



PERANCANGAN ALAT BANTU PENGUKUR PROFIL KUAT MEDAN MAGNET SIKLOTRON CS-30 BATAN

Syefudin Ichwan¹ dan Hari Suryanto¹

¹Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka - BATAN Serpong

Key words :
Nut, Screw,
Alloy,
Lendutan,
Torsi,
medan magnet,

Abstrak

Perancangan Alat Bantu Pengukur Profil Kuat Medan Magnet Siklotron CS-30 BATAN. Telah dilakukan perancangan alat bantu pengukur profil kuat medan magnet Siklotron CS-30 BATAN. Siklotron ini merupakan jenis siklotron pemercepat ion positif yang telah dimodifikasi menjadi pemercepat ion negatif (H^-). Energi berkas ion terektraksi adalah 26,5 MeV berupa proton (H^+) yang dapat digunakan untuk memproduksi radionuklida PET (Positron Emission Tomography) maupun SPECT (Single-Photon Emission Computed Tomography) untuk keperluan "molecular imaging" dalam scanning kanker atau kelainan fungsi organ tubuh. Pengukuran profil kuat medan magnet ini perlu dilakukan untuk mengetahui kesesuaian profil kuat medan magnet terukur dengan profil medan magnet yang seharusnya setelah lebih dari 25 tahun dioperasikan. Ketidaksesuaian profil medan magnet ini akan dapat mempengaruhi kinerja dari sistem Siklotron secara keseluruhan dalam menghasilkan arus berkas. Untuk melakukan pengukuran profil kuat medan magnet tersebut, maka diperlukan suatu alat bantu agar diperoleh hasil pengukuran yang tepat. Alat bantu pengukuran profil kuat medan magnet ini dirancang menggunakan prinsip kerja perpindahan daya ulir, yaitu merubah gerakan rotasi menjadi translasi. Perancangan pada tahap awal meliputi penentuan material, ukuran dan bentuk atau geometrinya. Dalam perancangan ini juga dilakukan perhitungan untuk menentukan ukuran motor penggerak dan menghitung besarnya lendutan atau defleksi yang terjadi pada pemegang probe akibat beban selama pengoperasian, sehingga didapatkan hasil pengukuran yang tepat.

Design of Supporting Tools for Measurement of Batan's CS-30 Cyclotron Magnetic Field Profile. A design for measurement of BATAN's CS-30 cyclotron magnetic field profile has been done. This BATAN's CS-30 cyclotron is a type of positive ion accelerator that has been modified into a negative ion accelerator (H^-). The extracted ion beam energy is 26.5 MeV of proton (H^+), which can be used to produce PET (Positron Emission Tomography) or SPECT (Single-Photon emission Computed Tomography) radionuclides in order to support research in molecular imaging in the cancer or organ dysfunction scanning. Measurement of the magnetic field profile was needed to determine the suitability between the magnetic field profile measured and the original profile of magnetic field after 25 years of operation. Incompatibility of the magnetic field profile has an impact on the performance of cyclotron system as a whole in generating of the beam current. So, a device for that magnetic field profile measurement is required in order to get the precise measurement result. The device was designed by principal of screw power displacement, which transformed the rotation movement into translation. Preliminary design covered material, dimension and geometry of the device has been conducted. Furthermore, to achieve precise measurement data, the calculation to determine the size of motors and deflection rate on the probe holder caused by load on operation were performed.

PENDAHULUAN

Siklotron CS-30 BATAN adalah merupakan siklotron pemercepat ion positif yang telah dimodifikasi menjadi pemercepat ion negatif yang digunakan untuk mempercepat ion hidrogen negatif (H^-) dengan energi ion terektraksi sebesar 26,5 MeV. Ion terektraksi tersebut merupakan ion hidrogen positif (H^+) atau proton setelah terektraksi melewati *beam stripper* dari bahan foil karbon. Dengan energi berkas proton (H^+) terektraksi sebesar 26,5 MeV, siklotron ini dapat digunakan untuk memproduksi radionuklida yang diperlukan dalam penyiapan radiofarmaka PET (*Positron Emission Tomography*) maupun SPECT (*Single-Photon Emission Computed Tomography*) untuk keperluan *molecular imaging* dalam *scanning* kanker atau kelainan fungsi organ tubuh.

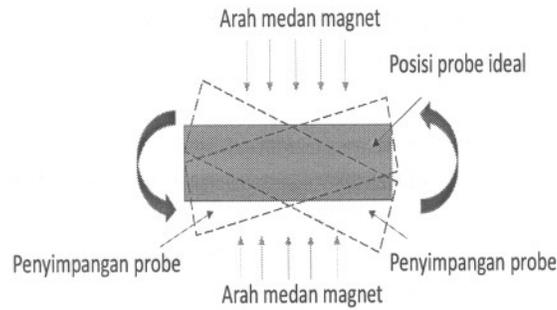
Siklotron CS-30 BATAN ini telah beroperasi selama lebih dari 25 tahun, sehingga perlu dilakukan pengukuran profil kuat medan magnetnya. Hal ini penting untuk mengetahui kesesuaian profil kuat medan magnet terukur dengan profil medan magnet yang seharusnya, dimana ketidaksesuaian profil medan magnet ini akan dapat mempengaruhi kinerja dari sistem Siklotron secara keseluruhan dalam menghasilkan arus berkas. Sebelum melakukan pengukuran profil kuat medan magnet, perlu dipersiapkan suatu alat bantu pengukur profil medan magnet. Alat bantu pengukur profil kuat medan magnet adalah suatu alat mekanik elektrik yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran kuat medan magnet yang terjadi di dalam ruang pemercepatan siklotron, dari radius terkecil (0 cm) hingga radius terbesar (42 cm). Alat pengukur profil kuat medan magnet ini terdiri atas konstruksi mekanis dan penggerak *steeping motor* yang di kendalikan secara elektronik, sehingga mampu mengukur

dengan pergerakan yang teliti guna mendapatkan hasil pengukuran yang tepat.

Alat bantu pengukur profil medan magnet ini merupakan pengembangan dari alat yang sudah ada sebelumnya yang telah digunakan untuk melakukan pengukuran. Alat tersebut sangat sederhana, berupa pipa dengan diameter 0.5 inchi, dengan pemberian skala pengukuran tiap 0,5cm dan dihubungkan dengan *probe Gauss meter*. Metode pengukuran yang dilakukan dengan alat ini yaitu dengan cara menempatkan alat tersebut pada *port* khusus di *chamber* Siklotron kemudian memposisikan ujung *probe* tepat di titik 0 cm (radius terdalam) yaitu pada titik tengah *pole magnet*, kemudian ditarik keluar secara periodik (dalam hal ini tiap 1 cm) dan dicatat hasil pengukuran yang terjadi melalui pembacaan *display Gauss meter* hingga mencapai radius terluar (42 cm).

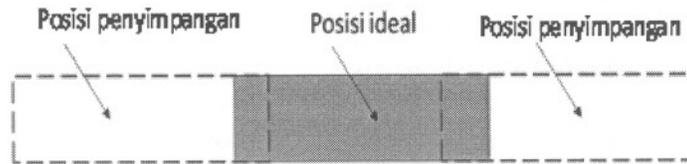
Selama dilakukan proses pengukuran menggunakan alat tersebut, timbul beberapa keraguan terhadap hasil pengukuran yang disebabkan oleh cara/ metode pengukuran dan kondisi alat bantu tersebut, seperti :

1. Batang pemegang *probe* (*probe holder*) digerakkan secara manual yaitu dengan ditarik secara bertahap/periodik dengan tangan, sehingga memungkinkan terjadi kesalahan atau ketidakpastian nilai setiap langkah (tidak selalu tepat 1 cm untuk setiap langkah pengukuran).
2. Pada batang pemegang *probe* (*probe holder*), juga ada kemungkinan terjadinya gerak rotasi akibat pergeseran yang tak terduga karena digerakkan dengan tangan yang menyebabkan terjadinya penyimpangan radial seperti ditunjukkan pada Gambar-1, sehingga posisi *probe* tidak terjamin selalu tegak lurus terhadap arah medan magnet.

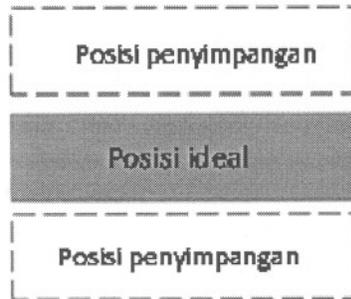


Penyimpangan probe karena gerak rotasi

Gambar 1: Penyimpangan radial.



Gambar-2 :Penyimpangan arah horisontal.



Gambar 3 : Penyimpangan *vertical*.

3. Batang pemegang *probe* (*probe holder*) tersebut hanya memiliki satu tumpuan sehingga akan sangat mungkin terjadi gerak ayun baik *horizontal probe* yang menyebabkan penyimpangan pengukuran arah *horizontal* seperti ditunjukkan pada

Gambar-2 dan gerak ayun arah vertikal pada *probe* yang menyebabkan penyimpangan *vertical* seperti ditunjukkan pada Gambar-3, sehingga posisinya tidak selalu berada pada *median plane* (posisi ditengah-tengah) antara magnet atas dan magnet bawah.

Sehingga dengan alat tersebut diatas, hasil pengukuran yang diperoleh tidak tepat. Untuk itu dibuatlah disain alat bantu pengukur profil kuat medan magnet yang dapat mengatasi tiga kelemahan pada alat sebelumnya, yaitu :

- Kestabilan besaran jarak pengukuran.
- Kestabilan posisi *probe* sehingga *probe* selalu tegak lurus terhadap arah medan magnet.
- Kestabilan *probe holder* dari gerakan ayun sehingga *probe* selalu berada pada posisi *median plane*.

Prinsip kerja alat bantu ini adalah merubah gerakan rotasi pada motor penggerak menjadi gerak lurus (translasi) pada *Nut*, dimana *Nut* dihubungkan dengan suatu mekanisme luncur (*sliding*) dan batang penghubung langsung dengan *probe Gauss meter*, dengan kata lain perpindahan gerak translasi pada *Nut* sama dengan perpindahan pada *probe*. Serta penggunaan mekanisme penyeimbang luncur (*sliding*) yang akan membatasi/ mengunci gerakan rotasi pada *nut*, sehingga menjamin gerakan hanya akan berlangsung secara translasi tanpa ada gerakan rotasi yang menyertainya dengan pengaruh gesekan sekecil mungkin. Pada akhirnya akan dapat dilakukan proses pengukuran profil kuat medan magnet dalam ruang pemercepat Siklotron CS-30 dari radius terdalam (0 cm) sampai ke radius terluar (42 cm) atau dari arah sebaliknya dengan posisi *probe* selalu terjamin tegak lurus terhadap arah medan magnet.

TATA KERJA

Pembuatan alat bantu pengukuran kuat medan magnet ini diawali dengan pembuatan disain. Tahapan disain meliputi :

1. Analisa Kebutuhan.

Analisa kebutuhan dalam hal ini dibutuhkan suatu alat bantu pengukur medan magnet

yang dapat mengakomodir keperluan pengukuran, yaitu dapat melakukan pengukuran dengan hasil yang lebih baik dari alat bantu ukur yang pernah digunakan sebelumnya.

- Alat bantu ini harus mempunyai kestabilan garakan linier yang konstan dan jaminan posisi *probe* selalu tegak lurus sebagai syarat pengambilan data yang akurat, maka direncanakan penggunaan *ball screw* yang mempunyai ketelitian tinggi dan sedikit gesekan sebagai penggerak *probe*. Dan menggunakan penyeimbang sstem luncur (*sliding*) untuk menjamin *probe* selalu tegak lurus terhadap arah medan magnet dengan gesekan sekecil mungkin.

- Alat bantu harus dapat dilepas pasang karena setelah pemakaian (pengukuran), alat tersebut harus dilepas dari *chamber* Siklotron, sehingga disain alat bantu ini harus memperhatikan ketersediaan *port/tempat* yang akan dipakai dan *space/ruangan* yang tersedia serta penggunaan konstruksi pengikat yang dapat dilakukan bongkar pasang.

- Lingkungan kerja berada di dalam *cave* Siklotron dengan pengkondisian ruangan, sehingga perlakuan/*treatment* khusus terhadap bahan/material tidak diperlukan.

- Alat bantu ini akan jarang digunakan atau hanya sesekali pada masa tertentu, sehingga biaya konstruksi perlu dipertimbangkan agar tidak terlalu mahal/ rasional, dengan cara pemilihan geometri yang mudah dalam pengerjaan sehingga biaya pabrikan dapat ditekan, penggunaan bahan yang mudah didapat dan murah tetapi tetap memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan serta pemilihan jenis pengerjaan dengan *tools* yang mudah didapatkan dan sebisa mungkin

menggunakan *tools* yang telah ada sehingga tidak memerlukan pengadaan *tools* tambahan, sehingga dapat menghemat biaya.

2. Pembuatan Sketsa Disain.

Pada tahap ini dilakukan sketsa mekanisme yang dapat menampung kebutuhan diatas, mulai dari : bentuk, dimensi dan bahan, juga dapat memasukkan kriteria lain seperti faktor ekonomi, sehingga didapatkan konsep atau gambaran awal dari disain yang dikehendaki yang kemudian dijadikan dasar perancangan selanjutnya.

3. Alternatif Disain.

Pada tahap ini dilakukan pembuatan beberapa disain yang berbeda baik secara bentuk ataupun prinsip kerjanya, tetapi dengan fungsi yang sama yaitu untuk mengukur kuat medan magnet. Untuk itu pada akhirnya didapat disain pembanding untuk dapat ditentukan disain mana yang paling baik setelah dilakukannya pertimbangan dari beberapa hal. Karena disain yang terbaik belum tentu disain yang paling kompleks, tetapi yang paling mampu memenuhi kebutuhan rancangan seperti: kinerja dan ekonomi

4. Pemilihan Disain.

Pada tahap ini telah dipilih disain yang terbaik, dapat dilakukan dengan memilih salah satu dari *alternative* yang ada ataupun gabungan dari *alternative* tersebut.

a) Menentukan jenis penggerak guna mendapatkan kepastian jarak ukur maka

diperlu atau digunakan penggerak berupa motor *stepper*, hal ini didasarkan karena kebutuhan untuk ketepatan jarak tiap pengukuran harus sama.

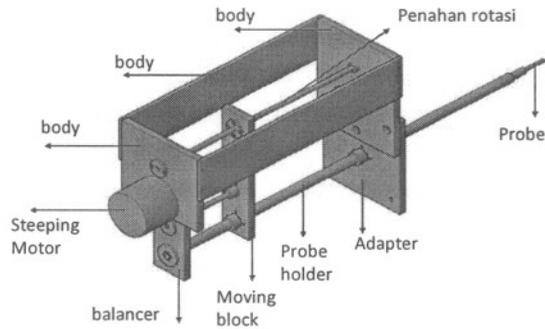
b) Menentukan *liner/eretan*. Alat bantu ini didisain menggunakan *ball/lead screw* sebagai eretannya, hal ini didasarkan pada efektifitas pemindahan dan keakuratan perpindahan (*displacement*).

c) Menentukan spesifikasi dari batang pemegang *probe gauss meter*, dimana pemegang ini berupa batang berbahan *non ferro* (bukan besi) kaku dan ringan hal ini bertujuan :

- Bahan Non ferro bertujuan agar batang tidak mengintervensi/memberikan kontribusi kemagnetan pada daerah pengukuran, sehingga pengukuran benar-benar dihasilkan dari medan magnet ruang pemercepat Siklotron CS-30 saja.

- Kaku karena pada pengukuran ini tidak diijinkan terjadi defleksi batang yang signifikan, maka diperlukan batang yang kaku/*rigid*. Faktor penyebab terjadinya defleksi adalah jenis bahan batang, beban batang dan *probe* serta kabel *probe*.

- Ringan, sehingga torsi yang diperlukan untuk menggerakannya juga ringan/kecil. Dari ketiga variabel syarat diatas maka ditetapkan disain batang menggunakan bahan pipa *aluminum alloy*.



Gambar 4: Bagian-bagian alat.

5. Analisa Pembebanan.

Dalam disain ini analisa pembebanan digunakan untuk mencari Torsi yang diperlukan untuk menggerakkan alat, dimana untuk menentukan ukuran penggerak maka harus diketahui terlebih dahulu berapa besarnya beban yang akan ditanggung oleh penggerak tersebut, sehingga akan didapatkan ukuran motor penggerak yang sesuai. Analisa pembebanan juga dilakukan untuk mengetahui besarnya beban yang terjadi pada batang pemegang *probe* yang akan mengakibatkan terjadinya defleksi pada batang pemegang *probe Gauss meter*, hal ini dilakukan untuk menentukan spesifikasi bahan dan ukuran pemegang *probe* tersebut.

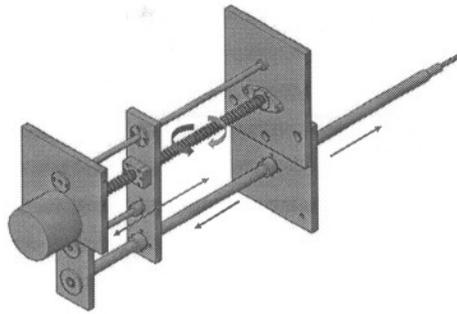
HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Alat.

Motor penggerak yang berupa *stepping motor* akan menggerakkan/memutar poros berulir (*screw rod*) sehingga *Nut/mur* juga ikut berputar, karena *Nut/mur* tersebut terhubung dengan blok pembawa (*moving block*), sedangkan *moving block* dihubungkan dengan batang penahan rotasi sehingga gerakan *nut* tersebut tidak lagi rotasi

melainkan menjadi translasi karena gerak rotasinya tertahan, disini terjadi perubahan dari gerak rotasi motor menjadi gerakan translasi *moving block*.

Moving block tersebut terhubung dengan batang pemegang *probe (probe holder)* dimana diujungnya terpasang *probe* dari *Gauss meter*, sehingga *probe* juga ikut bergerak maju. Dengan demikian gerakan *probe* ditentukan oleh gerakan motor, jika motor berputar searah jarum jam, maka *probe* akan bergerak maju dan sebaliknya. Adapun untuk membatasi adanya penyimpangan vertikal, maka dibuatkan penyeimbang (*balancer*) yang berguna untuk membatasi kesalahan gerakan *vertical* (naik turunnya *probe*). Dengan demikian pergerakan *moving block* hanya akan bergerak maju mundur secara translasi dengan jarak pergerakan yang dapat diatur dari konversi putaran *stepping motor*, tanpa adanya gerakan rotasi dan gerakan naik turun. Sehingga posisi *probe* dari *Gauss meter* juga akan tetap terjaga stabil di posisi *median plane* ruang pemercepat Siklotron CS-30, dengan demikian akan didapatkan hasil pengukuran yang lebih baik dan meyakinkan.



Gambar 5 : mekanisme kerja alat.

3.2 Perhitungan Spesifikasi Motor.

Perhitungan dilakukan untuk mencari spesifikasi dari motor penggerak dan mengetahui besarnya defleksi dari pipa pemegang *probe* dari bahan yang direncanakan:

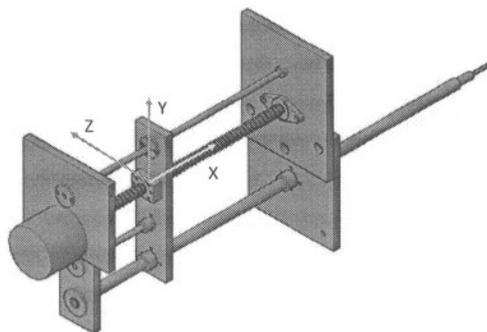
A. Pembebanan yang diterima motor penggerak:

- Pembebanan pada sumbu X, yaitu pembebanan akibat gaya (berat) yang ditopang oleh *ball nut* untuk digerakkan maju atau mundur, seperti : *body plat*, *hollow shaft* dan mekanisme penyeimbang *hollow shaft* termasuk

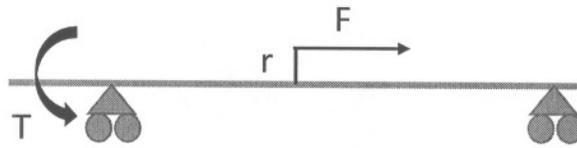
gesekan antara *body plat* dengan *balancing rod*.

- Pembebanan arah sumbu Y, dalam hal ini tidak ada beban arah Y.
- Pembebanan arah sumbu Z, dalam hal ini tidak ada beban arah Z.

Adapun untuk memudahkan melakukan perhitungan, maka dibuat *Free Body Diagram* seperti ditunjukkan pada Gambar-7. *Free Body Diagram* digunakan agar detail pembebanan dapat lebih jelas. Dengan demikian semua variable pembebanan yang diperlukan dalam proses perhitungan dapat terlihat, sehingga didapatkan hasil perhitungan yang tepat.



Gambar 6: Pembebanan arah x,y,z.



Gambar 7: Diagram batang bebas (*Free body diagram*).

Berdasarkan *free body diagram* tersebut maka, beban yang dipikul oleh motor penggerak adalah F , dengan ukuran diameter poros ulir d dan radius poros r , maka Torsi atau moment puntir [T] yang terjadi adalah : $T = F \cdot r$ [Nm], dimana F adalah beban keseluruhan pada arah sumbu y , yang meliputi : *body plat 1*, *body plat 2* dan batang pemegang *probe*.

Menghitung massa tiap-tiap bagian:

a. Body plat 1.

Pada kenyataannya plat ini dilubangi untuk tempat *bushing* yang juga berbahan aluminum, sehingga dapat diabaikan dan diasumsikan plat tersebut dalam keadaan utuh tanpa lubang *bushing*.

Dimensi plat adalah :

$$70 \text{ [mm]} \times 300 \text{ [mm]} \times 15 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume plat} &= p \times l \times t \\ &= (70 \times 300 \times 15) \text{ mm}^3 \\ &= 315000 \text{ mm}^3 \\ &= 0.000315 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Massa jenis [ρ] *aluminum alloy*

$$\text{adalah} = 2700 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

sehingga massa plat adalah :

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot V \\ &= 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.000315 \text{ m}^3 \\ &= 0.8505 \text{ kg} \end{aligned}$$

b. Body plat 2

$$\text{Dimensi} = (80 \times 165 \times 15) \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Volume plat} &= 198000 \text{ mm}^3 \\ &= 0.000198 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Massa jenis [ρ] aluminum alloy

$$\text{adalah} = 2700 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

sehingga massa plat 2 adalah :

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot V \\ &= 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.000198 \text{ m}^3 \\ &= 0.5345 \text{ kg} \end{aligned}$$

c. Batang pemegang *probe* (pipa aluminum)

$$\text{Diameter lingkaran luar } d_1 = \frac{3}{4} \text{ inch}$$

$$= 19.5 \text{ mm}$$

Dengan ketebalan 0.9 mm

- Sehingga diameter dalam pipa d_2

$$d_2 = (19.5 - 2 \times 0.9) \text{ mm}$$

$$= (19.5 - 1.8) \text{ mm}$$

$$= 17.7 \text{ mm}$$

- Luas lingkaran luar l_1

$$l_1 = \pi \cdot r^2, l_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$$

$$l_1 = \frac{\pi \cdot (19.5)^2}{4}$$

$$= \frac{1195.07}{4}$$

$$= 298.77 \text{ mm}^2$$

$$l_1 = 2.9877 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Diameter lingkaran dalam $d_2 = 17.7 \text{ mm}$

Luas lingkaran dalam :

$$l_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \text{ mm}^2 = \frac{\pi \cdot (17.7)^2}{4} \text{ mm}^2$$

$$l_2 = 2.46156 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Luas permukaan efektif pipa adalah luas lingkaran luar-luas lingkaran dalam.

$$\begin{aligned} \text{Luas efektif } [l_s] &= l_1 - l_2 \\ &= (2.9877 \times 10^{-4} - 2.46156 \times 10^{-4}) \text{ m}^2 \\ &= 0.52614 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Volume pipa = Luas efektif x panjang pipa
Volume = luas alas x tinggi
tinggi pipa = panjang pipa m
 $V = (0.52614 \times 10^{-4} \times 0.75) \text{ m}^3$
 $= 0.394605 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

Massa pipa [m] = Volume [V] x massa jenis [ρ]

$$\begin{aligned} m &= 0.394605 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= 1065.4335 \times 10^{-4} \text{ kg} \\ &= 0.10654 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Sehingga total massa yang dipikul oleh *nut* adalah :

massa plat 1 + massa plat 2 + massa pipa
Total massa yang ditanggung oleh motor penggerak sebesar 1,491 kg

- Sehingga total beban [W] adalah :

$$W = m \cdot g$$

dimana g adalah percepatan gravitasi yang besarnya = $9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$,

sehingga :

$$W = 1.491 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 14.632 \text{ N}$$

Dimana beban/berat adalah besarnya gaya yang dipengaruhi gravitasi,

Sehingga $W = F$ [N]

Menghitung Torsi atau momen puntir yang dibutuhkan untuk memutar *ball /lead screw* :
Ukuran poros *ball screw/lead screw* direncanakan menggunakan ukuran $\frac{5}{8} \text{ inch}$ = 15,875mm, dengan alasan ukuran tersebut adalah ukuran terkecil yang sering tersedia dipasaran.

Dari ukuran tersebut maka radius poros adalah: $r = \frac{d}{2} = \frac{15.875}{2} = 7.9375 \text{ mm}$

Sehingga besarnya Torsi yang dibutuhkan untuk dapat memutar poros *ball/lead screw* adalah :

$$\begin{aligned} T &= F \cdot r \\ &= 14.632 \text{ N} \times 7.9375 \text{ mm} \\ &= 14.632 \text{ N} \times 7.9375 \times 10^{-3} \text{ m} \\ &= (116,141 \times 10^{-3}) \text{ Nm} \\ &= 0.116141 \text{ Nm.} \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan maka di ketahui bahwa torsi yang diperlukan adalah sebesar 0,116141 Nm, sehingga dibutuhkan motor penggerak yang mempunyai Torsi minimal sebesar 0,116141 Nm. Karena desain direncanakan menggunakan motor stepper maka dicarilah spesifikasi *steeping motor* berdasarkan kebutuhan Torsi dari hasil perhitungan tersebut. Dari data katalog produk *motor stepper*, maka digunakan *motor stepper* dengan kode 5014-042 - NEMA 14, Torsi : 25.53 (oz-in) atau setara dengan 0.180281 N.

B. Pembebanan yang terjadi pada batang pemegang *probe* :

Adapun pembebanan yang terjadi pada batang pemegang *probe* lebih dititik beratkan pada potensi terjadinya lendutan, sehingga akan dihasilkan hasil pengukuran yang akurat. Untuk lebih memperjelas distribusi beban maka dibuatlah diagram batang bebas (*free body diagram*) untuk beberapa posisi *probe*, untuk *probe* pada radius terluar yang ditunjukkan pada Gambar-8, dimana : A dan B adalah tumpuan dan F adalah besarnya gaya, sedangkan y adalah lendutan / defleksi.



Gambar 8: Diagram pembebanan pada batang pemegang *probe* pada posisi radius terluar (42cm).

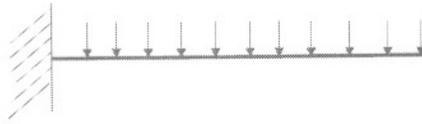


Gambar 9: Diagram pembebanan pada batang pemegang *probe* pada posisi radius terdalam (0 cm).

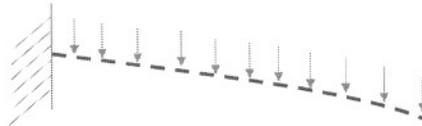
Pada posisi ini lendutan / defleksi batang bisa diabaikan karena sangat kecil, hal ini karena geometri batang yang didukung dua buah tumpuan yang simetris dan bentangan batang yang cukup merata. Adapun untuk *free body diagram* untuk posisi probe pada radius terdalam ditunjukkan pada Gambar 9.

Pada posisi ini lendutan/defleksi batang bisa terjadi cukup signifikan, hal ini karena geometri batang yang didukung dua buah tumpuan yang simetris tapi dengan

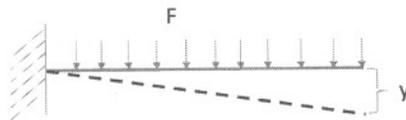
bentang batang yang tidak merata, bentang batang lebih banyak disisi kanan tumpuan sehingga sangat mungkin terjadi defleksi. Jenis pembebanan diasumsikan berbentuk kantilever dengan distribusi beban merata. Beban adalah berat batang + berat probe yang terdistribusi merata, diilustrasikan pada Gambar-10, sedangkan lendutan akibat pembebanan merata diilustrasikan pada Gambar-11, serta besarnya lendutan (y) yang terjadi diilustrasikan pada Gambar-12 dibawah ini.



Gambar 10 : Diagram pembebanan merata.



Gambar 11 : Diagram lendutan akibat beban merata.



Gambar 12 : Diagram besarnya lendutan yang terjadi.

Menghitung besarnya lendutan yang terjadi:

Diketahui:

E = modulus elastisitas aluminium

$$= 68\text{GPa} = 6.8 \times 10^{10} \text{N/m}^2$$

R = 9.75 mm (diameter lingkaran luar) $d_1 = \frac{3}{4}$

inch = 19.5 mm

r = 8.85, (diameter dalam pipa)

$d_2 = 17.7$ mm

W: beban (berat pipa + probe + kabel) [N]

Defleksi yang terjadi pada pipa:

$$\delta_{max} = \frac{Wl^3}{8EI}$$

Maka dicarilah moment inersia luasan untuk bentuk penampang pipa /

• Momen inersia luas pada pipa adalah

$$I = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$$

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot (9.75^4 - 8.85^4) \text{mm}^4$$

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot 2902.4649 \text{mm}^4$$

$$I = 2.280 \times 10^{-9} [\text{m}^4]$$

• Volume pipa = Luas efektif x panjang pipa

$$V = 0.52614 \times 10^{-4} \text{m}^2 \times 0,5 \text{ m}$$

$$= 0.26307 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

• Massa pipa [m] = Volume [V] x massa jenis [ρ]

$$m = 0.26307 \times 10^{-4} \text{m}^3 \times 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 710,289 \times 10^{-4} \text{kg}$$

$$= 0,0710298 \text{ kg}$$

• $W_{\text{pipa}} = 0,0710298 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$= 0,710298 \text{ N}$$

• Massa probe + kabel :

$$= 32\text{gr}$$

$$= 3,2 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

• Berat probe + kabel [W]

$$W = m \cdot g$$

$$= 3,2 \times 10^{-2} \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$= 31,392 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$= 3,1392 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Diasumsikan seluruh kabel dibebankan ke batang pemegang probe, sehingga berat total yang memberikan gaya ke bawah pada batang adalah berat batang itu sendiri sepanjang 500mm dan berat *probe*+kabel.

Sehingga :

$$\begin{aligned} W &= W_{\text{batang}} + W_{\text{probe+kabel}} \\ &= 0,710298 \text{ N} + 3,1392 \times 10^{-3} \text{ N} \\ &= 0,713437 \text{ N} \end{aligned}$$

Deflesi maksimum yang terjadi :

$$\delta_{\text{max}} = \frac{Wl^3}{8EI} = \frac{0,713437(N) \times 0,5(m^3)}{8 \times 6,8 \times 10^{10} \left(\frac{N}{m^2}\right) \times 2,8 \times 10^{-9}(m^4)}$$

$$\delta_{\text{max}} = 2,3281 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\delta_{\text{max}} = 0,23281 \text{ mm}$$

Dari hasil perhitungan didapat besarnya lendutan/defleksi adalah 0,23 mm

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Perancangan alat bantu pengukur profil kuat medan magnet Siklotron CS-30 maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Bahan bodi dirancang menggunakan plat Aluminium
2. Motor penggerak menggunakan *stepping motor* dengan Torsi [T]= 0,116141 Nm, dan berdasarkan data katalog produk motor stepper maka digunakan motor stepper dengan kode 5014-042 - NEMA 14, torsi : 25.53 oz-in atau setara dengan 0.180281 Nm. Torsi yang tersisa ini dapat digunakan untuk mengatasi adanya gesekan antar bagian terutama pada daerah *sliding rod* dan kemungkinan ketidaktepatan proses pabrikan dimana sebelumnya hal diabaikan dalam proses perhitungan.
3. Eretan/poros ulir menggunakan *balls screw* atau bisa juga diganti dengan *lead screw*, karena keduanya sama-sama menggunakan prinsip ulir pemindah daya, dengan ukuran *5/8 inch*.

4. Batang pemegang *probe* (*probe holder*) menggunakan pipa *aluminum alloy 6063* dengan ukuran diameter luar $\frac{3}{8}$ inci (19.5mm), dengan ketebalan 0.9 mm dan panjang total 750 mm, lendutan yang terjadi sebesar 0,23mm dapat dikategorikan aman, lendutan tersebut dapat diabaikan karena sangatlah kecil jika dibandingkan dengan jarak antar *hill* atas dan *hill* bawah / *total hill gape* sebesar 66,5 mm pada radius 0 cm dan 52,5 mm pada radius 42 cm.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada: Heranudin, M.Eng beserta staf Subbid. Pengelolaan Perangkat Aktivasi atas pemikiran dan sarannya.

REFERENSI

1. Suga SK., *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*, P.T. Pradnya Paramita, Jakarta, Cetakan Keenam, 1987.
2. Khurmi R.S dan Gupta J.K., "A Text Book of Machine Design", Eurasia Publishing House, New Delhi, 1987.
3. Anonim, Operating and Service Manual for CS-30 Cyclotron, Computer Technology and Imaging (CTI), Berkeley, California, USA, 1985.
4. Specification of Gauss meters
<http://www.gaussmeter.co.uk/product/gauss-meter-gm08/>
5. Specification of stepping motors 5014-042 - NEMA 14
<http://www.applied-motion.com/products/stepper-motors/5014-042>

6. Properties of Aluminum alloy
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6063T6>