

PEMODELAN LAJU PENIPISAN DINDING DALAM PIPELINE AKIBAT ALIRAN SLURRY

Umboh, M^{*)},

^{*)} Staf Pengajar Departement Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi Manado
E-mail: markus_umboh@yahoo.com

Abstrak

Penggunaan jaringan pipa (*pipeline*) untuk transportasi *slurry* telah berkembang dengan pesat. Sistem transportasi *slurry* memberikan alternatif yang secara teknis dapat dilaksanakan dengan baik, mengatasi masalah lingkungan dan ekonomis. Aliran *slurry* dalam pipa mempunyai karakter fisik aliran yang tergantung dari beberapa faktor diantaranya: ukuran dan distribusi partikel, konsentrasi padatan dalam fasa cairan, tingkat turbulensi dan reologi aliran. Aliran *slurry* harus mempunyai kecepatan tertentu agar tidak terjadi pengendapan ataupun tidak terjadi turbulensi yang tinggi. Hal yang harus diperhatikan pada aliran *slurry* dalam pipa adalah masalah keausan abrasi yang berakibat penipisan dinding dalam pipa. Adanya keausan abrasi menyebabkan berkurangnya keandalan pipa karena dapat menyebabkan kebocoran pipa yang pada akhirnya mengganggu sistem produksi secara keseluruhan.

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan untuk mengetahui hubungan berbagai parameter penyebab keausan abrasi dalam sistem transportasi *slurry pipeline*. Pemodelan diformulasikan berdasarkan nilai koefisien gesek total permukaan (μ_{total}) yang merupakan parameter sistem kontak antara *slurry* dengan material pipa. Penentuan koefisien gesek total permukaan (μ_{total}) dilakukan dengan metode *chemical mechanical planarization (CMP)*. Hasil pemodelan keausan abrasi untuk pipa horisontal pada potongan melintang dengan *two-layer model* menunjukkan jika kecepatan aliran (V), koefisien gesek total permukaan (μ_{total}), dan volume konsentrasi padatan pada *bed* (C_{vb}) meningkat, maka laju keausan abrasi akan meningkat. Perhitungan yang dilakukan pada material pipa tipe API5L-X65 dengan komposisi 50% wt silika dengan air pada kecepatan aliran 41 mm/det menunjukkan, laju keausan abrasi 0.79 mm/tahun dengan keausan maksimum terjadi pada bagian dasar pipa (sudut 0°). Jika tebal pipa 9.53 mm maka diperoleh prediksi umur pakai pipa hingga 12 tahun. Berdasarkan hasil ini, maka harus dilakukan program pemeliharaan berkala khususnya pada bagian pipa yang keausannya paling besar (sudut 0°).

Keywords: Pipeline, slurry, model abrasion wear, wear rate

1. Latar Belakang

Menurut Thomson dan kawan-kawan, *slurry*/luluhan/lumpur dapat didefinisikan sebagai aliran dua-fasa yang mengangkut padatan terdispersi dalam cairan pembawa. Umumnya dipakai air sebagai cairan pembawa, tetapi dapat juga dipakai media cair lainnya misalnya metil alkohol. Pesatnya perkembangan penggunaan *pipeline*, bukan tidak mungkin akan menjadi sistem transportasi utama penyaluran material hasil pertambangan menggantikan sistem transportasi lainnya. Umumnya material *pipeline* yang digunakan dalam bidang pertambangan adalah baja. Pada penggunaan/aplikasi tertentu, baja perlu ditambahkan unsur-unsur tertentu sehingga sifat baja dapat sesuai dengan yang diinginkan. Aspek yang harus diperhatikan adalah kegagalan material *pipeline*, salah satunya yaitu terjadinya keausan abrasi. Keausan pipa adalah kehilangan volume material pipa akibat berinteraksi dengan aliran fluida. Keausan abrasi yang terjadi berdampak pada penipisan dinding *pipeline*.

Pengendalian terhadap keausan abrasi harus dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan/kebocoran, apalagi *pipeline* tersebut menyalurkan material yang mengandung resiko terhadap lingkungan. Kebocoran *pipeline* akan mengakibatkan kerusakan lingkungan dan sangat berbahaya bagi kehidupan makhluk hidup. Umumnya bagian dalam pipa sering dilapisi dengan lapisan pelindung (*liner*). Lapisan pelindung ini dimaksudkan untuk melindungi pipa dari keausan akibat interaksi dengan aliran fluida dan sekaligus mempermudah perawatannya. Penggunaan *liner* umumnya

digunakan untuk *pipeline* dengan ukuran diameter yang besar, sedangkan untuk *pipeline* dengan diameter yang kecil biasanya tidak.

Melalui kondisi di lapangan diperoleh data hasil pengukuran ketebalan pipa secara berkala. Hasil data pipa tersebut dapat digunakan untuk memprediksi laju keausan dan umur pakai sebelum dilakukan perbaikan dan perawatan. Satu hal yang dapat ditempuh adalah melalui pendekatan model yang menyatakan laju penipisan dinding dalam pipa. Pada penelitian ini akan dikembangkan pemodelan dari model yang telah ada yaitu *two-layer model* dihubungkan faktor koefisien gesek total (μ_{total}) material pipa. Koefisien gesek bukan sifat khas suatu material melainkan sifat suatu sistem secara keseluruhan. Penentuan koefisien gesek dilakukan dengan sistem *chemical mechanical planarization (CMP)* dengan model dasar yang disebut *material removal rate (MRR)*. Selain untuk masalah disain, hasil pemodelan dapat digunakan untuk analisis operasional, perbaikan dan perawatan *pipeline*.

Prediksi laju keausan dilakukan pada pipa tipe API5L-X65 yang dibuat dalam arah potongan melintang dari pipa dengan diameter pipa 200 mm, tebal pipa (z) 9.533 mm dan kekerasan material pipa (H_{war}) 233 BHN. Pengujian dilakukan pada *slurry* silika dengan air sebagai media pembawanya dimana *specific gravity (S)* silika 1.4, perbandingan konsentrasi berat partikel (C_w) dengan air masing-masing 50% berat, ukuran diameter partikel (d) 200 mesh, volume konsentrasi padatan pada *bed* (C_{vb}) 35.76 % dan sudut keausan (β) 80° . Analisis dilakukan dengan mengukur pengurangan berat pada pembebanan dan jarak tempuh yang bervariasi, tetapi dengan kecepatan putar yang konstan.

Analisis pemodelan untuk keausan abrasi memang agak rumit, dikarenakan ada banyak faktor yang mempengaruhi laju keausan abrasi antara lain *abrasive properties*, kondisi kontak dan *wear material properties* [7]. Akibat adanya faktor tersebut, maka dibutuhkan batasan penelitian dan asumsi-asumsi untuk menyederhanakan permasalahan. Asumsinya adalah partikel abrasi berbentuk bola, kekerasan partikel jauh lebih besar dari kekerasan material, tidak terjadi gerakan *rolling* pada partikel, material bersifat isotropik, dan tidak terjadi mekanisme *pile up* akibat deformasi yang berlebihan. Disamping itu, temperatur pengujian merupakan temperatur kamar dengan pH normal pipa horisontal, tanpa belokan, tanpa *liner*, dan aliran *slurry* adalah laminar. Hasil pengembangan pemodelan ini dapat menyatakan distribusi laju penipisan dinding dalam pipa yang kemudian digunakan untuk memprediksi umur pipa.

2. Karakteristik Aliran Slurry Pipeline

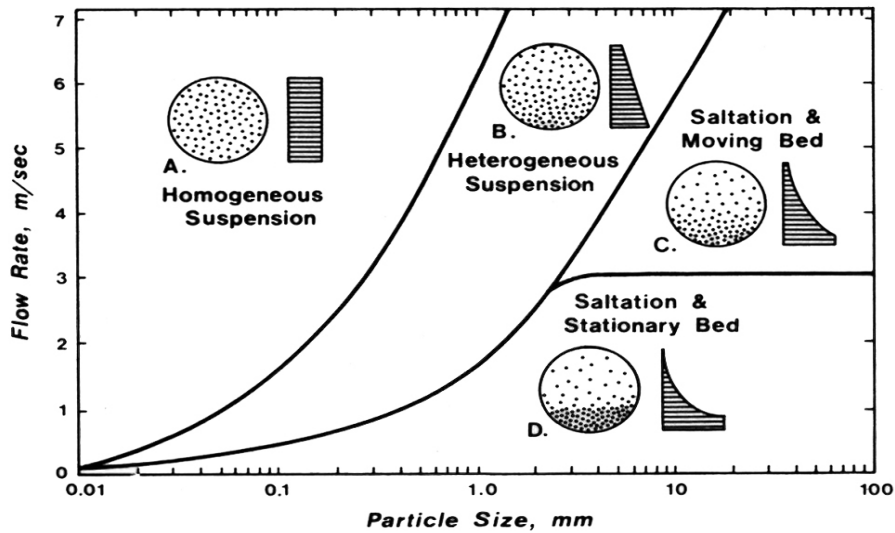
Slurry pada dasarnya merupakan suatu campuran antara cairan pembawa dan padatan yang dipertahankan dalam suspensi. Karakteristik fisiknya tergantung dari banyak faktor seperti ukuran dan distribusi partikel, konsentrasi padatan dalam fasa cairan, ukuran pipa penyalurnya, tingkat turbulensi, dan viskositas absolut atau dinamik zat pembawa.

Aliran *slurry* dalam suatu *pipeline* sangat berbeda dengan aliran cairan fasa tunggal yang secara teoritis dapat mengalir dengan kecepatan yang lambat dari aliran laminar hingga turbulen. *Slurry* harus mengatasi kecepatan kritis pengendapannya atau kecepatan kritis kekentalan transisi. Bila kecepatan ini tidak dilampaui, maka partikel-partikel tersebut tidak dapat dipertahankan dalam suspensi. Dilain pihak, pada kasus dimana campuran memiliki viskositas yang tinggi, jika laju geseran (*shear rate*) dalam *pipeline* terlalu rendah, campuran tersebut akan terlalu kental dan tidak akan mengalir.

Aliran *slurry* terdiri dari dua jenis utama yaitu aliran homogen dan heterogen. Gambar 1 memperlihatkan secara skematis pembagian aliran pada suatu *slurry pipeline*. Pada aliran homogen, padatan terdistribusi secara merata di cairan pembawanya. Ukuran partikel untuk aliran homogen ini lebih kecil dari $40 \mu\text{m}$ hingga $70 \mu\text{m}$ (325-200 mesh) tergantung dari densitas padatan. Aliran homogen misalnya berlaku pada *slurry* lempung, batu kapur halus, atau konsentrat tembaga.

Pada aliran heterogen, padatan tidak terdistribusi merata menurut bidang horisontalnya. Terdapat gradien konsentrasi pada arah vertikal. *Sliding bed* dapat terbentuk pada pipa, dengan

partikel berat di dasar pipa dan partikel yang lebih ringan berada dalam suspensi khususnya pada kecepatan kritis pengendapan. Umumnya *slurry* dari *tailing* tambang memiliki sifat aliran heterogen. Pada aplikasi *tailing* disposal umumnya konsentrasi partikel dibawah 35% berat.



Gambar 1. Pembagian aliran pada suatu *slurry pipeline*

Kecepatan minimum penyaluran untuk aliran heterogen dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan Durand (1952)^[7] sebagai berikut:

$$v_d = F_L \left[2 g D_i \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

dimana: F_L = Faktor Durand

v_d = Kecepatan pengendapan

g = Percepatan gravitasi

D_i = Diameter dalam pipa

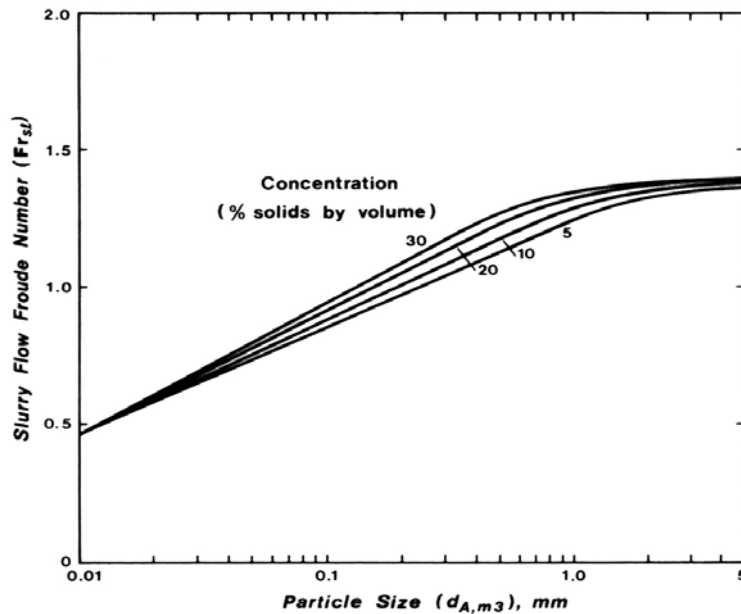
ρ_s = Densitas padatan

ρ_L = Densitas cairan

Faktor Durand berhubungan dengan ukuran partikel dan konsentrasi volume padatan. Beberapa literatur mendefinisikan suatu bilangan Froude (F_r) sebagai:

$$F_r = F_L \cdot \sqrt{2} \quad (2)$$

Gambar 2 memperlihatkan korelasi bilangan Froude untuk aliran *slurry* dengan ukuran partikel. Namun demikian, korelasi ini dibuat untuk partikel-partikel yang memiliki ukuran relatif seragam, dan meskipun diterapkan pada bahan yang memiliki ukuran partikel hampir seragam, hasil perhitungan memperlihatkan harga hasil perhitungan kecepatan pengendapan tersebut terlalu tinggi.



Gambar 2 Korelasi bilangan Froude untuk aliran *slurry* dengan ukuran partikel

Wasp (1970) mengajukan penggunaan faktor modifikasi F_r' dengan persamaan modifikasi Durand:

$$v_d = F_L' \left[2 g D_i \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right) \right]^{1/2} \left[\frac{d_p}{D_i} \right]^{1/6} \quad (3)$$

dimana d_p adalah diameter rata-rata partikel.

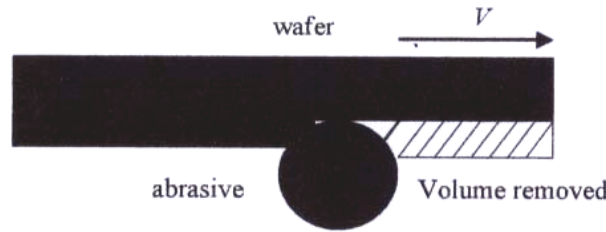
Schiller dan Herbich (1991) kemudian mengajukan persamaan berikut yang menyatakan faktor kecepatan Durand yang didasarkan pada d_{50} partikel yang dinyatakan dalam mm:

$$F_L = \left\{ \left(1.3 \times C_v^{0.125} \right) \left[1 - \exp \left(-6.9 d_{50} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Dalam beberapa disain disebutkan bahwa selang operasi *pipeline* ditentukan oleh komposisi *slurry*, sistim hidrolik, dan profil *pipeline*. Kecepatan minimum cukup tinggi untuk menjaga partikel *tailing* yang lebih besar (*top size*) berada dalam suspensi untuk meminimalisir keausan dasar *pipeline*. Kegagalan untuk menjaga partikel dalam suspensi akan mengakibatkan partikel-partikel tersebut berjalan menyeret didasar pipa dan mempercepat keausan dinding dasar pipa. Kecepatan yang terlalu rendah bahkan akan menyebabkan padatan mengalami jatuh bebas, dan bila bertemu dengan perubahan profil *pipeline* akan berpotensi terjadinya penyumbatan. Kecepatan aliran juga dijaga agar tetap dibawah kecepatan maksimum untuk mencegah akselerasi keausan pada komponen *pipeline* (pipa, liner, valve dll).

3. Formulasi Pemodelan

Analisis mekanisme laju keausan akibat aliran *slurry* dapat ditinjau dengan pendekatan satu partikel abrasi. Satu partikel abrasi ini bergerak dengan kecepatan tertentu menyebabkan adanya sejumlah volume material yang terlepas (*volume removed*) dari *wafer* (material uji). Model inilah yang disebut model *material removed rate (MRR)* seperti ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Model *MRR* untuk satu partikel

Pada model ini diasumsikan kekerasan partikel jauh diatas kekerasan *wafer* sehingga partikel tidak terdeformasi. Secara sederhana analisis model ini dapat dinyatakan dengan perbedaan antara massa sebelum pengujian dan setelah pengujian, dengan demikian model dasar *MRR* dapat dituliskan :

$$\Delta m = \rho_{waf} A_w \Delta x \tag{5}$$

Dimana : Δm = Kehilangan massa
 ρ_{waf} = Massa jenis material
 A_w = Luas material uji
 Δx = Jarak yang ditempuh

Bila persamaan 5 dibagi dengan perubahan waktu (Δt) dan diambil nilai limitnya, maka persamaan tersebut menjadi

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{waf} A_{waf} \frac{dx}{dt} \tag{6}$$

Jika diasumsikan partikel abrasi berbentuk bola dan kekerasan partikel jauh lebih besar dari kekerasan material, maka laju pengurangan massa total dapat dinyatakan dengan nilai koefisien gesek total permukaan (μ_{total})^[8] atau ditulis

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{waf} \mu_{total} \frac{3}{8} \frac{F_N}{H_{waf}} V \tag{7}$$

Dimana : F_N = Gaya normal
 H_{waf} = Kekerasan material
 V = Kecepatan

Dalam hal ini kecepatan pergerakan partikel abrasi diasumsikan sama dengan kecepatan aliran *slurry*. Bila nilai luas meterial selalu tetap sedangkan yang berkurang adalah tebalnya (z) maka massa jenis material dapat dinyatakan dengan

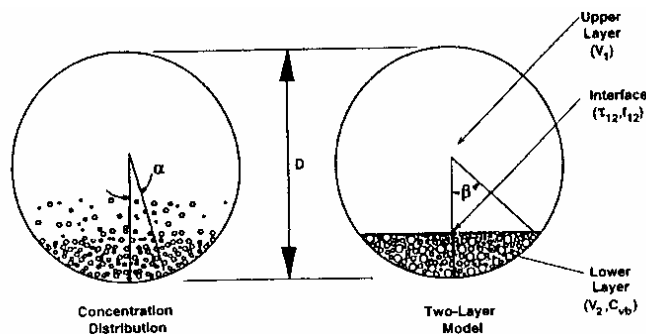
$$\rho_{waf} = \frac{1}{A_{waf}} \frac{dm}{dz} \tag{8}$$

Persamaan 8 dapat disubstitusikan pada persamaan 7 dengan tekanan (P) = F_N/A_{waf} , dan disusun kembali menjadi

$$\frac{dz}{dt} = \mu_{total} \frac{3}{8} \frac{P}{H_{waf}} V \tag{9}$$

Pada kenyataannya sebaran partikel dalam pipa cenderung tidak merata serta terjadi pengendapan pada bagian dasar pipa (aliran bersifat heterogen). Hal ini menyebabkan nilai tekanan normal yang besar pada bagian dasar pipa akibat *sliding bed*, dan akibatnya terjadi keausan yang besar pada bagian dasar pipa.

Distribusi partikel yang terjadi dapat dimodelkan dengan analisis *two-layer model* seperti pada gambar 4.



Gambar 4. Sketsa untuk *two-layer model*

Dengan memasukkan kondisi batas pada gambar 4, maka diperoleh penurunan tekanan akibat *sliding bed* pada dinding dalam pipa sebesar :

$$P = \rho_w (S_s - S_f) C_{vb} \frac{D_i}{2} (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (10)$$

dimana ρ_w = massa jenis air

S_s = *Specific gravity* padatan

S_f = *Specific gravity* fluida

C_{vb} = fraksi volumetrik dari padatan dalam *bed*

D_i = Diameter pipa

P = Tekanan normal pada dinding pipa

α, β = Sudut keausan

Analisis untuk menentukan laju keausan diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan 10 ke persamaan 9 diperoleh

$$\frac{dz}{dt} = \mu_{total} \frac{3}{8} \frac{\rho_w (S_s - S_f) C_{vb} \left(\frac{D_i}{2} \right) (\cos \alpha - \cos \beta)}{H_{waf}} V \quad (11)$$

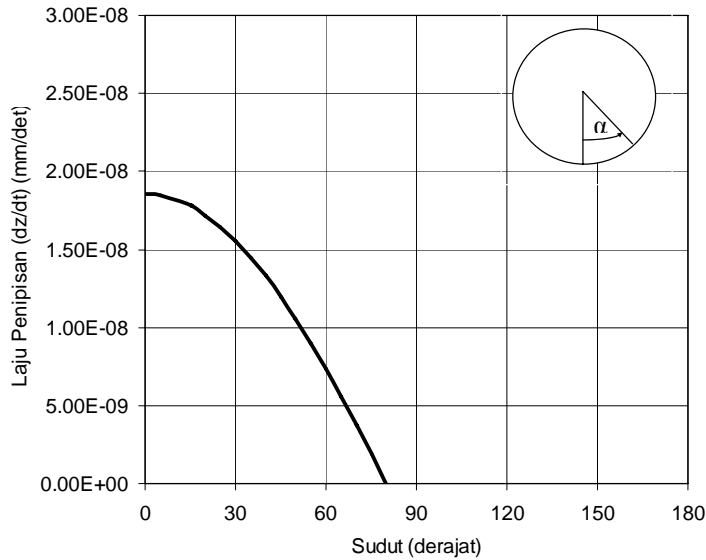
Persamaan 11 merupakan prediksi laju keausan abrasi akibat aliran slurry dalam pipa.

4. Prediksi Tingkat Laju Keausan Material Pipa

Disain hidrolis pipa *slurry* harus menjamin tidak terjadinya penyumbatan, stabilitas aliran tetap terjaga, partikel mengendap dan sedikit mungkin terjadi keausan. Prediksi laju keausan abrasi dinyatakan dengan menentukan tingkat laju penipisan terhadap sudut dalam pipa akibat *slurry* silika dengan *two-layer model*. Jika sudut keausan (β) hanya terjadi sampai dengan sudut 80° dan dengan menggunakan data-data yang ada baik dari hasil pengujian maupun pemodelan (tabel 1), maka diperoleh tingkat laju penipisan akibat aliran *slurry* silika seperti pada gambar 5.

Tabel 1. Data-Data Material Pipa API5L-X65 dan Aliran Slurry Silika

No	Simbol	Arti	Nilai
1	H_{waf}	Kekerasan Material	233 BHN
2	μ_{total}	Koefisien gesek total permukaan	0.0553
3	ρ_w	Massa jenis air	1000 kg/m ³
4	S_f	<i>Specific gravity</i> air	1
5	D_i	Diameter pipa	200 mm
6	C_{vb}	fraksi volumetrik dari padatan dalam <i>bed</i>	20.647 %
7	$V_d=V_2=V$	Kecepatan aliran <i>slurry</i>	41.47 mm/det
8	S_s	<i>Specific gravity</i> silika	2.65
9	B	Sudut keausan maksimum	80°



Gambar 5. Tingkat laju penipisan terhadap sudut dalam pipa akibat *slurry* silika dengan *two-layer model*

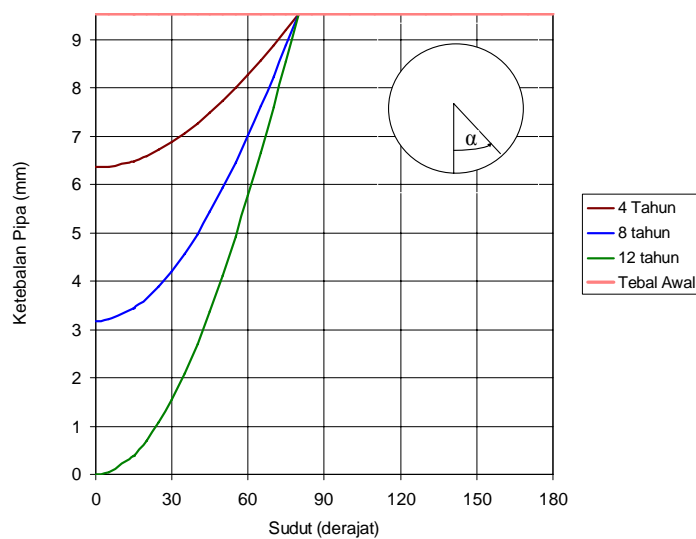
Hasil yang diperoleh pada gambar 5 memperlihatkan tingkat laju keausan yang terbesar ada pada sudut 0°, dan semakin besar sudut dalam pipa maka semakin kecil tingkat keausan yang terjadi. Hal ini berlaku untuk daerah analisis sampai dengan sudut batas 80°. Dari hasil pemodelan diperoleh laju keausan *slurry* silika pada sudut 0° adalah $2.52 \cdot 10^{-8}$ mm/det (0.79 mm/tahun).

5. Prediksi Umur Pakai Material Pipa

Salah satu analisis yang dilakukan dalam disain adalah menentukan prediksi umur pakai material. Dengan menetapkan syarat batas, diperoleh prediksi penipisan ketebalan material yaitu:

$$z = 0.375 \mu_{total} \frac{\rho_w (S_s - S_f) C_{vb} \left(\frac{D}{2}\right) (\cos \alpha - \cos \beta) V}{H_{waf}} t \quad (12)$$

Jika tebal akhir pipa adalah tebal awal dikurangi dengan besarnya penipisan ($z_{akhir} = z_{awal} - z$) maka diperoleh profil pengurangan tebal akibat *slurry* silika untuk umur pemakaian tertentu seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Profil pengurangan tebal terhadap sudut akibat *slurry* silika untuk umur pemakai tertentu dengan *two-layer model*

Hasil prediksi profil laju keausan memperlihatkan penurunan ketebalan pipa yang terbesar terjadi pada dasar dinding pipa (0°), kemudian menurun sampai pada sudut keausan 80° dengan prediksi umur pemakaian pipa untuk *slurry* silika 12 tahun. Secara umum dapat dikatakan bahwa umur pemakaian dapat ditingkatkan dengan cara menaikkan nilai kekerasan dan ketebalan material serta menurunkan koefisien gesek, kecepatan aliran dan tekanan kerja. Khususnya untuk kecepatan aliran perlu dianalisis lebih mendalam, karena penurunan kecepatan justru membuat partikel padatan jatuh bebas dan bergerak menyeret dinding dasar pipa. Sebaliknya peningkatan kecepatan yang besar akan menyebabkan turbulensi dan gaya angkat yang besar, yang akhirnya menyebabkan keausan yang besar pada dinding atas pipa. Karenanya diperlukan kecepatan kritis agar partikel padatan tidak mengendap dan tidak terjadi turbulensi.

6. Penutup

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan di atas, maka dapat diambil rangkuman sebagai berikut:

1. Aliran fluida untuk satu fasa berbeda dengan dua fasa dalam hal kondisi dan pengendaliannya. Aliran *slurry* termasuk dalam aliran dua fasa yang memiliki kecepatan minimum tertentu agar tidak terjadi pengendapan.
2. Laju keausan abrasi berbanding lurus dengan tekanan (P), koefisien gesek total permukaan (μ_{total}), dan kecepatan aliran (V), serta berbanding terbalik dengan kekerasan material (H_{waf}).
3. Semakin besar sudut keausan (β) dan nilai volume konsentrasi padatan dalam *bed* (C_{vb}), semakin besar tingkat keausan yang terjadi dengan prediksi umur pemakaian pipa untuk *slurry* silika 12 tahun.
4. Profil laju keausan memperlihatkan laju keausan maksimum terjadi pada dasar dinding pipa (0°) karena itu perlu dilakukan penanganan khusus/inspeksi berkelanjutan di bagian yang keausannya paling besar.

7. Ucapan Terima Kasih

1. Dr. Ir. Syoni Soepriyanto, MSc dari *Graduate Program Mineral & Metallurgical Engineering Institute of Technology Bandung*, yang sudah banyak membantu penulis dalam menyusun makalah ini.
2. Dr. A. Taufik, MEng, dari *Pipeline Integrity Research Group* yang sudah banyak memberikan saran dan masukan guna kesempurnaan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Backer, W.T., Shipley, R.J. (2002), *Abrasive Wear Failure*, ASM Handbook Failure Analysis and Prevention, Vol. 11, Ohio, 907-921
- Kelly, E.G., Spottiswood, D.J. (1982), *Introduction to Mineral Processing*, John Wiley & Sons Publ., New York, 62-389.
- Luo, J., Dornfeld, D.A (2001), Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: Theory and modeling, University of California at Berkeley, Berkeley, 112-133
- Martojo, W. (1990), Teknologi luluhan: Tinjauan umum tentang aspek-aspek teknik keekonomian serta dampak lingkungan jaringan pipa luluhan silika, Pusat Antar Universitas Ilmu Rekayasa, Institut Teknologi Bandung, 1-38.
- Martojo, W., Astanawinata, R.C., Soedarsono, A.S. (1989), Pengangkutan silika dalam media air melalui pipa: Studi alternatif, Institut Teknologi Bandung, 1-10
- Soepriyanto, S., Umboh, M., Korda, A. (2004), Teknologi slurry pipeline: Parameter sistem transport, *Proceeding of the Indonesian Pipeline technology 2004 Conference and Exhibition*, Institut Teknologi Bandung, 17.1-17.13.
- Sukam, C.P., Seok, J., Kim, A.T., Tichy, J.A, Cale, T.S. (2002), Modeling of material removal for fixed abrasive CMP: Blanket wafer, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 1-6
- Williams, J.A. (1996), *Engineering Tribology*, Oxford Press, Oxford, 1967-185.
- Wilson K.C., Addie, G.R., Clift, R. (1992), *Slurry Transport Using Centrifugal Pumps*, Elsevier Science Publishers. Ltd, London and New York, 1-235.