



**OPTIMASI DAYA APLIKATOR GELOMBANG MIKRO
MENGUNAKAN METODE KONTROL DAYA SIKLUS
INTEGRAL DAN MODULASI LEBAR PULSA**

Skripsi

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Elektro**

Oleh

Amirul Mahmud

NIM.5301415002

**PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2020**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Amirul Mahmud

NIM : 5301415002

Program Studi : Pendidikan Teknik Elektro, S1

Judul : Optimasi Daya Aplikator Gelombang Mikro Menggunakan Metode
Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Program Studi Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 12 Februari 2020

Dosen Pembimbing



Dr.-ing Dhidik Prastiyanto, S.T., M.T.
NIP.197805312005011002

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “Optimasi Daya Aplikator Gelombang Mikro Menggunakan Metode Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa” telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 25 bulan Februari tahun 2020.

Oleh

Nama : Amirul Mahmud
NIM : 5301415002
Program Studi : Pendidikan Teknik Elektro, S1

Panitia:

Ketua Panitia




Ir. Ulfah Mediaty Arief, M.T., IPM
NIP.196605051998022001

Sekretaris



Drs. Ir. Sri Sukamta, M.Si., IPM
NIP.196505081991031003

Penguji 1




Dra. Dwi Purwanti, Ah.T.,M.S.
NIP. 195910201990022001

Penguji 2



Arimaz Hangga, S.T.,M.T.
NIP. 199008122015041002

Penguji 3/Pembimbing



Dr.-ing Dhidik Prastiyanto, S.T.,M.T.
NIP.197805312005011002

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik UNNES



Dr. Nur Qudus, M.T.
NIP.197111301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan pembimbing dan masukan tim penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 12 Februari 2020

Yang membuat pernyataan,



Amirul Mahmud
NIM. 5301415002

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

1. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan (Q.S. Al-Insyirah:6)
2. Dan musibah apapun yang menimpa kamu adalah karena perbuatan tanganmu sendiri, dan Allah memaafkan banyak (dari kesalahan-kesalahanmu) (Q.S. Asy-Syura:30)
3. Selemah-lemah manusia ialah orang yang tak mau mencari sahabat dan orang yang lebih lemah dari itu adalah orang yang menyia-nyiakan sahabat yang telah dicari (Ali bin Abi Thalib)
4. *Try not to become a man of success, but rather try to become a man of value* (Albert Einstein)
5. *You have to endure caterpillars if you want to see butterflies* (Antoine de Saint)
6. *There are two ways you can go with pain. You can let it destroy you or you can use it as fuel to drive you.* (Taylor Swift)

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Ayah, Ibu, dan Adik tercinta yang selalu memberikan dukungan dan doa restu;
2. Seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan bantuan dan dukungan;
3. Para guru dan dosen yang telah mendidik dan memberikan bekal ilmu;
4. Sahabat-sahabat tercinta yang telah banyak membantu;
5. Teman-teman seperjuangan Jurusan Teknik Elektro yang telah banyak menemani dan memberikan bantuan; serta
6. Teman-teman penghuni Kos Violet yang telah menemani dan membantu.

RINGKASAN

Amirul Mahmud. 2020. **Optimasi Daya Aplikator Gelombang Mikro Menggunakan Metode Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa.** Dr.-ing Dhidik Prastiyanto, S.T.,M.T. Pendidikan Teknik Elektro. Fakultas Teknik. Universitas Negeri Semarang

Optimasi pemanasan karbon aktif menggunakan aplikator gelombang mikro dipengaruhi oleh daya. Oleh karena itu, perlu dirancang sistem pengontrol daya yang dapat mengatur daya aplikator. Sistem pengontrol daya yang telah dirancang pada penelitian terdahulu menggunakan metode kontrol arus anode, metode kontrol fase, dan metode *burst mode*. Metode-metode tersebut masih memiliki beberapa kelemahan, yaitu bentuk gelombang keluaran yang kurang baik yang dapat merusak transformator, magnetron, dan komponen lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengontrol daya yang memiliki performa lebih baik dari metode-metode tersebut.

Metode kontrol daya yang diusulkan dalam penelitian ini adalah metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa. Metode ini dilakukan dengan memberikan sinyal kontrol PWM untuk menentukan waktu *on-off* magnetron. Pengujian sistem dilakukan dengan menggunakan osiloskop dan hasilnya akan dianalisis untuk mengetahui performa dari metode yang diusulkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode kontrol daya yang diusulkan memiliki performa yang baik dalam mengontrol tegangan catu filamen dan tegangan catu anode magnetron dengan *switching loss* masing-masing sebesar 0,67% dan 0,83% serta kesalahan daya sebesar 0,74%. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa metode yang diusulkan bekerja paling optimal pada daya 100% atau 900 W dengan nilai *switching loss* sebesar 0% dan kesalahan daya sebesar 0%.

Kata kunci: *Metode kontrol siklus integral, PWM, switching loss, optimasi daya*

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Optimasi Daya Aplikator Gelombang Mikro Menggunakan Metode Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi S1 Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaikan kepada Nabi Muhammad SAW, mudah-mudahan kita semua mendapatkan syafaatnya di yaumul akhir nanti, Amiin.

Penyelesaian Skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum., selaku Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Ir. Ulfah Mediaty Arief M.T., IPM selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang.
4. Dr.-ing Dhidik Prastiyanto, S.T.,M.T. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran telah memberikan arahan, bimbingan, motivasi, dan saran kepada penulis.
5. Dra. Dwi Purwanti, A.hT., M.S. dan Arimaz Hangga, S.T., M.T. selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan saran, tanggapan, dan bimbingan yang berharga untuk perbaikan skripsi ini.
6. Dr. Widi Astuti, S.T., M.T., Lambang Setyo Utomo, A.Md., dan Arlinto, S.T., M.Si. yang telah banyak memberikan bantuan selama kegiatan penelitian di laboratorium.

7. Seluruh Dosen dan Staf Karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah banyak memberikan bimbingan dan bantuan selama ini.
8. Keluarga tercinta, terutama Bapak dan Ibu yang selalu memberikan dukungan, doa, dan semangat dalam penyusunan skripsi ini.
9. Teman-teman Jurusan Teknik Elektro 2015 yang telah membantu selama kuliah.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang turut serta memberikan dukungan selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan penelitian dan ilmu pengetahuan.

Semarang, 12 Februari 2020

Penulis

Amirul Mahmud

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	v
RINGKASAN.....	vi
PRAKATA.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	5
1.3 Pembatasan Masalah.....	6
1.4 Perumusan Masalah.....	6
1.5 Tujuan.....	7
1.6 Manfaat.....	7
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	9
2.1 Kajian Pustaka.....	9

2.2 Landasan Teori.....	12
2.2.1 Medan Elektromagnetik.....	12
2.2.1.1 Medan Listrik.....	12
2.2.1.2 Medan Magnet.....	13
2.2.1.3 Teori Terjadinya Gelombang Elektromagnetik.....	14
2.2.1.4 Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	16
2.2.2 Gelombang Mikro.....	17
2.2.3 Pemanasan dengan Gelombang Mikro (<i>Microwave Heating</i>).....	18
2.2.3.1 Sumber Gelombang Mikro.....	21
2.2.3.2 Saluran Transmisi.....	23
2.2.3.3 Aplikator Gelombang Mikro.....	24
2.2.4 Interaksi Gelombang Mikro dengan Material.....	24
2.2.5 Daya Gelombang Mikro.....	26
2.2.6 Teknik Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa.....	27
2.2.7 <i>Triode Alternating Current</i> (TRIAC).....	29
2.2.8 IC MOC3041.....	31
2.2.9 Karbon Aktif (<i>Activated Carbon</i>).....	31
BAB III METODE PENELITIAN.....	33
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	33
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	33
3.3 Metode Penelitian.....	34
3.4 Desain Penelitian.....	37

3.4.1	Diagram Blok Sistem Pengontrol Daya.....	37
3.4.2	Rangkaian Sistem Pengontrol Daya.....	38
3.4.3	Pemilihan Komponen Sistem Pengontrol Daya.....	39
3.4.4	Rangkaian Catu Daya Magnetron.....	41
3.4.5	Penentuan Nilai Variasi Daya.....	42
3.4.6	Penentuan Frekuensi Sinyal PWM.....	43
3.4.7	Penentuan <i>Duty Cycle</i> Sinyal PWM.....	43
3.4.8	Desain Pengujian.....	44
3.5	Parameter Penelitian.....	44
3.6	Teknik Pengumpulan Data.....	45
3.7	Teknik Analisis Data.....	46
3.7.1	Analisis Kesalahan.....	47
3.7.2	Analisis <i>Switching Loss</i>	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		48
4.1	Hasil Pengujian dan Analisis Sinyal Kontrol PWM.....	48
4.1.1	Analisis Kesalahan Frekuensi.....	48
4.1.2	Analisis Kesalahan <i>Duty Cycle</i>	49
4.1.3	Analisis <i>Switching Loss</i> Sinyal PWM.....	50
4.2	Hasil Pengujian dan Analisis Sinyal Tegangan TRIAC.....	51
4.3	Hasil Pengujian dan Analisis Metode Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa.....	54
4.3.1	Perbandingan Hasil Pengujian dengan Teori.....	54
4.3.2	Analisis <i>Switching Loss</i> Tegangan Catu Filamen.....	55

4.3.3 Analisis <i>Switching Loss</i> Tegangan Catu Anode.....	58
4.3.4 Analisis Kesalahan Daya.....	59
4.3.5 Analisis Kesalahan Gelombang Sinusoidal.....	60
4.4 Pembahasan.....	62
BAB V PENUTUP.....	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	75

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Medan Listrik yang Ditimbulkan oleh Muatan Listrik.....	13
Gambar 2.2 Medan Magnet yang Ditimbulkan oleh Magnet Permanen.....	13
Gambar 2.3 Gelombang Elektromagnetik.....	15
Gambar 2.4 Mekanisme Pemanasan Dengan Gelombang Mikro	20
Gambar 2.5 Bentuk Fisik Magnetron	21
Gambar 2.6 Diagram Skematik Magnetron	22
Gambar 2.7 Diagram Aplikator Gelombang Mikro.....	24
Gambar 2.8 Kombinasi Teknik Kontrol Siklus Integral dan PWM	28
Gambar 2.9 Struktur dan Simbol TRIAC	29
Gambar 2.10 Kurva Karakteristik TRIAC	30
Gambar 2.11 Bentuk Fisik dan Diagram Skematik IC MOC3041.....	31
Gambar 3.1 Metode Penelitian Eksperimen <i>One-Shot Case Study</i>	34
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	36
Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem Pengontrol Daya	37
Gambar 3.4 Rangkaian Sistem Pengontrol Daya.....	38
Gambar 3.5 Rangkaian Catu Daya Magnetron	41
Gambar 4.1 Hasil Sinyal Kontrol PWM untuk Beberapa Daya.....	48
Gambar 4.2 Sinyal Tegangan TRIAC Saat Bekerja	52
Gambar 4.3 Bentuk Gelombang Tegangan TRIAC untuk Beberapa Daya	53
Gambar 4.4 Perbandingan Hasil Pengujian Kontrol Daya.....	55

Gambar 4.5 Bentuk Gelombang Tegangan Catu Filamen untuk Beberapa Daya	56
Gambar 4.6 Bentuk Gelombang Tegangan Catu Anode untuk Beberapa Daya...	58
Gambar 4.7 Perbandingan Gelombang Sinusoidal Hasil Pengukuran dengan Gelombang Sinusoidal Acuan	61
Gambar 4.8 Perbandingan Bentuk Gelombang yang Dihasilkan dengan Kim <i>et al.</i> (2016)	63
Gambar 4.9 Perbandingan Bentuk Gelombang yang Dihasilkan dengan Korkua <i>et al.</i> (2016)	64

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu.....	10
Tabel 2.2 Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	17
Tabel 3.1 Alat Penelitian	33
Tabel 3.2 Bahan Penelitian	34
Tabel 3.3 Spesifikasi Magnetron Tipe 2M219J.....	42
Tabel 3.4 Rancangan Variasi Nilai Daya	42
Tabel 3.5 Rancangan Nilai <i>Duty Cycle</i>	44
Tabel 3.6 Desain Pengujian Sistem Pengontrol Daya	44
Tabel 3.7 Pengumpulan Data	45
Tabel 3.8 Teknik Analisis Data	46
Tabel 4.1 Analisis Kesalahan Frekuensi Sinyal PWM	49
Tabel 4.2 Analisis Kesalahan <i>Duty Cycle</i>	50
Tabel 4.3 Analisis <i>Switching Loss</i> Sinyal PWM	51
Tabel 4.4 Analisis <i>Switching Loss</i> TRIAC	54
Tabel 4.5 Analisis <i>Switching Loss</i> Tegangan Catu Filamen	57
Tabel 4.6 Analisis <i>Switching Loss</i> Tegangan Catu Anode	59
Tabel 4.7 Analisis Daya Keluaran Metode Kontrol Siklus Integral dan PWM ...	60
Tabel 4.8 Analisis Kesalahan Gelombang Sinusoidal.....	62

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 <i>Datasheet</i> TRIAC BTA16.....	75
Lampiran 2 <i>Datasheet</i> IC MOC3041	80
Lampiran 3 <i>Desain Layout</i> PCB	86
Lampiran 4 Dokumentasi Penelitian.....	87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai negara agraris, jumlah limbah biomassa di Indonesia sangat melimpah (Putra dkk., 2016). Sumber energi dari limbah biomassa memiliki keuntungan antara lain dapat dimanfaatkan secara lestari karena dapat diperbarui (Mirmanto dkk., 2017). Saat ini limbah biomassa dipilih sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif karena murah, dapat diperbarui, dan tersedia melimpah di alam (Mourão *et al.*, 2011). Selain itu, limbah biomassa memiliki kandungan karbon yang tinggi sehingga sangat menjanjikan untuk dijadikan karbon aktif dengan karakteristik yang diinginkan (Hesas *et al.*, 2013). Beberapa jenis limbah biomassa yang sudah pernah diteliti untuk membuat karbon aktif antara lain jerami padi (Mashhadi *et al.*, 2016), kulit kacang (Georgin *et al.*, 2016 dan Wu *et al.*, 2015), akar jamur (Cheng *et al.*, 2016), dan kulit delima (Ahmad *et al.*, 2014). Dengan demikian, pembuatan karbon aktif dari limbah biomassa memiliki keuntungan ganda: dari sisi ekonomis biaya lebih murah dan dari sisi lingkungan dapat mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah biomassa (Ferrera-lorenzo *et al.*, 2014).

Secara umum, ada dua cara yang dapat digunakan untuk memproduksi karbon aktif, yaitu pemanasan konvensional (pemanasan termal) dan pemanasan dengan gelombang mikro (Hesas *et al.*, 2013). Pada pemanasan konvensional,

energi dihasilkan melalui proses konduksi dan konveksi, sedangkan pada pemanasan dengan gelombang mikro, energi dihasilkan dari proses rotasi dipol dan konduksi ionik dalam partikel (Ahmed dan Theydan, 2014). Pada pemanasan konvensional, energi dihasilkan oleh *furnace* elektrik (Ferrera-lorenzo *et al.*, 2014) sehingga distribusi suhu yang seragam sulit diperoleh untuk bentuk dan ukuran sampel yang bervariasi (Ahmed dan Theydan, 2014). Selain itu, pemanasan konvensional membutuhkan energi yang besar dan waktu pemanasan yang lama (Alslaibi *et al.*, 2012). Sementara itu, pada pemanasan dengan gelombang mikro energi elektromagnetik ditransmisikan pada kecepatan cahaya dan dapat didisipasikan secara selektif pada lokasi yang diinginkan sehingga proses pemanasan lebih cepat (Sturm *et al.*, 2014). Pemanasan dengan gelombang mikro juga bersifat internal dan volumetrik sehingga waktu proses lebih pendek, energi yang dibutuhkan lebih rendah, dan ukuran pori lebih seragam (Ao *et al.*, 2018). Selain itu, karbon aktif yang diproses dengan gelombang mikro memiliki dampak terhadap lingkungan yang lebih rendah dari karbon aktif yang diproses dengan pemanasan konvensional (Yi *et al.*, 2013). Keuntungan lainnya adalah karbon aktif yang dibuat dengan gelombang mikro dapat didaur ulang berkali-kali tanpa merusak strukturnya, justru dapat meningkatkan luas permukaannya (Ania *et al.*, 2004).

Walaupun pemanasan dengan gelombang mikro memiliki banyak kelebihan dibanding pemanasan konvensional, untuk mencapai pemanasan yang optimal bukanlah hal yang mudah. Optimasi pemanasan dengan gelombang mikro salah satunya dipengaruhi oleh daya gelombang mikro (Mekonnen *et al.*, 2018).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh daya gelombang mikro terhadap kualitas karbon aktif yang dihasilkan. Cheng *et al.* (2016) melakukan penelitian terkait pengaruh daya terhadap kualitas karbon aktif yang dibuat dari limbah akar jamur. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa daya optimal dicapai pada 800 W dengan kualitas karbon aktif yang paling baik. Berikutnya, Reis *et al.* (2016) membuat karbon aktif dari lumpur limbah kota dan hasil optimal diperoleh pada daya 980 W. Pada tahun yang sama, Duan *et al.* (2016) mengolah limbah katun menjadi karbon aktif menggunakan aplikator gelombang mikro dan hasil optimal dicapai pada daya 640 W. Berdasarkan hasil-hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa daya optimal untuk masing-masing limbah berbeda. Mengingat banyaknya penelitian terkait pengaruh daya gelombang mikro terhadap kualitas karbon aktif, maka diperlukan suatu sistem pengontrol daya agar daya gelombang mikro dapat diubah-ubah sesuai dengan keperluan tersebut.

Penelitian mengenai perancangan sistem pengontrol daya untuk aplikator gelombang mikro sudah banyak dilakukan. Heggannavar (2015) merancang sistem pengontrol daya untuk magnetron dengan daya 1200 W menggunakan metode kontrol arus anode. Pengontrolan dilakukan dengan menggunakan thyristor dan mikrokontroler. Sistem yang dirancang tidak dilengkapi dengan rangkaian *zero crossing detector*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengontrol daya yang dirancang dapat mengirim daya ke beban dengan toleransi atau kesalahan sebesar 2%.

Kim *et al.* (2016) merancang sistem pengontrol daya magnetron untuk mengendalikan lampu plasma sulfur menggunakan metode *burst mode* dan *zero voltage switching*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang bekerja dengan baik dengan efisiensi maksimum sebesar 96,44% pada daya 400 W. Pada tahun yang sama, Korkua *et al.* (2016) merancang sistem pengontrol daya magnetron untuk sistem pengeringan menggunakan metode kontrol fase otomatis berdasarkan suhu yang dilengkapi dengan *zero crossing detector*. Perancangan menggunakan TRIAC dan Arduino Mega untuk mengontrol daya magnetron. Bentuk gelombang arus yang dihasilkan pada penelitian Kim *et al.* (2016) masih kurang bagus karena masih terdapat lonjakan arus yang cukup tajam seperti gigi gergaji. Sementara itu, bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan pada penelitian Korkua *et al.* (2016) juga masih kurang bagus karena gelombang sinus yang dihasilkan tidak terpotong dengan baik.

Berikutnya, Merwe dan Swardt (2017) merancang sistem pengontrol daya magnetron dengan metode kontrol fase TRIAC yang dilengkapi dengan *zero crossing detector*. Penelitian dilakukan dengan mengatur sudut tunda penyalaan TRIAC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang menghasilkan peningkatan dalam hal respon waktu dan resolusi daya. Namun, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa semakin besar sudut penyalaan, semakin menurun respon waktu menjadi lebih lambat. Selain itu, masih terdapat sinyal harmonik yang dihasilkan yang dapat mengganggu komponen-komponen catu daya magnetron.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengontrol daya magnetron yang akan digunakan untuk pemanasan karbon aktif dari limbah biomassa. Metode yang digunakan adalah kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa. Dalam implementasinya, sistem pengontrol daya dilengkapi dengan *zero crossing detector* agar proses *switching* dapat dilakukan secara tepat saat tegangan berada pada titik nol. Sinyal PWM dibangkitkan oleh mikrokontroler agar mudah dalam aplikasinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi beberapa kelemahan dari hasil penelitian sebelumnya. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem pengontrol daya yang optimal dengan kesalahan yang lebih kecil dari hasil penelitian sebelumnya dan bentuk gelombang yang lebih baik. Dengan demikian, diharapkan proses pemanasan karbon aktif dengan aplikator gelombang mikro dapat berjalan dengan lebih optimal.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diidentifikasi permasalahan sebagai berikut.

1. Optimasi pemanasan gelombang mikro dipengaruhi oleh daya sehingga diperlukan adanya sistem pengontrol daya untuk mengetahui pengaruh tersebut.
2. Optimasi pemanasan karbon aktif menggunakan gelombang mikro dari berbagai jenis limbah terjadi pada daya yang berbeda-beda sehingga perlu adanya variasi daya aplikator.

3. Sistem pengontrol daya yang dirancang pada penelitian sebelumnya masih memiliki kesalahan sebesar 2% dan bentuk gelombang yang dihasilkan masih kurang baik sehingga perlu dirancang sistem pengontrol daya yang memiliki performa lebih baik.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian dapat berfokus pada tujuan yang akan dicapai, diperlukan pembatasan masalah sebagai berikut.

1. Pengontrolan daya magnetron menggunakan metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa.
2. Sistem pengontrol daya yang dirancang memiliki enam variasi daya, yaitu 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%.
3. Sistem pengontrol daya yang dirancang diaplikasikan pada tegangan masukan 220 V dan dapat mengalirkan arus maksimum sebesar 16 A.
4. Sinyal kontrol PWM yang digunakan memiliki frekuensi 5 Hz.
5. Analisis hasil penelitian hanya berfokus pada kesalahan *switching* dengan meniadakan pembahasan mengenai harmonik dan efisiensi.

1.4 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini, dirumuskan permasalahan sebagai berikut.

1. Bagaimana performa sinyal kontrol PWM yang dihasilkan oleh sistem pengontrol daya?

2. Bagaimana performa sistem pengontrol daya magnetron menggunakan metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa?
3. Berapa daya optimal yang dapat dikontrol oleh sistem pengontrol daya menggunakan metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa?

1.5 Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui performa sinyal kontrol PWM yang dihasilkan oleh sistem pengontrol daya.
2. Mengetahui performa sistem pengontrol daya magnetron menggunakan metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa.
3. Mengetahui daya optimal yang dapat dikontrol oleh sistem pengontrol daya menggunakan metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa.

1.6 Manfaat

Manfaat yang diharapkan akan diperoleh dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Melakukan inovasi teknologi yang dapat digunakan untuk memudahkan penelitian terkait optimasi pemanasan karbon aktif dari berbagai jenis limbah biomassa.

2. Menciptakan sistem pengontrol daya yang dapat diterapkan pada aplikator gelombang mikro.
3. Memperkaya hasil penelitian di bidang teknik elektro yang dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian tentang optimasi daya pemanasan karbon aktif dari limbah biomassa menggunakan aplikator gelombang mikro sudah banyak dilakukan. Beberapa penelitian tersebut antara lain penelitian yang dilakukan oleh Cheng *et al.* (2016), Reis *et al.* (2016), dan Duan *et al.* (2016).

Cheng *et al.* (2016) mengolah akar jamur menjadi karbon aktif menggunakan gelombang mikro dan aktivasi asam fitat. Penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh daya radiasi gelombang mikro terhadap pori-pori karbon aktif yang terbentuk. Pemanasan sampel dilakukan selama 15 menit dengan variasi daya gelombang mikro 600 W, 700 W, dan 800 W. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif yang terbentuk memiliki luas permukaan maksimum sebesar 1024 m²/g pada daya 800 watt.

Berikutnya, Reis *et al.* (2016) melakukan penelitian untuk membandingkan proses pembuatan karbon aktif dari lumpur limbah menggunakan metode pemanasan konvensional dan pemanasan gelombang mikro. Hasil optimal untuk pemanasan konvensional diperoleh pada suhu 500°C dan waktu pemanasan 15 menit. Pemanasan dengan gelombang mikro dilakukan pada daya 700 W, 840 W, dan 980 W. Hasil optimal diperoleh pada daya 980 W dan waktu pemanasan 12 menit.

Pada tahun yang sama, Duan *et al.* (2016) melakukan penelitian terkait pemanasan karbon aktif dari katun dengan gelombang mikro. Pemanasan dilakukan dengan daya 320 W, 480 W, 640 W, 800 W, dan 960 W. Karbon aktif yang dihasilkan memiliki luas permukaan maksimum 1370 m²/g dan volume pori total 0,98 cm³. Hasil tersebut dicapai dengan pemanasan selama 10 menit pada daya 640 W dengan konsentrasi asam fosfat 50%. Karbon aktif tersebut kemudian diuji untuk mengadsorpsi *methylene blue* (MB). Hasil pengujian menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memiliki kapasitas adsorpsi 476 mg/g.

Tabel 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Peneliti	Jenis Limbah Biomassa	Kondisi Optimal	
		Daya (watt)	Waktu pemanasan (menit)
Cheng <i>et al.</i> (2016)	Akar jamur	800	15
Reis <i>et al.</i> (2016)	Lumpur limbah kota	980	12
Duan <i>et al.</i> (2016)	Kapas medis	640	10

Berdasarkan Tabel 2.1, penelitian-penelitian tersebut juga mengungkapkan bahwa proses pemanasan karbon aktif yang optimal dicapai pada kondisi yang berbeda-beda bergantung pada jenis limbah yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengontrol daya yang dapat diterapkan pada aplikator gelombang mikro. Dengan demikian, aplikator gelombang mikro dapat digunakan untuk optimasi proses pemanasan karbon aktif dari berbagai jenis limbah biomassa.

Penelitian mengenai perancangan sistem pengontrol daya untuk aplikator gelombang mikro sudah banyak dilakukan. Heggannavar (2015) merancang sistem pengontrol daya magnetron berdaya 1200 W dengan metode kontrol arus anode. Sistem pengontrol daya dilengkapi dengan menggunakan thyristor dan mikrokontroler. Namun, sistem yang dirancang tidak dilengkapi dengan rangkaian *zero crossing detector*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengontrol daya yang dirancang dapat mengirim daya ke beban dengan toleransi atau kesalahan sebesar 2%.

Kim *et al.* (2016) merancang sistem pengontrol daya magnetron untuk mengendalikan lampu plasma sulfur. Metode kontrol daya yang digunakan adalah *burst mode* dan *zero voltage switching*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang bekerja dengan baik dengan efisiensi sebesar 96,44% pada daya 400 W dan 95,67% pada daya 200 W. Pada tahun yang sama, Korkua *et al.* (2016) merancang sistem pengontrol daya magnetron untuk sistem pengeringan. Metode kontrol daya yang digunakan adalah metode kontrol fase otomatis berdasarkan suhu yang dilengkapi dengan *zero crossing detector*. Perancangan dilengkapi dengan TRIAC dan Arduino Mega untuk mengontrol daya magnetron. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang dapat bekerja dengan baik. Namun, bentuk gelombang arus yang dihasilkan kurang halus dan masih terdapat lonjakan arus yang cukup besar dan tajam.

Berikutnya, Merwe dan Swardt (2017) merancang sistem pengontrol daya magnetron dengan metode kontrol fase TRIAC yang dilengkapi dengan *zero crossing detector*. Penelitian dilakukan dengan mengatur sudut tunda penyalan

TRIAC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang menghasilkan peningkatan dalam hal respon waktu dan resolusi daya. Namun, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa semakin besar sudut penyalaan, semakin menurun respon waktu. Selain itu, masih terdapat sinyal harmonik yang dihasilkan yang dapat mengganggu catu daya magnetron.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengontrol daya magnetron yang akan digunakan untuk pemanasan karbon aktif dari limbah biomassa. Metode yang digunakan adalah kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa. Dalam implementasinya, sistem pengontrol daya dilengkapi dengan *zero crossing detector* agar proses *switching* dapat dilakukan secara tepat saat tegangan berada pada titik nol. Sinyal PWM dibangkitkan oleh mikrokontroler agar mudah dalam aplikasinya. Sistem pengontrol daya yang dirancang diharapkan untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan penelitian sebelumnya.

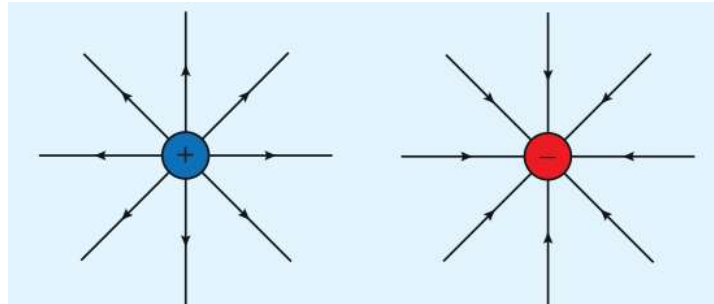
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Medan Elektromagnetik

2.2.1.1 Medan Listrik

Medan listrik adalah daerah atau ruang di sekitar muatan listrik yang masih dipengaruhi oleh gaya listrik. Medan listrik umumnya digambarkan sebagai garis-garis gaya yang mewakili lintasan yang ditempuh oleh partikel muatan yang bergerak karena gaya listrik (Meredith, 1998). Gambar 2.1 menunjukkan medan

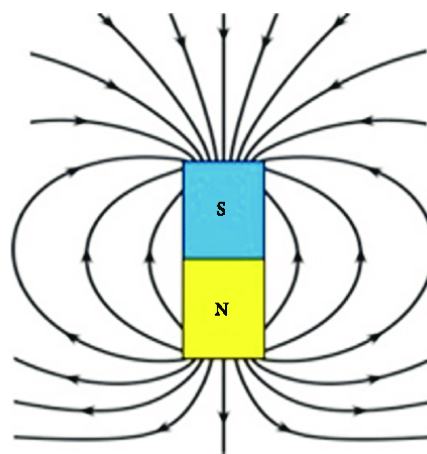
listrik yang ditimbulkan oleh muatan listrik positif dan negatif. Medan listrik berbentuk radial dan arahnya keluar dari muatan positif dan menuju muatan negatif.



Sumber: (Rediansyah *et al.*, 2015)

Gambar 2.1 Medan Listrik yang Ditimbulkan oleh Muatan Listrik

2.2.1.2 Medan Magnet



Sumber: (Meram dan Onen, 2019)

Gambar 2.2 Medan Magnet yang Ditimbulkan oleh Magnet Permanen

Medan magnet adalah daerah atau ruang di sekitar magnet yang masih dipengaruhi oleh gaya magnet. Medan magnet umumnya digambarkan sebagai garis-garis gaya magnet. Gambar 2.2 menunjukkan medan magnet yang

ditimbulkan oleh suatu magnet permanen. Medan magnet membentuk sirkuit tertutup dan arahnya keluar dari kutub utara dan menuju kutub selatan.

2.2.1.3 Teori Terjadinya Gelombang Elektromagnetik

Hukum-hukum yang mendasari terjadinya gelombang elektromagnetik adalah sebagai berikut.

1. Hukum Coulomb dan Hukum Gauss menyatakan bahwa muatan listrik statis dapat menimbulkan medan listrik di sekitarnya.
2. Hukum Ampere dan Hukum Biot-Savart menyatakan bahwa muatan listrik yang bergerak (arus listrik) akan menimbulkan medan magnet di sekitarnya.
3. Hukum Faraday menyatakan bahwa medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu akan menghasilkan medan listrik yang berubah-ubah pula.
4. Hipotesis Maxwell menyatakan bahwa jika medan magnet yang berubah-ubah dapat menimbulkan medan listrik yang berubah-ubah, maka ada kemungkinan sebaliknya, yaitu medan listrik yang berubah-ubah dapat menimbulkan medan magnet yang berubah pula. Hipotesis Maxwell dirumuskan dalam empat buah persamaan matematis berikut.

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

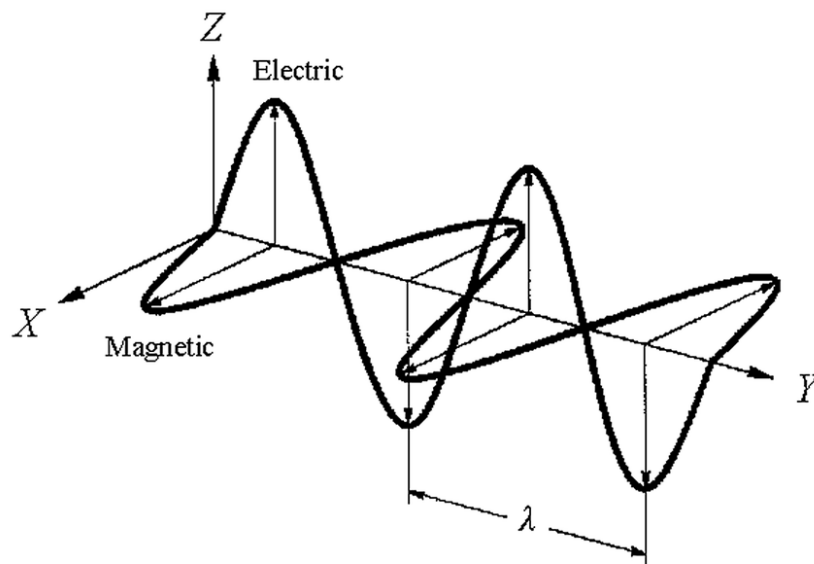
$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + I \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

Dengan E merupakan vektor medan listrik, H merupakan vektor medan magnet, D merupakan vektor kerapatan fluks listrik, B merupakan vektor kerapatan fluks magnet, I merupakan vektor kerapatan arus, dan ρ merupakan kerapatan muatan.

Maxwell juga merumuskan kecepatan gelombang elektromagnetik yang besarnya diperkirakan sama dengan kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8$ m/s. Hal ini dibuktikan oleh Hertz pada tahun 1887 melalui percobaan dan diperoleh hasil bahwa kecepatan gelombang elektromagnetik tepat sama dengan kecepatan cahaya, yaitu sebesar 3×10^8 m/s.



Sumber: (Geiger, 2004)

Gambar 2.3 Gelombang Elektromagnetik

Gambar 2.3 menunjukkan gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet. Proses terjadinya gelombang elektromagnetik dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Muatan listrik menimbulkan medan listrik di sekitarnya dengan arah radial.
2. Ketika muatan listrik digerakkan, maka medan listrik yang arahnya radial akan membentuk sirkuit tertutup sehingga timbul medan magnet.
3. Selanjutnya, medan magnet yang membentuk sirkuit tertutup akan kembali terbuka sehingga timbul medan listrik.
4. Proses perubahan medan listrik menjadi medan magnet dan sebaliknya berlangsung secara terus menerus dan saling timbal balik sehingga terbentuk medan listrik dan medan magnet sinusoidal yang merambat ke segala arah dengan arah saling tegak lurus.
5. Proses perambatan medan listrik dan medan magnet menghasilkan gelombang elektromagnetik.

2.2.1.4 Spektrum Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik terdiri dari beberapa jenis yang disebut dengan spektrum gelombang elektromagnetik. Tabel 2.2 menunjukkan spektrum gelombang elektromagnetik berdasarkan frekuensi dan panjang gelombang.

Tabel 2.2 Spektrum Gelombang Elektromagnetik

No.	Spektrum	Panjang Gelombang (m)	Frekuensi (Hz)
1	Sinar Gamma	$10^{-14} - 10^{-10}$	$3 \times 10^{18} - 3 \times 10^{22}$
2	Sinar X	$10^{-12} - 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{18}$
3	Sinar Ultraviolet	$10^{-8} - 0,4 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$
4	Cahaya Tampak	$0,4 \times 10^{-6} - 0,7 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$
5	Sinar Inframerah	$0,7 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-3}$	$10^{11} - 4,3 \times 10^{14}$
6	Gelombang Mikro	$3 \times 10^{-4} - 1$	$3 \times 10^8 - 10^{12}$
7	Gelombang Radio	$10^{-2} - 10^5$	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^{10}$

Sumber: (DeRoos *et al.*, 1993)

2.2.2 Gelombang Mikro

Gelombang mikro (*microwave*) termasuk salah satu spektrum gelombang elektromagnetik. Gelombang mikro adalah suatu bentuk radiasi elektromagnetik dalam bentuk penyebaran energi dalam vakum dengan kondisi material tidak bergerak (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017). Gelombang mikro memiliki panjang gelombang 1 milimeter hingga 1 meter dengan frekuensi 0,3 GHz – 300 GHz (Salazar-gonzález *et al.*, 2012). Frekuensi yang paling umum digunakan untuk pemanasan dengan gelombang mikro adalah 0,915 GHz dan 2,45 GHz (Thostenson dan Chou, 1999). Gelombang mikro merupakan gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus (Mishra dan Sharma, 2016). Ketika gelombang mikro bertemu dengan suatu medium, gelombang tersebut dapat dipantulkan, diserap, ditransmisikan, ataupun kombinasi dari ketiganya (Sun *et al.*, 2016).

2.2.3 Pemanasan dengan Gelombang Mikro (*Microwave Heating*)

Pemanasan dengan gelombang mikro (*microwave heating*) adalah suatu proses ketika energi elektromagnetik masuk ke dalam produk yang dipanaskan dalam bentuk gelombang elektromagnetik dan diubah menjadi panas ketika di dalam produk (Imenokhoyev *et al.*, 2013). Pemanasan dengan gelombang mikro menggunakan energi dari gelombang elektromagnetik yang dapat digunakan untuk memanaskan material dielektrik (Bradshaw *et al.*, 1998). Pemanasan dengan gelombang mikro berbeda dengan pemanasan konvensional dalam hal bahwa panas dapat secara langsung diarahkan ke material tanpa memanaskan udara di sekitarnya (Imenokhoyev *et al.*, 2013). Energi gelombang mikro dikirim secara langsung ke material melalui interaksi molekul dengan medan elektromagnetik (Sun *et al.*, 2016).

Pemanasan dengan gelombang mikro sudah banyak digunakan dalam pembuatan karbon aktif. Pemanasan dengan gelombang mikro memerlukan waktu sepuluh kali lebih cepat dibanding proses pemanasan lainnya sehingga konsumsi energi dapat berkurang (Decareau dan Peterson, 1986). Teknologi ini merupakan salah satu metode alternatif untuk pemanasan konvensional dan sudah digunakan secara luas di berbagai bidang karena efisiensi dan kemudahan dalam penggunaannya (Rodriguez-jasso *et al.*, 2013). Gelombang mikro yang digunakan untuk pemanasan biasanya memiliki rentang frekuensi 2,4 GHz – 2,4853 GHz. Jangkauan frekuensi tersebut sudah dapat menghasilkan pemanasan yang homogen dan efisien (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017).

Pemanasan dengan gelombang mikro sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat dielektrik material karena material dielektrik dapat terpolarisasi oleh medan listrik dan juga memiliki interaksi elektromagnetik yang baik (Stuerga, 2006). Selain sifat-sifat dielektrik, parameter lain yang dapat mempengaruhi penyerapan dan transfer gelombang mikro untuk mencapai pemanasan yang seragam antara lain komposisi kimia, penyebaran panas, konduktivitas panas, ukuran partikel, dan massa jenis material (Chandrasekaran *et al.*, 2013 dan Lyng *et al.*, 2014).

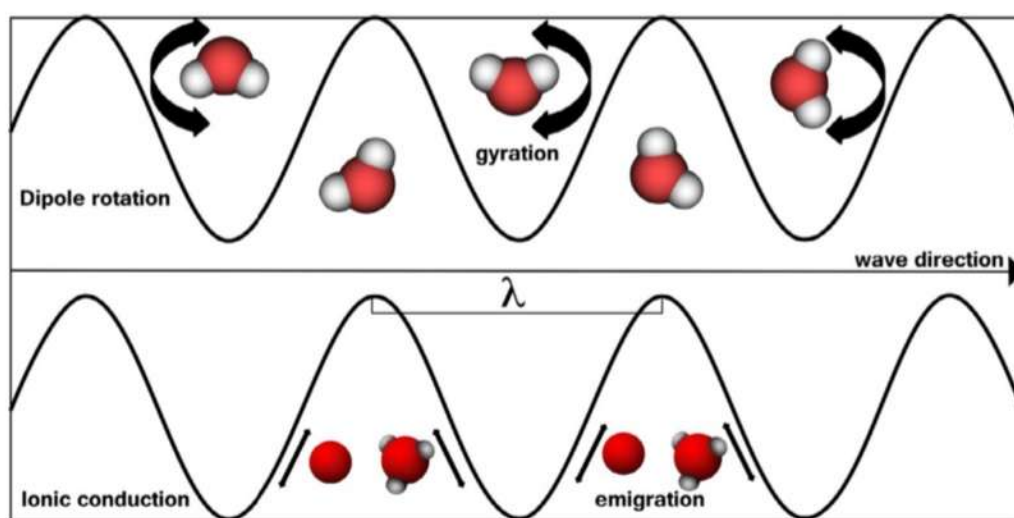
Pemanasan dengan gelombang mikro memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut.

1. Perpindahan panas lebih cepat dan waktu reaksi lebih singkat (Frag *et al.*, 2012).
2. Pemanasan bersifat dielektrik, volumetrik, dan selektif karena pemanasan dikhususkan untuk molekul-molekul yang memiliki dipol (Binner *et al.*, 2014).
3. Energi pemanasan lebih efisien sehingga biaya juga lebih efektif (Lin *et al.*, 2014).
4. Tidak ada kontak langsung antara material yang dipanasi dengan sumber panas sehingga dapat mencegah pemanasan berlebih pada permukaan material (Xie *et al.*, 1999).
5. Ramah lingkungan (Cheng *et al.*, 2011).

Sementara itu, kelemahan utama pemanasan dengan gelombang mikro adalah distribusi daya yang tidak merata pada material yang tidak homogen dalam hal

komposisi, geometri, dan ukuran sehingga menyebabkan pemanasan berlebih (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017).

Menurut Aguilar-reynosa *et al.* (2017), perambatan panas dalam proses pemanasan dengan gelombang mikro dilakukan melalui dua cara seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Kedua cara tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.



Sumber: (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017)

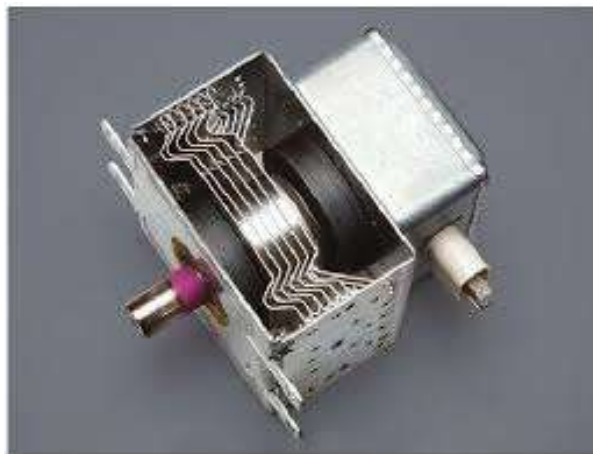
Gambar 2.4 Mekanisme Pemanasan Dengan Gelombang Mikro

1. Konduksi ionik terjadi ketika terdapat ion-ion bebas atau spesi ionik dan molekul-molekul berorientasi akibat gerakan ion yang dihasilkan dalam medan listrik sehingga menyebabkan pemanasan yang cepat. Jika larutan lebih rapat, maka terjadi lebih banyak getaran sehingga lebih banyak energi kinetik yang diubah menjadi panas.

2. Rotasi dipol yang mengacu pada suatu interaksi ketika molekul-molekul polar mencoba untuk menyelaraskan diri dengan perubahan medan listrik. Pergerakan tersebut menyebabkan gesekan antarmolekul dan kemudian mengirim energi panas sebagai hasil dari rotasi molekul.

Menurut Thostenson dan Chou (1999), sistem pemanasan dengan gelombang mikro memiliki tiga bagian utama, yaitu sumber gelombang mikro, saluran transmisi, dan aplikator. Sumber gelombang mikro menghasilkan radiasi elektromagnetik, saluran transmisi mengirimkan energi elektromagnetik dari sumber ke aplikator, sedangkan aplikator merupakan tempat terjadinya penyerapan dan pemantulan energi elektromagnetik oleh material.

2.2.3.1 Sumber Gelombang Mikro

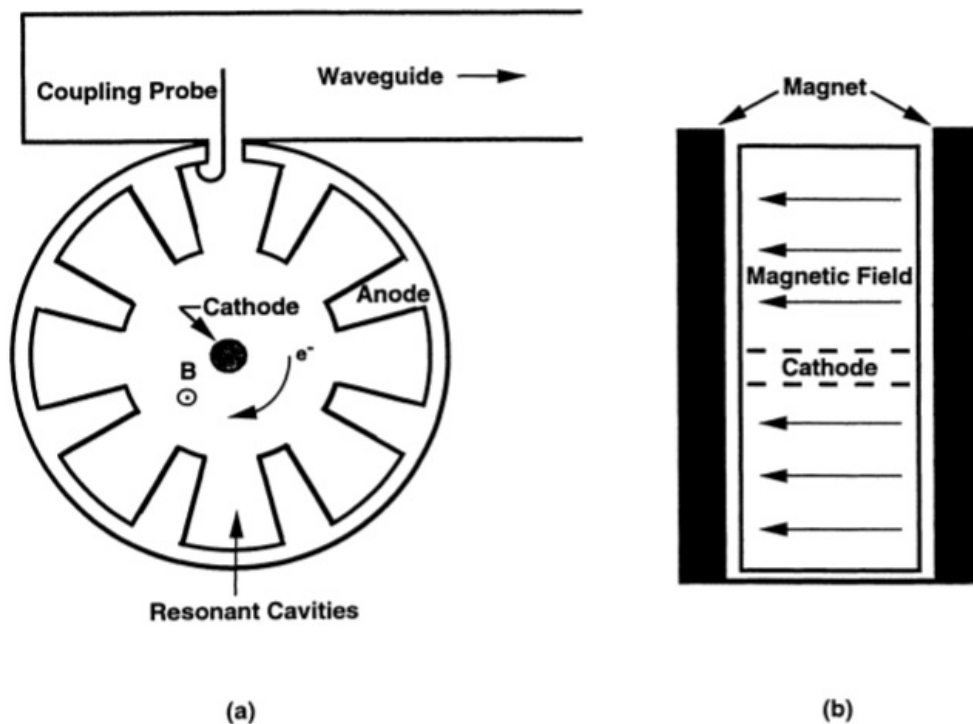


Sumber: (Gimersky dan Ernst, 2015)

Gambar 2.5 Bentuk Fisik Magnetron

Menurut Thostenson dan Chou (1999), sumber gelombang mikro umumnya berupa tabung vakum. Tabung vakum yang sudah digunakan untuk pemanasan

dengan gelombang mikro antara lain magnetron, *travelling wave tubes* (TWT), dan *klystron*. Magnetron dengan bentuk fisik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 adalah sumber gelombang mikro yang efisien dan reliabel. Tabung magnetron menggunakan struktur resonansi untuk menghasilkan medan elektromagnetik sehingga hanya mampu menghasilkan medan elektromagnetik dengan frekuensi yang tetap. Sementara itu, TWT dapat digunakan untuk menghasilkan frekuensi gelombang mikro yang bervariasi.



Sumber: (Meredith, 1998)

Gambar 2.6 Diagram Skematik Magnetron

Dalam tabung vakum, anode memiliki potensial yang lebih tinggi dari katode. Perbedaan potensial tersebut menghasilkan medan listrik yang kuat, dan katode dipanaskan untuk melepaskan elektron valensi. Saat dilepaskan dari katode,

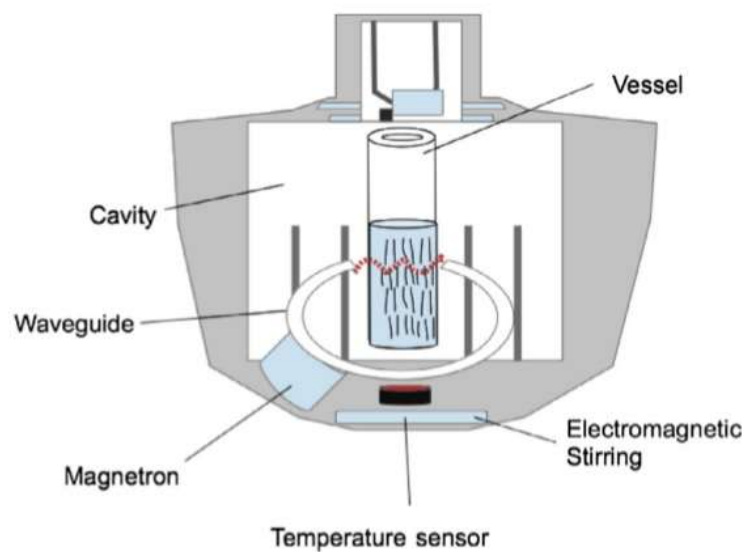
elektron akan dipercepat terhadap katode oleh medan listrik. Diagram skematik dari magnetron ditunjukkan pada Gambar 2.6. Dalam suatu magnetron, magnet eksternal digunakan untuk menghasilkan medan magnet yang tegak lurus dengan medan listrik. Medan magnet akan menghasilkan gaya pada elektron sehingga elektron dipercepat ke anode. Gaya tersebut menyebabkan elektron bergerak dalam lintasan spiral sehingga membentuk perputaran awan elektron. Ketika elektron melewati rongga-rongga resonan (*resonant cavities*), rongga-rongga (*cavities*) tersebut akan menghasilkan osilasi pada awan elektron dengan frekuensi yang bergantung pada ukuran *cavities*. Energi elektromagnetik digabung dari salah satu *resonant cavities* ke saluran transmisi melalui kabel koaksial atau *waveguide*.

3.2.3.2 Saluran Transmisi

Menurut Thostenson dan Chou (1999), saluran transmisi berfungsi untuk menghubungkan energi dari sumber gelombang mikro dengan aplikator. Dalam sistem daya rendah, saluran transmisi menggunakan kabel koaksial yang serupa dengan kabel televisi. Pada frekuensi dan daya tinggi, rugi daya yang timbul pada kabel koaksial cukup signifikan sehingga kurang efektif. Pada pemanasan gelombang mikro dengan frekuensi tinggi, *waveguide* sering digunakan sebagai saluran transmisi. *Waveguide* berupa tabung berongga sebagai tempat menyebarnya gelombang elektromagnetik. Penyebaran gelombang mikro dalam *waveguide* dapat terjadi dalam dua mode, yaitu mode *transverse electric* (TE) dan mode *transverse magnetic* (TM).

2.2.3.3 Aplikator Gelombang Mikro

Aplikator gelombang mikro adalah tempat terjadinya pemantulan dan penyerapan gelombang mikro oleh material. Gambar 2.7 menunjukkan diagram aplikator gelombang mikro.



Sumber: (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017)

Gambar 2.7 Diagram Aplikator Gelombang Mikro

2.2.4 Interaksi Gelombang Mikro dengan Material

Interaksi antara gelombang mikro dengan material terjadi melalui proses polarisasi dan konduksi (Clark dan Sutton, 1996). Polarisasi melibatkan perpindahan muatan dalam waktu singkat melalui pembentukan dan rotasi dipol elektrik, sedangkan konduksi memerlukan perpindahan muatan dalam waktu yang lebih lama. Pada kondisi tertentu, proses polarisasi dan konduksi tidak dapat

dipisahkan satu sama lain dan bekerja bersama dalam menghasilkan panas (Sun *et al.*, 2016).

Menurut Thostenson dan Chou (1999), sifat-sifat dielektrik material menentukan pengaruh medan elektromagnetik terhadap material yang dipanaskan. Sifat dielektrik atau permitivitas adalah kemampuan material dielektrik untuk menyimpan energi elektrostatik dalam medan magnet (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017). Sifat dielektrik material dinyatakan dalam bentuk bilangan kompleks dengan persamaan

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (5)$$

dengan ε' adalah konstanta dielektrik dan ε'' adalah rugi dielektrik. Konstanta dielektrik (*dielectric constant*) adalah kemampuan molekul untuk terpolarisasi oleh suatu medan listrik dan juga untuk menyimpan energi listrik; bagian ini merupakan bagian nyata dari sifat-sifat dielektrik dalam bentuk kompleks (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017). Sementara itu, rugi dielektrik (*dielectric loss*) adalah jumlah energi yang hilang dari material untuk didisipasikan menjadi panas ketika berinteraksi dengan gelombang mikro; bagian ini merupakan bagian imajiner dari sifat-sifat dielektrik dalam bentuk kompleks (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017). Semakin rendah rugi dielektrik, kemampuan material untuk menyerap gelombang mikro semakin kecil (Zhao *et al.*, 2010 dan Motasemi *et al.*, 2014). Rugi dielektrik berkurang ketika temperatur meningkat (Ayappa, 1997).

Bentuk lain yang umum untuk menyatakan sifat-sifat dielektrik adalah *loss tangent* atau faktor disipasi (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017) yang dinyatakan dalam persamaan

$$\text{Tan } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (6)$$

Faktor disipasi atau tangen rugi dielektrik adalah perbandingan antara rugi dielektrik dengan konstanta dielektrik. Parameter ini digunakan untuk mendeskripsikan kapasitas material yang dipanaskan dengan gelombang mikro (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017). Berdasarkan faktor disipasi, material dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori sebagai berikut (Aguilar-reynosa *et al.*, 2017).

1. Material konduktif, memiliki nilai $\tan \delta < 0$ dan tidak dapat ditembus oleh gelombang mikro; contohnya logam.
2. Material nonkonduktor, memiliki nilai $\tan \delta = 0,1-0,5$ dan rugi dielektrik yang rendah, cocok untuk dijadikan reaktor gelombang mikro; contohnya teflon.
3. Material dielektrik, memiliki nilai $\tan \delta > 0,5$ dan dapat menyerap gelombang mikro sehingga sangat ideal digunakan dalam pemanasan dengan gelombang mikro; contohnya air.

2.2.5 Daya Gelombang Mikro

Persamaan dasar daya gelombang mikro dinyatakan sebagai berikut (Gerling, 1987):

$$P_g = P_R + P_a + P_d \quad (7)$$

Daya yang dihasilkan oleh magnetron (P_g) sama dengan jumlah daya yang dipantulkan balik ke magnetron (P_R), daya yang diserap oleh aplikator (P_a), dan daya yang dikirim ke beban atau material yang dipanaskan di dalam aplikator (P_d). Daya yang dipantulkan balik ke magnetron bergantung pada jumlah beban atau material yang dipanaskan. Semakin banyak beban, semakin sedikit daya yang dipantulkan balik ke magnetron, dan juga sebaliknya. Daya yang diserap oleh aplikator disebabkan oleh timbulnya arus listrik pada permukaan logam dinding aplikator. Daya yang dikirim ke beban atau material bergantung pada ukuran dan penempatan material di dalam aplikator.

Menurut Thostenson dan Chou (1999), jika medan listrik dianggap seragam pada material yang dipanaskan, daya yang diserap tiap satuan volume ditentukan oleh persamaan

$$P = 2\pi f \varepsilon'' E^2 \quad (8)$$

dengan P adalah daya yang diserap tiap satuan volume, f adalah frekuensi gelombang mikro, ε'' adalah rugi dielektrik, dan E adalah medan listrik.

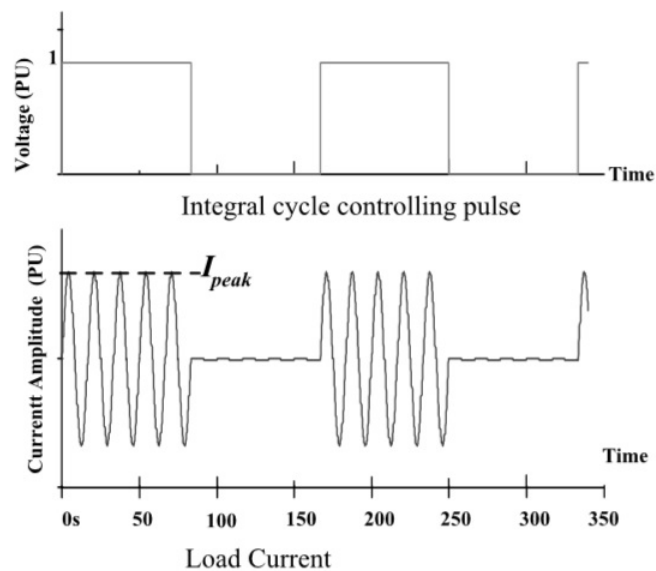
2.2.6 Teknik Kontrol Daya Siklus Integral dan Modulasi Lebar Pulsa

Teknik kontrol daya dengan siklus integral sudah digunakan secara luas untuk mengontrol daya AC karena dapat menghilangkan interferensi frekuensi radio (McCarthy dan Danesh, 1978). Teknik ini dilakukan dengan mengatur waktu *on* dan *off* dari sumber sehingga diperoleh daya rata-rata yang dibutuhkan oleh

beban (Nigim dan Heydt, 2002). Menurut McCharty dan Danesh (1978), daya rata-rata yang diterima beban ditentukan dengan

$$P_{mean} = \frac{N_C}{N} P_{max} \quad (9)$$

dengan N_C adalah jumlah setengah gelombang saat konduksi (*on*), N adalah jumlah total setengah gelombang, dan P_{max} adalah daya maksimum.



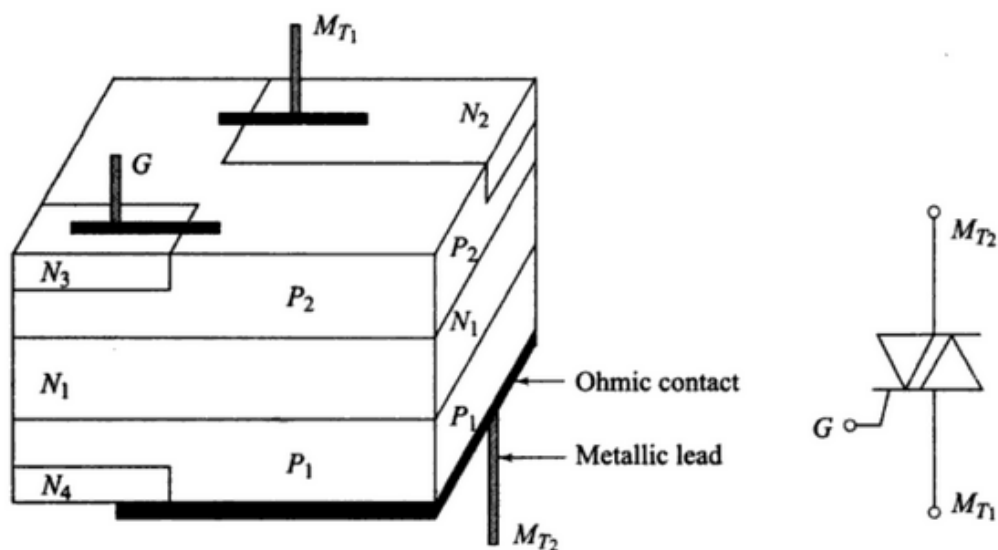
Sumber: (Nigim dan Heydt, 2002)

Gambar 2.8 Kombinasi Teknik Kontrol Siklus Integral dan PWM

Modulasi lebar pulsa atau *Pulse Width Modulation* (PWM) digunakan untuk mengatur waktu *on* dan *off* dengan menggunakan mikrokontroler. PWM adalah serangkaian pulsa yang memiliki frekuensi dan magnitudo tetap dan lebar pulsa yang dapat diatur (Yu *et al.*, 1997). Keuntungan PWM antara lain proses *switching* (perubahan kondisi *on* dan *off*) dapat dilakukan secara presisi dan meminimalkan

gangguan sinyal harmonik (Nigim dan Heydt, 2002). Keuntungan lainnya antara lain mudah diterapkan dan dikontrol, kompatibel dengan mikroprosesor yang saat ini terus berkembang, dan daya disipasi yang rendah (Yu *et al.*, 1997). Kombinasi teknik kontrol siklus integral dan PWM dapat menghasilkan gelombang keluaran seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Berdasarkan Gambar 2.10, dapat diketahui bahwa metode kontrol siklus integral menghasilkan keluaran berupa gelombang sinusoidal secara utuh. Hal ini berbeda dengan metode kontrol fase yang menghasilkan gelombang sinusoidal yang terpotong. Gelombang sinusoidal yang tidak sempurna dapat menyebabkan kerusakan komponen sehingga memperpendek umur komponen tersebut (Sadati *et al.*, 2008).

2.2.7 Triode Alternating Current (TRIAC)

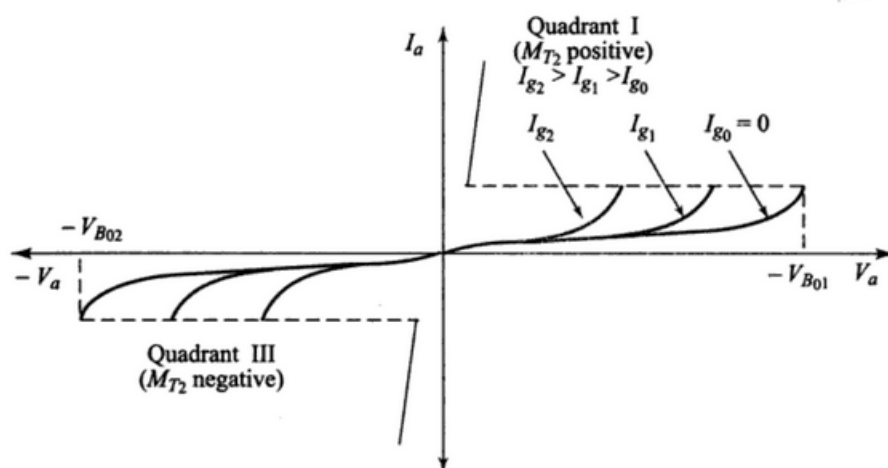


Sumber: (Singh dan Khanchandani, 2008)

Gambar 2.9 Struktur dan Simbol TRIAC

Gambar 2.9 menunjukkan struktur dan simbol TRIAC. Menurut Singh & Khanchandani (2008), TRIAC terdiri dari dua buah thyristor yang dihubungkan secara paralel dan berlawanan arah. TRIAC memiliki tiga buah terminal, yaitu *main terminal* MT1, MT2, dan *gate* G. Terminal MT1 adalah titik referensi untuk pengukuran tegangan dan arus pada terminal G dan MT2.

Gambar 2.10 menunjukkan kurva karakteristik TRIAC. Kurva karakteristik tersebut berdasarkan pada terminal MT1 sebagai titik referensi. Kuadran pertama adalah daerah di mana MT2 positif dan MT1 negatif. Sebaliknya, kuadran ketiga merupakan daerah di mana MT1 positif dan MT2 negatif. Tegangan puncak yang diberikan ke TRIAC dalam kedua arah harus lebih kecil dari tegangan *breakover* untuk mempertahankan kontrol dari G. TRIAC dapat dipicu dengan memberikan arus G positif maupun negatif yang mempertahankan terminal MT2 pada potensial positif atau negatif. Pemicuan dapat diberikan dalam bentuk gelombang searah maupun bolak-balik.

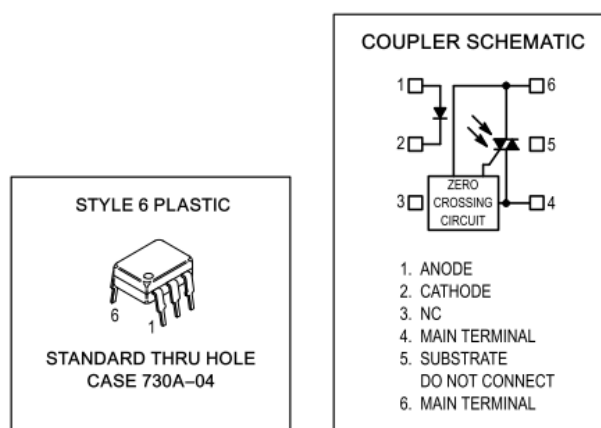


Sumber: (Singh dan Khanchandani, 2008)

Gambar 2.10 Kurva Karakteristik TRIAC

2.2.8 IC MOC3041

Gambar 2.11 menunjukkan bentuk fisik dan diagram skematik dari IC MOC3041. IC MOC3041 terdiri dari dioda inframerah yang terhubung secara optik dengan sebuah detektor yang berfungsi sebagai *zero voltage detector* untuk mengendalikan TRIAC (Motorola, 1995). Bagian dioda inframerah adalah terminal 1 dan 2 yang masing-masing bertindak sebagai anode dan katode. Terminal 4 dan 6 merupakan output yang akan dihubungkan dengan TRIAC.



Sumber: (Motorola, 1995)

Gambar 2.11 Bentuk Fisik dan Diagram Skematik IC MOC3041

2.2.9 Karbon Aktif (*Activated Carbon*)

Karbon aktif merupakan senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan proses aktivasi (Idrus dkk., 2013). Pada proses aktivasi terjadi penghilangan hidrogen, gas, dan air dari permukaan karbon sehingga terbentuk pori-pori baru akibat pengikisan atom karbon melalui proses oksidasi atau pemanasan. Karbon aktif umumnya mempunyai luas permukaan pori yang sangat

besar, berkisar 300 – 2000 m²/g (Danarto dan T., 2008). Luas permukaan yang besar ini disebabkan karena karbon mempunyai struktur permukaan yang berongga, sehingga mempunyai kemampuan menyerap gas atau zat yang berada dalam larutan (Janowska *et al.*, 1991).

Berdasarkan diameter porinya, karbon aktif dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu makropori, mesopori, dan mikropori (McDougall, 1991). Karbon aktif makropori memiliki diameter pori lebih dari 50 nm, karbon aktif mesopori memiliki diameter pori 2 nm – 50 nm, sedangkan karbon aktif mikropori memiliki diameter pori kurang dari 2 nm (Danarto dan T., 2008).

Proses pembuatan karbon aktif dilakukan melalui tiga tahap, yaitu dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi (Danarto dan T., 2008). Pada tahap dehidrasi, bahan baku dipanaskan sampai suhunya mencapai 105 °C untuk menghilangkan kandungan air. Tahap karbonisasi merupakan proses pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal pada suhu 600 – 1100 °C. Selama proses ini, unsur-unsur selain karbon seperti hidrogen dan oksigen dibebaskan dalam bentuk gas. Pada proses aktivasi, ukuran pori karbon aktif bertambah besar karena hidrokarbon yang menyumbat pori-pori terbebaskan. Proses aktivasi dapat dilakukan secara fisika maupun kimia. Aktivasi secara fisika dilakukan dengan mengalirkan uap atau udara pada suhu 800 – 1000 °C, sedangkan aktivasi secara kimia dilakukan dengan merendam bahan baku pada bahan kimia seperti HCl, NaCl, dan sebagainya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

4. Sinyal kontrol PWM yang dihasilkan bekerja dengan baik dengan rata-rata kesalahan frekuensi sebesar 0%, rata-rata kesalahan *duty cycle* sebesar 0,15%, dan rata-rata *switching loss* sebesar 0,1%.
5. Metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa yang dirancang hasilnya sesuai dengan teori dan memiliki performa yang cukup baik. Metode tersebut bekerja dengan baik dalam mengontrol tegangan catu filamen dan tegangan catu anode magnetron dengan *switching loss* masing-masing sebesar 0,67% dan 0,83%. Selain itu, metode tersebut dapat mengontrol daya magnetron dengan baik dengan kesalahan daya sebesar 0,74%.
6. Metode kontrol daya siklus integral dan modulasi lebar pulsa yang dirancang dapat bekerja paling optimal pada daya 100% atau 900 W dengan nilai *switching loss* sebesar 0% dan kesalahan daya sebesar 0%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, penulis menyadari bahwa hasil penelitian ini masih memiliki banyak kekurangan. Berikut ini saran dari penulis untuk perbaikan penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan penelitian ini.

1. Nilai kesalahan pengontrol daya perlu dikurangi agar nilainya mendekati 0%, baik dengan mengembangkan metode kontrol daya yang sama dengan penelitian ini maupun menggunakan metode kontrol daya yang lain.
2. Dalam penelitian ini tidak dibahas gangguan harmonik dan efisiensi sehingga untuk penelitian berikutnya perlu mempertimbangkan gangguan harmonik dan efisiensi tersebut agar daya yang diberikan ke magnetron lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar-reynosa, A., Romaní, A., Rodríguez-jasso, R. M., Aguilar, C. N., Garrote, G., & Ruiz, H. A. (2017). Microwave Heating Processing as Alternative of Pretreatment in Second- Generation Biorefinery : An Overview. *Energy Conversion and Management*, 136, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.004>
- Ahmad, A. M., Azreen, N., Puad, A., & Solomon, O. (2014). Kinetic , equilibrium and thermodynamic studies of synthetic dye removal using pomegranate peel activated carbon prepared by microwave-induced KOH activation. *Water Resources and Industry*, 6, 18–35. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.06.002>
- Ahmed, M. J., & Theydan, S. K. (2014). Optimization of Microwave Preparation Conditions for Activated Carbon from Albizia lebbeck Seed Pods for Methylene Blue Dye Adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.11.005>
- Alslaibi, T., Abustan, I., Azmeir, M., & Foul, A. A. (2012). Review : Comparison of agricultural by-products activated carbon production methods using surface area response. *Awam International Conference on Civil Engineering*, 528–538.
- Ania, C. O., Menendez, J. A., Parra, J. B., & Pis, J. J. (2004). Microwave-induced regeneration of activated carbons polluted with phenol: A comparison with conventional thermal regeneration. *Carbon*, 42, 1383–1387. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.010>
- Ao, W., Fu, J., Mao, X., Kang, Q., Ran, C., Liu, Y., & Zhang, H. (2018). Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 958–979. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.051>
- Ayappa, K. G. (1997). Modelling Transport Processes During Microwave Heating: A Review. *Reviews in Chemical Engineering*, 13(2), 1–69.
- Binner, E. R., Robinson, J. P., Silvester, S. A., Kingman, S. W., & Lester, E. H. (2014). Investigation into the mechanisms by which microwave heating enhances separation of water-in-oil emulsions. *FUEL*, 116, 516–521. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.042>

- Bradshaw, S. M., Wyk, E. J. Van, & Swardt, J. . B. de. (1998). Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 201–212.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing — A review. *Food Research International*, 52(1), 243–261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>
- Cheng, C., Liu, H., Dai, P., Shen, X., Zhang, J., Zhao, T., & Zhu, Z. (2016). Microwave-assisted preparation and characterization of mesoporous activated carbon from mushroom roots by phytic acid (C 6 H 18 O 24 P 6) activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 67, 532–537. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.08.032>
- Cheng, S. F., L., M. N., & Chuah, C. H. (2011). Microwave pretreatment : A clean and dry method for palm oil production. *Industrial Crops & Products*, 34(1), 967–971. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.002>
- Cheng, W. M. (2004). *Microwave Power Control Strategies on the Drying Process*. McGill University.
- Clark, D. E., & Sutton, W. H. (1996). *Microwave Processing of Materials*. Chicago.
- Danarto, Y. C., & T., S. (2008). Pengaruh Aktivasi Karbon dari Sekam Padi pada Proses Adsorpsi Logam Cr(VI). *Ekulibrium*, 7(1), 13–16.
- Decareau, R. V., & Peterson, R. A. (1986). *Microwave processing and engineering*. WILEY-VCH Verlag GMBh.
- DeRoos, B. G., Wilson, G., Lyon, F., & Pope, W. S. (1993). *Technical Survey and Evaluation of Underwater Sensors and Remotely Operated Vehicles*. Columbus.
- Duan, X., Srinivasakannan, C., Wang, X., Wang, F., & Liu, X. (2016). Synthesis of activated carbon fibers from cotton by microwave induced H₃PO₄ activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 0, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.036>
- Faharuddin, A., & Wibisana, G. (2012). Simulasi Kualitas Daya Saluran Distribusi Sekunder Perumahan. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 1(1), 42–50.
- Farag, S., Sobhy, A., Akyel, C., Doucet, J., & Chaouki, J. (2012). Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45 GHz. *Applied Thermal Engineering*, 36, 360–369.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.049>

- Ferrera-lorenzo, N., Fuente, E., Suarez-ruiz, I., & Ruiz, B. (2014). KOH activated carbon from conventional and microwave heating system of a macroalgae waste from the Agar – Agar industry. *Fuel Processing Technology*, 121, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.12.017>
- Geiger, C. A. (2004). An introduction to spectroscopic methods in the mineral sciences and geochemistry. *EMU Notes in Mineralogy*, 6(1), 1–42.
- Georgin, J., Dotto, L. G., Mazutti, A. M., & Foletto, L. E. (2016). Preparation of activated carbon from peanut shell by conventional pyrolysis and microwave irradiation-pyrolysis to remove organic dyes from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.018>
- Gerling, J. E. (1987). Microwave Oven Power : A Technical Review. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 22(4), 199–207. <https://doi.org/10.1080/08327823.1987.11688024>
- Gimersky, M., & Ernst, M. (2015). *Modeling of large microwave cavities for industrial and scientific applications*.
- Heggannavar, M. (2015). Power Supply Design for Magnetron Power Source from Single Phase Supply. *International Conference on Energy Systems and Applications*, 546–551.
- Hesas, R. H., Arami-niya, A., Daud, W. M. A. W., & Sahu, J. N. (2013). Preparation of granular activated carbon from oil palm shell by microwave-induced chemical activation: Optimisation using surface response methodology. *Chemical Engineering Research and Design*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.06.004>
- Idrus, R., Lapanoro, B. P., & Putra, Y. S. (2013). Pengaruh Suhu Aktivasi Terhadap Kualitas Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa. *Prisma Fisika*, 1(1), 50–55.
- Imenokhoyev, I., Windsheimer, H., Waitz, R., Kintsel, N., & Linn, H. (2013). Microwave Heating Technology: Potentials and Limits. *Process Engineering*, 90(4), 41–49.
- Janowska, H., Swiatkwoski, A., & Choma, J. (1991). *Activated Carbon*. Chycheeste: Ellis Horwood Ltd.

- Kim, M., Choi, W., Jeong, I., Park, H., & Park, K. (2016). New Driving Method of Magnetron Power Supply for Sulfur Plasma Lamp. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2565441>
- Korkua, S. K., Member, I., Chandhaket, S., Thinsurat, K., & Pornbandit, K. (2016). Design of Automatic Phase-controlled Converter based on Temperature for Microwave Drying System. *IEEE*, 1–6.
- Lin, Y., Chen, S., Wu, T., Yang, P., Jhang, S., & Lin, J. (2014). Energy-saving and rapid transesterification of jatropha oil using a microwave heating system with ionic liquid catalyst. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 0, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.11.014>
- Lyng, J. G., Arimi, J. M., Scully, M., & Marra, F. (2014). The influence of compositional changes in reconstituted potato flakes on thermal and dielectric properties and temperatures following microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 124, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.032>
- Mangkuatmodjo, S. (2015). *Statistik Deskriptif*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Mashhadi, S., Javadian, H., Ghasemi, M., Saleh, T. A., & Gupta, V. K. (2016). Microwave-induced H₂SO₄ activation of activated carbon derived from rice agricultural wastes for sorption of methylene blue from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1119737>
- McCarthy, E. P., & Danesh, J. (1978). A Novel Method of Direct Digital Integral-Cycle Power Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 25(2).
- McDougall, G. J. (1991). The Physical Nature and Manufacture of Activated Carbon. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 91(4), 109–120.
- Mekonnen, S. A., Yenikaya, S., Yenikaya, G., & Yılmaz, G. (2018). Effects of Dielectric Properties of the Material located inside Multimode Applicator on Microwave Efficiency. *Advances in Science, Technology, and Engineering Systems Journal*, 3(3), 61–66.
- Meram, A., & Onen, U. (2019). Vibration analysis of a novel magnetic-viscous nonlinear passive isolator via finite element simulation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27, 2309–2320. <https://doi.org/10.3906/elk-1807-195>

- Meredith, R. (1998). *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*. London: The Institution of Electrical Engineers.
- Merwe, J. P. Van der, & Swardt, J. B. de. (2017). Power Control of a Domestic Microwave Oven. *IEEE Africon 2017 Proceedings*, 574–578.
- Mirmanto, Mulyanto, A., & Hidayatullah, L. R. (2017). Hubungan ketinggian dan diameter lubang udara tungku pembakaran biomassa dan efisiensi tungku. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(4), 225–230. <https://doi.org/10.22441/jtm.v6i4.2048>
- Mishra, R. R., & Sharma, A. K. (2016). Microwave – material interaction phenomena : Heating mechanisms , challenges and opportunities in material processing. *Composites: Part A*, 81, 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>
- Motasemi, F., Afzal, M. T., Salema, A. A., Mouris, J., & Hutcheon, R. M. (2014). Microwave dielectric characterization of switchgrass for bioenergy and biofuel. *Fuel*, 124, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.085>
- Motorola. (1995). *6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output MOC3041*. Tokyo.
- Mourão, P. A. M., Laginhas, C., Custódio, F., Nabais, J. M. V., Carrott, P. J. M., & Carrott, M. M. L. R. (2011). Influence of oxidation process on the adsorption capacity of activated carbons from lignocellulosic precursors. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.04.013>
- Nigim, K. A., & Heydt, G. T. (2002). Power quality improvement using integral-PWM control in an AC / AC voltage converter. *Electric Power System Research*, 63, 65–71.
- Nugroho, F. C. (2017). *Penggunaan Filter Pasif untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Pemakaian Mesin Las Listrik*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Onyango, J. P., & Plews, A. M. (1987). *A Textbook of Basic Statistics*. Nairobi: East African Educational Publisher.
- Putra, A. D., Yusuf, I., & Gani, U. A. (2016). *Studi Potensi Limbah Biomassa Kelapa Sawit Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Di PT Perkebunan Nusantara XIII PKS Parindu*. Pontianak.
- Rediansyah, H., Khairurrijal, & Viridi, S. (2015). Static electric field mapping using a mosquito racket and baby oil. *Physics Education*, 50(6), 690–693. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/50/6/690>

- Reis, S. G. dos, Wilhelm, M., Canuto, T., Silva, D. A., Rezwan, K., Hoffmann, C., ... Souza, U. de. (2016). The use of design of experiments for the evaluation of the production of surface rich activated carbon from sewage sludge via microwave and conventional pyrolysis. *Applied Thermal Engineering*, 93, 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.035>
- Rodriguez-jasso, R. M., Mussatto, S. I., Pastrana, L., Aguilar, C. N., & Teixeira, J. A. (2013). *Chemical composition and antioxidant activity of sulphated polysaccharides extracted from Fucus vesiculosus using different hydrothermal processes*. <https://doi.org/10.2478/s11696-013-0430-9>
- Sadati, S., Tahani, A., Jafari, M., & Dorgahi, M. (2008). Derating of Transformers unde Non-Sinusoidal Loads. *IEEE 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 263–268. Brasov, Romania.
- Salazar-gonzález, C., Martin-gonzales, M. F. S., Lopez-malo, A., & Sosa-morales, M. E. (2012). Recent Studies Related to Microwave Processing of Fluid Foods. *Food Bioprocess Technol*, 5, 31–46. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0639-y>
- Singh, M. D., & Khanchandani, K. B. (2008). *Power Electronics* (2nd ed.). New Delhi: McGrwa-Hill.
- Sjaferial, A., Penangsang, O., & Riawan, D. C. (2015). Peredaman Resonansi Harmonisa Pada Sistem Kelistrikan Industri Menggunakan Filter Hybrid Dengan Konduktansi Variable. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), 181–186.
- Stuerga, D. (2006). Microwave – Material Interactions and Dielectric Properties , Key Ingredients for Mastery of Chemical Microwave Processes. In A. Loupy (Ed.), *Microwave in Organic Synthesis* (2nd ed., pp. 1–61). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GMBh.
- Sturm, G. S. J., Verweij, M. D., Stankiewicz, A. I., & Stefanidis, G. D. (2014). Microwaves and microreactors : Design challenges and remedies. *Chemical Engineering Journal*, 243, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.088>
- Sugiyono. (2016). *Metode Penelitian Pendidikan*. Bandung: Alfabeta.
- Sun, J., Wang, W., & Yue, Q. (2016). Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies. *Materials*, 9(231), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ma9040231>
- Thostenson, E. T., & Chou, T. W. (1999). *Microwave processing : fundamentals*

and applications. *Composites*, 30, 1055–1071.

- Wu, M., Li, R., He, X., Zhang, H., Sui, W., & Tan, M. (2015). Microwave-assisted preparation of peanut shell-based activated carbons and their use in electrochemical capacitors. *New Carbon Materials*, 30(1), 86–91. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60178-0](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60178-0)
- Xie, Z., Yang, J., Huang, X., & Huang, Y. (1999). Microwave Processing and Properties of Ceramics with Different Dielectric Loss. *Journal of European Ceramic Society*, 19, 381–387.
- Yi, H., Li, F., Ning, P., Tang, X., Peng, J., Li, Y., & Deng, H. (2013). Adsorption separation of CO₂, CH₄, and N₂ on microwave activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 215–216, 635–642. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.050>
- Yu, Z., Mohammed, A., & Panahi, I. (1997). A Review of Three PWM Techniques. *Proceedings of the American Control Conference*, 257–261. Albuquerque.
- Zhao, X., Zhou, Y., Zheng, G., & Liu, D. (2010). Microwave Pretreatment of Substrates for Cellulase Production by Solid-State Fermentation. *Appl Biochem Biotechnol*, 160, 1557–1571. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8640-x>