

**SIMULASI EFEK DENSITAS (ρ) PADA PLASMA
DI DALAM TOKAMAK MELALUI PERSAMAAN
MAGNETOHIDRODINAMIKA MENGGUNAKAN
KODE BOUT++**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian
persyaratan mencapai derajat S-1
Program Studi Fisika

Diajukan oleh:

Koddam Rukadi Lubis

16620029

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2020

**SIMULASI EFEK DENSITAS (ρ) PADA PLASMA DI DALAM TOKAMAK MELALUI
PERSAMAAN MAGNETOHIDRODINAMIKA MENGGUNAKAN KODE BOUT++**

Koddam Rukadi Lubis
16620029

INTI SARI

Densitas plasma di tokamak dapat disimulasikan menggunakan kode BOUT++. Penelitian ini menggunakan kode BOUT++ untuk menganalisis distribusi densitas pada plasma di dalam tokamak. Dengan menggunakan kode BOUT++, persamaan fisika yang diselesaikan disediakan di satu tempat dan dapat dengan mudah diubah hanya dengan sedikit pengetahuan tentang cara kerja kode. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh densitas pada plasma di dalam tokamak melalui persamaan magnetohidrodinamika (MHD). MHD adalah peristiwa pergerakan gelombang dan plasma dalam medan magnet. Analisis hasil dalam penelitian ini dilakukan melalui *software* Matlab 2017b. Hasil penelitian menunjukkan bahwa densitas berubah dari waktu ke waktu dan selalu mengarah pada kondisi stabil. Efek dari distribusi variasi densitas plasma di tokamak adalah pada saat $t = 30 \mu s$ menghasilkan energi yang kuat. Pada saat $t = 40 \mu s$ dan $t = 50 \mu s$ menghasilkan energi yang lemah.

Kata kunci: densitas plasma, kode BOUT++, tokamak, MHD.



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

**SIMULATION OF DENSITY (ρ) EFFECTS ON PLASMA IN THE TOKAMAK
THROUGH THE MAGNETOHYDRODYNAMICS EQUATION USING BOUT++ CODE**

Koddam Rukadi Lubis
16620029

ABSTRACT

The density of plasma in the tokamak can be simulated using BOUT++ code. This study uses the BOUT++ code to analyze the distribution of density on plasma in the tokamak. By using the BOUT++ code, the physics equations that are solved provided in one place and can be easily changed with only minimal knowledge of how the code works. This study aims to determine the effects of density on plasma in the tokamak according to the magnetohydrodynamics (MHD) equation. MHD is the sending or movement of waves and plasma in a magnetic field. The analysis of the results in this study is provided by the software 2017b Matlab. The results show that the density changed from time to time and always lead to steady conditions. The effect of the distribution of plasma density variations in the tokamak is that when $t = 30 \mu\text{s}$ produces strong energy. When $t = 40 \mu\text{s}$ and $t = 50 \mu\text{s}$ it produces weak energy.

Key words: plasma density, BOUT++ code, tokamak, MHD.



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Koddam Rukadi Lubis

NIM : 16620029

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Simulasi Efek Densitas (ρ) Pada Plasma di Dalam Tokamak Melalui Persamaan Magnetohidrodinamika Menggunakan Kode Bout++” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 01 Desember 2020
Penulis



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Koddam Rukadi Lubis
16620029



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
Yogyakarta di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : KODDAM RUKADI LUBIS

NIM : 16620029

Judul Skripsi : SIMULASI EFEK DENSITAS (ρ) PADA PLASMA DI
DALAM TOKAMAK MELALUI PERSAMAAN
MAGNETOHIDRODINAMIKA MENGGUNAKAN
KODE BOUT++

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.
Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 01 Desember 2020

Pembimbing

Cecilia Yanuarief, M.Si.

NIP. 19840127 201503 1 001



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-05/Un.02/DST/PP.00.9/01/2021

Tugas Akhir dengan judul : SIMULASI EFEK DENSITAS PADA PLASMA DI DALAM TOKAMAK MELALUI
PERSAMAAN MAGNETOHIDRODINAMIKA MENGGUNAKAN KODE BOUT++

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : KODDAM RUKADI LUBIS
Nomor Induk Mahasiswa : 16620029
Telah diujikan pada : Rabu, 23 Desember 2020
Nilai ujian Tugas Akhir : A-

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Cecilia Yanuarief, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 5fe2b23eed6c3



Penguji I

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

Valid ID: 5f104b339a1be



Penguji II

Anis Yuniati, S.Si., M.St., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 5ff04914ee84f



Yogyakarta, 23 Desember 2020
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

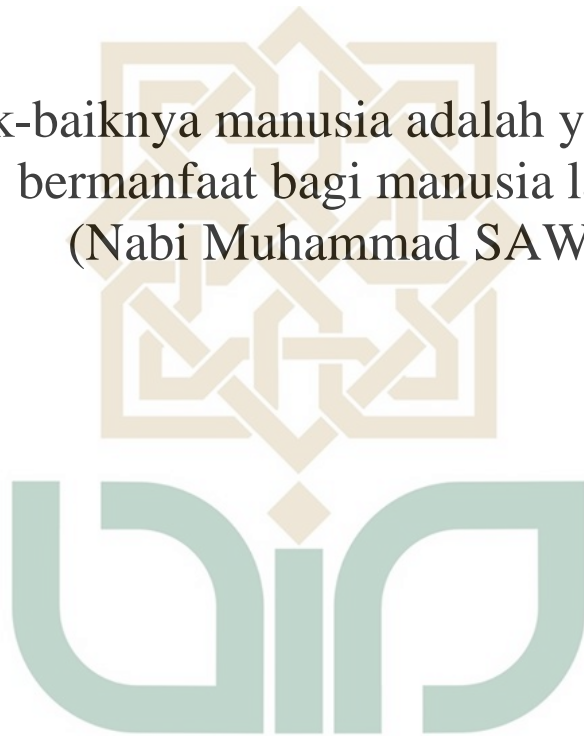
Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 5f128e04483e

HALAMAN MOTTO

*I am not perfect never ever but I can do
something!*
(Penulis)

Sebaik-baiknya manusia adalah yang paling
bermanfaat bagi manusia lain.
(Nabi Muhammad SAW)



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini penulis persembahkan untuk orang tua, keluarga, sahabat dan semua pihak yang telah bertanya “kapan sempro?” “kapan munaqasah?” “kapan wisuda?” dan lain sejenisnya, kalian adalah alasan peneliti segera menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas akhir ini jadi saksi keproduktifan peneliti di masa pandemi covid-19.



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis berupa kesehatan, kesempatan, kekuatan dan kesabaran yang tidak terhingga sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir judul **“SIMULASI EFEK DENSITAS (ρ) PADA PLASMA DI DALAM TOKAMAK MELALUI PERSAMAAN MAGNETOHIDRODINAMIKA MENGGUNAKAN KODE BOUT++”**. Shalawat serta salam tak lupa selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, semoga kita mendapatkan syafaatnya di *yaumulqiyamah* aamiin.

Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana strata satu (S-1) Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. Penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Ayah, Ibu, Nenek dan saudara/iku yang telah memberikan semangat, perhatian dan kasih sayang serta doa yang tiada henti kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, S.Ag., M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
4. Bapak Cecilia Yanuarif, M.Si. selaku Dosen Pembimbing tugas akhir serta Dosen Pembimbing Akademik Mahasiswa Fisika Angkatan 2016.
5. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Fisika.

6. Seluruh Dosen Fisika beserta jajarannya yang telah memberikan ilmu untuk bekal melakukan tugas akhir.
7. Alm. Bapak Bambang Subyandono dan keluarga, Mas Tri dan Mba Reni, Mba Wal, Pak man beserta keluarga yang penulis sayangi.
8. Assit. Prof. Dr. Boonyarit Chatthong selaku Dosen Pembimbing selama masa studi di *Prince of Songkla University*.
9. Muhammad Rafiuddin yang telah mensponsori laptopnya beserta Wi-Fi kosnya untuk membantu penulisan tugas akhir penulis.
10. Seluruh teman-teman Sirarom Mansion (*Student Exchange*) dan Mahasiswa Indonesia di *Prince of Songkla University* Hat Yai Thailand serta teman-teman Thailand.
11. Sahabat-sahabat Bogeng Fisika 2016 dan BNK KKN Tematik Minyak Atsiri angkatan 99 yang penulis sayangi.
12. Semua pihak yang telah membantu dan tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penulisan tugas akhir ini banyak kekurangan, oleh sebab itu kritik dan saran penulis harapkan demi perbaikan selanjutnya. Akhir kata penulis berharap supaya laporan tugas akhir ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak dan dapat menjadi sumber referensi yang representatif, dijadikan sebagai acuan dalam melakukan kajian penelitian selanjutnya.

Yogyakarta, 27 Desember 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
INTI SARI.....	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
HALAMAN MOTTO.....	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	6
1.3. Tujuan Penelitian.....	6
1.4. Batasan Penelitian.....	6
1.5. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1. Studi Pustaka.....	9
2.2. Landasan Teori.....	16

2.2.1.	Densitas	16
2.2.2.	Magnetohidrodinamika (MHD).....	16
2.2.3.	Tokamak	20
2.2.4.	Plasma dan reaksi nuklir fusi.....	28
2.2.5.	BOUT++.....	33
2.2.6.	ITER	36
2.2.7.	Wawasan al-Qur'an tentang manfaat matahari	43
BAB III METODE PENELITIAN.....		45
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	45
3.2.	Alat Penelitian	45
3.1.	Prosedur Penelitian	47
3.1.1.	Prosedur simulasi kode BOUT++ untuk menentukan nilai distribusi densitas plasma di dalam tokamak.	47
3.1.2.	Prosedur pembuatan visualisasi grafik dan video melalui <i>software</i> matlab 2017b	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		61
4.1.	Hasil Penelitian.....	61
4.1.1.	Hasil simulasi kode BOUT++ untuk menentukan nilai distribusi densitas plasma di dalam tokamak	61
4.1.2.	Hasil visualisasi grafik dan video perubahan keadaan densitas terhadap waktu pada plasma di dalam tokamak dengan menggunakan kode BOUT++ melalui matlab.....	62
4.2.	Pembahasan	65

4.2.1.	Pembahasan hasil analisis kode BOUT++ untuk simulasi densitas plasma di dalam tokamak	65
4.2.2.	Pembahasan hasil visualisasi grafik dan video perubahan keadaan densitas terhadap waktu pada plasma di dalam tokamak dengan menggunakan kode BOUT++ melalui matlab.....	67
4.2.3.	Integrasi interkoneksi	71
BAB V KESIMPULAN.....		73
5.1.	Kesimpulan.....	73
5.2.	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA		75
LAMPIRAN.....		77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. BOUT++	35
Tabel 2.2. Garis waktu penelitian ITER	41
Tabel 3.1. Waktu penelitian.	45
Tabel 3.2. Daftar <i>hardware</i>	46
Tabel 3.3. Daftar <i>software</i>	46



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema medan magnetik pada z-pinch, θ -pinch, dan tokamak (Goedbloed dan Poedts, 2010).....	21
Gambar 2.2. Tokamak (ITER, 2020).	22
Gambar 2.3. Medan magnet (ITER, 2020).	24
Gambar 2.4. Plasma (CCFE, 2020).....	25
Gambar 2.5. Arus plasma (CCFE, 2020).	26
Gambar 2.6. Pemanas plasma (CCFE, 2020).....	27
Gambar 2.7. Knalpot plasma (CCFE, 2020).....	28
Gambar 2.9. Proses terjadinya fusi.	31
Gambar 3.1. Unduh <i>TeamViewer</i>	47
Gambar 3.2. Persiapan instalasi <i>TeamViewer</i>	48
Gambar 3.3. Proses instalasi <i>TeamViewer</i>	48
Gambar 3.4. Finishing instalasi <i>TeamViewer</i>	49
Gambar 3.5. Menu utama <i>TeamViewer</i>	49
Gambar 3.6. Tampilan utama matlab 2017b.....	50
Gambar 3.7. Diagram alir prosedur pengambilan data melalui kode BOUT++.....	53
Gambar 3.8. Diagram alir pembuatan grafik dan video melalui matlab 2017b.....	57
Gambar 3.9. Ilustrasi hasil simulasi grafik.	58
Gambar 4.1. Hasil simulasi pada kode BOUT++.....	59
Gambar 4.2. Visualisasi grafik distribusi variasi densitas terhadap posisi (a) pada saat $t=30 \mu\text{s}$, (b) pada saat $t=40 \mu\text{s}$ dan (c) pada saat $t=50 \mu\text{s}$	61

Gambar 4.3. Visualisasi video distribusi variasi densitas terhadap posisi (a) pada saat $t=30 \mu\text{s}$, (b) pada saat $t=40 \mu\text{s}$ dan (c) pada saat $t=50 \mu\text{s}$63



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kode matlab untuk menampilkan grafik	76
Lampiran 2 Kode matlab untuk menampilkan video	78
Lampiran 3 <i>Curriculum Vitae</i>	80



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Di langit ada matahari bersinar menyinari bumi, cahayanya yang tajam, menembus kegelapan, menerangi seluruh alam (Ria, 1994). Kalimat tersebut merupakan lirik lagu Qasidah dengan judul Nabi Muhammad Matahari Dunia yang dinyanyikan oleh Nasida Ria. Mendengar kata “matahari” pada lirik lagu tersebut bukan merupakan hal yang asing. Ketika mendengar kata matahari kata yang otomatis muncul dipikiran ialah kata “panas”. Matahari yang panas ini merupakan sumber kehidupan bagi seluruh makhluk hidup di muka bumi. Bagaimana tidak matahari berfungsi sebagai penghangat bumi yang selalu bersinar dari pagi hingga sore hari dan sebagai sumber energi terbesar yang memungkinkan bumi dapat layak untuk dihuni.

Senada dengan lirik lagu tersebut, dalam al-Qur’an surat Yunus ayat 5 yang berbunyi:

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسُ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ
وَالْحِسَابَ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ ﴿٥﴾

Artinya: Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya, dan Dialah yang menetapkan tempat-tempat orbitnya, agar kamu mengetahui bilangan tahun, dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu melainkan dengan benar. Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui (Departemen Agama RI, 2007).

Tafsir Quraish Shihab pada al-Qur’an surat Yunus ayat 5 mengartikan bahwa ayat ini merupakan penjelasan tentang sifat Rububiyah Allah SWT serta ilmu dan

hikmah-Nya dalam mencipta, menguasai dan mengatur alam raya. Lebih lanjut, hal ini menjelaskan bahwa jika matahari dan bulan saja diatur Allah SWT maka tentu lebih dan lebih lagi manusia serta seluruh alam raya juga diciptakan-Nya untuk dimanfaatkan manusia. Pada ayat di atas, kata *dhiya'* dipahami oleh ulama masa lalu sebagai cahaya yang sangat terang. Pada ayat ini menggunakan kata *dhiya'* untuk matahari dan menggunakan kata *nur* untuk bulan. Penggunaan kata *dhiya'* untuk matahari membuktikan bahwa cahaya matahari bersumber dari dirinya sendiri, bukan pantulan dari cahaya lain dan cahayanya menghasilkan panas/kehangatan. Penggunaan kata *nur* untuk bulan menjelaskan bahwa cahaya dari bulan tidak terang dan bukan bersumber dari dirinya sendiri melainkan pantulan dari cahaya matahari serta tidak menghasilkan kehangatan. Lebih lanjut, sinar bulan bukan berasal dari dirinya tetapi pantulan dari cahaya matahari. Dengan demikian, ayat ini mengandung isyarat ilmiah yang merupakan salah satu aspek kemukjizatan al-Qur'an (Shihab, 2002).

Berdasarkan uraian di atas, selaras dengan tema yang dibahas oleh peneliti yakni matahari disebut sebagai *dhiya'*. Allah SWT menjadikan matahari sebagai tanda kebesaran-Nya untuk dipelajari oleh hamba-Nya yang haus akan ilmu pengetahuan. Allah SWT ingin menunjukkan kepada hamba-Nya bahwa sinar yang dipancarkan matahari bukan hanya sebagai penerang bumi, melainkan juga memiliki panas yang mana panas ini sangat banyak manfaatnya bagi kehidupan di muka bumi. Sebagai contoh dalam penelitian ini panas dari matahari tersebut ditiru para ilmuwan serta insinyur fisika plasma di dunia saat ini. Penelitian tersebut

digunakan untuk menciptakan energi yang sama dengan matahari sebagai sumber energi terbaru yang menghasilkan energi listrik.

Sumber energi terbesar yang digunakan manusia saat ini ialah berasal dari bahan bakar fosil, fisi nuklir, atau sumber terbarukan seperti tenaga air (Utama dkk., 2014); (Martins dkk., 2019). Bahan bakar ini banyak digunakan sebagai sumber energi sebagai penghasil listrik. Listrik merupakan bentuk energi yang sangat dibutuhkan oleh manusia. Manusia tidak akan bisa lepas dari listrik dikarenakan di rumah, di jalan raya, di sekolah atau universitas, di kantor, di pabrik dan di manapun berada pemanfaatan listrik selalu bisa ditemukan. Faktanya bahwa pada tahun 2050, penduduk bumi meningkat dua kali lebih banyak dibandingkan saat ini yakni meningkat dari tujuh miliar menjadi sembilan miliar. Fakta lainnya yaitu standar hidup manusia yang lebih baik akan menyebabkan peningkatan besar dalam konsumsi energi terutama listrik (Utama dkk., 2014., CCFE, 2020). Penggunaan listrik secara terus menerus akan membuat bahan bakar fosil semakin berkurang dan lama kelamaan akan habis dikarenakan bahan bakar fosil sendiri merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui (Martins dkk., 2019). Maka dari itu perlombaan untuk menemukan sumber listrik baru yang berkelanjutan untuk populasi yang terus bertambah banyak dilakukan oleh para ilmuwan maupun insinyur di seluruh dunia saat sekarang ini.

Mengingat semakin bertambahnya konsumsi energi manusia tersebut, serta kekhawatiran akan habisnya bahan bakar fosil yang diperkirakan akan habis pada tahun 2050 (Utama dkk., 2014) para ilmuwan atau insinyur plasma fusi nuklir mendapatkan ide untuk membuat matahari mini di bumi (matahari buatan). Hal ini

bukan merupakan pemikiran tanpa dasar, melainkan karena diketahui bahwa energi yang dihasilkan oleh matahari itu sangat besar dan dengan energi dari matahari tersebut dapat memberikan kehidupan bagi seluruh makhluk hidup di bumi. Energi yang dihasilkan oleh matahari dihasilkan dari reaksi fusi dan proses tersebut dapat ditiru serta dapat dimanfaatkan energinya.

Reaksi fusi adalah peristiwa penggabungan inti atom sehingga membentuk inti atom yang lebih berat (Stacey, 2010). Untuk mendapatkan reaksi fusi yang sama seperti di matahari maka dua fisikawan asal Rusia (Andrei Sakharov dan Igor Yevgenyevich Tamm) menawarkan teknik plasma Tokamak (Smirnov, 2010). Teknik plasma tokamak ini merupakan teknik yang dilakukan untuk mengontrol plasma yang panas di dalam tokamak dengan medan magnet yang kuat. Proses penggabungan dua inti atom atau fusi menjadi satu terjadi dengan reaksi penggabungan dua inti atom gas hidrogen yakni deuterium dan tritium. Kedua atom tersebut dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi yaitu mencapai lebih dari 100 juta derajat celcius sehingga membentuk plasma fusi (CCFE, 2020). Gas tersebut kemudian bergabung membentuk inti helium dan neutron, dengan sebagian kecil massa diubah menjadi energi fusi (ITER, 2020).

Bahan bakar untuk pembentukan plasma fusi sangat berlimpah keberadaannya di bumi. Misalnya bahan bakar deuterium dapat diperoleh di air laut yaitu terhitung 1 dari setiap 6700 atom, sedangkan tritium diproduksi dari litium. Cadangan bahan bakar fosil dunia saat ini terus digunakan untuk menyediakan penggunaan listrik di seluruh dunia sampai pada tahun 2050, maka bahan bakar fosil akan habis dalam waktu kurang dari 100 tahun, tetapi hal tersebut berbeda

dengan bahan bakar deuterium dan litium. Litium akan bertahan lebih dari 6000 tahun dalam penggunaannya (Chen dan Von Goeler, 1985).

Banyaknya ketersediaan bahan bakar untuk pembentukan plasma fusi serta keuntungan dari penggunaannya yang dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama, semakin membuat para insinyur atau ilmuwan plasma fusi dunia bersemangat untuk terus meneliti tentang plasma fusi. Hal tersebut juga menginspirasi serta menjadi semangat bagi peneliti untuk berkontribusi dalam penelitian terkait plasma fusi yaitu dengan tema densitas pada plasma, maka dari itu perlu dilakukan penelitian ini.

Penelitian ini merupakan penelitian terbaru dan berfokus pada pensimulasian keadaan densitas pada plasma di dalam tokamak melalui persamaan magnetohidrodinamika. Magnetohidrodinamika (MHD) merupakan ilmu fisika yang dapat digunakan untuk menganalisis pergerakan gelombang dan plasma dalam suatu medan magnet. Teori MHD dapat menggambarkan dinamika aliran kompleks akibat penggabungan persamaan Navier-Stokes dan Maxwell melalui gaya Lorentz dan hukum Ohm (Labovsky and Layton, 2016). Pengaruh magnetohidrodinamika adalah fenomena fisika yang menggambarkan pergerakan fluida yang mengalir di bawah pengaruh medan magnet luar.

Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi menggunakan kode BOUT++. Kode BOUT++ digunakan karena kode ini dapat mengotomatiskan tugas-tugas persamaan fisika plasma fluida dengan lebih mudah dan fleksibel. Hasil dari penelitian ini berupa grafik dan video pergerakan acak densitas plasma yang ditampilkan menggunakan *software* Matlab. Penelitian ini tidak menjabarkan

persamaan densitas pada persamaan magnetohidrodinamika, karena pada saat sekarang ini permasalahan mengenai magnetohidrodinamika masih dalam pembahasan oleh banyak kalangan ilmuwan di seluruh dunia (Suzuki, 2020). Oleh karena itu, pensimulasian densitas pada plasma di dalam tokamak akan disesuaikan dengan karakteristik, morfologi dan sifat-sifat dari densitas pada plasma berdasarkan penelitian saat ini.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana menganalisis kode BOUT++ untuk simulasi densitas plasma di dalam tokamak?
2. Bagaimana tampilan grafik dan video pergerakan acak perubahan keadaan densitas terhadap waktu pada plasma di dalam tokamak dengan menggunakan kode BOUT++ melalui matlab?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis hasil simulasi kode BOUT++ untuk menentukan nilai distribusi densitas plasma di dalam tokamak.
2. Menganalisis visualisasi grafik dan video pergerakan perubahan keadaan densitas terhadap waktu pada plasma di dalam tokamak dengan menggunakan kode BOUT++ melalui matlab.

1.4. Batasan Penelitian

Batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek yang digunakan pada penelitian ini adalah perubahan keadaan densitas pada plasma terhadap waktu.
2. Penelitian ini tidak menjabarkan persamaan densitas pada magnetohidrodinamika, melainkan pengaitan antara persamaan tersebut dengan hasil simulasi.
3. Penelitian ini dilakukan dengan proses pengambilan data menggunakan kode BOUT++ dengan tampilan hasil berupa grafik dan video pergerakan acak perubahan keadaan densitas pada plasma terhadap waktu melalui matlab 2017b.
4. Input nilai jumlah waktu keluaran adalah $t = 30\mu s$, $t = 40\mu s$, $t = 50\mu s$, dengan variabel tetap posisi (Δr) sebesar 100.
5. Observasi distribusi densitas antar plasma di dalam tokamak berada sebelum terjadi reaksi fusi.
6. Data yang digunakan untuk simulasi densitas pada plasma menggunakan kode BOUT++ melalui komputer *server* laboratorium plasma dan fusi *Prince of Songkla University* (PSU) atas nama Boonyarit Chatthong (*simulation-boonyarit*).

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini mencakup sebagai hal berikut:

1. Memberikan pengetahuan tentang cara menggunakan dan menganalisis kode BOUT++ untuk simulasi keadaan densitas pada plasma di dalam tokamak.
2. Memberikan pengetahuan tentang cara menampilkan dan menganalisis visualisasi grafik dan video pergerakan acak perubahan keadaan densitas

terhadap waktu pada plasma di dalam tokamak dengan menggunakan kode BOUT++ yang ditampilkan melalui matlab.

3. Hasil analisis dari penelitian ini akan digunakan sebagai dasar dalam mempelajari pengaruh densitas pada plasma berdasarkan persamaan magnetohidrodinamika di dalam tokamak menggunakan kode BOUT++, juga sebagai solusi terbaru dan membantu proses pengembangan penelitian tentang plasma fusi untuk masa mendatang.



BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab IV, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kode BOUT++ untuk menentukan distribusi nilai densitas plasma di dalam tokamak telah berhasil dianalisis yakni dengan hasil persentase waktu keluaran menunjukkan nilai yang konstan.
2. Efek densitas pada plasma ketika $t = 30 \mu s$ dengan variasi tetap posisi (Δr) sebesar 100 menghasilkan kemungkinan plasma di dalam tokamak untuk melakukan fusi kecil dengan densitas yang tinggi dan menghasilkan energi yang kuat. Pada saat $t = 40 \mu s$ dan $t = 50 \mu s$ menghasilkan kemungkinan plasma di dalam tokamak untuk melakukan fusi tinggi dengan densitas yang rendah dan menghasilkan energi yang lemah.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa kekurangan pada penelitian ini. Oleh karena itu, disarankan melakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Memvariasi nilai posisi (Δr) pada densitas plasma di dalam tokamak.
2. Meneliti efek temperatur, tekanan, medan magnet, serta kecepatan pada plasma di dalam tokamak.

3. Mengunduh aplikasi BOUT++ dengan komputer *server* sendiri untuk memudahkan proses pengambilan data.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. (2016) *Fisika Dasar I*. 1st edn. Bandung.
- Afida, A. N. dan Mustari, M. (2019) 'Matahari Dalam Perspektif Sains Dan Al-Qur'an Sun in Perspectives of Science and Al-Qur'an', *Ijsme*, 02(1), pp. 27–35.
- CCFE (2015) *How fusion works*. Available at: http://www.ccfе.ac.uk/How_fusion_works.aspx (Accessed: 5 September 2020).
- CCFE (2020a) *Advantages of fusion power*. Available at: <https://ccfe.ukaea.uk/fusion-energy/fusion-in-brief/> (Accessed: 5 November 2020).
- CCFE (2020b) *The race is on to find new, sustainable electricity sources for a growing population*. Available at: <https://ccfe.ukaea.uk/fusion-energy/why-we-need-fusion/> (Accessed: 5 November 2020).
- CCFE (2020c) *The tokamak*. Available at: <https://ccfe.ukaea.uk/fusion-energy/the-tokamak/> (Accessed: 5 November 2020).
- Chen, F. F. and Von Goeler, S. E. (1985) *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion Volume 1: Plasma Physics, Second Edition*, *Physics Today*. doi: 10.1063/1.2814568.
- Departemen Agama RI (2007) 'Al-Qur'an dan Terjemahannya Al-Jumanatul'ali'.
- Dudson, B. D. dkk. (2009) 'BOUT ++: A framework for parallel plasma fluid simulations', *Computer Physics Communications*. Elsevier B.V., 180(9), pp. 1467–1480. doi: 10.1016/j.cpc.2009.03.008.
- Dudson dkk., 2017 (2017) *Running BOUT++*. doi: doi.org/10.1016/j.cpc.2009.03.008.
- Freidberg, J. (2014) *Ideal MHD, Ideal MHD*. doi: 10.1017/CBO9780511795046.
- Gibbon, P. (2014) 'Introduction to plasma physics', *CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration 2014, Proceedings*, pp. 51–65. doi: 10.5170/CERN-2016-001.51.
- Goedbloed, J. P. H. and Poedts, S. (2010) *Cambridge Books Online, Choice Reviews Online*. doi: 10.5860/choice.48-1788.
- Halliday, D. (2007) *Fundamental of Physics*. 8th edn.
- ITER (2020a) *WHAT IS A TOKAMAK?* Available at: <https://www.iter.org/mach/Tokamak>.
- ITER (2020b) *What is Fussion*. Available at: <https://www.iter.org/proj/inafewlines#1> (Accessed: 5 November 2020).
- ITER (2020c) *WHAT IS ITER*. Available at: <https://www.iter.org/proj/inafewlines#1> (Accessed: 5 November 2020).
- ITER (2020d) *WHAT WILL ITER DO?* Available at: <https://www.iter.org/proj/inafewlines> (Accessed: 5 November 2020).
- ITER (2020e) *WHEN WILL EXPERIMENTS BEGIN?* Available at: <https://www.iter.org/proj/inafewlines> (Accessed: 5 November 2020).
- Labovsky, A. and Layton, W. (2016) 'Magnetohydrodynamic flows: Boussinesq conjecture', *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. Elsevier

- Inc., 434(2), pp. 1665–1675. doi: 10.1016/j.jmaa.2015.09.045.
- Li, N. M. dkk. (2018) ‘Calculation of two-dimension radial electric field in boundary plasmas by using BOUT++’, *Computer Physics Communications*, 228, pp. 69–82. doi: 10.1016/j.cpc.2018.03.003.
- Lucas, R. M. and Ponsonby, A. L. (2006) ‘Considering the potential benefits as well as adverse effects of sun exposure: Can all the potential benefits be provided by oral vitamin D supplementation?’, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 92(1), pp. 140–149. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.019.
- Martins, F. dkk. (2019) ‘Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries †’, pp. 1–11. doi: 10.3390/en12060964.
- Matworks (2020) *MATLAB for Artificial Intelligence*. Available at: <https://www.mathworks.com/> (Accessed: 25 November 2020).
- Nur, M. (2011) *Fisika Plasma dan Aplikasinya*, Universitas Diponegoro Semarang.
- Ria, N. (1994) *Nabi Muhammad Mataharinya Dunia*. Available at: <https://www.musixmatch.com/lyrics/Nasida-Ria/Nabi-Muhammad-Mataharinya-Dunia> (Accessed: 28 September 2020).
- S, R. and Parthasarathy, H. (2010) ‘Design, Development and Simulations of MHD Equations with its proto type implementations’, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 1(4). doi: 10.14569/ijacsa.2010.010404.
- Saxena, Y. C. (2016) ‘Tokamak: A device for nuclear fusion’, *Indian Journal of Cryogenics*, 41(1), p. 1. doi: 10.5958/2349-2120.2016.00001.7.
- Shihab, M. Q. (2002) *TAFSIR AL-MISHBAH Pesan, Kesan dan Keserasian al-Qur’an*, Lentera Hati. Jakarta.
- Smirnov, V. P. (2010) ‘Tokamak foundation in USSR / Russia 1950 – 1990’, 50, pp. 1–8. doi: 10.1088/0029-5515/50/1/014003.
- Stacey, W. M. (2010) *An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*. Second. Atlanta.
- Suzuki, Y. (2020) ‘Asean School on Plasma Nuclear and fusion (ASPNF) and Sokendai Winter School 2020’, in.
- TeamViewer (2020) *Team Viewer Remote Access & Support*. Available at: <https://www.teamviewer.com/> (Accessed: 25 November 2020).
- Utama, N. A. dkk. (2014) ‘The End of Fossil Fuel Era : Supply-demand Measures through Energy Efficiency’, *Procedia Environmental Sciences*. Elsevier B.V., 20(May 2016), pp. 40–45. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.007.
- Waresindo, W. X. (2019) ‘Analisis Potensi Sumber Energi di Indonesia Serta Tantangan Eksplorasinya’, *Tugas Pengantar Sains Dan Energi (Fi 6002)*, (September). Available at: https://www.researchgate.net/publication/335985811_Analisis_Potensi_Sumber_Energi_di_Indonesia_Serta_Tantangan_Eksplorasinya.
- Yagi, M., Seki, K. and Matsumoto, Y. (2009) ‘Development of a magnetohydrodynamic simulation code satisfying the solenoidal magnetic field condition’, *Computer Physics Communications*. Elsevier B.V., 180(9), pp. 1550–1557. doi: 10.1016/j.cpc.2009.04.010.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Kode matlab untuk menampilkan grafik

a. Pada saat $t = 30 \mu s$

```
1. >> ncdisp('bout.dmp.30.nc');
2. Source:
3.         C:\Users\.rin\Downloads\Bout Data Koddam\bout.dmp.30.nc
4. Format:
5.         netcdf4
6. Global Attributes:
7.         _NCProperties = 'version=2,netcdf=4.7.3,hdf5=1.10.4'
8.         BOUT_REVISION = '20f8d3e2dfe2e255b08522ecc4398415d26bd7d5'
9. Dimensions:
10.        x = 132
11.        y = 68
12.        z = 1
13.        t = 31      (UNLIMITED)
14. dx
15.        Size:      68x132
16.        Dimensions: y,x
17.        Datatype:  double
18.        Attributes:
19.                cell_location = 'CELL_CENTRE'
20.                direction_y   = 'Standard'
21.                direction_z   = 'Average'
22. dy
23.        Size:      68x132
24.        Dimensions: y,x
25.        Datatype:  double
26.        Attributes:
27.                cell_location = 'CELL_CENTRE'
28.                direction_y   = 'Standard'
29.                direction_z   = 'Average'
30. dz
31.        Size:      1x1
32.        Dimensions:
33.        Datatype:  double
34. density
35.        Size:      1x68x132x31
36.        Dimensions: z,y,x,t
37.        Datatype:  double
38.        Attributes:
39.                cell_location = 'CELL_CENTRE'
40.                direction_y   = 'Standard'
41.                direction_z   = 'Standard'
42. >> d=ncread('BOUT.dmp.30.nc','density');
43. >> dd=reshape(d,68,132,31);
44. >> plot(dd(:,end))
```

b. Pada saat $t = 40 \mu s$

```
1. >> ncdisp('bout.dmp.40.nc');
2. Source:
3.         C:\Users\.rin\Downloads\Bout Data Koddam\bout.dmp.40.nc
4. Format:
```

```

5.          netcdf4
6. Global Attributes:
7.          _NCProperties = 'version=2,netcdf=4.7.3,hdf5=1.10.4'
8.          BOUT_REVISION = '20f8d3e2dfe2e255b08522ecc4398415d26bd7d5'
9. Dimensions:
10.         x = 132
11.         y = 68
12.         z = 1
13.         t = 41      (UNLIMITED)
14. dx
15.         Size:      68x132
16.         Dimensions: y,x
17.         Datatype:  double
18.         Attributes:
19.                 cell_location = 'CELL_CENTRE'
20.                 direction_y   = 'Standard'
21.                 direction_z   = 'Average'
22. dy
23.         Size:      68x132
24.         Dimensions: y,x
25.         Datatype:  double
26.         Attributes:
27.                 cell_location = 'CELL_CENTRE'
28.                 direction_y   = 'Standard'
29.                 direction_z   = 'Average'
30. dz
31.         Size:      1x1
32.         Dimensions:
33.         Datatype:  double
34. density
35.         Size:      1x68x132x41
36.         Dimensions: z,y,x,t
37.         Datatype:  double
38.         Attributes:
39.                 cell_location = 'CELL_CENTRE'
40.                 direction_y   = 'Standard'
41.                 direction_z   = 'Standard'
42. >> d1=ncread('BOUT.dmp.40.nc','density');
43. >> d1d1=reshape(d1,68,132,41);
44. >> plot(d1d1(:,end))

```

c. Pada saat $t = 50 \mu s$

```

1. >> ncdisp('bout.dmp.50.nc');
2. Source:
3.       C:\Users\.rin\Downloads\Bout Data Koddam\bout.dmp.50.nc
4. Format:
5.          netcdf4
6. Global Attributes:
7.          _NCProperties = 'version=2,netcdf=4.7.3,hdf5=1.10.4'
8.          BOUT_REVISION = '20f8d3e2dfe2e255b08522ecc4398415d26bd7d5'
9. Dimensions:
10.         x = 132
11.         y = 68
12.         z = 1
13.         t = 51      (UNLIMITED)
14. dx
15.         Size:      68x132
16.         Dimensions: y,x
17.         Datatype:  double

```

```

18.           Attributes:
19.           cell_location = 'CELL_CENTRE'
20.           direction_y   = 'Standard'
21.           direction_z   = 'Average'
22.   dy
23.           Size:         68x132
24.           Dimensions:   y,x
25.           Datatype:     double
26.           Attributes:
27.           cell_location = 'CELL_CENTRE'
28.           direction_y   = 'Standard'
29.           direction_z   = 'Average'
30.   dz
31.           Size:         1x1
32.           Dimensions:
33.           Datatype:     double
34.   density
35.           Size:         1x68x132x51
36.           Dimensions:   z,y,x,t
37.           Datatype:     double
38.           Attributes:
39.           cell_location = 'CELL_CENTRE'
40.           direction_y   = 'Standard'
41.           direction_z   = 'Standard'
42.   >> d2=ncread('BOUT.dmp.50.nc','density');
43.   >> d2d2=reshape(d2,68,132,51);
44.   >> plot(d2d2(:,end))

```

Lampiran 2 Kode matlab untuk menampilkan video

a. Pada saat $t = 30 \mu s$

```

1. vidObj = Videowriter('MHD_.avi');
2. vidObj.FrameRate=3;
3. vidObj.Quality=100;
4.
5. open(vidObj);
6.
7. %# preallocate
8. nFrames = 1;
9. mov(1:31) = struct('cdata',[],'colormap',[]);
10. d=ncread('BOUT.dmp.30.nc','density');
11. dd=reshape(d,68,132,31);
12. %# create movie
13. for k=1:31
14.     z=dd(:,:,k);
15.     surf(z)
16.     title(sprintf('%'));
17.     xlabel('Posisi (0-150)');
18.     ylabel('Posisi (0-100)');
19.     zlabel('Densitas kg/m^3');
20.     drawnow;
21.     colorbar;
22.     pause(0.02)
23.     mov(k) = getframe(gcf);
24.     writeVideo(vidObj,mov(k));
25. end
26. close(vidObj);

```

b. Pada saat $t = 40 \mu s$

```

1. vidObj = VideoWriter('MHD_.avi');
2. vidObj.FrameRate=3;
3. vidObj.Quality=100;
4.
5. open(vidObj);
6.
7. %# preallocate
8. nFrames = 1;
9. mov(1:41) = struct('cdata',[],'colormap',[]);
10. d1=ncread('BOUT.dmp.40.nc','density');
11. d1d1=reshape(d1,68,132,41);
12. %# create movie
13. for k=1:41
14.     z=d1d1(:,:,k);
15.     surf(z)
16.     title(sprintf('%'));
17.     xlabel('Posisi (0-150)');
18.     ylabel('Posisi (0-100)');
19.     zlabel('Densitas kg/m^3');
20.     drawnow;
21.     colorbar;
22.     pause(0.02)
23.     mov(k) = getframe(gcf);
24.     writeVideo(vidObj,mov(k));
25. end
26. close(vidObj);

```

c. Pada saat $t = 50 \mu s$

```

1. vidObj = VideoWriter('MHD_.avi');
2. vidObj.FrameRate=3;
3. vidObj.Quality=100;
4.
5. open(vidObj);
6.
7. %# preallocate
8. nFrames = 1;
9. mov(1:51) = struct('cdata',[],'colormap',[]);
10. d2=ncread('BOUT.dmp.50.nc','density');
11. d2d2=reshape(d2,68,132,51);
12. %# create movie
13. for k=1:51
14.     z=d2d2(:,:,k);
15.     surf(z)
16.     title(sprintf('%'));
17.     xlabel('Posisi (0-150)');
18.     ylabel('Posisi (0-100)');
19.     zlabel('Densitas kg/m^3');
20.     drawnow;
21.     colorbar;
22.     pause(0.02)
23.     mov(k) = getframe(gcf);
24.     writeVideo(vidObj,mov(k));
25. end
26. close(vidObj)

```

Lampiran 3 *Curriculum Vitae*

CURRICULUM VITAE

A. Data Pribadi

Nama Lengkap : Koddam Rukadi Lubis
 Jenis Kelamin : Laki-laki
 Tempat, Tanggal Lahir : Pawan, 15 Maret 1998
 Alamat Asal : Pawan Hilir
 Alamat Tinggal : Jalan Monjali, Perum. Nandan no 145
 E-mail : koddam.rukadi@gmail.com
 No. HP : +6282398384076



B. Latar Belakang Pendidikan Formal

Jenjang	Nama Sekolah	Tahun
SD	SD Negeri 011 Rambah	2005-2010
SMP	MTs Negeri Rambah	2010-2013
SMA	MA Negeri Pasir Pengaraian	2013-2016
S1	UIN Sunan Kalijaga	2016-2020

C. Pengalaman Organisasi

Panitia Kunjungan Industri Fisika	Tahun 2017
<i>Study club</i> Instrumentasi Fisika	Tahun 2017-2020
Panitia Fisika Festival (Divisi Acara)	Tahun 2018
Panitia <i>The 7th Asian Academic Society International Conference</i> (AASIC) (Divisi Acara)	Tahun 2019

D. Pengalaman Pekerjaan

Mahasiswa Pendamping (MP) Program Pendampingan Keagamaan (PPK)	Tahun 2017-2018
Tentor Cakruk Sinau <i>Course</i>	Tahun 2019
Asisten Praktikum Fisika Dasar II	Tahun 2019
Asisten Praktikum Elektronika Dasar	Tahun 2019

Mahasiswa Pendamping <i>Community Based Outerch Program</i> (Mahasiswa Malaysia dan Turki)	Tahun 2019
Mahasiswa Pendamping <i>Student Research/Attachment and Student Mobility Program</i>	Tahun 2019
Magang Kerja Fakultas Sains Dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga	Tahun 2020
Asisten Praktikum Gelombang dan Optika	Tahun 2019
Asisten Praktikum Gelombang dan Optika	Tahun 2020
Fasilitator Kegiatan Pengabdian Masyarakat Berbasis Laboratorium Program Studi Fisika	Tahun 2020
Tentor A3 Privat	Tahun 2019-sekarang

E. Keahlian

Bahasa Inggris (<i>Speaking</i>)
<i>Microsoft office</i>
Matlab

F. Penghargaan

Piagam Penghargaan Kegiatan Akademik Program Studi Fisika	Tahun 2019
Piagam Penghargaan Sebagai Mahasiswa <i>Student Exchange Prince of Songkla University</i>	Tahun 2019
Piagam Penghargaan Sebagai Partisipan The 6 th ASEAN School on Plasma and Nuclear Fusion (ASP NF 2020) and Sokendai Winter School	Tahun 2020

G. Karya Tulis

Penerapan Epistemologi Islam Pada Proses Pembudayaan Pola Pikier Yang Islami Bagi <i>Scientist</i> (KIIIST)	Tahun 2018
Resistance Characteristic of Soil Fertility (ICSE)	Tahun 2019

H. Pengabdian Masyarakat

Kuliah Kerja Nyata Tematik Minyak Atsiri	Tahun 2019
--	------------