ini, secara esensial tidak ada solusi untuk kelelahan korosi. Cara yang lazim digunakan adalah pelapisan plastic pada drillpipe dan/atau mengatur kimia lumpur untuk mengurangi terjadinya proses korosi. Menaikkan kekuatan pipa tidak signifikan untuk menaikkan ketahanan terhadap kelelahan pipa, seperti pada **Gambar 3.59** dan secara nyata dapat menyebabkan masalah lain ketika menemui hydrogen sulfide. *Drillpipe aluminium* dan *titanium* memberikan alternatif metallurgi yang lain dan yang akan dibahas kemudian.

Jika terdapat hydrogen sulfida, pipa berkekuatan tinggi dapat rusak karena mekanisme retak akibat tekanan hydrogen (hydrogen stress) yang juga berkenaan dengan sulfide-stress cracking (SSC). Bentuk kerusakan ini disebabkan oleh

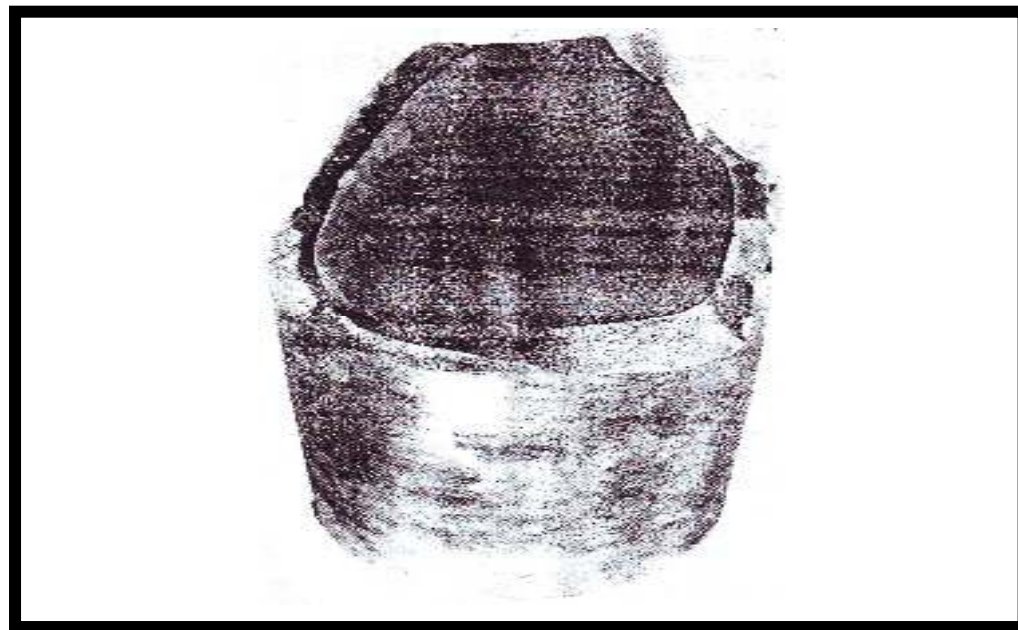
adsorbs/penyerapan hydrogen ke dalam logam karena reaksi korosi antara baja dengan hydrogen sulfida basah. Meski mekanisme aktual dari retakan ini masih diperdebatkan, namun parameter yang menyebabkan kerentanan SSC dapat terdokumentasi dengan baik. Faktor-faktor ini adalah kekuatan, tekanan yang digunakan, pH, konsentrasi H<sub>2</sub>S, temperatur, dan mikrostruktur.

Peningkatan kekuatan dan penggunaan tekanan akan meningkatkan kerentanan SSC sebagaimana mengurangi pH dan temperatur. Mikrostruktur terbaik agar tahan SSC pada level kekuatan yang sebanding adalah martensite yang ditempa dengan baik, sedangkan yang paling lemah terhadap SSC adalah struktur normal.

Sebagaimana diperkirakan, pipa S-135 sangat rentan terhadap SSC, sedangkan pipa X-95 dapat digunakan ketika lumpur pemboran diperlakukan untuk menghilangkan hydrogen sulfida. Pada konsentrasi hydrogen sulfida yang tinggi dimana dalam pemilihan pipa tidaklah sepenuhnya efektif, maka grade rendah seperti E dan X adalah yang terbaik. Karena ketahanan baja terhadap SSC mencapai minimal pada suhu mendekati 25°C, maka permasalahan terbesar pada retakan ini terjadi pada bagian atas lubang dimana pipa berkekuatan tinggi seringkali dipergunakan. Untuk mengurangi masalah ini, pada bagian rangkaian yang meruncing dapat digunakan untuk mengurangi beban di puncak rangkaian, dan dinding pipa yang lebih tebal dapat digunakan di bagian atas untuk mengurangi tekanan yang digunakan. Karena baja X-95 memiliki kekerasan seperti 27-30 HRC dan sering diperkeras, biasanya akan lebih baik dalam menahan SSC daripada baja G-105 dan S-135 yang lebih kuat. **Gambar 3.63** menunjukkan kerusakan SSC pada pipa S-135 dengan karakteristik yang mudah retak dan rapuh. Salah satu pertimbangan penting yang sering dilupakan adalah kekerasan yang tinggi pada tool joint. Semua tool joint memiliki kekerasan yang setara dengan pipa S-135. Karenanya menggunakan pipa yang kekuatannya lebih rendah hanya akan mengurangi kemungkinan rekah pada pipa dan tidak pada peralatan tool joint. Sangatlah umum bila drillpipe berkekuatan rendah (tipe E dan X) yang digantungkan pada tool joint mengalami kerusakan SSC, karena pada drillpipe tersebut adalah yang menerima tekanan yang paling tinggi. Baja tool joint umumnya mudah terkena SSC karena kekuatannya yang lebih besar. Seringkali kerusakan pada pin terjadi dimana

retakan mengikuti keliling joint di sekitar pangkal dari sambungan. Daerah ini menunjukkan tekanan tertinggi dan konsentrasi tekanan yang disebabkan oleh sambungan itu sendiri. Perhitungan tekanan menunjukkan bahwa tekanan pada sambungan terakhir dapat mencapai atau bahkan melebihi yield strength. Meski pada box jarang terjadi kerusakan, namun dapat menjadi subjek tekanan loop/hoop yang tinggi; retak pada box yang biasanya terjadi adalah pada arah yang longitudinal. Drill collar akan mengalami kerusakan sama seperti tool joint namun lebih jarang terjadi karena tekanan yang dialami lebih kecil.

Meskipun hydrogen sulfida seringkali berasal dari reservoir, degradasi lumpur pemboran dapat juga menghasilkan hydrogen sulfida yang menjadi penyebab SSC. **Tabel III-15** menunjukkan kemungkinan-kemungkinan masalah penggunaan lumpur lignosulfonate pada suhu tinggi. Untuk melengkapi data pada **Tabel III-15**, penulis yang sama menunjukkan, meski pada pH yang tinggi (>12); lumpur lignosulfonate, sulfidanya dapat berubah karena dekomposisi dari lumpur (**Tabel III-16**). Dekomposisi ini juga menjadi penyebab kerusakan SSC dari casing berkekuatan tinggi ketika lumpur digunakan sebagai fluida packer.



**Gambar 3.63**  
**Kerusakan SSC pada Pipa S-135 <sup>4)</sup>**

Salah satu alternatif metallurgi yang jarang digunakan dalam industri migas, selain penggunaan pipa dengan kandungan karbon lebih dan baja low-alloy, adalah drillpipe aluminium. Salah satu dari keuntungannya adalah beratnya yang ringan, sehingga dapat membor lebih dalam dengan menggunakan rangkaian gabungan. Meskipun yield strength (58.000 psi) dan tensile strength (64.000 psi) dari aluminium 2014-T6 berada di bawah drillpipe grade E, namun faktor ini dapat diatasi dengan menggunakan dinding yang lebih tebal. Dari sisi ketahanan bengkok, membandingkan baja dengan aluminium yang dibebani defleksi yang sama, pipa aluminium memiliki umur kelelahan yang jauh lebih lama dibandingkan baja. Aluminium juga lebih tahan terhadap H<sub>2</sub>S dan korosi CO<sub>2</sub> dibandingkan baja.

**Tabel III-15.**  
**Kemungkinan-Kemungkinan Masalah Penggunaan Lumpur Lignosulfonate pada Suhu Tinggi <sup>4)</sup>**

Lignosulfonate Solution*	A	B	C
Temperature (°F)	450	405	425
Pressure (psi)	12,000	10,000	10,000
Initial pH	8.3	8.5	8.3
Final pH	6.1	5.9	5.9
H <sub>2</sub> S (ppm)	15	2.5	20
Aging time (days)	16	16	16

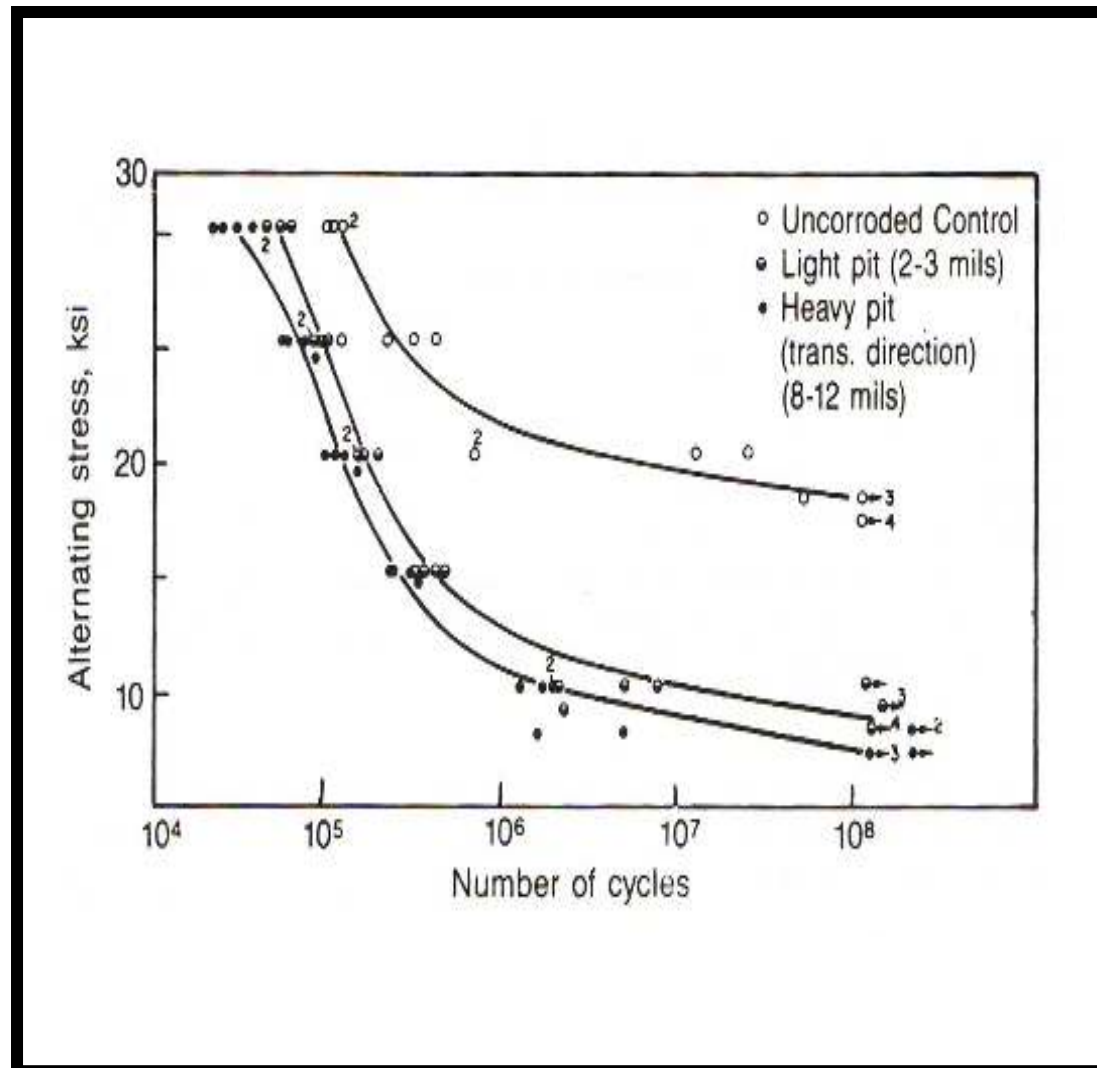
\*Solutions contained 10 parts per billion (ppb) lignosulfonate solubilized in a 0.43 ppb caustic soda solution. (After Bush et al.)

**Tabel III-16.**  
**Sulfide yang dapat Berubah karena Dekomposisi dari Lumpur <sup>4)</sup>**

Lignosulfonates Solution*	A	B	C
Temperature (°F)	375	375	375
Pressure (psi)	300	300	300
Initial pH	12,6	12,8	12,6
Final pH	8,1	8,2	9,1
H <sub>2</sub> S (ppm)	15	25	2,5
Aging Time (days)	7	7	7
* Solutions contained 10 ppb lignosulfonate solubilized in 2 ppb caustic soda solution. ( After Bush et. al. )			

Salah satu kelemahan pipa aluminium adalah ketahanannya yang rendah pada lumpur dengan pH diatas 10,5; Sehingga apabila menaikkan pH di atas ini dapat menyebabkan korosi yang serius. Klorida dapat menyebabkan pitting yang parah, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.64**, pipa dapat kehilangan daya tahan lelah pada tingkat diatas 180.000 ppm pada salt-mud. Ketahanan pada contoh tersebut berkurang hingga lebih dari 50%. Selain itu, penelitian laboratorium menunjukkan bahwa drillpipe aluminium rentan terhadap kerusakan stress-corrosion pada lumpur brine oxygenated meskipun dalam prakteknya tidak terjadi SSC.





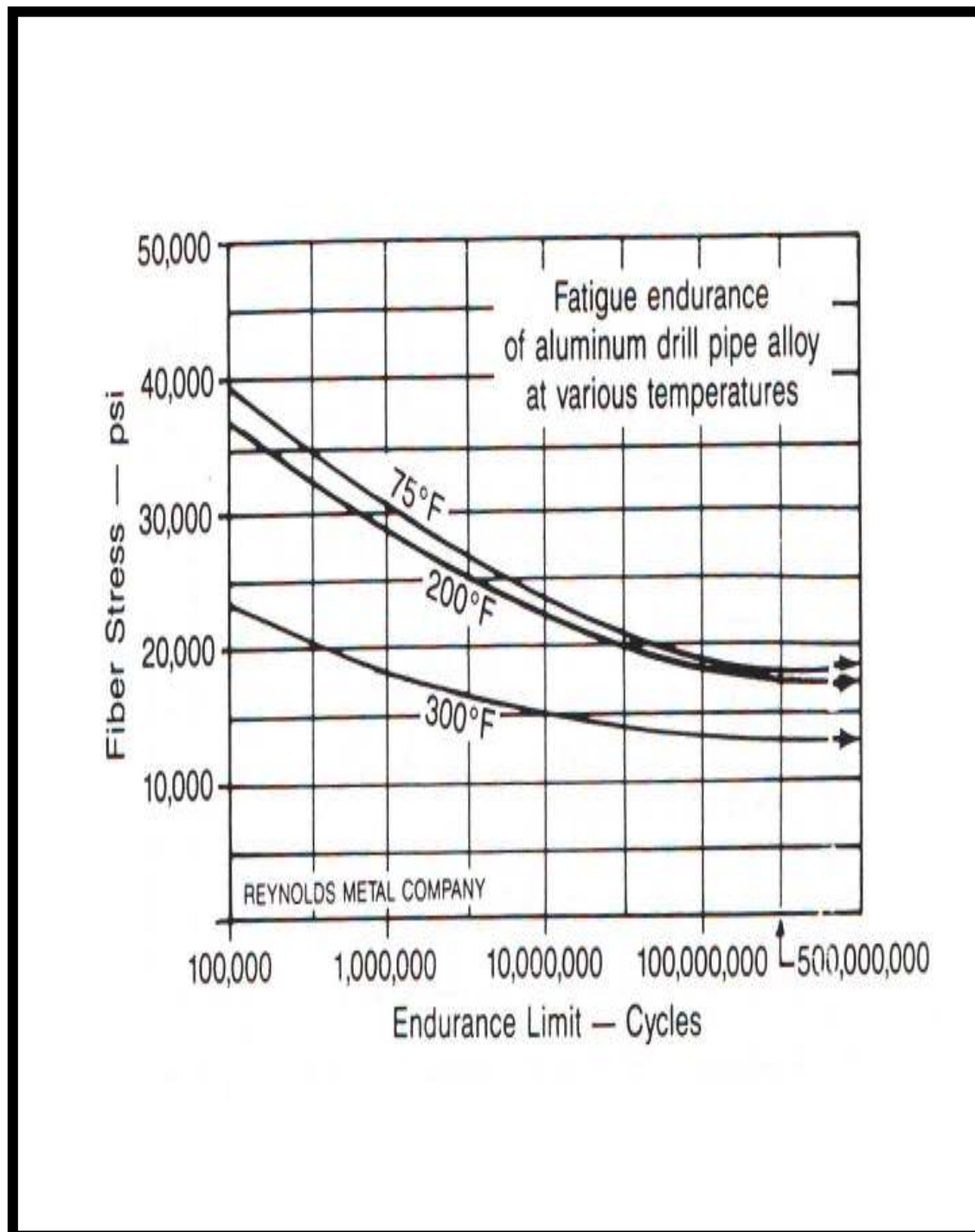
**Gambar 3.64.**

**Grafik dari Klroida yang dapat Menyebabkan Pitting yang Parah <sup>4)</sup>**

Faktor lain penggunaan drillpipe aluminium adalah sifatnya pada temperatur yang tinggi. Kekuatan lelehnya akan berkurang banyak pada temperatur 300 °F atau lebih (**Gambar 3.65**), sehingga tidak direkomendasikan untuk penggunaan jangka panjang pada suhu diatas 250°F. namun kekurangan ini dapat dielakkan dengan menggunakan pipa aluminium di bagian atas lubang dan pipa baja di bagian dasar lubang dimana temperatur lebih tinggi. Tentunya temperatur statis dasar sumur bukanlah faktor penentu karena aliran lumpur akan membuat pendinginan, sehingga temperatur sirkulasi menjadi pertimbangan penting pada pembatasan temperatur.

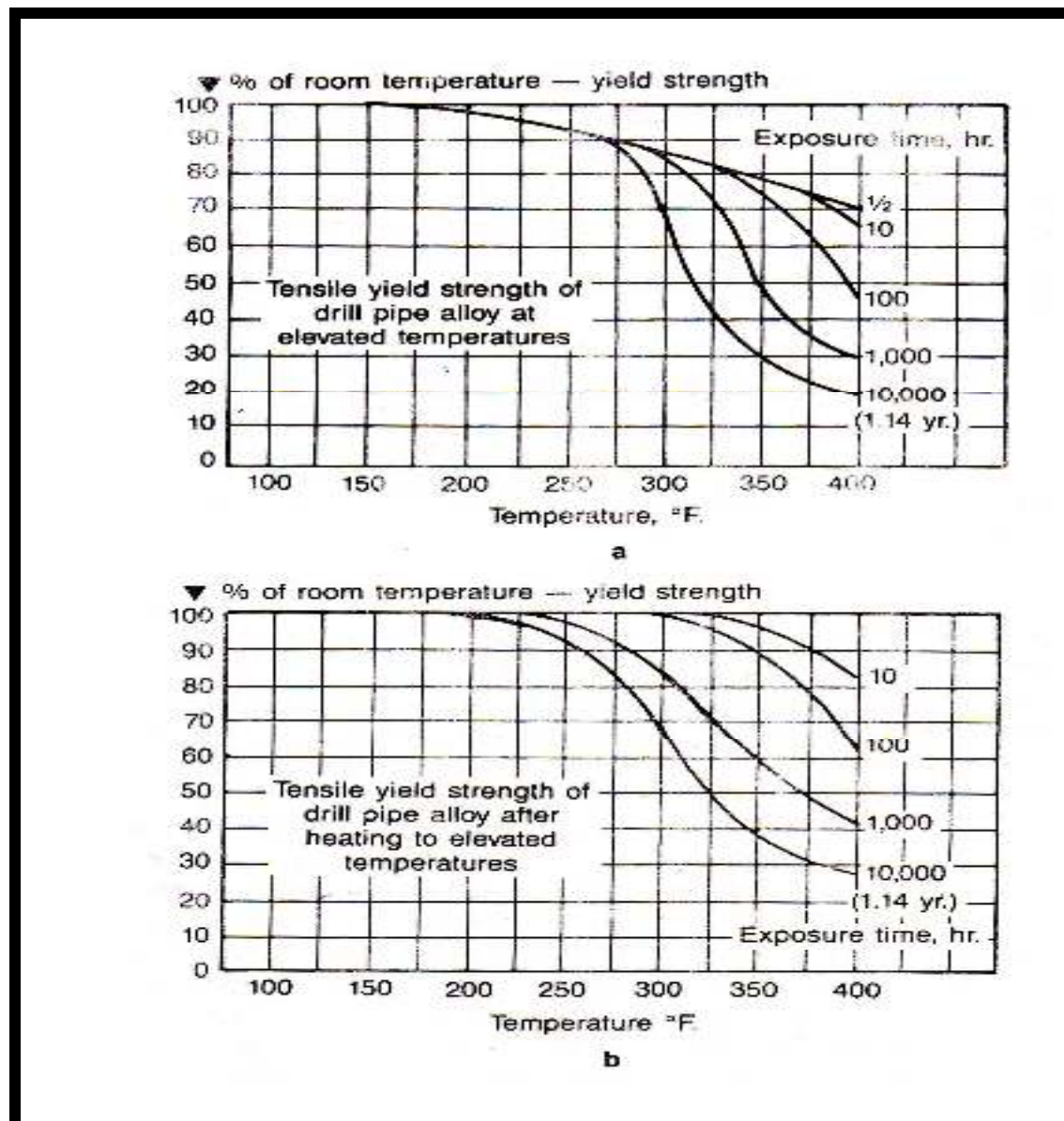


**Gambar 3.66** menunjukkan yield strength berkurang ketika diuji pada temperatur tinggi dan pada temperatur ruangan setelah diambil dari temperatur tinggi.



**Gambar 3.65.**  
**Fatigue Strength pada Aluminium Drillpipe pada Elevated Temperatur <sup>4)</sup>**

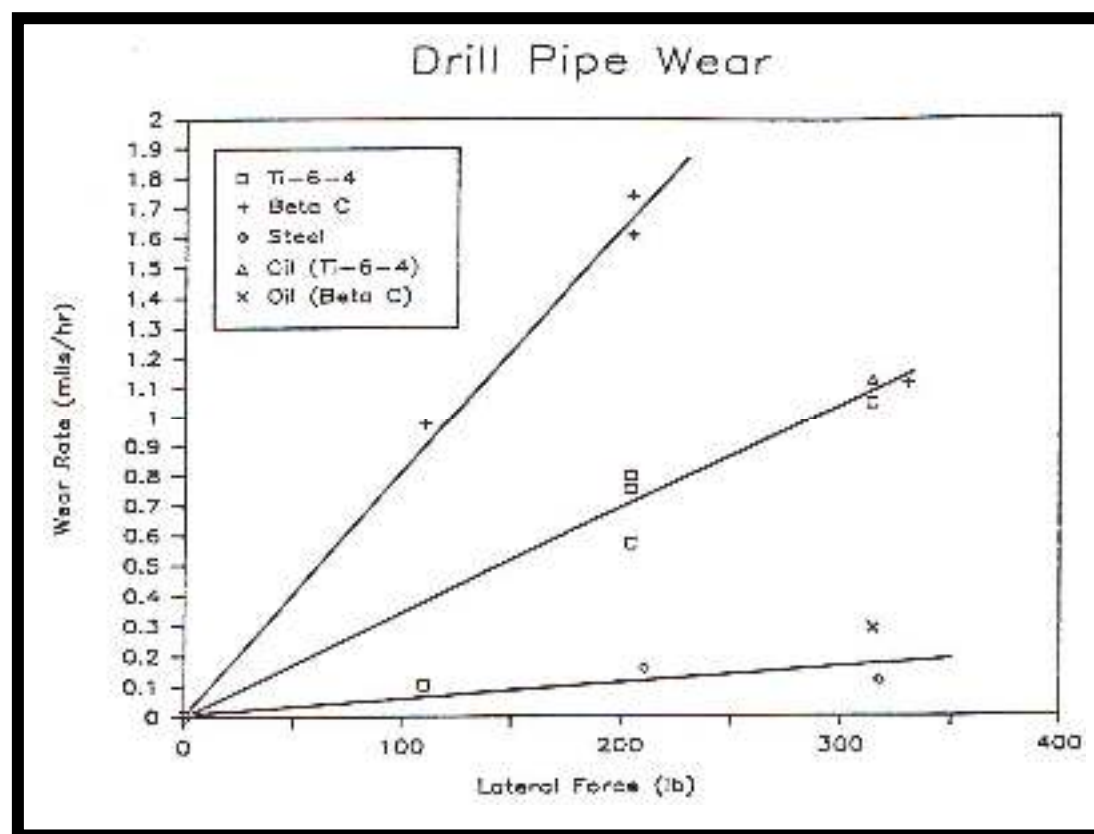
Masalah lain penggunaan pipa aluminium adalah ketahanannya terhadap abrasi yang lemah jika dibandingkan drillpipe baja. Karena kekuatan dan kekerasannya lemah, aluminium tidak tahan terhadap abrasi atau erosi dari cutting dalam lumpur. Persoalan ini dapat diatasi dengan mengurangi kandungan padatan dalam lumpur, namun memakaikannya pada casing masih menjadi suatu persoalan.



**Gambar 3.66.**  
Yield Strength pada Aluminium Drillpipe , (a) pada Elevated Temperatur, (b) setelah Elevated Temperatur <sup>4)</sup>

Tool joint baja masih rentan terhadap korosi galvanic dan sambungannya memiliki kecenderungan untuk lepas selama masa pemboran. Kedua masalah ini dapat terjadi selama pemboran.

Pipa titanium juga memberikan alternatif metallurgi pada baja dan aluminium. Titanium dipertimbangkan untuk pemboran sumur yang sangat dalam karena keterbatasan hanging load (beban gantung) dari baja. Titanium memberikan rasio keuntungan kekuatan yang tinggi dengan berat yang ringan yang melebihi baja dan dapat disambungkan dengan tool joint titanium. Titanium sangat tahan terhadap korosi dari sebagian besar lumpur pemboran dan korosi H<sub>2</sub>S serta CO<sub>2</sub>. Selain itu titanium juga memiliki ketahanan pada temperatur yang tinggi pada dasar sumur dan umur leleh yang sangat baik.



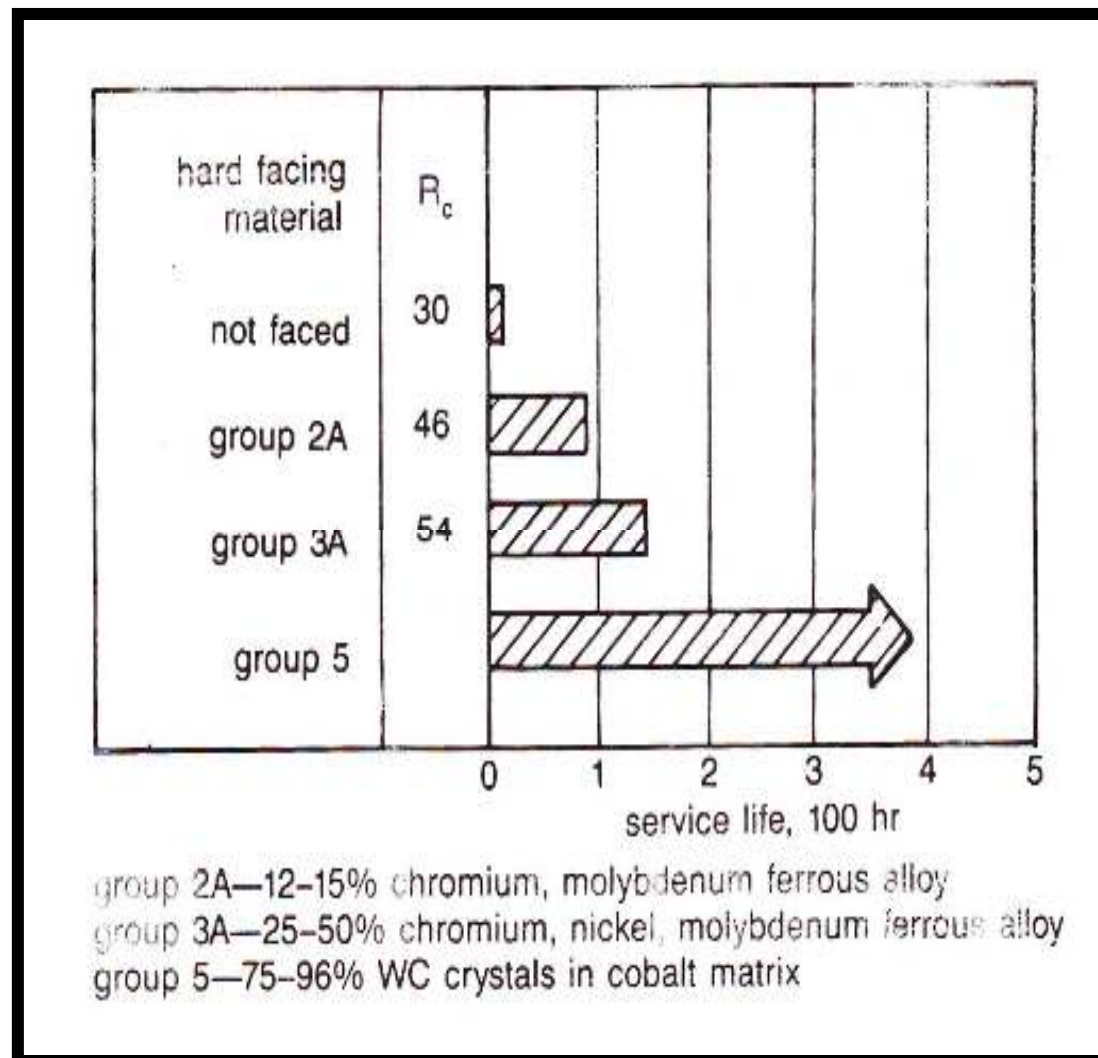
**Gambar 3.67.**  
**Tingkat Keausan dari Dua Jenis Drillpipe Titanium (Ti-6-4 dan Beta C) terhadap Casing Baja P110 jika Dibandingkan dengan Drillpipe Baja pada Penggunaan Lumpur Jenis Water-Base Mud dan Oil-Base Mud <sup>4)</sup>**

Salah satu kekurangan titanium adalah harganya yang sangat mahal jika dibandingkan dengan baja. Namun jika dibandingkan dengan biaya tambahan untuk rig, besar kemungkinannya untuk menggantung pipa baja, penggunaan titanium dapat dikatakan kompetitif. Kekurangan lain dari drillpipe titanium adalah wear rate-nya yang lebih tinggi terhadap casing baja, drillpipe baja maupun tool joint baja. **Gambar 3.68** menunjukkan tingkat keausan dari dua jenis drillpipe titanium (Ti-6-4 dan Beta C) terhadap casing baja P110 jika dibandingkan dengan drillpipe baja pada penggunaan lumpur jenis water-base mud dan oil-base mud.

Tool joint sering mengalami keausan di luar permukaan karena abrasi dengan casing atau formasi pada saat membor pada lubang yang berbelok. Karena tool joint lebih besar diameternya daripada pipa, maka memiliki kecenderungan untuk menggesek dinding formasi atau casing. Namun demikian, kerusakan pada pipa dapat terjadi ketika pipa membengkok atau ketika pembelokan lubang terlalu besar sehingga pipa menyentuh dinding formasi. Ketika tool joint berputar pada kekuatan lateral terhadap dinding lubang, temperatur pada tool joint meningkat karena adanya gesekan. Temperatur ini dapat melebihi temperatur kritis bawah, yang pada akhirnya menyebabkan pengecekan temperatur pada tool joint karena tool joint ini secara terus-menerus didinginkan oleh lumpur pemboran dan dipanaskan oleh adanya faktor gesekan. Jaringan dari retakan-retakan yang longitudinal dari gesekan itu dapat berkembang menjadi retakan yang lebih panjang, sehingga akan memberikan tempat untuk terjadinya washout atau berkembangnya retakan lain akibat kelelahan atau SSC.

Penurunan yang besar pada kekuatan torsional tool joint terjadi karena keausan OD (Outer Diameter). Hal ini disebabkan oleh kekuatan lateral terhadap dinding lubang dan erosi cutting dalam lumpur. Pencegahan masalah ini adalah dengan pengerasan (lapisan penutup) dari baja dasar dengan alloy yang memiliki ketahanan aus lebih kuat. Beberapa perusahaan menggunakan gas metal arc-welding, dan menambahkan tungsten carbide untuk meningkatkan ketahanan terhadap aus. Keuntungan dari penambahan tungsten carbide dijelaskan pada grafik pada **Gambar 3.69**. Umur penggunaan meningkat secara signifikan ketika pengerasan dengan tungsten carbide dibandingkan dengan material keras lainnya. Tungsten carbide

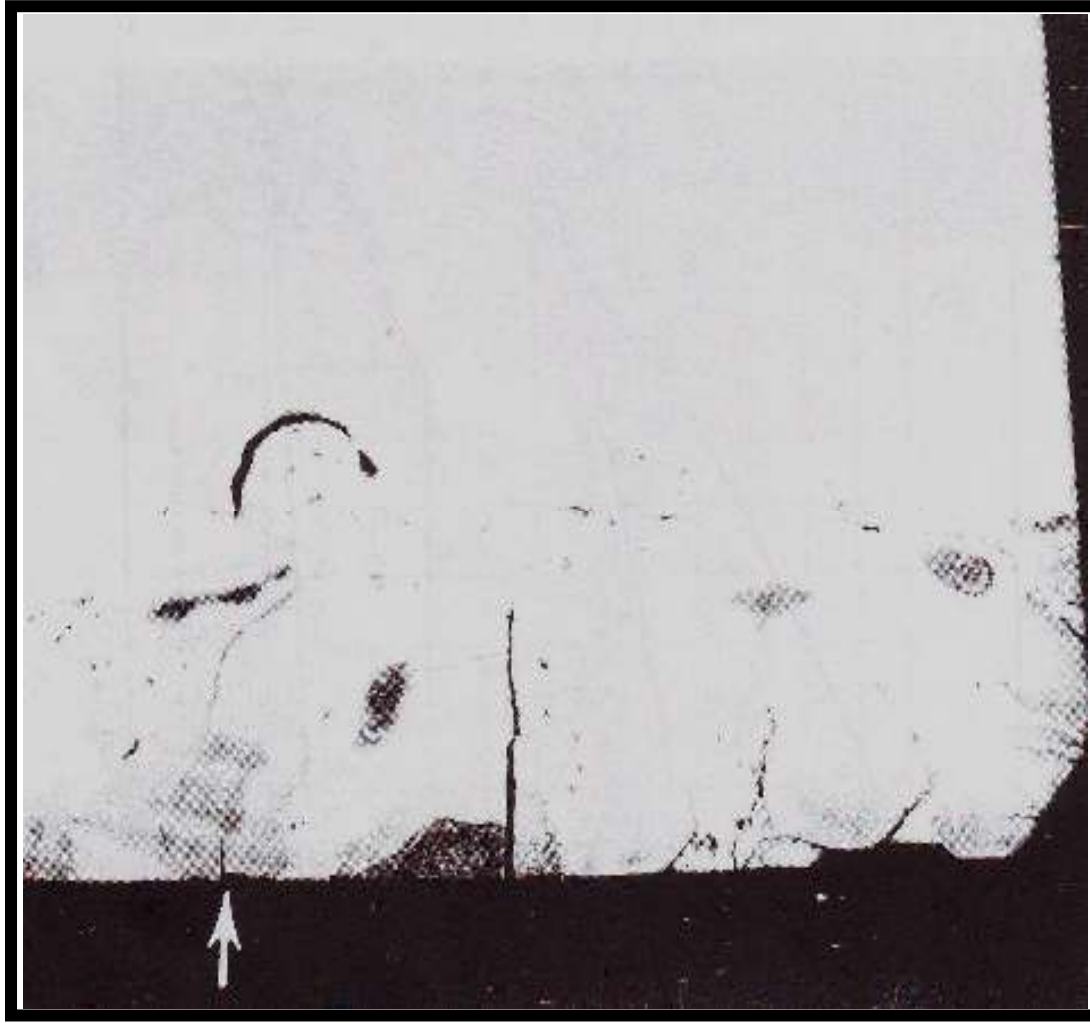
dikelaskan berdasarkan ukuran partikel mulai dari 325-400 mesh yang paling halus sampai yang paling kasar yaitu 8-10 mesh. Meski mesh yang kasar sangat baik menahan abrasi, namun partikel individualnya cenderung untuk lebih mudah retak dibandingkan mesh halus pada tingkat kerapuhan tungsten carbide.



**Gambar 3.68.**  
**Grafik Penambahan Tungsten Carbide <sup>4)</sup>**

**Gambar 3.70** menunjukkan retakan pada partikel tungsten carbide pada suatu pengerasan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan drill collar. Kerusakan serupa dapat terjadi jika lempengan untuk pelapis itu tidak dipanasi dengan baik selama penyatuan dan tekanan dihilangkan setelah pelapisan tersebut.

Kekerasan yang lebih diciptakan pada zona pemanasan yaitu pada saat adanya penyatuan yang dilakukan selama aplikasi/proses dari pengerasan. Jika paska pemanasan tidak dilakukan perlakuan yang tepat, maka akan terjadi kerusakan prematur pada komponen pemboran.

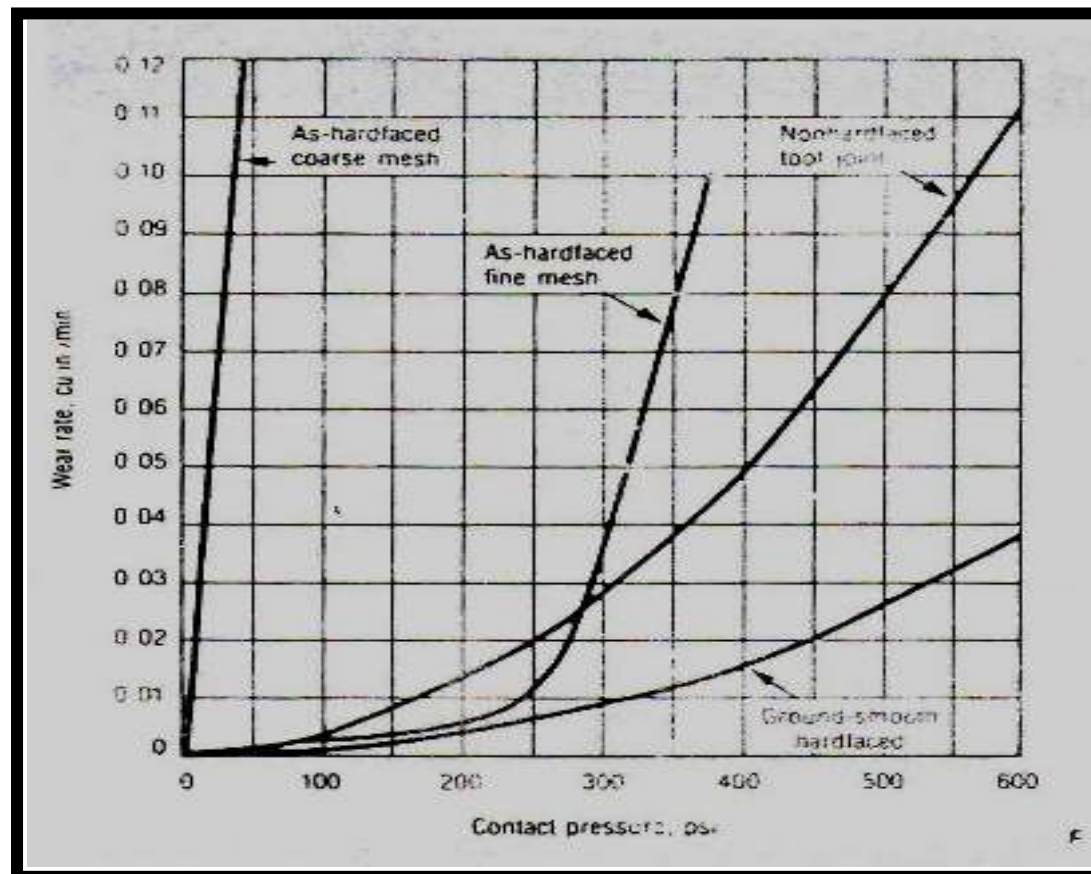


**Gambar 3.69.**  
**Retakan pada Partikel Tungsten Carbide pada Pengerasan yang Menyebabkan Kerusakan pada Drill Collar <sup>4)</sup>**

Salah satu kekurangan dari pengerasan itu adalah meningkatnya keausan pada casing. Keausan pada casing harus dipertimbangkan sebelum memutuskan untuk melakukan pengerasan pada peralatan tool joint. **Gambar 3.70** menunjukkan



perbandingan tingkat keausan dari casing terhadap mesh kasar, mesh halus, dan tool joint yang tidak dilapisi pengeras.

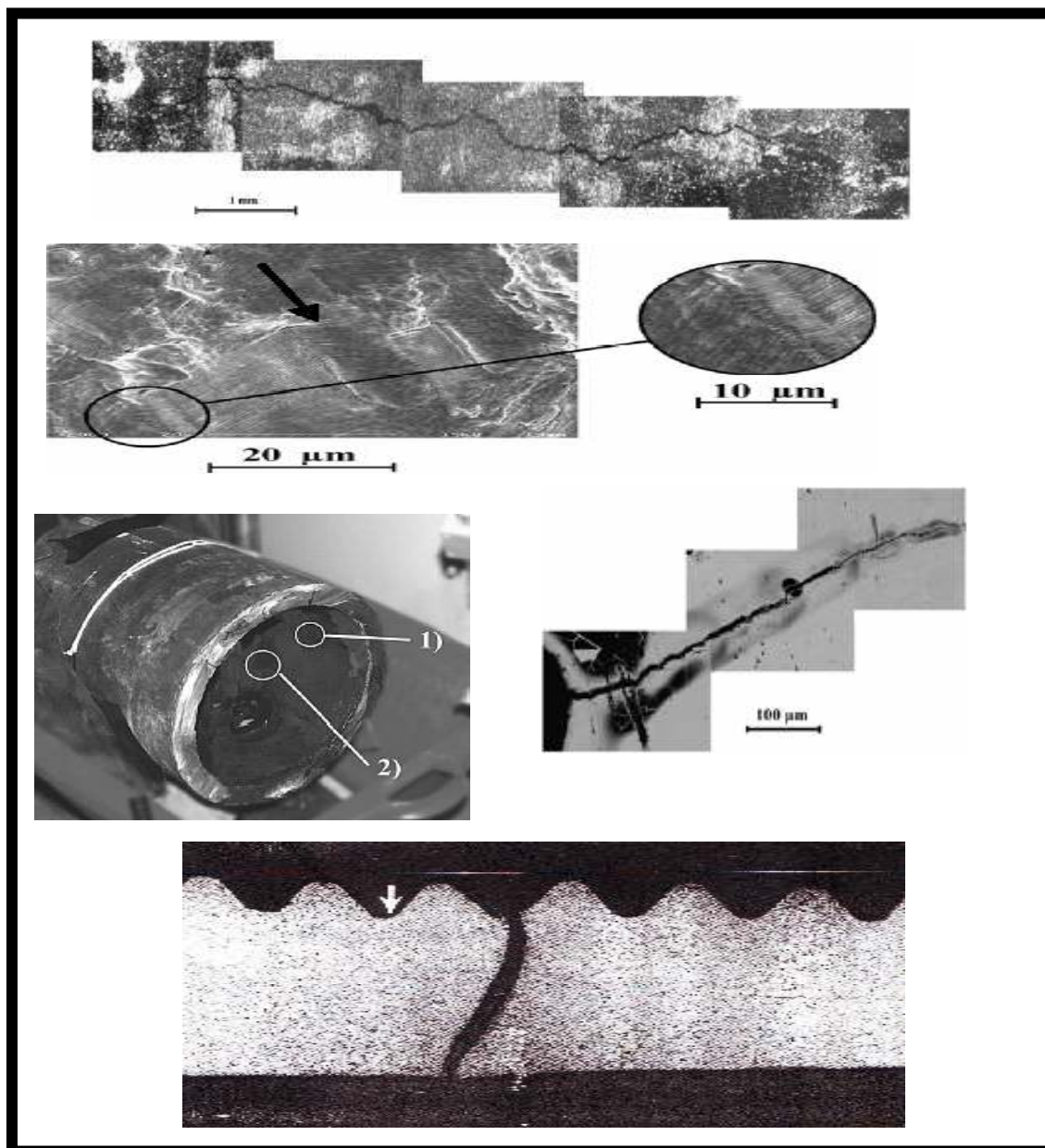


**Gambar 3.70.**  
**Perbandingan Tingkat Keausan dari Casing terhadap Mesh Kasar, Mesh Halus, dan Tool Joint yang Tidak Dilapisi Pengeras. <sup>4)</sup>**

Kerusakan lain pada tool joint yang tidak berkaitan dengan metallurgi adalah ketidakcukupan putaran yang menyebabkan erosi pada pin atau box oleh lumpur pemboran, yang disebut *wobble*, dan kerusakan pada sambungan yang disebabkan penggunaan kekuatan yang tidak tepat pada sambungan.

Salah satu permasalahan pada pemboran adalah kelelahan casing. Seperti dibahas diatas, keausan casing dapat menjadi permasalahan serius selama operasi pemboran. Masalah yang sering dihadapi pada pemboran yang lama adalah kelelahan

pada sambungan casing. Sambungan ini bertindak sebagai peningkat tekanan dan hal ini bersama dengan perubahan beban dari putaran drillstring akan menyebabkan rusak lelah pada casing. Keausan yang parah pada casing tidak terjadi pada peristiwa ini. **Gambar 3.71** menunjukkan retak lelah pada ulir 8-round casing pada casing K-55.



**Gambar 3.71.**  
**Retak Lelah pada Ulir 8-Round Casing pada Casing K-55 <sup>4)</sup>**



### 3.4.3. Peralatan Bawah Permukaan

#### 3.4.3.1. Casing dan Tubing

Casing dan tubing atau pada industri perminyakan dikenal sebagai Oil-Country Tubular Goods (OCTG/peralatan bundar) dimana telah diatur oleh API berdasar ketentuan 5CT dan 5D. Berbagai grade API berdasarkan sifat mekanik, kandungan kimia serta kemampuan terhadap tensile dan strength ditunjukkan oleh tabel yang terdapat pada lembar lampiran, dimana pada grade group satu memiliki kekuatan terendah dan grade group empat adalah yang terkuat.

Pup joint, casing dan tubing dibuat tanpa keliman atau pengelasan listrik. (ERW/Electric-Resistance Welded) berdasarkan penyusunnya. Kemampuan casing dan tubing untuk pengelasan adalah dengan perlakuan pemanasan pada temperatur paling rendah yaitu 1000 °F (538 °C) atau diproses tanpa perlakuan temper. API 5CT membutuhkan perlakuan panas kelim-pengelasan. Kelim biasanya dibentuk pada pemanasan suhu berkisar 1,650 ° - 1,850 °F selama lebih kurang 1 menit untuk menghasilkan struktur yang baik pada badan pipa.

Berdasarkan daerah kerjanya yang berada dibawah permukaan, dibuatlah suatu bahan yang tahan terhadap tekanan yang bekerja pada seluruh bidang bahan baik dari tekanan fluida beserta kecepatannya, tekanan dari dinding sumur maupun gaya tarik dari seluruh rangkaian pipa. Selain itu, korosi juga merupakan faktor dominan dalam pendesainan casing dan tubing.

Untuk menanggulangi gaya tarik rangkaian pipa, pada ujung-ujung sambungan pipa dibuat lebih tebal dari rangkaian pipa yang lain dan membuat bentuk ulir yang sesuai dengan besarnya gaya. Selain itu, sebisa mungkin membuat pipa yang bebas keliman/las agar pipa dapat terhindar dari serangan korosi. Untuk menghindari terjadinya korosi dibuatlah casing dan tubing berbahan paduan (corrosion resistance-alloys/CRAs) yang dapat dilihat pada **Lampiran A-1**.

#### 3.4.3.2. Wireline

Peralatan wireline telah dispesifikasi oleh API berdasar spesifikasi 9A yang dibuat dari kawat besi, diperkuat kawat besi atau ekstra diperkuat kawat besi dan dilapisi oleh zinc dengan perlakuan posisi elektrode maupun galvanisasi panas.

Kawat besi memiliki komposisi yang sama dengan besi AISI 1067 dan memiliki kemampuan tensile berkisar 240.000 psi; diperkuat kawat besi yang diproduksi oleh besi AISI 1075 memiliki kekuatan 250.000 psi atau lebih. Kekuatan terhadap strength yang tinggi ini dicapai oleh perlakuan panas dan pembentukan dingin pada proses penyatuan, dikarenakan pada perlakuan panas dan pengerjaan dingin menghasilkan bentuk mikrostruktur perlit yang sangat baik yang berbentuk sejajar dengan arah panjang kabel. Kabel-kabel ini seringkali telah dilapisi dengan senyawa corrosion-inhibitor yang efektif pada berbagai macam lingkungan. Untuk mengetahui kemampuan material kawat terhadap stress-corrosion-cracking yang menyerangnya, baik pada percobaan di laboratorium maupun pada kondisi di lapangan dapat dilihat pada Tabel III-17.

**Tabel III-17.**  
**Kemampuan Material Kawat Terhadap Stress-Corrosion-Cracking <sup>4)</sup>**

Materials	Lab (93°C)	Field (93°C)	Lab (149°C)	Field (149°C)	Lab (177°C)	Field (204°C)
AISI 316	F	F	F	F	...	F
18-18-2	F	P	F	P	...	F
Uranus 50	NF	NF	F	F	F	F
SAP 2205	NF	...	F	...	F	F
Uranus B6	NF	NF	F	F	F	F
23365 (Sabbitt)	NF	NF	F	NF	F	F
Sankro 28	NF	...	F	...	F	F
Carpenter 20Cb-3	NF	...	NF	NF	F	F
Incoloy 825	NF	...	NF	...	F	F
Hastelloy C	NF	...	NF	...	...	F
Alloy 718	...	NF	NF	NF	...	F
Pyromet 31	NF	...	F**	...	F	F
Inconel 625	...	...	NF	NF	...	F
Inconel 617	...	...	NF	NF	F	F
Hastelloy C276	...	NF	NF	NF	F	F
MP35N	...	...	NF	NF	NF	NF

Environment —Field (NaCl + MgCl<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub> with 11% H<sub>2</sub>S and 40% CO<sub>2</sub> gas for 30 days)  
—Lab (NaCl with 100% H<sub>2</sub>S gas for 7 days)

NF = No failure  
F = Failure  
P = Pitted but no failure  
F\*\* = three of six specimens failed  
(After Vaughn and Chung)

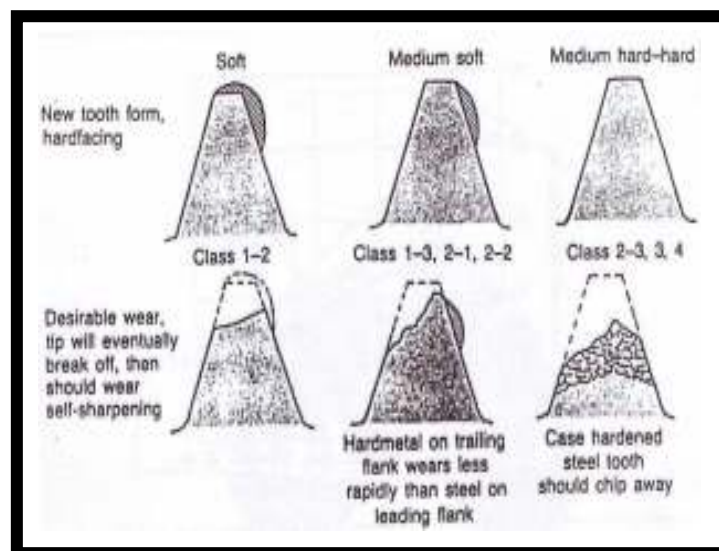
### 3.4.3.3. Bit Cone Metallurgy ( Metallurgi Pada Bagian Kerucut Bit )

Ada dua jenis cone yang sering digunakan dalam industri migas di bidang pemboran. Pemotong berputar pada bit terdiri atas gigi-gigi yang dibuat di pabriknya sebagai bagian integral dari cone, dan kemudian berkembang dengan nama bit “mill tooth”. Ketika menemui lingkungan pemboran yang memiliki batuan keras dan abrasive, gigi-gigi tersebut akan cepat aus dan akan segera dibutuhkan bit yang baru. Karena itu diperlukan gigi-gigi pada cone yang dibuat dari material yang lebih tahan terhadap keausan, seperti tungsten carbide.

Gigi dan selipan pada bit menggunakan klasifikasi yang sama untuk terminologi jajaran cone dan gigi-giginya. Jajaran gigi-gigi bit diistilahkan :

- 1) *heel row* untuk jajaran yang terluar,
- 2) *nose* atau *toe row* untuk jajaran bagian dalam, dan
- 3) *middle row* untuk jajaran gigi antara *heel row* dan *toe row*.

Titik pada bagian ujung tombak dirancang untuk membor formasi pada pusat bit dan sering-kali tidak terdapat jajaran gigi-gigi yang penuh, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.72**. Penomoran cone dimulai dari cone yang terletak pada titik tombak dan penomoran berlanjut searah putaran jarum jam. Cone pada titik tombak dinamakan *cone #1* dan pada arah jarum jam berikutnya adalah *cone #2*.



**Gambar 3.72.**  
Titik pada Bagian Ujung Tombak pada Gigi Bit <sup>4)</sup>

Jumlah offset pada cone dari tengah bit merupakan karakteristik deskriptifnya. Seperti dikatakan sebelumnya, offset pada cone dapat melakukan penggerusan dan pencungkulan pada formasi yang runtuh karena mekanisme pemotongannya. Jumlah offset untuk jenis bit umum ditunjukkan pada **Tabel III-18**. Dua kelompok pertama pada mill tooth dan klasifikasi insert memiliki offset  $1-4^\circ$ , tergantung pada pengelompokan spesifikasinya. Mayoritas kelompok 3, 7 dan 8 tidak memiliki offset. Kelompok-kelompok bit ini dirancang untuk membor formasi yang runtuh karena kompresi.

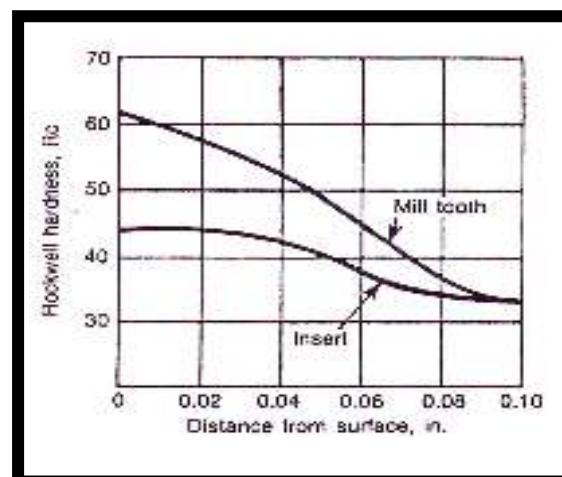
**Tabel III-18.**  
**Kemampuan Material Kawat Terhadap Stress-Corrosion-Cracking <sup>4)</sup>**

Type	Class	Formation Type	Tooth Description	CT set
Steel Cutter	1-1, 1-2	Very soft	Hardfaced tip	$3^\circ-4^\circ$
	1-3, 1-4	Soft	Hardfaced side	$2^\circ-3^\circ$
Mill Tooth Bits	2-1, 2-2	Medium	Hardfaced side	$1^\circ-2^\circ$
	2-3	Medium hard	Casehardened	$1^\circ-2^\circ$
	3	Hard	Casehardened	0
	4	Very soft		
Tungsten Carbide Insert Bits	5-2	Soft	Long, blunt chisel	$2^\circ-3^\circ$
	5-3	Medium soft	Long, sharp chisel	$2^\circ-3^\circ$
	6-1	Medium shales	Medium chisel	$1^\circ-2^\circ$
	6-2	Medium limes	Medium projectile	$1^\circ-2^\circ$
	7-1	Medium hard	Short chisel	0
	7-2	Medium	Short projectile	0
	8	Hard chert	Conical or hemispherical	0

**Tabel III-18** dapat juga digunakan untuk mendeskripsikan beberapa karakteristik mill tooth pada bit. Pada operasi pemboran normal, mill tooth bit dengan cepat akan meratakan sudut pahat ke titik dimana akan membulat, sehingga menjadi gigi yang tidak efektif. Untuk menghindari hal ini, pabrik pembuat bit menggunakan beberapa hardfacing pada sudut-sudut gigi bit atau pengerasan pada gigi bit itu sendiri (lihat **Gambar 3.73**).

Insert bit dari tungsten carbide dijelaskan pada **Tabel III-18** dan juga akan berbeda-beda tergantung pada jenis formasi yang dibor. Pada formasi yang keras, bit yang digunakan adalah bit dengan gigi-gigi yang pendek, berbentuk kerucut yang akan mampu menahan beban berat bit yang dibebankan selama pemboran pada batuan keras, sedangkan pada batuan yang lunak, bit yang digunakan adalah bit dengan gigi-gigi yang mirip pahat, panjang, dan tajam untuk melakukan penetrasi pada formasi.

**Metallurgi Cone.** Gigi cone baja atau mill terkadang karena penggunaan yang berat dapat menjadi aus atau patah, yang menyebabkan pecah atau hilangnya cone. Cone dengan gigi baja dibuat dari penempaan nikel-molybdenum. Sebelum karbonisasi, cone tersebut didinginkan dan kemudian dipanaskan menggunakan prosedur *double oil quench* dan melalui *proses penempaan*. Prosedur ini menghasilkan gigi pemotong dengan properti seperti : 1) kulit luar tipis dan kuat, kekerasannya lebih rendah daripada lapisan dibawahnya, sehingga meningkatkan ketahanannya terhadap pecah atau gempil ( patah sebagian dengan ukuran yang kecil ), 2) lapisan dengan karbon tinggi dibawah kulit tersebut untuk kekuatan dan ketahanan terhadap aus yang maksimum, 3) cone yang direfinasi dengan kombinasi terbaik, baik dengan kekuatan dan ketahanan terhadap benturan/ impact yang maksimal.

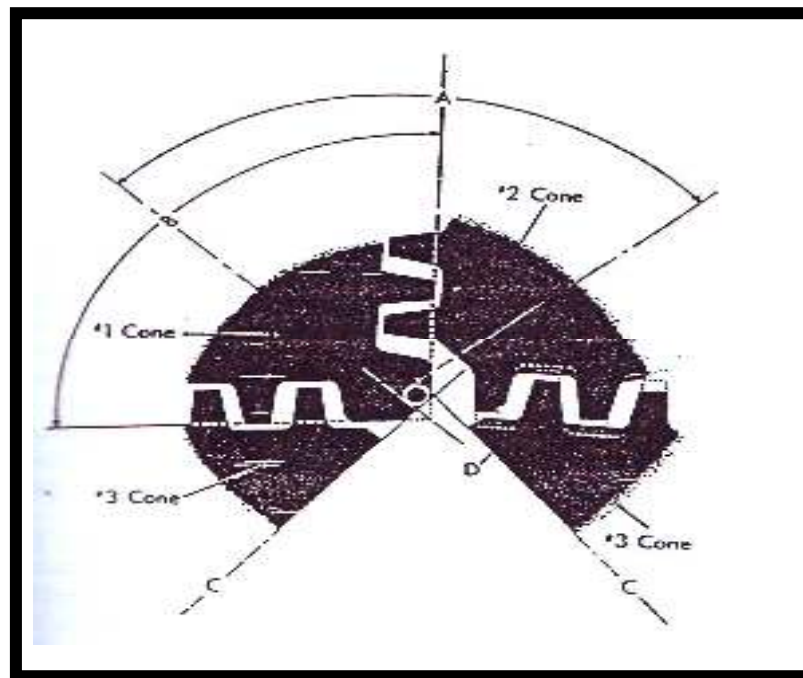


**Gambar 3.73.**  
**Pengerasan pada Gigi Bit <sup>4)</sup>**

Cone gigi carbide mengalami perlakuan karbonisasi yang sama seperti gigi cone baja dengan beberapa perbedaan, seperti ditunjukkan **Gambar 3.73** diatas, cone yang digunakan untuk insert bit dilakukan case-hardened hanya sampai 45 Rc. selain itu cone diproses agar permukaannya tidak terkarbonisasi di suatu area dimana lubang dibor dan dilebarkan untuk pemasangan gigi-gigi carbide.

**Bit teeth/Gigi Bit** . Banyak jenis gigi yang digunakan dalam mill tooth dan insert bit. Beberapa dari tujuan khususnya adalah untuk membersihkan teeth/gigi, dan meminimalisasi keausan. Sebuah bit harus dipilih gigi-giginya yang sesuai untuk formasi yang akan dibor.

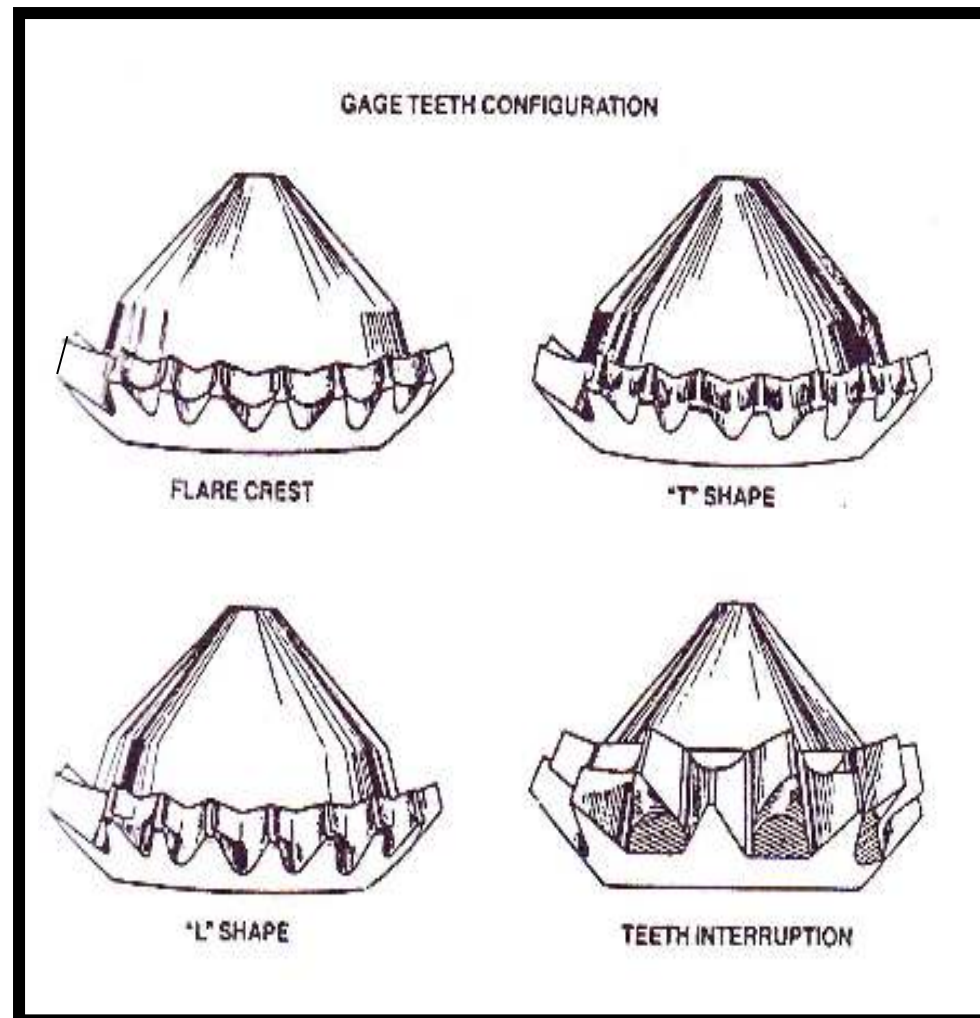
Jenis mekanisme formasi akan mempengaruhi rancangan bit dan gigi-giginya. Formasi lunak dibor dengan pemotongan batuan yang akan sangat efektif dilakukan dengan teeth/gigi yang panjang. Sedangkan formasi yang keras akan memerlukan lebih banyak teeth/gigi yang lebih pendek (lihat **Tabel III-18, Gambar 3.72**). Perhatikan bahwa panjang tooth akan turun dengan semakin kerasnya formasi, sedangkan jumlahnya akan naik.



**Gambar 3.74.**  
**Teeth Interfit <sup>4)</sup>**

Fitur bit khusus untuk drillbit adalah kedalaman tooth interfit, jet circulation pada bit dirancang untuk membersihkan lubang sebagai fungsi utamanya. Karena itu pembersihan teeth dapat menjadi masalah serius pada formasi yang halus dan lengket. Teeth interfit ditunjukkan pada **Gambar 3.74** diatas yang tujuannya untuk membersihkan cone yang akan meminimalkan balling. Selain itu teeth interfit membuat desain bit menjadi lebih lebar dan kuat.

Teeth dirancang untuk meminimalkan kelebihan keausan gauge yang sering digunakan pada heel row. Beberapa tipe khusus ditunjukkan pada **Gambar 3.75**. Desain teeth dapat meliputi desain T, L atau bentuk jaring.



**Gambar 3.75.**  
Desain Teeth dapat Meliputi Desain T, L atau Bentuk Jaring <sup>4)</sup>



Insert bit menggunakan tungsten carbide yang ditekan ke dalam cone. Beberapa jenis-jenis insert ditunjukkan **Gambar 3.77** dan **3.78**.

Pengkelasan/Pembagian teeth merupakan pertimbangan penting pada pemilihan bit dan optimasi. Grading/tingkatan meliputi evaluasi keseragaman keausan tooth dan melihat kondisi abnormal seperti kerusakan bit. Keausan bit diukur dengan delapan kondisi seperti pada **Gambar 3.79**. Bit yang telah digunakan dianggap paling buruk jika telah aus barisan gigi-giginya. Jika bit teeth telah aus 3/8 dari kondisi aslinya, hasilnya dilaporkan sebagai T-3.

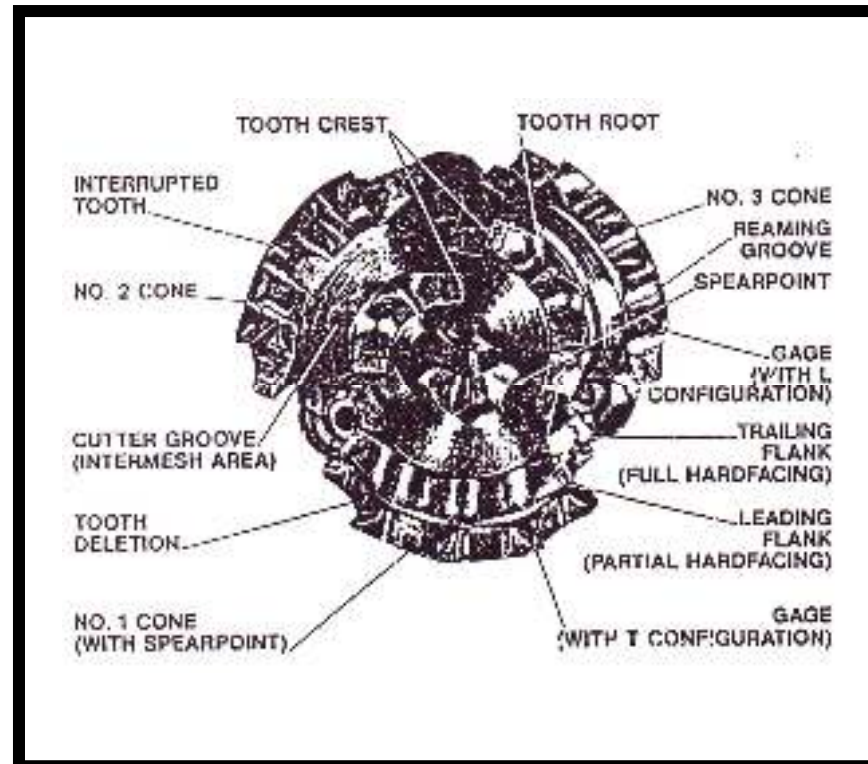
Beberapa notasi grading dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi keausan bit tooth :

Kondisi bit	Notasi
Teeth patah	BT
Balled up	BU
Cone bergeser	CD
Cored	CR
Kehilangan kepadatan	LT
Off-center	OC
Gauge membuldar	RG
Keausan seragam	UW
Gauge aus	WG

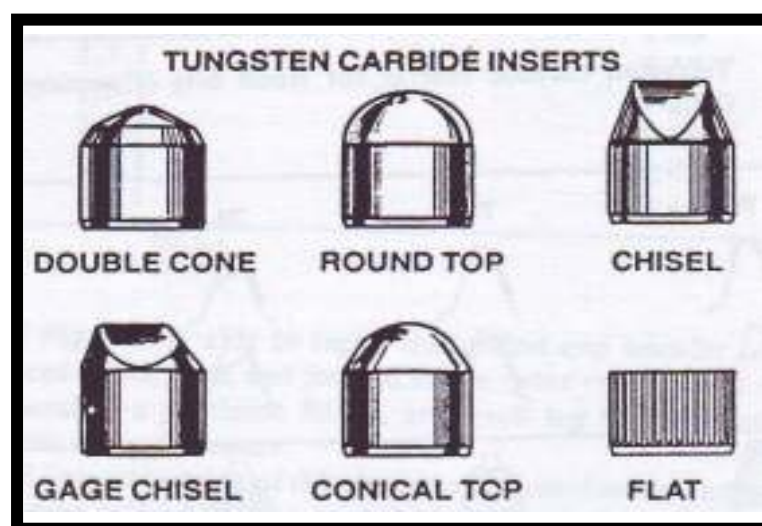
Pengklasifikasian/pengkelasan teeth dapat membantu menentukan bit berikutnya untuk dijalankan di sumur. Grade tooth T-1, T-2, T-3 menunjukkan formasi memiliki level abrasive yang kecil, jadi digunakan bit untuk formasi lunak. Jika bit grade 1,3,1 (kode IADC) setelah bit dijalankan, tipe bit harus diganti dengan 1,1,1 atau 1,2,1 jika bit tidak ditarik karena alasan bearing. Sebaliknya jika grade bit 1,3,1 kelas bit T-6, maka bit yang baru akan digunakan seharusnya 1,4,1 atau 2,1,1 dengan asumsi tidak ada perubahan fitur.

**Bearing.** Cone yang terletak pada pin bearing dan membuatnya dapat melakukan gerakan memutar dengan susunan beberapa bearing, ditunjukkan **Gambar 3.76**. Bearing ini adalah tipe roller, nose bushing (friction) atau thrust button dan ball. Setiap bearing memiliki tujuan tertentu selama operasi pemboran.

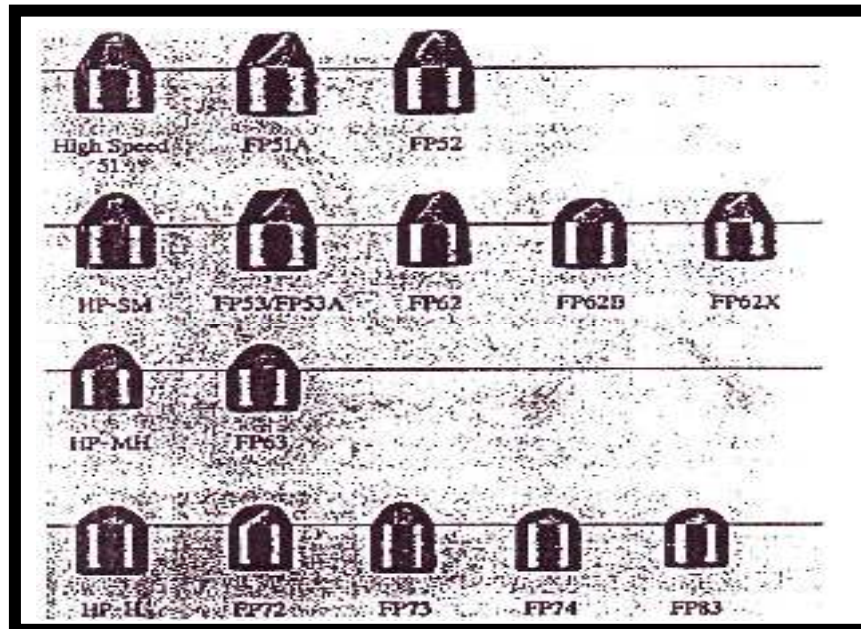




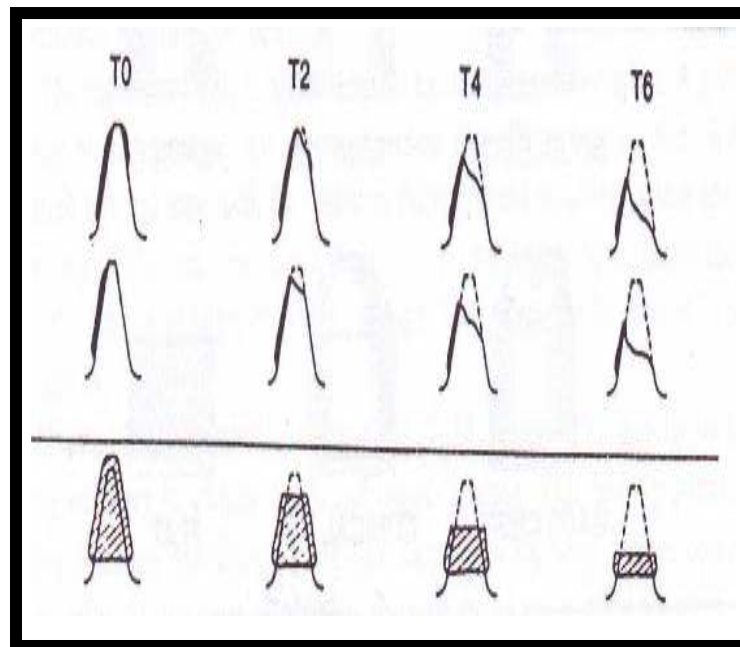
Gambar 3.76.  
Penamaan Milled Tooth Bit <sup>11)</sup>



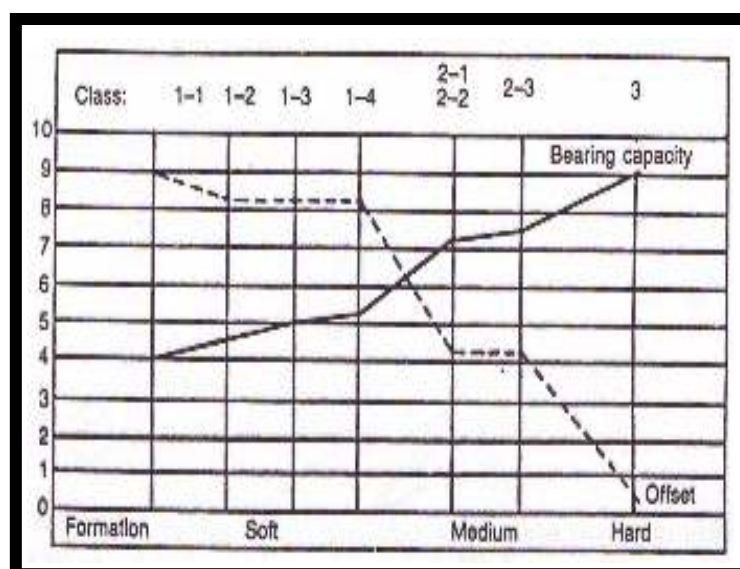
Gambar 3.77.  
Tungsten Carbide Insert <sup>11)</sup>



Gambar 3.78.  
Tungsten Carbide Insert <sup>11)</sup>



Gambar 3.79.  
Pelapisan pada Gigi Bit <sup>11)</sup>



**Gambar 3.80.**  
**Bearing Capacity <sup>11)</sup>**

**Tabel III-19.**  
**Hubungan antara Beberapa Tipe Bit dengan Bearing Capacity <sup>11)</sup>**

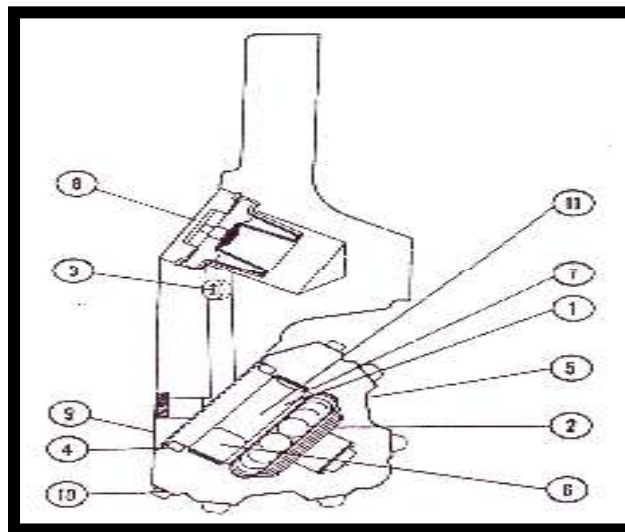
IADC Code	Bearing Capacity**
1,1,1	1.00
1,2,1	1.15
1,3,1	1.20
2,1,1	1.35
2,2,1	1.45
3,1,1	1.45

Keterangan : \*) *Relative Values ( Harga / Nilai relatif bearing capacity )*

Beban radial pada bit ditahan oleh bearing luar dan dalam. Bearing luar adalah roller bearing; bearing dalam adalah nose bearing atau friction. Porsi friction pada nose bearing terdiri atas bushing yang di-casehardened secara khusus yang ditekan ke dalam ujung dalam cone, dan kepingan pria atau pilot pin di kakinya di-hardfaced dengan material khusus dengan kombinasi bushing, menunjukkan koefisien friksi yang rendah untuk menahan keausan.

Baris bearing tengah adalah barisan ball bearing yang menahan beberapa daya dorong, terutama beban longitudinal. Pengaruhnya, ball bearing menjaga cone pada bearing pin. Pada bit yang besar, friction atau nose bearing digantikan dengan tambahan baris roller bearing.

Kapasitas bearing dipengaruhi oleh kekerasan formasi. Diameter bit telah menunjukkan ukuran maksimum cone yang mempengaruhi ukuran bearing. Bit untuk formasi lunak menggunakan teeth yang panjang untuk kecepatan pemboran yang optimum yang menyebabkan sedikitnya ruang untuk bearing di dalam cone. Sebaliknya, pada formasi yang keras digunakan bit dengan teeth yang pendek yang menyebabkan penggunaan bearing dengan diameter lebih besar. Efek ini dapat dilihat pada **Tabel III-19** dan **Gambar 3.80**.



**Gambar 3.81.**

**. Material yang Ditanamkan di Cone Seperti pada Bagian #7 (Special Alloy) <sup>11)</sup>**

Sistem jurnal-bearing ditunjukkan **Gambar 3.76**, meningkatkan kapasitas struktur bearing untuk menahan unit bit dan beban benturan. Struktur bearing ini membutuhkan tingkat presisi tinggi dalam pembuatannya. Pada rancangan , jurnal-bearing solid roller bearing dihilangkan. Di sekitar area struktur bearing ini, metal keras yang sesuai dipasangkan di cone. Material yang ditanamkan di cone, seperti ditunjukkan **Gambar 3.81**, bertujuan untuk menghilangkan dan mentransfer panas yang berasal dari gesekan permukaan cone dan jurnal pada cone luar dengan cepat. Material yang ditanam ini kemudian disatukan dengan penyelesaian yang presisi, dan masing-masing kaki cocok dengan tiap cone dengan nilai toleransi yang sedikit.

Solid jurnal bearing dari desain dan manufaktur ini dapat menahan beban unit yang lebih besar dibandingkan roller bearing, dan bit dapat bertahan lebih lama sebelum jurnal aus atau kelelahan terjadi. Inner bearing pada desain solid journal bearing menahan struktur yang sama dengan ball bearing dan memiliki tipe yang serupa dengan struktur bearing friction. Kapabilitas beban thrust akan meningkat dengan menghilangkan pilot pin bushing pada cone, casehardening pada lubang inner bearing, dan pemasangan logam keras pada kaki jurnal thrust face.

Peringkat bearing dari bit yang digunakan penting dilakukan untuk menjalankan bit di masa mendatang. Bearing diberi peringkat berdasarkan delapan tingkat keausan bearing. Misal grade B-3 menunjukkan 3/8 umur bit bearing telah digunakan. Tidak seperti grading pada teeth, evaluasi bearing sangat subjektif. IADC membuat beberapa panduan sebagai berikut :

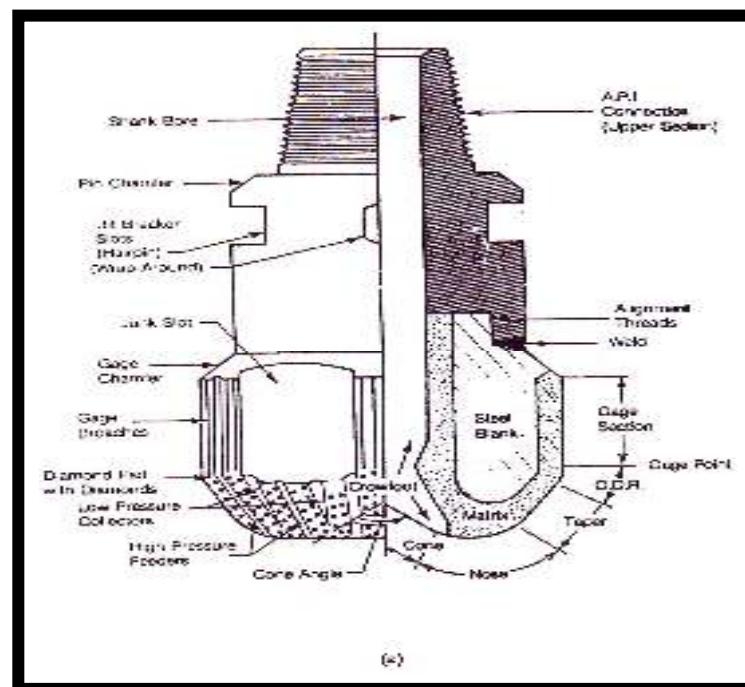
Umur bearing yang telah digunakan	Kode	Keterangan
1/8	B-1	
2/8	B-2	Bearing rapat
3/8	B-3	
4/8	B-4	Bearing rapat tapi telah aus
5/8	B-5	
6/8	B-6	Bearing renggang
7/8	B-7	
8/8	B-8	Bearing terkunci atau hilang

IADC juga membuat beberapa singkatan berkaitan dengan kondisi bearing sebagai berikut

Roller rusak	BR
Bearing hilang	LB
Roller hilang	LR
Penutup efektif	SE
Penutup gagal	SF
Penutup dipertanyakan	SQ

#### 3.4.3.4. Metallurgy Diamond Bit

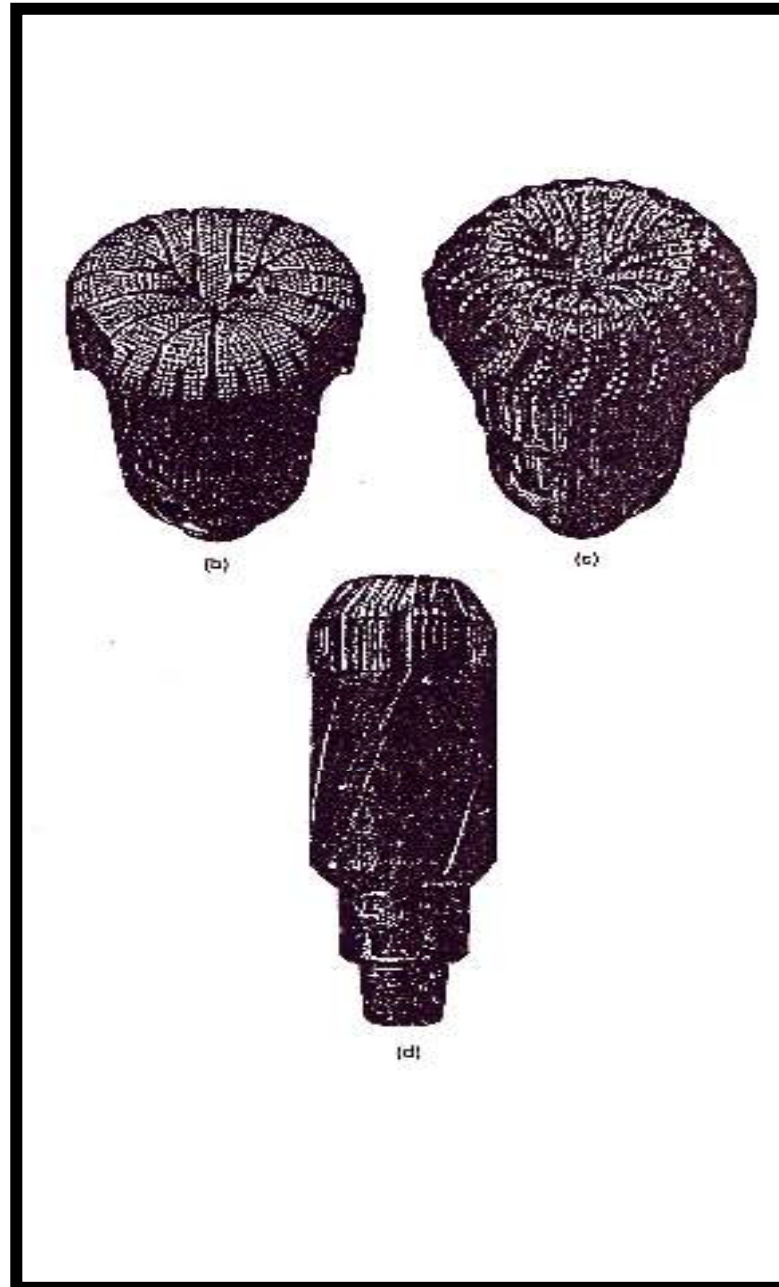
Intan yang dilekatkan pada matrik telah digunakan sejak zaman dinasti-dinasti di Cina, penggunaan intan di zaman modern untuk eksplorasi mineral menjadi hal yang biasa pada awal 1900. Sifat alami intan yang tahan terhadap keausan menjadikannya kompetitif dalam praktik-praktik pemboran saat ini, meskipun harganya sangat tinggi. Bit intan digunakan pada pemboran berputar/rotary konvensional, turbin dan operasi coring.



**Gambar 3.82.**  
**Penamaan pada Diamond Bit ;(a) Untuk Formasi yang Keras dan Lunak <sup>11)</sup>**



Seperti pada produk lain, rancangan dan aplikasi bit intan harus dipahami untuk menghasilkan hasil yang optimal dan ekonomis. Kombinasi hidrolika fluida ditambah dengan pemilihan dan aransemen intan membuat tujuan tadi dapat dicapai pada sebagian besar jenis formasi.



**Gambar 3.83.**  
**((b),(c)) Turbine Drilling Bit ; (d) Courtesy NL Hycalog <sup>11)</sup>**

Struktur bit intan berbeda dengan bit roller cone (lihat **Gambar 3.82**). Struktur matrik yang dilekatkan intan sedikit berbeda dari gigi baja atau insert bit. Fluida pemboran harus mengalir di permukaan bit untuk membersihkan dan mendinginkan intan pada bit.

Mekanisme penembusan batuan dengan bit intan sedikit berbeda dengan menggunakan steel tooth atau insert bit. Intan akan menempel pada formasi dan kemudian menariknya dari permukaan batuan tanpa diangkat atau ditempelkan kembali, seperti pada penggunaan bit roller cone. Mekanisme penembusan ini dapat digunakan pada batuan yang lunak, medium atau keras.

Beberapa karakter fisik dari bit intan penting diketahui ketika mempertimbangkan penggunaannya. Pertimbangan utama adalah kekuatan pemotongan yang rendah dan ketahanan terhadap benturan muatan. Karena itu diperlukan berat bit yang lebih ringan, dan karena itu juga perlu untuk memastikan bahwa drillstring benar-benar stabil untuk meminimalkan pembelokan dan kekuatan pemotongan.

Bit intan khususnya digunakan untuk memperoleh biaya pemboran per-foot yang lebih rendah. Pengurangan biaya akan terjadi jika bit intan tersebut mendapatkan rate pemboran yang lebih besar daripada roller bit pada kondisi tertentu. Pengurangan dalam trip untuk mengubah bit juga menjadi faktor positif penggunaan diamond bit. Pabrikan juga dapat dikonsultasikan mengenai perkiraan biaya atau evaluasi performa diamond bit untuk suatu sumur.

Banyak jenis struktur diamond bit dibuat untuk memenuhi sistem operasi yang luas. Pemilihan seringkali dilakukan atas dasar alasan ekonomi, formasi yang akan dibor, dan jenis rotary drill bit (jenis cone) yang biasanya digunakan pada suatu area. Sebagian besar pabrik diamond bit telah membuat suatu petunjuk perbandingan antara produk mereka dengan roller cone bit. **Tabel III-20** menunjukkan panduan produk-produk Cristensen.

Kode menggunakan tiga karakter yang diawali dengan huruf D yang menunjukkan produk diamond. **Tabel III-21** menunjukkan grafik produk diamond NL Hycalog.



**Evaluasi penggunaan diamond bit.** Seperti pada peralatan yang lain, diamond bit juga akan menunjukkan tanda-tanda keausan. Beberapa keausan dianggap sebagai failure; sedangkan keausan lain harus dikualifikasikan. Failure dapat dianggap sebagai kerusakan pada fungsi atau operasi bit. Pada beberapa kasus definisi ini digunakan karena diamond bit berhenti bekerja atau berhenti menjalankan fungsinya. Failure dapat juga disebut sebagai falling short. Hal ini terjadi ketika ROP terlalu kecil, penurunan tekanan terlalu tinggi, atau suatu kombinasi dimana jika berlanjut, maka diamond bit akan menjadi tidak ekonomis atau praktis dalam penggunaannya. Failure juga disebutkan ketika bit dijalankan secara ekonomis berdasarkan interval yang telah ditentukan, namun pengamat dari bit yang digunakan mengatakan bit tersebut telah terdeteksi mengalami keausan. Hal ini dapat terjadi karena erosi fluida lokal, hilangnya diamond atau beberapa fenomena lain yang tidak berhubungan dari masalah ekonomi atau keseluruhan performa bit, namun pada kondisi terakhir, bit diputuskan tidak dapat digunakan.

Persoalan keausan bit dapat dibagi menjadi tiga macam kategori: 1) diamond, 2) matriks, 3) permasalahan lain.

Keausan pada diamond dapat disebabkan dari salah satu atau kombinasi dari failure di bawah ini:

- Grafitisasi
- Oksidasi
- Kerusakan besar
- Abrasi atau pengikisan microscopic

Grafitisasi pada diamond terjadi ketika temperaturnya melebihi 2500°F pada atmosfer lembab. (pada lingkungan tertentu, temperaturnya dapat lebih kecil dari itu). Kristal diamond pada saat itu akan terdegenerasi menjadi kristal grafit yang lebih stabil. Grafitisasi biasanya terjadi pada permukaan diamond pada saat digunakan untuk membor. Grafitisasi juga terjadi di dalam diamond karena panas yang tinggi yang cukup untuk menyebabkan atom karbon di dalam bit mengkristal, sehingga menyebabkan diamond berubah atau tergrafitisasi. Karena kristal grafit menempati daerah yang lebih luas, kristal diamond bagian luar akan retak untuk

mengakomodasi kristal grafit untuk tumbuh. Hal ini menyebabkan kerusakan batuan dan tidak semestinya dibingungkan oleh thermal stress cracking.

Oksidasi diamond mulai terjadi pada suhu antara 900 °F dan 1400°F dalam kondisi terdapat oksigen. Karbon dalam diamond dan oksigen bebas diubah menjadi karbon dioksida dan karbon monoksida, yang keduanya berupa gas. Adanya oksigen bebas dalam lumpur pemboran; karena temperatur yang dibutuhkan untuk oksidasi ada, oksidasi di dasar sumur hampir pasti terjadi. Beberapa menganggap bahwa oksidasi adalah penyebab yang paling signifikan dari keausan diamond.

Kerusakan besar/ gross breakage terjadi ketika kekuatan diamond terlampaui atau ketika rekahan atau bidang perpotongan memiliki orientasi dimana akan menyebabkan benturan atau kekuatan tangensial pada diamond yang menjadi penyebab kerusakan. Meski sebagian besar diamond yang digunakan pada bit mengandung bagian yang retak, namun kerusakan ini meskipun tidak sering tapi kerusakannya dalam skala besar.

Abrasi, atau pengikisan mikroskopis pada diamond disebabkan oleh benturan-benturan yang terus-menerus dengan formasi, pasir yang telah tercabut dari formasi dan padatan yang terbawa oleh lumpur pemboran. Ketika terjadi benturan, akan terjadi pengikisan yang sangat kecil pada diamond, area yang tajam yang mencuat keluar akan menjadi datar. Pengikisan dan pengasahan yang terus-menerus ini menyebabkan diamond kehilangan massa dan wear flat/ keausan menjadi rata akan terjadi.

Keausan matrik. Yang paling sering pada keausan matriks terjadi karena erosi fluida. Semua bit diamond akan menunjukkan erosi fluida sampai tingkat tertentu ketika digunakan. Besarnya keausan ini proporsional dengan lamanya waktu penggunaan bit dan kondisi hidrolis dimana bit itu digunakan.

Erosi fluida disebabkan oleh fluida pemboran yang melewati permukaan bit dengan tingkat energy yang kuat dengan padatan yang menggesek matriks bit. Ketika kecepatan fluida meningkat, energi yang dikeluarkan juga meningkat. Tingkat energi yang tinggi membantu mempercepat pemboran dengan menghancurkan dan mengangkat formasi, namun pada saat yang sama juga mempercepat tingkat keausan matrik. Rate keausan matrik dapat meningkat dengan penambahan padatan abrasi

halus ke lumpur pemboran. Padatan ini sangat kecil (-200 mesh) dimana mereka tidak terdeteksi pada laporan lumpur namun mereka ada dan sangat merusak umur bit. Namun dengan konstruksi material saat ini, erosi jarang menjadi masalah yang serius.

**Tabel III-20.  
Pemilihan Diamond Bit Berdasarkan Tipe Formasi dan Tipe Roller Bit <sup>11)</sup>**

Formation	Rock Type	Rock Bits	Step Bits	Compact Bits	Dia. Bits	BallsSet Bits	Downhole Motor Bits	Core Bits
Soft formation with sticky layers and low compressive strength	Gumbo	S35		R481 (R411)				RC473 (RC13)
	Clay	J11		R448 (R401)			R448 (R401)	RC444 (RC4)
	Mud	Y12	K810	R381 (R321)			K810	
Soft formation with low compressive strength and high drillability	Mud	O5C1G			D38			RC475 (RC6)
	Salt	U7		R382 (R311)	D311		K830	C18
	Anhydrite	FP51	K820	R426 (R11)	D262		K831	
	Shale	C12		R482 (R401F)	D303			
Salt to medium formation with low compressive strength interbedded with hard layers	Sand	J35	K831		D311		R419 (R4)	RC476 (RC6)
	Shale	S89F		R423 (R261F)			T18	C18
	Chalk	FP53					R423 (R261F)	
		F7	K839	R419 (R4)			K839	C22
Medium to hard formation with high compressive strength and small abrasive layers	Shale	J46			D331		R419 (R4)	
	Mudstone	E4		R486 (R401F)			K851	
	Limestone	C13					S225 (D187)	C701
							K852	
Formation	Rock Type	Rock Bits	Step Bits	Compact Bits	Dia. Bits	BallsSet Bits	Downhole Motor Bits	Core Bits
	Sandstone	FP62				S225 (D187)	S226 (D185)	SC226 (C201B)
Hard and dense formation with very high compressive strength, but non-abrasive	Limestone	J55	K851		D331	S226 (D185)	S225 (D187)	C23
	Dolomite	M89F	K852				T51	SC226 (C201B)
	Anhydrite	FP63					K859	
		F57	K859		D41	S246 (D331B)	T52	
Hard and dense formation with very high compressive strength, and some abrasive formation layers	Siltstone	J77			D24			SC236 (C23B)
	Sandstone	Y31	K869				S249 (S240)	
	Mudstone	H88					T54	SC249 (SC240)
		F7						
Extremely hard and abrasive formation	Quartzite	J99				S249 (S240)	S249 (S240)	SC249 (SC240)
	Volcanic	H100						

Courtesy Christmas Diamond Products

**Tabel III-21.**  
**IADC Diamond Drill Bit Classification Chart <sup>11)</sup>**

Formation	Bit Design Features				
	IADC Series Number	Stone Size Carats	Step Type 1	Long Taper 2	Short Taper 3
<b>Soft</b>	0				JETPAX
Weakly banded shales, sands, evaporites, and other formations with low compressive strengths	1	1½-2			
	2	1¼		901	
	3	1		901	
	4	¾		901	
<b>Medium Soft</b>	0				JETPAX
Medium banded interbedded sands and shales, granular limestones, and most unaltered precipitates	1	¾		901 MS1 730	
	2	½-¾		901 MS1 730	
	3	½		901 MS1 730	
	4				
<b>Medium</b>	0				
Hard shales, sandy shales, dolomites, crystalline limestone, and other formations of similar compressive strengths	1	½		901 730	
	2	¼-½		901 730	
	3	¼		901 730	
	4	¼		901 730	
<b>Medium Hard</b>	0				
Calcareous sands, siliceous limestones, altered dolomites, and pressure compacted formations	1	½		901 730	
	2	¼		901	
	3	¼		901 730	
	4	¼		901 730	
<b>Hard</b>	0				
Well-cemented quartzitic sands, schists, altered siltstones, and other rocks with high compressive strengths	1	¼		901 730	
	2	¼		901 730	
	3	¼		901 730	
	4	¼			

Courtesy: NL Hydrolog.

Tabel III-21.  
(Lanjutan)<sup>11)</sup>

Bit Design Features					
Non-taper 4	Downhole Motor 5	Side-track 6	Oil Base 7	Core Ejector 8	Other 9
TURBOPAX					
	MSIT	ST	901S	901CE	204 BI CNTR
	MSIT 901T	ST WM	901S	901CE	204 BI CNTR
	MSIT 901T				
TURBOPAX					
	MSIT 901 730T	ST	901S	901CE	204 BI CNTR
	MSIT 901 730T	ST	901S	901CE	204 BI CNTR
	MSIT 901 730T	ST WM	901S	901CE	204 BI CNTR
MIT 901T 730T					
	MIT 901T 730T	ST	901S	901CE 730CE	204 BI CNTR
	MIT 901T 730T	ST	901S	901CE 730CE	204 BI CNTR
	MIT 901T 730T	ST	901S	901CE 730CE	204 BI CNTR
	MIT 901T 730T	ST WM	901S	901CE 730CE	204 BI CNTR
525 501	MIT 901T 730T	ST	901S	730CE	204 BI CNTR
525 501	MIT 901T 730T	ST	901S	730CE	204 BI CNTR
525 501	MIT 901T 730T	ST	901S	730CE	204 BI CNTR
525 501	MIT 901T 730T	ST WM	901S	730CE	204 BI CNTR
525 501	MIT 901T 730T	ST	901S	730CE	
525 501	MIT 901T 730T	ST	901S	730CE	
525 501	MIT 901T 730T			730CE	
525 501	MIT	WM			

Degradasi matriks dapat juga disebabkan karena panas. Karena suatu hal fluida pemboran tidak dapat mencapai suatu bagian pada bit dan mendinginkannya, panas yang terbentuk tidak dapat dihilangkan. Pembentukan panas ini dapat menyebabkan gangguan panas dan dapat mengganggu umur serta ROP ( Rate Of Penetration ).

**Keausan lain.** Bentuk keausan yang lain diklasifikasikan secara umum dan tidak hanya keausan namun kerusakan bagian bit yang tidak secara langsung terlibat dalam penggalian formasi dan fungsi pengangkatan. Keausan ini meliputi shank, sambungan API, akibat washout pada drillstring, dan fungsi mekanik dari operasi pemboran yang secara premature menyebabkan bit tertarik (misal LCM, twistoff, dropping).

**Analisis ketumpulan bit.** Diamond bit cenderung tersumbat ketika shale dan batugamping halus dan lengket ketika dibor, dengan tingkat energy hidrolik yang rendah. Jalan fluida dapat mampat dan fluida akan mengalir melalui jalan lain. Formasi yang terimpact cenderung untuk terbangun dan memadat. Pada aplikasi horsepower yang rendah, tidak biasa untuk menarik bit yang mengalami sepertiga bagian jalur fluidanya mampat, dengan matrik disekitar area ini menunjukkan retak akibat panas. Shale bertindak sebagai bantalan pada titik ini dan panas yang dihasilkan tidak dapat dihilangkan, karena itu matriks akan mengembang dan retak.

**Loss of gauge.** Gauge loss pada diamond bit dapat disebabkan oleh berbagai sebab. Yang pertama dikarenakan pelebaran lubang yang terlalu cepat dengan beban yang terlalu besar. Karena diamond bit tidak memiliki sistem distribusi hidrolik sampai mencapai dasar, maka tidak ada cara yang efektif untuk mendinginkan diamond dalam gauge tersebut. Jika beratnya terlalu besar atau digunakan pemboran berputar atau pelebaran untuk jarak yang panjang, gauge diamond dapat kelebihan beban dan hancur bahkan sebelum mencapai dasar sumur. Penyebab lain dari kehilangan gauge diamond adalah ketika diamond yang dipasang pada baris luar diameter (ODR/Outer Diameter Range) terlalu lebar dan tidak cukup banyak. Karena kecepatan angular bit akan maksimal pada gauge, diamond ini akan berlebihan kerjanya dan kurang terlumasi. Aliran lumpur lebih sulit dikendalikan di dekat

gauge, sehingga diamond tidak didinginkan secara efisien. Sehingga batu gauge tidak dapat bekerja.

Cara terbaik untuk mengatasi masalah ini adalah meminimalkan pelebaran yang dilakukan menggunakan diamond bit dan melakukan pelebaran dengan hati-hati dan pelan ketika menggunakan diamond bit. Selain itu, jika terjadi masalah pada gauge, gunakan diamond yang lebih kecil pada ODR dan gauge akan meningkat ketahanannya terhadap keausan.

**Cored center.** Di masa lalu, center coring adalah penyebab umum kerusakan bit. Center coring terjadi ketika diamond didalam dan di sekitar ujung hancur atau hilang. Formasi mulai mengauskan material matriks dan utamanya karena bit mencoba untuk memotong core kecil. Tingkat penetrasi melambat atau berhenti, dan mungkin kenaikan tekanan pada standpipe menjadi jelas. Umumnya penyebabnya adalah 1) rancangan yang tidak tepat, 2) diamond yang tidak tepat (terlalu besar), 3) pecah atau retak formasi 4) perlapisan yang buruk, 5) stabilisasi yang tidak tepat, dan 6) logam asing.

Penggunaan diamond kecil di ujung bit biasanya dapat mengatasi masalah ini. Modifikasi core ejector dapat juga membantu. Peningkatan stabilisasi selalu direkomendasikan.

**Ring out.** Kerusakan ring out terlihat seperti alur cincin O yang muncul di mana saja di muka pemboran. Yang paling sering adalah di dalam nose, namun sebenarnya dapat terjadi di mana saja. Suatu ring out dapat dikenali di permukaan dengan peningkatan yang cepat pada tekanan standpipe yang diikuti penurunan ROP (Rate Of Penetration).

Penstabilan yang tidak tepat merupakan faktor utama. Pecah formasi, timbunan sisa, erosi, dan diamond yang terlalu sedikit juga berperan pada terjadinya kerusakan ring out. Modifikasi desain, diamond yang lebih kecil, peningkatan densitas, dan pemakaian carbon diamond yang bijaksana dapat mengurangi efek samping yang tidak diinginkan ini.

**Rounded gauge.** Bit baru memiliki bagian gauge dengan silindris sempurna. Adakalanya bit yang digunakan akan tertarik dan gauge akan membundar. Bit tersebut tidak harus keluar dari gauge, namun kemungkinan besar juga dapat keluar

dari gauge. Hal ini terjadi karena peristiwa perputaran yang oleng dan berhubungan dengan ketidakcukupan stabilisasi di dasar sumur dan pendulum hook-ups. Jika peningkatan stabilisasi tidak dipilih, maka susunan gauge yang lebih tebal dan lebar akan mengatasi masalah ini.

**Erosi matriks.** Erosi matriks bit hampir selalu muncul pada bit yang digunakan. Erosi berat biasanya berhubungan dengan tingkat energi hidrolik yang tinggi yang digunakan untuk membor formasi lunak dan medium. Area di dalam nose umumnya menunjukkan akibat erosi yang terbesar. Hal ini karena akselerasi fluida menyebabkan turbulensi fluida yang ekstrim karena perubahan arah jalur aliran fluida. Hal ini memaksimalkan energi yang diberikan kepada matrik sehingga menyebabkan erosi. Hal ini diperparah dengan meningkatnya kandungan padatan yang tidak diinginkan (terutama pasir abrasive) yang biasanya disebabkan oleh pemboran cepat. Erosi adalah hal yang normal, namun harus dilakukan pembedaan: apakah erosi itu normal atau berlebihan? Dikarenakan banyak faktor yang terlibat dan sifat mekanisme erosi yang rumit, hal ini tidak mudah dijelaskan. Tergantung pada penyebabnya, salah satu dari solusi berikut dapat digunakan: horsepower hidrolik yang lebih kecil, lumpur yang lebih bersih dan mengubah desain bit atau tonjolan diamond yang lebih sedikit.

**Kerusakan diamond.** Kerusakan diamond sebagai akibat dari kekuatan tangensial. Ketika kekuatan diamond dilampaui, retakan sepanjang bidang belah terjadi dan semua atau sebagian besar menunjukkan pembelahan batu. Pada bit yang digunakan dapat dikenali dengan permukaan yang datar, sangat reflektif. Peristiwa kerusakan acak tidak signifikan pada sebagian besar bit, namun terkadang kerusakan tersebut menyebar dan mengganggu performa. Penyebabnya karena batu diamond terlalu lebar, pecah formasi, timbunan runtuh, terlalu sedikit jumlah diamondnya, WOB (Weight On Bit) yang berlebihan, penstabilan yang tidak tepat, dan erosi.

Masih banyak usaha yang harus dilakukan untuk meningkatkan umur peralatan pemboran, terutama pemilihan drillstem pada lingkungan pemboran yang kurang baik/buruk. Oleh karena itu, Pertimbangan metallurgi menjadi sangat penting untuk saat ini, karena sangat diperlukan untuk pemboran-pemboran yang dalam dan



## **MODUL IV**

### **MATERIAL LUMPUR PEMBORAN**

Pada mulanya orang hanya menggunakan air saja untuk mengangkat serpih pemboran *cutting*. Kemudian dengan berkembangnya sistem pemboran, lumpur mulai digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat, dan zat-zat kimia yang ditambahkan dan akhirnya digunakan pula udara dan gas untuk pemboran walaupun lumpur tetap bertahan.

Secara umum lumpur pemboran dapat dipandang sebagai tiga komponen atau fasa, yaitu:

1. Komponen cair (terdiri dari air dan minyak).
2. Komponen padatan (*solids*), *Reaktif solids* dan *Inert solids*.
3. Additive, yaitu berupa material-material tambahan yang dapat berbentuk padatan maupun cairan.

#### **3.2.1. Komponen Cair**

Zat cair dari lumpur bor merupakan komponen dasar dari lumpur yang mana dapat berupa air atau minyak ataupun keduanya yang disebut dengan emulsi. Emulsi ini dapat terdiri dari dua jenis emulsi minyak didalam air atau emulsi di dalam minyak.

##### **3.2.1.1. Air**

Lebih dari 75% lumpur pemboran menggunakan air, disini air dapat dibagi menjadi dua, yaitu : air tawar dan air asin, sedangkan air asin dapat dibagi menjadi dua, yaitu : air asin jenuh dan air air asin tak jenuh. Untuk pemilihan air hal ini perlu disesuaikan dengan lokasi setempat, manakah yang mudah didapat dan juga disesuaikan dengan formasi yang akan ditembus.

##### **3.2.1.2. Emulsi**

*Invert emulsion* adalah pencampuran minyak dengan air dan mempunyai komposisi minyak 50 – 70 % (sebagai komponen yang kontinu) dan air sebanyak 30 – 50 % (sebagai komponen diskontinu), emulsi terdiri dari dua macam, yaitu : *Oil In Water Emulsion* dan *Water In Oil Emulsion*

1. *Oil In Water Emulsion*

Disini air merupakan komponen yang kontinu dan minyak sebagai komponen teremulsi. Air bisa menacapai sekitar 70 % volume, sedangkan minyak sekitar 30 %

2. *Water In Oil Emulsion*

Disini yang merupakan komponen kontinu adalah minyak, sedangkan komponen yang teremulsi adalah air. Minyak bisa mencapai sekitar 50 –70 %, sedangakn air 30 – 50 %.

### **3.2.1.3. Minyak**

Kalau komponen cair berupa minyak, maka minyak yang digunakan merupakan minyak yang sudah diolah dengan sifat :

1. *Aniline Number* yang tinggi.

*Aniline Number* merupakan suatu angka yang menunjukkan kemampuan untuk melarutkan karet. Makin tinggi *Aniline Number* suatu minyak, maka kemampuan untuk melarutkan karet semakin kecil. Dalam operasi pemboran banyak peralatan yang dilewati lumpur, berupa karet, seperti pada pompa, packer, plug untuk penyemenan dan lain-lain.

2. *Flash Point* yang tinggi.

*Flash Point* adalah suatu angka yang menunjukkan dimana minyak akan menyala. Makin rendah *Flash Point* suatu minyak, maka penyalaan akan cepat terjadi, atau minyak makin cepat terbakar.

3. *Pour Point* yang tinggi.

*Pour Point* adalah suatu angka yang menunjukkan pada temperatur berapa minyak akan membeku. Jadi kita tidak menginginkan lumpur yang cepat membeku.

4. Molekul minyak yang stabil, dengan kata lain tidak mudah terpecah-pecah.
5. Mempunyai bau serta *Fluoresensi* yang berbeda dengan minyak mentah (*crude oil*). Kalau tidak demikian maka akan sulit menyelidiki apakah minyak berasal dari formasi yang dicari atau berasal dari bahan dasar dari lumpur.

### 3.2.2. Komponen Padatan

Komponen padatan disini merupakan komponen pembentuk campuran lumpur berupa padatan reaktif (*reaktif solid*) dan padatan tidak reaktif (*inert solid*).

#### 3.2.2.1. Reaktif Solid

*Reaktif Solid* yaitu padatan yang bereaksi dengan air membentuk koloid (clay). Padatan ini bereaksi dengan sekelilingnya untuk membentuk koloidal. Dalam hal ini clay air tawar seperti bentonite menghisap (absorp) air tawar dan membentuk lumpur. Istilah “yield” digunakan untuk menyatakan jumlah barrel Lumpur yang dapat dihasilkan dari satu ton clay agar viscositas lumpurnya 15 cp.

*Reaktif Solid* merupakan suspensi reaktif terdispersi dalam fasa kontinyu (sifat koloid lumpur yang merupakan lembaran *clay* (lempung) yang berukuran 10 – 20 Amstrong dan terdispersi dalam fasa kontinyu air).

Semakin kecil ukuran partikelnya, maka luas bidang kontak antara partikel solids dengan cairan mediumnya, sehingga *interconnected properties* (sifat saling berhubungan) dengan medianya besar. Sifat partikel ini mempunyai gerak brown, yang terpenting dalam hal ini adalah :

- a. Adanya gerak tarik-menarik atom-atom pada permukaan akan membentuk endapan.
- b. Sedang dalam *absorpsi*, terbagi dalam *koloid hyprophilic* (menarik air) dan *hydrophobic* (tidak menarik air)

Pada *hyprophilic*, partikel menarik molekul air dan membentuk lapisan film yang disebut *cushion* (bantalan). Pada *hydrophobic*, partikel mempunyai muatan yang saling tolak-menolak dengan molekul air. Lumpur bor mengandung *hyprophilic* dan *hydrophobic*.

### 3.2.2.2. *Inert solid*

*Inert solid* merupakan komponen padatan dari lumpur yang tidak bereaksi dengan zat-zat cair lumpur bor. Dalam kehidupan sehari-hari pasir yang diaduk dengan air dan kita diamkan beberapa saat, akan turun ke dasar bejana dimana kita mengaduknya. Disini pasir disebut *inert solid*. Didalam lumpur bor *inert solid* berguna untuk menambah berat atau berat jenis lumpur, yang tujuannya untuk menahan tekanan dari formasi.

*Inert solid* dapat pula berasal dari formasi-formasi yang dibor dan terbawa oleh lumpur seperti *chert*, pasir atau *clay-clay non swelling*, padatan seperti ini bukan disengaja untuk menaikkan densitas lumpur dan perlu dibuang secepat mungkin (dapat menyebabkan abrasi dan kerusakan pompa).

Sebagai contoh yang umum digunakan sebagai *inert solid* dalam lumpur bor, adalah :

- *Barite* ( $\text{BaSO}_4$ )
- Oksida Besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
- Kalsium Karbonat ( $\text{CaCO}_3$ )
- *Galena* ( $\text{PbS}$ )

### 3.2.3. Additive Lumpur

Di dalam lumpur pemboran selain terdiri atas komponen pokok lumpur, maka ada material tambahan yang berfungsi mengontrol dan memperbaiki sifat-sifat lumpur agar sesuai dengan keadaan formasi yang dihadapi selama operasi pemboran. Berikut ini akan disebutkan beberapa bahan kimia tersebut, yaitu untuk tujuan : menaikkan berat jenis lumpur, menaikkan viskositas, menurunkan viskositas, menurunkan *filtration loss* dan lain-lain.

1. Bahan-bahan untuk menaikkan berat jenis adalah sebagai berikut :

- *Barite* ( $\text{BaSO}_4$ )

Mempunyai spesifik gravitasi antara 4,25 – 4,35, biasanya dipergunakan untuk operasi pemboran yang melewati zona gas bertekanan tinggi yang dangkal.

- *Galena* (PbS)

Mempunyai spesifik gravitasi 6,7 – 7,0, fungsi utamanya adalah untuk mematikan sumur apabila tekanan dari formasi yang besar.

- *Calcium Carbonat* (CaCO<sub>3</sub>)

Mempunyai spesifik gravitasi 2,75, material ini digunakan untuk lumpur jenis *oil base mud*. Kalsium karbonat biasanya dipergunakan untuk operasi pemboran yang dalam.

2. Bahan-bahan untuk menaikkan viskositas sebagai berikut :

- *Wyoming bentonite*, merupakan material yang berfungsi untuk menaikkan viskositas lumpur jenis *fresh water mud*, dimana tiap penambahan material ini kedalam air sebanyak 20 lb/bbl akan dapat memberikan viskositas sebesar kurang lebih 36 detik *mursh funnel*.
- *Attapulgate*, merupakan material *clay* yang berfungsi untuk menaikkan viskositas pada lumpur jenis *salt water base mud*.
- *CMC*
- *Starch*, dan beberapa senyawa polimer.

3. Bahan-bahan untuk menurunkan viskositas, antara lain :

- *Calcium ligno sulfonate*, sangat baik untuk dispersant pada *calcium treated muds* ataupun *lime treated muds*.
- *Phospat*, dipakai sebagai *thinner* pada *low pH muds* dimana pada temperatur tidak lebih dari 180 °F, karena pada temperatur tersebut *phospat* akan pecah menjadi *orthophospat* dan sering dipaaki untuk keadaan lumpur yang terkontaminasi dengan semen.
- *Quebracho*, dengan penambahan 2% dari volume lumpur dapat memperbaiki air tapisan dan menurunkan viskositas lumpur.
- *Lignite*, dapat digunakan dalam *water-base mud* pada temperatur sampai 400 °F.

- Bahan penurunan viskositas yang lainnya antara lain : *Chrome ligno sulfonate, Processed lignite, Alkaline.*
4. Bahan-bahan untuk menurunkan *filtration loss* :
- *Pregelatinized starch*  
Digunakan pada salt water muds pada temperatur di bawah 200 °F dan diproduksi dari sari pati jagung dan kentang.
  - *Sodium carboxymethyl cellulose*  
Tersedia dalam beberapa tingkatan tergantung dari derajat *polymerization*, tahan terhadap garam dan temperatur tapi tidak lebih dari 300°F.
  - *Dispersants*  
Contohnya adalah *lignites, lignosulfanates.*  
Mengurangi partikel clay menjadi jarak koloidal, dimana efektif terhadap permeabilitas filter cake dan dapat digunakan pada fresh water sitem ,temperatur stabil bervariasi tergantung pilihan
5. Bahan-bahan untuk mengatasi lost circulation :
- *Milmica*, merupakan material mika yang tidak mengikis peralatan dan mempunyai bentuk yang kasar.
  - *Kwik seal*, material yang sangat efektif untuk mencegah hilangnya lumpur pada formasi porous.
  - *Mill-plug*, merupakan material berbentuk butir, yang mempunyai strength sangat tinggi yang berfungsi untuk menutup formasi yang pecah.
  - Bahan material yang lain, seperti : *fiber, wood fiber*
6. Bahan-bahan untuk mencegah korosi :
- *Noxygen*, berfungsi sebagai katalisator *sodium sulfide* yang berupa tepung, digunakan untuk membersihkan oksigen yang dapat menimbulkan korosi. Material ini biasanya dipakai secara rutin pada operasi pemboran.
  - *Noxygen L*, berfungsi sebagai pembersih oksigen yang terdapat dalam lumpur, adapun bentuk dari noxygen ini berupa larutan dengan konsentrasi 11,2 lb/bbl ammonium sulfide.
7. Bahan-bahan pengontrol Ph :

- *Caustic Soda* (NaOH), mempunyai kadar alkohol yang tinggi dan berfungsi mengontrol pH pada *water base muds*.
  - *Potassium Hydroxide* dan *Calcium Hidroksida*, biasanya digunakan dalam lumpur untuk clay hidration inhibition.
8. Bahan-bahan sebagai *Fluccolant* :
- Fluccolant* adalah fasa kimia yang berfungsi untuk mempercepat pengendapan serbuk bor. Fasa kimia tersebut adalah :
- *Fluxit* (buatan Magcobar)
  - *Baroflac* (buatan Baroid)
9. Bahan-bahan sebagai *emulsifier*:
- Emulsifier* adalah fasa kimia untuk emulsi minyak dan air, antara lain :
- *Mogco Mul* (buatan Magcobar)
  - *Trimulsi* (buatan Baroid)
  - *Atlasol* (buatan Mil White)
  - *Imco – Ceox* (buatan IMC)

### 3.3. Jenis-jenis Lumpur Pemboran

Jenis-jenis lumpur pemboran dibedakan terutama berdasarkan fasa cairnya : air (water-base), minyak (oil-base) atau gas, sebagai berikut :

1. Water drilling mud
  - Fresh water mud (lumpur air tawar)
  - Salt water mud (air asin)
2. Oil drilling mud
  - Oil in water emulsion
  - Oil base dan Oil base emulsion mud
3. Gaseous drilling mud

#### 3.3.1. Fresh water mud

Adalah lumpur yang fasa cairnya adalah air tawar dengan (kalau ada) kadar garam yang kecil (kurang dari 10000 ppm = 1% berat garam).

## **1. Spud mud**

Spud mud digunakan untuk membor formasi bagian atas bagi conductor casing. Fungsi utamanya mengangkat cutting dan membuka lubang di permukaan (formasi atas). Volume yang diperlukan biasanya sedikit dan dapat dibuat dari air dan bentonite (yield 100 bbl/ton) atau clay air tawar yang lain (yield 35 – 50 bbl/ton). Tambahkan bentonite atau clay perlu dilakukan untuk menaikkan viscositas dan *gel strength* bila membor pada zone-zone loss. Kadang-kadang perlu ditambahkan *lost circulation material* dan densitas harus diperkecil.

## **2. Natural mud**

Natural mud dibentuk dari pecahan-pecahan cutting dalam fasa air. Sifat-sifatnya bervariasi tergantung dari formasi yang dibor. Umumnya tipe lumpur ini digunakan untuk pemboran yang cepat seperti pemboran pada *surface casing* (permukaan). Dengan bertambahnya kedalaman pemboran, sifat-sifat lumpur yang lebih baik diperlukan dan natural mud ini ditreated dengan zat-zat kimia dan *additive-additive koloidal*. Beratnya sekitar 9,1 – 10,2 ppg, dan viskositasnya 35 – 45 detik.

## **3. Bentonite-treated mud**

Mencakup sebagian besar dari tipe-tipe lumpur air tawar. Bentonite adalah merupakan material yang paling umum digunakan untuk membuat koloid inorganik untuk mengurangi *filter loss* dan mengurangi tebal *mud cake* (ketebalan mud cake). Bentonite juga menaikkan *viscositas* dan *gel strength* yang dapat dikontrol dengan *thinner*.

## **4. Phosphate treated mud**

Mengandung polyphosphate untuk mengontrol viscositas dan gel strength. Penambahan zat ini akan berakibat pada terdispersinya fraksi-fraksi clay colloid padat sehingga density lumpur dapat cukup besar tetapi viscositas dan gel strengthnya rendah. Ia mengurangi loss serta mud cake dapat tipis. Tannin sering ditambahkan bersama-sama dengan polyphosphate untuk pengontrolan lumpur.

Polyphosphate tidak stabil pada temperatur tinggi (sumur-sumur dalam) dan akan hilang efeknya sebagai thinner. Polyphosphate akan rusak pada



kedalaman 10.000 ft atau temperatur 160 – 180 °F, karena berubah ke orthophosphate yang malah menyebabkan terjadinya flokulasi. Juga phosphate mud sukar dikontrol pada density lumpur tinggi (yang sering berhubungan dengan pemboran dalam). Dengan penambahan zat-zat kimia dan air, density lumpur dapat dijadikan 9 - 11 ppg. Polyphosphate mud juga menggumpal bila terkena kontaminasi NaCl, Calcium sulfate atau kontaminasi semen dalam jumlah banyak.

### **5. Organic colloid treated mud**

Terdiri dari penambahan Pregelatinized Starch atau Carboxy Methyl Cellulosa pada lumpur. Karena organic colloid tidak terlalu sensitif terhadap flokulasi seperti clay, maka control filtrasinya pada lumpur yang terkontaminasi dapat dilakukan dengan organic colloid ini baik untuk mengurangi filtration loss pada fresh water mud. Dalam kebanyakan lumpur penurunan filter loss lebih banyak dapat dilakukan dengan koloid organic daripada dengan inorganic.

### **6. “Red” mud**

Red mud mendapatkan warnanya dari warna yang dihasilkan oleh treatment dengan caustic soda dan quebarcho (merah tua). Istilah ini akan tetap digunakan walaupun nama-nama koloid yang dipakai sekarang ini mungkin menyebabkan warna abu-abu kehitaman. Umumnya istilah ini digunakan untuk lignin-lignin tertentu dan humic thinner selain untuk tannin di atas. Suatu jenis lain lumpur ini adalah alkaline tannate treatment dengan penambahan polyphosphate untuk lumpur-lumpur dengan pH dibawah 10. Perbandingan antara alkaline, organik dan polyphosphate dapat diatur sesuai dengan kebutuhan setempat. Alkaline-tannate mud mempunyai range pH 8 – 13.

Alkaline tannate dengan pH kurang dari 10 sangat sensitif terhadap flokulasi karena kontaminasi garam. Dengan naiknya pH maka lebih sukar untuk flokulasi. Untuk pH lebih dari 11,5, pregelatinized starch dapat digunakan tanpa bahaya fermentasi. Di bawah pH ini, preservative harus digunakan untuk mencegah fermentasi (meragi) pada fresh water mud. Jika diperlukan density lumpur yang tinggi lebih murah bila digunakan treatment yang menghasilkan calcium treated mud dengan pH yang tingginya 12 atau lebih.

## 7. Calcium mud

Lumpur ini mengandung larutan calcium (disengaja). Calcium dapat ditambah dalam bentuk slaked lime (kapur mati), semen, plaster ( $\text{CaSO}_4$ ) dipasaran atau  $\text{CaCl}_2$ , tetapi dapat pula karena pemboran semen, anhydrite dan gypsum.

### a) Lime treated mud

Lumpur ini ditreated dengan caustic soda atau organic thinner, hydrated lime dan untuk mendapat filter loss rendah, suatu koloid organik. Treatment ini menghasilkan lumpur dengan pH 11,8 atau lebih, dan 60 – 100 (3 – 20 epm) ppm ion Ca dalam filtrat. Lumpur ini menghasilkan viscositas dan gel strength rendah, memberi suspensi yang baik bagi materia-material pemberat, mudah dikontrol pada density sampai 20 ppg, toleran terhadap konsentrasi garam (penyebab flokulasi) yang relatif besar dan mudah dibuat dengan filter loss rendah. Keuntungannya terutama pada kemampuannya untuk membawa konsentrasi padatan clay dalam jumlah yang lebih besar pada viscositas rendah dari pada dengan tipe-tipe lumpur lainnya. Kecuali tendensinya untuk memadat temperatur tinggi, lumpur ini cocok untuk pemboran dalam dan untuk mendapatkan density tinggi. Pilot test dapat dibuat untuk menentukan tendensinya untuk memadat, dan dengan penambahan zat kimia pemadatan ini dapat dihalangi untuk sementara waktu untuk memberi kesempatan pemboran berlangsung beserta test-test sumurnya. Suatu lumpur lime treated yang bertendensi memadat tidak boleh tertinggal pada casing tubing annulus pada waktu well completion dilangsungkan. Penggunaan/penyelidikan yang extensive pada lumpur tipe lime treated ini menghasilkan variasi-variasi lumpur yang ditujukan pada lumpur yang sukar memadat. Dengan ini timbul dua jenis yang lain, yaitu “lime mud” dan “low lime mud” yang bedanya hanya pada jumlah excess limenya. “Lime mud” umumnya mengandung konsentrasi caustic soda dengan lime yang tinggi, dengan excess lime bervariasi antara 5 – 8 lb/bbl, sedangkan “low lime mud” mengandung caustic soda dan lime lebih sedikit, dengan excess lime 2 – 4 lb/bbl.

Jenis calcium treated mud yang lain adalah “shale control mud”. Pada lumpur ini dianjurkan agar kadar ion Ca-nya pada filtrat dibuat minimal 400 ppm,

dengan excess lime bervariasi antara 1 – 2 lb/bbl. Sifat kimia lumpur dan filtrat memberikan suatu tahanan terhadap hidrasi/swelling shale dan clay formation. Pada temperatur tinggi (yang cukup lama waktunya) lumpur ini tidak sesuai untuk ditempatkan pada casing tubing annulus waktu completion (dimana lumpur ini akan memadat). Resistivity listriknya yang umumnya rendah merugikan SP-logging, sebaliknya toleransinya terhadap kontaminan memberi kemungkinan untuk penambahan garam agar resistivity sesuai untuk laterolog dan focused electrode log.

**b) Gypsum treated mud**

Lumpur ini berguna untuk membor formasi anhydrite dan gypsum, terutama bila formasinya interbedded (selang-seling) dengan garam dan shale. Treatmentnya adalah dengan mencampur base mud (lumpur dasar) dengan plaster ( $\text{CaSO}_4$  dipasaran) sebelum formasi anhydrite dan gypsum dibor. Dengan penambahan plaster tersebut pada rate terkontrol, maka viskositas dan gel strength yang berhubungan dengan kontaminan ini dapat dibatasi. Setelah clay di lumpur bereaksi dengan ion Ca, tak akan terjadi pengentalan lebih lanjut dalam pemboran formasi gypsum atau garam. Gypsum treated mud dapat dikontrol filtrat lossnya dengan organic colloid dan karena pH-nya rendah, maka preservative harus ditambahkan untuk mencegah fermentasi. Preservasi ini boleh dihentikan penambahannya bila garam yang dibor cukup untuk memberikan saturated salt water mud.

Suatu modifikasi dari gypsum treated mud adalah dengan penggunaan chrome lignosulfonate deflucolant yang memberikan kontrol pada characteristic flat gels pada lumpur tersebut. Lumpur gypsum lignosulfonate ini mempunyai sifat yang sama baiknya dengan lime treated mud, karena itu ia digunakan pada daerah-daerah yang sama seperti penggunaan lime treated mud.

Penggunaan non-ionic surfactant dalam gypsum chrome lignosulfonate mud menghasilkan pengontrolan yang lebih baik pada filtrate loss dan flow propertiesnya, selain toleransinya yang besar terhadap kontaminasi garam calcium salt

Selain hydrated lime dan gypsum telah digunakan tetapi tidak meluas. Juga zat-zat kimia yang memberi suplai kation *multivalent* untuk *base exchange clay* (pertukaran ion-ion pada clay) seperti  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  telah digunakan.

### **3.3.2. Salt Water Mud**

Lumpur ini terutama digunakan untuk membor garam massive (salt dome) atau salt stringer (lapisan formasi garam) dan kadang-kadang bila ada aliran garam yang terbor. Filtrate lossnya tebal dan mud cakenya tebal bila tidak ditambah organic colloid. PH lumpur dibawah 8, karena itu perlu preservative untuk menahan fermentasi starch. Jika salt mudnya mempunyai pH yang lebih tinggi, fermentasi terhalang oleh basa. Suspensi ini bisa diperbaiki dengan penggunaan attapulgate sebagai pengganti bentonite.

#### **1. Unsaturated Salt Water Mud**

Air laut dari laut lepas atau teluk sering digunakan untuk lumpur yang tak jenuh kegaramannya ini. Kegaraman (*salinity*) lumpur ini ditandai oleh :

1. Filtrate loss besar kecuali ditreated dengan organic colloid.
2. Medium sampai tinggi pada gel strength kecuali ditreated dengan thinner.
3. Suspensi yang tinggi kecuali ditreated dengan attapulgate atau organiccolloid.

Lumpur ini biasa mengalami “foaming”, yaitu berbusa (gas menggelembung) yang bisa direduksi dengan :

1. Menambah solubel surface active agents.
2. Menambah zat kimia untuk menurunkan gel strength.

Lumpur yang terkena kontaminasi garam juga ditreated seperti pada sea water mud ini.

#### **2. Saturated Salt Water Mud**

Fasa cair ini dijenuhkan dengan NaCl. Garam-garam lain dapat pula berada disitu dalam jumlah yang berlainan. Saturated salt water mud dapat digunakan untuk membor formasi-formasi garam dimana rongga-rongga yang

terjadinya karena pelarutan garam dapat menyebabkan hilangnya lumpur, dan ini dicegah dengan penjenjuran garam terlebih dahulu pada lumpurnya.

Lumpur ini juga dibuat dengan menambahkan air garam yang jenuh untuk pengenceran dan pengaturan volume. Filtrate loss yang rendah pada saturated salt organic colloid mud menyebabkan tidak perlunya memasang casing diatas *salt beds* (formasi garam). Filtrate lossnya dapat dikontrol sampai 1 cc API dengan organic colloids. Saturated salt water mud dapat dibuat berdensity lebih dari 19 ppg. Dengan menambahkan organic colloid agar filtration lossnya kecil, lumpur ini bisa untuk membor formasi dibawah salt beds, walaupun resistivitynya yang rendah buruk bagi electric logs.

Gabungan dari non-ion surfactant menyebabkan pengontrolan filtrasi dan flow properties yang lebih mudah dan murah, terutama pada density tinggi. Saturated salt mud ini juga dapat dibuat dari fresh water atau brine mud. Jika dibuat dari fresh water mud maka paling tidak separuh dari lumpur semula harus dibuang. Ini diperlukan untuk pengenceran dengan air tawar dan penambahan lebih kurang 125 lb garam/bbl lumpur. Jika dikehendaki pengontrolan filtration loss, suatu organic colloid dan preservative dapat ditambahkan.

Jika lumpurnya dibuat dari saturated brine (air garam yang jenuh) sekitar 20 lb/bbl attapulgate ditambahkan bersama dengan organic colloid dan mungkin preservative. Lumpur ini densitynya 10,3 ppg dan akan naik sekitar 11 ppg selama pemboran berlangsung. Pemeliharaannya termasuk penambahan air asin untuk mengurangi viscositas, attapulgate untuk menambah viscositas dan organic colloid untuk mengontrol filtrasi. Jika saturasi salt water muds digunakan untuk mengebor lapisan shale maka control viscositas, gel dan filtrasi dapat diperoleh dengan penambahan alkaline-tannate solution, atau sedikit lime. Emulsified salt water muds telah umum digunakan di Kansas dan Dakota. Ini mempunyai sifat-sifat baik dari conventional emulsion muds. Lumpur ini menunjukkan tendensi *foaming* (berbusa) yang bisa dicegah dengan penambahan surfactant.

### **3. Sodium Silicate Mud**

Fasa cair Na-silicate mud mengandung sekitar 65% volume larutan Na-silicate dan 35% larutan garam jenuh. Lumpur ini dikembangkan untuk

digunakan bagi pemboran heaving shale, tetapi telah terdesak penggunaannya oleh lime treated gypsum lignosulfonate, shale control dan surfactant mud yang lebih baik, murah dan mudah dikontrol sifat-sifatnya.

### **3.3.3. Oil –in-Water Emulsion Muds (Emulsion Mud)**

Pada lumpur ini minyak merupakan fasa tersebar (emulsi) dan air sebagai fasa kontinu. Jika pembuatannya baik, filtratnya hanya air. Sebagai dasar dapat digunakan baik fresh maupun salt water mud. Sifat-sifat fisik yang dipengaruhi oleh emulsifikasi hanyalah berat lumpur, volume filtrate, tebal mud cake dan pelumasan. Segera setelah emulsifikasi, filtrate loss berkurang. Keuntungannya adalah bit yang lebih tahan lama, penetration rate naik, pengurangan korosi pada drill string, perbaikan pada sifat-sifat lumpur (viscositas dan tekanan pompa boleh/dapat dikurangi, water loss turun, mud cake turun dan tipis) dan mengurangi balling (terlapisnya alat oleh padatan lumpur) pada drill string. Viscositas dan gel lebih mudah dikontrol bila emulsifiernya juga bertindak sebagai thinner.

Umumnya oil-in-water mud dapat bereaksi dengan penambahan zat dan adanya kontaminasi seperti juga lumpur asalnya. Semua minyak dapat digunakan (crude) tetapi lebih baik bila digunakan minyak yang mempunyai sifat-sifat sebagai berikut :

1. Uncracked (tidak terpecah-pecah molekulnya), supaya stabil.
2. Flash point tinggi, untuk mencegah bahaya api.
3. Aniline number tinggi (lebih dari 155) agar tidak merusak karet-karet dipompa/circulation system.
4. Pour point rendah, agar digunakan untuk bermacam-macam temperatur.

Suatu keuntungan lainnya adalah bahwa karena bau dan flourensinya lain dengan crude oil (mungkin yang berasal dari formasi), maka ini berguna untuk pengamatan cutting oleh geolog dalam menentukan adanya minyak dipemboran tersebut. Adanya karet-karet yang rusak dapat juga dicegah dengan penggunaan karet sintetis.

Fresh water oil-in-water emulsion muds adalah lumpur yang mengandung NaCl sampai sekitar 60.000 ppm. Lumpur emulsi ini dibuat dengan menambahkan emulsifier (pembuat emulsi) ke water base mud diikuti dengan sejumlah minyak biasanya 5 – 25% volume. Jenis emulsifier bukan sabun lebih disukai karena ia dapat digunakan dalam lumpur yang mengandung larutan Ca tanpa memperkecil emulsifiernya dalam hal efisiensi. Emulsifikasi minyak dapat bertambah dengan agitasi (diaduk).

Maintenancenya terdiri dari penambahan minyak dan emulsifier secara periodik. Jika sebelum emulsifikasi lumpurnya mengandung presentase clay yang tinggi, pengenceran dengan sejumlah air perlu dilakukan untuk mencegah kenaikan viscositas. Karena keuntungan dalam pemboran dan mudahnya pengontrolan maka lumpur ini disukai orang.

Salt water oil-in water absorption mud mengandung paling sedikit 60.000 ppm NaCl dalam fasa airnya. Emulsifikasi dilakukan dengan emulsifier agent organik. Lumpur ini biasanya mempunyai pH dibawah 9, dan cocok digunakan untuk daerah-daerah dimana perlu dibor garam massive atau lapisan-lapisan garam. Emulsi ini mempunyai keuntungan-keuntungan seperti juga pada fresh water emulsion. Filtrate loss sedikit dan mud cake tipis dan lubrikasi lebih baik. Lumpur demikian mempunyai tendensi untuk foaming yang bisa dipecahkan dengan penambahan surface active agent tertentu. Maintenance lumpur ini sama seperti pada salt mud biasa kecuali perlunya menambah emulsifier, minyak dan *surface active defoamer (anti foam)*.

#### **3.3.4. Oil Base dan Oil Base Emulsion Mud**

Lumpur ini mengandung minyak sebagai fasa kontinunya, komposisinya diatur agar kadar airnya rendah (3 – 5% volume). Relatif lumpur ini tidak sensitif terhadap contaminant. Tetapi airnya adalah kontaminasi karena memberi efek negatif bagi kestabilan lumpur ini. Untuk mengontrol viscositas, menaikkan gel strength, mengurangi efek kontaminasi air dan mengurangi filtrate loss, perlu ditambahkan zat-zat kimia.

Kegunaan oil base mud didasarkan pada kenyataan bahwa filtratnya adalah minyak karena itu tidak akan menghidratkan shale atau clay yang sensitif baik terhadap formasi biasa maupun formasi produktif (bisa juga untuk completion mud). Guna terbesar adalah pada completion dan work over sumur. Kegunaan lain adalah untuk melepaskan drill pipe yang terjepit, mempermudah pemasangan casing liner. Oil base mud ini harus ditempatkan pada suatu tanki besi untuk menghindari kontaminasi air. Rig harus dipersiapkan agar tidak kotor dan bahaya api berkurang.

*Oil base emulsion* mud adalah air sebagai fasa kontinyu dan minyak sebagai fasa yang terdispersi. Minyak ditambahkan untuk meningkatkan laju penembusan, mengurangi filtrat loss, memperbaiki pelumasan, menurunkan drag dan torsi pada pemboran miring. Pada umumnya oil-emulsion mud mengandung minyak sebesar antara 5 - 10% volume. Emulsi dapat diformulasikan dengan menggunakan sodium soap sebagai emulsifier.

*Oil base emulsion* mud dan *oil base* mud mempunyai minyak sebagai fasa kontinyu dan air sebagai fasa tersebar. Umumnya oil base emulsion mud mempunyai faedah yang sama seperti oil base mud, yaitu filtratnya minyak dan karena itu tidak menghidratkan shale/clay yang sensitif. Perbedaan utamanya dengan oil base mud adalah bahwa air ditambahkan sebagai tambahan yang berguna (bukan kontaminasi). Air yang teremulsi dapat antara 15 – 50% volume, tergantung dengan density dan temperatur yang diinginkan (dihadapi dalam pemboran). Karena air merupakan bagian dari lumpur ini, maka lumpur ini mempunyai sifat-sifat lain dari oil base mud yaitu ia dapat mengurangi bahaya api, toleran pada air, dan pengontrolan *flow propertiesnya* dapat seperti pada water base mud.

### **3.3.5. Gaseous Drilling Fluid**

Digunakan untuk daerah-daerah dengan formasi keras dan kering. Dengan gas atau udara dipompakan pada annulus, salurannya tidak boleh bocor. Keuntungan cara ini adalah penetration rate lebih besar, tetapi adanya formasi air



dapat menyebabkan *bit balling* (bit dilapisi cutting/padatan-padatan) yang merugikan. Juga tekanan formasi yang besar tidak membenarkan digunakannya cara ini. Penggunaan natural gas membutuhkan pengawasan yang ketat pada bahaya api. Lumpur ini juga baik untuk completion pada zone-zone dengan tekanan rendah.

Suatu cara pertengahan antara lain lumpur cair dengan gas adalah *aerated mud drilling* dimana sejumlah besar udara (lebih dari 95%) ditekan pada sirkulasi lumpur untuk memperendah tekanan hidrostatik (untuk *lost circulation zone*) dan mempercepat pemboran.

### 3.4. Sifat Fisik Lumpur Pemboran

Kemampuan suatu lumpur yang digunakan didalam pemboran sangat ditentukan oleh sifat-sifat fisik yang diperlihatkan oleh lumpur tersebut, yang dapat diperoleh dari percobaan di laboratorium. Hasil analisa tersebut diharapkan mampu memenuhi properties atau sifat-sifat yang diharapkan, apabila lumpur tersebut digunakan untuk mengebor suatu formasi. Kesalahan dalam analisa dapat menjadi sebab kemampuan dari lumpur tidak mampu mengatasi problema yang timbul apabila menembus suatu formasi tertentu. Sifat-sifat yang harus diperlihatkan oleh suatu lumpur sebelum dipergunakan dalam pemboran adalah densitas, viscositas, gel strength dan filtration loss.

#### 3.4.1. Densitas

Densitas adalah berat suatu zat (dalam hal ini adalah lumpur) dalam suatu volume tertentu. Densitas biasanya ditulis dengan simbol “ $\rho$ ” dengan dimensi  $\text{kg/dm}^3$ ,  $\text{gr/cc}$ ,  $\text{lb/cuft}$  dan  $\text{lb/gal}$ . Tekanan hidrostatik di dasar lubang bor merupakan fungsi dari densitas lumpur.

Hubungan antara tekanan hidrostatik dengan densitas lumpur :

$$P_h = 0.0052 \times \rho \times D \dots\dots\dots (3-2)$$

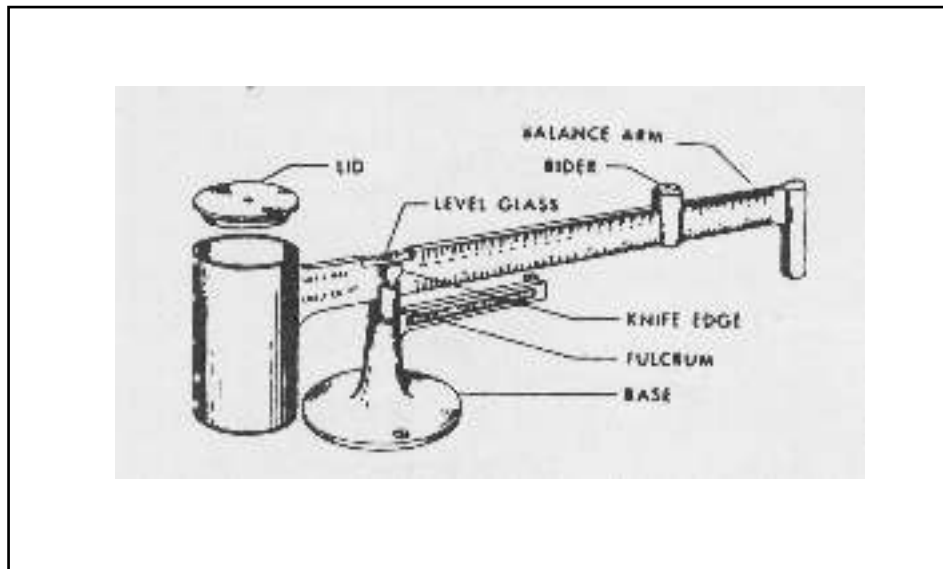
Keterangan :

$P_h$  = tekanan hidrostatik lumpur, psi

$\rho$  = densitas lumpur, ppg

$D$  = kedalaman lubang bor, ft

Berdasarkan rumus tersebut maka berlaku ketentuan bahwa densitas lumpur yang besar akan memberikan tekanan hidrostatik yang besar pula, demikian pula sebaliknya. Densitas lumpur diukur dengan alat yang disebut *Mud Balance* (Gambar 3.1.).



**Gambar 4.1.**  
**Mud Balance**  
**(Chillingarian, G, V. 1981)**

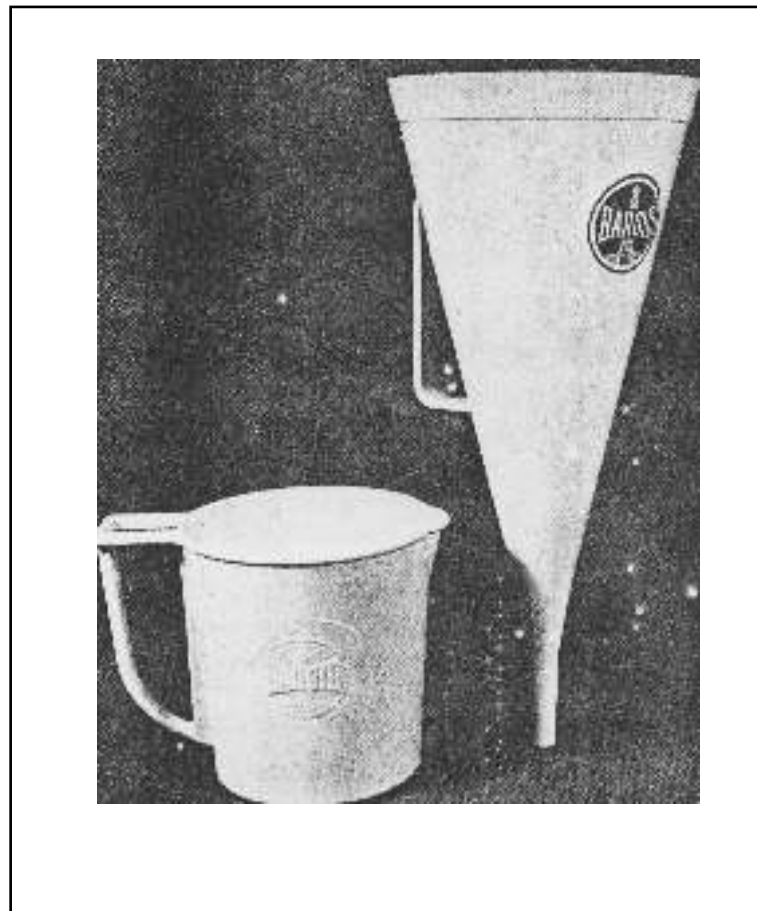
### 3.4.2. Viscositas

Viscositas adalah tahanan fluida terhadap aliran atau ukuran keengganan suatu fluida untuk bergerak. Istilah thick mud dipergunakan untuk lumpur dengan

viscositas tinggi (kental), dan thin mud untuk lumpur dengan viscositas kecil (encer). Viscositas dari lumpur dapat diukur dengan *Marsh Funnel* (Gambar 3.2.).

Dalam pemboran, viscositas lumpur dapat naik dan turun karena dua hal, yaitu karena flokulasi dan terlalu banyaknya padatan yang ditemui. Satuan dalam lapangan biasanya adalah MF-detik, centipoise atau poise.

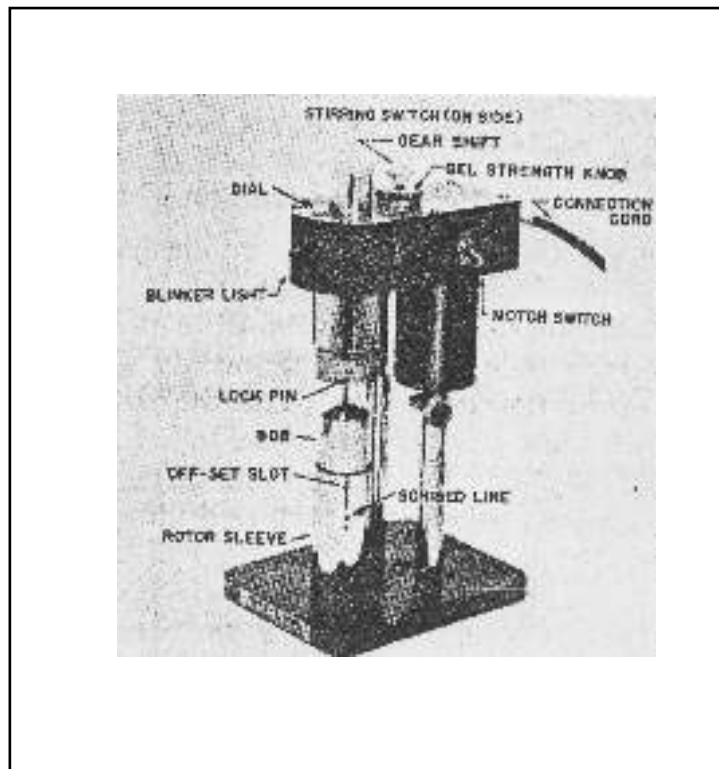
Pada flokulasi gaya tarik menarik antar partikel clay yang terlalu besar akan mengakibatkan clay tersebut akan menggumpal. Penggumpalan tersebut disebabkan oleh kenaikan jumlah partikel-partikel padat atau karena kontaminasi (anhydrite, gypsum, semen, garam yang menetralsir gaya tolak menolak antara muatan-muatan negatif dipermukaan clay). Dengan terjebaknya air bebas oleh partikel-partikel clay akan mengakibatkan sistem kekurangan air bebas sehingga akan menaikkan viscositas.



**Gambar 4.2.**  
**Marsh Funnel**  
**(Chilingarian, G.V, 1981)**

### 3.4.3. Gel Strength

Gel strength adalah pembentukan padatan karena gaya tarik menarik plat-plat clay apabila ditinggalkan. Sifat ini merupakan sifat aliran dalam keadaan statis dimana clay dapat mengatur diri. Jadi bertambahnya waktu diam (yang terbatas), akan menambah besar gel strengthnya. Gel strength harus sekecil mungkin (asal dapat mengikat clay) karena jika terlalu besar maka ada kemungkinan sebelum lumpur bergerak, sudah terjadi *break down* pada formasi terlebih dahulu, dimana lumpur masuk ke dalam formasi. Gel strength sebenarnya sangat tergantung pada viskositas lumpur, makin besar viskositas lumpur maka makin besar juga gel strengthnya. Pengukuran besar gel strength dilakukan dengan alat *Fann V-G Meter* (Gambar 3.3.).

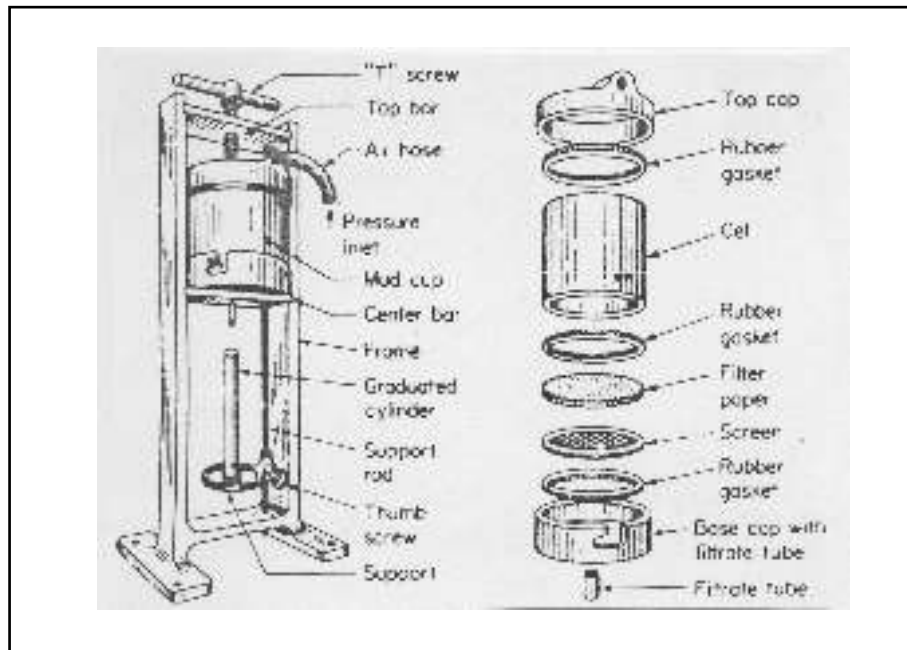


**Gambar 4.3.**  
**Fann V-G Meter**  
**(Chilingarian, G.V, 1981)**

### 3.4.4. Filtration Loss

Filtration loss adalah kehilangan sebagian cairan lumpur masuk ke dalam formasi. Biasanya filtration loss terjadi pada formasi yang permeable (mudah menyerap air). Filtration loss diukur dengan *Filter Press* (Gambar 3.4.).

Banyak sedikitnya air tapisan (*water loss*) dapat berpengaruh positif dan negatif. Makin banyak air tapisan masuk ke dalam formasi, maka akan mengakibatkan makin tebalnya mud cake pada dinding lubang bor, sehingga mempengaruhi cutting ke permukaan. Disamping itu, pada waktu mencabut pahat, pahat tersebut akan mengikis mud cake tersebut sehingga dapat mengakibatkan jepitan pada rangkaian pipa bor. Akibat lain dengan adanya air tapisan yang besar yaitu terjadinya keguguran dinding formasi akibat formasi yang dimasuki air tersebut menjadi rapuh dan lepas dari ikatannya, maka akan mengakibatkan terjepitnya rangkaian pipa bor.



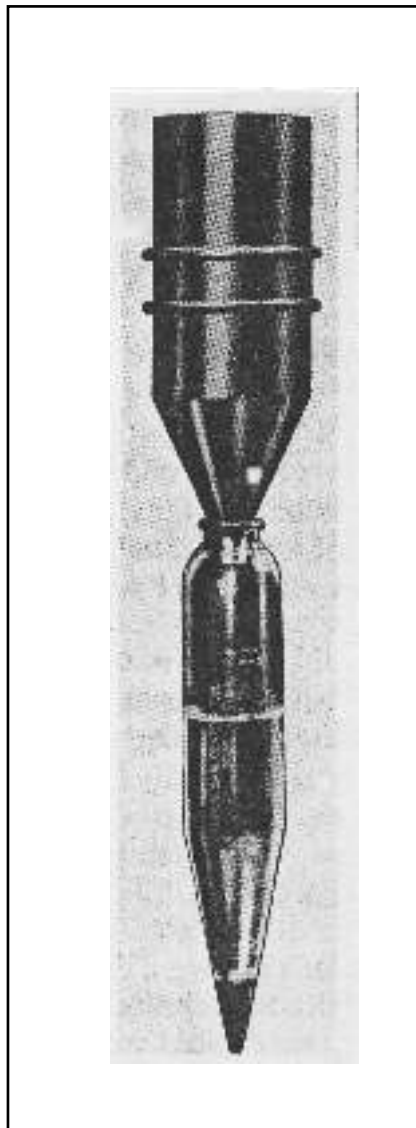
**Gambar 4.4.**  
**Filter Press**  
**(Chilingarian, G.V, 1981)**

### 3.4.5. Sand Content

Yang dimaksud dengan sand content adalah kadar pasir di dalam lumpur bor. Pasir tidak boleh terlalu banyak di dalam lumpur bor. Pasir tidak boleh terlalu banyak di dalam lumpur bor karena dapat merusak peralatan yang dilaluinya pada saat sirkulasi dan akan menaikkan berat jenis lumpur bor itu sendiri. Maksimal yang diperbolehkan adalah 20% volume.

Alat yang dipergunakan untuk mengukur kadar pasir ini adalah *Sand Content Set*, dimana peralatannya sebagai berikut :

- Saringan 200 mesh, berdiameter 2,5 inch.
- Corong yang cocok dengan saringan.
- Gelas ukur yang mempunyai tanda batas lumpur yang diukur.



**Gambar 4.5.**  
**Peralatan Sand Content**  
**(Chilingarian, G.V, 1981)**

### **3.5. Pemilihan Lumpur Pemboran**

Dasar yang dipakai dalam pemilihan lumpur pemboran untuk beberapa formasi yang ditembus adalah berbagai faktor sebagai berikut :

- Faktor formasi.
- Efek dari penggunaan lumpur pemboran.

Dengan mengaitkan kedua faktor tersebut kita harapkan kerusakan formasi akibat dari penggunaan lumpur pemboran yang menyebabkan problema produksi selanjutnya dapat ditekan sekecil mungkin. Demikian juga diharapkan agar problem-problem dalam kelancaran pemboran tidak diketahui, seperti jepitan pada rangkaian pipa bor, lost circulation, blow out dan lain sebagainya.

#### **3.5.1. Faktor Formasi**

Seperti yang telah disebutkan didepan, bahwa pemakaian lumpur pemboran yang tidak sesuai dengan kondisi formasi akan menyebabkan terjadinya problema yang tidak diharapkan, bahkan dapat mengakibatkan kegagalan didalam operasi pemboran. Yang termasuk faktor formasi adalah meliputi : jenis batuan, temperatur formasi, tekanan dan kerapuhan formasi, permeabilitas formasi, serta kandungan clay dan garam.

#### **1. Jenis Batuan**

Untuk mengetahui bagaimana lumpur pemboran dapat mengakibatkan kerusakan pada formasi produktif, maka perlu diketahui jenis batumannya. Batuan reservoir yang terdapat di dunia adalah 60% terdiri dari batupasir, 30% terdiri dari batugamping/karbonat dan sisanya adalah batuan reservoir jenis lainnya.

Batuan reservoir yang sebagian besar merupakan batuan sedimen ini, diklasifikasikan menurut komposisi mineral dari matriknya dan tekstur dari pori

volumenya. Berdasarkan sifat-sifat dari mineral dan sifat-sifat fisik dari masing-masing batuan reservoir tersebut, maka dapat dianalisa untuk menentukan lumpur yang paling sesuai pada masing-masing formasinya.

## **2. Temperatur Formasi**

Temperatur harus diketahui atau diperkirakan sebelum menentukan lumpur pemboran yang akan dipakai, karena seperti kita ketahui bahwa karena adanya kenaikan temperatur formasi pada lubang bor akan mempengaruhi kestabilan dari sifat-sifat lumpur pemboran.

Suatu batas temperatur dimana fluida pemboran menjadi tidak stabil dan sulit dikontrol harus diketahui, hal ini menjadi dasar pemilihan lumpur pemboran. Pada temperatur lebih besar dari 300<sup>o</sup>F, stabilitas dari penggunaan water base mud akan mengalami penurunan. Untuk mempertahankan stabilitasnya, sebaiknya perlu ditambahkan lignosulfonate. Sedangkan pada oil base mud sewaktu temperatur mencapai 300<sup>o</sup>F, viscositasnya harus dikontrol yaitu dengan menambahkan hidroxyl ethyl cellulose dalam lumpur pemboran tersebut agar viscositasnya tetap stabil.

## **3. Tekanan Dan Kerapuhan Formasi**

Densitas lumpur pemboran harus ditentukan yang sesuai dengan tekanan formasinya ditambah faktor keamanan tertentu. Sehingga disini perlu diketahui tekanan formasi terlebih dahulu sebelum menentukan densitas lumpur yang akan dipakai.

Untuk formasi yang bertekanan rendah, bila lumpur yang digunakan mempunyai densitas yang terlalu tinggi akan menyebabkan lost circulation. Demikian pula halnya dengan tekanan lumpur terlalu rendah, jauh lebih kecil dari tekanan formasinya akan menyebabkan masuknya fluida formasi ke dalam sumur dan bisa mengakibatkan terjadinya blow out bila tidak segera ditanggulangi.

Jadi dalam pengontrolan tekanan formasi, yang penting adalah densitas dari lumpur pemboran itu sendiri. Densitas lumpur pemboran harus dikontrol agar sesuai dan cukup untuk menahan tekanan formasi. Untuk tingkat kerapuhan



formasi harus juga diperhatikan agar tidak terjadi runtuhnya dinding lubang bor. Sebagai contoh untuk formasi yang sangat *unconsolidated* seperti *very loose sand* akan sangat mudah runtuh ke dalam lubang bor. Untuk mencegah hal tersebut maka dipilih lumpur pemboran dengan viscositas dan densitas yang dinaikan sejauh masih dalam toleransi yang diperbolehkan.

#### **4. Permeabilitas Formasi**

Pada formasi yang mempunyai permeabilitas tinggi harus digunakan lumpur pemboran yang dapat mengontrol filtration loss dan bila perlu ditambahkan material-material tertentu untuk mencegah filtration loss yang lebih besar. Invasi dari mud filtrat dan ketebalan mud cake juga harus dijaga, untuk mencegah terjadinya *formation block*.

Dalam mengontrol fluid loss, pemakaian oil emulsion sering dilakukan karena mempunyai fluid loss yang kecil. Hal ini disebabkan karena pemakaian lumpur emulsi akan menyebabkan terjadinya *swelling*, walaupun hanya kecil. Bahan-bahan lain yang dapat ditambahkan dalam lumpur pemboran untuk menurunkan fluid loss adalah Starch, CMC dan damar atau gandarukem juga sangat baik untuk mengontrol fluid loss, yaitu dengan jalan dilarutkan ke dalam minyak.

Dalam lumpur pemboran yang mengandung hiroxy ethyl cellulose (HEC) sebagai viscosifier dan calcium karbonat sebagai pemberat dengan ukuran-ukuran partikel tertentu dapat menutup rekahan-rekahan atau celah-celah kecil sehingga akan memperkecil fluid loss. Apabila material-material tersebut tidak dapat mengatasi terjadinya fluid loss, maka ke dalam lumpur pemboran perlu ditambahkan material-material fluid loss yang lebih besar.

#### **5. Kandungan Clay Dan Garam**

Untuk formasi yang banyak mengandung garam massive (salt dome), lapisan-lapisan garam (salt stringer) atau adanya air garam yang melimpah, demikian pula di daerah payau maupun lokasi pemboran ditepi/dilepas pantai, dianjurkan memakai salt water mud atau oil in water emulsion mud. Pemakaian

lumpur jenis-jenis ini akan memperlihatkan kehilangan air filtrat besar dan mud cake tebal bila tidak ditambahkan dengan organic colloid dan pembuihan yang terjadi dapat dikurangi dengan penambahan surfactant ke dalam lumpur pemboran.

Ada kemungkinan bahwa formasi batuan mengandung mineral clay dalam berbagai type dan konsentrasi yang dapat menghidrat bila bertemu dengan filtrat lumpur yang berupa air. Dimana clay ini secara kontinyu akan menyerap air, sehingga mengembang dan pada akhirnya akan menyebabkan kerusakan formasi. Jenis mineral clay yang umum terdapat pada batuan reservoir adalah : Bentonite, illite, Chlorite, Kaolinite dan Attapulgate.

Sedangkan mineral clay yang biasa digunakan untuk membuat lumpur pemboran adalah bentonite (sodium monmorollinite) untuk lumpur air tawar dan attapulgate untuk lumpur air asin. Sedangkan untuk berbagai macam konfigurasi dari clay sendiri telah digambarkan dan diterangkan.

### **3.5.2. Efek Dari Penggunaan Lumpur**

Dalam suatu pemboran diinginkan suatu laju pemboran yang cepat, hal ini berkaitan dengan faktor ekonomis. Laju pemboran ini dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya adalah sifat dari lumpur pemborannya. Dengan mengetahui pengaruh sifat lumpur pemboran terhadap laju pemboran diharapkan dalam suatu operasi pemboran dapat dikontrol sifat-sifat lumpurnya, yang mana akan menghasilkan suatu laju pemboran yang optimal. Tetapi hal ini hanya ditinjau dari sifat lumpurnya.

Pengaruh sifat lumpur terhadap laju pemboran dapat diketahui dari melihat hubungannya dengan faktor-faktor lainnya yang berpengaruh terhadap laju pemboran yaitu hidrolika, faktor mekanis dan juga faktor batuan. Sifat-sifat lumpur yang mempengaruhi laju pemboran ini adalah sebagai berikut :

- Densitas.
- Viscositas.
- Filtration loss.
- Kadar minyak.

- Kadar padatan.

### 1. Densitas.

Densitas adalah berat fluida tiap satuan volume dan biasanya dinyatakan dalam ppg. Densitas ini merupakan sifat dari lumpur yang besar pengaruhnya terhadap laju pemboran, hal ini disebabkan karena densitas ini berpengaruh terhadap faktor batuan, faktor mekanis dan faktor hidrolika.

Densitas ditinjau dari hubungannya dengan faktor batuan. Karakteristik batuan berpengaruh pada laju pemboran. Umumnya laju pemboran berbanding terbalik dengan compressive strength dari batuan. Adanya lumpur di atas batuan yang akan dibor menjadikan batuan elastis, sehingga batuan sulit dibor. Disamping itu dengan adanya lumpur ini menyebabkan batuan lebih compressive, hal ini disebabkan adanya berat atau beban lumpur yang ada di atas batuan. Efek ini biasanya terdapat pada batuan yang lunak, misalnya shale. Jadi dengan adanya beban di atasnya, shale akan lebih compressive dibanding dengan keadaan di atmosfer. Tekanan yang ada di atasnya disebabkan oleh lumpur yang disebut tekanan hidrostatik. Tekanan hidrostatik ini merupakan fungsi dari kedalaman dan densitas. Secara matematis dapat dikemukakan sebagai berikut :

$$PH = 0.0052 * \rho * h \dots\dots\dots (3-3)$$

keterangan :

PH = Tekanan hidrostatik, psi

$\rho$  = Densitas, ppg

h = Kedalaman, ft

Dari rumus diatas terlihat bahwa semakin dalam dan semakin besar densitasnya maka tekanan hidrostatiknya akan semakin besar pula. Dengan semakin besarnya tekanan hidrostatik maka compressive strength batuan yang berada dibawahnya akan bertambah besar pula. Efek ini sangat besar pengaruhnya terhadap formasi shale. Bertambahnya compressive strength batuan maka laju pemboran akan berkurang, dan bisa dilihat pada rumus dibawah ini :

$$R = 1,5 \frac{N F^2}{D^3 S^2} \dots\dots\dots (3-4)$$

keterangan :

- R = Laju pemboran, in/menit
- N = Putaran, rpm
- F = Weight on bit (WOB), lb
- D = Diameter lubang bor, in
- S = Rock strength, psi

Jadi bisa terlihat dengan jelas semakin besar densitas maka laju pemboran akan berkurang.

Densitas ditinjau hubungannya dengan faktor mekanik. Seperti diketahui faktor mekanis berpengaruh terhadap laju pemboran, karena laju pemboran merupakan fungsi dari WOB, putaran, diameter lubang bor dan rock strength, secara matematis seperti Persamaan (3-4). Dari Persamaan (3-4) akan dicari hubungan atau pengaruh densitas terhadap laju pemboran. Salah satu fungsi dari laju pemboran adalah weight on bit (F). Untuk menerangkan hubungan densitas dengan weight on bit yang selanjutnya mempengaruhi laju pemboran tersebut perlu diperkenalkan konsep bouyancy faktor yang berdasarkan hukum Archimides. Hukum Archimides berbunyi “Apabila suatu benda dimasukkan ke dalam suatu cairan maka akan mendapat gaya ke atas sejumlah cairan yang dipindahkan”. Pada pemboran, dimana lubang penuh dengan lumpur, untuk suatu *foot drill pipe*.

$$W_{pm} = W_{pa} - W_m \dots\dots\dots (3-5)$$

Keterangan :

- $W_{pm}$  = Berat drill pipe di dalam lumpur, lb/ft.
- $W_{pa}$  = Berat drill pipe di udara, lb/ft.
- $W_m$  = Berat ekivalen lumpur, lb/ft.

Dari rumus ini bisa dilihat bahwa densitas lumpur berpengaruh terhadap WOB. Makin besar densitas lumpur maka WOB akan semakin turun, dengan turunnya WOB maka laju pemboran juga turun. Karena laju pemboran berbanding lurus dengan WOB. Dengan demikian dapat dikatakan pula bahwa kenaikan densitas lumpur dapat memperlambat laju pemboran.

Densitas ditinjau hubungannya dengan faktor hidrolika. Hidrolika juga merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap laju pemboran, hal ini berhubungan dengan pembersihan dan pengangkatan cutting dari dalam lubang bor. Pembersihan dan pengangkatan cutting kurang baik dapat menyebabkan cutting turun ke dasar lubang dan menyebabkan bit menghancurkan cutting lebih dari satu kali sehingga akan mengurangi efisiensi pemboran.

## **2. Viscositas.**

Viscositas adalah tahanan fluida terhadap aliran. Tahanan ini disebabkan oleh gesekan dari gaya tarik menarik antar molekul di dalam fluida pemboran. Viscositas biasanya dinyatakan dalam satuan centipoise.

Viscositas ditinjau hubungannya dengan faktor batuan. Pengaruh operasi pemboran dengan menggunakan lumpur yang viscositasnya tinggi akan menyebabkan batuan formasinya menjadi *malleable* (liat). Formasi liat lebih sukar dibor dari formasi brittle. Meskipun hal ini tidak dapat ditunjukkan secara matematis tetapi yang pasti bahwa laju pemboran pada formasi yang plastis lebih rendah dibandingkan dengan laju pemboran pada batuan yang brittle. Jadi dari batumannya maka viscositas yang tinggi akan menghasilkan laju pemboran yang lebih rendah dibandingkan viscositas rendah.

Hubungan antara viscositas dengan faktor mekanis secara matematis tidak dapat ditunjukkan, karena viscositas tidak langsung berpengaruh terhadap fungsi dari faktor mekanis seperti WOB, RPM, diameter lubang dan compressive strength batuan.

## **3. Filtration Loss.**

Pengaruh filtration loss dan filter cake ini terhadap laju pemboran tidak dapat ditunjukkan secara matematis. Namun disini akan dijelaskan pengaruh adanya filtration loss dan filter cake yang secara tidak langsung dapat mempengaruhi laju pemboran. Dilihat dari filtration loss yang besar akan memberikan tekanan balik pada formasi terhadap tekanan hidrostatik lumpur sehingga efek dari tekanan hidrostatik menjadi lebih kecil. Dengan tekanan hidrostatik yang lebih kecil akan menyebabkan laju pemboran menjadi lebih cepat.

Sedangkan ditinjau dari filter cakenya maka dengan filtration loss yang besar maka filter cake akan tebal. Filter cake yang tebal menyebabkan laju pemboran akan turun (dalam hal ini filter cake dinamik, dimana ada gerakan bit) karena gigi-gigi bit harus membuangnya dulu sebelum menembus formasi.

#### **4. Kadar Minyak.**

Telah lama diselidiki dilapangan bahwa penambahan minyak pada water base mud hampir selalu menaikkan laju pemboran pada semua jenis batuan. Kenaikan yang paling besar terjadi pada batuan lunak, sedangkan kenaikan pada batuan keras adalah kecil. Kenaikan ini disebabkan karena minyak memberikan pelumasan sehingga bit lebih awet, mengurangi pembesaran lubang dan having shale, mengurangi gesekan pipa dengan lubang dan juga akan mengurangi balling pada bit. Dengan kenaikan umur bit ini berarti waktu yang terbuang untuk trip dapat dikurangi, sehingga laju pemboran naik.

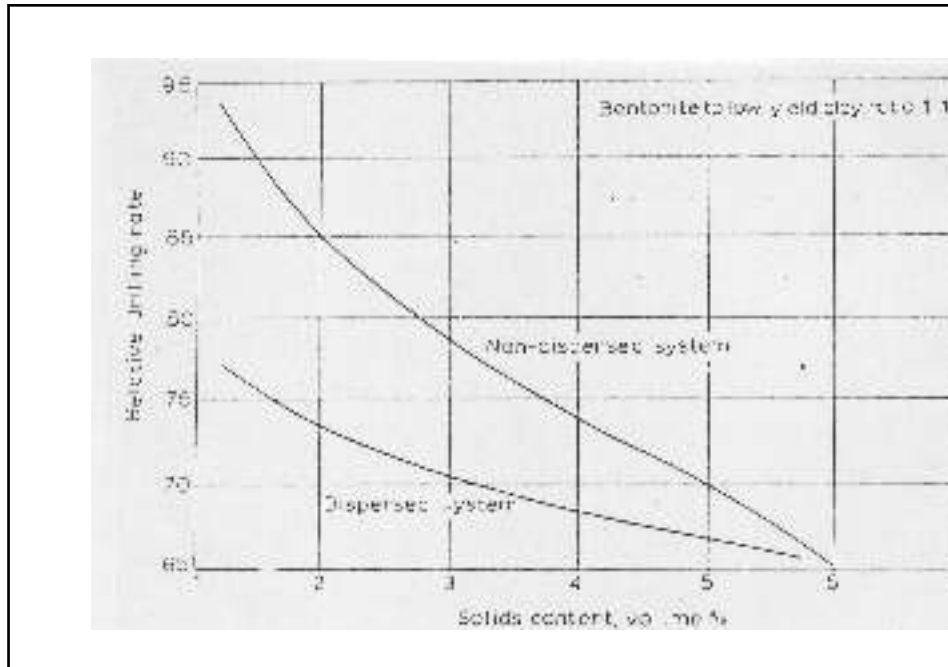
Meskipun kenyataannya berlawanan, bahwa penambahan minyak pada water base mud umumnya menurunkan water loss dan menyebabkan laju pemboran naik, hal ini dikarenakan faktor lain yang ada lebih dapat mengimbangi dibanding faktor tersebut. Densitas dan kandungan padatan yang turun dengan naiknya kadar minyak dalam lumpur mungkin dapat mengimbangnya. Hasil test laboratorium menunjukkan pengaruh persen minyak pada pemboran dua lapisan shale, diambil suatu kesimpulan bahwa kadar minyak optimum antara 15% - 20%.

#### **5. Kadar Padatan.**

Pengaruh kandungan padatan terhadap laju pemboran sulit untuk dipisahkan dari pengaruh densitas lumpur. Karena biasanya kandungan padatan naik maka densitas lumpur akan naik. Tetapi sebetulnya mempunyai efek terhadap laju pemboran.

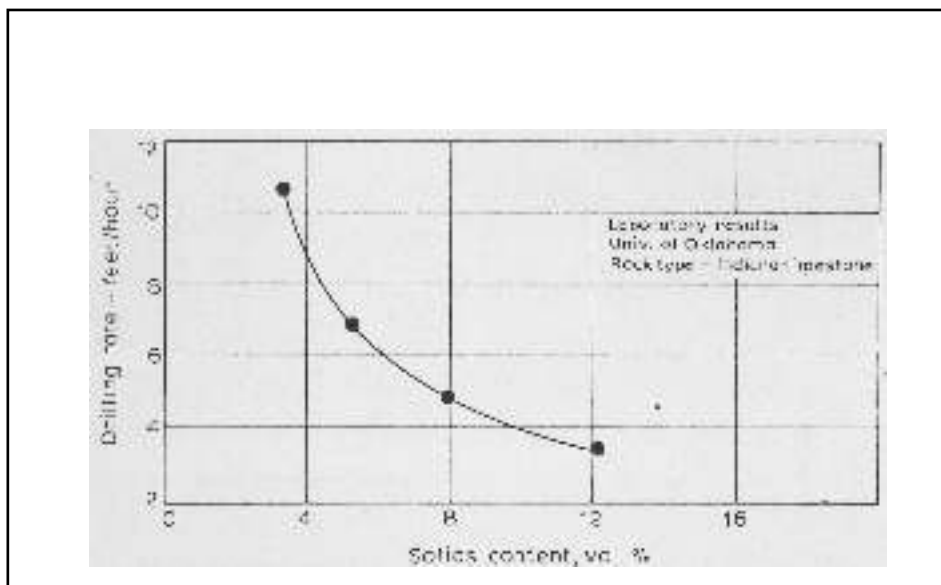
Dari hasil test di lapangan telah diketahui bahwa laju pemboran dengan menggunakan fluida pemboran air asin yang jenuh dengan densitas 10 ppg, pada kondisi dan lingkungan yang sama. Untuk menunjukkan pengaruh kandungan padatan terhadap laju pemboran ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.

Gambar 3.6. menunjukkan hasil dari test lapangan dimana digunakan slug yang bergantian dari lumpur dengan densitas 9,2 ppg dan air yang digunakan sebagai fluida pemboran. Ukuran dari masing-masing slug telah ditentukan untuk memberikan tekanan hidrostatik yang konstan di annulus. Laju pemboran diukur ketika air dan lumpur melalui bit, laju pemboran dengan menggunakan fluida pemboran air ditunjukkan dengan grafik laju pemboran 100% pada Gambar 3.6.



**Gambar 4.6.**  
**Pengaruh Kandungan Padatan Terhadap Laju Pemboran**  
**(Chilingarian, G.V, 1981)**

Sedangkan laju pemboran dengan menggunakan fluida pemboran berupa lumpur yang diukur setelah melewati bit ditunjukkan dengan menggunakan air untuk jenis bit dan 40% untuk bit jenis konvensional. Test ini dilakukan di daerah Texas barat dan untuk menunjukkan kalau kandungan padatan dapat mempengaruhi laju pemboran.



**Gambar 4.7.**  
**Pengaruh Kwantitas Kandungan Padatan Terhadap Laju Pemboran**  
**(Gatlin, C, 1960)**

Pengaruh kandungan padatan terhadap laju pemboran ditunjukkan pada Gambar 3.7. Yang merupakan suatu hasil test laboratorium. Dari Gambar 3.7. Terlihat jelas bahwa semakin besar suatu kandungan padatan dalam lumpur maka laju pemboran akan semakin turun. Laju pemboran menunjukkan 11 ft/jam dengan kandungan padatan 2% volume dan kira-kira 3 ft/jam kandungan padatan 12% volume.



## MODUL IV

### MATERIAL SEMEN PEMBORAN

#### 4.1. Komposisi Semen

Komponen utama semen Portland diperlihatkan oleh Tabel V-1. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa  $C_3S$  dan  $C_2S$  merupakan komponen utama.  $C_3S$  memiliki laju hidrasi yang paling tinggi dan berpengaruh pada sifat ketahanan semen secara keseluruhan.  $C_2S$  merupakan komponen yang tidak begitu reaktif dan berpengaruh pada peningkatan kekuatan semen secara bertahap.  $C_3A$  berpengaruh pada pengerasan awal karena sifat hidrasinya yang cepat.  $C_4AF$  hampir sama dengan  $C_3A$  akan tetapi sangat tergantung pada temperatur dan persentase additif.

Bahan dasar pembuatan semen diambil dari batuan jenis Calcareous dan Argillaceous seperti limestone, clay dan shale, serta jenis bahan lainnya dengan kandungan kalsium karbonat yang tinggi.

**Tabel IV-1.**  
**Komposisi Kimiawi Komponen Penyusun Semen <sup>20)</sup>**

Komponen	Rumus Kimia	Nama Dagang	Jumlah
Tricalcium Silicate	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$	50%
Dicalcium Silicate	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$	25%
Tricalcium Aluminate	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$	10%
Tetracalcium Aluminoferrite	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	$C_4AF$	10%
Oksida lain (gypsum, magne-sium, sulfat, CaO dan additif khusus lainnya			5%

#### 4.2. Klasifikasi Semen Pemboran

- a. **Kelas A** : Digunakan dari permukaan sampai kedalaman 6000 ft (1830 meter) dengan temperatur hingga 80°C dan tidak tahan terhadap sulfat. Tersedia hanya dalam tipe Ordinary (O), digunakan pada kondisi normal. (Setara dengan ASTM C-150 tipe I).
- b. **Kelas B** : Digunakan dari permukaan sampai kedalaman 6000 ft (1830 meter) dan temperatur hingga 80°C dengan kondisi formasi banyak mengandung sulfat. Tersedia hanya dalam tipe Ordinary (O) dan Moderate Sulfate Resistant (MSR). (Setara dengan ASTM C-150 tipe II).
- c. **Kelas C** : Digunakan dari permukaan sampai kedalaman 6000 ft (1830 meter) dan temperatur hingga 80°C pada kondisi dimana diperlukan pengerasan yang cepat. Tersedia semen tipe Ordinary (O), Moderate Sulfate Resistant (MSR) dan High Sulfate Resistant (HSR). (Setara dengan ASTM C-150 tipe III).
- d. **Kelas D** : Digunakan dari kedalaman 6000 ft (1830 meter) sampai 10.000 ft (3050 meter) dengan kondisi tekanan formasi dan temperatur agak tinggi (antara 80 – 130°C). Tersedia semen tipe Moderate Sulfate Resistant (MSR) dan High Sulfate Resistant (HSR).
- e. **Kelas E** : Digunakan dari kedalaman 10.000 ft (3050 meter) sampai 14.000 ft (4270 meter) dengan kondisi temperatur (130 – 145°C) dan tekanan formasi tinggi. Tersedia semen tipe Moderate Sulfate Resistant (MSR) dan High Sulfate Resistant (HSR).
- f. **Kelas F** : Digunakan dari kedalaman 10.000 ft (3050 meter) sampai 16.000 ft (4880 meter) dengan kondisi temperatur (130 – 160°C) dan tekanan formasi yang sangat tinggi. Tersedia semen tipe Moderate Sulfate Resistant (MSR) dan High Sulfate Resistant (HSR).
- g. **Kelas G** : Digunakan sebagai semen dasar untuk penyemenan dengan kedalaman dari permukaan sampai 8000 ft (2440 meter) dengan temperatur hingga 90°C. Bila ditambah dengan additives,

maka semen kelas G ini dapat digunakan pada tekanan dan temperatur yang lebih tinggi serta kedalaman yang lebih. sebagai semen dasar dan jika diperlukan dapat ditambah additives yang sesuai. Tersedia semen tipe Moderate Sulfate Resistent (MSR) dan High Sulfate Resistent (HSR).

- h. Kelas H** : Digunakan sebagai semen dasar untuk penyemenan dengan kedalaman dari permukaan sampai 8000 ft (2440 meter) dengan temperatur hingga 95<sup>o</sup>C. Tersedia semen tipe Moderate Sulfate Resistent (MSR) dan High Sulfate Resistent (HSR).

**Tabel IV-2.**  
**Klasifikasi Semen Berdasarkan API. <sup>18)</sup>**

<b>API Classification</b>	<b>Mixing Water (gal/sk )</b>	<b>Slurry Weight (lb/gal)</b>	<b>Well Depth (ft)</b>	<b>Static Temperatu r (<sup>o</sup>F)</b>
A (portland)	5.2	15.6	0 to 6.000	80 to 170
B (portland)	5.2	15.6	0 to 6.000	80 to 170
C (high early)	6.3	14.8	0 to 6.000	80 to 170
D (retarded)	4.3	16.4	6.000 to 12.000	170 to 260
E (retarded)	4.3	16.4	6.000 to 14.000	170 to 290
F (retarded)	4.3	16.2	10.000 to 16.000	230 to 320
G (basic)	5.0	15.8	0 to 8.000	80 to 170
H (basic)	4.3	16.4	0 to 8.000	80 to 170

#### **4.3. Sifat Fisik Semen Pemboran**

Bubur semen yang dibuat harus disesuaikan sifat-sifatnya dengan keadaan formasi yang akan disemen. Sifat-sifat bubur semen yang dimaksud adalah sebagai berikut : *density*, *thickening time*, *strength*, sifat filtrasi, permeabilitas semen, kualitas perforasi, ketahanan korosi dan pengaruh tekanan serta *temperature*.

### 1. Densitas

Penambahan air dan *additives* akan berpengaruh pada *density* bubur semen. Pada umumnya *density* bubur semen dibuat lebih besar dari *density* lumpur, hal ini mengingat bahwa kontaminasi lumpur akan meningkat dengan *density* yang relatif sama. Penentuan *density* bubur semen tergantung dari faktor berat jenis bubuk semen dan air. *Density* ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$D_{bs} = \frac{G_{bk} + G_w + G_a}{V_{bk} + V_w + V_a} \dots\dots\dots (4-1)$$

Keterangan :

- D<sub>bs</sub> : Densitas suspensi semen, ppg.
- G<sub>bk</sub> : Berat bubuk semen, lb.
- G<sub>w</sub> : Berat air, lb.
- G<sub>a</sub> : Berat *additives*, lb.
- V<sub>bk</sub> : Volume bubuk semen, gal.
- V<sub>w</sub> : Volume air, gal.
- V<sub>a</sub> : Volume *additives*, gal.

Densitas suspensi semen sangat berpengaruh terhadap tekanan hidrostatik suspensi semen di dalam lubang sumur. Bila formasi tidak sanggup menahan tekanan suspensi semen, maka akan menyebabkan formasi pecah, sehingga terjadi lost circulation. Untuk mengurangi densitas suspensi semen dapat ditambahkan *clay*, zat-zat kimia silikat jenis jenis *extender* atau bahan-bahan yang dapat memperbesar volume suspensi semen seperti *pozzolan*. Untuk memperbesar densitas suspensi semen dapat ditambahkan pasir atau material-material pemberat ke dalam suspensi semen seperti barite.

## 2. *Thickening Time & Viskositas*

Bubur semen harus tetap dalam keadaan cair agar dapat dipompakan ke tempat dimana semen harus mengeras dalam waktu tertentu. *Thickening Time (pumpability)* adalah waktu yang dibutuhkan bubur semen untuk mencapai konsistensi 100 poise. Harga 100 poise ini merupakan batas bubur semen masih dapat dipompakan. Dalam hidrasi semen makin lama makin mengeras dan naik viskositasnya. Viskositas pada semen disebut konsistensi karena semen merupakan fluida yang Non-Newtonian dan ini untuk membedakan terhadap istilah viskositas fluida newtonian. Untuk memperpanjang atau memperpendek *thickening time* adalah dengan menambahkan *additives-additives* ke bubur semen.

Besarnya *thickening time* yang diperlukan adalah tergantung dari kedalaman penyemenan, volume bubur semen yang akan dipompakan serta jenis penyemenan. Umumnya *thickening time* adalah 3 – 3,5 jam untuk penyemenan dengan kedalaman 6.000 – 18.000 ft. Waktu tersebut termasuk waktu pembuatan bubur semen sampai penempatan semen di belakang casing ditambah dengan harga safety faktor, sedangkan pada penyemenan yang lebih dalam dimana tekanan dan temperatur akan semakin tinggi sehingga diperlukan *additives-additives* untuk memperlambat pengerasan (*thickening time*).

Untuk memperpanjang *thickening time* perlu ditambahkan retarder ke dalam suspensi semen, seperti kalsium lignosulfonat, carboxymethyl retarder cellulose dan senyawa-senyawa asam organik. Untuk memperpendek *thickening time* dapat ditambahkan accelerator ke dalam suspensi semen seperti kalsium klorida, sodium klorida, gypsum, sodium silikat, air laut dan *additives* yang tergolong dispersant.

Bila semen mengeras di dalam casing merupakan problema yang fatal bagi operasi pemboran selanjutnya. Waktu pemompaan (*pumpability time*) yang maksimum umumnya disamakan dengan *thickening time* dengan pertimbangan faktor keamanan. Waktu pemompaan yang

diperlukan dipengaruhi oleh tinggi kolom dan volume suspensi semen yang harus dipompakan, kecepatan laju alir pemompaan dan temperatur operasi sumur tersebut.

### **3. Filtration Loss**

*Filtration loss* adalah peristiwa hilangnya cairan dalam suspensi semen ke dalam formasi permeabel yang dilaluinya. Cairan atau umumnya air yang masuk ini disebut dengan filtrat. Filtrat yang hilang tidak boleh terlalu banyak, karena akan membuat suspensi semen kekurangan air yang disebut dengan flash-set. Bila suspensi semen mengalami flash-set, maka akibatnya akan sama jika air yang dicampurkan dalam bubur semen yang jumlahnya lebih kecil dari kadar minimumnya. Akibatnya friksi pada *annulus* akan naik, pressure loss naik dan tekanan bubur semen di *annulus* juga naik. Bila hal ini terjadi, maka formasi akan rekah. Jadi dapat disimpulkan, bila formasi yang akan dilalui bubur semen merupakan formasi yang porous dan permeabel, maka perlu penambahan *additives* yang sesuai sebelum bubur semen dipompakan. *Filtration loss* yang direkomendasikan oleh API adalah :

- a. Untuk formasi permeabel dengan zona gas, dimana migrasi gas mudah terjadi maka semen dianjurkan memiliki semen *fluid loss* antara 20 – 40 ml / 30 menit.
- b. Untuk semen densitas tinggi dengan pengurangan kadar air yang dapat menimbulkan gangguan pada operasi pemompaan semen terutama pada pemompaan yang rendah API fluid lossnya adalah kurang dari 50 ml / 30 menit.
- c. Dan untuk semen *casing* produksi API fluid lossnya kurang dari 100 ml / 30 menit.

Pengujian *filtration loss* di laboratorium menggunakan alat *filter press* pada kondisi temperatur sirkulasi dengan tekanan 1000 psi. Namun filter loss mempunyai kelemahan yaitu temperatur maksimum yang dapat digunakan hanya sampai 90<sup>0</sup>F (194<sup>0</sup>C). *Filtration loss* diketahui dari

volume filtrat yang ditampung dalam sebuah tabung atau gelas ukur selama 30 menit masa pengujian. Bila waktu pengujian tidak sampai 30 menit maka besarnya *filtration loss* dapat diketahui dengan rumus :

$$F_{30} = F_t \frac{5.477}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots (4-2)$$

Keterangan :

$F_{30}$  : Filtrat pada 30 menit.

$F_t$  : Filtrat pada t menit.

t : Waktu pengukur, menit.

#### **4. Water Cement Ratio (WCR)**

*Water cement ratio* adalah perbandingan antara volume air dan semen yang dicampurkan untuk mendapatkan sifat-sifat bubur semen yang diinginkan. Air yang dicampurkan tidak boleh terlalu banyak ataupun kurang, karena akan mempengaruhi baik-buruknya ikatan semen nantinya. Batasannya diberikan dalam bentuk kadar maksimum dan minimum air. Kadar air minimum adalah jumlah air yang dicampurkan tanpa menyebabkan konsistensi suspensi semen lebih dari 30 Uc. Bila air yang ditambahkan lebih kecil dari kadar minimumnya maka akan menaikkan densitas suspensi semen yang akan menimbulkan gesekan (friksi) yang cukup besar di annulus sewaktu suspensi semen dipompakan yang akhirnya akan menaikkan tekanan di annulus.

Kadar air maksimum ditunjukkan oleh adanya kandungan air yang bebas (*free water*) yang dapat dicari dengan mengambil suspensi semen sebanyak 250 ml, kemudian dидiamkan selama 2 jam sehingga akan terjadi air bebas pada bagian atas tabung. Untuk semen kelas G air bebas yang terjadi tidak boleh lebih dari 3,5 ml (1.4%). Bila air bebas yang terjadi melebihi 3,5 ml maka akan terjadi pori-pori pada semen. Dan ini akan mengakibatkan semen mempunyai permeabilitas yang besar. Kandungan air normal dalam suspensi semen yang direkomendasikan oleh API dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel IV-3.**  
**Kandungan Air Normal Pada Suspensi Semen.<sup>18)</sup>**

<b>PROPERTIS OF NEAT CEMENT SLURRIES</b>				
<b>Class</b>	<b>Slurry Weight lb/gal</b>	<b>Gallon Mixing water / sak</b>	<b>Cuft Slurry sk. Cement</b>	<b>Percent Mixing Water</b>
A	15.6	5.2	1.18	46
B	15.6	5.2	1.18	46
C	15.8	6.32	1.32	56
D	16.46	4.29	1.05	38
G	15.8	4.97	1.15	44
H	16.46	4.29	1.05	38

### **5. *Waiting On Cement (WOC)***

*Waiting on cement* atau waktu menunggu pengerasan semen adalah waktu yang dihitung saat menunggu pengerasan suspensi semen setelah semen selesai ditempatkan. WOC ditentukan oleh faktor-faktor seperti tekanan dan temperatur sumur, WCR, compressive strength dan additives-additives yang dicampurkan ke dalam suspensi semen (seperti accelerator atau retarder). WOC berdasarkan API adalah jika compressive strength mencapai 1000 psi (7 Mpa).

### **6. Permeabilitas**

Permeabilitas diukur pada semen yang mengeras dan bermakna sama dengan permeabilitas pada batuan formasi yang berarti sebagai kemampuan untuk mengalirkan fluida. Semakin besar permeabilitas



semen maka semakin banyak fluida yang dapat melalui semen tersebut dan begitu pula sebaliknya.

Semen diinginkan tidak mempunyai permeabilitas. Karena jika semen mempunyai permeabilitas besar akan menyebabkan terjadinya kontak fluida antara formasi dengan *annulus* dan juga *strength* semen berkurang. Permeabilitas semen dapat naik karena air yang dicampurkan dalam bentuk bubuk semen terlalu banyak. Tetapi permeabilitas semen dapat juga meningkat karena terlalu berlebihan dalam penambahan *additives*.

Perhitungan permeabilitas semen di laboratorium dapat dilakukan dengan menggunakan “*Cement Permeameter*” dengan menggunakan sampel semen. Permeabilitas diukur dengan menggunakan laju alir air yang melalui luas permukaan sampel yang diberi perbedaan tekanan sepanjang sampel tersebut. Perhitungan permeabilitas dapat dilakukan dengan menggunakan rumus darcy sebagai berikut :

$$K = \frac{Q \times \mu \times L}{A \times \delta P} \dots\dots\dots(4-3)$$

Keterangan :

K : Permeabilitas, mD.

Q : Laju alir, ml/s.

$\mu$  : Viscositas, cp.

L : Panjang sampel, cm.

A : Luas permukaan sampel, cm<sup>2</sup>.

$\delta P$  : Perbedaan tekanan, psi.

Harga permeabilitas maksimum yang direkomendasikan oleh API adalah tidak lebih dari 0,1 mD. Permeabilitas semen erat kaitannya dengan kekuatan semen. Harga permeabilitas yang kecil akan menyebabkan harga *strength* yang besar begitupun sebaliknya.

## **7. Compressive Strength & Shear Strength**

*Strength* pada semen terbagi menjadi dua yaitu *compressive strength* dan *shear strength*. *Compressive strength* didefinisikan sebagai kekuatan semen dalam menahan tekanan-tekanan yang berasal dari formasi maupun dari casing, sedangkan *shear strength* didefinisikan sebagai kekuatan semen dalam menahan berat casing. Jadi *compressive strength* menahan tekanan-tekanan dalam arah horisontal dan *shear strength* menahan tekanan-tekanan pada arah vertikal.

*Compressive strength* dipengaruhi oleh besarnya kandungan air dalam suspensi semen dan lamanya waktu pengkondisian (*curing time*). Dalam mengukur *strength* semen seringkali yang diukur adalah *compressive strength*, sedang *shear strength* kurang diperhatikan. Umumnya *compressive strength* mempunyai harga 8 – 10 kali lebih dari harga *shear strength*. Pengujian *compressive strength* di laboratorium dilakukan dengan menggunakan alat “*Curing Chamber*” dan *water curing bath*, untuk kemudian diuji kekerasannya dengan menggunakan *hydraulic chamber*. *Curing chamber* dapat mensimulasikan kondisi semen untuk tekanan dan temperatur tinggi sesuai dengan temperatur dan tekanan formasi. *Hydraulic chamber* merupakan mesin pemecah semen yang sudah mengeras dalam *curing chamber*. *Compressive strength* minimum dirokemendasikan oleh API untuk dapat melanjutkan operasi pemboran adalah 500 psi. Sedang *shear strength* yang baik tidak kurang dari 100 psi, sehingga casing dapat terikat dengan kokoh. Dalam keadaan ini pemboran sudah dapat dilanjutkan. Dari segi teknis, *strength* semen diharuskan memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Kuat menahan pipa selubung.
- b. Mengisolasi zona-zona permeabel.
- c. Menahan goncangan-goncangan pemboran dan tidak pecah karena perforasi.
- d. Mencegah terjadinya kontak antara casing dengan fluida formasi.

Kapasitas daya dukung semen terhadap casing di dalam lubang bor, dinyatakan :

$$F = 0.969 \times S_c \times d \times H \dots\dots\dots (4-4)$$

Keterangan :

- F : Daya dukung semen atau beban rekah, lb.
- Sc : Compressive strength, psi.
- d : Diameter luar casing, in.
- H : Tinggi kolom semen, ft.

#### 4.4. Additif Penyemenan

Ber macam-macam semen telah dibuat orang untuk memenuhi kebutuhan bermacam-macam kondisi sumur, seperti kedalaman, temperatur, tekanan dan ini dapat diubah-ubah densitas dan *thickening time*-nya dalam batas-batas tertentu dengan mengubah kadar air. *Additives* atau zat-zat tambahan adalah material-material yang ditambahkan pada semen untuk memberikan variasi yang lebih luas pada sifat-sifat bubuk semen agar memenuhi persyaratan yang diinginkan. *Additives* ini penting sekali dalam perencanaan bubuk semen karena digunakan untuk :

- a. Mempercepat atau memperlambat *thickening time*.
- b. Memperbesar *strength*.
- c. Menaikkan atau menurunkan *density* bubuk semen.
- d. Menaikkan volume bubuk semen.
- e. Mencegah *lost circulation*.
- f. Mengurangi *fluid loss*.
- g. Menaikkan sifat tahan lama (*durability*).
- h. Mencegah kontaminasi gas pada semen.
- i. Menekan biaya.

##### 1. *Accelelator*

Adalah *additives* yang digunakan untuk mempercepat pengerasan bubuk semen. Penggunaan *additives* ini terutama untuk penyemenan

pada temperatur dan tekanan rendah (sumur yang dibor masih dangkal) yang umumnya juga karena jarak untuk mencapai target tidak terlalu panjang. Selain itu juga mempercepat naiknya *strength* semen dan mengimbangi *additives* lain (seperti *dispersant* dan *fluid loss control agent*), agar tidak tertunda proses pengerasan suspensi semennya. Contoh-contoh *additives* yang berlaku sebagai *accelerator* yang umum digunakan adalah Calcium Chloride, Sodium Chloride, Gypsum, Sodium Silicate dan Sea Water.

**Tabel IV-4.**  
**Accelerator untuk semen Klas A,B, C, G dan H. <sup>18)</sup>**

<b>Accelerator</b>	<b>Amount Used (wt% of cement)</b>
Calcium chloride (CaCl <sub>2</sub> ) (flake, powdered, anhydrous)	2 to 4
Sodium chloride (salt - NaCl)	3 to 10 *
Gypsum - hemihydrate form (plaster of Paris)	20 to 100
Sodium silicate (Na <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> )	1 to 7.5
Cement dispersant (with reduced water)	0.5 to 1.0
Sea water (as mixing water)	-
* Percent by weight of water	

## **2. Retarder**

Adalah *additives* yang digunakan untuk memperpanjang waktu pengerasan. Hal ini biasanya dilakukan pada penyemenan sumur yang

dalam, dimana temperaturnya tinggi. *Additives* yang berfungsi sebagai *retarders* antara lain : Lignosulfonate, Organic Acids, Modified Lignosulfonate, Carboxy Methyl Hydroxy Ethyl Cellulose.

**Tabel IV-5. Retarder.** <sup>18)</sup>

Material	Usual Amount Used
Lignin retarder	0.1 to 1.0% *
Calcium lignosulfonate, organic acid	0.1 to 2.5% *
Carboxymethyl Hydroxyethyl Cellulose (CMHEC)	0.1 to 1.5%
Saturated salt	14 to 16 lbm/sack of cement
Borax	0.1 to 0.5% *
* Percent by weight of water	

### 3. Extender

Merupakan *additives* yang digunakan untuk membuat volume bubuk semen menjadi lebih banyak dari setiap sak semennya, karena diperlukan penambahan air. Dengan demikian extenders berfungsi sebagai *additives* yang dapat mengurangi atau menurunkan *density* bubuk semen. yang termasuk *extenders* adalah : Bentonite-Attapulgite, Gilsonite, Diatomaceous Earth, Perlite dan Pozzolans.

**Tabel IV-6.**  
**Extender.** <sup>18)</sup>

<b>Material</b>	<b>Amount Used</b>
Bentonite	2 to 16 wt% of cement
Diatomaceous earth	10, 20, 30 or 40 wt% of cement
Gilsonite	1 to 50 lb/sk of cement
Coal	5 to 50 lb/sk of cement
Expanded perlite	5 to 20 lb/sk of cement
Nitrogen	0 to 70%
Sodium silicate	1 to 1.75 lb/sk of cement

#### **4. Weighting agents**

Merupakan *additives* yang digunakan untuk memperbesar *density* bubuk semen dan biasanya digunakan pada formasi yang bertekanan tinggi yang berguna mengurangi kemungkinan terjadinya *blow out*. yang termasuk dalam *additives* ini adalah : Hematite, Limenite, Barite dan pasir.

**Tabel IV-7.**  
**Additif Penambah Berat Semen.** <sup>18)</sup>

<b>Material</b>	<b>Amount Used (wt% of cement)</b>
Hematite	4 to 104
Ilmenite (iron-titanium oxide)	5 to 100
Barite	10 to 108
Sand	5 to 25
Salt	5 to 16
Cement with dispersant and reduced water	0.05 to 1.75

#### **5. Dispersant**

Adalah *additives* yang berfungsi untuk mengurangi viskositas suspensi semen. Pengurangan viskositas atau friksi terjadi karena

dispersant mempunyai kelakuan sebagai *thinner* (pengencer). Hal ini menyebabkan suspensi semen menjadi encer, sehingga dapat mengalir dengan aliran *turbulensi* walaupun dipompa dengan laju pemompaan yang rendah. *Additives* yang dapat digunakan adalah Organic Acids, Lignosulfonate, Polymers dan Sodium Chloride.

**Tabel IV-8.**  
**Dispersants.** <sup>18)</sup>

Type of Material	Amount Used (lb/sack of cement)
Polymer : Blend	0.3 to 0.5
Long chain	0.5 to 1.5
Sodium chloride	1 to 16
Calcium lignosulfonate, organic acid (retarder and dispersant)	0.5 to 1.5

## 6. Fluid Loss Control Agents

*Fluid loss control agent* adalah *additives* yang berfungsi mencegah hilangnya fasa liquid semen ke dalam formasi, sehingga terjaga kandungan cairan pada suspensi semen. *Additives* yang termasuk ke dalam fluid loss control agents diantaranya polymer, CMHEC dan Latex.

**Tabel IV-9.**  
**Filtration Control Additives.** <sup>18)</sup>

Type and Fuction of Additives	Recom mended Types of Amount Cement	How Handled
Organic polymer (cellulose) to form micellers	0.5 to 1.5%	All API classes Dry mixed
Organic polymers (dispersants) to improve prarticle-size distribution and form micelles in the filter cake	0.5 to 1.25%	All API classes Dry mixed or with (densifie mixing

			d)	water
Carboxymethyl hydroxyethyl cellulose to form Micelles	0.3 to 1.0%	All API classes		Dry mixed
Latex additive to form films	1.0 gal/sack	All API classes		Dry mixed or with mixing water
Bentonite cement with dispersant to improve particle-size distribution	12 to 16% gel, 0.7 to 1.0% dispersant	API class A, G, or H		Batch mixed

### 7. Loss Circulation Control Agents

Seperti halnya dengan sirkulasi lumpur pemboran pada sirkulasi bubuk semen pada penyemenan bisa juga terjadi kehilangan bubuk semen. Sehingga di sini perlu ditambahkan *additives* untuk menghindari hal tersebut. *Gilsonite* dianggap material yang paling baik untuk itu, selain itu juga dapat berfungsi sebagai *extenders*. *Lost Circulation Materials* lainnya : Walnut Hulls, Cellophane Flakes dan Nylon Fibers.

**Tabel IV-10.**  
**Additives Untuk Semen Loss Circulation.<sup>18)</sup>**

Type	Material	Nature of Particles	Amount Used	Water Required
<b>Additives for Controlling Lost Circulation</b>				
Granular	Gilsonite	Graded	1 to 50 lbm/sack	2 gal / 50 lbm
	Perlite	Expanded	1/2 to 1 cuft/sack	4 gal/cuft



	Walnut shells	Graded	1 to 5 lbm/sack	0.85 gal / 50 lbm
Lamellted	Coal	Graded	1 to 10 lbm/sack	2 gal / 50 lbm
Fibrous	Cellophane	Flake	1/8 to 2 lbm/sack	None
	Nylon	Short-fibered	1/8 to 1/4 lbm/sack	None
<b>Formulation of Material for Controlling Lost Circulation</b>				
Semisolid or flash setting	Gypsum cement	-	-	4.8 gal / 100 lbm
	Gypsum / portland cement	-	10 to 20% gypsum	5.0 gal / 100 lbm
	Bentonite cement	-	10 to 25% gel	12 to 16 gal/sack (the silicate is mixed with water before adding cement)
Quick gelling	Cement + sodium silicate	-	-	-
	Bentonite / diesel oil	-	-	-

## 8. Specially Additives

Ada bermacam-macam *additives* lainnya yang dikelompokkan sebagai *specially additives*, diantaranya adalah silika, mud kill, radioactive tracers, fibers, antifoam agent.

### a. Mud Decontaminant

Berfungsi sebagai additives yang menetralkan bubuk semen terhadap zat-zat kimia dalam lumpur pemboran. Contoh mud kill adalah paraformaldehid. Mud kill juga memberi keuntungan seperti memperkuat ikatan semen dan memperbesar strength semen.

### b. Radioactive Tracers

Radioactive tracers ditambahkan ke dalam suspensi semen supaya memudahkan operasi logging dalam menentukan posisi semen dan mengetahui kualitas ikatan semen.

### c. Antifoam Agents

Adanya foam (busa) dalam suspensi semen sering menyebabkan hilangnya tekanan pemompaan, maka untuk mencegahnya ditambahkan antifoam agent. Polypropylene Glycol adalah contoh antifoam agent yang sering digunakan, karena selain efektif juga harganya murah.

**Tabel IV-11.**  
**Additif Spesial Untuk Semen. <sup>18)</sup>**

<b>Additives</b>	<b>Recommended Quantity</b>
Mud decontaminants	1.0% *
Silica flour	30 to 40% *
Radioactive tracers	Variable
Dyes	0.1 to 1.0% *
Hydrazine	6 gal / 1.000 bbls mud
Fibers	0.125 to 0.5% *
Gypsum	4 to 10% *
* Percent by weight of cement	

# **MODUL V**

## **MATERIAL KEPALA SUMUR**

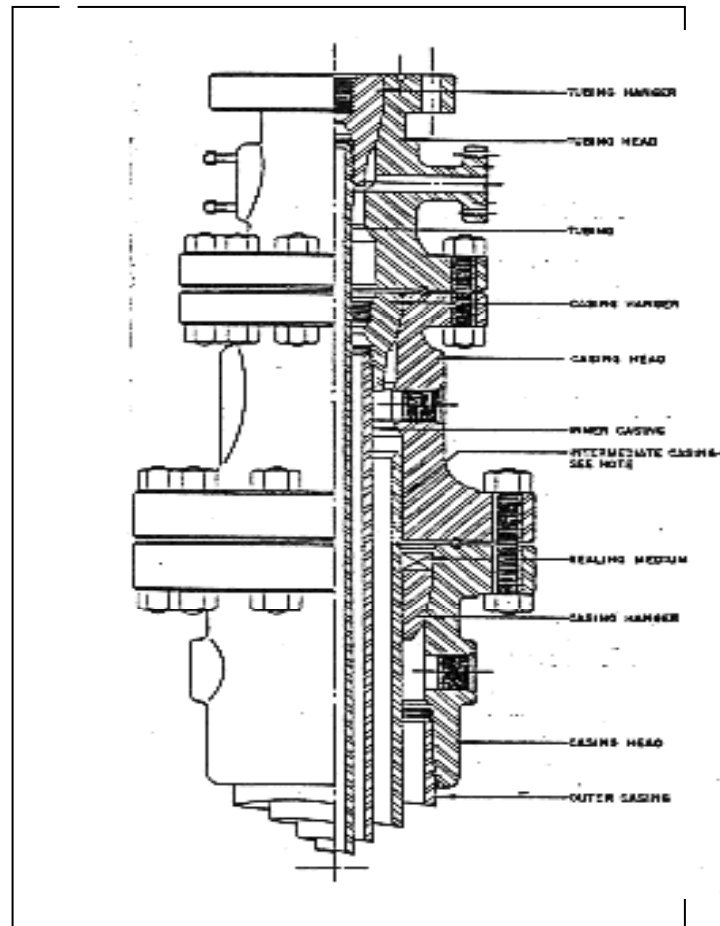
Peralatan di kepala sumur meliputi wellhead, christmas tree, choke, adapter dan crossover flange.

### **Well Head**

Wellhead atau kepala sumur adalah istilah yang memberi arti tempat berpautnya peralatan / rangkaian pipa di dalam sumur, tempat untuk menahan / menopang, menyekat casing dan tubing serta untuk mengontrol produksi sumur dari semburan atau kebocoran cairan sumur ke permukaan. Well Head merupakan peralatan produksi permukaan, yang terbuat dari besi baja. Gambar Wellhead dapat dilihat pada gambar 1.

Wellhead ini tersusun atas casing head dan tubing head. Peralatan wellhead dalam standar <sup>0</sup>API diklasifikasikan berdasarkan kesanggupannya dalam menahan tekanan kerja (working pressure) yang berkisar antara 960 psi sampai 15000 psi. Jenis - jenis dari wellhead serta bentuk yang digunakan dibedakan menurut kondisi dari sumur dan formasinya. Wellhead untuk tekanan yang tinggi

menghendaki tekanan formasi yang tinggi. Misalnya tekanan yang berkisar antara 10000 – 15000 psi memakai wellhead yang berat.



**Gambar 1**

**Wellhead beserta Komponen-Komponennya** <sup>(5)</sup>  
Fungsi dari wellhead, antara lain adalah :

- Untuk pelindung dan tempat bergantung casing
- Untuk penahan tekanan tinggi

- Sebagai pengontrol sumur di permukaan (jika terjadi kick atau terjadi kerusakan peralatan di bawah permukaan)
- Merubah aliran vertikal dari tubing ke aliran horizontal dalam flowline

Pada lapangan yang memproduksi jenis minyak berat biasanya dari wellhead ini akan diinjeksikan suatu zat kimia tertentu atau fluida panas agar fluida yang mengalir dari pipa vertikal ke wellhead tidak menimbulkan penyumbatan-penyumbatan sehingga fluida produksi dapat mengalir dengan baik. Beberapa kriteria dalam perencanaan wellhead didasarkan atas :

- Perencanaan casing dan completion
- Tipe fluida dan laju produksi yang diharapkan
- Tekanan dan temperatur
- Pertimbangan – pertimbangan lingkungan

Dalam suatu rangkaian wellhead terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu :

- A. Casing Head
- B. Casing Hanger
- C. Tubing Head
- D. Tubing Hanger
- E. Christmass Tree

Pemilihan wellhead perlu dilakukan untuk memberikan keselamatan kerja pada saat penggantian atau pemasangan alat tersebut. Yang terpenting dalam pemilihan ukuran wellhead adalah memilih wellhead sesuai dengan range tekanan dan menentukan diameter choke yang dibutuhkan.

Dalam hal ini pemilihan peralatan tersebut ditentukan berdasarkan American Petroleum Institute (API). Peralatan wellhead dalam standar API diklasifikasikan berdasarkan kesanggupannya dalam menahan tekanan kerja (working pressure) yang berkisar antara 960 – 15000 psi, seperti ditunjukkan pada tabel 1.

**Tabel 1.**  
**Standard API untuk Wellhead <sup>(14)</sup>**

<b>Mark cold working (psia)</b>	<b>Hidrostatik test pressure (psia)</b>	<b>Former Corresponding Series Designation</b>
960	1440	Series 400
2000	4000	Series 600
3000	6000	Series 900
5000	10000	Series 1500
10000	15000	Series 2900
15000	22500	Series 2900

## ➤ **Casing Head**

Casing head disebut juga landing base. Digunakan untuk menahan casing berikutnya yang lebih kecil, memberikan suatu penyekat antara rangkaian casing, memberikan suatu hubungan dengan annulus dan sebagai landasan blow out preventer. Casing head harus direncanakan untuk dapat menahan berat intermediate casing berikutnya yang akan dipasang tanpa menyebabkan kerusakan pada casing.

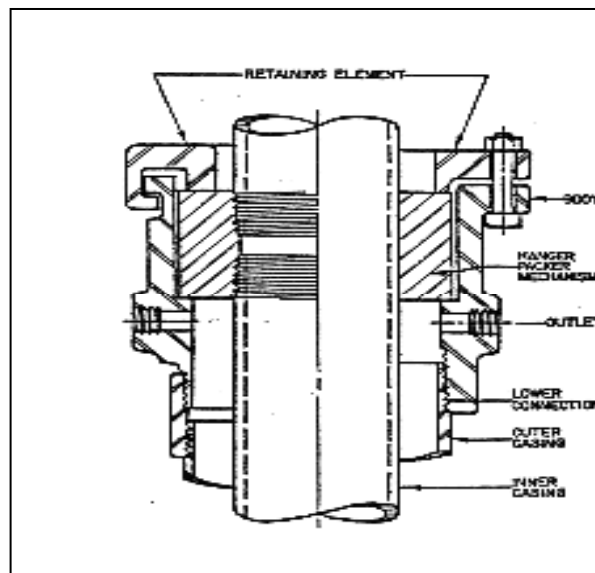
### 1. Lowermost Casing Head

Lowermost casing head merupakan bagian paling bawah dari peralatan wellhead yang akan berpaut dengan bagian atas surface casing dan berfungsi untuk menopang rangkaian surface casing serta menyekat annulus diantara rangkaian casing head. Bagian-bagian dari lowermost casing head adalah :

- Lower connection , yaitu bagian paling bawah yang berfungsi untuk menyambung puncak dari surface casing dengan lowermost casing head.
- Outlet, yaitu saluran keluar yang berfungsi untuk mencatat tekanan annulus dan tempat pemasangan katup.

- Ring gasket, yaitu sebagai penyekat antara casing dan lowermost casing head bagian dalam.
- Casing hanger, yaitu merupakan bagian paling atas yang berfungsi sebagai tempat terpautnya blow out preventer, intermediate casing head, dan tubing head.

Ada beberapa macam ukuran dari lowermost casing head yaitu dari 6"- 20", sedangkan yang digunakan untuk menopang rangkaian casing adalah ukuran antara 4"- 6". Gambar 2. memperlihatkan penampang dari lowermost casing head.



**Gambar 2.**  
**Lowermost Casing Head <sup>(14)</sup>**



Dalam pemilihan ukuran peralatan lowermost casing head harus dipertimbangkan hal-hal sebagai berikut :

1. Desain

Casing harus didesain agar dapat menerima casing hanger tanpa menyebabkan kerusakan pada rangkaian casingnya.

2. Tekanan kerja (working pressure)

Tekanan kerja minimum sekurang-kurangnya harus sama dengan tekanan formasi untuk dasar surface casing. Sedangkan tekanan kerja maksimum paling tidak harus sama dengan tekanan formasi pada dasar casing string berikutnya yang lebih kecil.

3. Lock screw

Lock screw pada casing head flange berguna sebagai perlengkapan keamanan tambahan ketika menentukan tekanan annulus atau sedang mengganti casing yang lebih ringan.

4. Ukuran (size)

Ukuran flange harus dapat memberikan lubang masuk yang luas untuk pipa dipermukaan dengan ukuran minimum.

2. Intermediate Casing Head

Intermediate casing head disebut juga casing head spool yang berfungsi untuk menahan casing berikutnya yang lebih kecil dan memberikan suatu hubungan ruang annulus antara masing-masing casing. Bagian-bagian dari intermediate casing head yang dapat diterangkan :

- Top flange, mempunyai fungsi sama dengan lowermost casing head, yaitu sebagai tempat terpautnya intermediate casing head atau tempat berpautnya tubing head dengan menggunakan lock screw.
- Casing hanger, yaitu berfungsi untuk menopang rangkaian casing yang lebih kecil tanpa menyebabkan kerusakan pada pipa.
- Lower flange, yaitu berfungsi sebagai tempat untuk memasang bit guide yang dapat dipindahkan dan tempat untuk memasang seal selanjutnya. Pemasangan bit guide ini bertujuan untuk melindungi bagian atas dari rangkaian intermediate casing terhadap kerusakan oleh bit dan peralatan-peralatan lain yang diturunkan kedalam lubang bor.
- Outlet, yaitu merupakan saluran keluar yang jumlahnya bisa satu atau dua buah. Pada saluran keluar ini biasanya dipasang katup-katup.

Pada umumnya tekanan kerja minimum dari intermediate casing head sama atau lebih besar dari tekanan maksimum yang menyebabkan kerusakan formasi pada bagian dasar dari rangkaian casing intermediate. Sedangkan tekanan kerja maksimumnya paling tidak sama dengan tekanan pada dasar rangkaian pipa casing yang tergantung pada intermediate casing head.

Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan intermediate casing head, antara lain :

1. Ukuran dan tekanan kerja dari bottom flange harus sesuai dengan top flange dari casing head dibawahnya, misalnya ukuran bottom flange pada intermediate casing harus sama dengan ukuran top flange dari lowermost casing head.
2. Top flange intermediate casing head ukurannya disesuaikan dengan pemakaian tubing spool.
3. Ukuran bit guide dan secondary seal harus sesuai dan cocok dalam menggantung casing.
4. Harus memiliki penyesuaian ukuran, jenis dan tekanan kerja untuk lubang saluran keluar.

### ➤ **Casing Hanger**

Dalam pemilihan casing hanger akan sangat ditentukan oleh ukuran diameter luar casing yang akan ditopang oleh casing hanger tersebut. Ukuran dari casing hanger umumnya berkisar antara 6"- 20", sedangkan untuk menopang casing biasanya digunakan ukuran 4"- 16". Untuk casing hanger biasanya ukuran yang dipakai ialah sebagai berikut ;

- Casing hanger 8" untuk casing 4"- 5"
- Casing hanger 10" untuk casing 4"- 7 <sup>5</sup>/<sub>8</sub>"
- Casing hanger 12" untuk casing 5"- 9 <sup>5</sup>/<sub>8</sub>"

Pada umumnya casing hanger harus mampu menahan tekanan kerja yang cukup tinggi karena akan menopang atau menahan rangkaian casing berikutnya. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan casing hanger antara lain :

1. Casing hanger yang dipilih harus mampu menggantung seluruh joint strength dari casing yang dipergunakan dan tidak mengurangi ukuran penampang. Apabila terjadi pengurangan penampang maka akan timbul kesulitan-kesulitan pada pemasangan alat di dalam sumur.
2. Pack off atau seal utama harus disusun sedemikian rupa sehingga tekanan sumur, tekanan flange, atau tekanan rekah tidak dapat mengurangi kekuatan casing hanger.

3. Memilih pack-off yang dapat diatur dan dipindahkan tanpa menggerakkan rangkaian casing yang digantung.
4. Memilih casing hanger yang sesuai, sehingga dapat cocok di dalam mangkok casing head dan dapat digunakan untuk menopang casing.

### ➤ **Tubing Head**

Tubing head ini ditempatkan di atas casing head dan berfungsi untuk menggantungkan tubing string dan memberikan suatu pack-off antara tubing string dengan production string. Disamping itu juga memberikan hubungan annulus casing dan tubing melalui outlet samping.

Berdasarkan mangkok tubingnya maka tubing head dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu : tubing head untuk satu rangkaian tubing (single string), tubing head untuk beberapa rangkaian tubing (multi string). Bagian-bagian utama dari tubing head adalah :

- Top flange, top flange disini dilengkapi dengan lock screw yang berfungsi untuk menahan tubing hanger pada tempatnya dan memberikan tekanan pada tubing hanger seal dan seal annulus.

- Tubing hanger, untuk menggantungkan tubing dan memberikan penyekat antara tubing dan tubing head.
- Outlet, merupakan saluran keluar yang jumlahnya bisa satu atau dua buah.
- Lower flange, merupakan tempat untuk memasang bit guide dan secondary seal.

Dalam pemilihan tubing head dapat dibedakan menjadi dua macam berdasarkan perencanaan mangkok tubingnya, yaitu :

#### 1. Tubing head untuk single completion

Untuk pemilihan ukuran tubing head ini dapat dipenuhi dengan kriteria sebagai berikut : untuk tubing head yang mempunyai ukuran 6", maka top flange minimum mempunyai ukuran  $6 \frac{5}{16}$ " , dimana akan memberikan pembukaan penuh (full opening) sampai 7" atau rangkaian peralatan produksi yang mempunyai ukuran lebih kecil. Apabila digunakan tubing string dengan ukuran  $7 \frac{5}{8}$ " maka harus digunakan tubing head dengan ukuran pembukaan penuh untuk ukuran bit  $6 \frac{3}{4}$ ". Adapun ukuran lower flange berkisar antara 6 - 12". Dan fungsinya sebagai penopang rangkaian casing produksi dengan ukuran  $4 - 10 \frac{3}{4}$ ".

Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan tubing head, yaitu :

- a. Lower flange dari tubing head harus mempunyai ukuran dan tekanan kerja yang sesuai dengan top flange dari casing head sebelumnya.
- b. Memilih bit guide dan secondary seal yang ukurannya sesuai dengan rangkaian casing yang digunakan untuk produksi fluida sumur.
- c. Besarnya tekanan kerja dari tubing head harus sama atau lebih besar dari harga tekanan permukaan saat sumur ditutup.
- d. Ukuran flange bagian atas harus sesuai dengan ukuran tubing hanger yang diperlukan.
- e. Tubing head harus mempunyai saluran keluar yang sesuai dengan ukuran dan tekanan kerjanya.
- f. Tubing head harus sesuai dengan semua kemungkinan keadaan produksi seperti pumping dan gas lift.

## 2. Tubing head untuk multiple completion

Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pemilihan mangkuk tubing untuk multiple completion, yaitu :

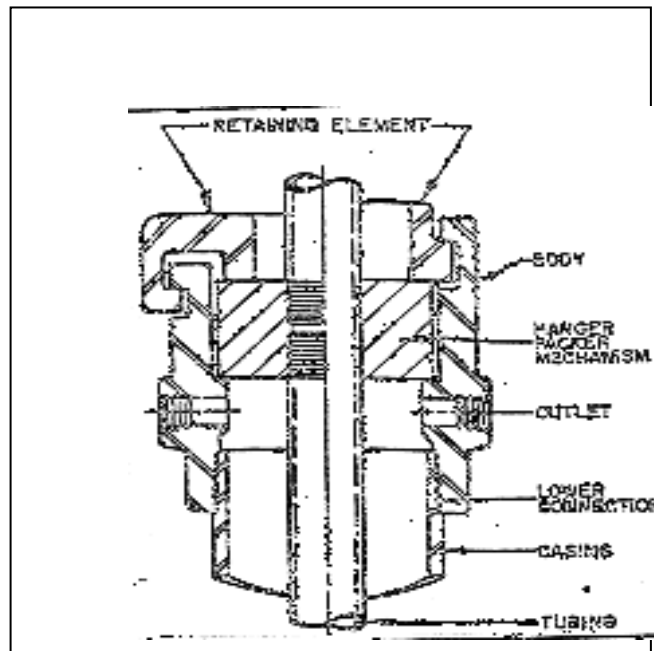
1. Memilih ukuran yang sesuai dengan desain bagian dalam supaya dapat menerima tubing hanger yang diinginkan.

2. Merencanakan tubing hanger sehingga masih tetap berlaku untuk menggantung sejumlah rangkaian tubing yang lebih kecil atau sebuah rangkaian tubing.
3. Tubing head direncanakan agar dapat menerima hangernya sehingga dapat dipasang tanpa membuka BOP-nya.
4. Menggunakan alat pemandu untuk menentukan arah tubing hanger yang tepat.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar dari tubing head untuk multiple completion pada gambar 3. Selanjutnya dalam pemilihan multiple completion tubing hanger, maka faktor-faktor yang harus dipertimbangkan adalah :

1. Memilih seal yang terdapat diantara masing-masing tubing hanger, supaya tidak terjadi kerusakan pada waktu pemasangan tubing.
2. Memilih elemen pack-off yang tepat atau seal yang sesuai.
3. Merencanakan agar pada waktu menggantungkan rangkaian tubing dalam casing bagian atas tidak terpecah.





**Gambar 3.**  
**Tubing Head untuk Multiple Completion <sup>(14)</sup>**

4. Menyusun hanger sehingga pemasangan katup back pressure sesuai dengan tempatnya.
5. Hanger harus disusun untuk ketepatan atau keakuratan test tekanan.

## **Riwayat Hidup Penulis**



### **PERSONAL :**

Nama : Dr. Ing. Ir. H. KRT. Nur Suhascaryo, B.Eng., M.Eng.  
Lahir : Jakarta, 17 May 1961  
Penguasaan Bahasa : Indonesia dan Inggris

### Alamat:

Rumah: Puri UPN “Veteran” Baru Blok B/Kav. 44, Kergan Wedomartani  
Ngeplak Sleman, Jogjakarta.  
Kantor : Jurusan Teknik Perminyakan, FTM-UPN  
“Veteran”, Jogjakarta. Ring road Condongcatur Sleman,  
Telp./Faks. 62-274-486056;  
E-mail : [suhascaryo@yahoo.com](mailto:suhascaryo@yahoo.com)  
Hp : 0812-270-2173  
Telp. rumah : 0274. 870245

### **KELUARGA :**

Isteri : Dra. Tarfu’ah  
Anak-anak : 1. R. Rr. Retno Nurswitar Dwiyanti  
2. R. Oka Tuwondo (died)  
3. R. Rr. Hasthi Nuroktriana Mispawanti  
4. R. Muhammad Nuryandono Mispafuad  
5. R. Rr. Azizah Nursinta Rubyandini

### **PENDIDIKAN :**

1984 : Lulus Sarjana Muda (B.Eng.), Fakultas Teknik Perminyakan,  
UPN “Veteran” Jogjakarta.  
1991 : Lulus Sarjana (Ir.), Fakultas Teknik Perminyakan UPN  
“Veteran” Jogjakarta.  
1996 : Lulus Magister Teknik Perminyakan (M.Eng), Fak. Tek. Mineral,  
Pascasarjana ITB, Bandung.

2007 : Lulus Doktor Teknik Perminyakan (Dr. Ing), Fakultas Ilmu  
Kebumihan dan Teknologi Mineral, Pascasarjana ITB, Bandung.

#### **RIWAYAT PEKERJAAN:**

- 1984 – 1987 : Assisten Fakultas Teknik Perminyakan, UPN  
“Veteran” Jogjakarta.
- 1988 – Sekarang : Dosen Tetap Fakultas Teknik Perminyakan, UPN “Veteran”  
Jogjakarta.
- 1990 – 1994 : Kepala Lab Studio Peralatan Produksi, Fakultas Teknik  
Perminyakan, UPN “Veteran” Jogjakarta.
- 1994 – 1996 : Study Master program on ITB, Lulus Magister Teknik  
Fakultas Teknologi Mineral, PPS - ITB, Bandung.
- 1998 – 2000 : Kepala Lab. Peralatan Pemboran, Jurusan Teknik Perminyakan  
FTM UPN “Veteran” Jogjakarta.
- 2000 : Tugas Presentasi Makalah di Morioka Japan, pada acara World  
Geothermal Congress (WGC II)
- 2001 : Wakil Pusat Studi MATERIAL, LPPM UPN “Veteran”  
Jogjakarta.
- 2000 : Kepala Lab. Lumpur Pemboran, Jur. Tek Perminyakan, UPN  
“Veteran” Jogjakarta.
- 2001 : Study Doktor Program di sekolah Pascasarjana ITB,  
Bandung, Lulus tahun akademik 2006-2007.
- 2005 : Tugas Presentasi makalah di Atalya Turkey, World Geothermal  
Congress (WGC III)
- 2010 : Tugas Presentasi makalah di Nusa Dua Bali, Indonesia, World  
Geothermal Congress (WGC IV).
- 2008-2011 : Ketua TIM Pelaksana Kerjasama UPN “Veteran” Jogjakarta –  
Dili Institute Technology (DIT) Timor Leste.

#### **PENGALAMAN PROFESI :**

1. Study laboratoris tentang aktifasi pemanfaatan bentonite lokal untuk  
dijadikan bahan dasar lumpur pemboran, Thesis Magister Teknik,  
Departemen Teknik Perminyakan, 1996, ITB, Bandung.
2. Studi problem pemboran tentang penggunaan lumpur lapangan Cipari,  
Pertamina UEP III Cirebon, 1995. Anggota tim riset, ITB, Bandung.
3. Studi kapasitas tukar kation bentonite local untuk dijadikan lumpur  
pemboran, Kopertis V, 1997, Jogjakarta.
4. Studi geolistrik untuk mencari sumber air tanah dalam di daerah Trangkil  
gunung Pati, Ungaran Jawa Tengah, 2001, Untag Semarang -UPN  
“Veteran” Jogjakarta.
5. Stud analisa cutting dan pengembangan clay sumur Tambun, DOH  
Pertamina Cirebon, 2001

6. Studi laboratory tentang barite lokal untuk dijadikan material pemberat lumpur pemboran, PT. Disky, 2002, Jakarta.
7. Studi laborator dari water based and oil based mud, PT. Intekindo & PT. Promosindo, 2003, Jakarta.
8. Studi dari sintec fluid pilot project untuk lapangan Migas, Anggota tim riset Drilling Laboratories ITB, 2002, Bandung.
9. Studi tentang expanding cement untuk meningkatkan kekuatan ikatan geser (shearbond strength) pada lapangan Migas, Anggota tim riset selektip LPPM ITB, Bandung 2003.
10. Studi endapan bentonite local Kupang untuk dijadikan bahan dasar pembuat lumpur bor, Hiber Dikti, 2006, Anggota tim riset, Universitas Nusa Cendana Kupang.
11. Studi tentang kualitas ikatan geser semen pengembang untuk kondisi HTHP, Anggota tim riset Ogrindo, Departemen Teknik Perminyakan, FIKTM ITB, Bandung 2004 –2006.
12. Studi dari Outsanding and Continous Sanding untuk Regional Sand Study, Unocal Chevron, member of research, ITB, Bandung, 2005-2006.
13. Publikasi makalah dengan judul: Design of drilling fluid low solids content on Vispex System, World Geothermal Congress, Morioka, Japan, 2000.
14. Publication paper entitled : The effort of additive new expanding for Increasing shearbond strength under high temperature and pressure., Simposium and congress IATMI, 2001, Jogjakarta.
15. Publication paper entitled : Design of drilling fluids low solid content for geothermal fields study or HTHP Condition, World Geothermal congress, Atalya, Turkey, 2005.
16. Publication paper entitled : Design of cement slurry and hardness characterization on high temperature and pressure conditioning for oil and geothermal field, World Geothermal Congress, Atalya Turkey, 2005.
17. Publication paper entitled : Study laboratories of mineral charatrerizations formed on cement hardness after conditions HTHP curing chamber on 168 hours, 200 °C, and 2000 psi. Simposium Nasional IATMI, 2005, ITB Bandung.
18. Publication paper entitled : Study laboratories of light weight cement system on HTHP conditions, Simposium and Congress Nasional IATMI, 2004, Jakarta.
19. Lecturer on Dinas Pertambangan Propinsi Jawa Barat entitled : Drilling operations on onshore and offshore field, Bandung, 2001.
20. Lecturer on Dinas Pertambangan Propinsi Jawa Barat entitled : Improvement Oil Recovery (IOR) for old and marginal oil and gas field, Bandung, 2001.
21. Lecturer on PT. Huprima Jogjakarta entitled : The planning and optimization electrical submersible pump (ESP), Hotel Garuda, Jogjakarta, 2002.
22. Lecturer on PT. MSI Jogjakarta entitled : Drilling pronogsis, optimization, and authorised future expenditure, Hotel Melia Purosani, Jogjakarta, 2002.
23. Lecturer on PT. MSI Jogjakarta entitled : Advanced process design on oil and gas well field, Hotel Melia Purosani, jogjakarta, 2003.

24. Lecturer on MITT-XI LPPM ITB entitled : Well completion, well equipment, pigging operations, and compressor, Hotel Gunung Puteri Lembang, Jawa barat, 2002.
25. Lecturer on PT. MCP Jakarta entitled : Gas well Technology Process, Hotel Melia Purosani, Jogjakarta, 2001.
26. Lecturer on Mud Training Job for employ Pertamina entitled : Design drilling fluid, water based and oil based mud, Drilling Lab. Petroleum Dept. ITB, Bandung 1995-1996.
27. Lecturer on Mud Training Job for employ Pertamina entitled : Design drilling fluid, water based and oil based mud, Drilling Lab. Petroleum Dept., UPN "Veteran" Jogjakarta, 1998 -2000.
28. Lecturer on POLTEK PPKP – UNY entitled : Drilling operation, drilling planning, and advanced drilling technology, Jogjakarta, 1999-2002.
29. Lecturer Assistant on Petroleum Department of FIKTM ITB Bandung entitled  
Advanced Drilling for Magister Programe and Laboratories Coordinators Practical for S1 Programe, Bandung 2005.
30. Lecturer on PT. HCP Trainer Tangerang entitled : Basic Concept Technology for increasing production rate to found incremental recovery reserve, May-June 2006, Bandung.
31. Member of Discussion for Alternatives Energy and Solving Problema in Indonesia, BPPT-Menristek RI, 15 September 2006, Jakarta.
32. Member of Research PT. Alamjaya Makmur Sejahtera (AMS), Pekerjaan pembagunan, simulasi dan implementasi system informasi manajemen pengaturan dan pengawasan kegiatan usaha penyediaan dan pendistribusian BBM dan pengangkutan Gas Bumi melalui pipa, Maret-Juni 2006, Jakarta.
33. Lecturer on PT. Back Trainer Jakarta entitled : Gas Processing Plant, Agustus-September 2006, Bandung.
34. Kajian Karakteristik *Expanding Additive* Lokal Untuk Semen Dalam Negeri Pada Sumur-Sumur Migas, Riset Disertasi ITB, Bandung, 2001-2006.
35. Lecturer on PT. Mawas Multidaya Teknik Jogjakarta entitled : Technical concept of improving well productivity and oil recovery, Hotel Inna Garuda Jogjakarta, Maret 2007.
36. Lecturer on PT. Pura Kencana Jakarta entitled : Increasing of oil and gas trapping by improvement oil recovery (IOR), Bandung, May, 2007.
37. East Kalimantan Gas Deliverbility Review of VICO Field, member team researchers, Lemigas-BP Migas, Maret-Juli 2007, Jakarta

38. Speaking Talk, entitled Memorium One Year of Lapindo Brantas Mud Flow And to exposed my research results to ability stopped it by powder Compositions model, Kompas, Bernas, Kedaulatan Rakyat, RRI, Jogja TV, Jawa Post, Press RoomUPN "Veteran" , June 2007, Jogjakarta.
39. Making a proposed for PT. Thesmindoo Jakarta, AMDAL study for Refinery crude oil on Kebumen Gross Road, 2007.
40. Member of research coal bed methanen (CBM), PT. Global Arrow Brisbane-UPN "Veteran" Jogjakarta, 2007-2008.
41. Lecturer on PT. Skala Prima Energy (SPE) Jakarta, entitled : Succesfully of Design well completion and solids control for engineers and supervisors, Bandung, Juni 2008.
43. Lecturer on PT. Skala Prima Energy (SPE) Jakarta, entitled: Knowledge Materials for Drilling and Production operations, and Iventory, Papandayan Hotels, Bandung, August 2008
44. Lecturer on PT. Skala Prima Energi (SPE) Jakarta, entitled : Basic Reservoir Engineering, Melia Purosani Hotels, Jogjakarta, August, 2008.
45. Inhouse Training entiltled : Pra sertifikasi operator lantai bor, Tanjung Selor, Bulungan Kalimantan Timur Gelombang II, September- October 2008.
46. Head of expert petroleum consultant, entitled : The Study of Old wells models contract for Indonesia Fields, PT. Anardhako Global, Biro Hukum Project-Dirjen Migas Jakarta, July-December 2008.
47. Head of expert petroleum consultant, entitled : The Study of Distribution models Minyak tanah on Country of Indonesia, PT. Bumi Karya Artha, Jakarta, Biro Hukum Project-Dirjen Migas Jakarta, July-December 2008.
48. Lecturer on PT. Skala Prima Energy (SPE) Jakarta, entitled : Evaluation Design cement and casing Analysis, Hotel Melia Purosani, Jogjakarta, October 2008.
49. Lecturer of Oil and Gas Industry for Students, Dili Institute of Technology, Timor Leste, DILI, Oktober, 2008.
50. Lecturer on PT. Pura Kencana Jakarta, entitled: Production Surface Operations, Bandung, Nopember 2008.
51. Lecturer on PT. Pura Kencana Jakarta, entitled: Workover and Solids Control, Bandung, Nopember 2008.

52. Member of Researcher Geothermal, Indonesia Power-LPPM UPN "Veteran" Jogjakarta, entitled : The Study Plan of Development Geothermal, West Java, May 2008.
53. Lecturer on Yayasan IATMI Jakarta, entitled : Coiled tubing technology and underpressure completion, Lombok, Mataram, Desember 2008
54. Lecturer on Yayasan IATMI Jakarta, entitled : Design well completion and sand problem, Jogjakarta, Nopember 2008.
55. Lecturer on PT. Wish Jakarta, entitled : Drilling Well Design for Engineer and Supervisors, Jogjakarta, Maret 2009.
56. Lecturer on PT. Smart Jogjakarta, entitled : Drilling well design for non engineer, Jogjakarta, April 2009.
57. Lecturer on PT. Humalindo Jakarta, entitled : Drilling and well completion design, PLC Simprok Jakarta, Mei 2009.
58. Lecturer on University of DIT Timor Leste, entitled : Oil and gas Introduction for personel staf and supported, FTM UPN "Veteran" Jogjakarta, Mei 2009.
59. Lecturer on Pascasarjana USAKTI Jakarta, entitled Drilling operation and hole problems, Jakarta, June 2009.
60. Lecturer on Sertification of Mud engineer JTM UPN "Veteran" Jogjakarta - Pusdiklat Migas Cepu, July 2009.
61. Presenter on seminar nasional kebumian, entitled : Cementing design for geothermal resources energy, FTM UPN "Veteran" Jogjakarta, August 2009.
62. Lecturer on Pascasarjana ITB at Pusdiklat Migas Cepu, entitled : Drilling and well completions design, August 2009-January 2010.
63. Lecturer on PT. Sentra Humalin Energy (SHE) Jakarta, entitled : Water flood design for engineer and field personels, PHE ONWJ Bacth I, December 2009, Bacth II on January 2010, and Bacth III on February 2010.
64. Lecturer on PT. Wish Jakarta, entitled : Drilling well design for personels support, Semarang, February 2010.
65. Support calon accesor Production Operations, entitled : Electrical, Mechanics, Instrumen, HSE, Production equipments, BNSP-PT. HSE, UPN "Veteran" Jogjakarta, 21-26 May 2010.

65. Lecturer on PT. Humalin Sentra Energy, entitled : Material Knowledge for Oil and Gas Industry, Pulau Batam, 1-4 June 2010.
66. Lecturer on PT. Sentra Humalin Energy, entitled : Well Completion, Work Overs, and Drilling, Pertamina Hulu Energy (ex Arco), Hotel grand Mega Cepu,, Bacth I on 3- 7 July 2010 dan Bacth II on 7-11 August 2010.
67. Lecturer on PT. Wish, entitle : Basic drilling for non engineers, Hotel Ibis Jogjakarta, 13-17 September 2010.
68. Lecturer on PT. Rizki, entitled : Production optimization for personel staf, Hotel Melia Purosani Jogjakarta, 21-24 September 2010.
69. Lecturer on PT. Fresh, entitle : Petroleum Engineer for Non Petroleum, Hotel Meliapurosani Jogjakarta, 12-15 October 2010.
70. Lecturer on PT. Rizki Jakarta, entitled : Safety production operations, Duri, Chevron, 21-25 October 2010.
71. Lecturer on PT. Sentra Humalin Energy Bacth I, entitle : Gas Lift Operations and Otimizations, Bogor, 25-28 October 2010, Pertamina Hulu Energy ( PHE ex Arco)
72. Lecturer on PT. Sentra Humalin Energy Bacth II, entitle : Gas Lift Operations and Otimizations, Bogor, 19-23 January 2011, Pertamina Hulu Energy (PHE Ex Arco)
73. Lecturer on PT. Centragama Jogjakarta, entitled : Piping system on oil gas industry, Hotel Santika Balikpapan, February 2011.
74. Lecturer on PT. Centragama Jogjakarta, entitled : Pengawas Operasi Pertambangan (POP), Hotel Meliapurosani Jogjakarta, April 2011
75. Lecturer on PT. Centragama Jogjakarta, entitled : Pengawas Operasi Pertambangan (POP), Hotel Amaris Bandung, Mei 2011.
76. Lecturer on PT. Wish Jogjakarta, entitled : Well Stimulation. Hotel Ibis Malioboro, Juni 2011.
77. Lecturer on PT. Centragama Jogjakarta, entitled : Pedoman Tata Kelola (PTK) 007 Rev.II-2011, Hotel Phoniks, Jogjakarta, Juli 2011
78. Lecturer on PT. Fresh Jogjakarta, entitled : Petroleum Engineering for Personals Staf or Non PE, Hotel All session, Dagen, Agustus, 2011.
79. Lecturer on PT. Centragama Jogjakarta, entitled : Pedoman Tata Kelola (PTK) 007 Rev. II-2011, Hotel MM UGM Sagan Jogjakarta, September 2011.



80. Presenter on Seminar nasional geomekanik I Fakultas Teknologi Mineral UPN  
“Veteran” Yogyakarta, Hotel Sheraton mustika ratu Yogyakarta, June, 2012.

81. Study of Potensi dan Produksi Migas Kabupaten Tanjung Jabung Barat Jambi,  
ESDM Pemda Tanjung Jabung Barat, Jambi , Juli - Desember 2012.

Cover belakang buku Dr Ing. Ir. KRT.H. Nur Suhascaryo

**Dr. Ing. Ir. H. KRT. Nur Suhascaryo, B.Eng, M.Eng**, lahir di Jatinegara Jakarta Timur pada tanggal 17 Mei 1961. Menyelesaikan pendidikan Sarjana Muda (B.Eng) di Fakultas Teknik Perminyakan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta tahun 1984. Lulus Sarjana (Ir.), Fakultas Teknik Perminyakan UPN “Veteran” Yogyakarta tahun 1991, Mengikuti pendidikan Strata Dua (S2) Jurusan Teknik Perminyakan di Fakultas Teknologi Mineral di Institut Teknologi Bandung (ITB) Bandung, lulus tahun 1996. Menempuh pendidikan Strata Tiga (S3) pada tahun 2001 di Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral di Institut Teknologi Bandung (ITB) Bandung, lulus tahun 2007.

Dosen Tetap Fakultas Teknik Perminyakan UPN “Veteran” Yogyakarta sejak 1984 sampai sekarang. Dosen Pascasarjana Teknik Perminyakan FKIM ITB Bandung tahun 2008, Dosen Pascasarjana Teknik Perminyakan Universitas Trisakti tahun 2008-2009, Pernah sebagai Kepala Laboratorium Studio Peralatan Produksi, Fakultas Teknik Perminyakan, UPN “Veteran” Yogyakarta (1990-1994), Kepala Lab. Peralatan Pemboran, Jurusan Teknik Perminyakan FTM UPN “Veteran” Yogyakarta (1998 -2000), Wakil Pusat Studi Material, LPPM UPN “Veteran” Yogyakarta dan Kepala Laboratorium Lumpur Pemboran, Jurusan Teknik Perminyakan, UPN “Veteran” Yogyakarta tahun 2000. Menjalankan tugas presentasi penelitian pada makalah di Morioka – Beppu – Japan pada World Geothermal Congress (WGC II) tahun 2000, Di Atalya Turkey pada WGC III tahun 2005, dan tugas presentasi makalah di Nusa Dua Bali, Indonesia, World Geothermal Congress (WGC IV) 2010, jabat sebagai Ketua TIM Pelaksana Kerjasama UPN “Veteran” Yogyakarta – Dili Institute Technology (DIT) Timor Leste 2008 – 2011.

Pengalaman profesinya sangat banyak, di antaranya: Studi problem pemboran tentang penggunaan lumpur lapangan Cipari, Pertamina UEP III Cirebon, 1995. Anggota tim riset, ITB, Bandung, Studi kapasitas tukar kation bentonite local untuk dijadikan lumpur pemboran, Kopertis V, 1997, Yogyakarta, Publikasi makalah dengan judul: Design of drilling fluid low solids content on Vispex System, World Geothermal Congress, Morioka, Japan, 2000, Publication paper entitled : Design of cement slurry and hardness characterization on high temperature and pressure conditioning for oil and Geothermal field, World Geothermal Congress, Atalya Turkey, 2005, Member of Discussion for Alternatives Energy and Solving Problema in Indonesia, BPPT-Menristek RI, 15 September 2006, Jakarta, dan Study of Potensi dan Produksi Migas Kabupaten Tanjung Jabung Barat Jambi, ESDM Pemda Tanjung Jabung Barat, Jambi, Juli - Desember 2012. \*\*\*