

ORGANISASI RISET TENAGA NUKLIR

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

(PRACTICE 5-[28 NOVEMBER 2025])

Kekritisan Reaktor

Author:

Awwal Ainur Rizqi
(NIM:19/446710/TK/49815)

Institution:

Universitas Gadjah Mada

Daftar Isi

1 Tujuan Percobaan	2
2 Dasar Teori	2
2.1 Kekritisian Reaktor	2
2.2 Faktor yang Memengaruhi Kekritisian Reaktor	2
2.2.1 Komposisi Material	2
2.2.2 Massa dan Densitas	2
2.2.3 Energi Neutron dan Moderasi	2
2.2.4 Geometri dan Reflektor	2
2.3 Penentuan Massa Kritis Reaktor	3
2.3.1 Metode Pendekatan Multiplikasi Subkritis	3
2.3.2 Pendekatan Teori Difusi	3
3 Alat dan Bahan	4
4 Prosedur Percobaan	4
4.1 Persiapan Kondisi Awal (<i>Initial Unloading</i>)	4
4.2 Pemasukan (<i>Loading</i>) Bahan Bakar ke dalam Teras Reaktor	4
4.2.1 Pelaksanaan <i>loading</i> bahan bakar	4
4.3 Analisis Hasil Eksperimen	5
5 Data Hasil Percobaan	6
6 Pembahasan	6
7 Kesimpulan	7

1 Tujuan Percobaan

Pada praktikum kali ini, peserta praktikum dapat menentukan jumlah massa kritis dari bahan bakar ^{235}U yang harus diisikan ke dalam teras reaktor agar dapat melangsungkan reaksi pembelahan berantai (*chain reaction*) dengan selamat.

2 Dasar Teori

2.1 Kekritisian Reaktor

Pada saat reaktor dioperasikan, terjadi proses reaksi inti bahan bakar ^{235}U dengan neutron termal yang menghasilkan reaksi pembelahan (fisi) berantai[1]. Reaksi fisi ^{235}U melepaskan neutron baru yang berperan dalam melanjutkan proses ini. Apabila populasi neutron di dalam teras reaktor pada kondisi ajeg (*steady state*) maka disebut reaktor dalam kondisi kritis. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa pada saat berlangsungnya proses regenerasi, jumlah neutron sebelum dan sesudah reaksi fisi ^{235}U adalah tetap[2]. Kondisi ini dapat tercapai hanya jika jumlah minimum bahan bakar fisil, yang dikenal sebagai massa kritis, terpenuhi, sehingga memungkinkan regenerasi neutron dapat berlangsung secara kontinu dengan populasi neutron sebelum dan sesudah regenerasi adalah sama. Massa kritis adalah jumlah minimum bahan bakar ^{235}U yang memungkinkan regenerasi neutron dapat berlangsung secara kontinu, sehingga populasi neutron sebelum dan sesudah regenerasi adalah sama.

Didefinisikan bahwa K_{eff} adalah perbandingan jumlah neutron pada suatu generasi terhadap jumlah neutron pada generasi sebelumnya, dituliskan sebagai:

$$K_{eff} = \frac{\Sigma \text{neutron pada suatu generasi}}{\Sigma \text{neutron generasi sebelumnya}} \quad (1)$$

- Bila $K_{eff} > 1$ maka reaktor disebut dalam kondisi superkritis; dimana populasi neutron di dalam teras reaktor pada suatu generasi terus meningkat sebagai fungsi waktu.
- Bila $K_{eff} < 1$, disebut reaktor dalam kondisi subkritis; dimana populasi neutron pada suatu regenerasi terus berkurang sebagai fungsi waktu.
- Bila $K_{eff} = 1$, disebut reaktor dalam kondisi kritis, dimana populasi neutron pada suatu regenerasi dalam keadaan dalam keadaan setimbang (tetap/ajeg).

2.2 Faktor yang Memengaruhi Kekritisian Reaktor

Kekritisian reaktor nuklir dipengaruhi oleh beberapa faktor utama yang menentukan keseimbangan antara produksi neutron fisi dan hilangnya neutron (melalui absorpsi dan kebocoran)[1].

2.2.1 Komposisi Material

Komposisi material teras reaktor sangat menentukan kekritisian. Faktor utamanya adalah kandungan bahan fisil (seperti ^{235}U atau ^{239}Pu) yang memicu reaksi fisi, dan bahan fertil (seperti ^{238}U atau ^{232}Th) yang dapat dikonversi menjadi bahan fisil baru. Selain itu, keberadaan material penyerap neutron, seperti boron atau kadmium, dapat menghambat reaksi berantai dengan menghilangkan neutron bebas. Kontrol terhadap material penyerap ini sangat penting untuk menjaga kekritisian yang diinginkan[2].

2.2.2 Massa dan Densitas

Kekritisian terkait langsung dengan jumlah bahan fisil. Massa bahan fisil harus cukup besar untuk mencapai massa kritis; jika massa terlalu kecil, laju kebocoran neutron akan melebihi laju produksi neutron, menyebabkan sistem menjadi subkritis. Selain itu, densitas bahan fisil memengaruhi jumlah atom fisil per satuan volume. Densitas yang lebih tinggi meningkatkan probabilitas interaksi antara neutron dengan inti fisil, sehingga meningkatkan kekritisian.

2.2.3 Energi Neutron dan Moderasi

Probabilitas terjadinya fisi dipengaruhi oleh energi neutron. Neutron termal (berenergi rendah) memiliki probabilitas yang jauh lebih tinggi untuk memicu fisi pada bahan seperti ^{235}U , sedangkan neutron cepat lebih efektif pada beberapa bahan fisil tertentu, seperti ^{239}Pu . Oleh karena itu, moderasi adalah proses penting untuk memperlambat neutron cepat menjadi neutron termal menggunakan material moderator (seperti air ringan, air berat, atau grafit). Moderator yang efektif meningkatkan peluang neutron ditangkap oleh bahan fisil, secara langsung meningkatkan K_{eff} [1].

2.2.4 Geometri dan Reflektor

Faktor-faktor ini berkaitan dengan manajemen kebocoran neutron. Bentuk geometris material fisil memengaruhi rasio luas permukaan terhadap volume, yang secara langsung menentukan laju kebocoran neutron; bentuk yang lebih kompak, seperti bola, akan

meminimalkan kebocoran. Selain itu, penggunaan reflektor (misalnya, berilium atau grafit) di sekeliling inti reaktor berfungsi memantulkan neutron yang bocor kembali ke dalam inti. Penggunaan reflektor secara signifikan mengurangi kebocoran neutron, sehingga meningkatkan efisiensi reaksi dan membantu mencapai kondisi kritis[2].

2.3 Penentuan Massa Kritis Reaktor

2.3.1 Metode Pendekatan Multiplikasi Subkritis

Penentuan massa kritis reaktor dapat dilakukan melalui metode eksperimental yang mengamati respons populasi neutron terhadap penambahan bahan bakar, yang dikenal sebagai metode multiplikasi subkritis (*subcritical multiplication method*)[1]. Apabila sumber neutron awal dengan laju produksi S neutron dimasukkan ke teras, maka pada akhir generasi pertama akan dihasilkan $K_{\text{eff}} \cdot S$ neutron, pada akhir generasi kedua sejumlah $K_{\text{eff}}^2 \cdot S$, dan seterusnya.

Total perlipatan neutron (*multiplication factor*) di dalam teras (X) adalah penjumlahan dari deret geometris yang dihasilkan:

$$X = \frac{S + K_{\text{eff}}S + K_{\text{eff}}^2S + \dots}{S} = 1 + K_{\text{eff}} + K_{\text{eff}}^2 + \dots \quad (2)$$

Untuk kondisi subkritis, di mana $K_{\text{eff}} < 1$, jumlah seluruh neutron yang ada di dalam teras (N) adalah hasil perkalian antara sumber neutron dan faktor multiplikasi X :

$$N = S \cdot X = \frac{S}{1 - K_{\text{eff}}} \quad (3)$$

Jika di area medan neutron teras ditempatkan detektor neutron (misalnya, detektor *Fission Chamber*, FC), maka laju cacah yang teramati (C) adalah sebagian fraksi (F) dari jumlah neutron total (N) yang ada di dalam teras:

$$C = F \cdot N = \frac{F \cdot S}{1 - K_{\text{eff}}} \quad (4)$$

Dalam eksperimen penentuan massa kritis, lebih disukai untuk mengamati nilai resiprokal laju cacah, $1/C$, untuk setiap penambahan bahan bakar[2]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1 - K_{\text{eff}}}{F \cdot S} \quad (5)$$

Harga K_{eff} akan bertambah seiring pertambahan massa bahan bakar ^{235}U secara bertahap. Bila kondisi kritis telah tercapai ($K_{\text{eff}} = 1$), maka parameter

$1/C$ dari Persamaan (5) akan menjadi nol. Massa kritis reaktor kemudian dapat ditentukan dengan menentukan titik nol ($1/C = 0$) pada grafik korelasi antara $1/C$ versus massa bahan bakar yang telah dimasukkan.

2.3.2 Pendekatan Teori Difusi

Penentuan massa kritis juga dapat dilakukan dengan pendekatan teoritis berdasarkan model reaktor. Berdasarkan pendekatan teori difusi satu kelompok untuk reaktor telanjang (*bare reactor*), faktor multiplikasi efektif dirumuskan sebagai berikut[3]:

$$K_{\text{eff}} = \frac{K_{\infty}}{1 + M^2 B^2} \quad (6)$$

Di mana K_{∞} (faktor multiplikasi tak hingga) dan M^2 (luas migrasi) adalah fungsi dari komposisi material dan dapat dianggap konstan. Dengan mensubstitusikan Persamaan (6) ke dalam Persamaan (5) dan menyederhanakannya, didapatkan:

$$\frac{1}{C} \propto 1 - K_{\text{eff}} = 1 - \frac{K_{\infty}}{1 + M^2 B^2} = \frac{1 - K_{\infty} + M^2 B^2}{1 + M^2 B^2} \quad (7)$$

Dalam kondisi yang mendekati kritis, dapat diasumsikan bahwa $1/C$ kira-kira linier terhadap B^2 (*buckling*). Pada kondisi kritis, B^2 sama dengan *buckling* geometris (B_g^2), yang untuk teras silinder, dirumuskan:

$$B_g^2 = \left(\frac{2.405}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_e} \right)^2 \quad (8)$$

Di mana R_e dan H_e berturut-turut adalah jari-jari dan tinggi teras terekstrapolasi.

Dengan penambahan bahan bakar secara bertahap, jari-jari teras (R) akan bertambah, sementara tinggi teras (H) biasanya tetap. Dengan demikian, dapat dibuat grafik korelasi antara $1/C$ versus $1/R^2$. Harga $1/C = 0$ berhubungan dengan jari-jari kritis R_c . Massa kritis reaktor (M_c) selanjutnya dapat ditentukan dari dimensi kritis ini:

$$M_c = \pi R_c^2 H_a \rho \quad (9)$$

Di mana ρ adalah densitas bahan bakar (g/cm^3) dan H_a adalah tinggi aktif teras reaktor. Secara keseluruhan, penentuan massa kritis dilakukan dengan mengamati pertambahan populasi neutron (cacah) terhadap jumlah gram penambahan bahan bakar ke dalam teras hingga regenerasi neutron mencapai seimbang, di mana harga $K_{\text{eff}} = 1$. Untuk tujuan ini, sumber neutron (misalnya Am-Be) dimasukkan ke dalam teras sebagai sumber awal[1].

3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penentuan massa kritis reaktor ini meliputi[4]:

- *Handling Tool*: Digunakan untuk operasi *loading* (pemasukan) dan *unloading* (pengeluaran) elemen bahan bakar ke dan dari teras reaktor.
- Detektor Neutron (*Fission Chamber*, FC): Detektor proporsional yang sensitif terhadap fluks neutron termal, digunakan sebagai pencacah (sensor) populasi neutron di dalam teras.
- Sistem Pencacah (*Counter/Scaler*): Perangkat elektronik yang terhubung ke detektor FC untuk menampilkan dan merekam laju cacah neutron.
- Elemen Bahan Bakar: Elemen bahan bakar uranium dengan pengayaan rendah yang akan dimasukkan secara bertahap.
- Sumber Neutron: Sumber neutron independen (misalnya Amerisium-Berilium / Am-Be) yang dimasukkan ke teras untuk menghasilkan fluks neutron awal (S) saat reaktor dalam kondisi subkritis.
- Perangkat Lunak Analisis: Program lembar kerja (seperti *Microsoft Excel*) untuk memproses data laju cacah (C) dan menghitung faktor resiprokal $1/C$ serta menentukan massa kritis.

Spesifikasi bahan bakar reaktor Kartini.

Parameters	Specification
Length of Fuel Element	75 cm
Outer Diameter	3.81 cm
Length of Graphite	9.4 (Bottom); 6.6 (Top) cm
Length of UZrH	38.1 cm
Diameter of UZrH	3.56 cm
Mass of UZrH	2.235 gr
Density of UZrH	5.99 gr/Cm ³
Uranium contents	8.5%
U235 Enrichments	19.75%
Mass of U235	±38 gr

Table 1: Spesifikasi dari bahan bakar reaktor Kartini.

4 Prosedur Percobaan

Prosedur eksperimen ini bertujuan mengukur multiplicasi subkritis reaktor untuk memperkirakan massa kritis[2].

4.1 Persiapan Kondisi Awal (*Initial Unloading*)

Pada kondisi operasi kritis Reaktor Kartini pada daya 100 kW, jumlah elemen bahan bakar adalah 71 kelongsong dengan massa total ^{235}U sekitar ±2645 gram. Agar reaktor berada dalam kondisi subkritis total (*zero power*) sebelum pengujian dimulai, dilakukan *unloading* (pengeluaran) elemen bahan bakar sebanyak 8 kelongsong. Dengan demikian, jumlah total elemen bahan bakar pada kondisi awal praktikum (*initial condition*) adalah 63 kelongsong. Kondisi ini memastikan bahwa faktor multiplikasi efektif (K_{eff}) jauh di bawah 1, sehingga regenerasi neutron tidak dapat berlangsung tanpa adanya sumber neutron eksternal.

4.2 Pemasukan (*Loading*) Bahan Bakar ke dalam Teras Reaktor

Tujuan utama dari prosedur pemasukan (*loading*) bahan bakar ke dalam teras reaktor adalah untuk menentukan jumlah massa minimum ^{235}U yang dibutuhkan agar reaktor mencapai kondisi kritis ($K_{\text{eff}} = 1$)[2]. Pada kondisi awal, reaktor sudah berisi sejumlah bahan bakar sisa (*initial condition* sebanyak 63 kelongsong, sekitar 2377 gram ^{235}U) dan telah dipasang sumber neutron awal (Am-Be). Meskipun demikian, kondisi ini masih subkritis ($K_{\text{eff}} < 1$), yang berarti populasi neutron yang ada di dalam teras (termasuk cacah latar belakang) bergantung pada sumber eksternal. Untuk menentukan (memperkirakan) massa kritis, elemen bahan bakar dimasukkan secara bertahap.

4.2.1 Pelaksanaan *loading* bahan bakar

Personil minimal terdiri dari 9 orang:

1. Supervisor Reaktor: 1 orang
2. Operator Reaktor: 2 orang
3. Operator *Handling Tool*: 1 orang
4. Operator *Unloading*: 3 orang
5. Petugas Akuntansi Bahan Nuklir: 1 orang
6. Petugas Proteksi Radiasi: 1 orang

Personil melakukan kegiatan *loading* sesuai prosedur berikut:

1. Sebelum percobaan dimulai, yakinlah bahwa telah dilakukan *unloading* (8 buah) bahan bakar, dan catat berat massa bahan bakar yang masih ada dalam teras.
2. Menaikkan semua batang kendali baik pengaman, kompensasi, dan pengatur berada pada posisi *fully-up*, kemudian lakukan pencacahan neutron (C_1).
3. Melakukan *loading* satu buah bahan bakar dan catat berat massa ^{235}U dalam teras reaktor setelah penambahan, kemudian lakukan pencacahan neutron (C_2). Untuk memperhitungkan (prediksi) massa kritis, tentukan titik potong sumbu ordinat dengan menarik garis dari (C_1 sampai dengan C_2). Dengan menggunakan *Excel*, hitung prediksi massa kritisnya.
4. Dengan cara yang sama dengan langkah (3), lakukan *loading* kembali untuk bahan bakar berikutnya dan lakukan pencacahan neutron berikutnya (C_3). Kemudian lakukan kembali loading bahan bakar dan pencacahan (ke-n dengan cacah C_n) hingga mencapai kritis.
5. Tentukan massa kritis reaktor dengan membuat grafik $1/C$ versus massa bahan bakar fissil (^{235}U) untuk reaktor Kartini. Kemudian tentukan jari-jari kritis reaktor R_c dari persamaan (9). Bentuk grafik yang diperoleh dalam menuju kondisi kritis bisa bervariasi (lurus, cembung atau cekung) seperti ditunjukkan pada gambar (1).
6. Kondisi kritis ditandai dengan pernunjukan daya reaktor pada kondisi konstan (*zero power*), atau bahkan terjadi kenaikan daya reaktor secara perlahan dan kontinu.
7. Apabila indikasi kekritisannya telah diperoleh, semua batang kendali diturunkan, kemudian dilanjutkan *loading* bahan bakar yang masih tersisa (apabila masih tersedia).
8. Setiap penambahan bahan bakar, salah satu batang kendali diturunkan sampai 0% untuk aspek keamanan.

4.3 Analisis Hasil Eksperimen

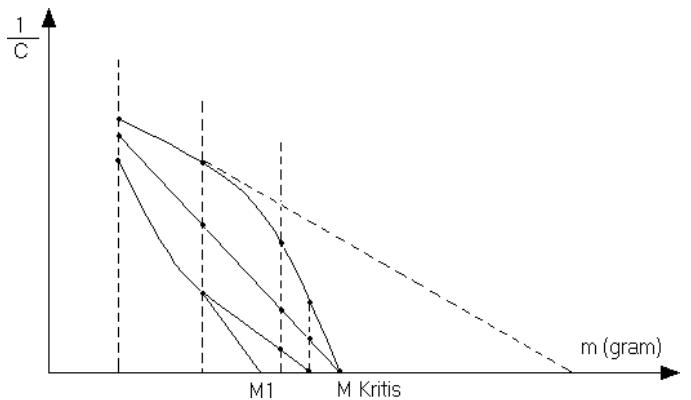


Figure 1: Contoh grafik antara $\frac{1}{C}$ vs M (massa kritis ^{235}U).

Data hasil eksperimen diplot dalam grafik dimana nilai $\frac{1}{C}$ adalah absis dan massa ^{235}U sebagai ordinatnya sebagaimana ditampilkan pada gambar (1). Dilakukan ekstrapolasi dengan menarik garis ke arah sumbu-x antara dua data berurutan, misal data 1 sampai 2, 2 sampai 3, 3 sampai 4, dan seterusnya. Dengan memperbanyak data akan membuat data semakin konvergen. Dalam hal ini massa kritis reaktor adalah ketika konvergen saat $y = 0$.

Grafik berbentuk linier adalah yang paling ideal karena ekstrapolasi pada penambahan bahan bakar pada tahap 1 telah dapat memberikan estimasi massa kritis reaktor dengan baik. Estimasi tahap 1 yang diperoleh kurva cekung memberikan jumlah massa kritis yang terlalu kecil, sedangkan kurva cembung memberikan estimasi yang terlalu besar. Bentuk kurva yang terlalu cekung umumnya diperoleh bila posisi detektor terlalu jauh dengan sumber neutron, sedangkan kurva yang terlalu cembung umumnya diperoleh apabila posisi detektor terlalu dekat. Dengan memperbanyak jumlah tahap penambahan bahan bakar, estimasi massa kritis yang diperoleh semakin baik.

Pendekatan lain adalah dengan menggunakan *Microsoft Excel*. Dengan cara:

1. Data hasil eksperimen diplot dalam grafik dimana nilai $\frac{1}{C}$ adalah absis dan massa ^{235}U sebagai ordinat.
2. Tambahkan persamaan grafik dalam bentuk $y = mx + c$.
3. Karena massa kritis adalah saat $y = 0$, maka persamaan $y(0) = mx + c$ dapat diselesaikan dengan $x = \frac{c}{m}$ dimana nilai x adalah massa kritis M_c .

Jari-jari kritis dapat ditentukan dengan menggunakan nilai massa kritis yang telah diperoleh (M_c), tinggi aktif bahan bakar (H_a), dan densitas bahan bakar ^{235}U (ρ) menggunakan persamaan (9) sebelumnya, didapat persamaan sebagai berikut.

$$R_c^2 = \frac{M_c}{\pi H_a \rho} \quad (10)$$

Penentuan jari-jari kritis reaktor massa kritis harus konsisten dengan densitas yang digunakan.

5 Data Hasil Percobaan

Adapun untuk tampilan *benchmark core* dari TRIGA sebagai berikut.

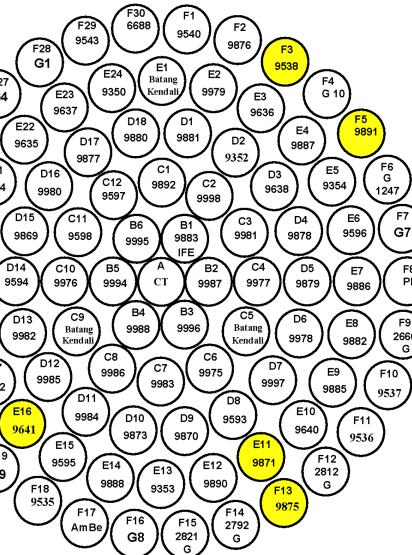


Figure 2: Bahan bakar yang ditambahkan pada praktikum ini berwarna kuning.

Step-	Number of Fuel Element in the core (pcs)	Addition of fuel number ID	Counting time (s)						Note	
			Counting Results			Average (counts per second)	1 / Count Average			
			1st	2nd	3rd					
0	63	Initial Condition	2336.1302	202	210	205	34278	0.0217	subkritis	
1	64	9871	37.2235	2376.5537	285	292	284	4.7833	0.2091	subkritis
2	65	9641	37.2127	2412.5664	425	442	430	7.2056	0.1388	subkritis
3	66	6710	37.9357	2450.5021	673	713	728	11.7444	0.0851	subkritis
4	67	9542	35.3782	2486.8803	1318	1658	1677	25.8500	0.0387	subkritis
5	68	9875	36.6012	2522.4815	9880	21717	43901	417.7667	0.0024	subkritis
6	69	9891	36.9831	2559.0464	1062234	2009803	2040751	28404.3778	0.0000	kritis 63kW
7	70		2559.4546				#DIV/0!	#DIV/0!		
8	71		2559.4546				#DIV/0!	#DIV/0!		

Figure 3: Data Praktikum: ID material, massa, total massa, pencacahan, rerata pencacahan per detik, $\frac{1}{C}$, dan keterangan kekritisan.

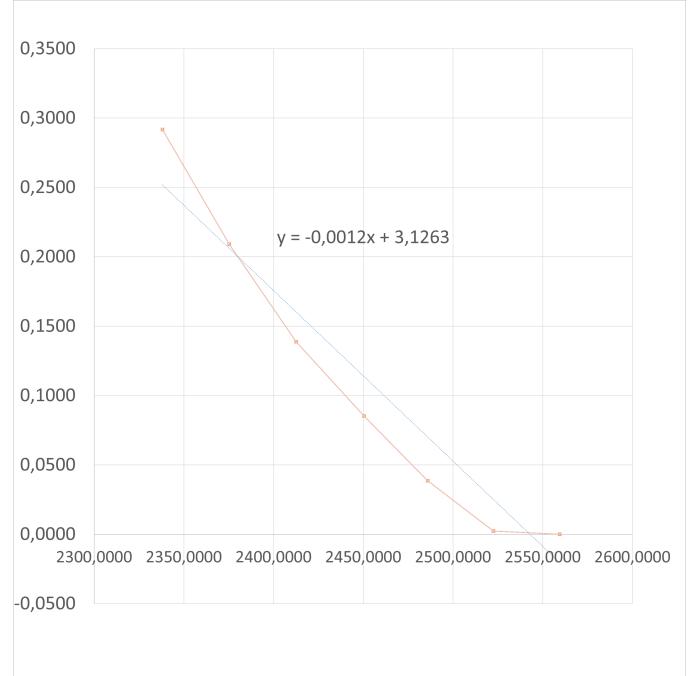


Figure 4: $\frac{1}{C}$ versus Penambahan massa bahan bakar.

6 Pembahasan

Dari data hasil percobaan(5) di atas, didapatkan persamaan $y = -0.0012x + 3.1263$. Dari persamaan ini, dengan menggunakan cara yang sama pada bagian(4.3), maka akan didapatkan massa kritis M_c sebesar $M_c = \frac{3.1263}{0.0012} = 2605.25$ gram.

Kemudian untuk mendapatkan jari-jari kritis, digunakan persamaan(10), sehingga didapatkan:

$$R_c = \sqrt{\left(\frac{M_c}{\pi H_a \rho}\right)} = \sqrt{\left(\frac{2605,25}{\pi(38,1)(5,99)}\right)} = 1.906 \text{ cm}$$

Dari sini, R_c dan M_c perhitungan menggunakan persamaan di atas, adalah *Bulk Geometric Property*, dengan catatan nilai dari nilai R_c yang dihitung hitung adalah Radius Kritis teoretis untuk model homogen yang disederhanakan, yang memiliki sifat neutronik (kekritisannya) yang sama dengan inti heterogen yang sebenarnya. Nilai ini membantu memvalidasi nilai M_c eksperimental terhadap model fisika reaktor dasar, yang sering kali memperlakukan material inti sebagai campuran homogen tunggal. Jika penambahan massa total untuk sampai kritis pada tabel(2), massa total sebesar 255.4646 gram, dalam hal ini, teras reaktor perlu diisi bahan bakar sampai mencapai massa kritis, sebesar katakanlah $\Delta M = 2605.25 - 255.4646 = 45.7854$ gram. Dengan melihat tabel spesifikasi(1), rerata massa dari bahan bakar ^{235}U sebesar 38 gram, sehingga dibutuhkan paling tidak penambahan dua kali bahan bakar, sehingga

menjadi 71 buah bahan bakar dari hasil praktikum kali ini. Namun, jika melihat pada tabel, tanpa ekstrapolasi, kita dapat melihat pada(3) bahwa $\frac{1}{C} \approx 0$ ketika bahan bakar total sebanyak 69.

Dari data yang disajikan pada *PROSIDING SEMINAR PENELITIAN DAN PENGELOLAAN PERANGKAT NUKLIR-BATAN*, dapat dilihat untuk operasi reaktor daya 100 kW untuk 360 jam/tahun, atau 2 kali lipatnya, keterangan kritis dari reaktor Kartini tercapai dengan kisaran jumlah bahan bakar ketika menyentuh angka 69, 70, dan 71 buah[5].

7 Kesimpulan

Pada praktikum kali ini, telah didapat data untuk massa kritis reaktor kartini, pada *Practice-5 Kekritisannya Reaktor* tanggal 28 November 2025, sebesar $M_{c-extra} = 2605.25$ gram. Namun, dengan melihat tabel(2), dapat dilihat pada massa total bahan bakar untuk sampai pada keadaan reaktor kritis, sebesar $M_{c-tabel} = 255.4646$ gram. Dapat dihitung error relatif nilai M_c sebesar $err_{rel} = \frac{M_{c-extra} - M_{c-tabel}}{M_{c-extra}} = 2\%$, dapat dituliskan $M_c = 2605.25 \pm 0.02$. Kemudian dengan jari-jari kritis untuk mencapai massa kritis reaktor sebesar $R_c = 1.906$ cm, dengan keterangan bahwa nilai ini merupakan *Bulk Geometry Property*, dan dikarenakan M_c merupakan sifat neutronik (*neutronic property*), maka perlu diperhitungkan metode lain seperti penggunaan software *MCNP*, dan software neutronik lain untuk mendapatkan nilai teoritis sehingga banding error di atas lebih valid.

References

- [1] J. R. Lamarsh and A. J. Baratta, *Introduction to Nuclear Engineering*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [2] S. Glasstone and A. Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering*, 4th ed. New York: Chapman & Hall, 1994.
- [3] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [4] M. Zubair, P. Matesha, Y. Akram, P. H. Sadewo, U. S. Hidayat, A. S. Wicaksono, and T. N. H. Susanto, “Advancing nuclear science education through irl integration: A case experiment on criticality mass determination at the kartini research reactor,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 204, p. 110538, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454924002019>
- [5] Mudjilan and T. N. H. Susanto, “ANALISIS KEBUTUHAN BAHAN BAKAR REAKTOR KARTINI,” in *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir: Book II*. Yogyakarta, Indonesia: Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), sep 2013, pp. 455–458, seminar held 11 September 2013.