

## INTERAKSI PROTON BERENERGI TINGGI DENGAN MATERI DAN APLIKASINYA UNTUK STUDI KOROSI BAHAN

Imam Kambali, Hari Suryanto

### ABSTRAK

**INTERAKSI PROTON BERENERGI TINGGI DENGAN MATERI DAN APLIKASINYA UNTUK STUDI KOROSI BAHAN.** Interaksi proton berenergi tinggi dengan materi sangat penting untuk dipelajari karena hal inilah yang mendasari pengetahuan tentang aplikasi pemakaian berkas proton untuk tujuan analisis dan modifikasi permukaan bahan. Makalah ini membahas tentang eksperimen penetrasi proton berenergi tinggi (lebih dari 10 MeV) dalam besi, tembaga dan *stainless steel-304* (SS-304). Berkas proton dengan energi 10,8 MeV dan 12,5 MeV masing-masing diperoleh dengan melewati berkas proton berenergi 24,85 MeV dan 25,6 MeV yang dihasilkan dari siklotron pada sistem *degrader* aluminium yang dipasang pada ujung saluran berkas. Selanjutnya berkas proton tersebut ditembakkan ke tumpukan target foil (besi, tembaga dan SS-304). Interaksi antara proton dan target menghasilkan atom radioaktif  $^{56}\text{Co}$  (dalam hal target besi dan SS-304) dan  $^{65}\text{Zn}$  (dalam hal target tembaga). Radioaktivitas yang dihasilkan dari interaksi tersebut dapat diukur untuk memperoleh informasi tentang jangkauan penetrasi proton dalam target. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa proton berenergi 10,8 MeV mampu menembus target dengan jangkauan yang tidak lebih dari 300  $\mu\text{m}$ , sedangkan proton berenergi 12,5 MeV mampu menjangkau permukaan besi sampai pada kedalaman lebih dari 300  $\mu\text{m}$ . Hasil eksperimen ini tidak berbeda jauh dengan hasil perhitungan menggunakan *software* SRIM-96. Laju korosi target ditentukan dengan menggunakan target kupon yang diradiasi dengan proton dan ditempelkan pada pemegang kupon yang dipasang didalam pipa SS-304. Kemudian kedalam pipa tersebut dialirkan larutan HCl 0,5 M dengan debit 100 liter/menit. Laju korosi besi terukur sebesar 11,692  $\mu\text{m}/\text{jam}$  sedangkan laju korosi SS-304 sebesar 0,366  $\mu\text{m}/\text{jam}$ .

Kata kunci: interaksi dan jangkauan proton, siklotron, studi korosi

### ABSTRACT

**INTERACTION OF HIGH ENERGY PROTON WITH MATTER AND ITS APPLICATION TO STUDY ON MATERIAL CORROSION.** Interaction of high-energy proton with matter is important to be studied since it is the basic knowledge employing the proton beam for the purpose of material analysis and surface modification as well. This paper presents experimental works on the penetration of high-energy proton (more than 10 MeV) through iron, copper and SS-304. The proton beams having energy of 10.8 and 12.5 MeV respectively were obtained by passing 24.85 and 25.6 MeV of cyclotron-liberated proton beam through an aluminum degrader system installed at the end of the beam line. The proton beams were then bombarded to the stack foils of the targets (iron, copper and SS-304 respectively). The proton-target interacts

created radioactive atoms of  $^{56}\text{Co}$  (in case of iron and SS-304 targets) and  $^{65}\text{Zn}$  (in case of copper target). The resulting activities can be measured to get information on the proton penetration ranges in the targets. It was found that the 10.8 MeV proton beam was able to pass through the targets with the range of less than 300  $\mu\text{m}$ , while the 12.5 MeV proton beam was able to pass through the iron with the range of more than 300  $\mu\text{m}$ . The results of this experiment are insignificantly different as compared to theoretical calculation using SRIM-96 software. The corrosion rate of the targets was studied using proton-irradiated target coupons mounted in a coupon holder and installed in a 2"-diameter of SS-304 pipe in which 100 liters/minute of 0.5 M HCl was flowed through. The corrosion rate of iron was found to be about 11.692  $\mu\text{m}/\text{hour}$  while that of SS-304 was about 0.366  $\mu\text{m}/\text{hour}$ .

Keywords: interaction and range of proton, cyclotron, corrosion study

## PENDAHULUAN

Setelah penemuan partikel berenergi tinggi yang dipancarkan oleh bahan radioaktif, banyak ilmuwan yang tertarik untuk mempelajari bagaimana partikel tersebut mengalami perlambatan ketika menembus suatu bahan. Mereka segera menyadari perlunya mengadakan eksperimen untuk memecahkan rahasia atom melalui mekanisme penetrasi partikel dalam suatu target tipis.

Sebelum teori model atom dikemukakan oleh para ahli, teori tentang hilangnya energi partikel selama menembus materi masih belum mengalami perkembangan yang berarti dan bahkan mengalami hambatan yang menyebabkan belum terpecahkannya teori tersebut. Beberapa eksperimen akhirnya mulai dilakukan pada awal tahun 1900-an untuk membuat teori tentang daya henti (*stopping power*) partikel guna mengembangkan model atom yang telah ada [1]. Pada tahun 1909, Geiger dan Marsden mempelajari penetrasi partikel alfa melalui foil tipis dan hamburannya setelah menembus keluar foil. Mereka melaporkan bahwa sekitar 0,01% dari partikel alfa tersebut terhambur balik dari target [1]. Setelah eksperimen tersebut, beberapa eksperimen lainnya menyusul untuk melengkapi data tentang model atom dan teori daya henti partikel. Diantara ilmuwan tersebut tercatat nama-nama yang tidak asing bagi pecinta fisika, yaitu Rutherford, J.J. Thomson dan Niels Bohr yang secara simultan menerbitkan analisis tentang daya henti partikel bermuatan dalam materi [2].

Masalah yang muncul berkenaan dengan teori *stopping power* diantaranya adalah bagaimana suatu partikel yang berenergi tinggi mengalami kehilangan energi selama berinteraksi dengan plasma elektron yang terkuantisasi dalam materi (kehilangan energi secara inelastis) dan bagaimana hubungan antara distorsi yang secara simultan dialami oleh plasma elektron yang disebabkan oleh partikel (polarisasi target) dengan interaksi itu sendiri. Masalah yang lain adalah bagaimana perkiraan derajat ionisasi suatu atom yang

bergerak dan penjelasan tentang perkembangan teori *stopping power* dan elektronnya ketika keduanya terionisasi serta bagaimana perhitungan koreksi relativistik terhadap semua masalah tersebut [1].

Deretan masalah tersebut menyebabkan jangkauan (*range*) partikel dalam materi mengalami pasang surut sampai diajukan suatu teori yang lebih komprehensif oleh Bethe dan Bloch pada akhir abad ke-20 dengan menerapkan teori mekanika kuantum dalam perhitungan tersebut [1,3]. Pendekatan teoritis ini tetap menjadi konsep dasar untuk mengevaluasi *energy loss* dari partikel ringan yang bergerak dengan kecepatan tinggi atau yang mempunyai energi diatas 1 MeV/amu [1].

Selain partikel alfa,  $^3\text{He}$ , dan Deuteron, salah satu jenis partikel yang sangat penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi fisika nuklir adalah proton. Partikel ini banyak diaplikasikan dalam berbagai analisis dan modifikasi suatu bahan yang berbasis teknologi nuklir. Proton dengan energi tertentu dapat dipercepat dalam suatu mesin pemercepat partikel seperti akselerator, siklotron dan generator Van De Graff untuk tujuan tertentu.

Partikel proton berenergi tinggi sangat penting untuk dipelajari lebih jauh, terutama jangkauan penetrasinya dalam materi. Dalam makalah ini akan dibahas jangkauan proton berenergi 10,8 MeV dan 12,5 MeV dalam besi, serta jangkauan proton berenergi 10,8 MeV dalam tembaga dan *Stainless Steel-304* (SS-304) serta beberapa contoh aplikasinya untuk studi korosi, erosi dan keausan bahan yang telah dilakukan di Bidang Siklotron, P2RR-BATAN. Percobaan yang dilakukan bertujuan untuk mempelajari jangkauan penetrasi proton dalam bahan-bahan percobaan tersebut diatas serta mempelajari pemanfaatan fenomena interaksi dan jangkauan proton untuk menentukan laju korosi suatu bahan.

## TEORI

### Interaksi Partikel Ion dengan Materi

Interaksi partikel ion dengan materi akan menimbulkan beberapa fenomena yang tergantung pada jenis partikel ion, besarnya energi partikel ion dan jenis materi. Dalam interaksi ini akan dipancarkan sinar-X dari de-eksitasi atom dan sinar gamma dari de-eksitasi inti. Bahkan biasanya juga dipancarkan partikel ion lainnya maupun partikel netral. Selama berinteraksi dengan materi, partikel ion akan kehilangan energinya dan akhirnya berhenti apabila kehabisan energi. Dalam hal ini terjadi perlambatan kecepatan partikel.

Partikel ion dapat terhambur balik ataupun menimbulkan dislokasi, kekosongan (*vacancy*), sisipan atom pada kristal dan mengerosi permukaan materi. Dalam hal ini atom materi akan terlepas akibat ditumbuk oleh partikel ion, dan peristiwa ini disebut *sputtering effect*.

### Daya Henti dan Jangkauan Partikel Ion dalam Materi

Daya henti linier (*linear stopping power*) suatu partikel bermuatan ( $S$ ) yang bergerak menembus materi tertentu secara fisis didefinisikan sebagai energi yang hilang ( $dE$ ) dari sebuah partikel yang bergerak melintasi jarak  $dx$ . Daya henti ini juga disebut sebagai laju kehilangan energi.

Selama bergerak dipercepat dan menumbuk materi target, partikel akan berinteraksi dengan atom-atom target, sehingga partikel tersebut akan selalu kehilangan energinya, baik kehilangan energi sebagai akibat interaksi dengan inti atom target (disebut kehilangan energi inti,  $S_n$ ) maupun kehilangan energi sebagai akibat interaksi dengan elektron atom target (disebut kehilangan energi elektronik,  $S_e$ ). Secara total, laju kehilangan energi (daya henti linier) tersebut dapat dirumuskan sebagai [1,3,4,5]:

$$S = -\frac{dE}{dx} = -N(S_n + S_e) \quad (1)$$

dengan  $N$  adalah densitas materi.

Secara empiris,  $S_n$  dan  $S_e$  didefinisikan sebagai [1,3,4,5]:

$$S_n = N \int_{r_e}^E T d\sigma \quad (2)$$

$$S_e = \frac{2\pi Z_{\text{eff}} Z_2}{\beta^2} N m_e r_e^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I_{\text{av}}^2} \right) - 2\beta^2 \right] \quad (3)$$

Dalam hal ini,  $T$  adalah energi kinetik partikel,  $\sigma$  adalahampang lintang diferensial partikel,  $Z_{\text{eff}}$  adalah nomor atom efektif partikel proyektil,  $Z_2$  adalah nomor atom target,  $m_e$  adalah massa diam elektron,  $r_e$  adalah jari-jari lintasan elektron,  $I_{\text{av}}$  adalah potensial ionisasi rata-rata,  $\beta$  adalah kecepatan relatif partikel ( $v/c$ ) dan:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \beta^2} \quad (4)$$

Di akhir interaksi, partikel tersebut akan berhenti setelah menempuh jarak atau jangkauan tertentu (R) yang didefinisikan sebagai jarak total yang ditempuh oleh partikel dalam target yang dihitung pada saat partikel masuk ke dalam target sampai ion tersebut berhenti di suatu lokasi dalam kisi-kisi atom target. Jangkauan ini dapat dirumuskan dengan [1,3,4]:

$$R = \int_0^R dx = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (5)$$

Untuk keperluan teknis, didefinisikan suatu jangkauan terproyeksi ( $R_p$ ), yaitu jangkauan yang diukur sejajar dengan arah partikel mula-mula dan dihitung dengan persamaan [6]:

$$R_p = \frac{R}{\frac{1}{4} \left[ (5 + M) \frac{1 + M}{2M} \text{ArcCos} \left( \frac{1 - M}{1 + M} \right) - 1 - 3M \right]} \quad (6)$$

dengan  $M = \frac{M_2}{M_1}$

Persamaan (5) dan (6) hanya berlaku untuk bahan target yang terdiri dari satu unsur saja. Untuk bahan paduan yang terdiri dari n unsur, jangkauan partikel menjadi [4,6]:

$$R = \frac{\prod_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n X_i R_i} \quad (7)$$

dengan  $R_i$  adalah jangkauan partikel dalam unsur ke-i, sedangkan  $X_i$  adalah fraksi unsur ke-i dalam paduan.

### Program SRIM (Stopping and Range of Ion in Matter)

Program SRIM merupakan *software* yang dapat digunakan untuk menghitung daya henti dan jangkauan partikel atau ion yang berenergi 10 eV/amu-2 GeV/amu dalam materi dengan menerapkan teori mekanika kuantum tumbukan antara ion dan atom [7]. Dalam hal ini, yang disebut ion adalah partikel yang bergerak (dipercepat), sedangkan atom adalah materi target yang dilalui oleh ion.

Meskipun *software* SRIM dapat digunakan dalam perhitungan secara akurat, namun program yang pertama kali dikembangkan oleh James F. Ziegler, Biersack dan Littmark ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain [8]:

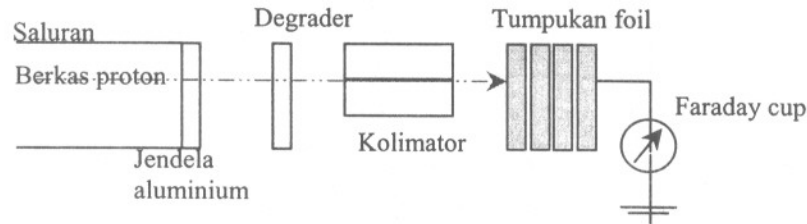
- Teori transport tetap digunakan untuk menyediakan rumus analitis dengan beberapa penyederhanaan.
- Pengurangan energi partikel terjadi akibat tumbukan dengan inti dan elektron. Perhitungan ini terhenti jika energi partikel lebih kecil dari batas yang ditentukan atau partikel keluar media.
- Perubahan arah partikel terjadi akibat tumbukan dengan inti dan bergerak dalam arah lurus sepanjang jejak terbang bebas (*free flight path*).
- Target dianggap memiliki struktur bahan tak beraturan (amorf) sehingga sifat keteraturan atom pada bahan kristal diabaikan.
- Kehilangan energi inti dan elektronik atau perlambatan dianggap sebagai variabel bebas.

### TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Untuk mendapatkan profil kedalaman atau jangkauan proton dalam beberapa bahan (besi, tembaga, dan SS-304), dilakukan perhitungan awal dengan bantuan simulasi program SRIM-96. Disamping itu, jangkauan proton dalam bahan-bahan tersebut juga ditentukan secara eksperimen dengan menggunakan metode tumpukan foil.

Foil besi (99,5%), tembaga (99,9%) dan SS-304 (paduan 71%Fe, 18%Cr, 9%Ni, 0,08%C) setebal 25  $\mu\text{m}$  dan berdiameter 1 cm disiapkan sebagai sampel yang masing-masing berjumlah 12 keping. Tumpukan foil ini ditembak dengan berkas proton berenergi 10,8 MeV dan dengan dosis iradiasi masing-masing sebesar 0,5  $\mu\text{Ajam}$ . Khusus untuk bahan besi juga ditembak dengan proton berenergi 12,5 MeV. Berkas proton yang digunakan dengan energi tersebut diperoleh dengan melewati berkas proton berenergi 24,85 MeV dan 25,6 MeV pada sistem *degrader* yang terbuat dari bahan aluminium dengan ketebalan 1,477 mm dan dipasang pada ujung saluran berkas seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Aktivitas radioisotop  $^{56}\text{Co}$  yang terbentuk dalam foil

dicacah dengan detektor NaI(Tl) yang dikopel dengan *pocket* MCA (*Multi Channel Analyzer*) tipe 8000A buatan AMPTEK-Amerika .



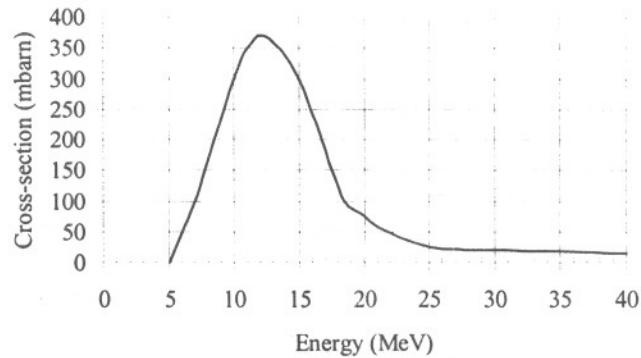
**Gambar 1.** Eksperimen untuk menentukan jangkauan proton dalam materi

Dalam skala laboratorium, uji korosi sampel besi dan SS-304 dilaksanakan dengan menggunakan instalasi pipa penyalur fluida korosif. Masing-masing sampel yang berbentuk kupon dengan diameter 1,5 cm dan tebal 2 cm diiradiasi dengan berkas proton berenergi 10,8 MeV dan dengan dosis 0,5  $\mu$ A. jam. Pipa penyalur yang digunakan adalah terbuat dari bahan SS-304 dengan diameter 2 inci. Larutan HCl 0,5 M dialirkan dalam pipa dengan debit yang konstan sebesar 100 liter/menit. Pemantauan laju korosi dilakukan dengan mengamati penurunan aktivitas kupon setiap 2 jam sekali selama proses korosi berlangsung.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Interaksi dan Jangkauan Proton Dalam Besi, Tembaga dan SS-304

Partikel proton berinteraksi dengan materi melalui gaya Coulomb antara muatan positif partikel dengan muatan negatif elektron orbital dalam atom materi [9]. Ketika berinteraksi, proton akan memberikan energi kinetiknya kepada atom materi. Elektron atom akan naik ke tingkat yang lebih tinggi (eksitasi) atau lepas meninggalkan atom (ionisasi), tergantung pada energi yang diberikan pada elektron atom. Dalam eksperimen ini, proton dipercepat sampai mempunyai energi yang cukup tinggi (diatas 10 MeV) sehingga kemungkinan interaksi tak elastis (reaksi nuklir) terjadi dalam materi yang dilaluinya.



**Gambar 2.** Tampang lintang reaksi nuklir antara proton dan atom besi [10]

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2 diatas, reaksi nuklir antara proton dan atom besi dapat terjadi jika energi proton melebihi 5 MeV. Oleh karena itu, energi proton yang hilang selama berinteraksi dengan inti atom target tidak bisa diabaikan begitu saja karena pengaruhnya sangat signifikan terhadap jangkauan proton selama melewati target.

**Tabel 1.** Jangkauan proton dalam beberapa materi

Materi	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Nomor atom (molekul)	Energi proton (MeV)	S <sub>e</sub> [MeV/(mg/cm <sup>2</sup> )]	S <sub>n</sub> [MeV/(mg/cm <sup>2</sup> )]	R <sub>p</sub> (μm)
Udara	0,00125	7,4	0,12	7,054x10 <sup>-1</sup>	8,676x10 <sup>-4</sup>	1560
Fe	7,8658	26	10,8	2,887x10 <sup>-2</sup>	1,437x10 <sup>-5</sup>	258,55
Fe	7,8658	26	12,5	2,550x10 <sup>-2</sup>	1,224x10 <sup>-5</sup>	376,99
Cu	8,92	29	10,8	2,708x10 <sup>-2</sup>	1,360x10 <sup>-5</sup>	242,92
SS-304	7,8275	25,3	10,8	2,896x10 <sup>-2</sup>	1,441x10 <sup>-5</sup>	258,99

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan *software* SRIM-96, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1, jangkauan proton sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter, antara lain energi proton dan jenis materi yang dilaluinya (nomor atom dan densitas bahan). Semakin besar energi proton, semakin jauh jangkauannya dalam menembus materi. Dengan energi yang lebih tinggi, proton lebih mudah melalui hambatan (berupa



tumbukan dengan elektron dan atom materi), yang pada akhirnya jangkauannya akan lebih jauh. Sebagai contoh, proton berenergi 12,5 MeV mempunyai jangkauan sepanjang 376,99  $\mu\text{m}$  dalam besi, namun dengan energi 10,8 MeV, jangkauannya menjadi 258,55  $\mu\text{m}$  dalam bahan yang sama.

Sebaliknya, semakin besar nomor atom dan densitas bahan yang dilalui proton, semakin pendek jangkauannya. Hal ini berkaitan dengan kerapatan elektron dan atom dalam bahan. Materi yang mempunyai nomor atom dan densitas yang lebih besar, mempunyai probabilitas yang lebih besar pula dalam berinteraksi dengan proton berenergi tinggi, sehingga proton akan mengalami lebih banyak kehilangan energi selama bertumbukan dengan materi yang dilaluinya. Sebagai akibatnya, proton hanya mampu menembus materi dengan jangkauan yang lebih pendek. Dalam target besi, jangkauan proton berenergi 10,8 MeV adalah 258,55  $\mu\text{m}$ , sedangkan dengan energi yang sama, proton hanya mampu menembus tembaga sepanjang 242,92  $\mu\text{m}$ . Fenomena ini terjadi karena nomor atom tembaga lebih besar dibandingkan dengan nomor atom besi.

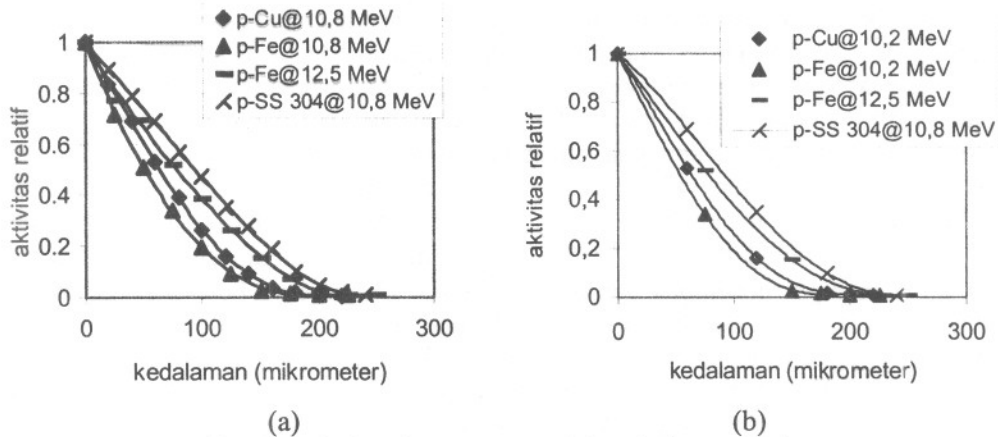
Dalam logam paduan (*alloy*), proton dengan energi yang sama cenderung mempunyai jangkauan terproyeksi yang tidak jauh berbeda dengan material dasarnya (*base material*) seperti yang terjadi dalam material SS-304. Paduan yang terdiri dari 71% Fe, 18%Cr, 9%Ni dan 0,08%C ini tidak banyak mempengaruhi laju proton dalam proses penetrasinya karena densitasnya hampir sama, yaitu 7,8275  $\text{g/cm}^3$  untuk SS-304 dan 7,8658  $\text{g/cm}^3$  untuk besi. Namun demikian, secara umum jangkauan proton dalam bahan paduan sangat dipengaruhi oleh komposisi unsur yang membentuk paduan tersebut.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, pada umumnya proton berenergi tinggi (lebih dari 5 MeV) mampu mengaktifkan bahan yang dilaluinya menjadi bersifat radioaktif. Reaksi nuklir yang terjadi antara proton dengan foil besi, tembaga dan SS-304 adalah sebagai berikut [10]:



Dengan demikian, penetrasi proton dalam materi dapat diikuti dengan hanya mendeteksi radioisotop yang terbentuk dalam materi. Secara eksperimen, profil kedalaman atom materi yang teraktivasi dapat mewakili kedalaman penetrasi proton (dalam bahan besi, tembaga dan SS-304) untuk proton berenergi lebih dari 10 MeV. Dalam eksperimen ini, jangkauan proton dalam beberapa bahan termasuk besi, tembaga dan SS-304 ditentukan dengan mendeteksi radioisotop  ${}^{56}\text{Co}$  yang terbentuk dalam tumpukan foil besi dan tumpukan SS-304, serta dengan mendeteksi radioisotop  ${}^{65}\text{Zn}$  yang terbentuk dalam tumpukan foil tembaga. Secara bergantian, masing-masing tumpukan foil ditembak dengan proton berenergi 10,8 MeV, dan khusus untuk foil besi juga ditembak dengan proton berenergi 12,5 MeV untuk mengetahui pengaruh energi proton

terhadap jangkauannya dalam materi. Hasil perhitungan teoritis tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3a dan 3b, yaitu dengan tingkat kesalahan yang tidak melebihi 3% untuk masing-masing bahan.

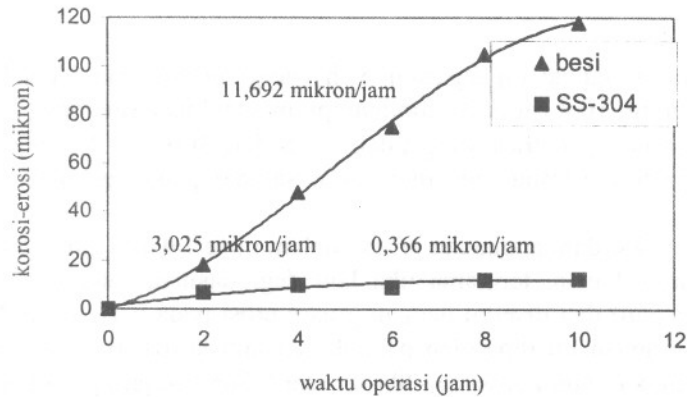


**Gambar 3.** Jangkauan proton dalam beberapa bahan:

- (a) Hasil percobaan
- (b) Hasil perhitungan teoritis

### Aplikasi Jangkauan Proton untuk Studi Korosi, Erosi dan Keausan Bahan

Prinsip dasar teknik *Thin Layer Activation* (TLA) adalah dengan mengaktivasi bahan yang akan ditentukan tingkat korosinya menggunakan proton berenergi tinggi. Hasil aktivasi ini adalah berupa lapisan tipis (dalam orde mikrometer) yang bersifat radioaktif. Pada saat uji korosi dan keausan, permukaan bahan yang terauskan akan sebanding dengan pengurangan aktivitas radioisotop yang terbentuk pada permukaan bahan. Dengan bantuan konversi aktivitas relatif radioisotop terhadap profil kedalaman aktivasi (jangkauan) proton dalam bahan target, laju korosi dan keausan bahan dapat ditentukan secara kuantitatif. Konversi ini dapat dilakukan dengan *plotting* aktivitas relatif radioisotop *versus* kedalaman aktivasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 di atas.



**Gambar 4.** Hasil pengukuran korosi besi dan SS-304

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4 di atas, besi dan SS-304 mempunyai laju korosi yang berbeda. Rata-rata laju korosi besi selama 10 jam operasi adalah sebesar 11,692  $\mu\text{m}/\text{jam}$ . Berbeda dengan besi, untuk operasi dari 0 sampai 4 jam pertama bahan SS-304 mempunyai laju korosi rata-rata 3,025  $\mu\text{m}/\text{jam}$  sedangkan untuk operasi dari 4 sampai 10 jam berikutnya (pada kondisi jenuh) lajunya cenderung lambat, yaitu rata-rata sebesar 0,366  $\mu\text{m}/\text{jam}$ . Kecenderungan ini menunjukkan terbentuknya oksida protektif pada permukaan SS-304 yang mampu melindungi permukaan paduan tersebut terhadap korosi lebih lanjut.

Dari pengalaman studi ini, terlihat jelas pemanfaatan perhitungan jangkauan proton berenergi tinggi untuk studi korosi suatu bahan, sehingga teknik ini dapat diaplikasikan secara langsung di industri yang mempunyai problem korosi pada berbagai komponennya. Studi degradasi material ini hanya membutuhkan waktu yang relatif singkat dalam mendapatkan data yang cukup untuk menentukan laju korosi, erosi dan keausan bahan serta didukung dengan presisi dan akurasi yang tinggi [10]. Dalam hal ini, metode ini hanya bisa diaplikasikan untuk mengukur korosi yang disertai dengan proses erosi atau pengelupasan permukaan bahan. Selain itu, metode ini juga dapat diaplikasikan untuk pengukuran laju keausan komponen otomotif.

## **KESIMPULAN**

Jangkauan proton sangat dipengaruhi oleh energi proton dan jenis bahan yang dilaluinya. Dengan energi 10,8 MeV, proton mampu menembus target besi, tembaga dan SS-304 dengan jangkauan penetrasi yang tidak lebih dari 300  $\mu\text{m}$ . Sedangkan dengan energi 12,5 MeV, proton mampu menembus besi sampai pada kedalaman lebih dari 300  $\mu\text{m}$ .

Fenomena interaksi dan jangkauan proton dalam materi dapat dimanfaatkan untuk menentukan laju korosi bahan, terutama jika laju degradasinya sangat lambat (dalam beberapa mikrometer/jam) dan disertai dengan proses erosi pada permukaan bahan yang terkorosi. Dalam percobaan ini diperoleh pengukuran laju korosi besi rata-rata sebesar 11,692  $\mu\text{m}/\text{jam}$ , sedangkan laju korosi SS-304 sebesar 0,366  $\mu\text{m}/\text{jam}$  pada kondisi jenuh. Teknik ini perlu dikembangkan lebih lanjut dan perlu diadakan kerjasama dengan industri untuk aplikasinya secara langsung di lapangan.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Eksperimen ini tidak akan berjalan dengan lancar tanpa bantuan Bapak Subardi, Bapak Parwanto, Bapak Edi Slamet R., Bapak Rustama dan semua staf Bidang Siklotron yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu terlaksananya penelitian ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

1. Of Applied Physics, [www.srim.org](http://www.srim.org) (1999) 1249-1272
2. YANG, F., HAMILTON, J.H., "Modern Atomic and Nuclear Physics", The ZIEGLER, J.F., "The Stopping of Energetic Light Ions in Elemental Matter", Journal McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore (1996)
3. KNOLL, G.F., "Radiation Detection and Measurement", second edition, John Willey and Sons, Singapore (1989)

4. MILOSEVSKY, G.V., "Monte Carlo Numerical Simulation of Ion Implantation Into Solid Targets", Luikov Heat and Mass Transfer, Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, The Radiative Gas Dynamics Laboratory, people.brandies.edu (2000)
5. ANONIM, "Ion Implantation", dunham.ee.washington.edu/ee539/notes/chapter8.pdf (1999)
6. DEARNALEY, G., FREEMAN, J.H., NELASON, R.S., STEPHEN, J., "Ion Implantation", North Holland Publishing Company, Amsterdam (1973)
7. ANONIM, "SRIM Instruction Manual", www.srim.org (2004)
8. IMAM KAMBALI, "Efek Implantasi Elemen Reaktif Yttrium dan Cerium Terhadap Sifat Ketahanan Oksidasi Material FeNiCr Selama Siklus Termal", Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta (2002)
9. DARSONO, "BATAN Accelerator School 2004: Aplikasi Teknologi Akselerator untuk Analisis Unsur, Geologi dan Monitoring Lingkungan", P3TM-BATAN, Yogyakarta (2004)
10. ANONIM, "The Thin Layer Activation and Its Application in Industry", IAEA-TECDOC, Vienna, Austria (1997)