

Konsep Desain Reaktor Termonuklir Fusi Tokamak *Sizeable* Sebagai Sumber Daya Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Dengan Pengamanan *Cryogenic*

Dheo Erfiansyah¹⁾, Yusnita Rahayu²⁾, Eddy Hamdani³⁾

¹⁾Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro S1, ²⁾Dosen Teknik Elektro, ³⁾Dosen Teknik Elektro Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik Universitas Riau
Kampus Binawidya Jl. H.R.Soebrantas Km 12,5 Simpang Baru Panam,
Pekanbaru, Riau
28293
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Email: dheoer@live.com

ABSTRACT

Some implications and research about tokamak as nuclear fusion reactor are examined. From the other researching about tokamak shown that this nuclear fusion reactor has been developed significantly in last 3 decade. In this research to determine new concept to recreate the tokamak with more safety tendencies. The step from this idea to make tokamak is calculate the nuclear fusion cycle energy (based on electron-volt), magnetic field needed (e.m.u), the equilibrium value of nuclear reaction (in electron-volt), temperature and heat conversion of the result from fusion reaction. Also, as the measurement of the tokamak, this study using sizeable value to determine radius of orbit, the coil, etc. From the conclusion this tokamak concept has estimate to produced high energy and high temperature. The tokamak projected to have >200MeV equilibrium energy value and converted to heat energy around 500°C - 600°C. Which use as the fuel flowed to the boiler as a device to produce steam. Then steam will set in motion the turbine.

Keywords: Nuclear Fusion, Tokamak, Equilibrium, Deuterium, Cryogenic

1. PENDAHULUAN

Tokamak adalah alat reaktor fusi dengan sistem kurungan medan magnet untuk mengendalikan plasma (campuran partikel-partikel bermuatan) atau dapat disederhanakan sebagai kurungan medan magnet pengendali reaksi nuklir Fusi. Saat ini teknik tokamak dan stellarator merupakan dasar pemodelan dalam upaya terwujudnya reaksi fusi termonuklir.

Penelitian terbesar nuklir fusi saat ini adalah mega proyek dengan nama ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Mega proyek tokamak ini merupakan penelitian gabungan EU (Uni-Eropa), Rusia, Amerika Serikat, China dan Jepang yang telah dirancang pembangunannya pada 1998. ITER saat ini berkantor pusat di Cadarache, Saint-Paul-les-Durance, Perancis dan dipimpin oleh Bernard Bigot. ITER dikembangkan dengan tujuan menjadi tokamak terbesar didunia dengan tujuan utama menciptakan energi setara bintang/matahari di bumi.

Tungsten/Wolframium berdasarkan data yang ada saat ini dari tabel periodik adalah logam dengan nilai titik didih 5555°C dan titik leleh 3422°C yang merupakan terkuat diantara logam yang telah ditemukan dan terdata pada unsur tabel periodik. Oleh karena itu, tungsten dapat diproyeksikan sebagai bahan logam untuk tokamak karena ketahanan pada suhunya yang tinggi.

Sebagai pengamanan yang mungkin bisa dijadikan solusi untuk menekan lonjakan suhu yang ekstrim dari reaksi nuklir fusi, maka penggunaan cryogenic dapat menjadi solusi untuk mengendalikan suhu agar tidak melewati batas dari ketahanan logam reaktor. Cryogenic adalah metode pendinginan ekstrim yang berada pada suhu dibawah 0°C hingga pada titik nol mutlak (273,15°C/0°K). Pada suhu titik nol mutlak semua partikel akan membeku, dimana kondisi ini diproyeksi dapat digunakan sebagai kondisi pengamanan reaksi termonuklir fusi dengan menghentikan proses fusi partikelnya.

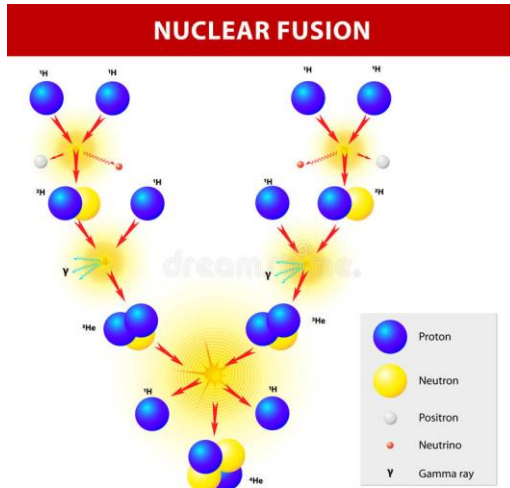
Reaktor fusi tokamak sangat menjanjikan energi yang besar namun belum dapat terwujud menjadi sumber utama tenaga listrik dikarenakan masalah pada pengendalian suhu reaksi nuklir fusi itu sendiri. Banyak pengembangan tokamak dengan skala besar dalam upaya menghasilkan energi namun masih dalam tahap pengembangan dan belum menjadi sebuah model yang dapat dijadikan sebagai sumber energi dari peralatan yang dapat bermanfaat dan menunjang kehidupan manusia.

Berdasarkan latar belakang di atas maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian tentang pengembangan tokamak sebagai sumber energi dan pembangkit listrik dengan judul "Desain Konsep Reaktor Termonuklir Fusi Tokamak *Sizeable* Sebagai

Sumber Daya Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Dengan Pengamanan Cryogenic”.

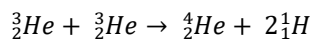
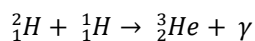
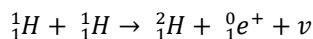
2. LANDASAN TEORI

2.1 Fusi Nuklir



Gambar 1. Reaksi Nuklir Fusi (dreamstime.com)

Fusi nuklir ialah penyatuan dua nuklida ringan menjadi satu nuklida yang lebih berat dengan melepaskan energi. Proses fusi sering disebut reaksi termonuklir, sebab reaksi ini memerlukan partikel berenergi kinetik yang sangat tinggi sewaktu berbenturan, yang berhubungan dengan suhu yang sangat tinggi, sebelum reaksinya dapat dimulai. Proses seperti ini terjadi dimatahari dan di bintang lainnya. Pada tahun 1939 Hans Bethe (dan secara sendiri-sendiri, Carl von Weizsacker) mengusulkan bahwa pada bintang normal (urutan utama) terjadi reaksi berikut :



Dalam reaksi pertama, dua proton dengan kecepatan tinggi berfusi membentuk deuterium, dengan memancarkan satu positron dan satu neutrino yang membawa pergi (sebagai energi kinetik) tambahan energi sebesar 0,415 MeV. Pada reaksi kedua, deuterium berenergi tinggi bergabung dengan proton berkecepatan tinggi membentuk inti helium dengan massa 3 dan meregenerasi dua proton. Ketiga reaksi tersebut bersifat eksotermik, tetapi diperlukan sampai 1,25 MeV untuk mengatasi hambatan berupa tolakan inti-inti yang bermuatan positif. Hasil keseluruhan dari siklus ini ialah konversi inti hidrogen menjadi inti helium, dan prosesnya dinamakan pembakaran hidrogen.

2.2 The Synchrotron-A Proposed High Energy Particle Accelerator (Edwin M. McMillan, 1945)

(McMillan, 1945)Salah satu metode tersukses untuk mempercepat energi partikel menjadi energi yang sangat tinggi mempunyai aplikasi berulang dari sebuah osilasi medan listrik, seperti yang terdapat pada *cyclotron*. Jika angka yang sangat banyak dari sebuah akselerator dibutuhkan, maka akan banyak kesulitan dalam mempertahankan partikel pada dalam tahap dengan selaras medan listrik. Pada *cyclotron*, kesulitan ini muncul saat masa relatif berubah menyebabkan sebuah variasi pada kecepatan angular dari partikel.

Untuk mempercepat partikel diperlukan mengubah nilai dari kesetimbangan energi, dimana dapat diselesaikan dengan membedakan/membandingkan medan magnet atau frekuensinya. Saat energi kesetimbangan berubah, tahap dari gerakan partikel bertambah untuk menyediakan keperluan dalam akselerasi partikel.

Persamaan yang mendeskripsikan fase dan variasi energi telah diperoleh dengan mengambil variasi waktu dari medan magnet dan frekuensi, akselerasi menggunakan “*betatron effect*” (perubahan nilai dari flux), variasi terakhir radius orbit dalam osilasi dan rugi-rugi energi dari ionisasi atau radiasi.

$$E_0 = \frac{(300cH)}{(2\pi f)},$$

$$E = E_0 \left[1 - \frac{(d\phi)}{(d\theta)} \right],$$

$$2\pi \frac{d}{d\theta} \left(E_0 \frac{d\phi}{d\theta} \right) + V \sin\phi = \left[\frac{1}{f} \frac{dE_0}{dt} - \frac{300}{c} \frac{dF_0}{dt} + L \right] + \left[\frac{E_0}{f^2} \frac{df}{dt} \right] \frac{d\phi}{d\theta}$$

$$R = \frac{(E^1 - E_r^2)^{\frac{1}{2}}}{300H}$$

Penjelasan :

- E - energi total dari partikel (energi kinetik ditambah sisa energi),
- E_0 - nilai kesetimbangan dari E ,
- E_r - sisa energi,
- V - energi yang didapat /putaran dari medan listrik, pada tahap paling menguntungkan untuk akselerasi,
- L - energi yang hilang /putaran dari ionisasi dan radiasi,
- H - medan magnet pada lintasan,
- F_0 - flux magnet yang melalui lintasan yang setimbang,
- ϕ - Fasa dari partikel
- θ - pemindahan angular dari partikel,
- f - frekuensi dari medan listrik,
- c - kecepatan cahaya,
- R - radius dari lintasan.

(Energi dalam elektron volt, kuantitas magnet dalam e.m.u., sudut dalam radian, kuantitas lainnya dalam satuan c.g.s.)

2.3 The Energy Source: Nuclear Fusion Reactors (Harold P. Furth, 1985)

Nuklir fusi adalah energi yang dihasilkan oleh reaksi nuklir antara atom ringan pada temperatur jutaan derajat. Proses ini disebut termonuklir fusi karena tingginya temperatur dihasilkan oleh penggabungan nuclei ringan untuk menghasilkan nuclei yang lebih berat. Contohnya, 4 atom hidrogen (nomor atom 1) dapat direaksikan untuk memproduksi 1 atom helium (nomor atom 2). Pada proses nuklir fusi, berat dari atom-atom ringan yang dibutuhkan lebih banyak daripada berat dari atom berat yang dihasilkan. Perbedaan massa adalah energi yang terkonversi.

- **Hidrogen sebagai bahan bakar nuklir fusi**

Hidrogen adalah elemen yang unik diantara elemen lain karena isotopnya (atom dengan nomor dan susunan kimia yang identik dengan massa atom yang berbeda) semua punya nama yang berbeda. Nama hidrogen diaplikasikan pada elemen isotop yang ditemukan pada alam. Hidrogen dengan massa atom 1 memiliki nama protium. Hidrogen dengan massa atom 2 disebut deuterium (biasa juga disebut 'hidrogen berat'). Hidrogen dengan massa atom 3 disebut tritium. Hidrogen yang berada di bumi terdiri dari 99,985% protium (hidrogen dengan massa atom 1) dan 0,015% deuterium (hidrogen dengan massa atom 2). Tritium tidak stabil (radioaktif) dan hanya muncul pada kuantitas yang hampir tidak terdeteksi sebagai hasil dari interaksi kosmik antara atom-atom dan material lain. Reaksi dari isotop berat dari hidrogen yang berguna untuk produksi energi dapat dilihat pada tabel.

- **Proses reaksi nuklir fusi**

Kebanyakan penelitian sekarang adalah mempelajari kegunaan dan mengendalikan reaksi D + T karena memerlukan energi panas terendah (temperatur) dan menghasilkan rasio energi kembali yang sangat besar. Kekurangan dari reaksi ini berdasarkan pada produksi dari neutron-neutron yang mengakibatkan induksi radioaktifitas pada struktur/bangunan pada reaktor. Banyak reaksi yang rumit lainnya bisa saja digunakan pada masa depan dimana pemahaman yang lebih baik dan pengendalian dari reaksi fusi yang telah ada.

Hidrogen pada air adalah 0.015% deuterium, atau 318 g.t-1. Pada awalnya sekilas ini tampak seperti nilai yang rendah, tetapi hasil dari energi yang dihasilkan kembali sangatlah besar, energi yang besar dihasilkan diproduksi dari tiap gram deuterium. Bila dipertimbangkan dengan menganggap jumlah dari air yang ada di bumi, ini cukup untuk menyediakan energi untuk jutaan tahun. Bahkan, ini dapat dengan biaya murah memisahkannya dengan air. Bahan bakar lainnya, tritium, adalah isotop dari pancaran radioaktif elektron dari hidrogen dengan waktu paruh 12 tahun.

Tritium siap untuk diproduksi dengan membombardir/membom lithium dengan neutron.

Tabel 1. Reaksi Nuklir Fusi

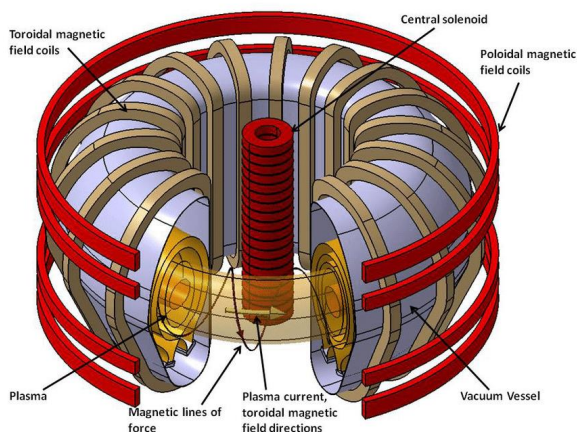
<i>Reaction</i>	<i>Yield (keV)</i>	<i>Ignition energy (keV)</i>	<i>Ratio</i>
D+T → He(4)+n	17600	10	1760
D+T → He(3)+n	3300	50	66
D+D → T+p	4000	50	80
D+ He(3) → He(4)+p	18300	100	183
P+B → 3He(4)	8700	300	29

D, Deuterium; T, Tritium; He(3) isotop Helium, massa 3; He(4) isotop Helium, massa 4; p, proton; n, neutron; B, isotop boron, massa 11. Energi pembakaran per partikel adalah setimbang dengan temperatur. Rasio adalah energi yang diproduksi per partikel dibagi dengan energi yang digunakan pada awal mula reaksi.

Persyaratan untuk reaktor fusi yang sukses adalah produksi dari keadaan yang cocok untuk reaksi D + T untuk mendapatkan rasio yang cukup tinggi untuk menyusun energi yang dibutuhkan untuk memulai dan mempertahankan reaksi dan menyediakan jaringan keluaran untuk digunakan sebagai tenaga keluaran. Untuk menghasilkan reaksi fusi, nuclei dari atom-atom harus dipaksa untuk bertabrakan dengan energi yang cukup/dibutuhkan untuk reaksi. Ini memerlukan temperatur jutaan derajat. Pasti ada reaksi yang cukup pada sebuah volume untuk membentuk panas yang hilang dan menghasilkan lebihnya untuk digunakan. Reaksi harus berlangsung cukup lama untuk mempertahankan diri.

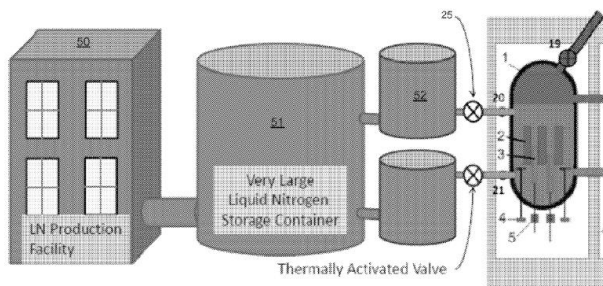
2.4 Referensi Model Reaktor Fusi Tokamak

Tokamak adalah sistem kurungan toroidal/tertutup berbentuk donat. Alat ini digunakan untuk mengurung medan yang merupakan gabungan dari medan toroidal yang kuat. Medan toroidal dihasilkan oleh lilitan yang mengelilingi bidang/badan kurungan, medan poloidal juga dihasilkan oleh arus listrik kuat yang diarahkan secara toroidal dengan cara induksi untuk mengalirkan plasma. Pola garis bidang yang dihasilkan dari super-posisi dari medan toroidal dan poloidal adalah spiral.



Gambar 2. Rancangan Dasar Tokamak (researchgate.net)

2.5 Cryogenic Sebagai Pengamanan dan Pendingin Pada Tokamak



Gambar 3. Skema Sistem Pengaman *Cryogenic* Untuk Reaktor Nuklir Fisi

Cryogenic sebagai pengamanan system reaktor nuklir fusi dapat menjadi solusi karena hasil dari reaksi nuklir fusi yang terjadi dapat setara dengan inti matahari ($15.000.000^{\circ}\text{C}$). Dengan suhu *Cryogenic* yang merupakan Teknik pembekuan dengan suhu ekstrim, bisa mencapai pada suhu nol mutlak dibawah $273,15^{\circ}\text{C}$. Dengan menerapkan *cryogenic* pada tokamak, maka suhu tinggi yang dihasilkan dari reaksi nuklir fusi yang sangat tinggi akan dapat di kendalikan agar tidak menjadi reaksi berantai nuklir fusi.

3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi perhitungan dilakukan menggunakan *software* Matlab dan perancangan konsep desain/ide dengan menggunakan *software* desain grafis 3D Autodesk 3DS Max.

3.1 Parameter Penelitian

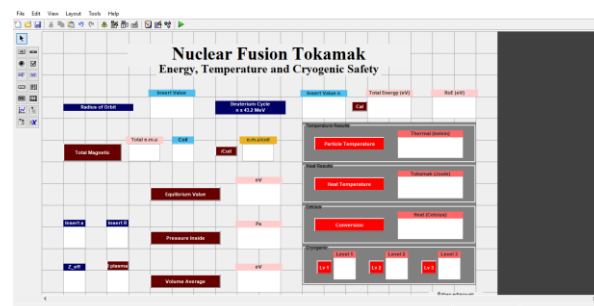
Tokamak akan dirancang untuk menghasilkan energi panas yang memiliki suhu diatas 500°C . Bahan tokamak yang digunakan adalah Tungsten (Wolframium-74) yang memiliki nilai titik didih 5555°C dan titik leleh 3422°C yang merupakan salah satu material paling kuat didunia. Parameter merupakan suatu nilai yang ingin dicapai pada proses pembuatan,

baik dalam berupa simulasi maupun pengukuran secara langsung. Adapun nilai-nilai parameter tokamak untuk pembangkit listrik tenaga nuklir adalah **suhu yang dihasilkan $>500^{\circ}\text{C}$.**

Sebelum mendesain tokamak maka perlu dilakukan perhitungan ukuran-ukuran dalam membentuk tokamak. Perhitungan dilakukan berdasarkan cara perhitungan penelitian terdahulu. Perhitungan ini masih bersifat teoritis, dengan menggunakan perhitungan-perhitungan dari jurnal yang ada maka ukuran-ukuran dalam mendesain tokamak dapat diperoleh. Setelah mengukur dan menentukan dimensi dari tokamak, hasil dari perhitungan akan dijadikan dasar desain tokamak pada *software* desain autodesk 3DS Max. Desain bersifat 3D sebagai contoh dari hasil dimensi perkiraan tokamak. Sementara perhitungan energi nuklir yang dihasilkan maupun tahap konversi energi dilakukan pada matlab. Hasil desain pada autodesk 3DS Max merupakan demo tampilan prototipe dan konsep sebagai sebuah alat reaktor nuklir fusi.

3.6 Perhitungan Dimensi Tokamak Dengan GUI (Graphical User Interfaces) Matlab

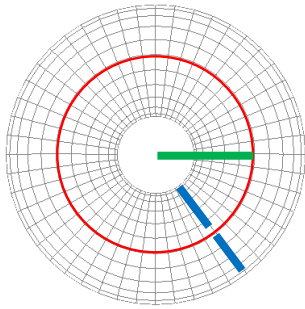
Sebagai alat bantu dalam menghitung dimensi dari tokamak maka perhitungan dilakukan dengan memanfaatkan GUI matlab.



Gambar 4. Screenshot Perancangan GUI Perhitungan Tokamak Menggunakan Matlab

3.7 Merancang Desain Tokamak Pada Autodesk 3DS Max

Parameter awal yang di gunakan untuk memulai desain tokamak adalah panjang lintasan partikel atau radius orbit partikel yang di representasikan sebagai keliling lingkaran. Pada penelitian ini nilai yang di pakai adalah **10 meter**.



Gambar 5. Skema Penentuan Panjang Lintasan

Setelah menetapkan panjang lintasan partikel, maka langkah selanjutnya adalah menentukan lebar bidang dalam tokamak. Dengan keliling **10 meter** (di tandai oleh warna merah) maka jari-jari yang di dapat adalah $\pm 1,6$ meter (di tandai oleh warna hijau). Dimana berarti jarak dari lintasan ketengah adalah 1,6 meter. Dari lintasan di ambil 50 cm ke kanan dan kiri untuk mendapatkan lebar dari tokamak (di tandai oleh warna biru). Hasil dari konsep tokamak secara 3D adalah sebagai berikut.

Langkah selanjutnya untuk melengkapi tokamak adalah memasang koil pada bidang berbentuk torus.

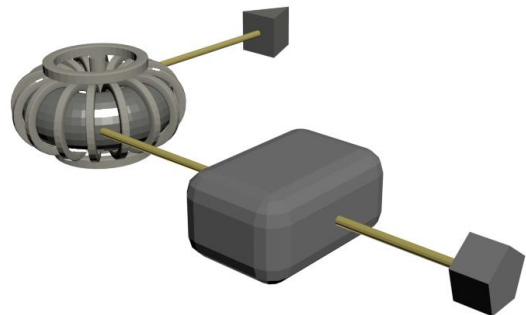


Gambar 6. Skema Torus Dengan Koil Telah Terpasang

Selanjutnya membuat *injector* deuterium untuk tokamak yang di representasikan sebagai *black box*. Diasumsikan kriteria dan cara kerja *injector* sudah

sesuai dan bisa digunakan sehingga tidak perlu di bahas secara spesifik.

Begitu juga dengan pembuatan *boiler* hingga turbin uap yang di tampilkan dalam bentuk *black box* karena karakteristik dalam spesifikasi *boiler* dan turbin uap mengikuti spesifikasi alat yang sudah sehingga di penelitian ini tidak ada bahasan lanjut tentang *boiler* dan turbin uap yang digunakan untuk mengkonversi panas menjadi energi listrik.



Gambar 7. Skema Tokamak Lengkap Dengan *Injector*, *Boiler* dan Turbin Uap

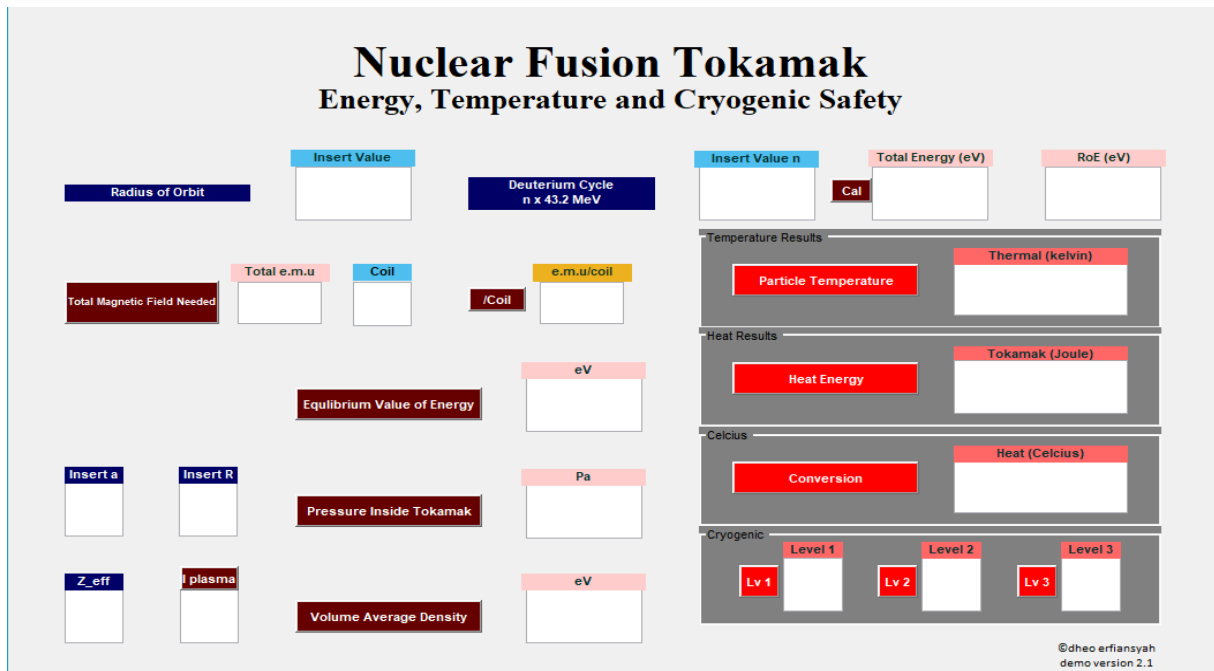
Komponen-komponen yang merupakan *default* atau tidak dijelaskan secara rinci dapat dilihat pada lampiran 2.

Tahap terakhir dari konsep desain tokamak ini adalah pemasangan *cryogenic* sebagai system pengaman dan pendingin pada tokamak. Sistem *cryogenic* akan memiliki 3 lapisan/tahapan keamanan, ditiap levelnya akan berbeda jenis kerja dan pengamanannya.

4. HASIL PENELITIAN

4.1 Perhitungan Dimensi Menggunakan GUI Matlab

Sebagai alat bantu dalam menghitung dimensi dari tokamak maka perhitungan dilakukan dengan memanfaatkan GUI matlab.



Gambar 8. Screenshot Perancangan GUI Perhitungan Tokamak Menggunakan Matlab

Berdasarkan perhitungan yang telah diperoleh dari hasil simulasi GUI Matlab diatas didapatkan hasil perhitungan suatu ukuran tokamak dengan dimensi pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Dimensi Reaktor Fusi Tokamak

Variabel	Nilai
Radius Lintasan Partikel	10 M
Total Energi Siklus Fusi Deuterium	$4,32 \times 10^8$ eV
Sisa Energi Siklus Fusi Deuterium	$4,104 \times 10^8$ eV
Medan Magnet Lintasan	1,54919 e. m. u
Energi Keseimbangan	$4,433325 \times 10^8$ eV
Tekanan Didalam Tokamak	0,393546 Pa
Kepadatan Volume Rata-Rata	0,124466 KeV
Temperatur dari Reaksi Fusi	$2,95698 \times 10^6$ °K

Data yang dihasilkan dari nilai $n = 10$ saat mereaksikan nuklir fusi menggunakan siklus deuterium menunjukkan banyak jumlah energi yang dihasilkan adalah $4,433325 \times 10^8$ eV atau $2,95698 \times 10^6$ °K.

4.2 Hasil Konsep Desain Tokamak Sizeable

Hasil dari perancangan desain yang di lakukan dengan menggunakan Autodesk 3DS Max adalah konsep desain tokamak yang sudah dilengkapi dengan.

- *injector* deuterium sebagai alat untuk memasukkan bahan bakar reaksi nuklir fusi isotop dari hidrogen (^1H) yaitu deuterium (^2H).
- *Boiler* dan turbin uap sebagai alat komponen untuk menghasilkan listrik, dengan cara konversi energi panas melalui *boiler* lalu uap yang dihasilkan oleh *boiler* akan menggerakkan turbin uap sehingga menghasilkan listrik.
- *Cryogenic* sebagai pengamanan dan pendingin pada tokamak apabila terjadi reaksi nuklir fusi yang diluar batas atau tidak terkendali sehingga menghasilkan energi yang besar. Pemanganan tokamak dibagi menjadi 3 level keamanan.

4.3 Konversi Energi Panas

Setelah mendapatkan dimensi dari tokamak dan hasil-hasil parameter sebagai sumber energi untuk memanaskan boiler, maka tahap selanjutnya adalah memanaskan air pada boiler untuk menghasilkan uap sebagai penggerak generator atau turbin sebagai penghasil tenaga listrik AC. Suhu yang dibutuhkan untuk memanaskan boiler adalah berkisar 500-600° C untuk membangkitkan daya diatas 500 MW (tergantung jenis dari boiler yang digunakan).

Dengan menggunakan referensi $n(\text{jumlah siklus deuterium}) = 40$. Hasil dari konversi energi panas berawal dengan hasil reaksi termonuklir fusi yaitu :

- *Nilai Equilibrium* = $8,86652 \times 10^8$ eV
- *Suhu Hasil Reaksi Nuklir Fusi* = $5,91397 \times 10^6$ °K

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Tokamak yang dirancang dengan nilai dimensi radius lintasan = 10 M, jari-jari tokamak pada lintasan = 1,6 M, jari-jari pada bagian dalam tokamak = 1,1 dan jari-jari pada bagian luar tokamak = 2,1 M. Tokamak tanpa penambahan energi pada reaksi fusi sudah mencapai spesifikasi parameter yang diinginkan. Dengan energi > 200 MeV dan suhu >500°C.
2. Hasil dari energi dan suhu yang dihasilkan sebagai sumber pemanasan boiler pada penelitian ini belum termasuk dari interferensi dari pengamanan *cryogenic* yang diasumsikan akan diterapkan pada tokamak ini sebagai alat pengamanan reaksi nuklir fusi.

Hasil keluaran berupa listrik belum bisa ditentukan pada hasil penelitian sementara ini, dikarenakan hasil energi dan suhu yang dibutuhkan sebagai pemanas boiler belum mencapai karakteristik. Hasil keluaran listrik akan dapat dihasilkan sesuai dengan spesifikasi dari boiler/steam generator yang telah ditentukan. Contoh : PLTU Paiton, Jawa Timur menghasilkan 600 MW dari suhu 500-600°C. Jadi untuk menghasilkan listrik melalui pembangkitan tenaga uap parameter utama adalah suhu. Hasil penelitian bertujuan menghasilkan suhu yang sesuai dengan jangka waktu yang lama dengan memanfaatkan tenaga nuklir fusi.

Saran

Untuk penelitian lanjutan sebaiknya dilakukan kalkulasi dan desain dengan melibatkan bidang ilmu lain agar hasil yang didapatkan dapat lebih tepat dan absolut. Agar mendapatkan hasil yang lebih detail, maka semua aspek yang berhubungan dengan tokamak beserta perangkat pendukungnya lebih baik diteliti lebih mendalam sebagai acuan penelitian lanjutan. Bila memungkinkan maka akan lebih baik jika memasukkan reaksi fusi dingin sebagai salah satu kemungkinan penelitian untuk reaktor nuklir fusi tokamak. Sebagai pengembangan dan perluasan keilmuan pada bidang nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

BATAN. (n.d.). *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)*.

Bouzat, N., Bressan, C., Grandgirard, V., Latu, G., & Mehrenberger, M. (2017). *Targeting realistic geometry in Tokamak code Gysela*. 1–29. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1712.02201>

Furth, H. P. (1994). The energy source: Nuclear fusion reactors. *Applied Energy*, 47(2–3), 147–167. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0306-2619(94)90076-0)

İpek, O. (2010). Analysis of temperature distribution, burn-up and breeding parameters in nuclear fuel

rod in fusion-fission reactor system fueled with mixed ThO₂-UO₂ fuel. *International Journal of Energy Research*, Vol. 35, pp. 112–122. <https://doi.org/10.1002/er.1771>

Krane, Kenneth, “Fisika Modern.” United States : John Wiley & Sons, 1992.

Lin-Hendel, C. (2012). *Emergency And Back-up Cooling Of Nuclear Fuel And Reactors*. 1(19). <https://doi.org/10.1037/t24245-000>

Liu, K. F., & Chao, A. W. (2017). Accelerator based fusion reactor. *Nuclear Fusion*, 57(8), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7642>

McMillan, E. M. (1945). The synchrotron—a proposed high energy particle accelerator. *Physical Review*, 68(5–6), 143–144. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.68.143>

Nova Science Publishers, I. (n.d.). *NUCLEAR REACTORS, NUCLEAR FUSION AND FUSION ENGINEERING*.

Oxtoby, David W., “Prinsip-Prinsip Kimia Modern edisi empat.” United States : Harcourt, 1999.

Shi, Y. (n.d.). *Alternating Current Adiabatic Compression Tokamak : A New Way to Fusion Reactor*. 1–8.

Tokamak. Wikipedia. 15 Maret 2018. Web. 20 Maret 2018. <https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>

Tokamak. ITER. 2015. Web. 20 Maret 2018. <https://www.iter.org/mach/Tokamak> Web. 15

Y. J. Shi. 2018. Alternating Current Adiabatic Compression Tokamak: A New Way to Fusion Reactor. Department of Nuclear Engineering, Seoul National University.