

## AKSELERATOR UNTUK PENGENDALIAN KOROSI DI INDUSTRI DAN KEGIATAN LIFE EXTENSION ENGINEERING PLANT (LEEP)

\*M. Munawir Z, \*P. Untoro, \*R. Isaris, \*\*Hari Suryanto  
\*PPNR - BATAN  
\*\*PPR - BATAN

### ABSTRAK

**AKSELERATOR UNTUK PENGENDALIAN KOROSI DI INDUSTRI DAN KEGIATAN LIFE EXTENSION ENGINEERING PLANT (LEEP).** Akselerator sebagai peralatan pemercepat partikel bermuatan telah dimanfaatkan untuk berbagai keperluan diantaranya: untuk peningkatan mutu bahan, analisa dan terutama reaksi inti. Suatu pengembangan aplikasi dari akselerator saat ini telah digunakan untuk penanganan korosi di industri disajikan dalam tulisan ini. Kegiatan manajemen untuk perpanjangan umur suatu plant disajikan secara singkat. Tulisan ini memberikan gambaran lebih jelas peran teknik nuklir dalam kegiatan R&D di industri dengan menggunakan akselerator. Beberapa bentuk aplikasi yang sedang dilakukan juga diuraikan dalam tulisan ini.

### PENDAHULUAN

Degradasi material karena pengaruh lingkungan (Environmental degradation) seperti korosi, erosi dikombinasikan dengan degradasi metalurgi adalah bentuk pembatasan umur dari berbagai peralatan seperti peralatan proses, petrokimia, refinery (pengolahan minyak) maupun pembangkit daya. Suatu alat biasanya dirancang berdasar code-code dengan waktu operasi yang sudah ditetapkan. Namun dalam kenyataannya masa operasinya tergantung pada umur minimal dari material dan komponen utama dari plant tersebut. Oleh karenanya untuk peningkatan umur plant dapat dilakukan melalui peningkatan umur material dari komponen utama ini, khususnya dari pengaruh lingkungan seperti korosi dan erosi. Untuk peningkatan umur operasi ini perlu dilakukan pengamatan laju degradasi secara "On line" dan "In situ" untuk memperkirakan umur dari komponen kunci tersebut dapat diprediksi dan selanjutnya bisa dilakukan "Action Plant". Akselerator sebagai alat pemercepat partikel bermuatan (negatif atau positif  $^1_1p^1$ ,  $^1_1d^2$ ,  $^2_2He^3$ ,  $^2_2He^4$  dan lain sebagainya) telah banyak dipakai dalam berbagai kegiatan ilmiah seperti perlakuan bahan, analisa maupun studi reaksi inti ataupun aktivasi, sehingga berbagai penerapan dalam berbagai kegiatan telah dilakukan seperti pada bidang kedokteran, Biologi, lingkungan juga industri.

Didalam tulisan ini dibahas peran akselerator untuk mendukung kegiatan peningkatan umur suatu plant (Life extension engineering Plant). Perpanjangan umur suatu plant sangat penting sebagai upaya peningkatan efisiensi dan profit industri, baik jangka pendek maupun jangka panjang sehingga akselerator memberi peranan positif dan nyata bagi kejayaan masa depan dari industri tersebut.

### Korosi Sebagai Sumber Kerugian

Korosi, Erosi dan aus sebagai penyebab utama penurunan mutu logam komponen, juga sumber kerugian bagi industri, baik secara langsung maupun tidak langsung. Meskipun secara makro, peristiwa ini juga diperlukan sebagai bagian proses resirkulasi dari suatu bahan sehingga memungkinkan terjadinya proses produksi ulang. Namun untuk penghematan energi, manusia perlu mempertahankan kondisinya, agar kerugian bisa dikurangi. Bila dibiarkan kerugian yang terjadi akan semakin besar. Berdasarkan sensus yang dilakukan oleh asosiasi korosi di USA pada tahun 1982 diperkirakan US\$ 70 - 129 Milyar per tahun sedang pada tahun 1992 diperkirakan US\$ 180 Milyar per tahun dalam bentuk kerugian langsung berupa kebutuhan biaya untuk perbaikan struktur/peralatan yang terkorosi, sedang kerugian tak langsung jauh lebih besar dari angka tersebut, terutama akibat berhentinya produksi.

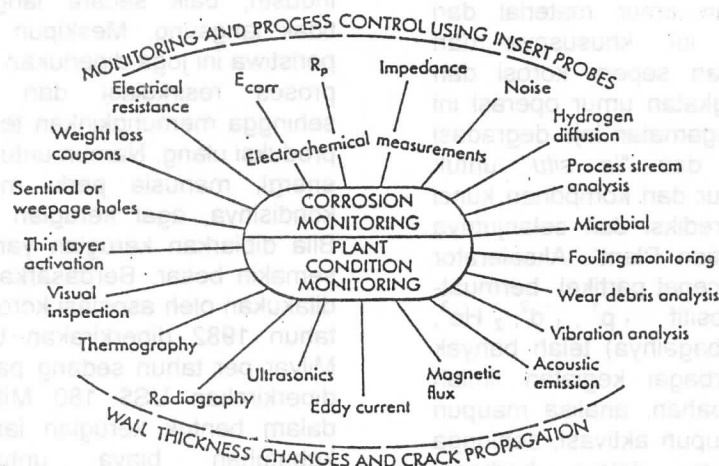
Di Indonesia sebagai negara tropis dengan kondisi lingkungan sangat korosif karena temperatur udara dan kelembaban relatif tinggi tentunya kerugian akibat korosi prosentasinya jauh lebih besar dibanding di Amerika Serikat, meski demikian upaya upaya penanggulangan terhadap korosi masih belum efektif karena keterbatasan SDM, teknologi dan peralatan selain biaya. Walaupun sebagian orang sudah sadar bila tidak ditanggulangi akan menimbulkan kerugian sangat besar, bahkan bisa menimbulkan bencana yang bisa merenggut nyawa manusia. Sebagai ilustrasi besarnya biaya yang diperlukan untuk menangani korosi pipa minyak dan gas di Indonesia adalah sebesar 1 Milyar rupiah per tahun, padahal di Indonesia pada tahun 1997 ini telah memasang pipa minyak dan gas sepanjang 7494 km, maka diperlukan biaya sebesar Rp. 7.494 Trilyun per tahun, belum termasuk korosi peralatan-peralatan lain diberbagai kegiatan industri, seperti : perhubungan, petro kimia, pembangkit daya yang tentunya juga memerlukan anggaran yang sangat besar. Oleh karenanya dalam menangani korosi selain diperlukan skala prioritas, juga diperlukan teknologi yang lebih murah dan ekonomis dapat dilakukan secara "On line" dan "In Situ" agar proses terjadinya korosi dapat diamati secara terus menerus sehingga tidak menimbulkan kerugian yang lebih besar, sebagai upaya peningkatan umur dari industri tersebut.

Berdasarkan analisis keunggulan teknis, maupun biaya "Thin Layer Activation Technique" adalah salah satu teknik tepat guna untuk mendukung kegiatan LEEP dengan biaya relatif murah. Namun untuk pelaksanaannya diperlukan peralatan Akselerator ion tenaga menengah ( 5 MeV s/d 40 MeV ) untuk pembuatan lapisan TLA tersebut.

### Keunggulan TLA Sebagai Sarana Monitoring Korosi, Aus Dan Erosi

Banyak peralatan yang dapat digunakan untuk monitoring korosi seperti terlihat pada gambar 1, namun TLA punya keunggulan dibanding peralatan lain yakni :

1. Jangkauan kedalaman TLA cukup lebar ( 15 - 200  $\mu\text{m}$  )
2. Sensitivitas tinggi ( 1% dari kedalaman aktif )
3. Dapat digunakan pada berbagai jenis logam/paduan
4. Tidak merusak dan tak ada modifikasi permukaan
5. Tidak menyerang lingkungan (invasive)
6. Pengukuran bisa secara " On line ", " In Situ " dan digabung dengan parameter lain
7. Dapat disesuaikan dengan berbagai konfigurasi
8. Tingkat radiasi sangat rendah ( aman bagi pekerja dan lingkungan )
9. Cocok untuk penanganan korosi



Gambar 1. Teknik monitoring korosi/Plant

## LIFE EXTENTION ENGINEERING PLANT ( LEEP )

Kegiatan LEEP adalah suatu kegiatan yang bertujuan untuk meningkatkan umur suatu Plant melebihi dari waktu yang ditetapkan oleh engineer-nya. Tujuan ini dapat dicapai apabila komponen-komponen kunci diberi perlakuan lebih baik terhadap serangan degradasi baik lingkungan maupun metalurgis. Ada tiga tahap kegiatan dalam LEEP yakni :

- I. Auditing dan perkiraan resiko pada plant
- II. Penilaian kondisi komponen-komponen kritis
- III. Simulasi lingkungan kerja /dan proses perlakuan bahan/komponen

### Tahap I

Kegiatan pada tahap I. ini lebih ditekankan pada upaya mengetahui sejarah pengoperasian dan mekanisme kerusakan lingkungan yang terjadi dalam kegiatan ini dilakukan survai terhadap :

1. Material yang dipakai dan material disain dari plant tersebut
2. Data proses dan data operasi (lingkungan aliran bahan kimia, tegangan ( stress ) yang bekerja temperatur, tekanan, kelembaban, PH, dan lain-lain)
3. Data inspeksi secara off line atau out put dari pengamatan On Line ( bila tersedia )
4. Sejarah kegagalan dan mekanisme kerusakan.

Informasi ini dipakai untuk mengidentifikasi dan merangking komponen keseluruhan yang berkaitan dengan kritikalitas dan suseptibilitas terhadap serangan lingkungan yang dapat dicapai, untuk menentukan strategidalam menangani strategi sistem dan komponen plant yang berhubungan dengan kasus terburuk akibat proses degradasi lingkungan yang menyerangnya. Rangking komponen kritis ini kemudian diformulasikan dan untuk menetapkan penting dan kinerja jangka panjang (yakni target umur yang akan dicapai) dan suseptibilitas untuk rusak karena penyimpangan plant.

Output studi tahap I kemudian dipakai untuk menetapkan lingkup kegiatan tahap II.

### Tahap II

Output tahap I secara garis besar telah menunjukkan komponen-komponen yang memerlukan pengawasan dan penilaian yang lebih detail. Untuk mengevaluasi lebih jauh komponen-komponen dan umur plant, perlu dilakukan kegiatan-kegiatan inspeksi (NDT) terhadap komponen-komponen kritis tersebut. Teknik penilaian kondisi baik secara konvensional atau modern (advanced) dipakai untuk memperkirakan laju kerusakan dan statusnya serta mengidentifikasi mekanisme degradasi lingkungan yang bekerja. Studi tahap II dapat memakai teknik monitoring secara "On line" untuk mengidentifikasi laju korosi. Disini teknik TLA punya keunggulan dibanding dengan teknik lain, Informasi yang dihasilkan tahap II dapat dipakai untuk mengkalibrasi dan menyediakan masukan data untuk memperkirakan model yang tersedia untuk mendefinisikan waktu hidup komponen. Dalam praktik kegiatan tahap I dan tahap II biasanya dikerjakan secara paralel. Peralatan monitoring korosi secara "On line" pada saat ini telah dipakai oleh banyak Plant. Bila informasi tahap I dan II dianggap cukup maka mulai dilakukan langkah operasi perpanjangan umur (LEEP), dengan memikirkan penanganan komponen kritis tersebut.

### Tahap III

Jika ketidakpastian dari prediksi penilaian dari tahap II terlampau besar, atau sebagian terbesar kasus mekanisme degradasi tidak sepenuhnya diketahui maka perlu dilakukan langkah III. Untuk itu penilaian memerlukan kegiatan laboratorium dengan mensimulasikan kondisi lingkungan plant yang akan diteliti, bersama dengan sampling material dari komponen plant atau sampel-sampel material identik secara metalurgi, tes-tes yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan respon material dan sensitivitas terhadap parameter lingkungan kunci. Tes-tes tersebut meliputi :

1. Slow strain rate test ( untuk melihat Stress Corrosion Cracking /SCC )

2. Tes korosi lelah ( Corrosion Fatigue Test )
3. Testing Elektrokimia
4. Immersion Testing

Hasil tes ini dapat dipakai untuk memodifikasi model-model secara mekanis yang dihasilkan degradasi lingkungan atau menyediakan pengukuran semi empiris unsur/komponen.

## AKSELERATOR UNTUK PENGENDALIAN KOROSI

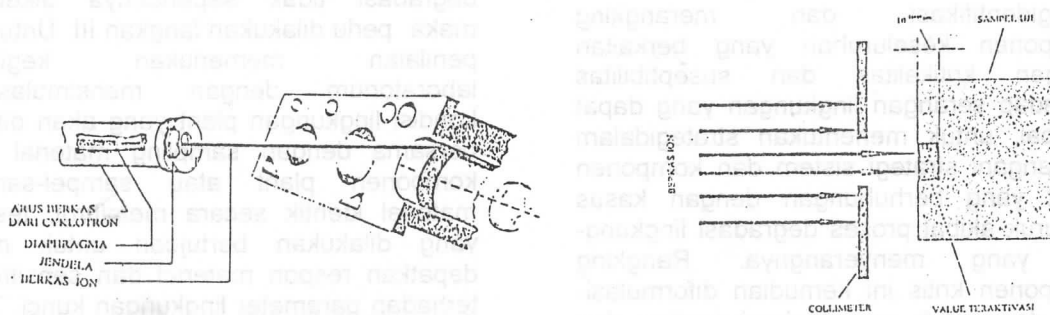
Didalam pengendalian korosi selain identifikasi parameter lingkungan dimana bahan atau komponen berada dan mengalami korosi, ada kegiatan lain untuk melihat proses korosi itu terjadi dan kelajuannya serta analisa bahan dan pengendaliannya. Pada kegiatan kedua ini Akselerator dapat dimanfaatkan untuk :

- a. Kegiatan monitoring korosi
- b. Analisa komposisi bahan
- c. Peningkatan kualitas bahan/komponen tahan korosi, erosi atau aus.

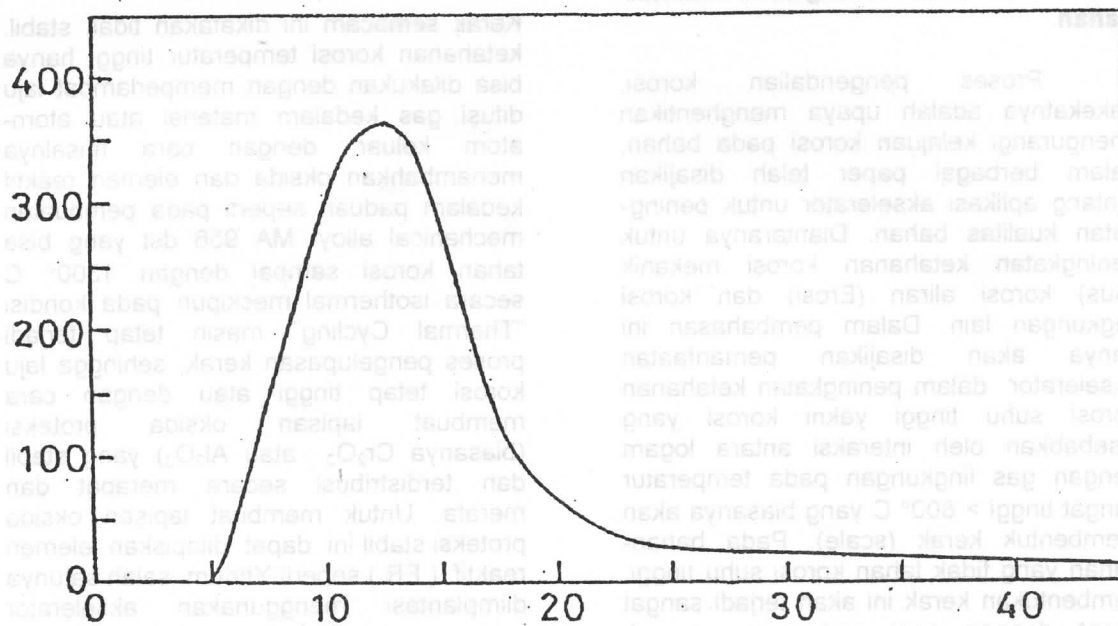
Seperti diuraikan di atas akselerator dapat digunakan untuk monitoring dengan teknik TLA berdasar fenomena fisis reaksi inti dan stopping power agar diperoleh kedalaman lapisan aktif tertentu (orde mikro), ada empat parameter TLA yang terpenting yakni :

- a. Luas dan ketebalan volume lapisan aktif
- b. Nilai aktivitas relatif
- c. Komposisi radionuklida
- d. Distribusi kedalaman radionuklida proses

Akselerator adalah alat yang sangat tepat untuk melakukan proses pembuatan TLA ini, Seperti diketahui pada proses korosi unsur-unsur penting yang sering diteliti adalah Fe, Al, Cr, Ti, Ni, Cu, Zn, Nb, Mo, dan W sebagai unsur-unsur penyusunan logam atau paduan sehingga pemilihan reaksi inti yang harus diupayakan oleh pembuat TLA adalah reaksi antara Ion ( $^1_1p^1$ ,  $^2_1d^2$ ,  $^3_2He^3$ ,  $^4_2He^4$  dst ) yang dipercepat dengan unsur-unsur tersebut diatas. Selain untuk TLA dalam pengendalian korosi, ahli TLA harus bekerjasama dengan ahli korosi untuk memikirkan berapa energi yang harus dipilih agar reaksi terjadi secara maksimal dengan kedalaman disesuaikan kondisi lapangan. Dalam pelaksanaannya juga harus dipikirkan kemungkinan adanya reaksi inti lain dari unsur-unsur yang tidak dikehendaki yang pada langkah berikutnya sebagai gangguan (noise) dalam kegiatan monitoring yang akan mempersulit pelaksanaan kalibrasi. Gambar 2 dan 3 berturut-turut adalah proses pembuatan TLA pada Coupon/komponen langsung dan tampang lintang reaksi inti antara proton dengan Fe. Sedang pada tabel 1. adalah kebolehjadian terjadinya reaksi inti mekanisme pada berbagai unsur logam. Melalui ketebalan lapisan tipis aktif ini gugusan material radioaktif (TLA) akibat korosi/aus dapat diidentifikasi mekanismenya maupun kelajuannya.



Gambar 2. Pembuatan TLA dengan Akselerator



Gambar 3. Tampang lintang reaksi inti antara proton dengan ( ${}_{1}p^1$ , Fe)

Tabel 1. Berbagai Reaksi inti dan energinya pada TLA ( IAEA - TECDOC 924 )

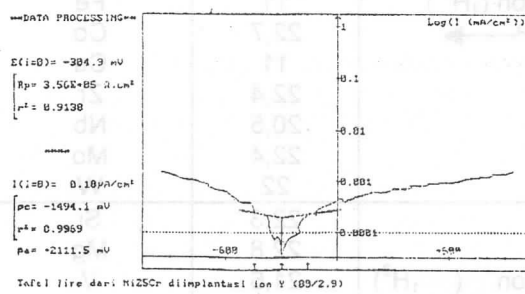
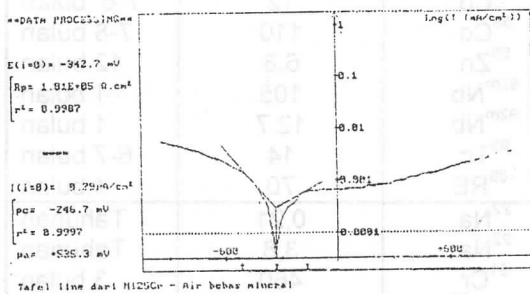
	Energi ( MeV )	Elemen	Radionuklida	Yeald $\mu\text{ci/mAh}$	Umur pakai
Ion ( ${}_{1}H^1$ ) P →	22,4	Be	${}^7\text{Be}$	11	5-6 bulan
	22,5	Ti	${}^{48}\text{V}$	510	2 bulan
	11	Cr	${}^{52}\text{Mg}$	110	20 bulan
	22,5	Mn	${}^{54}\text{Mn}$	17	12 bulan
	11	Fe	${}^{56}\text{Co}$	12	7-8 bulan
	22,7	Co	${}^{58}\text{Co}$	110	7-8 bulan
	11	Cu	${}^{65}\text{Zn}$	6,8	12 bulan
	22,4	Zr	${}^{92m}\text{Nb}$	105	1 bulan
	20,5	Nb	${}^{92m}\text{Nb}$	12,7	1 bulan
	22,4	Mo	${}^{95}\text{Tc}$	14	6-7 bulan
	22	W	${}^{189}\text{RE}$	70	4 bulan
Ion ( ${}_{2}H^2$ ) d	22,3	Si	${}^{22}\text{Na}$	0,21	Tahunan
	22,8	Mg	${}^{22}\text{Na}$	3,8	Tahunan
	21,6	V	${}^{51}\text{Cr}$	460	3 bulan
	22,5	Ni	${}^{58}\text{Co} + {}^{56}\text{Co}$	5,3 + 133	77,8 bulan
	20,5	Zn	${}^{62}\text{Zn}$	127	12 bulan
	22,3	Sn	${}^{124}\text{Sb}$	9	6 bulan
Ion ( ${}_{2}He^3$ ) $\alpha$	32,1	C	${}^7\text{Be}$	17	5-6 bulan
Ion ( ${}_{2}He^4$ ) $\alpha$	42,7	Al	${}^{22}\text{Na}$	0,16	Tahunan
	45	Cr	${}^{54}\text{Mg}$	6,5	12 bulan
	45	Fe	${}^{58}\text{Co} + {}^{60}\text{Co}$	30+1,6	7-8 bulan
	45	Nb	${}^{95m}\text{Tc}$	3	6-7 bulan



**Akselerator Untuk Peningkatan Kualitas Bahan**

Proses pengendalian korosi, hakekatnya adalah upaya menghentikan /mengurangi kelajuan korosi pada bahan, dalam berbagai paper telah disajikan tentang aplikasi akselerator untuk peningkatan kualitas bahan. Diantaranya untuk peningkatan ketahanan korosi mekanik (Aus) korosi aliran (Erosi) dan korosi lingkungan lain. Dalam pembahasan ini hanya akan disajikan pemanfaatan akselerator dalam peningkatan ketahanan korosi suhu tinggi yakni korosi yang disebabkan oleh interaksi antara logam dengan gas lingkungan pada temperatur sangat tinggi > 800° C yang biasanya akan membentuk kerak (scale). Pada bahan-bahan yang tidak tahan korosi suhu tinggi, pembentukan kerak ini akan terjadi sangat cepat dengan cara unsur gas masuk kedalam bereaksi dengan unsur-unsur yang ada didalam seperti pada reaksi ZnO, CdO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, atau unsur-unsur keluar dari matrik bereaksi dengan gas dilingkungan seperti Cu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, FeO, dan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pada kondisi dimana kerak yang terbentuk sudah sangat tebal, akan terjadi pengelupasan kerak akibat perbedaan "Stress dan Strain" antara material dengan oksida tersebut, apalagi bila mengalami "Thermal Cycling" .

Kerak semacam ini dikatakan tidak stabil. ketahanan korosi temperatur tinggi hanya bisa dilakukan dengan memperlambat laju difusi gas kedalam material atau atom-atom keluar, dengan cara misalnya menambahkan oksida dari elemen reaktif kedalam paduan seperti pada pembuatan mechanical alloy. MA 956 dst yang bisa tahan korosi sampai dengan 1300° C secara isothermal meskipun pada kondisi "Thermal Cycling" masih tetap terjadi proses pengelupasan kerak, sehingga laju korosi tetap tinggi atau dengan cara membuat lapisan oksida proteksi (biasanya Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, atau Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang stabil dan terdistribusi secara merata dan merata. Untuk membuat lapisan oksida proteksi stabil ini dapat dilapiskan elemen reaktif ( ER ) seperti Yttrium, salah satunya diimplantasi menggunakan akselerator tenaga rendah. Teknik pertama biaya relatif lebih mahal karena mahalnya unsur oksida ER tersebut. sedangkan teknik yang kedua ini lebih murah karena hanya dilapiskan dipermukaan. Keuntungan lain dari teknik kedua ini adalah proses peningkatan ketahanan korosi dapat dilakukan setelah komponen terbentuk yang sering kali juga menjadi masalah dalam konstruksi bila bahan itu berubah sifat mekaniknya pada saat berujud bahan, gambar 4 adalah contoh efek implantasi elemen reaktif pada peningkatan kualitas bahan.



Gambar 4. Hasil uji korosi dalam media air bebas mineral untuk :

- a. paduan NiCr yang tidak diimplantasi
- b. paduan NiCr yang diimplantasi dengan ion Yttrium pada dosis ion  $2,865 \times 10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> pada energy 80 KeV

## PROSPEK APLIKASI

TLA sebagai produk pemanfaatan akselerator dapat dan telah dimanfaatkan untuk menangani korosi baik dalam skala riset maupun industri. Akan mengalami peningkatan sejalan dengan perkembangan industri itu sendiri. Sebagaimana diketahui bahwa industri selain menjadi wilayah terjadinya korosi, juga sebagai penyebab korosi bagi industri lain melalui gas buang yang dikeluarkan oleh industri tersebut. Sehingga dengan naiknya investasi untuk industri, maka kepadatan industri semakin meningkat, juga akan meningkatkan jumlah kejadian dan laju korosi. Untuk itu upaya peningkatan efisiensi dan pengurangan kerugian, melalui program LEEP mutlak diperlukan. Seperti diuraikan diatas akselerator punya prospek yang sangat baik sejalan dengan kesadaran budaya perawatan industri.

Di Indonesia dimana tenaga ahli korosi masih sangat terbatas dan penanganan korosi belum intensif akibat biaya yang relatif mahal, maka perlu dicarikan alternatif penanganan korosi yang relatif murah, namun masih punya keunggulan teknis. TLA salah satu pilihan baik ditinjau secara teknis maupun biaya apalagi bila peralatan pendukungnya yakni akselerator energi menengah tersedia. Ketidak populeran teknologi ini khususnya di ASEAN terutama karena mahal biaya investasi akselerator tersebut. Sementara di Indonesia peralatan ini telah tersedia di BATAN. Berikut ini adalah lingkup industri dan penerapan TLA sebagai sarana monitoring aus, erosi dan korosi ( IAEA - TEC DOC-924 )

1. Industri Mesin dan Automobil
2. Untuk monitoring komponen-komponen mesin mobil anatara lain : Ring piston, celah piston, bantalan, penggerak piston, penggerak katup, batang penghubung antara Crankshafs dan Camshafts, Gear wheel dan lain-lain
3. Pompa : Untuk memeriksa/monitoring keausan pelindung permukaan dalam pompa dan blade
4. Turbine : Turbin blade, dll
5. Sistem pendingin : Refrigerator, compresor, dll.
6. Mesin Cetak : Jarum, pengarah, bantalan-bantalan.
7. Peralatan Textile : Mesin Obras.

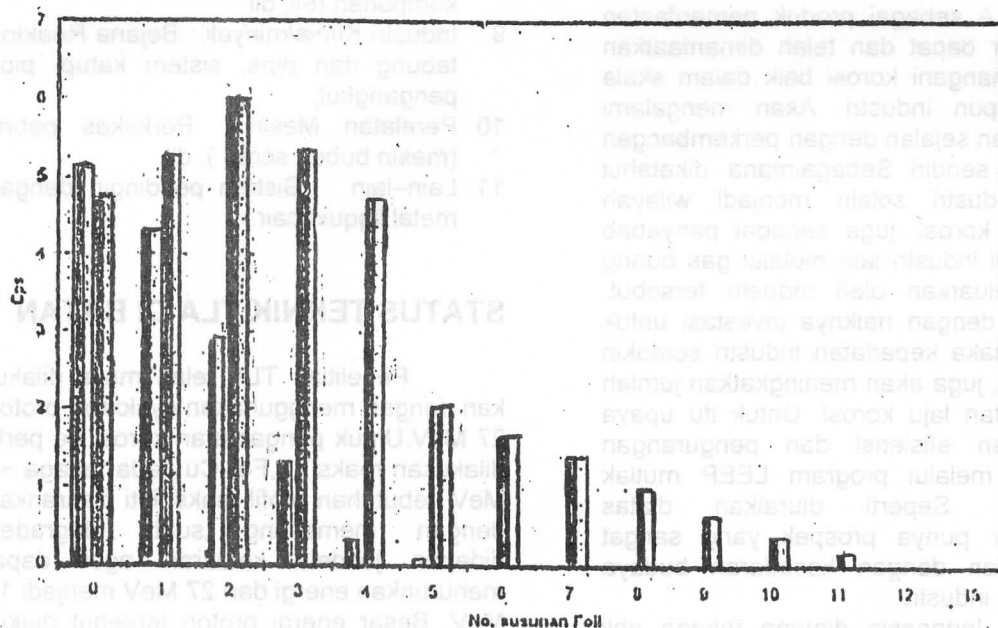
8. Rel Kereta Api : Permukaan roda kereta api, rem disk, sepatu rem komponen reil, dll
9. Industri Kimia/minyak : Bejana Reaktor, tabung dan pipa, sistem katup, pipa pengangkut.
10. Peralatan Mesin : Perkakas pabrik (mesin bubut, scrap ), dll.
11. Lain-lain : Sistem pendingin dengan metal liiquid/cair.

## STATUS TEKNIK TLA DI BATAN

Penelitian TLA telah mulai dilakukan dengan menggunakan cyclotron proton 27 MeV. Untuk pengamatan korosi Fe perlu dilakukan reaksi (P,Fe)-Cu pada tenaga ~1 MeV kebutuhan profil reaksi inti disarankan dengan memasang suatu degrader, didepan jendela keluaran agar dapat menurunkan energi dari 27 MeV menjadi 11 MeV. Besar energi proton tersebut diukur menggunakan kalibrator energi berupa aluminium foil yang dipasang didepannya, berdasar pendekatan menggunakan teori stopping power. Coupon-coupon TLA yang diteliti, diuji dengan menggunakan sistem simulator proses industri secara laboratories berdasar kebutuhan. Pada saat ini sedang diteliti dan direkayasa :

Peralatan monitoring korosi dan aus dengan TLA secara off line dan on line untuk :

- a. Sarana uji coba monitoring korosi pipa minyak dengan teknik TLA
- b. Instrumen monitoring korosi dengan TLA.



Gambar 5. Grafik distribusi TLA dan daya tembus pada Cu untuk energi awal 13,7 MeV dan 11 MeV

## PENUTUP

Berdasar uraian diatas, kiranya cukup informasi bila pengembangan akselerator diarahkan untuk mendukung kegiatan penanganan korosi di Industri. Karena kegiatan ini masih memerlukan perhatian yang sangat serius, sehubungan dengan sedikitnya jumlah SDM dan besarnya kerugian industri bila tidak ditangani. Selain itu mengingat mahalnya peralatan ini, maka alangkah baiknya bila dapat dilakukan optimalisasi pemanfaatan akselerator yang dimiliki melalui dukungan anggaran riset yang memadai, apalagi masih sedikit sekali negara, khususnya ASEAN yang memiliki peralatan ini. Bila program ini berjalan lancar, kegiatan aplikasi TLA dapat dijadikan sarana kegiatan regional antar negara khususnya ASEAN, atas pembinaan expert IAEA sesuai rekomendasi workshop TLA yang diselenggarakan oleh IAEA di New Zeland pada bulan Mei 1997.

Akhirnya semoga informasi ini dapat dijadikan pertimbangan dalam merencanakan pengembangan akselerator di Industri, khususnya dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi oleh industri.

## DAFTAR PUSTAKA :

1. LES BOULTON, Life extension of engineering Plant trough condition assessment
2. IAEA -TEC DOC - 924, The Thin Layer Activation Method and its Aplications in Industry IAEA - TEC DOC -924 Januari 1997
3. I.O KONSTANTINOV, Nuclear Methods of Wear and Corrosion Monitoring in Industry IPPE. Obninsk, Rusia
4. M. MUNAWIR, Z dkk, Laporan RUT V " Teknik Ion Beam Mixing untuk Peningkatan Efek Elemen Reaktif dan Ketahanan Korosi Bahan Rekayasa Temperatur Tinggi. 1997/1998.