

**KAJIAN FASE *BREAKDOWN* PLASMA HIDROGEN PADA REAKTOR  
TOKAMAK “GOLEM”**

**SKRIPSI**

Untuk memenuhi salah satu syarat mencapai derajat pendidikan Strata Satu (S-1)  
Sebagai Sarjana Sains pada Departemen Fisika



**Disusun Oleh:**

**Derap Pena Mukti Sari**

**24040120140127**

**PROGRAM STUDI FISIKA  
DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN MATEMATIKA  
UNIVERSITAS DIPONEGORO  
SEMARANG  
Januari, 2024**

## PERSETUJUAN UJIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini Dosen Pembimbing dari:

Mahasiswa : Derap Pena Mukti Sari  
NIM : 24040120140127  
Jurusan/Fakultas : Fisika/FSM  
Judul Skripsi : Kajian Fase *Breakdown* Plasma Hidrogen pada Reaktor Tokamak "GOLEM"

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut telah melaksanakan Ujian Seminar Hasil Skripsi sehingga menyetujui dan layak untuk melaksanakan Ujian Tugas Akhir.

Semarang, 4 Januari 2024

Dosen Pembimbing I,



(Prof. Dr. Drs. Muhammad Nur, DEA)  
NIP. 195711261990011001

Dosen Pembimbing II,



(Qidir Maulana BS., M.Sc., Ph.D.)  
NIP. 198603142012121006

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademis di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Semarang, 4 Januari 2024

  
Derap Pena Mukti Sari  
NIM. 240401120140127

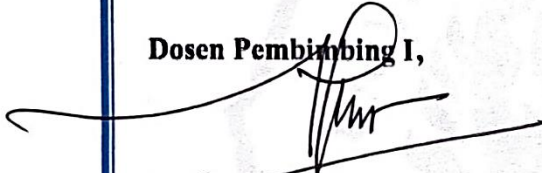
**HALAMAN PENGESAHAN  
SKRIPSI**

**Kajian Fase *Breakdown* Plasma Hidrogen pada Reaktor Tokamak  
"GOLEM"**

**Disusun Oleh:  
Derap Pena Mukti Sari  
24040120140127**

**Telah ditujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji  
Pada tanggal Januari 2024  
Tim Penguji,**

**Dosen Pembimbing I,**



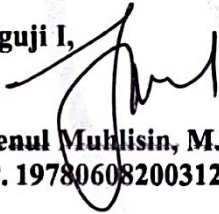
**(Prof. Dr. Drs. Muhammad Nur, DEA)  
NIP. 195711261990011001**

**Dosen Pembimbing II,**



**(Qidir Maulana BS., M.Sc., Ph.D.)  
NIP. 198603142012121006**

**Penguji I,**



**(Zaenul Muhlisin, M.Si., F.Med.)  
NIP. 197806082003121001**

**Penguji II,**



**(Pandji Triadyaksa, Ph.D., F.Med.)  
NIP. 198101272006041002**

**Penguji III,**



**(Prof. Dr. Heri Sutanto, SSi., M.Si., F.Med)  
NIP. 197502151998021001**

**Skrripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Tanggal 12 Januari 2024**

**Ketua Departemen Fisika,**



**Prof. Dr. Heri Sutanto, SSi., M.Si., F.Med  
NIP. 197502151998021001**

**PERNYATAAN PERSETUJUAN  
PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Diponegoro, saya yang bertandatangan di bawah ini:

Mahasiswa : Derap Pena Mukti Sari  
NIM : 24040120140127  
Program Studi : Fisika  
Jurusan : Fisika  
Fakultas : Sains dan Matematika  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Kajian Fase *Breakdown* Plasma Hidrogen pada Reaktor Tokamak  
"GOLEM"**

Beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalih media/ formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan (database) merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Dibuat di : Semarang

Pada Tanggal : 4 Januari 2024

Yang menyatakan



Derap Pena Mukti Sari  
24040120140127

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah hirabbil 'alamin*, puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala penguasa alam semesta dan seisinya, yang telah memberikan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini, yang berjudul “Kajian Fase *Breakdown* Plasma Hidrogen pada Reaktor Tokamak “GOLEM””.

Rampungnya Tugas Akhir ini tidak semata-mata karena upaya yang dilakukan oleh penulis sendiri, dibalik itu semua banyak pihak yang terlibat dalam mendorong penulis untuk bisa menyelesaikan karya ini. Maka dari itu, penulis berterima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orangtua yang tak henti-hentinya memanjatkan doa untuk penulis, yang senantiasa memberikan dukungan dalam setiap jalan yang penulis pilih, yang telah memberikan kasih sayang tak terhingga kepada penulis, semoga mereka selalu diberikan kesehatan dan keberkahan di dalam hidupnya.
2. Prof. Dr. Drs. Muhammad Nur, DEA selaku dosen pembimbing I yang telah sabar mengarahkan penulis dalam proses pembuatan Tugas Akhir, dan senantiasa memberikan motivasi dan inspirasi kepada penulis.
3. Bapak Qidir Maulana Binu Soesanto, S.Si., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing II yang telah sabar dalam membimbing penulis dalam menyusun Tugas Akhir.
4. Hutama Wahyu Nugraha dan Dewinya Aminnata, selaku kakak dan adik yang selalu memberikan dukungan penuh dan menyayangi penulis setulus hati, semoga mereka selalu diberikan kesehatan dan kebahagiaan.
5. Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si., selaku dosen yang sangat rendah hati dan telah sabar memberi masukan kepada penulis dalam menyusun Tugas Akhir.
6. Dr. Philippe Moreau, selaku mentor yang memberi inspirasi dan membimbing penulis selama menempuh sekolah fusi di Thailand.
7. Dr. Vojtech Svoboda, selaku kepala operator Tokamak GOLEM yang telah mengizinkan penggunaan tokamak pada kegiatan ASPNF 2023.

8. Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), Electric Generator Authority of Thailand (EGAT), International Atomic Energy Agency (IAEA), selaku organisasi yang telah menyelenggarakan kegiatan ASEAN School on Plasma and Nuclear Fusion 2023.
9. Lara Zefani, yang telah bersama-sama bersenda gurau, mencari inspirasi, yang memberikan tempat bernaung, dan menemani penulis selama berkuliah.
10. Naqwa Mumtazah Purba, yang senantiasa memberikan keceriaan, dukungan, masukan, dan bantuan kepada penulis, terutama saat proses penyusunan hingga pemaparan Tugas Akhir ini.
11. Mega Suci Lestari yang telah mengajarkan banyak hal tentang kesabaran dan kebahagiaan kepada penulis, *reality is what stands in between...*
12. Angelita Shinta yang selalu melingkupi penulis dengan candaan yang menggembarakan serta memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.
13. Pricha Aisha yang telah menjadi teman selama KKN, yang selalu mendukung dan sabar mendengarkan penulis saat bercerita tentang masalah yang sama.
14. Elisabeth, Vita, Enji, teman-teman Fisika Radiasi 2020, teman-teman ASPNF 2023, dan teman-teman KKN Desa Wiroko, yang telah menyumbangkan *fragments* dengan warna yang indah pada *tapestry* kehidupan penulis.
15. Pihak-pihak yang tidak penulis sebutkan, atas segala hal baik maupun buruk yang menyusun tumpukan pembelajaran kehidupan tak ternilai bagi penulis untuk menjadi pribadi yang lebih baik.
16. Derap Pena Mukti Sari untuk mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini, untuk mampu bangkit berkali-kali, untuk mampu melihat harapan, untuk mampu berusaha dan terus mencoba.

*“Out beyond ideas of wrongdoing and rightdoing, there is a field. I'll meet you there...”*

(Rumi)

Semarang, 2 Januari 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

PERSETUJUAN UJIAN TUGAS AKHIR.....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....	xiv
ABSTRAK .....	xv
<i>ABSTRACT</i> .....	xvi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.3 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II DASAR TEORI .....	6
2.1 Plasma.....	6
2.1.1 Fase <i>breakdown</i> .....	8
2.1.2 Jarak bebas rata-rata ( <i>mean free path</i> ).....	10
2.2 Fusi & Reaktor Fusi Termonuklir .....	11
2.2.1 Kriteria Lawson .....	14
2.3 Tokamak .....	15
2.3.1 Tokamak GOLEM.....	19
2.3.2 Fase <i>breakdown</i> pada tokamak.....	23
2.3.2 <i>Edge safety factor</i> $q(a)$ .....	24
2.4 ITER ( <i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i> ).....	25
2.5 Model Townsend .....	27
2.6 Kurva Paschen .....	29
BAB III METODE PENELITIAN.....	31
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	31



3.2	Alat dan Bahan Penelitian .....	31
3.2.1	Alat penelitian .....	31
3.2.2	Bahan penelitian .....	31
3.3	Prosedur Penelitian .....	32
3.3.1	Persiapan komputer (sebagai <i>remote control</i> dari GOLEM).....	32
3.3.2	Menentukan parameter input tokamak GOLEM .....	34
3.3.3	Analisis data .....	35
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		37
4.1	Parameter yang Digunakan untuk Melihat Keadaan <i>Breakdown</i> .....	37
4.2	Kurva Paschen pada Fase <i>Breakdown</i> Tokamak GOLEM.....	40
4.2.1	Daerah Townsend <i>avalanche</i> .....	41
4.2.2	Kurva Paschen .....	44
4.3	Hubungan Tekanan terhadap Durasi <i>Discharge</i> dan Arus Plasma Maksimum .....	48
4.3.1	Durasi <i>discharge</i> .....	48
4.3.2	Arus plasma maksimum .....	49
BAB V KESIMPULAN.....		50
5.1	Kesimpulan.....	50
5.2	Saran .....	50
DAFTAR PUSTAKA .....		51
Lampiran A Data <i>Discharge</i> Eksperimen Tokamak GOLEM .....		54

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1 Parameter yang dapat diatur secara remote pada tokamak GOLEM.... 34

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Partikel bermuatan (ion) uji dalam plasma (Nur, 2011).....	7
Gambar 2.2 Tabung lucutan gas (Nur, 2011).....	8
Gambar 2.3 Proses elektron yang diemisikan dari katoda dan menghasilkan pasangan ion-elektron baru (Piel, 2010) .....	9
Gambar 2.4 Kurva V-I untuk lucutan gas tekanan rendah (Magaldi et al., 2021)	10
Gambar 2.5 Diagram dari reaksi D-T (Chen, 2016) .....	11
Gambar 2.6 Penampang lintasan untuk reaksi fusi D-T, D- <sup>3</sup> He dan D-D sebagai fungsi energi pusat massa (Chen, 2016) .....	13
Gambar 2.7 Perumpamaan balok es deuterium dengan aliran ion tritium yang ditembakkan (Piel, 2010) .....	14
Gambar 2.8 Prinsip kerja tokamak (Dubus, 2014).....	16
Gambar 2.9 Kombinasi dari medan magnet toroidal dan poloidal yang membentuk medan helical sepanjang torus (Twarog, et al. 2011).....	17
Gambar 2.10 Skema untuk arus plasma selama proses pelepasan awal (Ariola dan Piranti, 2008).....	18
Gambar 2.11 Tokamak GOLEM (Grover et al., 2016).....	19
Gambar 2.12 Skema menyeluruh dari eksperimen pada tokamak GOLEM (Grover et al, 2016) .....	20
Gambar 2.13 Tampilan website saat proses penembakan discharge tokamak GOLEM secara langsung (live) (Grover, 2019) .....	22
Gambar 2. 14 Evolusi tahap awal (start-up) pada tokamak GOLEM (Svoboda, 2019) .....	23
Gambar 2.15 Garis medan magnet di dalam tokamak untuk (a) nilai q(a) 1,241 dan (b) nilai q(a) 12,241 (Pokol et al., 2014).....	24
Gambar 2.16 Situs lokasi ITER dibangun (a) bentuk rancangan asitektur dan (b) konstruksi aslinya (Dubus, 2014).....	25
Gambar 2.17 Ilustrasi dari tokamak ITER (Dubus, 2014).....	26
Gambar 2.18 Tegangan breakdown ( $U_{bd}$ ) pada jenis gas udara sebagai fungsi pd ( $1 \text{ torr cm} = 1.33 \text{ Pa m}$ ) (Sumber: Piel, 2010). .....	30
Gambar 3.1 Tampilan website database Tokamak GOLEM untuk hasil eksperimen discharge No. 41970 .....	32
Gambar 3.2 Tampilan saat mengatur input eksperimen melalui website tokamak GOLEM (Sumber: Grover, 2019).....	33
Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian .....	36
Gambar 4.1 Grafik perubahan tegangan loop ( $U_{loop}$ ), medan magnet toroidal ( $B_t$ ) dan arus plasma ( $I_p$ ) terhadap waktu, discharge (No. 41970) .....	37
Gambar 4.2 Perubahan sementara pada (a) densitas plasma ( $n_e$ ), (b) temperatur elektron ( $T_e$ ), (c) pemanasan ohmic ( $P_{OH}$ ), dan (d) edge safety factor ( $q(a)$ ) pada discharge (No. 41970) .....	38
Gambar 4.3 Durasi discharge dan arus plasma maksimum (No. 41970).....	41
Gambar 4.4 Fase Townsend avalanche pada discharge (No. 41970) .....	43
Gambar 4.5 Hubungan antara tegangan breakdown ( $U_{breakdown}$ ) dan tekanan pada kurva Paschen untuk setiap jenis $UCD$ .....	44

Gambar 4.6 Hubungan tegangan yang bekerja pada inti transformator GOLEM ( $UCD$ ) dengan tegangan <i>breakdown</i> ( $U_{breakdown}$ ) .....	46
Gambar 4.7 Hubungan tegangan yang bekerja pada inti transformator GOLEM ( $UCD$ ) dengan arus plasma maksimum ( $I_p, max$ ).....	47
Gambar 4.8 Hubungan antar tekanan ( $P$ ) yang bekerja pada gas hidrogen dengan durasi discharge ( $T_{dis}$ ) dari plasma untuk bertahan .....	48
Gambar 4.9 Hubungan antara arus plasma maksimum ( $I_p, max$ ) dengan durasi discharge ( $T_{dis}$ ) dari plasma untuk bertahan.....	49
Gambar 4.10 Hubungan antar tekanan ( $P$ ) yang diberikan pada gas hidrogen dengan arus plasma maksimum ( $I_p, max$ ).....	50

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Data <i>Discharge</i> Eksperimen Tokamak GOLEM.....	54
--	----

## ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

$H$	: Hidrogen
$He$	: Helium
$T$	: Tritium
$Li$	: Lithium
$p$	: Tekanan ( $Pa$ )
$n_e$	: Densitas elektron ( $m^{-3}$ )
$D$	: Deuterium
$E$	: Energi
$m$	: Massa ( $kg$ )
ITER	: International Thermonuclear Experimental Reactor
$q$	: Muatan partikel ( $C$ )
$v$	: Kecepatan partikel ( $m/s$ )
$B$	: Medan magnet ( $T$ )
CASTOR	: Czech Academy of Science TORus
$R_0$	: Radius major tokamak GOLEM ( $m$ )
$a$	: Jari-jari tokamak GOLEM ( $m$ )
$E$	: Medan listrik ( $V/m$ )
$\alpha$	: Koefisien pertama Townsend
$\lambda$	: Jarak bebas rata-rata partikel ( <i>mean-free-path</i> )
$e$	: Muatan elektron ( $C$ )
$V_i$	: Potensial ionisasi ( $V$ )
$\eta$	: Efisiensi
$\gamma$	: Koefisien kedua Townsend
$d$	: Lebar celah ( $m$ )
$U_{BD}$	: Tegangan <i>breakdown</i> ( $V$ )
$U_{BT}$	: Tegangan toroidal ( $V$ )
$U_{CD}$	: Tegangan pada inti transformator ( $V$ )
$T_{CD}$	: Waktu tunda antara kapasitor $U_{BT}$ dan $U_{CD}$ ( $s$ )
$T_e$	: Temperatur elektron ( $K$ )
$P_{OH}$	: Pemanasan ohmic ( $W$ )
$q(a)$	: <i>Edge safety factor</i>
$Z_{eff}$	: Nomor muatan efektif
$U_{loop}$	: Tegangan loop ( $V$ )
$I_p$	: Arus plasma ( $A$ )
$\mu_0$	: Konstanta permeabilitas magnetik ( $4\pi \times 10^{-7} m/A$ )
$B_t$	: Medan magnet toroidal ( $T$ )
$t$	: Waktu ( $s$ )
$T_{dis}$	: Durasi discharge ( $s$ )
$I_{p,max}$	: Arus plasma maksimum ( $A$ )

## ABSTRAK

Fase *breakdown* plasma pada tokamak merupakan tahapan penting sebelum mencapai keadaan fusi. Tahap tersebut akan mempengaruhi kualitas dari produksi elektron, kemurnian plasma, stabilitas plasma, dan lain-lain. Penelitian kali ini bertujuan untuk menentukan parameter optimum dalam fase *breakdown* pada tokamak GOLEM dengan melihat pengaruh dari tekanan gas dan tegangan inti transformator terhadap tegangan *breakdown*, durasi discharge, dan arus plasma maksimum. Penelitian dilakukan dari jarak jauh (*remote*) dengan menggunakan komputer dan mengakses halaman website yang terhubung pada tokamak GOLEM. Penelitian ini menggunakan 80 data *discharge* dari database website tokamak GOLEM yang kemudian diplot ke dalam bentuk grafik. Didapatkan nilai optimum untuk tekanan gas yang digunakan berkisar 7-15 mPa. Pada daerah tekanan tersebut durasi discharge ( $T_{dis}$ ) dan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ) akan mencapai kondisi yang relatif lebih tinggi (11,59 – 13,56 ms; 2,6 – 3,82 kA). Kenaikan pada tegangan ( $U_{CD}$ ) inti transformator akan menyebabkan peningkatan pada nilai tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ ), durasi discharge ( $T_{dis}$ ) dan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ).

**Kata kunci:** Fusi, Plasma, Tokamak GOLEM, Fase *breakdown*, kurva Paschen, Hubungan antara tekanan dan tegangan *breakdown*.

## **ABSTRACT**

*The breakdown phase of plasma in a tokamak is a crucial stage before achieving fusion conditions. This stage will influence the quality of electron production, plasma purity, plasma stability, and more. This study aims to determine the optimum parameters during the breakdown phase in the GOLEM tokamak by examining the effects of gas pressure and transformer core voltage on breakdown voltage, discharge duration, and maximum plasma current. The research is conducted remotely using a computer to access the website connected to the GOLEM tokamak. Eighty discharge data points from the GOLEM tokamak website database are plotted into graphs. The optimal gas pressure falls within the range of 7-15 mPa. In this pressure range, the discharge duration ( $T_{dis}$ ) and maximum plasma current ( $I_{p, max}$ ) reach relatively the highest values (11,59 – 13,56 ms; 2,6 – 3,82 kA). An increase in the transformer core voltage ( $U_{CD}$ ) results in an elevation of breakdown voltage ( $U_{breakdown}$ ), discharge duration ( $T_{dis}$ ), and maximum plasma current ( $I_{p, max}$ ).*

**Keywords:** *Fusion, Plasma, GOLEM Tokamak, Breakdown phase, Paschen curve, Relationship between Pressure and Breakdown Voltage.*



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

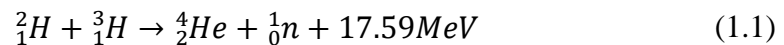
### **1.1 Latar Belakang**

Pada tahun 2018 energi fosil menyumbang sebesar 67% dari konsumsi energi secara global, dan 99% dari total emisi CO<sub>2</sub> berasal dari konsumsi energi, dan tanpa diragukan lagi CO<sub>2</sub> merupakan penyumbang utama dari masalah perubahan iklim dan kerusakan lingkungan selama 50 tahun terakhir (International Energy Agency, 2020), (BP Statistical Review of World Energy, 2022), (Ehiagimusoe et al., 2019), (Holecheck et al., 2022). Diprediksi cadangan minyak mentah dan gas alam secara global hanya cukup untuk bertahan selama 41,8 tahun dan 60,3 tahun (Behrouzi, 2016). Permasalahan ini semua mendorong para peneliti di dunia untuk menciptakan suatu sumber energi terbarukan yang dapat memenuhi kebutuhan di masa depan. Salah satu terobosan untuk menangani permasalahan tersebut adalah teknologi dengan memanfaatkan reaksi nuklir.

Teknologi nuklir saat ini memanfaatkan dua jenis reaksi yang dinamakan reaksi fisi dan fusi. Lebih dari 400 pembangkit listrik fisi telah beroperasi selama lebih dari setengah abad (Knapp, 2018). Fisi nuklir merupakan proses membelahnya inti berat seperti uranium atau plutonium dengan menembakkan neutron, inti tersebut kemudian membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan pada saat bersamaan melepaskan dua atau tiga neutron dan energi, yang kemudian dikonversi menjadi panas untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik (NEA, 2003). Meskipun teknologi fisi tidak menghasilkan polusi udara atau efek rumah kaca, proses produksinya menimbulkan banyak masalah seperti limbah radioaktif dan risiko kecelakaan yang fatal. Di lain sisi, teknologi fusi relatif lebih aman, meskipun sama-sama menghasilkan limbah radioaktif, masalah pengolahan limbah pada proses fusi jauh lebih sedikit jika dibandingkan fisi. Limbah dari reaksi fusi adalah tritium dengan waktu paruh 12 tahun, sementara fisi sebagai salah satu contoh plutonium memiliki waktu paruh sekitar 24000 tahun. Keuntungan yang tidak kalah penting dari teknologi fusi adalah sumber bahan

bakarnya yang melimpah, yang dapat diekstraksi dari air laut dengan mudah, murah dan keberadaannya yang tidak terbatas (Ariola dan Piranti, 2008).

Fusi merupakan sumber energi yang dihasilkan oleh matahari dan bintang-bintang dengan menggabungkan atom hidrogen menjadi atom helium, proses yang terjadi melepaskan sejumlah energi besar. Pada pembangkit listrik tenaga fusi, unsur atom yang digabungkan adalah tritium dan deuterium. Proses ini akan menghasilkan inti helium dengan massa yang lebih besar, neutron, dan juga perbedaan massa yang dilepaskan dalam bentuk energi kinetik inti-inti produk partikel- $\alpha$  sebesar  $17,59MeV$  yang kemudian energi tersebut akan dikumpulkan untuk digunakan dalam produksi listrik (Kikuchi et al., 2012).



Bahan bakar reaktor fusi tersedia sangat melimpah dan tidak terbatas dalam skala peradaban manusia, deuterium dapat ditemukan secara alami melimpah pada air dengan skala 1:6000, ini berarti terdapat 1 atom deuterium pada 6000 atom hidrogen. Walaupun tritium tidak dapat ditemukan secara alami ia dapat dihasilkan dengan memanfaatkan lithium yang juga tersedia melimpah di kerak bumi dan lautan (Kikuchi et al., 2012). Energi yang dilepaskan dari reaksi fusi dengan bahan bakar deuterium dan tritium seberat 1-gram setara dengan energi yang dihasilkan oleh 7.4-ton minyak bumi, atau juga setara dengan 1-Ton batu bara (Walker et al., 2020).

Suhu yang diperlukan untuk mencapai kondisi yang diinginkan agar reaksi termonuklir dapat berlangsung, berkisar 10 keV ( $1 eV \approx 11604 Kelvin$ ) atau sekitar 100 juta derajat celcius. Pada temperatur tersebut bahan bakar akan sepenuhnya ter-ionisasi dan mencapai keadaan dengan elektron dan ion dalam jumlah yang sama sehingga menghasilkan suatu kondisi gas netral yang dinamakan plasma (Wesson, 2004). Besarnya nilai temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai reaksi fusi menyebabkan suatu material dinding mesin saja tidak mampu menahan plasma agar tidak keluar. TOKAMAK yang berasal dari bahasa Rusia “*toroidalnya kamera ve magnetnaya katushka*” atau “*toroidal chamber with magnetik coil*” menawarkan suatu metode pengurungan plasma di dalam suatu

toroidal oleh medan magnet dan berputar dalam orbit yang kecil. Dengan cara ini, plasma dimungkinkan untuk melaju dengan jarak satu juta kali dari ukuran mesin, dengan konsep TOKAMAK plasma bersuhu tinggi tersebut tidak akan menyentuh dinding reaktor (Wesson, 2004).

Proses tahap awal (*start-up*) merupakan masalah yang kompleks namun memiliki perhatian yang sedikit dalam sejarah penelitian TOKAMAK. Banyak eksperimen belum berhasil menghasilkan reaksi fusi walaupun suhu tinggi telah tercapai. Pada eksperimen JET di 2009 terjadi lebih dari 100 kegagalan pada fase awal (*non-sustained breakdown shots*). *Breakdown* plasma merupakan kondisi saat arus plasma dan derajat ionisasi rendah namun tabrakan antara elektron dan molekul netral tinggi (Siusko et al., 2021). *Breakdown* merupakan fase yang cukup penting dalam pengoprasian awal tokamak dikarenakan akan mempengaruhi tahap-tahap selanjutnya: produksi elektron yang bergerak, *impurities*, kesetimbangan, stabilitas, dsb. (Siusko et al., 2021). Penelitian kali ini akan membahas tentang fase *breakdown* dan pengaruh dari tekanan dan juga tegangan inti transformator terhadap tegangan *breakdown* yang dihasilkan dengan menggunakan jenis gas hidrogen.

## 1.2 Tujuan Penelitian

- 1.2.1 Menentukan nilai optimum tekanan gas hidrogen pada kurva Paschen dalam fase *breakdown* plasma hidrogen pada tokamak GOLEM.
- 1.2.2 Menganalisa pengaruh dari tekanan dan tegangan inti transformator terhadap tegangan *breakdown*, durasi discharge, dan arus plasma maksimum dalam fase *breakdown* plasma hidrogen pada tokamak GOLEM.

## 1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat membantu memahami kondisi plasma hidrogen dalam fase *breakdown* tokamak. Dengan mengetahui kondisi optimum plasma pada fase *breakdown* diharapkan dapat membantu mewujudkan keadaan optimal pada fase-fase selanjutnya seperti burn *burn-trough phase*, *current rump-up*, serta kinerja tokamak yang lebih baik.

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Plasma**

Ketika suatu padatan dipanaskan hingga mencapai suatu gerakan termal pada atom-atom untuk bisa merusak struktur kisi kristal, maka biasanya cairan akan terbentuk. Ketika cairan dipanaskan hingga cukup untuk atom-atom menguap dari permukaan dan lebih cepat dari proses mereka untuk mengembun, maka gas akan terbentuk. Ketika gas dipanaskan hingga cukup untuk atom-atom saling bertabrakan dan melepaskan elektron mereka dalam proses tersebut, maka plasma terbentuk, yang disebut sebagai 'keadaan materi keempat' (Goldston, 1995).

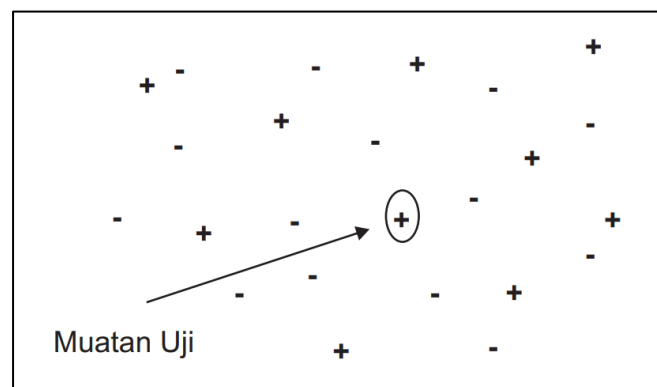
Plasma biasanya hanya didapati di ruang hampa, karena udara dapat menyebabkan plasma menjadi dingin dan hal tersebut dapat memicu terjadinya peristiwa rekombinasi atau bergabungnya kembali ion dan elektron menjadi atom. Namun plasma juga dapat ditemukan pada bumi, seperti kilatan petir, cahaya Aurora Borealis, lampu fluoresen, piksel dari TV plasma, atau reaktor termonuklir. Media yang mengandung suatu partikel bermuatan tidak selalu dapat dikatakan sebagai plasma, definisi yang cukup tepat menurut Chen (2016) adalah, plasma merupakan suatu gas kuasinetral dari partikel bermuatan dan partikel netral yang menunjukkan perilaku kolektif.

Suatu gas dapat dikatakan kuasinetral jika ia tersusun dari muatan positif (ion) dan muatan negatif (elektron) dalam jumlah yang sama.

$$n_e \approx n_i \tag{2.1}$$

dengan  $n_e$  merupakan densitas elektron dan  $n_i$  merupakan densitas ion positif, dalam kondisi plasma, densitas elektron akan sama dengan densitas ion positif. Pada molekul udara biasa, yang mana molekul berada dalam kondisi netral, tidak akan ditemukan gaya elektromagnetik yang bekerja pada mereka. Molekul udara

tersebut dapat bergerak tanpa gangguan sampai melakukan tumbukan dengan molekul lain, tumbukan inilah yang mengatur pergerakan molekul-molekul tersebut. Lain halnya dengan plasma, yang tersusun oleh partikel-partikel bermuatan. Saat partikel bermuatan ini bergerak mereka dapat menimbulkan suatu daerah yang tersusun oleh muatan positif atau negatif, hal inilah yang menyebabkan adanya medan listrik. Pergerakan dari muatan juga dapat menimbulkan arus, dan arus tersebut akan menimbulkan suatu medan magnet. Medan listrik dan medan magnet inilah yang kemudian akan memengaruhi pergerakan partikel bermuatan bahkan dari jarak yang jauh. Pengaruh dari medan ini menyebabkan plasma memiliki perilaku yang berbeda dari molekul atau gas yang bersifat netral pada umumnya, hal inilah yang disebut sebagai perilaku kolektif. Perilaku kolektif yang ditunjukkan oleh plasma dihasilkan oleh adanya gaya Coulomb jarak jauh antara muatan penyusunnya. Efek yang dihasilkan oleh muatan satu sama lain diibaratkan dengan (Gambar 2.1).



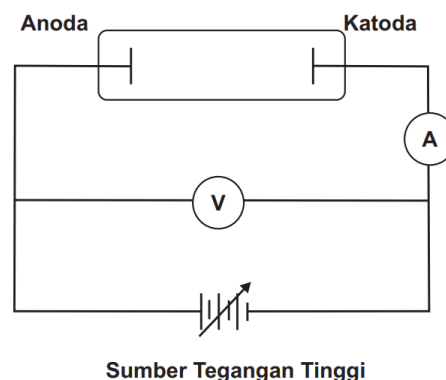
**Gambar 2.1 Partikel bermuatan (ion) uji dalam plasma (Nur, 2011)**

Muatan uji yang dimasukkan ke dalam plasma akan mendapatkan gaya potensial dari plasma di sekelilingnya. Hal ini mengartikan bahwa setiap partikel pada plasma berinteraksi dengan banyak partikel lain. Elemen pada plasma dapat menghasilkan gaya antara satu dan yang lainnya bahkan pada jarak yang jauh. Hal inilah yang menyebabkan timbulnya perilaku kolektif dari plasma tersebut dan juga memberikan banyak ruang untuk dipelajari dalam ilmu plasma (Chen, 2016) dan (Piel, 2010).

Plasma diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan rentang temperaturnya, yakni plasma dingin (*cold plasma*) dengan suhu sekitar 1000 K yang biasa digunakan dalam bidang agrikultur, mikroelektronik, pembersihan polutan dll. Plasma termik memiliki temperatur  $>3000$  K yang sering digunakan untuk pemotongan logam, pengelasan dll. Plasma panas atau plasma dengan temperatur di atas 10 juta kelvin yang ditujukan untuk memproduksi energi listrik (Nur, 2011).

### 2.1.1 Fase *breakdown*

Pada laboratorium, lucutan listrik dilakukan di dalam tabung berisikan gas dengan tekanan tertentu yang di ujung-ujungnya terdapat plat sejajar elektroda dan terhubung dengan tegangan tinggi DC (*direct current*), yang kemudian akan terjadi lucutan listrik di antara elektroda tersebut (Gambar 2.2).

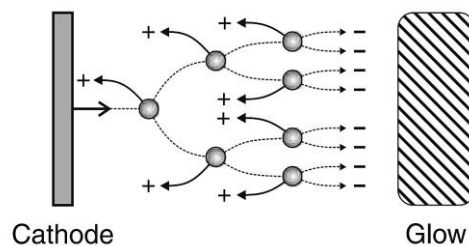


**Gambar 2.2 Tabung lucutan gas (Nur, 2011)**

Lucutan plasma terbentuk oleh peristiwa *breakdown* listrik pada gas. Gas yang sifat dasarnya merupakan isolator, pada keadaan *breakdown* akan berubah menjadi konduktor. Proses pembangkitan ini menyebabkan aliran arus berikutnya menghasilkan lucutan (*discharge*) listrik.

Kondisi *breakdown* merupakan istilah untuk mewakili proses multiplikasi elektron pada gas dan pelepasan elektron dari katoda yang disebabkan oleh tumbukan ion (menuju katoda). Saat elektron pertama terlepas dari katoda yang kemudian dipercepat oleh medan listrik, mereka dapat mengionisasi atom gas

yang dilewati. Saat proses ini terjadi, pasangan ion-elektron terbentuk, dan kemudian dua elektron dipercepat dan kemudian kembali menumbuk gas dan menghasilkan empat elektron dan akan terus berlanjut menciptakan ionisasi berantai dan keruntuhan elektron (*elektron avalanche*) (Gambar 2.3). Elektron akan dipercepat oleh medan listrik menuju anoda dan ion positif akan dipercepat menuju katoda dan menghasilkan elektron baru.

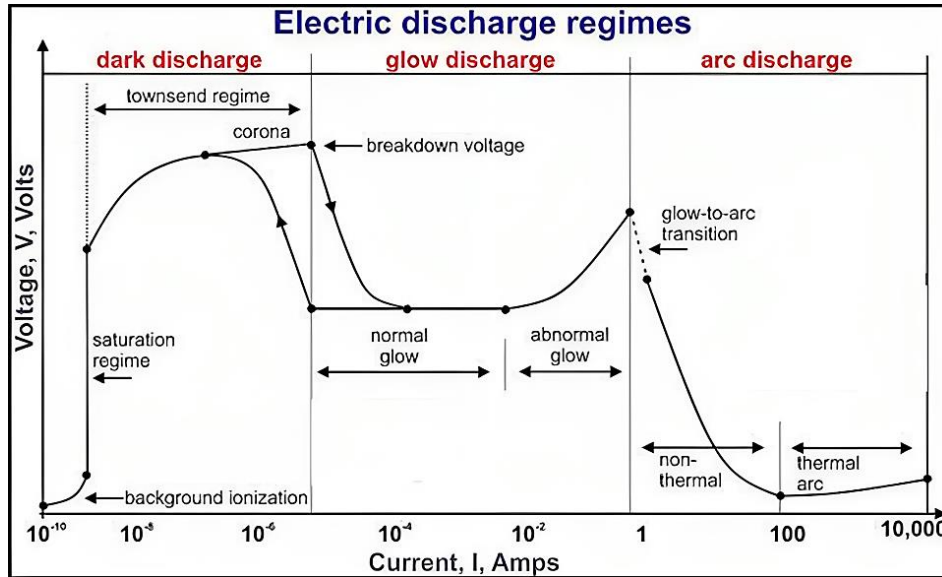


**Gambar 2.3 Proses elektron yang diemisikan dari katoda dan menghasilkan pasangan ion-elektron baru (Piel, 2010)**

Tegangan yang rendah tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap arus. Namun saat tegangan mulai dinaikkan, partikel akan memiliki energi tambahan dan proses ionisasi mulai meningkat sehingga arus listrik akan mengalami kenaikan terhadap tegangan, hal ini disebut sebagai lucutan Townsend (dinamai dari John S. Townsend, 1868-1957).

Saat tegangan dinaikkan dan ionisasi semakin banyak terjadi yang kemudian menghasilkan elektron-elektron akibat peristiwa fotolistrik, akan terjadi perubahan kondisi gas menjadi bersifat penghantar (konduktor) yang disebut sebagai keadaan *breakdown* (Gambar 2.4). Pada fase ini mulai terlihat adanya pancaran cahaya (emisi) pada katoda akibat peristiwa *bremstrahlung* yang disebabkan oleh tumbukan ion yang dipercepat medan listrik. Setelah keadaan tersebut, akan terjadi kenaikan arus akibat banyaknya elektron yang dihasilkan atau yang disebut sebagai keadaan *normal glow discharge*. Terjadi emisi yang hanya menutupi sebagian kecil permukaan katoda. Pada lucutan ini ionisasi akan terjadi secara berantai, tegangan yang dimiliki lebih rendah dan hampir konstan karena tidak lagi memerlukan tegangan tambahan dari luar untuk terjadinya ionisasi dengan rentang arus  $I \approx (0.1 - 10) \text{ mA}$  (Gambar 2.4). Arus akan terus meningkat hingga katoda sepenuhnya tertutupi oleh emisi cahaya. Selanjutnya,

tegangan kembali naik dengan arus yang semakin tinggi yang kemudian membentuk *anomalous/abnormal glow discharge* (Nur, 2011) dan (Piel, 2010).



Gambar 2.4 Kurva V-I untuk lucutan gas tekanan rendah (Magaldi et al., 2021)

Jika tegangan terus dinaikkan, suhu pada katoda akan semakin meningkat karena ion dengan energi tinggi terus menumbuknya dan menghasilkan lebih banyak elektron. Saat elektron melimpah arus juga semakin meningkat, jenis lucutan yang terbentuk pada keadaan ini menjadi tidak stabil (digambarkan dengan garis putus-putus pada kurva). Pada keadaan selanjutnya tegangan akan menurun dan arus terus meningkat yang disebut sebagai *arc discharge*, terbentuk dengan arus lucutan di atas 1 A.

### 2.1.2 Jarak bebas rata-rata (*mean free path*)

*Mean free path* ( $\lambda$ ) merupakan istilah untuk mewakili jarak rata-rata yang ditempuh suatu partikel (ion, elektron atau atom) sebelum bertabrakan dengan partikel lain, yang dirumuskan dengan (Piel, 2010):

$$\lambda = \frac{1}{n \cdot \sigma} \quad (2.2)$$

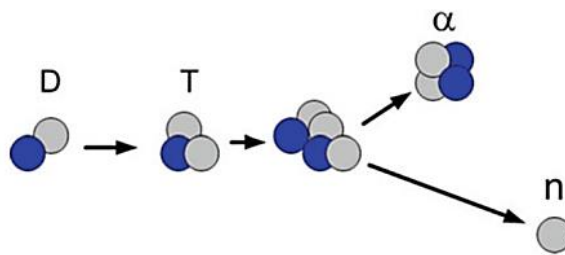


dengan  $n$  sebagai densitas dari partikel ( $m^{-3}$ ) dan  $\sigma$  sebagai *cross-section* ( $m^2$ ) tabrakan yang terjadi antara partikel atau area efektif untuk terjadinya tumbukan.

## 2.2 Fusi & Reaktor Fusi Termonuklir

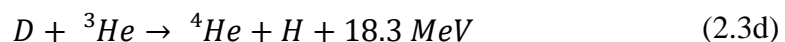
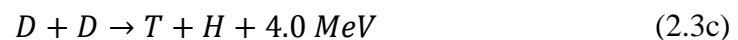
Jalan menuju penggunaan energi fusi nuklir terbuka pada tahun 1958 dalam Konferensi Atoms for Peace ke-2, saat ilmuwan dari seluruh dunia berkumpul dan membagikan hasil penelitian mereka dan hal ini merupakan “salah satu upaya ilmiah paling kolaboratif yang pernah dilakukan” (Folwer, 1997). Tujuan dari semua ini adalah semata-mata untuk dapat menggunakan energi yang dihasilkan dari penggabungan (fusi) inti deuterium dan tritium sebagai sumber energi untuk mengoperasikan pembangkit tenaga listrik.

Inti deuterium dan tritium yang bertabrakan dengan besar energi dalam skala puluhan keV memiliki kemungkinan yang besar untuk dapat bersatu dan menghasilkan partikel alfa (inti helium) dan neutron (Gambar 2.5).



**Gambar 2.5 Diagram dari reaksi D-T (Chen, 2016)**

Reaksi-reaksi yang mungkin terjadi dalam melibatkan inti deuterium dan tritium adalah:



Pada persamaan (2.3), *He* mewakili helium, dan *n* sebagai neutron yang dihasilkan dari proses fusi. Pada persamaan (2.3a) dibutuhkan tritium, tritium mengalami peluruhan radioaktif dengan waktu paruh 12,3 tahun sehingga tidak

dapat timbul secara natural, maka dari itu tritium akan diproduksi dari lithium pada komponen *blanket* reaktor dengan reaksi sebagai berikut:



Setelah reaksi fusi terjadi, total massa yang dihasilkan setelah reaksi akan lebih kecil dari massa sebelum reaksi, massa yang “hilang” ini lah yang kemudian berubah menjadi suatu energi, yang dapat dihitung dengan persamaan terkenal Albert Einstein:

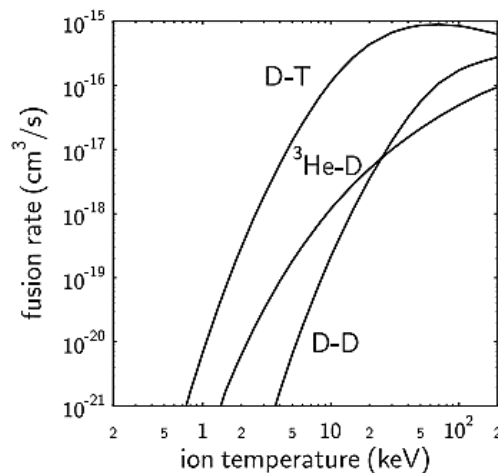
$$E = (m_r - m_p)c^2 \quad (2.5)$$

dengan  $E$  merupakan energi yang dihasilkan dari reaksi fusi,  $m_r$  merupakan total massa dari inti sebelum reaksi, dan  $m_p$  adalah massa dari inti setelah reaksi, dan  $c$  merupakan kecepatan cahaya. Energi yang dihasilkan pada reaksi fusi D-T adalah sebesar 17,6 MeV, sebagian besar energi dibawa pergi oleh neutron 14 MeV. Energi yang dibawa oleh neutron ini lah yang akan ditangkap dan dimanfaatkan untuk sumber tenaga listrik. Selimut pada komponen alat pembangkit tenaga listrik akan menangkap neutron dan mengubah energi kinetiknya menjadi panas yang kemudian memutar turbin pada generator listrik dan juga menghasilkan bahan bakar tritium kembali. Sementara sisa 20% (3,5 MeV) energi dari partikel  $\alpha$  (helium) terperangkap dalam medan magnet yang menahan plasma dan akan memanaskan si plasma itu sendiri (Ariola dan Pironti, 2008).

Cara untuk mewujudkan terjadinya reaksi ini adalah dengan membuat plasma dengan kepadatan dalam skala  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  dan energi rata-rata partikel dalam puluhan keV. Batas waktu untuk energi termal yang terkandung oleh plasma tersebut untuk dapat keluar ke permukaan material di sekitarnya harus melebihi waktu sekitar lima detik, agar daya yang dihasilkan oleh partikel alfa dapat menjaga suhu dari plasma. Pada tahun 1990-an peneliti telah berhasil membuat daya fusi sebesar 2-10 MW dalam plasma deuterium-tritium dengan temperatur 20-40keV dan mampu menahan energi selama 0,25-1 detik. Hal ini dapat dibandingkan dengan daya kisaran 10MW yang dihasilkan oleh plasma deuterium

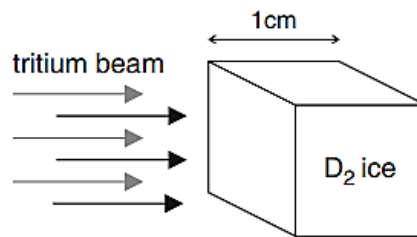
dengan suhu 1 keV dengan waktu tahan hanya selama 5 mili detik di tahun 1970-an (Goldstone, 1995).

Hasil reaksi fusi yang signifikan bergantung pada energi kinetik dari inti-inti pasangan dalam mengatasi gaya tolak-menolak (Coulomb) antara inti yang memiliki muatan yang sama. Hubungan penampang lintasan fusi sebagai fungsi energi partikel dalam sistem pusat massa dengan rentang energi antara 10 dan 100 keV ditunjukkan pada (Gambar 2.6). Ditemukan bahwa pada energi yang sama, penampang lintasan untuk reaksi D-T (Deuterium-Tritium) jauh lebih besar jika dibandingkan dengan reaksi D-D atau  $^3\text{He-D}$ . Inilah alasan mengapa semua eksperimen saat ini menggunakan campuran D-T untuk menghasilkan reaksi fusi (Piel, 2010).



**Gambar 2.6 Penampang lintasan untuk reaksi fusi D-T, D- $^3\text{He}$  dan D-D sebagai fungsi energi pusat massa (Chen, 2016)**

Pemercepat partikel (*particle accelerator*) tidak cukup untuk dapat menciptakan reaksi fusi antara inti-inti D-T. Interaksi antara proyektil inti yang ditembakkan (anggap saja ion tritium) terhadap material objek (elektron dari balok atom deuterium) menyebabkan kehilangan energi yang cukup besar karena proyektil tidak mampu menembus objek sehingga seluruh energi awal hilang sebagai panas pada balok deuterium yang ditembak tersebut (Gambar 2.7).



**Gambar 2.7 Perumpamaan balok es deuterium dengan aliran ion tritium yang ditembakkan (Piel, 2010)**

Fusi nuklir menggunakan konsep yang berbeda, panas tidak menjadi suatu energi yang hilang saat proses tumbukan berlangsung. Pada kungkungan magnetik, ion D<sup>+</sup> dan T<sup>+</sup> penyusun plasma berada dalam keseimbangan termal yang memenuhi distribusi Maxwellian. Tumbukan yang tidak menghasilkan fusi, hanya akan menyebabkan tabrakan antara pasangannya (antara individu muatan) sehingga tidak mengubah isi panas dari plasma itu sendiri, energi yang diperoleh dan hilang dalam tumbukan elastis dikembalikan ke distribusi termal. Walaupun tetap ditemukan kebocoran energi melalui peristiwa *bremstrahlung* selama proses tabrakan. Namun berbeda dengan konsep pemercepat partikel dengan energi tersebar dalam skala mikrodetik, energi plasma dalam kungkungan magnetik dapat dipertahankan dalam skala detik.

Walaupun plasma panas D-T tersebut bersifat encer, namun hasil yang diberikan akan signifikan saat reaktor dapat menahan partikel dan energi kinetik mereka dalam waktu yang cukup lama. Pengungkungan tersebut dapat dicapai dengan menggunakan medan magnet yang kuat yang disebut tokamak. Dengan cara ini setiap proyektil memiliki peluang berulang kali untuk dapat bertabrakan dengan inti-inti dan membentuk reaksi fusi.

### 2.2.1 Kriteria Lawson

Reaktor fusi akan berguna saat daya yang diproduksi dari hasil reaksi lebih besar dari pada daya yang digunakan untuk memanaskan plasma dan untuk mengoperasikannya. Ouput daya bersih yang dihasilkan oleh reaktor fusi dapat diukur dengan istilah *power gain* atau faktor Q, yang didefinisikan sebagai rasio dari daya output fusi terhadap daya input yang diberikan, dirumuskan dengan:

$$Q = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (2.6)$$

Maka dari itu, agar daya fusi mampu mencapai keadaan yang diinginkan sebagai pembangkit listrik nilai  $Q > 1$ . Keadaan dengan  $Q = 1$  dikenal sebagai kondisi *break-even* atau kriteria Lawson yakni kondisi saat daya output fusi yang dihasilkan sama dengan daya input yang diberikan, yang dirumuskan sebagai:

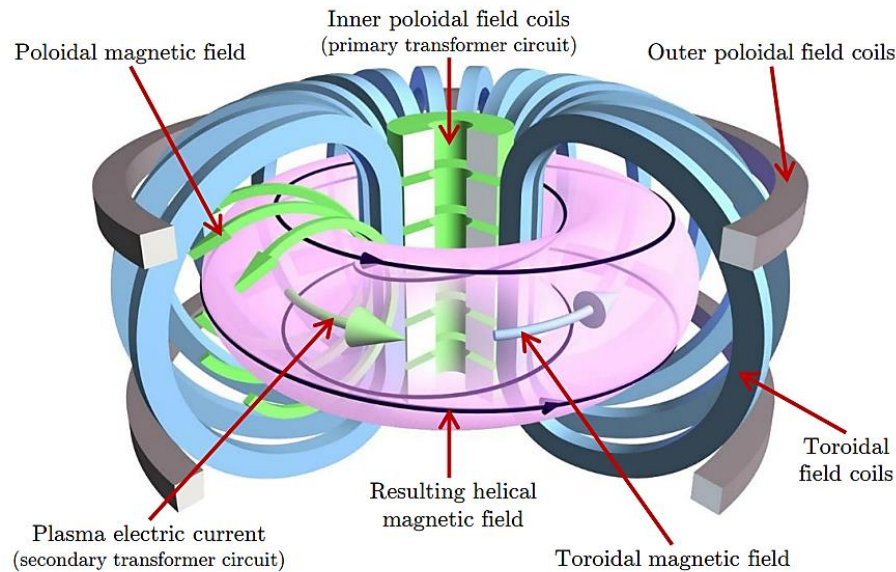
$$n\tau_E = 10^{20} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.7)$$

dengan ( $n$ ) sebagai densitas partikel dan ( $\tau_E$ ) sebagai waktu kukungan energi atau lama plasma mampu bertahan sebelum hilang. Kriteria Lawson memberikan informasi tentang kondisi dari densitas ( $n$ ) dan waktu kungkungan energi ( $\tau_E$ ) yang harus dipenuhi pada temperatur tertentu, sebagai contoh densitas dan waktu kungkungan untuk mencapai reaksi fusi  $D-T$  dengan nilai temperatur  $T_e = 15 \text{ keV}$ , merumuskan kriteria Lawson menjadi (Kikuchi et al., 2012; Ariola dan Pironti, 2008):

$$nT_e\tau_E > 1,5 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.8)$$

### 2.3 Tokamak

Konsep tokamak ditemukan di Uni Soviet pada akhir 1950-an oleh seorang ilmuwan yang bernama Igor Tamm dan mantan mahasiswanya Andrei Sakharov. Tokamak merupakan singkatan dari bahasa Rusia *TOroidalnaya KAmera ee MAgnitaya Katushka* yang artinya “ruangan toroidal dengan kawat magnet”. Tokamak merupakan suatu transformator raksasa, yang memuat torus (bentuk geometri seperti cincin donat) plasma membentuk lilitan sekunder tunggal. Plasma dimuat di dalam ruang vakum toroidal, yang dikelilingi oleh gulungan medan magnet untuk mengungkung partikel bermuatan. Tokamak juga menjadi perangkat yang menjanjikan untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga fusi nuklir. Saat ini tokamak menjadi subjek dari penelitian internasional pada proyek ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Gambaran prinsip kerja tokamak ditunjukkan pada (Gambar 2.8).



**Gambar 2.8 Prinsip kerja tokamak (Dubus, 2014)**

Ilustrasi di atas (Gambar 2.8) menunjukkan prinsip kerja tokamak, yang memuat komponen utama berupa:

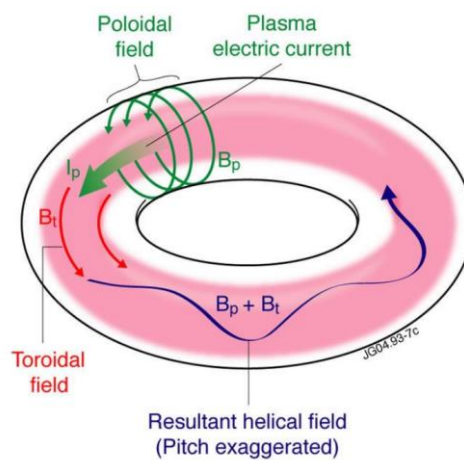
- *Vacuum vessel*, ruang plasma berada yang diwakilkan oleh daerah sekitar komponen berwarna ungu pada (Gambar 2.8);
- *Blanket*, berperan dalam menyerap neutron 14 MeV dan memproduksi tritium yang juga dibutuhkan untuk reaksi pada persamaan (2.3a), komponen ini terbuat dari bahan lithium agar reaksi pada persamaan (2.3) dapat terjadi, *blanket* akan berada dilapisan dalam tokamak (bagian dalam *toroidal field coils*);
- *Toroidal field coils* atau kumparan kawat toroidal, yang akan mengalirkan arus dan menghasilkan medan magnet toroidal (*toroidal magnetic field*) di sepanjang torus yang digunakan untuk mengungkung plasma, diwakilkan dengan komponen berwarna biru di sepanjang torus pada (Gambar 2.8);
- *Outer poloidal field coils* atau kumparan kawat poloidal luar, yang akan menghasilkan medan magnet poloidal (*poloidal magnetic field*) yang berfungsi mencegah plasma bersuhu tinggi untuk berinteraksi dengan dinding pada *Vacuum vessel*, diwakilkan dengan komponen berwarna abu-abu pada (Gambar 2.8);

- Kumbaran hijau yang berada di tengah mesin (Gambar 2.8) disebut sebagai *central solenoids (CS)* atau *inner poloidal field coils* yang berfungsi untuk menginduksi arus plasma (*plasma electric current*) di sepanjang torus yang terbentuk oleh aksi dari transformator, dengan CS merupakan transformator utama dan plasma itu sendiri berperan sebagai transformator sekunder.

Dengan adanya medan magnet, partikel bermuatan akan menunjukkan perputaran siklotron secara sederhana di sekitar garis medan magnet. Pergerakan dari partikel bermuatan ini dirumuskan oleh gaya Lorentz:

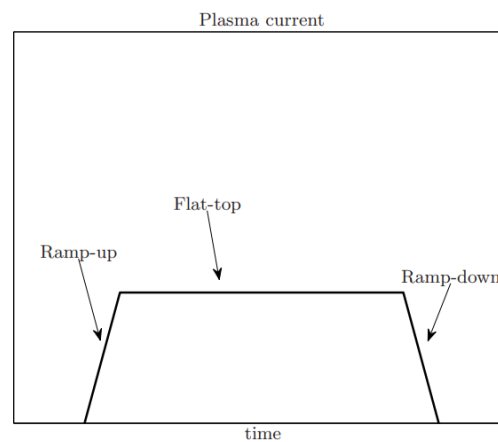
$$m \frac{d}{dt} v = q(v \times B) \quad (2.9)$$

dengan  $m$  dan  $q$  merupakan massa dan muatan dari partikel,  $v$  adalah kecepatan partikel, dan  $B$  sebagai medan magnet. Saat komponen kecepatan parallel terhadap medan magnet, yang juga tidak terpengaruh oleh gaya Lorentz, lintasan partikel bermuatan akan berbentuk helix (Gambar 2.9). Partikel pada kasus ini akan terjatuh ke ujung garis medan magnet, tidak sesuai dengan tujuan untuk menahan mereka pada lintasan. Untuk menyelesaikan permasalahan ini tokamak menggunakan garis medan yang melengkung dan membentuk torus (geometri seperti donat) agar lintasan partikel tidak berujung. Medan magnet akan membelokkan lintasan partikel bermuatan mengelilingi tokamak untuk membentuk struktur helical (Gambar 2.9).



**Gambar 2.9** Kombinasi dari medan magnet toroidal dan poloidal yang membentuk medan helical sepanjang torus (Twarog, et al. 2011)

Tokamak merupakan mesin pulsa (Gambar 2.10), plasma terbentuk pada tiap pulsanya (fase “*start-up*”), yang kemudian arus dipompa dengan besar yang konstan, yang disebut sebagai arus “*flat-top*”, yang dipertahankan pada keadaan menyala sepanjang fase utama dari pelepasan awal, dan akhirnya arus akan menurun secara drastis dan produksi plasma berakhir. Untuk menginisiasi pelepasan (*discharge*), gas hidrogen dialirkan menuju ruang vakum tokamak dan arus dari kumparan medan toroidal akan meningkat untuk menciptakan medan magnet dalam keadaan stabil yang nantinya akan menjadi tempat plasma. Kemudian medan listrik kuat terbentuk di dalam torus menggunakan pemanasan ohmic dari kumparan. Medan listrik ini memecah atom-atom gas netral yang kemudian membentuk plasma. Arus yang terbentuk pada plasma disebabkan oleh transformator. Tabrakan dari ion-ion pada plasma menyebabkan plasma bersifat resistif. Resistansi inilah yang kemudian memanaskan plasma (asal usul dari istilah “pemanasan ohmic”).



**Gambar 2.10 Skema untuk arus plasma selama proses pelepasan awal (Ariola dan Piranti, 2008)**

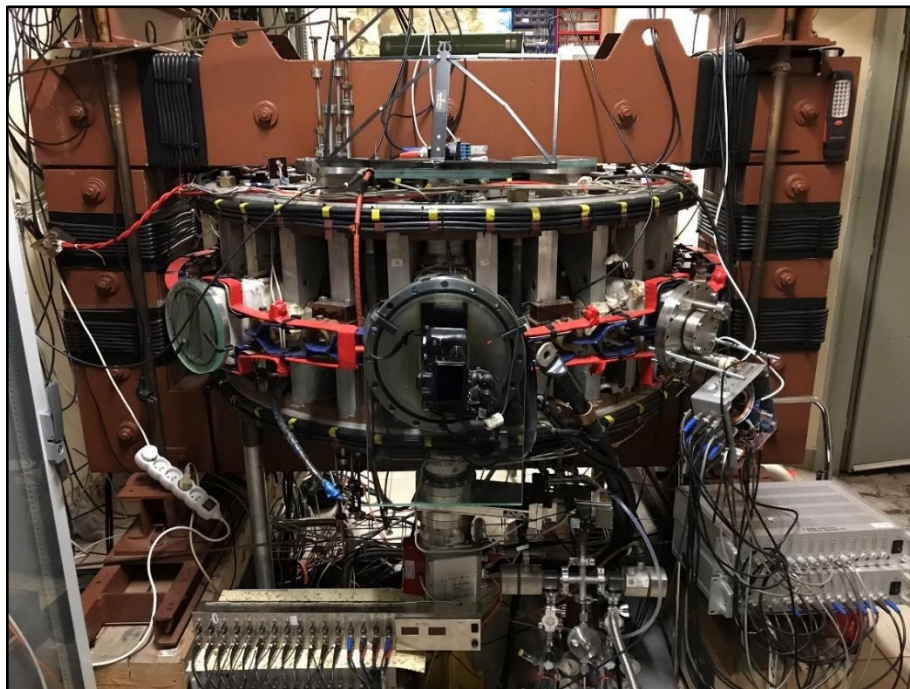
Saat temperatur meningkat, resistansi menurun dan pemanasan ohmic tidak lagi efektif. Untuk meningkatkan reaksi fusi, temperatur dari plasma haruslah lebih dari 100 juta derajat, yang mana ini enam kali lebih panas dari ini sebuah matahari. Panas ini dapat dicapai dengan berkas partikel (menginjeksi ion yang kuat) atau dengan frekuensi radio atau gelombang mikro (memanaskan ion atau elektron). Setelah proses *discharge* dimulai, gas tambahan dialirkan kembali



ke dalam ruang vakum untuk meningkatkan densitas dan atau tekanan untuk mencapai level yang diinginkan.

### 2.3.1 Tokamak GOLEM

Tokamak GOLEM beroperasi di Fakultas Fisika Nuklir dan Teknik Fisika (FNPPE), Czech Technical University di Praha. GOLEM merupakan tokamak berukuran kecil yang dibangun pada akhir 1950-an di Institut Kurchatov, Moskow dengan nama TM-1-MH. Tokamak ini dipindahkan ke Institut Fisika Plasma di Praha pada 1977 dan berubah nama menjadi CASTOR: Czech Academy of Science TORus, setelah direkonstruksi pada tahun 1985. Setelah 30 tahun beroperasi dan dinonaktifkan pada tahun 2006, CASTOR dipindahkan ke FNPPE dan diinstal ulang untuk kebutuhan edukasi bagi para mahasiswa yang kemudian berganti nama menjadi GOLEM yang ditunjukkan pada (Gambar 2.11).

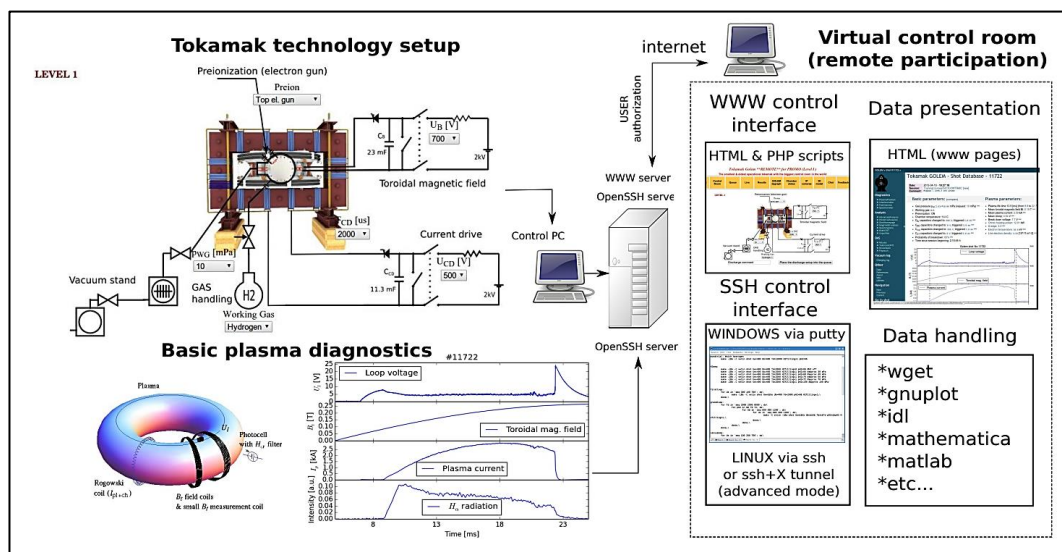


**Gambar 2.11 Tokamak GOLEM (Grover et al., 2016)**

Tokamak GOLEM memiliki penampang melingkar, dengan jari-jari wadah (*vessel*) utamanya berukuran  $R_0 = 0.4 \text{ m}$  dan *vessel minor*  $r_0 = 0.1$ . *Vessel* yang terbuat dari *stainless steel* dilengkapi dengan pembatas poloidal yang terbuat dari molibdenum, dengan jari-jari  $a = 0.085 \text{ m}$ . Tokamak memiliki fitur

yang dapat mengukur tegangan loop, arus plasma, medan magnet toroidal, dan emisi yang terlihat. GOLEM juga dilengkapi dengan kumparan Mirnov, spektrometer terlihat, serangkaian bolometer, kamera cepat, dan sebagainya. Tokamak beroperasi pada medan magnet toroidal maksimum hingga 0,5 T. Suhu pusat elektron kurang dari 100 eV, kepadatan garis rata-rata maksimum  $\sim 10^{19}\text{m}^{-3}$ , dan panjang pulsa maksimum sekitar 18 ms.

GOLEM sudah lama dikenal dengan operasionalnya yang dapat dilakukan dari jarak jauh. Pengukuran dan set-up tembakan untuk *discharge* dapat diatur melalui halaman website tokamak GOLEM (Gambar 2.12). Semua sistem telah diatur sedemikian rupa sehingga parameter yang diinput tidak akan merusak tokamak GOLEM. Sistem dilindungi dengan semacam token untuk mengaksesnya yang disediakan oleh operator untuk kegiatan-kegiatan tertentu. Pada eksperimen yang dilakukan untuk penelitian ini, operator akan mengirimkan link (URL) yang berisikan token untuk mengakses operasional tokamak dari jarak jauh.

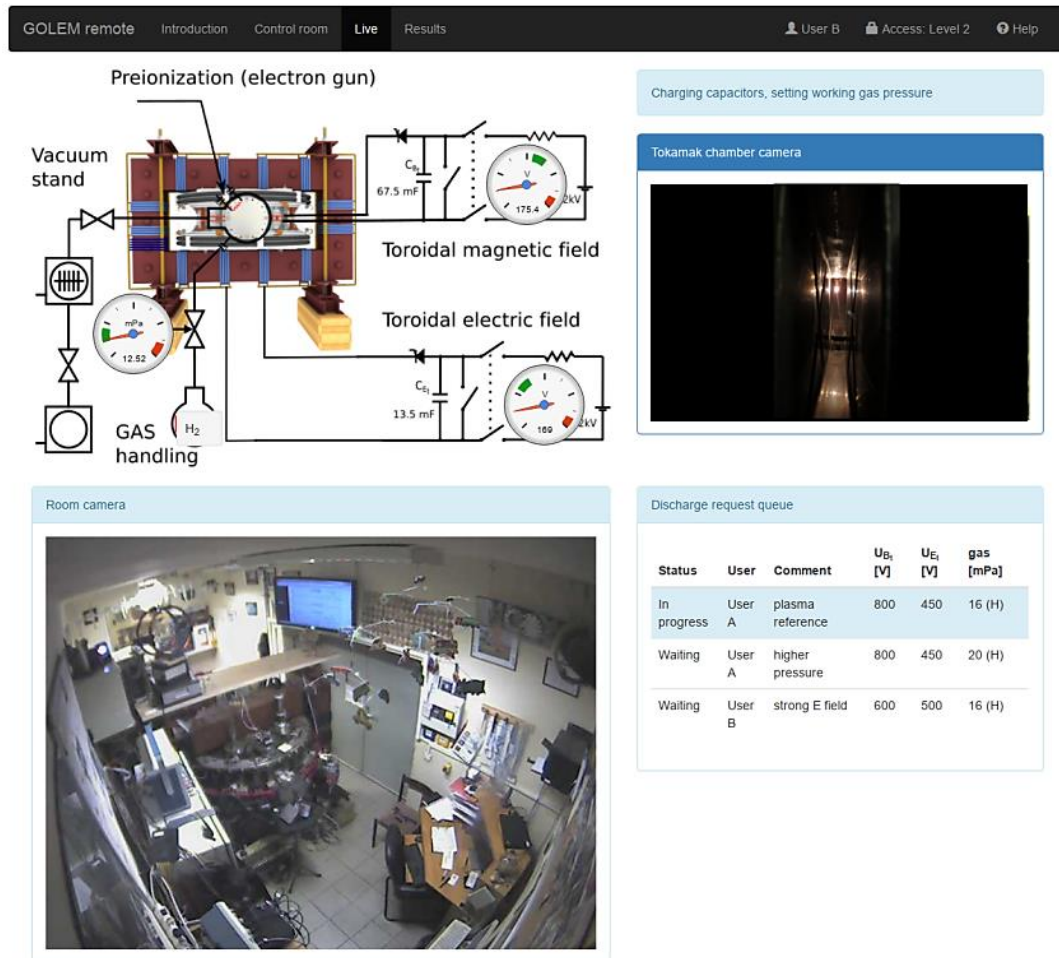


**Gambar 2.12** Skema menyeluruh dari eksperimen pada tokamak GOLEM (Grover et al, 2016)

Website Tokamak GOLEM memiliki beberapa fitur seperti (lihat Gambar 2.13):

- (i) **Home**, merupakan halaman yang memberikan sambutan dan penjelasan singkat terkait fasilitas yang dimiliki oleh Tokamak GOLEM,

- (ii) **GOLEM wiki**, bermuatkan dokumentasi, informasi terkait set-up dan parameter yang berhubungan dengan Tokamak GOLEM,
- (iii) **Control Room**, pada halaman ini pengguna dapat mengatur semua parameter yang dibutuhkan untuk pelepasan (*discharge*) dari eksperimen yang diinginkan (seperti,  $U_{BT}$ ,  $U_{CD}$ ,  $T_{CD}$ ,  $p_{WG}$ ,  $WG$ ) dan akan diteruskan ke antrian *discharge*.
- (iv) **Queue**, halaman untuk pengguna dapat memantau semua *discharge* dengan perkiraan waktu selesainya.
- (v) **Live**, halaman yang memperlihatkan kondisi terkini dari operasi tokamak, seperti tekanan terkini di dalam *vessel* (tangki) tokamak, status actual tokamak (antrian *discharge*, fase pra/dua/pasca *discharge*),
- (vi) **Result**, memuat basis data dari semua pengaturan yang telah diinput dengan lampiran tautan menuju halaman utama *discharge* yang sesuai.
- (vii) **IP camera**, halaman dengan dua bagian yakni (a) menyediakan tampilan *real-time* ke dalam ruang tokamak (b) tampilan tangki (*vessel*) di dalam, pengguna dapat melihat status *discharge* yang menyala, lampu filamen praionisasi menerangi *vessel* dalam fase pra-*discharge*, dan kilatan plasma selama *discharge* berlangsung.
- (viii) **Chat**, memberikan akses ke protokol IRC yang telah dipersiapkan sebelumnya, memungkinkan diskusi interaktif *many-to-many* atau *one-to-one*.

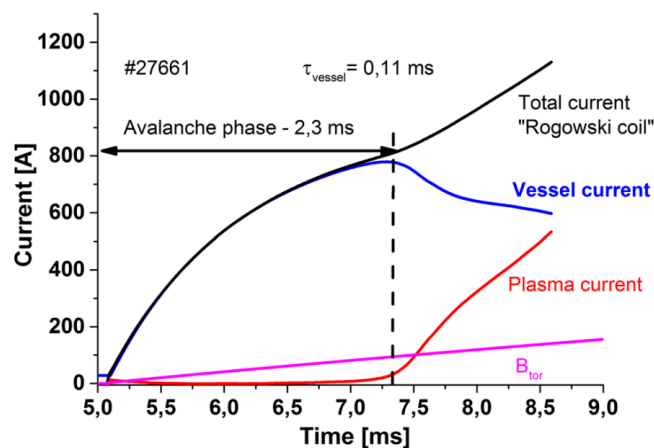


**Gambar 2.13** Tampilan website saat proses penembakan *discharge* tokamak GOLEM secara langsung (live) (Grover, 2019)

Pada bagian *control room* terdapat akses untuk mengatur tegangan pengisian bank kondensator yang digunakan untuk memberi daya pada gulungan medan toroidal ( $U_B$ ) dan gulungan primer transformator ( $U_{CD}$ ). Kemudian, waktu tunda (*time delay*) antara pulsa pemicu  $U_B$  dan  $U_{CD}$  juga dipilih sebelumnya ( $t_{CD}$ ). Selain itu, gas yang bekerja (Hidrogen atau Helium) dan tekanan pengisian ( $p_{WG}$ ) juga dipilih, serta jenis pra-ionisasi yang ingin digunakan (mikrowave atau *electron gun*). Tokamak ini dirancang untuk digunakan pada kelompok atau pengguna yang ingin meneliti dalam waktu yang bersamaan. Hal ini sangat dimungkinkan karena GOLEM memiliki kemampuan untuk melakukan operasi berulang setiap 2 menit, dan limit operasi hingga 200 lucutan (*discharge*) dalam satu hari (Grover, et al., 2016).

### 2.3.2 Fase *breakdown* pada tokamak

Kondisi *breakdown avalanche* merupakan tahap penting pada tahap awal pelepasan dalam pengoperasian tokamak agar dapat mencapai kinerja plasma yang baik. Tahap *start-up* dari suatu tokamak terdiri dari tiga fase yakni *breakdown* atau *avalanche*, *burn-trough phase* atau fase saat plasma cukup padat dan panas untuk mampu mempertahankan reaksi fusi sendiri, dan kenaikan arus plasma (*plasma current rump-up*). Fase *breakdown* dicirikan dengan rendahnya derajat ionisasi, namun didominasi oleh tumbukan antara elektron dan molekul netral. Arus plasma pada kondisi *breakdown avalanche* sangatlah rendah ditunjukkan oleh grafik (Gambar 2.14) dari salah satu *shot* dalam tahap awal (*start-up*) pada tokamak GOLEM.



**Gambar 2. 14** Evolusi tahap awal (*start-up*) pada tokamak GOLEM (Svoboda, 2019)

Untuk mencapai fase *breakdown* dibutuhkan beberapa syarat kondisi pada bagian *vacuum chamber* (ruang hampa). *Breakdown* pada tokamak secara umum bergantung pada parameter: nilai dan ukuran area dengan medan magnetik poloidal yang rendah, nilai medan magnetik toroidal, medan listrik toroidal, dan juga tekanan gas yang digunakan (Chektybayev, 2021). Berdasarkan pemodelan *breakdown* yang telah dilakukan oleh Song et al., (2017), elektron bebas mula-mula, akan dipercepat oleh medan listrik (E) toroidal dalam rentang waktu yang disebut waktu *breakdown* ( $\tau_{bd}$ ) hingga mencapai kondisi *avalanche*. Tedapat

beberapa peristiwa yang dapat memengaruhi  $\tau_{bd}$ , contoh umum adalah dari memburuknya kondisi dinding reaktor.

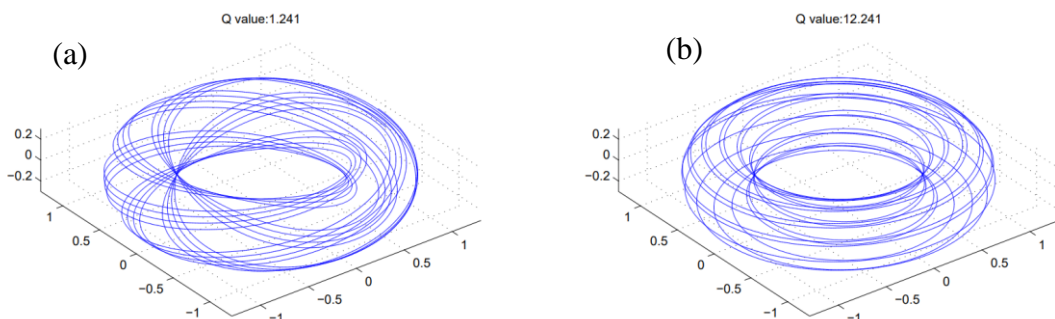
Teori *avalanche* Townsend pada sebuah tokamak dengan medan terbatas dan penerapannya pada awal ‘ITER-Design 1998’ (arus plasma 21 MA, radius utama 8,14m, radius minor 2,8 m, soleid sentral monolitik) menghasilkan formula untuk medan listrik minimum dari toroidal ( $E_{min}$ ) pada pertumbuhan proses *avalanche* dari gas  $H_2$  atau  $D_2$  atau  $T$  pada keadaan suhu kamar (300K) dengan tekanan  $p$  (Pa), untuk panjang *free-streaming*-elektron  $L$  (m), diberikan dengan persamaan:

$$E_{min} = 950p / \ln(3.88pL) \text{ Vm}^{-1} \quad (2.10)$$

Keadaan *breakdown* ideal harus memenuhi kriteria  $E \geq E_{min}$ . ITER diprediksi akan menghasilkan *breakdown avalanche* Townsend ‘Ohmic’ yang dapat diandalkan pada kondisi  $E_{min} = 0.3 \text{ Vm}^{-1}$ ,  $p = 1,4 \text{ mPa}$  ( $\approx 1.1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ ) dan  $L = 500 \text{ m}$  (Gribov et al., 2007).

### 2.3.2 Edge safety factor $q(a)$

Faktor keamanan tepi atau *edge safety factor*  $q(a)$  menyatakan jumlah putaran pada aksis toroidal untuk mencapai satu putaran aksis poloidal. Hal ini menggambarkan bagaimana bentuk medan magnetik yang berubah saat mulai mencapai bagian tepi tokamak. Secara sederhana, bentuk helix dari permukaan magnetik diwakili oleh  $q(a)$  yang diilustrasikan pada (Gambar 2.15).



**Gambar 2.15** Garis medan magnet di dalam tokamak untuk (a) nilai  $q(a)$  1,241 dan (b) nilai  $q(a)$  12,241 (Pokol et al., 2014)

Berdasarkan diagram Hugill, gangguan mulai terbentuk saat  $q(a) = 2$ , saat arus yang diberikan begitu besar nilai  $q(a)$  yang dihasilkan akan menurun yang mana hal ini mengindikasikan ketidakstabilan pada plasma atau dikenal dengan istilah *tearing mode* (Wesson, 1999).

#### 2.4 *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)*

Salah satu proyek besar yang melibatkan banyak negara untuk membangun tokamak adalah ITER. Beberapa negara yang berkontribusi dalam pembangunan ini adalah Uni Eropa, Jepang, China, India, Korea, USA, Russia. Ukuran ITER diperkirakan akan beberapa kali lebih besar dari ukuran tokamak yang ada saat ini. Design untuk pembangunan ITER telah disetujui pada tahun 2001 dan diperkirakan akan menghasilkan plasma pertama pada tahun 2025. ITER berlokasi di Uni Eropa tepatnya di situs penelitian Cadarache, kota Aix-en-Provence di bagian selatan Prancis.



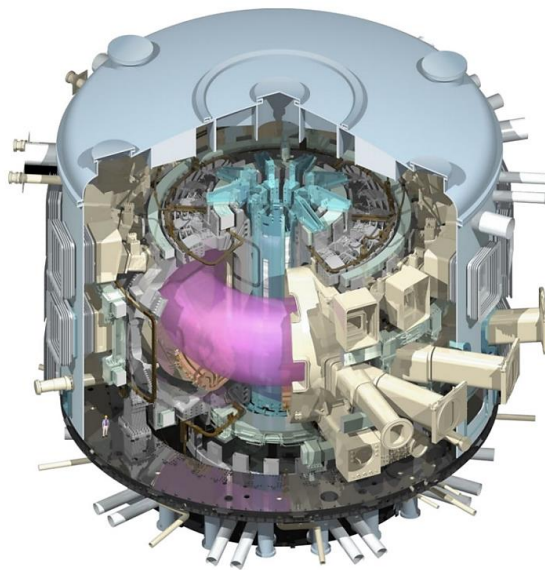
**Gambar 2.16** Situs lokasi ITER dibangun (a) bentuk rancangan asitektur dan (b) konstruksi aslinya (Dubus, 2014)

Tujuan dari pembangunan ITER adalah untuk mendemonstrasikan kelayakan secara saintifik dan teknologi untuk mewujudkan pemanfaatan energi fusi dengan tujuan perdamaian. Beberapa misi untuk mencapai tujuan tersebut adalah:

- Pertama, ITER harus menghasilkan daya yang lebih besar dari daya yang dikonsumsinya, caranya adalah dengan memproduksi energi fusi dengan *energy gain* ( $Q$ ) berada pada nilai sekitar 10 (setara dengan 500MW) selama beberapa ratus detik, dan  $Q$  lebih besar dari 5 hingga berkisar satu jam, sebagai perbandingan reaktor JET memiliki nilai  $Q < 1$ .

- Kedua, ITER harus memvalidasi design dasar untuk digunakan sebagai reaktor komersial di masa depan, dengan mendemonstrasikan penggunaan magnet superkonduktor dan pemeliharaan dari jarak jauh.
- Ketiga, ITER harus menguji konsep dari pembentukan tritium pada reaktor.

ITER akan membakar bahan bakarnya (deuterium-tritium) untuk menghasilkan daya sebesar 500MW dalam jangka waktu yang lama, dengan energi input sebesar 50MW. ITER memiliki berat 16 kali lipat dari tokamak sebelumnya (lebih dari 5000 ton) dan ukuran 2 kali lipat JET (hampir 30 meter), yang dilengkapi dengan magnet superkonduktor. Bentuk tokamak ITER diilustrasikan oleh (Gambar 2.17).



**Gambar 2.17 Ilustrasi dari tokamak ITER (Dubus, 2014)**

Central Solenoid (CS) dari ITER merupakan salah satu komponen penting yang akan menghasilkan arus kuat. Pada reaktor JET, CS menghasilkan arus plasma sekitar 5 MA dengan pulsa plasma mampu bertahan hingga 60 detik. Volume plasma pada ITER akan 8 kali lebih besar dari JET, maka dari itu energi magnetik yang dibutuhkan pada CS juga akan meningkat. Hal tersebut akan mampu mempertahankan kan arus plasma 15 MA dengan waktu berkisar 300-500 detik.



## 2.5 Model Townsend

Tabrakan pada plasma datang dari pergerakan ion dan elektron. Saat medan listrik ( $E$ ) diaplikasikan, ion akan dipercepat searah dengan arah  $E$ , sedangkan elektron akan bergerak ke arah berlawanan. Berdasarkan kecepatan elektron saat bertabrakan dengan atom, efek tabrakan ionisasi mungkin terjadi.

Energi rata-rata dari elektron menjadi bergantung dengan nilai medan listrik ( $E$ ), dan berbanding terbalik dengan nilai densitas ( $N$ ) (atau tekanan  $p$ , karena  $p = NkT$ ), sehingga (Magaldi et al., 2021):

$$\text{Energi} = \frac{E}{p} \quad (2.11)$$

Nilai rasio  $E/p$  ini, diartikan sebagai energi rata-rata yang diperoleh pada tabrakan antar elektron per satuan jarak bebas rata-rata partikel (*mean-free-path*), dan juga menentukan terjadinya perpecahan pada gas atau tidak.

Townsend memberikan model untuk peristiwa yang terjadi pada daerah Townsend (Gambar 2.12) dengan kasus elektroda plat sejajar bertekanan rendah. Model Townsend mengasumsikan bahwa pada setiap tabrakan yang terjadi yang disebabkan oleh medan listrik yang lebih besar dari potensial ionisasi atom (atau moleku) yang membentuk gas, elektron akan mentransfer seluruh energinya ke atom yang ditumbuk dan kemudian mengionisasinya dengan probabilitas dalam setiap tabrakan sama dengan 1. Faktor dari multiplikasi (perbanyak) elektron atau jumlah elektron ( $dn$ ) yang dihasilkan pada jarak ( $dx$ ) antara elektroda adalah sebanding dengan jumlah awal elektron ( $n$ ) dan jarak yang ditempuh ( $dx$ ), diwakili oleh persamaan berikut (Magaldi et al., 2021):

$$dn = \alpha n dx \quad (2.12)$$

yang kemudian mengarah pada pertumbuhan eksponensial  $n = n_0 e^{\alpha x}$ , dengan konstanta  $\alpha$  (koefisien pertama Townsend) merupakan angka untuk banyaknya ionisasi per satuan jarak,  $\alpha = \lambda^{-1}$  merupakan faktor perkalian gas yang diperkenalkan oleh Townsend. Kondisi pada atom dan elektron untuk dapat

bertabrakan dan memperoleh energi di atas dari energi potensial ionisasi partikel gas akan tercapai jika dapat memenuhi persamaan berikut (Magaldi et al., 2021):

$$eE\lambda_i \geq eV_i \quad (2.13)$$

dengan  $e$  merupakan muatan fundamental (elektron),  $E$  merupakan medan listrik,  $\lambda_i$  adalah jarak bebas rata-rata partikel (*mean-free-path*),  $V_i$  sebagai potensial dari ionisasi, sehingga:

$$\lambda_i = \frac{V_i}{E} \quad (2.14)$$

Koefisien pertama Townsend atau dilambangkan dengan konstanta  $\alpha$  yang mewakili banyak tabrakan yang terjadi per satuan jarak. Menurut Magaldi et al., 2021, Koefisien pertama Townsend memiliki hubungan dengan jarak bebas rata-rata partikel (*mean-free-path*) sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{\lambda_i}{\lambda}} \quad (2.15)$$

diketahui bahwa  $1/\lambda$  sebanding dengan tekanan ( $p$ ), dengan menggunakan persamaan (2.14), didapatkan (Magaldi et al., 2021):

$$\alpha = Ape^{-\frac{ApV_i}{E}} \quad (2.16)$$

dengan  $A$  merupakan konstanta untuk temperatur, dengan menganggap  $B = AV$ , persamaan menjadi (Magaldi et al., 2021):

$$\frac{\alpha}{p} = Ae^{-\frac{B}{E/p}} \quad (2.17)$$

dengan  $\alpha/p$  didefinisikan sebagai multiplikasi elektron yang terjadi per satuan jarak bebas rata-rata partikel (*mean-free-path*). Model Townsend menjelaskan tentang multiplikasi dari elektron dalam proses perpecahan (*rupture*) pada gas, dengan nilai  $A$  dan  $B$  (konstanta dari karakteristik gas yang digunakan), dan juga tegangan *breakdown*, hanya dapat ditentukan secara eksperimental (Magaldi et al., 2021).

## 2.6 Kurva Paschen

Fase *Breakdown* terjadi saat proses *avalanche* dapat berlangsung sendiri (tanpa tambahan tegangan dari luar). Hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan berikut (Chen, 2016):

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.20)$$

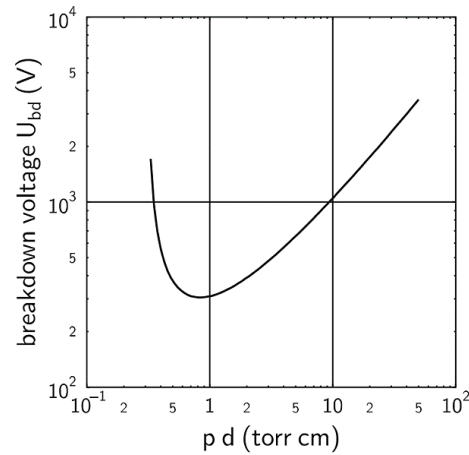
dengan  $\gamma$  (koefisien kedua Townsend) mewakili probabilitas terlepasnya elektron dari katoda akibat tumbukan ion, yang juga didefinisikan sebagai rasio dari fluks emisi elektron ke fluks ion yang datang dan  $\alpha$  (koefisien pertama Townsend) merupakan angka untuk banyaknya ionisasi per satuan jarak. Dengan menggunakan (Persamaan 2.20) dan (Persamaan 2.17), dan juga mendefinisikan  $U_{bd} = E_{bd}d$ , akan diperoleh hukum Paschen (Persamaan 2.21), yang dinamai dari Friedrich Paschen (1865–1947) (Chen, 2016).

$$U_{bd} = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)} \quad (2.21)$$

dengan,

$$C = \ln \left[ \frac{A}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right] \quad (2.22)$$

Banyaknya peristiwa ionisasi pada celah lucutan (*discharge gap*) sebanding dengan nilai densitas dari gas netral dan lebar ( $d$ ) celah. Kurva Paschen memiliki karakteristik minimum untuk menyatakan suatu kondisi optimal dari suatu plasma untuk setiap jenis gas yang digunakan. Hukum Paschen memberikan gambaran perilaku tegangan *breakdown* sebagai fungsi  $pd$ . Saat menggambarkan kurva tegangan *breakdown* ( $U_{bd}$ ) terhadap  $pd$  (tekanan yang dikali dengan lebar celah atau pada penelitian ini akan menjadi keliling dari tokamak GOLEM) akan diperoleh kurva yang dikenal dengan kurva Paschen (Gambar 2.18).



**Gambar 2.18** Tegangan *breakdown* ( $U_{bd}$ ) pada jenis gas udara sebagai fungsi  $pd$  ( $1 \text{ torr cm} = 1.33 \text{ Pa m}$ ) (Piel, 2010).

Bagian kiri kurva menunjukkan keberadaan atom yang terlalu sedikit untuk dimungkinkan terjadinya ioniasi, sedangkan di bagian kanan kurva menjelaskan bahwa jarak bebas rata-rata (*mean-free-path*) menjadi terlalu sempit untuk elektron dapat mempertahankan energi yang dibutuhkan sebelum melakukan ioniasi. Kedua kasus ini sama-sama membutuhkan solusi dengan cara menaikkan medan listrik untuk dapat membangkitkan tegangan *breakdown* yang lebih tinggi. Tegangan minimum akan bergantung dengan jenis dari material gas dan katoda yang digunakan.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Universitas Srinakharinwirot, Bangkok, Thailand, pada 29 Mei – 2 Juni 2023, dan di Laboratorium Fisika Plasma, Universitas Diponegoro, Semarang dari November hingga Desember 2023.

#### **3.2 Alat dan Bahan Penelitian**

Penelitian yang dilakukan berupa penelitian kuantitatif dengan menggunakan alat dan bahan:

##### **3.2.1 Alat penelitian**

###### **1. Tokamak GOLEM**

Tokamak digunakan sebagai reaktor tempat eksperimen berlangsung, terjadi proses pembentukan plasma dan reaksi fusi dengan fase *breakdown* menjadi salah satu bagian pada prosesnya.

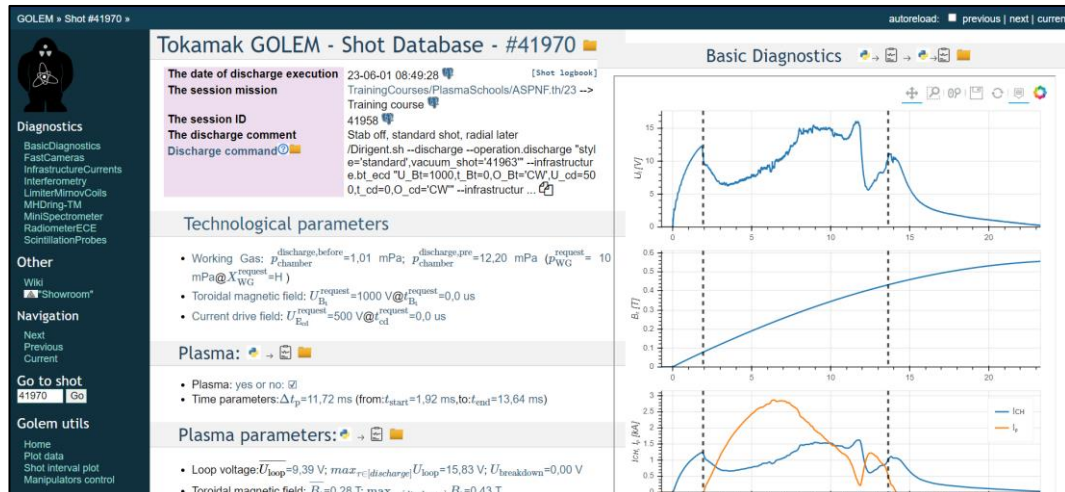
###### **2. Komputer**

Penelitian dilakukan secara *remote* (jarak jauh) dengan menggunakan komputer yang terhubung dengan internet, kemudian mengakses halaman website tokamak GOLEM. Komputer juga digunakan untuk mengumpulkan data hasil eksperimen yang tersimpan langsung secara otomatis 2 menit setelah *dicharge* berlangsung lihat (Gambar 3.1).

##### **3.2.2 Bahan penelitian**

Setelah proses berlangsung, kurang lebih 2 menit setelah lucutan (*discharge*), hasil eksperimen akan ditampilkan pada website database Tokamak GOLEM (Gambar 3.1) yang akan memberikan data informasi terkait nilai dari beberapa parameter seperti arus rata-rata plasma, tegangan (*loop voltage*) rata-rata, daya pemanasan Ohmic rata-rata, suhu elektron rata-rata selama proses *discharge* berlangsung, dan lain sebagainya. Beberapa data eksperimen yang

dikumpulkan terdiri dari 43 data primer dan 37 data sekunder yang semuanya diakses melalui website tokamak GOLEM yang bersifat *opensource*.



**Gambar 3.1** Tampilan website database Tokamak GOLEM untuk hasil eksperimen *discharge* No. 41970

### 3.3 Prosedur Penelitian

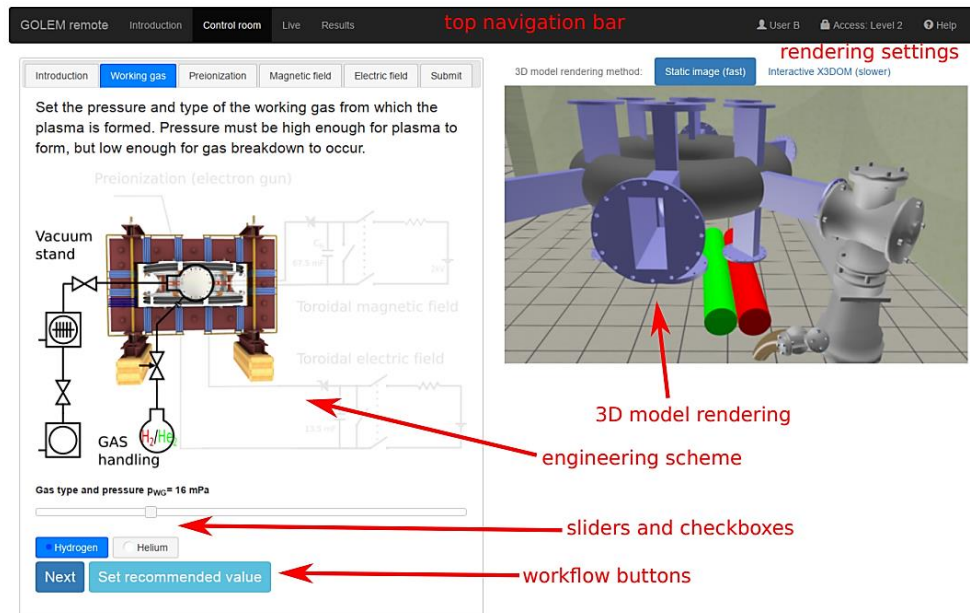
Prosedur penelitian ini akan dimulai dengan mempersiapkan komputer yang terhubung ke internet beserta izin dari kepala operator Tokamak GOLEM, menentukan parameter input eksperimen Tokamak GOLEM (gas yang digunakan, tekanan, tegangan toroidal, *delay time*, dll.), mengumpulkan data output dari website database Tokamak GOLEM, dan analisis data.

#### 3.3.1 Persiapan komputer (sebagai *remote control* dari GOLEM)

Setelah mendapat izin dari kepala operator Tokamak GOLEM, persiapan diawali dengan menghubungkan komputer dengan koneksi internet. Selanjutnya mengakses website Tokamak GOLEM. Setiap peserta atau grup yang ingin melakukan eksperimen akan diberikan kode khusus untuk dapat mengakses ruang kendali (*control room*) pada website yang terhubung ke Tokamak GOLEM (Gambar 3.1).

Terdapat beberapa akses atau parameter yang diatur pada bagian *control room* di website tokamak GOLEM, diantaranya lihat (Gambar 3.1):

- **Introduction:** Bagian ini berisikan penjelasan singkat tentang prosedur konfigurasi dan menunjukkan skema lengkap dari teknik dan juga visualisasi tokamak GOLEM.
- **Working gas:** Pada bagian ini akan ditentukan nilai tekanan gas (dalam satuan mPa) dan juga jenis gas (Hidrogen atau Helium) yang akan digunakan lihat (Gambar 3.1).
- **Pre-ionization:** Pemilihan metode pra-ionisasi (*electron gun* dihidupkan/dimatikan) dilakukan pada bagian ini. *Electron gun* akan mengionisasi sebagian gas yang selanjutnya digunakan untuk membentuk plasma.



**Gambar 3.2** Tampilan saat mengatur input eksperimen melalui website tokamak GOLEM (Grover, 2019)

- **Magnetic field:** Bagian ini akan memuat pengaturan untuk besar tegangan  $U_{Bt}$  (dalam satuan Volt) pada kapasitor yang akan dialirkan menuju coil medan toroidal. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, maka medan magnet yang menahan plasma akan semakin besar.
- **Electric field:** Pada bagian ini nilai tegangan  $U_{CD}$  untuk dialirkan menuju lilitan transformator primer diatur. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka medan listrik yang.

- **Submit:** Tahap terakhir di mana seluruh parameter *discharge* yang telah diatur selanjutnya dikirim ke daftar antrian untuk selanjutnya dilakukan eksekusi. Setelah pengiriman antrian berhasil akan muncul kotak hijau yang menginformasikan nomor antrian dan estimasi waktu sebelum eksekusi dilakukan.

Setelah mengatur nilai parameter sesuai keinginan pada *control room* melalui website Tokamak GOLEM, tokamak akan bekerja sesuai perintah. Proses yang berlangsung dapat dilihat secara langsung (*live*) pada website, yang akan menampilkan proses kilatan dari *discharge* plasma yang terjadi di dalam tokamak, jenis dan nilai input yang digunakan, antrian dari permintaan *shot* berikutnya, dan juga ruang penyimpanan tokamak yang akan terlihat secara langsung (lihat Gambar 2.13 pada halaman 22).

### 3.3.2 Menentukan parameter input tokamak GOLEM

Parameter yang akan diatur pada penelitian ini temuat pada (Tabel 3.1).

**Tabel 3.1 Parameter yang dapat diatur secara remote pada tokamak GOLEM**

Parameter yang dapat diatur dari jarak jauh ( <i>remote</i> )	Nilai maksimum	Nilai masukkan
Besaran tegangan untuk memberi daya pada kumparan toroidal ( $U_{BT}$ )	1300 V	$900 \leq U_{BT} \leq 1000 V$
Besaran tegangan untuk memberi daya kumparan inti transformator ( $U_{CD}$ )	700 V	$350 \leq U_{CD} \leq 500 V$
<i>Time delay</i> ( $T_{CD}$ )	20 ms	$0 \leq T_{CD} \leq 0,5 ms$
Tekanan dari gas yang bekerja ( $p$ )	50 mPa	$0 \leq p \leq 40 mPa$
Pra-ionisasi elektron- <i>gun</i>	<i>On/Off</i>	<i>On</i>
Gas yang bekerja	$H_2/He$	$H_2$

Parameter yang ditetapkan atau konstan untuk setiap *discharge* pada eksperimen ini adalah jenis gas yang bekerja (hidrogen atau  $H_2$ ), pra-ionisasi dengan menggunakan *electron-gun* (*on*), dan dengan mengatur parameter sisanya (Tabel 3.1) sesuai dengan rentang nilai yang direkomendasikan.



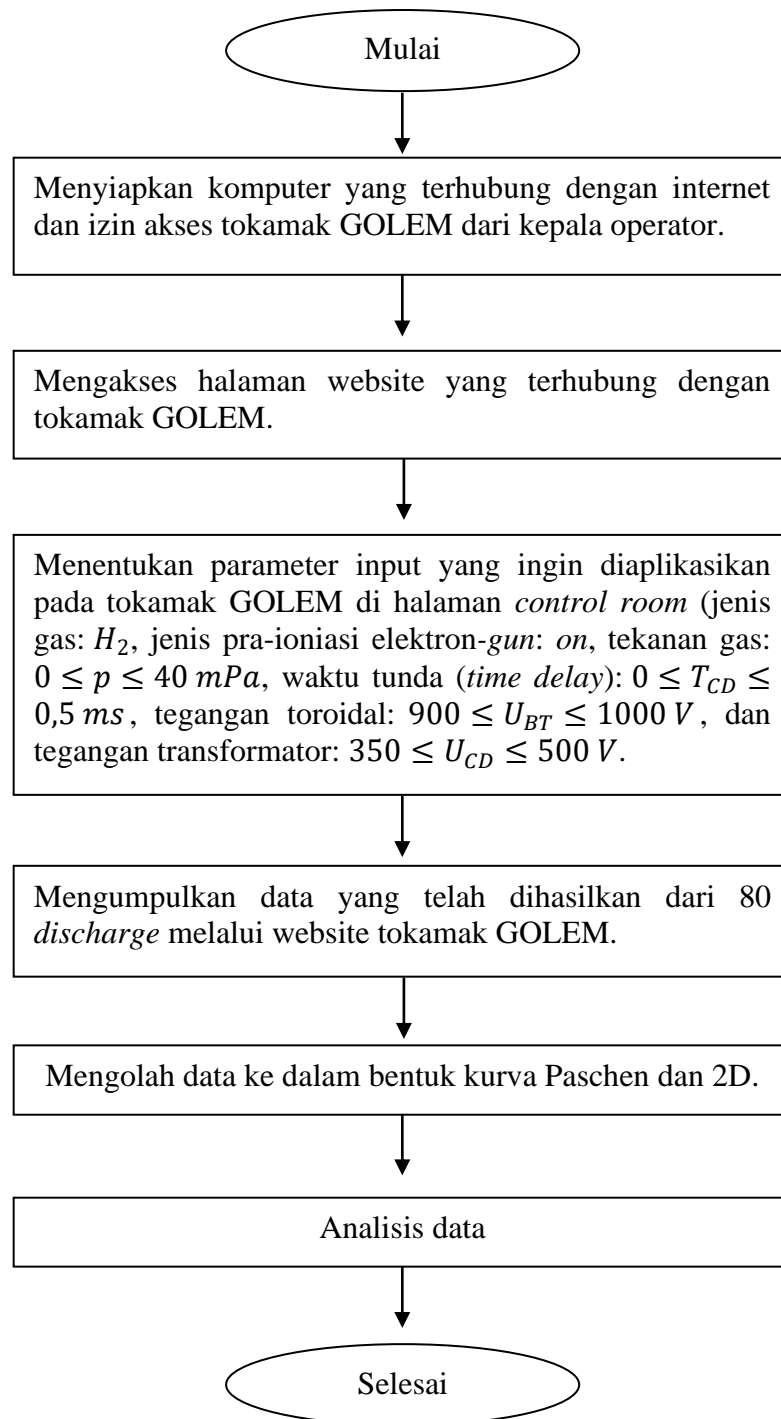
### 3.3.3 Analisis data

Penelitian kali ini akan menggunakan parameter input berupa: jenis gas hidrogen ( $H_2$ ), jenis pra-ioniasi elektron-*gun* yang diaktifkan (*on*), tekanan gas pada rentang ( $0 \leq p \leq 40$ ) *mPa*, waktu tunda antara kapasitor  $U_{BT}$  dan  $U_{CD}$  (*time delay*) ( $0 \leq T_{CD} \leq 0.5$ ) *ms*, tegangan toroidal ( $900 \leq U_{BT} \leq 1000$ ) *V*, dan tegangan yang diaplikasikan pada lilitan primer inti transformator ( $350 \leq U_{CD} \leq 500$ ) *V*. Data output yang akan dikumpulkan berupa nilai: durasi discharge ( $T_{dis}$ ), arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ), tegangan *breakdown* ( $V_{BD}$ ).

Penelitian menggunakan 80 data *discharge* yang tersimpan di database website Tokamak GOLEM, dengan 43 diantaranya merupakan data primer yang diinput langsung pada saat eksperimen, dan 37 sisanya adalah data sekunder yang diakses melalui database tokamak GOLEM yang bersifat *opensource*. Semua data termuat pada (Lampiran A) dengan data primer berada pada No. 33-75 pada tabel.

Nilai dari durasi discharge ( $T_{dis}$ ), arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ), dan tegangan *breakdown* ( $V_{BD}$ ) yang dihasilkan pada setiap discharge akan dikumpulkan satu persatu hingga terkumpul sampai 80 data untuk masing-masing parameter pada setiap dischargenya. Selanjutnya data akan dimasukkan ke lembar kerja Excel dan diplot ke dalam bentuk grafik menggunakan *software* Origin. Selanjutnya akan dilakukan analisis terkait pengaruh tekanan gas dan tegangan inti transformator terhadap fase *breakdown*, durasi discharge dan arus plasma maksimum pada tokamak GOLEM.

### 3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

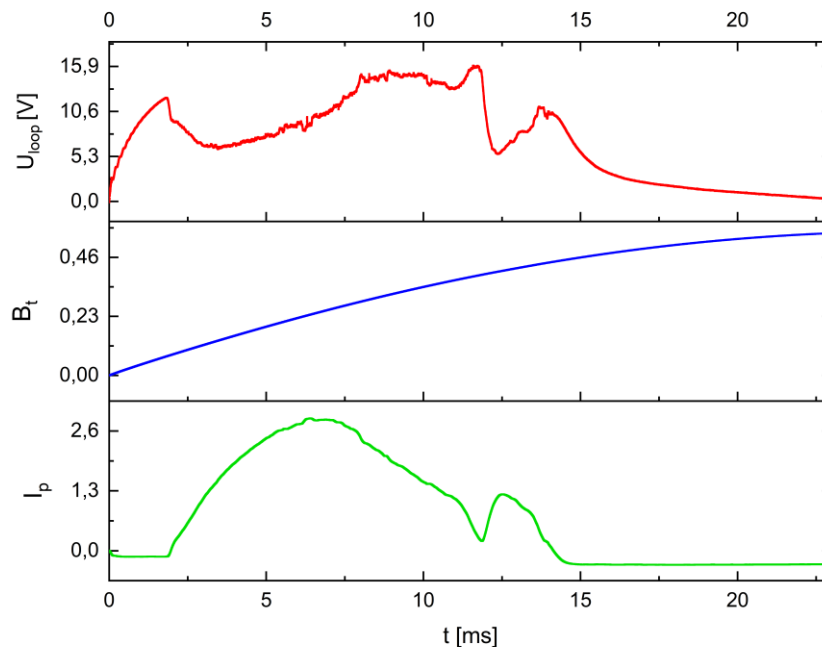
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Parameter yang Digunakan untuk Melihat Keadaan *Breakdown*.

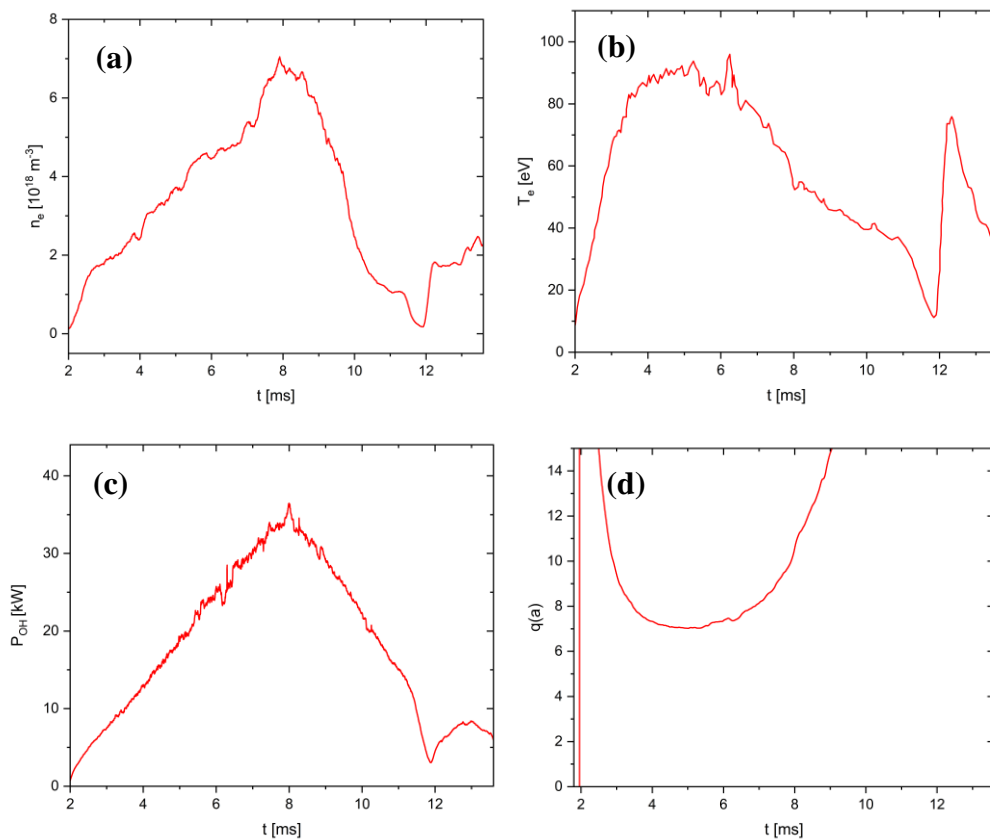
Penelitian ini telah dilakukan dengan menetapkan beberapa parameter input seperti: jenis gas yang digunakan adalah  $H_2$ , jenis pra-ionisasi elektron-*gun* yang diaktifkan (*on*), tekanan gas diberikan pada rentang ( $0 \leq p \leq 40$ ) *mPa*, waktu tunda antara kapasitor  $U_{BT}$  dan  $U_{CD}$  (*time delay*) ( $0 \leq T_{CD} \leq 0.5$ ) *ms*, tegangan toroidal ( $900 \leq U_{BT} \leq 1000$ ) *V*, dan tegangan yang diaplikasikan pada lilitan primer inti transformator ( $350 \leq U_{CD} \leq 500$ ) *V*.

Penelitian ini menggunakan 80 data *discharge* yang tersimpan di database website Tokamak GOLEM, dengan 43 diantaranya adalah data primer dan 37 sisanya adalah data sekunder (termuat pada Lampiran A: No. 33-75). Berikut salah satu contoh data yang dihasilkan pada eksperimen ini (Gambar 4.1).



**Gambar 4.1** Grafik perubahan tegangan loop ( $U_{loop}$ ), medan magnet toroidal ( $B_t$ ) dan arus plasma ( $I_p$ ) terhadap waktu, discharge (No. 41970)

Parameter yang ditetapkan pada *discharge* ini (No. 41970) berupa: gas hidrogen dengan tekanan *requested* 10 mPa;  $U_{BT} = 1000\text{ V}$ ;  $U_{CD} = 500\text{ V}$ , dan waktu tunda antara bank kapasitor  $U_{BT}$  dan  $U_{CD}$  (*time delay*) sebesar  $0\text{ ms}$ . Dilakukan tiga dasar pengukuran (Gambar 4.1) yang dihitung pada setiap *discharge*, tegangan loop, medan magnet toroidal, dan arus plasma. Data untuk parameter, durasi *discharge*, arus maksimum plasma, tegangan *breakdown*, dan medan magnet toroidal pada keadaan *breakdown* akan terekam dan tersimpan secara otomatis. Gambar 4.2 menunjukkan beberapa parameter yang dihasilkan secara otomatis pada diagnosis eksperimen ini: densitas plasma ( $n_e$ ), temperatur elektron ( $T_e$ ), pemanasan ohmic ( $P_{OH}$ ), dan *edge safety factor* ( $q(a)$ ).



**Gambar 4.2** Perubahan sementara pada (a) densitas plasma ( $n_e$ ), (b) temperatur elektron ( $T_e$ ), (c) pemanasan ohmic ( $P_{OH}$ ), dan (d) *edge safety factor* ( $q(a)$ ) pada *discharge* (No. 41970)

Tokamak GOLEM tidak memiliki instrumen untuk mengukur densitas plasma, namun densitas diukur menggunakan pendekatan hukum gas ideal, yang menghasilkan densitas maksimum sekitar  $6,195 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (Gambar 4.2.a). Kondisi breakdown pada tokamak GOLEM membutuhkan densitas plasma sekitar  $\sim(10^{17} - 10^{18})$  (Siusko, 2021). Resistivitas dari plasma yang terionisasi penuh bergantung pada temperatur elektron dan nomor muatan efektif ( $Z_{eff}$ ) (sejauh mana partikel dalam plasma berinteraksi dengan medan listrik dan magnetik). Plasma yang berada di tengah pusat reaktor memiliki suhu yang lebih tinggi, dan resistivitas yang rendah dengan kerapatan arus yang lebih tinggi, membuat perhitungan temperatur elektron menjadi tidak jelas. Temperatur elektron ( $T_e$ ) dihitung menggunakan persamaan resistivitas Spitzer, yang menghasilkan nilai maksimum pada *discharge* ini pada 96,133 eV (Gambar 4.2.b). Pemanasan ohmic yang terjadi pada tokamak GOLEM berasal dari arus yang mengalir melalui konduktor dengan resistivitas tertentu. Pemanasan ohmic maksimum pada *discharge* ini mencapai 39,876 kW (Gambar 4.2.c) yang dapat diukur dengan persamaan berikut:

$$P_{OH} = U_{loop} \times I_p \quad (4.1)$$

Faktor keamanan tepi atau *edge safety factor* ( $q(a)$ ) akan mencapai nilai 1 saat arus plasma begitu tinggi, saat  $q(a)$  mulai menyentuh nilai 2 plasma mulai menjadi tidak stabil. Pada eksperimen ini  $q(a)$  rata-rata memperoleh nilai 22,114 atau berada di atas nilai 7 (Gambar 4.2.d) yang mana sangat stabil karena arus yang digunakan relatif rendah. Faktor keamanan tepi  $q(a)$  dapat diperoleh dengan menggunakan hukum Ampere, sebagai berikut:

$$B_p(a, t) = \frac{\mu_0 I_p(t)}{2\pi a} \quad (4.2)$$

dengan mensubstitusinya ke persamaan faktor keamanan untuk tokamak dengan rasio keliling yang besar seperti GOLEM menjadi:

$$q(r, t) = \frac{r B_t(t)}{R B_p(r, t)} \quad (4.3)$$

diperoleh persamaan untuk faktor keamanan tepi menjadi:

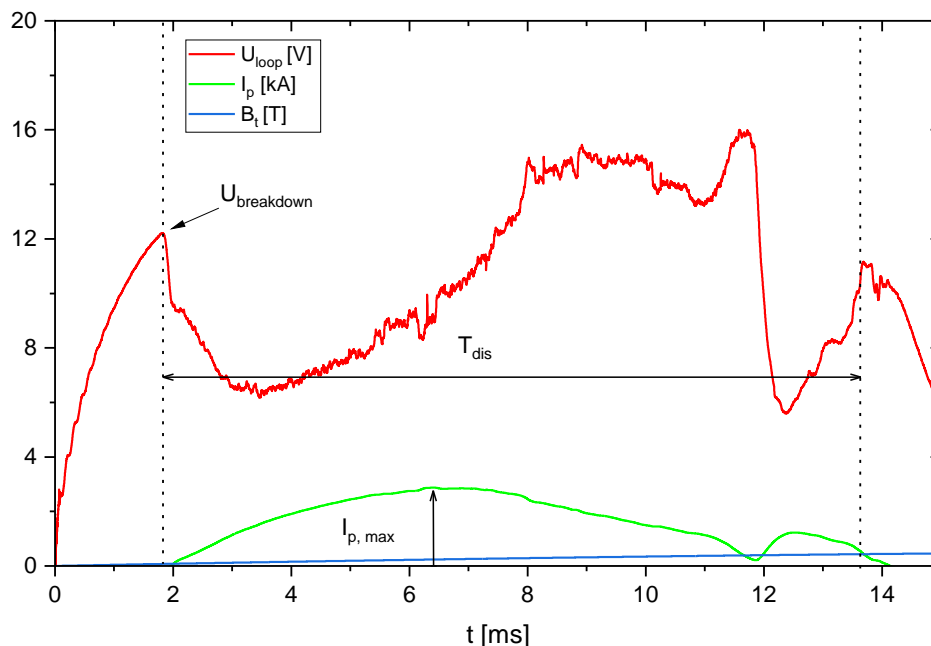
$$q(r, t) = \frac{a_0 2 B_t(t)}{R_0 \mu_0 I_p(t)} \quad (4.4)$$

dengan  $a_0 = 0,085$  merupakan radius dari pembatas poloidal,  $R_0 = 0,4 m$  merupakan radius major dari *vessel*,  $B_t$  merupakan medan magnet toroidal,  $I_p$  merupakan arus plasma, dan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} m/A$  yang merupakan konstanta permeabilitas magnetik.

#### 4.2 Kurva Paschen pada Fase *Breakdown* Tokamak GOLEM

Setelah parameter input ditetapkan dan masuk ke antrian untuk dilakukan eksekusi, tokamak GOLEM kemudian akan dipompa hingga mencapai tekanan sekitar  $(10^{-4} - 10^{-3}) Pa$ . Bagian *vacum vessel* pada tokamak akan dipanaskan hingga  $\sim 180^\circ C$  selama 60 menit, dan kemudian pembersihan dengan emisi discharge dari partikel Helium diaplikasikan selama 30 menit untuk membersihkan molekul yang tidak murni (*impurity molecuels*) dari bagian dalam dinding *vessel* tokamak GOLEM.

Data dari semua parameter mulai tersimpan pada waktu  $t = 0 ms$  (Gambar 4.3). Kapasitor akan bekerja setelah waktu tunda ( $0 ms$ ) untuk memberikan daya pada gulungan primer transformator yang selajutnya akan digunakan untuk menghasilkan tegangan loop ( $U_{loop}$ ). Peningkatan tegangan loop akan mempercepat elektron yang dihasilkan dari sumber pre-ionisasi menggunakan filamen tungsten yang kemudian menghasilkan elektron (elektron *gun*) yang kemudian proses tersebut menyebabkan peristiwa ionisasi *avalanche*.



**Gambar 4.3 Durasi discharge dan arus plasma maksimum (No. 41970)**

Setelah selang beberapa waktu ( $1 - 2 \text{ ms}$ ), kepadatan atau densitas plasma akan menjadi cukup tinggi yang kemudian terjadi keadaan *breakdown* pada plasma dengan diiringi kenaikan arus plasma. Pada keadaan *breakdown*, tegangan loop akan berada pada keadaan maksimum sebelum turun kembali karena kenaikan arus plasma, penurunan ini disebabkan oleh hambatan (*resistance*) yang menurun. Arus plasma terus meningkat karena tidak ada system untuk mengontrol keadaan ini pada Tokamak GOLEM. Selang waktu dari mulai terjadinya *breakdown* hingga hilangnya arus plasma disebut sebagai durasi *discharge* ( $T_{dis}$ ) pada (Gambar 4.3) plasma mampu bertahan selama  $11,72 \text{ ms}$ . Selama proses *discharge* berlangsung, arus plasma meningkat dan mencapai titik maksimumnya ( $I_{p, max}$ ) yang mana pada eksperimen ini bernilai  $2,87 \text{ kA}$ .

#### 4.2.1 Daerah Townsend *avalanche*

Daerah Townsend dimulai dari saat diaplikasikannya tegangan loop hingga mencapai titik *breakdown* atau yang biasa disebut sebagai fase Townsend *avalanche*, atau secara sederhananya adalah proses menuju keadaan *breakdown*. Pada *discharge* (No. 41970) dibutuhkan waktu  $1,8 \text{ ms}$  untuk mencapai keadaan

*breakdown* atau durasi saat proses Townsend *avalanche* berlangsung. Tegangan loop mulai diaplikasikan pada  $t = 0$  menyebabkan percepatan pada elektron sepanjang garis medan magnet oleh medan listrik toroidal sebesar:

$$E_t = \frac{U_{loop}}{2\pi R} \quad (4.5)$$

Kecepatan drift elektron yang bergerak sepanjang medium yang terpengaruh medan listrik menjadi:

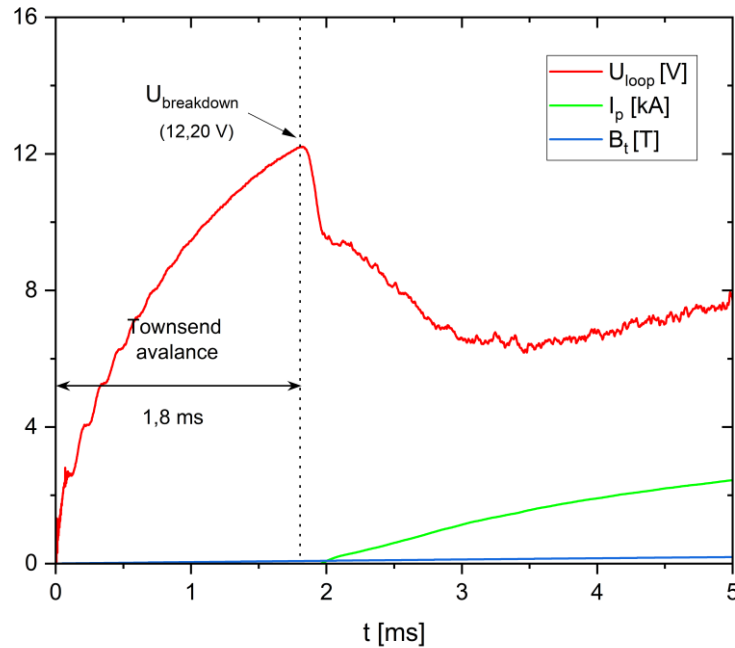
$$v_D = \frac{E_t}{p} \quad (4.6)$$

dengan  $p$  merupakan tekanan pada gas hidrogen. Saat energi elektron mampu melepaskan ikatan (ionisasi) atom molekul dari atom/molekul gas hidrogen, kepadatan (densitas)  $n_e$  dari plasma akan meningkat yang juga menyebabkan terjadinya peningkatan arus plasma pada  $t = 2 \text{ ms}$ , sesuai dengan:

$$I_p \sim n_e v_D \quad (4.7)$$

Arus plasma pada keadaan awal meningkat secara lambat karena kehilangan partikel bermuatan yang diakibatkan medan magnet yang menyimpang/diinginkan (*stray magnetik field*) yang menyebabkan tumbukan antara partikel lalu mengubah lintasannya di sepanjang medan magnet yang kemudian menghambat pergerakan muatan. Ketidakmurnian pada plasma juga menjadi penyebab hilangnya partikel bermuatan. Ketidakmurnian dapat disebabkan oleh partikel bermuatan yang mengionisasi material dinding (Zhou, 2019).





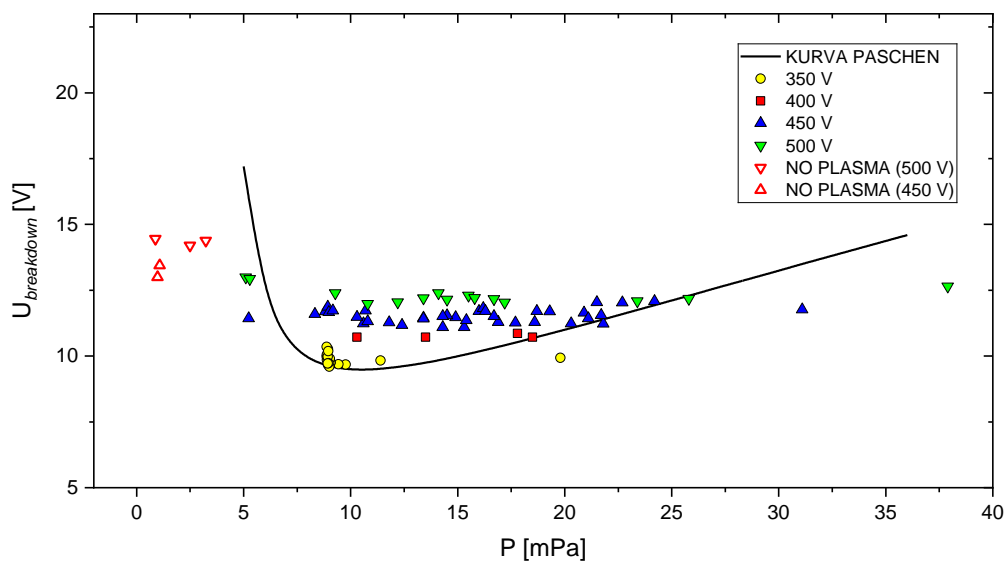
**Gambar 4.4 Fase Townsend avalanche pada discharge (No. 41970)**

Plasma dengan kondisi ketidakmurnian yang tinggi akan menyebabkan peningkatan pada resistivitasnya sehingga mendukung terjadinya peningkatan pada tegangan loop dan juga pemanasan ohmic. Seiring dengan kenaikan densitas elektron bebas yang dihasilkan selama proses Townsend *avalanche*, partikel bermuatan akan bergerak lebih bebas pada plasma dan menyebabkan penurunan resistivitas pada plasma. Penurunan resistivitas juga disebabkan oleh penampang lintang (*cross-section*) interaksi elektron dan ion yang lebih kecil jika dibandingkan dengan penampang lintang dari elektron dan atom (hidrogen). Resistivitas yang menurun akan menyebabkan menurunnya tegangan loop dan meningkatkan arus pada plasma sesuai dengan hukum Ohm:

$$I_{plasma} = \frac{U_{loop}}{R_{plasma}} \quad (4.8)$$

#### 4.2.2 Kurva Paschen

Hasil dari setiap tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ ) yang terjadi pada 80 *discharge* dirangkum ke dalam bentuk 2D pada (Gambar 4.5). Tegangan *breakdown* minimum terjadi pada daerah (7 – 15) *mPa*, untuk setiap variasi tegangan yang diaplikasikan pada inti transformator ( $U_{CD} = 350 - 500$ ).



**Gambar 4.5** Hubungan antara tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ ) dan tekanan pada kurva Paschen untuk setiap jenis  $U_{CD}$

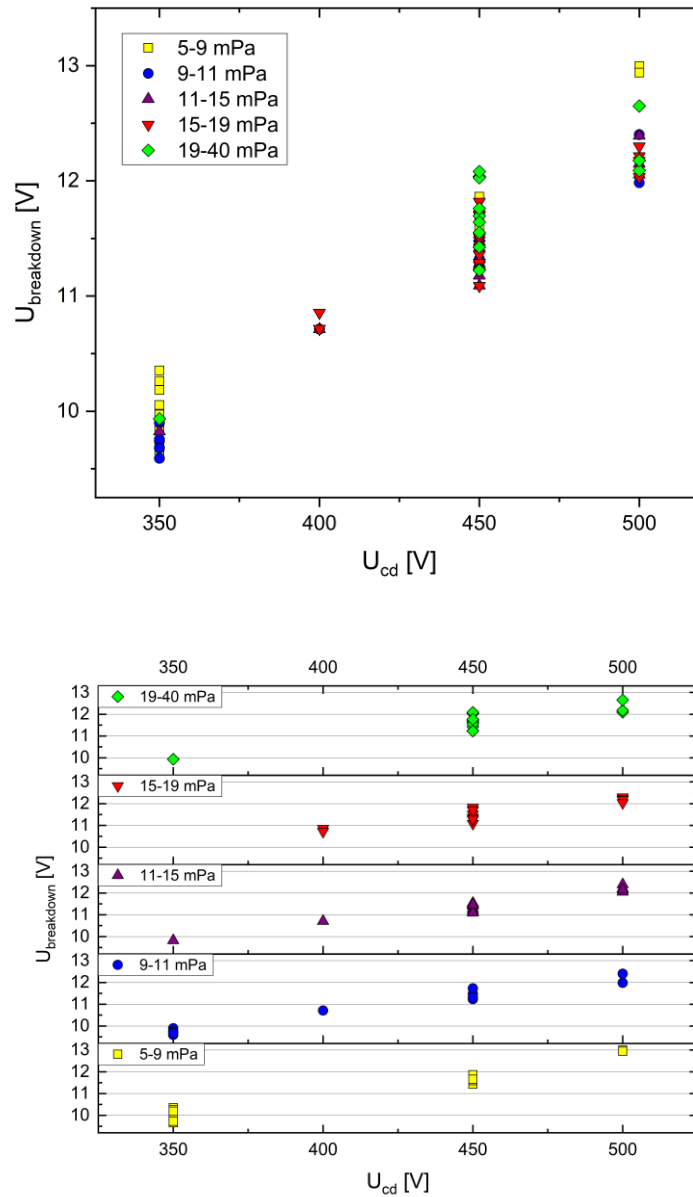
Pada daerah ( $P < 5$  *mPa*) tidak ditemukan adanya tegangan *breakdown* yang terjadi, hal ini dikarenakan tekanan yang terlalu rendah menyebabkan rendahnya nilai *cross-section* atau kemungkinan bertumbuknya elektron yang dihasilkan oleh elektron-*gun* dengan atom gas hidrogen untuk dapat terjadi ionisasi pada elektron penyusun atom, sehingga tegangan *breakdown* yang dibutuhkan akan menjadi sangat tinggi untuk memungkinkan hal tersebut untuk terjadi dan dibuktikan oleh kenaikan tegangan *breakdown* untuk setiap jenis  $U_{CD}$  saat mulai mendekati bagian daerah ( $P < 5$  *mPa*) (Gambar 4.5). Tegangan yang dibutuhkan pada daerah ( $P > 20$  *mPa*) juga akan membutuhkan tegangan yang lebih tinggi karena tekanan yang dimiliki oleh gas hidrogen akan menyebabkan penyempitan ruang untuk elektron bergerak dari elektron-*gun* dan mengumpulkan energinya hingga mampu mengionisasi atom pada gas hidrogen, hal ini pun

dibuktikan pada (Gambar 4.5) dengan meningkatnya tegangan *breakdown* seiring peningkatan tekanan gas untuk setiap jenis  $U_{CD}$ . Data yang termuat pada (Gambar 4.5) terbukti konsisten mengikuti garis kurva dari hukum Paschen untuk tegangan *breakdown*, didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$U_{breakdown} = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)} \quad (4.9)$$

dengan  $B = 0,36107$  dan  $C = -2,2673$  merupakan konstanta yang ditentukan oleh karakteristik gas yang digunakan dan juga tegangan *breakdown* yang dihasilkan pada eksperimen ini,  $p$  merupakan tekanan gas,  $d$  merupakan jarak antara lintasan yang dilalui oleh partikel katoda ke anoda, atau merupakan keliling dari tokamak GOLEM, yakni  $2\pi R = 2,513274 \text{ m}$  dengan  $R$  sebagai radius major dari tokamak GOLEM yakni  $0,4 \text{ m}$ .

Tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ ) minimum yang dihasilkan pada setiap  $U_{CD}$  menghasilkan nilai yang berbeda beda untuk setiap kenaikannya (50 V) dibuktikan pada (Gambar 4.5) dan (Gambar 4.6), yang mana  $U_{breakdown}$  mengalami kenaikas seiring dengan kenaikan dari  $U_{CD}$  yang digunakan.

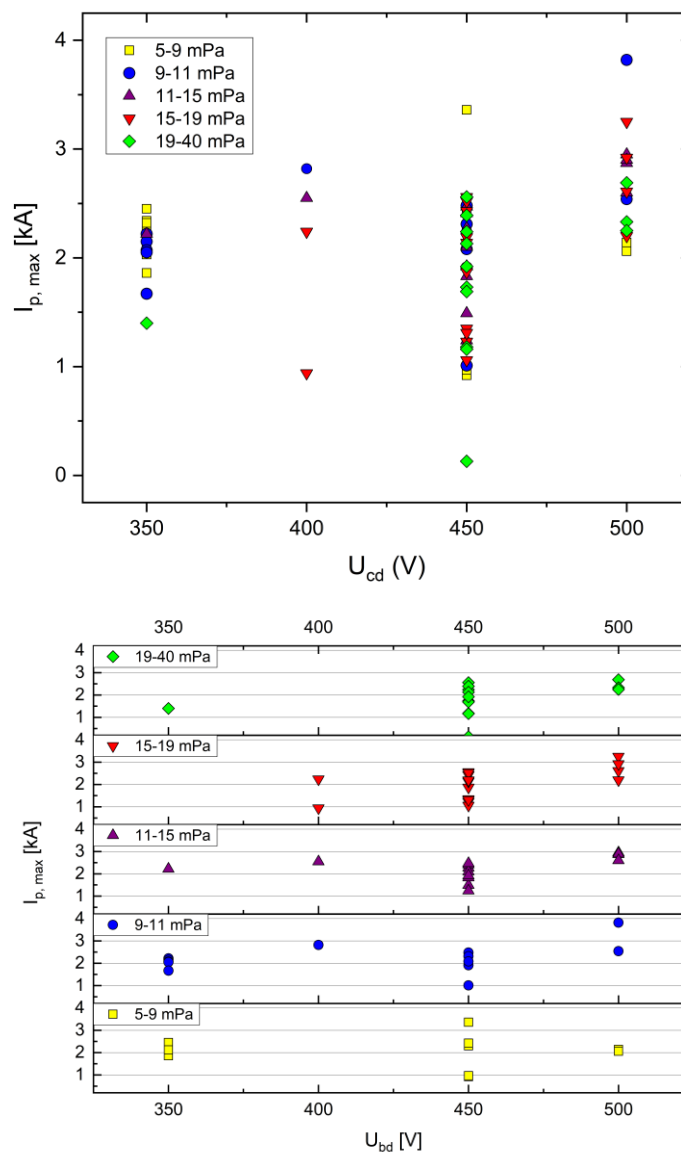


**Gambar 4.6 Hubungan tegangan yang bekerja pada inti transformator GOLEM ( $U_{CD}$ ) dengan tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ )**

Nilai tegangan *breakdown* tertinggi (Gambar 4.6) berada pada 12,996 V dengan tegangan yang diaplikasikan pada inti transformator sebesar 500 V. Meningkatnya tegangan *breakdown* gas hidrogen ini mengikuti hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik.

$$\varepsilon \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4.10)$$

dengan  $\varepsilon$  sebagai tegangan induksi,  $\Delta\Phi$  perubahan medan magnet. Saat tegangan ( $U_{CD}$ ) diinduksikan ke inti transformator (*primary winding*), medan magnet yang mengalir akan berbanding lurus dengan nilai tegangan tersebut. Saat medan magnet meningkat akan menyebabkan meningkatnya tegangan pada plasma (*secondary winding*) sesuai dengan hukum Ampere pada persamaan (4.2). Hal ini juga yang menyebabkan peningkatan arus plasma maksimum seiring dengan kenaikan  $U_{CD}$  (Gambar 4.7).



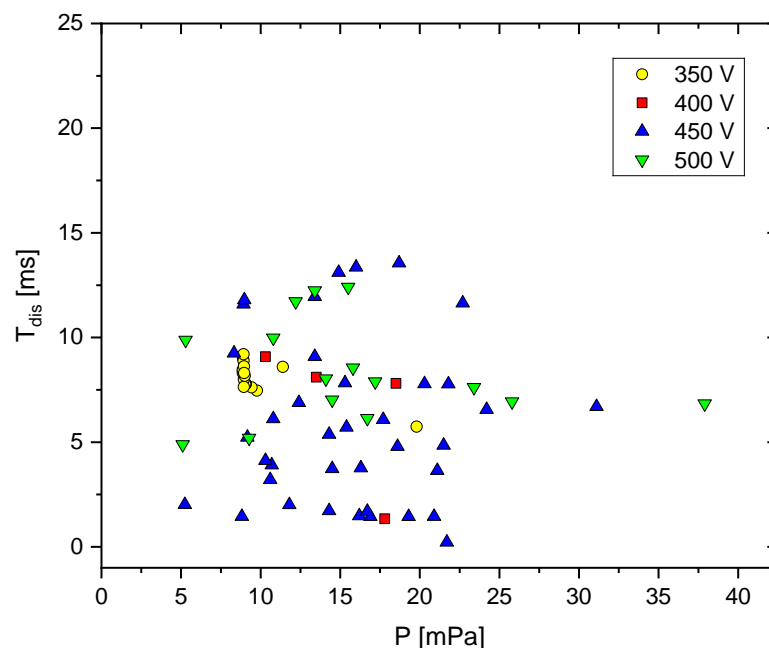
**Gambar 4.7** Hubungan tegangan yang bekerja pada inti transformator GOLEM ( $U_{CD}$ ) dengan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ )

### 4.3 Hubungan Tekanan terhadap Durasi *Discharge* dan Arus Plasma Maksimum

#### 4.3.1 Durasi *discharge*

Durasi *discharge* merupakan parameter penting pada tokamak GOLEM, yang menyatakan lama waktu untuk plasma mampu bertahan pada dinding bagian dalam tokamak. Hubungan durasi *discharge* dan tekanan gas hidrogen pada eksperimen ini diwakilkan oleh (Gambar 4.8), terlihat pada daerah abu-abu menunjukkan parameter tekanan optimum ( $7 - 20 \text{ mPa}$ ) untuk menghasilkan durasi *discharge* yang lebih lama.

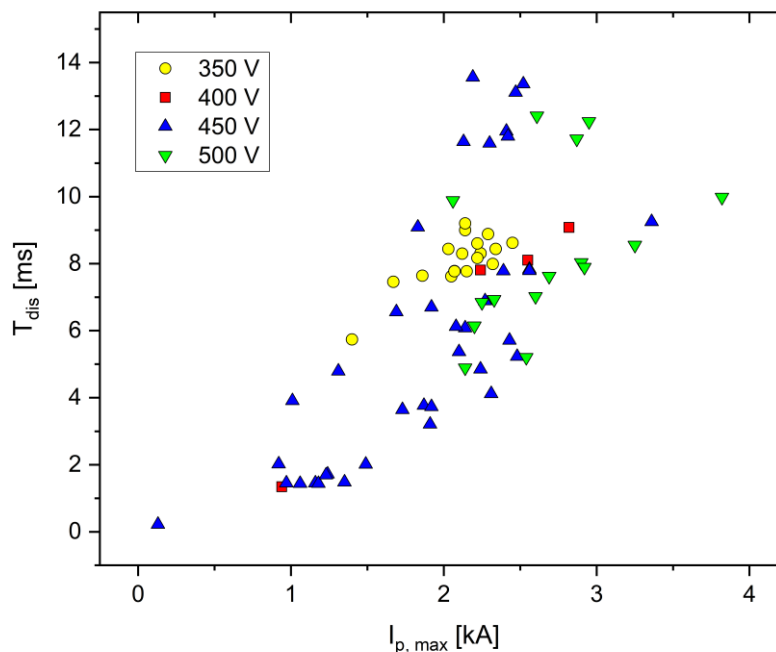
Seiring dengan peningkatan tekanan, durasi *discharge* juga mengalami penurunan. Durasi *discharge* dibatasi oleh kualitas dari besi inti transformator GOLEM, yang mana dirancang untuk mengalirkan fluks magnetik dengan maksimum  $0,12 \text{ Vs}$ , jika melebihi nilai tersebut maka inti transformator akan mencapai titik jenuh (*oversaturated*) dan tidak mampu mengalirkan daya atau tegangan dari lilitan primer ( $U_{CD}$ ) ke lilitan sekunder untuk tegangan loop plasma.



Gambar 4.8 Hubungan antar tekanan ( $P$ ) yang bekerja pada gas hidrogen dengan durasi discharge ( $T_{dis}$ ) dari plasma untuk bertahan

Pada (Gambar 4.8) terlihat bahwa rentang tekanan ( $7 - 15$ )  $mPa$ , yang digunakan untuk daerah tegangan *breakdown* minimum pada kurva Paschen (Gambar 4.5) memiliki nilai durasi *discharge* pada daerah yang relatif tinggi, hal ini menyatakan bahwa tekanan tersebut memenuhi kriteria untuk mencapai keadaan optimum tokamak GOLEM.

Terjadi peningkatan yang signifikan terhadap durasi *discharge* seiring dengan kenaikan arus plasma pada (Gambar 4.9), hal ini dapat dihubungkan dengan densitas yang tinggi dapat meningkatkan waktu plasma untuk dapat bertahan, dan juga tegangan yang diberikan pada inti transformator ( $U_{CD}$ ) terlihat jelas memberikan peningkatan pada durasi *discharge* plasma hidrogen yang juga sesuai dengan keadaan pada hubungan tekanan dan durasi *discharge* pada (Gambar 4.8).

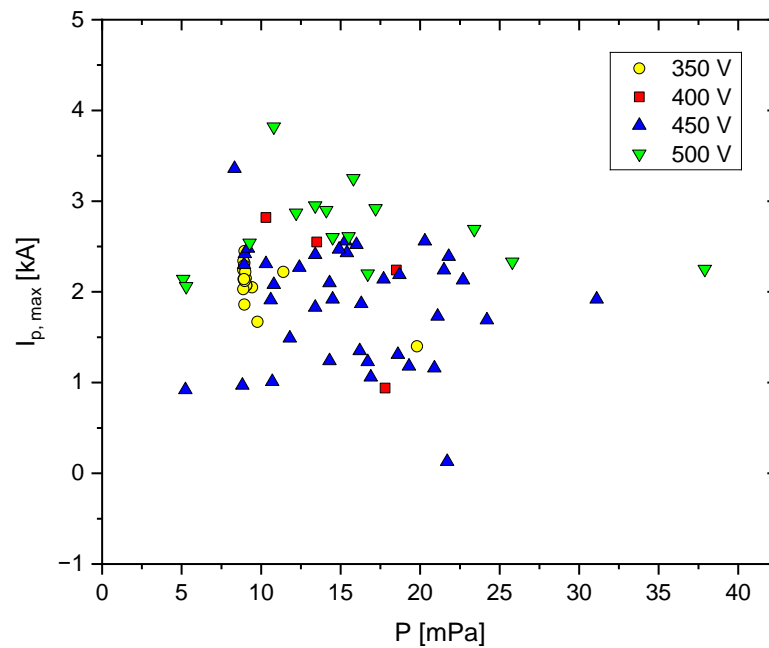


**Gambar 4.9 Hubungan antara arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ) dengan durasi discharge ( $T_{dis}$ ) dari plasma untuk bertahan**

#### 4.3.2 Arus plasma maksimum

Ilustrasi pada (Gambar 4.10) menunjukkan persebaran arus plasma maksimum terhadap tekanan yang diberikan, untuk setiap variasi tegangan yang diaplikasikan pada lilitan primer pada inti transformator GOLEM ( $U_{CD}$ ). Terjadi

penurunan arus plasma maksimum seiring dengan peningkatan tekanan pada gas hidrogen. Hal ini dapat disebabkan karena faktanya plasma dari tokamak GOLEM tidaklah terionisasi secara penuh dan derajat ionisasi yang menurun dengan seiring peningkatan tekanan yang digunakan. Namun, terjadi peningkatan pada sistem seiring dengan kenaikan dari  $U_{CD}$ . Hal ini juga sesuai dengan pembahasan pada (Gambar 4.7).



**Gambar 4.10 Hubungan antar tekanan ( $P$ ) yang diberikan pada gas hidrogen dengan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ )**

Hubungan yang terjadi pada tekanan dan arus plasma maksimum menunjukkan tekanan ideal yang digunakan berada pada daerah (7 – 17)  $mPa$ . Hal ini juga memperkuat tekanan yang digunakan pada tegangan *breakdown* minimum (7 – 15)  $mPa$  pada kurva Paschen (Gambar 4.5) sebagai tekanan ideal untuk mencapai keadaan optimum tokamak GOLEM.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

1. Kurva Paschen memberikan informasi tentang tegangan *breakdown* minimum pada gas hidrogen di Tokamak GOLEM yang dicapai pada tekanan tertentu. Tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ ) minimum untuk setiap jenis tegangan ( $U_{CD}$ ) yang diaplikasikan pada inti transformator memiliki nilai yang berbeda, namun semuanya berada pada tekanan optimum sekitar  $7 - 15 \text{ mPa}$  yang menghasilkan nilai durasi *discharge* ( $T_{dis}$ ) dan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ) pada daerah tertinggi.
2. Semakin tinggi tekanan ( $p$ ) yang diberikan pada gas hidrogen maka durasi *discharge* ( $T_{dis}$ ) dan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ) akan semakin menurun. Kenaikan pada tegangan ( $U_{CD}$ ) yang diaplikasikan pada lilitan primer di inti transformator tokamak GOLEM akan menyebabkan peningkatan pada nilai tegangan *breakdown* ( $U_{breakdown}$ ), durasi *discharge* ( $T_{dis}$ ) dan arus plasma maksimum ( $I_{p,max}$ ).

#### **5.2 Saran**

1. Jumlah data yang cukup atau lebih dari 80 data dan proposional untuk setiap variasi yang digunakan untuk tegangan yang diberikan pada transformator inti tokamak GOLEM ( $U_{CD}$ ), akan menghasilkan analisis yang lebih akurat.
2. Tetapkan variabel kontrol, yang mana pada penelitian ini waktu tunda (*time delay*), dengan rentang nilai yang konstan atau persempit rentang nilai, hingga tidak mengganggu interpretasi variabel lain dalam hasil penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ariola, M dan Pironti, A. (2016). *Magnetik Control of Tokamak Plasmas*. New York: Springer Cham.
- Behrouzi, F., Nakisa, M., Maimun, A. dan Ahmed, Y. M. (2016). Renewable energy potential in Malaysia: Hydrokinetic river/marine technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1270-1281.
- Benesch, J.F. (1981). *Breakdown in the PRETEXT Tokamak* (Ph.D. Thesis Texas Univ., Austin. Department of Physics.
- BP. (2022). *BP Statistical Review of World Energy*. London. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>. Diakses pada 10 Oktober 2022.
- Chektybayev, B., Sadykov, A., Batyrbekov, E., Skakov, M., Zarva, D., Tazhibayeva, I., et al. (2021). Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber. *Fusion Engineering and Design*, 163, 112167.
- Chen, F. F. (2016). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Edisi ketiga. New York: Springer Cham.
- Dubus, Gregory. (2014). From Plain Visualisation to Vibration Sensing: Using a Camera to Control the Flexibilities in the ITER Remote Handling Equipment. *Disertasi*. Tampere University of Technology. Finlandia.
- Ehigiamusoe, K.U., Lean, H.H. dan Lee, C. (2019). Moderating effect of inflation on the finance–growth nexus: insights from West African countries. *Empirical Economics*, 57(2), 399–422.
- Fowler, T.K. (1997). *The Fusion Quest* (Johns Hopkins University Press, Baltimore MD).
- Gribov, Y. Humphreys, D., Kajiwara, K., Lazarus, E.A., Lister J.B., Ozeki, T., et al. (2007). Chapter 8: Plasma operation and control. *Nuclear Fusion*, 47(6): S385-S403.
- Grover, O., Kocman J., Odstrcil M., Odstrcil T., Matusu M., Stöckel J., et al. (2016). Remote operation of the GOLEM Tokamak for Fusion Education. *Fusion Engineering and Design*, 112 1038–1044.
- Grover, O., Svoboda, V. dan Stockel, J., (2019). Online experimentation at the GOLEM Tokamak. International Conference. University of Madeira, Portugal.
- Holechek, J.L., Geli, H.M.E., Sawalhah, M.N. dan Valdez, R., (2022). A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?. *Sustainability*, 14(8), 4792.
- International Energy Agency (IEA). 2020. Report Extract Final Consumption, World Total Final Consumption 2020. Diambil dari

<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption> (diakses pada 23 Juni 2023).

- Islam, M.M., Irfan, M., Shahbaz, M. dan Vo, X.V., (2022). Renewable and non-renewable energy consumption in Bangladesh: The relative influencing profiles of economic factors, urbanization, physical infrastructure and institutional quality. *Renewable Energy*, 184, 1130-1149.
- Jiang, W., Peng, Y., Zhang, Y. dan Lapenta, G., (2016). Numerical modeling of tokamak breakdown phase driven by pure Ohmic heating under ideal conditions. *Nucl. Fus.*, 56(12), 126017.
- Kikuchi, M., Lackner, K. dan Tran, M.Q., (2012). *Fusion Physics*, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Levko, D. Arslanbekov, R.R. dan Kolobov, V.I., (2019). Modified Paschen curves for pulsed breakdown, *Phys. Plasmas* 26, 064502.
- Magaldi, B.V., Pessoa, R., Cesare, M.P., Ribeiro, A.A., Martins, C., dan Sobrinho, A.S.S., (2021). Control and data acquisition system to study dielectric breakdown in low-pressure DC plasma reactor with parallel electrodes. *Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas*, Vol. 40, e1821.
- Moriarty, P., dan Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 244-252.
- Nuclear Energy Agency (NEA). 2003. *Nuclear Energy Today*. OECD PUBLICATION, Prancis.
- Nur, M. 2011. *Fisika Plasma dan Aplikasinya*. Badan Penerbit Undip.
- Piel, A. 2010 *Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas*. New York: Springer.
- Pokol, G. Horvath, L., Buday, C., Refy, D.I., (2014). *Instructions for student measurements on the GOLEM Tokamak*. Department of Nuclear Techniques, Budapest University of Technology and Economics.
- Sarancha, G.A., Drozd, A.S., Emekeev, I.A., Ganin, S.A., Kropackova, D., Kudashev, I.S., et al. (2021). Hydrogen and Helium Discharges in the Golem Tokamak. *Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion*, 44 (4), 92.
- Siusko, Y., Svoboda, V., Stockel, J., Garkusha, I.E., Solyakov, D., Girka, I., et al., (2021). Breakdown Phase in the GOLEM Tokamak and Its Impact on Plasma Performance. *Ukrayins'kij Fyzychnij Zhurnal (Kyiv)*, 66(3), 231-239.
- Song, X., Duan, X.R., Song, X.M., Zheng, G.Y., Wang, S., Li, B., et al. (2017). Experimental results of plasma breakdown and flux optimization on HL-2A Tokamak, *Fusion Engineering and Design*, (125) 195-198.

- Svoboda, V., Zhekova, M., Dimitrova, M., Marinova, P., Podolnik, A., dan Stockel, J., (2019). Operational Domain in Hydrogen Plasmas on the GOLEM Tokamak. *Journal of Fusion Energy* 38: 253–261.
- Twaróg D., Stankiewicz, R. dan Drozdowicz, K., (2011). Test of the European Transport Solver in the frame of Integrated Tokamak Modeling. *IFJ Report*, 2051/AP.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. New York: UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.
- Walker, M.L., Vries, P.C.D, Felici, F. dan Schuster, E., (2020). Introduction to tokamak plasma control. *American Control Conference (ACC)*, 2901–2918.
- Wang, Tianbo. (2018). *Reconstruction of Soft X-Ray and Tungsten Concentration Profiles in Tokamaks Using Gaussian Process Tomography*. Ghent University.
- Wesson, J., (1999). *The Science of JET*. Oxfordshire, England.
- Wesson, J., (2004). *Tokamaks*, edisi ke-3. Oxford.
- Zhou, Yushan. (2019). Impact of Surface Structures on Deposition and Erosion in a Tokamak. *Disertasi*. School of Electrical Engineering and Computer Science. Swedia.

**LAMPIRAN A**  
**DATA DISCHARGE EKSPERIMEN TOKAMAK GOLEM**

No	Shot	Input				Output			
		$p$ (mPA)	$U_{BT}$ (V)	$U_{CD}$ (V)	$T_{CD}$ (ms)	$T_{dis}$ (ms)	$I_{p,max}$ (kA)	$V_{BD}$ (V)	Terbentuk Plasma
1	41834	21,7	1000	450	0	0,22	0,13	11,551	Ya
2	41835	18,6	1000	450	0	4,79	1,31	11,287	Ya
3	41836	21,1	1000	450	0	3,64	1,73	11,425	Ya
4	41837	16,3	1000	450	0	3,77	1,87	11,702	Ya
5	41839	14,5	1000	450	0	3,73	1,92	11,536	Ya
6	41840	10,7	1000	450	0	3,91	1,01	11,728	Ya
7	41842	10,3	1000	450	0	4,12	2,31	11,477	Ya
8	41843	8,93	1000	450	0	11,59	2,3	11,862	Ya
9	41844	8,98	1000	450	0	11,8	2,42	11,66	Ya
10	41846	9,17	1000	450	0	5,23	2,48	11,723	Ya
11	41848	13,4	1000	450	0,35	9,09	1,83	11,418	Ya
12	41849	14,3	1000	450	0,35	1,72	1,24	11,505	Ya
13	41850	16,7	1000	450	0,35	1,69	1,23	11,51	Ya
14	41852	21,5	1000	450	0,35	4,85	2,24	12,037	Ya
15	41853	22,7	1000	450	0,35	11,64	2,13	12,028	Ya
16	41863	8,82	1000	450	0	1,45	0,97	11,692	Ya
17	41865	14,9	1000	450	0	13,11	2,47	11,472	Ya
18	41867	0,98	1000	450	0	-	-	13	Tidak
19	41868	15,4	1000	450	0	5,71	2,43	11,359	Ya
20	41919	16,7	900	500	0	6,14	2,2	12,173	Ya
21	41926	5,29	1000	500	0	9,88	2,06	12,94	Ya
22	41927	5,1	1000	500	0	4,89	2,14	12,996	Ya
23	41928	9,28	1000	500	0	5,2	2,54	12,4	Ya
24	41936	11,8	1000	450	0	2,01	1,49	11,28	Ya
25	41937	17,7	1000	450	0	6,08	2,14	11,268	Ya
26	41938	17,8	1000	400	0	1,34	0,94	10,855	Ya
27	41940	19,3	1000	450	0	1,44	1,18	11,696	Ya
28	41941	20,9	1000	450	0	1,45	1,16	11,641	Ya
29	41945	16	1000	450	0	13,36	2,52	11,7	Ya
30	41946	16,2	1000	450	0	1,48	1,35	11,818	Ya
31	41949	16,9	1000	450	0	1,44	1,06	11,29	Ya
32	41951	18,7	1000	450	0	13,56	2,19	11,707	Ya
33	41958	5,24	1000	450	0	2,02	0,92	11,43	Ya
34	41959	10,6	1000	450	0	3,21	1,91	11,23	Ya
35	41960	12,4	1000	450	0	6,89	2,27	11,177	Ya
36	41961	14,3	1000	450	0	5,37	2,1	11,09	Ya

37	41962	10,8	1000	450	0	6,12	2,08	11,32	Ya
38	41963	1,08	1000	450	0	-	-	13,447	Tidak
39	41964	13,4	1000	450	0	11,95	2,41	11,446	Ya
40	41967	15,5	1000	500	0	12,41	2,61	12,3	Ya
41	41968	14,5	1000	500	0	7,02	2,6	12,148	Ya
42	41969	13,4	1000	500	0	12,24	2,95	12,2	Ya
43	41970	12,2	1000	500	0	11,72	2,87	12,053	Ya
44	41971	14,1	1000	500	0	8,03	2,9	12,391	Ya
45	41972	25,8	900	500	0	6,93	2,33	12,177	Ya
46	41975	23,4	1000	500	0	7,62	2,69	12,09	Ya
47	41976	15,3	900	450	0	7,83	2,56	11,088	Ya
48	41977	17,2	900	500	0	7,89	2,92	12,034	Ya
49	41979	37,9	900	500	0	6,84	2,25	12,65	Ya
50	41980	20,3	1000	450	0	7,79	2,56	11,234	Ya
51	41982	18,5	1000	400	0	7,81	2,24	10,715	Ya
52	41983	13,5	900	400	0,5	8,1	2,55	10,712	Ya
53	41989	19,8	900	350	0,5	5,74	1,4	9,935	Ya
54	41990	9,77	900	350	0,5	7,46	1,67	9,678	Ya
55	41991	9,43	900	350	0,5	7,62	2,05	9,682	Ya
56	41992	9,07	900	350	0,5	7,78	2,07	9,755	Ya
57	41993	9,06	900	350	0,5	7,77	2,07	9,74	Ya
58	41994	9,03	900	350	0,5	7,77	2,15	9,898	Ya
59	41995	8,95	900	350	0,5	7,99	2,32	10,262	Ya
60	41996	8,95	900	350	0,5	7,64	1,86	9,662	Ya
61	41997	8,9	900	350	0,5	9	2,14	9,847	Ya
62	41998	8,88	900	350	0,5	8,31	2,24	9,979	Ya
63	41999	8,89	900	350	0,5	8,44	2,34	10,054	Ya
64	42000	8,88	900	350	0,5	8,44	2,03	10,353	Ya
65	42002	8,93	900	350	0,5	8,88	2,29	9,97	Ya
66	42003	9,01	900	350	0,5	8,17	2,22	9,59	Ya
67	42004	8,96	900	350	0,5	8,62	2,45	10,184	Ya
68	42005	8,97	900	350	0,5	8,3	2,12	9,73	Ya
69	42006	8,93	900	350	0,5	9,2	2,14	9,72	Ya
70	42009	11,4	1000	350	0	8,6	2,22	9,824	Ya
71	42013	31,1	900	450	0	6,7	1,92	11,76	Ya
72	42014	21,8	900	450	0	7,78	2,39	11,224	Ya
73	42030	0,88	900	500	0	-	-	14,45	Tidak
74	42032	2,49	900	500	0	-	-	14,196	Tidak
75	42033	3,24	900	500	0	-	-	14,379	Tidak
76	43409	10,8	1000	500	0	9,98	3,82	11,984	Ya
77	43456	10,3	1000	400	0	9,08	2,82	10,713	Ya
78	43457	8,33	1000	450	0	9,25	3,36	11,588	Ya
79	43509	15,8	1000	500	0	8,55	3,25	12,214	Ya
80	43518	24,2	1000	450	0	6,56	1,69	12,081	Ya