BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Lapisan Tipis

Material lapisan tipis merupakan suatu material yang memiliki ketebalan dalam orde mikrometer hingga nanometer [2,3]. Material lapisan tipis telah banyak diaplikasikan dalam berbagai disiplin ilmu, seperti dalam bidang mekanika, material lapisan tipis digunakan untuk meningkatkan daya tahan korosi. Pada bidang optik, digunakan untuk membuat lensa anti refleksi, cermin reflektor, kaca pelindung cahaya, perlengkapan kamera dan pandu gelombang. Pada bidang elektronika, lapisan tipis digunakan untuk membuat kapasitor, semikonduktor dan sensor. Pada bidang industri lapisan tipis digunakan untuk berbagai fungsi dekoratif [1].

Secara umum lapisan tipis terbagi menjadi dua daerah utama yaitu lapisan tipis pada daerah bebas dan lapisan tipis pada daerah substrat. Pada daerah bebas lapisan tipis, digunakan polimer udara yang dapat mempengaruhi prilaku polimer sebagai lapisan tipis tersebut. Sehingga ketebalan lapisan tipis tersebut akan berkurang hingga material tersebut memiliki ketebalan lapisan yang sangat tipis. Pada daerah substrat lapisan tipis, digunakan substrat padatan atau cairan yang kemudian diuapkan untuk menghasilkan lapisan tipis yang diharapkan [2].

Lapisan tipis dapat ditumbuhkan dari material organik, anorganik, logam ataupun campuran logam organik (*organometalic*) yang memiliki sifat konduktor, semikonduktor, superkonduktor dan insulator. Dalam penumbuhan lapisan tipis, suhu operasi dan proses deposisi menjadi parameter yang berpengaruh terhadap karakteristik dan ketebalan lapisan tipis yang ditumbuhkan [7]. Berdasarkan derajat kevakumannya, metode penumbuhan material lapisan tipis dikelompokkan menjadi dua yaitu metode vakum dan metode non-vakum. Metode vakum terdiri dari *Physical Vapour Deposition* (PVD), *Chemical Vapour Deposition* (CVD), *Pulse Laser*

Ablation Deposition (PLAD), dan *Ion Planting*. Sedangkan metode non-vakum terdiri dari *Elektro-deposisi*, *Elektro-foresis*, *Dip Coating*, *Spin Coating*, *Screen Printing*, *Spray Pyrolisis* dan *Chemical Solution Deposition* (CSD) [8].

Material lapisan tipis dengan kualitas lapisan yang tinggi dapat ditumbuhkan dengan beberapa metode vakum tersebut. Namun pada metode yang berbasis vakum ini membutuhkan penggunaan *clean room* sehingga membutuhkan biaya produksi yang tinggi dan proses penumbuhannya cukup rumit. Sebagai alternatifnya, dapat digunakan beberapa metode non-vakum. Berdasarkan proses penumbuhannya, metode berbasis non-vakum lebih sederhana dibandingkan dengan metode berbasis vakum. Akan tetapi untuk beberapa metode berbasis non-vakum seperti *spray pyrolisis,* memiliki beberapa keterbatasan seperti ketebalan lapisan tipis yang tidak dapat dikontrol, kemungkinan terdapat retak (*crack*) pada lapisan tipis yang dihasilkan dan kesulitan dalam mengontrol suhu penumbuhan. Oleh karena itu, diantara beberapa metode penumbuhan lapisan tipis yang telah disebutkan, penumbuhan lapisan tipis dengan metode *spin coating* merupakan salah satu metode yang sederhana untuk dilakukan terutama untuk bahan material yang berbentuk larutan (*gel*) [4].

2.2 Metode *Spin Coating*

2.2.1 Pengertian Metode *Spin Coating*

Metode *spin coating* merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendeposisikan lapisan tipis dengan cara meneteskan material dalam bentuk larutan (*gel*) ke pusat-atas permukaan substrat yang tersimpan diatas piringan yang dapat berputar (*spinner*) baik secara manual ataupun dengan bantuan robot. Dengan memanfaatkan gaya sentripetal yang muncul ketika substrat diputar dengan laju putaran yang tinggi, maka larutan dapat tertarik ke pinggir substrat dan tersebar secara merata. Ketika alat *spin coater* berada pada laju putaran yang konstan,

sebagian larutan yang berlebih akan menuju tepi substrat dan akan terlepas dari substrat sehingga lapisan larutan pada substrat akan semakin menipis [9,10].

Konsep gerak dalam metode *spin coating* merupakan konsep gerak melingkar. Pada saat suatu objek bergerak secara melingkar, terdapat gaya sentripetal dan gaya khayal sentrifugal pada arah horizontal. Sedangkan pada arah vertikal terdapat gaya berat yang akan menghasilkan gaya gesek antara substrat dengan larutan (*gel*). Gaya gesek dapat muncul ketika terjadi percepatan putaran pada alat *spin coater*, dimana arah gaya gesek yang muncul searah dengan perputaran larutan yang sedang mengalami proses *spin coating*. Pada metode *spin coating*, gaya gesek merupakan gaya sekunder yang nilai dan pengaruhnya dapat diabaikan [2]. Besarnya gaya sentripetal yang muncul pada proses *spin coating* akan ditentukan oleh laju rotasi dari putaran *spinner* sesuai dengan persamaan berikut [11]:

$$F_{sp} = m\alpha_s \tag{2.1}$$

$$F_{sp} = \frac{mv_s^2}{r} \tag{2.2}$$

$$F_{sp} = m\omega^2 r \tag{2.3}$$

Dimana F_{sp} adalah gaya sentripetal, m adalah massa partikel, ω adalah laju angular piringan dan r adalah jarak yang diukur dari pusat piringan secara radial kearah luar.

2.2.2 Tahapan *Spin Coating*

Metode *spin coating* dibagi menjadi empat tahapan yaitu tahap deposisi atau pengendapan, *spin-up*, *spin-off* dan evaporasi atau penguapan pelarut sebagai penentu ketebalan akhir dari lapisan tipis yang terbentuk [12,13]. **Gambar 2.1** menunjukkan skema tahapan pada metode *spin coating*.

a) Deposisi atau pengendapan

Tahap pertama yaitu deposisi atau pengendapan yang dimulai pada saat diteteskan atau dialirkan larutan (*gel*) diatas permukaan substrat yang telah diletakkan diatas wadah yang dapat diputar (*spinner*). Ketika larutan dideposisikan, larutan tersebut akan menggantikan seluruh udara atau gas yang awalnya menutupi permukaan subtrat. Pada tahap ini larutan (*gel*) yang telah dideposisikan diatas substrat belum diputar.

b) *Spin-up*

Setelah larutan telah dideposisikan diatas substrat, pada tahap ini substrat yang diletakkan diatas *spinner* mulai diputar. Ketika substrat diberi percepatan sudut dan mulai berputar maka akan muncul gaya sentripetal. Akibat gaya sentripetal yang muncul, larutan diatas substrat menjadi tersebar secara radial keluar dari pusat putaran menuju tepi substrat. Pemutaran terus dilakukan hingga larutan merata diatas substrat dalam rentang waktu tertentu.

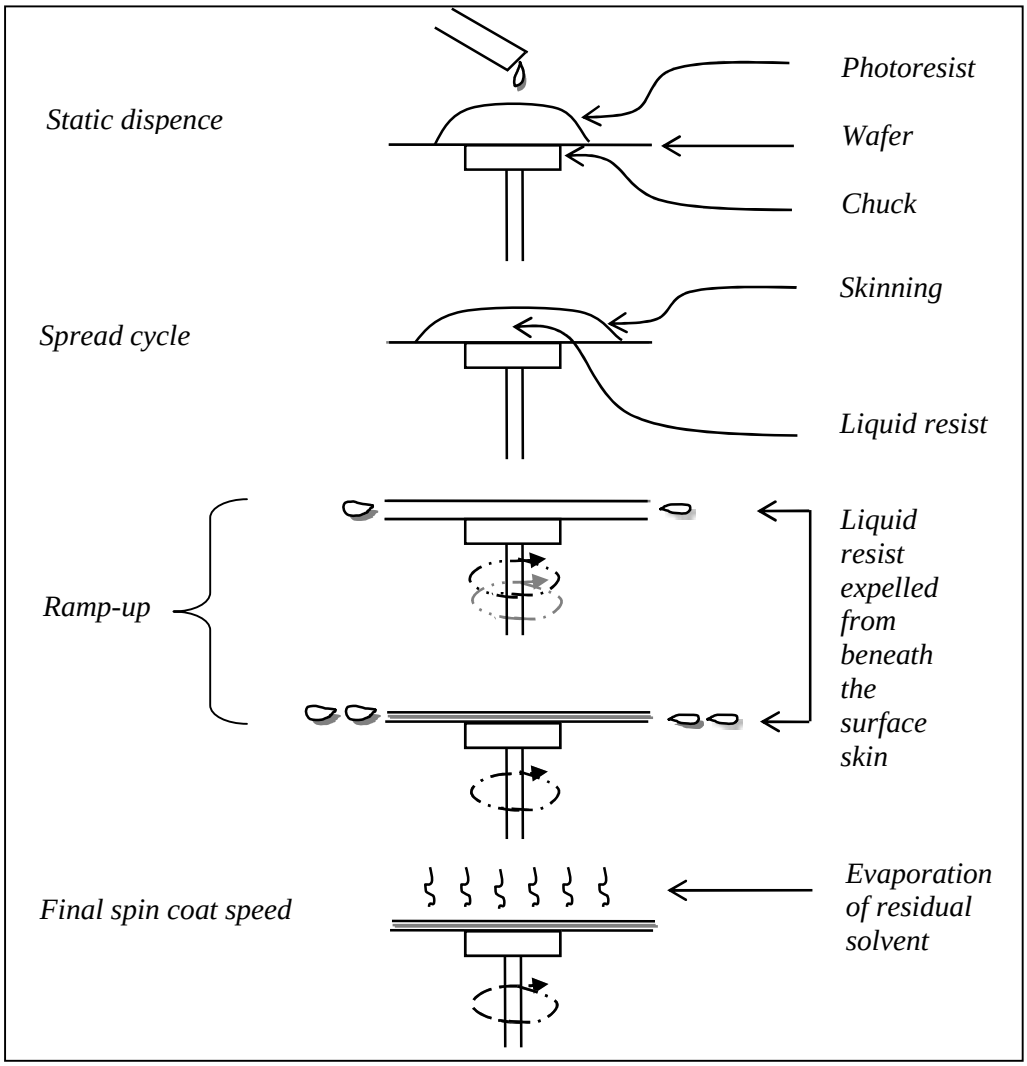
c) *Spin-off*

Pada tahap *spin-off* laju putaran substrat mulai konstan sehingga tidak terdapat percepatan sudut pada substrat. Pada tahap ini sebagian larutan yang berlebih akan menuju ke tepi substrat dan akhirnya terlepas dari substrat dan membentuk tetesan-tetesan yang terbuang. Semakin tipis lapisan yang terbentuk maka akan semakin berkurang tetesan-tetesan yang terbuang. Hal ini dipengaruhi oleh adanya penambahan hambatan air dan viskositas pada saat lapisan tipis semakin tipis.

d) Evaporasi atau penguapan

Tahap ini merupakan tahap akhir dimana terjadi pembekuan larutan yang bergantung pada penguapan pelarut. Penguapan pelarut merupakan proses pemfokusan atau

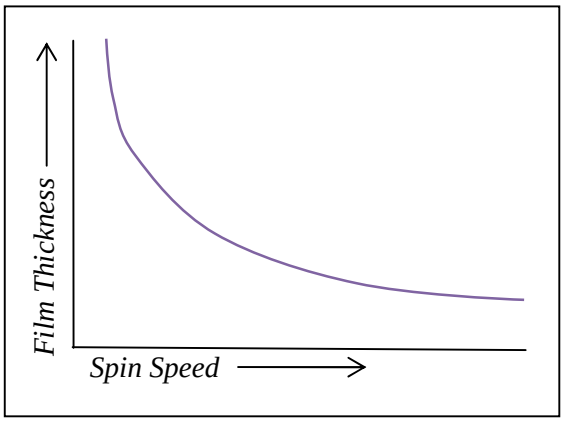
penyatuan, peleburan larutan, dan solusi lain dari penguapan rendah dalam material atau solusi untuk mengembalikkannya menjadi lapisan.



Gambar 2.1 Skema tahapan pada metode *spin coating* [14]

Ketebalan lapisan yang terbentuk ditentukan oleh dua parameter utama yaitu viskositas dan laju putaran (*angular speed*) disamping parameter-parameter lainnya seperti waktu dan konsentrasi larutan [15]. Kecepatan putaran pada substrat berpengaruh terhadap sudut gaya sentripetal yang mengenai material berupa larutan selain kecepatan dan *turbellence* udara diatasnya. Secara lebih spesifik tingkat kecepatan putaran yang tinggi menentukan ketebalan lapisan yang terbentuk [14].

Gambar 2.2 menunjukkan grafik hubungan antara kecepatan putar terhadap ketebalan lapisan tipis yang terbentuk.



Gambar 2.2 Hubungan antara kecepatan putaran dan ketebalan lapisan [14]

Ketebalan lapisan dan properti lainnya bergantung pada sifat dari bahan tersebut seperti viskositas, laju pengeringan, persen padatan, tegangan permukaan serta parameter yang dipilih pada saat proses *spin coating*. Faktor-faktor seperti kecepatan putaran, percepatan dan pembuangan berkontribusi terhadap bagaimana sifat lapisan ini dilapisi [14]. Banyak atau sedikitnya larutan yang digunakan tidak akan mempengaruhi hasil akhir lapisan tipis [2].

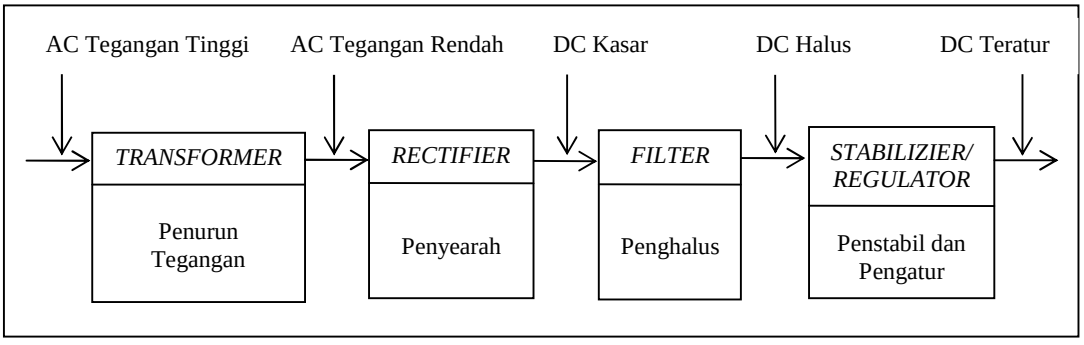
2.3 Catu Daya (*Power Supply*)

Catu daya atau *power supply* merupakan perangkat elektronika yang memiliki fungsi sebagai sumber penyedia daya listrik atau energi dalam suatu rangkaian listrik atau perangkat lain. Berdasarkan keluaran yang dihasilkan, catu daya terbagi menjadi dua yaitu catu daya tak distabilkan (*Alternating Current Power Supply*) dan catu daya distabilkan (*Direct Current Power Supply*). Catu daya tak distabilkan lebih sederhana dibandingkan dengan catu daya distabilkan. Hal ini dikarenakan pada catu daya jenis ini tegangan dan arus listrik keluaran tidak distabilkan. Sehingga nilai tegangan dan arus listrik keluaran akan berubah sesuai dengan nilai tegangan masukan serta beban yang terdapat pada keluaran [16].

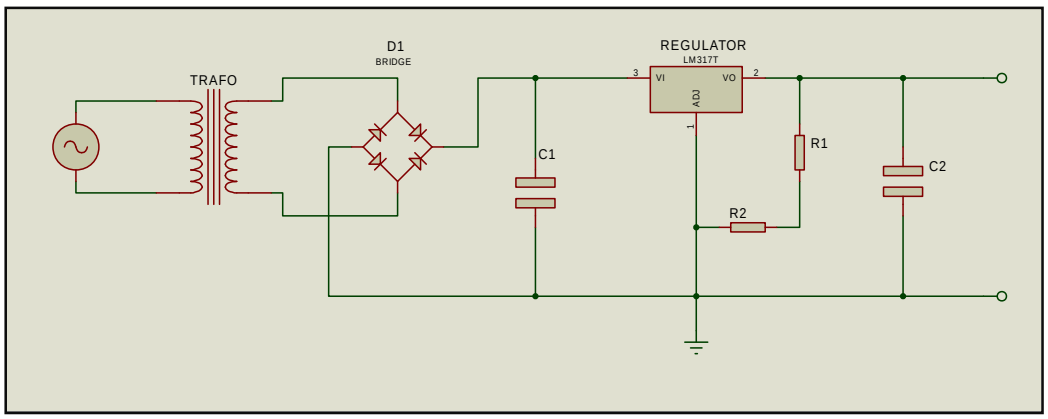
Pada catu daya distabilkan, tegangan keluaran distabilkan dengan mekanisme lolos balik. Sehingga nilai tegangan keluaran tidak dipengaruhi oleh nilai tegangan masukan, beban yang terdapat pada keluaran serta *noise*. Berdasarkan teknik regulasi, terdapat dua jenis catu daya distabilkan atau catu daya DC yaitu dengan regulasi pensaklaran (*switching*) dan dengan regulasi linier [17].

Pada catu daya DC dengan regulasi pensaklaran, masukan pada rangkaian berupa tegangan tinggi AC, langsung disearahkan (tanpa bantuan transformer) oleh rangkaian penyearah dengan menggunakan frekuensi tinggi (10 KHz – 1 MHz) yang nilainya jauh lebih tinggi dibandingkan frekuensi masukan AC (~ 50 Hz). Sedangkan pada catu daya DC dengan regulasi linier, masukan berupa tegangan tinggi AC diturunkan menjadi tegangan AC yang lebih rendah dengan bantuan transformer yang kemudian disearahkan oleh rangkaian penyearah untuk menghasilkan tegangan keluaran DC. Catu daya DC linier dapat menghasilkan tegangan keluaran DC yang bervariasi antara 0-60V dengan arus listrik antara 0-10A [18].

Sebuah catu daya DC linier memiliki empat bagian utama untuk menghasilkan keluaran berupa tegangan dan arus listrik DC yang stabil. Keempat bagian utama tersebut adalah transformer, penyearah, penyaring, dan penstabil atau pengatur [17]. Diagram blok dan skema dari sebuah catu daya DC linier dapat dilihat pada **Gambar 2.3** dan **Gambar 2.4.**



Gambar 2.3 Diagram blok catu daya DC linier [19]



Gambar 2.4 Skema catu daya DC linier [16]

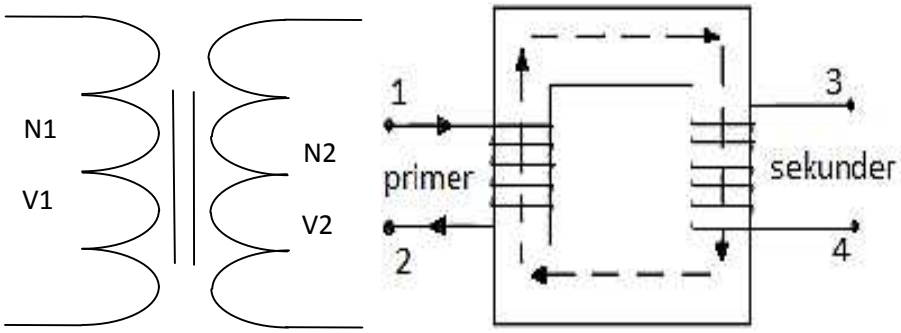
2.3.1 Penurun Tegangan (Transformer)

Transformer atau transformator merupakan komponen elektronika yang dapat memindahkan energi listrik dari satu rangkaian menuju rangkaian lain melalui konduktor induktif yang disebut dengan kumparan atau lilitan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator terdiri dari dua buah kumparan yaitu kumparan primer (N_1) yang digunakan sebagai masukan dan kumparan sekunder (N_2) yang digunakan sebagai keluaran pada transformator [20]. Masing-masing kumparan dililitkan pada suatu inti besi yang terisolasi atau terpisah satu dengan yang lain [21].

Berdasarkan perbandingan antara jumlah lilitan pada masing-masing kumparan, transformator terbagi menjadi dua jenis yaitu transformator *step-up* dan *step-down*. Transformator *step-up* merupakan transformator yang dapat mengubah nilai tegangan keluaran menjadi lebih tinggi dari nilai tegangan masukan dimana jumlah lilitan pada kumparan sekunder lebih banyak daripada jumlah lilitan pada kumparan primer ($N_2 > N_1$) [17,22].

Transformator *step-down* merupakan transformator yang dapat mengubah nilai tegangan keluaran menjadi lebih rendah dari nilai tegangan masukan dimana jumlah lilitan pada kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan pada kumparan sekunder ($N_1 > N_2$) [17,22]. Pada catu daya DC linier masukan berupa tegangan tinggi

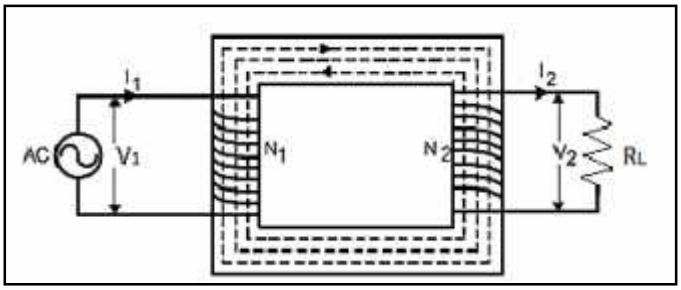
AC diturunkan menjadi tegangan AC yang lebih rendah menggunakan transformator *step-down* [21].



Gambar 2.5 (a) Simbol transformator (b) Skema transformator berteras besi [17]

Prinsip kerja transformator dapat dilihat pada **Gambar 2.6** dimana penghubung antara kumparan primer dan kumparan sekunder adalah fluks medan magnet. Ketika kumparan primer diberikan masukan berupa arus listrik AC, maka akan timbul medan magnet disekeliling kumparan yang disebut dengan mutual induktansi. Mutual induktansi bekerja berdasarkan Hukum Faraday tentang induksi magnet pada kawat yang dialiri arus listrik. Garis gaya magnet keluar dari kumparan dan kemudian diarahkan oleh inti besi. Fluks magnetik berputar di dalam inti besi seperti pada **Gambar 2.5 (b)**. Fluks magnetik tersebut berubah-ubah nilainya sesuai dengan masukan arus listrik AC yang diberikan [17].

Besar medan magnet yang diinduksikan ke inti besi ditentukan oleh besarnya arus listrik masukan dan jumlah lilitan pada kumparan. Ketika medan magnet memotong atau masuk ke kumparan sekunder, timbul gaya gerak listrik yang disebut dengan tegangan induksi. Tegangan induksi yang timbul tidak merubah atau mempengaruhi frekuensi. Sehingga frekuensi pada kumparan primer akan sama dengan frekuensi pada kumparan sekunder [17].



Gambar 2.6 Prinsip kerja transformator *step-down* [17]

Besar tegangan pada kumparan primer dan kumparan sekunder ditentukan oleh jumlah lilitan yang terdapat pada masing-masing bagian kumparan. Jika pada kumparan primer terdapat sejumlah N_1 lilitan dan pada kumparan sekunder terdapat sejumlah N_2 lilitan. Apabila kumparan primer diberikan masukan berupa tegangan V_1 maka pada kumparan sekunder akan terdapat tegangan keluaran V_2 sesuai dengan persamaan berikut [17]:

$$\boldsymbol{V_2 = \frac{N_2}{N_1}.V_1} \tag{2.4}$$

Jika besarnya tegangan dan faktor-faktor kerugian seperti kerugian tembaga karena aliran arus listrik dan kerugian besi karena fluks magnet yang berubah-ubah diabaikan, maka besar daya masukan akan sama dengan daya keluaran [17]. Sehingga didapatkan hubungan sebagai berikut [22]:

$$P_1 = P_2 \tag{2.5}$$

$$V_1 i_1 = V_2 i_2 \tag{2.6}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{i_2}{i_1} \tag{2.7}$$

Dimana P_1 adalah daya primer, P_2 adalah daya sekunder, i_1 adalah arus primer dan i_2 adalah arus sekunder.

Dari **Persamaan 2.4** dan **Persamaan 2.7** dapat dinyatakan hubungan ketiga parameter tersebut dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} \tag{2.8}$$

2.3.2 Penyearah (*Rectifier*)

Dalam rangkaian catu daya, penyearah berfungsi untuk mengubah masukan berupa tegangan listrik bolak-balik (*alternating current*) yang berasal dari kumparan sekunder transformator *step-down* menjadi tegangan listrik searah (*direct current*). Komponen elektronika yang dapat melakukan fungsi tersebut adalah dioda [23].

Berdasarkan bentuk gelombang keluarannya, penyearah terbagi menjadi dua macam yaitu rangkaian penyearah setengah gelombang (*half wave rectifier*) dan penyearah gelombang penuh (*full wave rectifier*) [22,23].

a) Rangkaian penyearah setengah gelombang

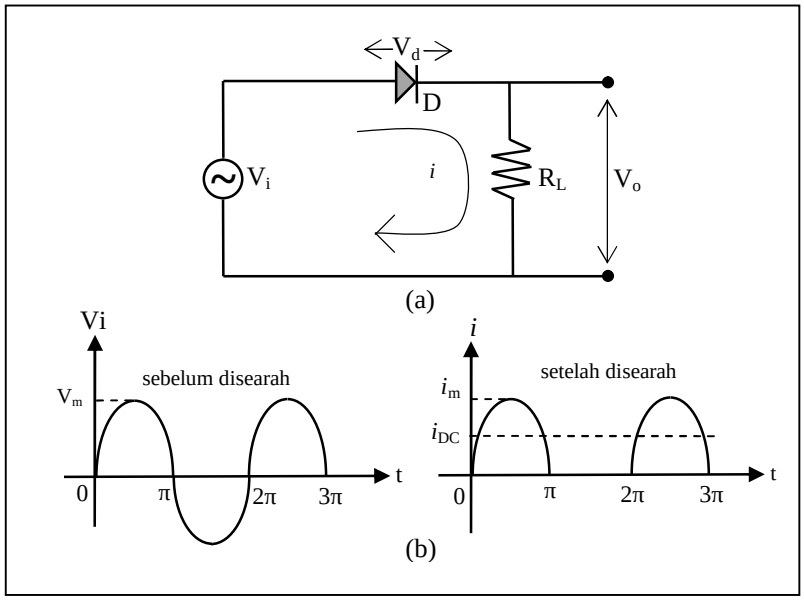
Rangkaian penyearah setengah gelombang merupakan rangkaian penyearah yang paling sederhana dimana pada rangkaian tersebut hanya terdiri dari satu buah dioda [22]. Skema rangkaian penyearah setengah gelombang dapat dilihat pada **Gambar 2.7 (a)**. Rangkaian penyearah setengah gelombang mendapat masukan dari sisi sekunder transformator berupa sinyal AC berbentuk sinus sesuai dengan persamaan berikut [22]:

$$V_i = V_m \sin \omega t \tag{2.9}$$

Dimana V_m merupakan tegangan puncak atau tegangan maksimum yang hanya dapat diukur dengan melihat langsung pada gelombangnya. Sedangkan nilai yang tercantum

pada sisi sekunder transformator merupakan nilai tegangan efektif (V_{eff}) atau tegangan *rms* (*root-mean-square*) yang merupakan tegangan yang terukur oleh voltmeter. Hubungan antara tegangan puncak V_m dengan tegangan efektif V_{eff} atau tegangan *rms* V_{rms} adalah sebagai berikut [22]:

$$V_{eff} = V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, V_m \qquad (2.10)$$



Gambar 2.7 (a) Skema rangkaian penyearah setengah gelombang (b) Bentuk gelombang masukan dan keluaran [22]

Pada saat sinyal masukan berupa siklus positif maka dioda mendapat bias maju dimana nilai tegangan masukan jauh lebih besar dari tegangan *offset* (≈ 0.7 Volt untuk dioda silikon dan ≈ 0.3 volt untuk dioda germanium). Sehingga arus (*i*) akan mengalir ke beban (*RL*), dan sebaliknya apabila sinyal masukan berupa siklus negatif maka dioda mendapat bias mundur sehingga tidak ada arus yang mengalir [22]. Hal ini menyebabkan nilai arus jatuh menjadi nol diantara 180° dan 360°. Bentuk gelombang tegangan masukan (V_i) dan arus beban (*i*) ditunjukkan pada dari **Gambar 2.7 (b)**.

Resistansi dioda pada saat ON (mendapat bias maju) adalah *Rf*, dimana nilainya lebih kecil dari *RL*. Pada saat dioda OFF (mendapat bias mundur) resistansinya besar sekali dan dapat dianggap tidak terhingga, sehingga arus dioda tidak mengalir atau $i = 0$ [22].

Arus yang mengalir ke beban (*i*) bentuknya sudah searah (satu arah) yaitu positif semua. Jika arah dioda dibalik, maka arus yang akan mengalir adalah negatif. Frekuensi sinyal keluaran dari penyearah setengan gelombang ini adalah sama dengan frekuensi masukan (dari jala-jala listrik) yaitu ~50 Hz. Karena jarak dari puncak satu ke puncak berikutnya adalah sama. Dari **Gambar 2.7 (b)**, arus dioda yang mengalir melalui beban *RL* (*i*) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [22]:

$$i = i_m \sin \omega t \qquad , jika\ 0 \leq \omega t \leq \pi \quad (siklus\ positif)$$

$$i = 0 \qquad , jika\ \pi \leq \omega t \leq 2\pi \quad (siklus\ negatif)$$

Dimana :

$$I_m = \frac{V_m}{R_f + R_L} \tag{2.11}$$

Terlihat bahwa sinyal keluaran dalam bentuk gelombang hanya memiliki satu arah gelombang yaitu positif. Sehingga harga rata-ratanya tidak lagi nol seperti pada arus bolak-balik. Arus rata-rata (DC) secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [22]:

$$i_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i \, d\omega t \tag{2.12}$$

Untuk penyearah setengah gelombang diperoleh [22]:

$$i_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_m \sin \omega t \; d\omega t$$

$$i_{dc} = \frac{i_m}{\pi} \cong 0.318 \; i_m \qquad (2.13)$$

Nilai tegangan keluaran DC dari rangkaian penyearah berupa turunan tegangan DC pada beban sehingga dapat dituliskan sebagai berikut [22]:

$$V_{DC} = i_{DC} \, . \; R_L$$

$$V_{DC} = \frac{i_n \; . \; R_L}{\pi} \qquad (2.14)$$

Apabila harga *Rf* jauh lebih kecil dari *RL*, maka nilai *Rf* dapat diabaikan dan **Persamaan 2.13** menjadi [22]:

$$V_m = i_m . R_L$$

Sehingga didapatkan nilai tegangan keluaran dari rangkaian penyearah adalah sebagai berikut [22]:

$$V_{DC} = \frac{V_m}{\pi} \cong 0.318 \, . V_m \qquad (2.15)$$

Untuk memperoleh hasil yang lebih teliti, maka tegangan *cut-in* dioda (Vγ) perlu dipertimbangkan sehingga **Persamaan 2.15** menjadi [22]:

$$V_{DC} = 0.318 \; (V_m - V_\gamma) \qquad (2.16)$$

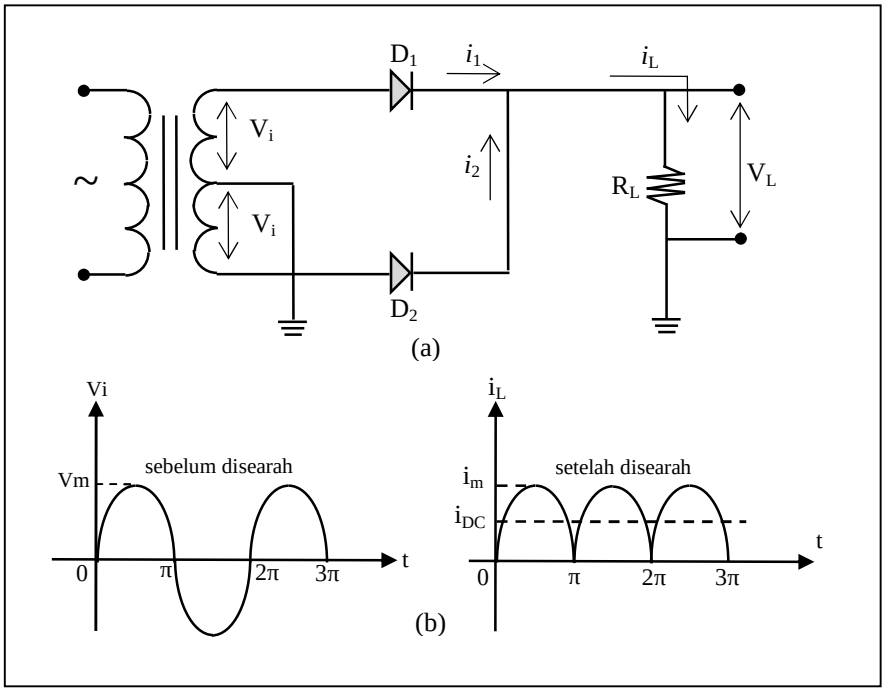
Frekuensi keluaran pada penyearah setengah gelombang adalah sebagai berikut [22]:

$$f_{out} = f_{in} \tag{2.17}$$

b) Rangkaian penyearah gelombang penuh

Berdasarkan jumlah dioda yang digunakan, rangkaian penyearah gelombang penuh terbagi menjadi dua yaitu rangkaian penyearah gelombang penuh dengan dua dioda dan empat dioda (dioda jembatan atau *bridge*). Skema rangkaian penyearah gelombang penuh dengan dua dioda diperlihatkan pada **Gambar 2.8 (a)** [22,23].

Untuk membuat rangkaian penyearah gelombang penuh dengan dua dioda digunakan transformator dengan CT (*central-tap*). Transformator dengan CT dapat memberikan dua buah tegangan keluaran dengan nilai yang sama tetapi berbeda fasa 180° dengan titik CT sebagai titik tengahnya. Kedua keluaran ini masing-masing dihubungkan ke D1 dan D2 [22].



Gambar 2.8 (a) Skema rangkaian penyearah gelombang penuh dengan dua dioda (b) Bentuk gelombang masukan dan keluaran [22]

Pada saat sinyal masukan berupa siklus tegangan positif, D1 mengalami bias maju dan D2 mengalami bias balik, sehingga arus akan mengalir melalui D1. Begitu pula pada saat sinyal masukan berupa siklus tegangan negatif, maka arus akan mengalir melalui D2. Sehingga baik pada saat siklus tegangan positif ataupun negatif, sinyal masukan akan dilewatkan oleh salah satu dioda secara bergantian. Karena arah arus i_1 dan i_2 memiliki arah yang sama ketikan melewati beban (*RL*), maka i_L menjadi satu arah dan berbentuk sinyal gelombang penuh yang disearahkan seperti pada **Gambar 2.8 (b)** [22].

Terlihat dengan jelas bahwa rangkaian penyearah gelombang penuh dengan dua buah dioda merupakan gabungan dua buah penyearah setengah gelombang yang bekerja secara bergantian setiap setengah siklus. Sehingga arus maupun tegangan rata-ratanya merupakan dua kali dari penyearah setengah gelombang. Dengan cara penurunan yang sama, maka diperoleh persamaan sebagai berikut [22]:

$$i_{dc} = \frac{2i_m}{\pi} \cong 0.636\, i_m \tag{2.18}$$

Dan

$$V_{DC} = i_{DC}\,.\,R_L = \frac{2i_m\,.\,R_L}{\pi} \tag{2.19}$$

Apabila nilai *Rf* jauh lebih kecil daril *RL*, maka *Rf* dapat diabaikan. Sehingga **Persamaan 2.19** dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [22]:

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} \cong 0.636\,.V_m \tag{2.20}$$

Untuk memperoleh hasil yang lebih teliti, maka tegangan *cut-in* dioda (Vγ) perlu dipertimbangkan sehingga **Persamaan 2.20** menjadi [22]:

$$V_{DC} = 0.636\ (V_m - V_\gamma) \quad (2.21)$$

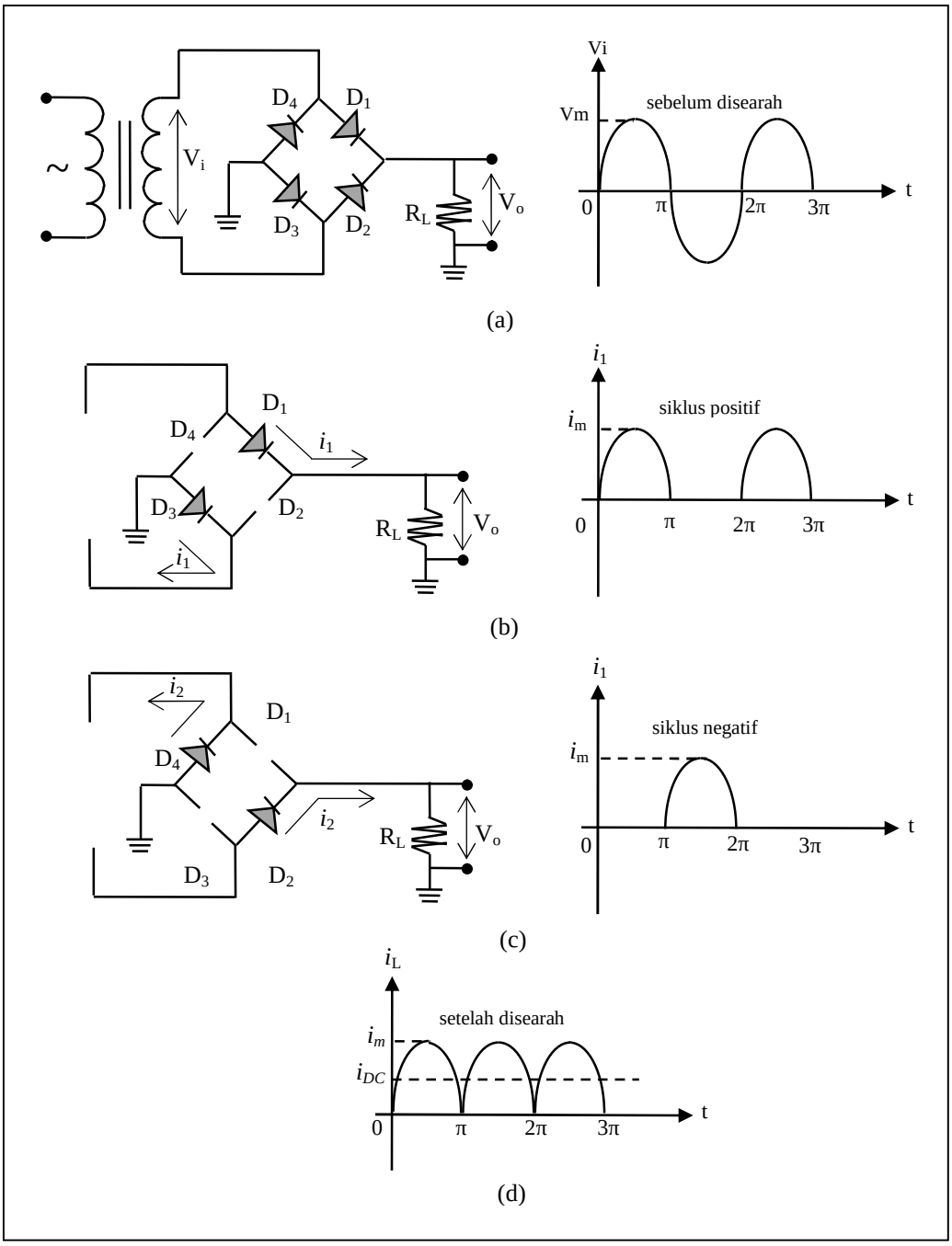
Frekuensi keluaran pada penyearah gelombang penuh dengan dua buah dioda adalah sebagai berikut [22]:

$$T_{out} = \frac{1}{2}\frac{1}{f_{in}}$$

$$f_{out} = 2f_{in} \quad (2.22)$$

c) Rangkaian penyearah gelombang penuh sistem jembatan (*bridge*)

Selain dengan menggunakan dua buah dioda, rangkaian penyearah gelombang penuh dapat menggunakan empat buah dioda (jembatan atau *bridge*). Rangkaian ini sering digunakan untuk menyearahkan karena memiliki puncak tegangan yang sama dengan penyearah setengah gelombang dan mempunyai nilai rata-rata yang lebih tinggi daripada penyearah gelombang penuh. Untuk membuat rangkaian penyearah gelombang penuh dengan empat dioda digunakan transformator non-CT. Skema rangkaian penyearah gelombang penuh sistem jembatan atau *bridge* dapat dilihat pada **Gambar 2.9 (a)** [22].



Gambar 2.9 (a) Skema rangkaian penyearah gelombang penuh sistem jembatan (b) Siklus positif (c) Siklus negatif (d) Bentuk keluaran [22]

Pada saat rangkaian penyearah gelombang penuh sistem jembatan mendapatkan masukan berupa siklus tegangan positif seperti pada **Gambar 2.9 (b)**, D1 dan D3 akan mengalami bias maju sedangkan D2 dan D4 mengalami bias mundur. Sehingga

arus i_1 mengalir melalui D1, RL dan D3. Pada ada saat mendapatkan masukan berupa siklus tegangan negatif seperti pada **Gambar 2.9 (c)**, D2 dan D4 akan mengalami bias maju sedangkan D1 dan D3 mengalami bias mundur. Sehingga arus i_2 mengalir melalui D2, *RL* dan D4 [22].

Karena arah arus i_1 dan i_2 yang melewati *RL* memiliki arah yang sama yaitu dari ujung atas *RL* ke ground. Dengan demikian arus yang mengalir ke beban (i_L) merupakan penjumlahan dari arus i_1 dan i_2 dalam paruh siklus seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.9 (d)**. Besar arus rata-rata pada beban sama seperti penyearah gelombang penuh dengan menggunakan transformator CT yang sesuai dengan persamaan berikut [22]:

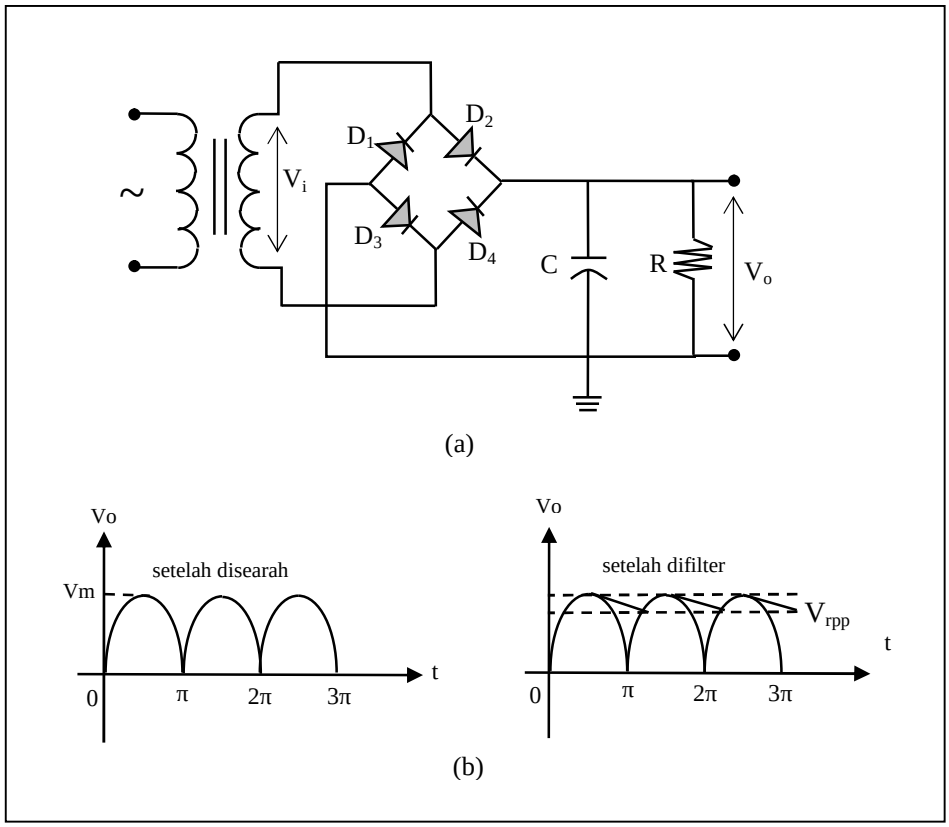
$$i_{dc} = \frac{2i_m}{\pi} \cong 0.636\, i_m \qquad (2.23)$$

Sedangkan besar tegangan keluaran dari rangkaian penyearah gelombang penuh sistem jembatan dengan memperhitungkan nilai Vγ adalah sebagai berikut [22]:

$$V_{DC} = 0.636\,(V_m - 2V_\gamma) \qquad (2.24)$$

2.3.3 Penghalus atau Penyaring (Filter)

Penyaringan atau penghalusan pada catu daya linier merupakan bagian yang berfungsi untuk meratakan atau memperkecil riak-riak gelombang hasil penyearahan gelombang AC dari transformator oleh dioda agar didapat gelombang yang lebih halus dan rata [17]. Komponen elektronika yang digunakan untuk menyaring tegangan keluaran searah dalam catu daya linier adalah kapasitor (kondensator) yang berjenis elektrolit atau ELCO (*Electrolyte Capacitor*). Selain itu dapat juga digunakan komponen berupa gabungan dari kapasitor dengan resistor (*RC*) dan induktor (*LC*) [19].



Gambar 2.10 (a) Skema rangkaian penyearah dengan menggunakan penyaring kapasitor (b) Bentuk gelombang masukan dan keluaran pada penyaring kapasitor [19]

Pada saat masukan yang berasal dari rangkaian penyearah melewati kapasitor, maka kapasitor akan terisi sesuai dengan bentuk gelombang masukannya. Setelah tegangan masukan mencapai nilai maksimumnya, tegangan akan tetap dipertahankan jika tidak mendapatkan beban. Kapasitor akan terisi pada periode sinyal berikutnya [19].

Dengan adanya kapasitor, tegangan keluaran tidak segera turun meskipun tegangan masukan sudah larut. Hal ini disebabkan kapasitor memerlukan waktu ($\tau = RC$) untuk mengosongkan muatannya. Sehingga semakin besar nilai kapasitansi pada kapasitor maka semakin lama waktu pengosongan muatannya. Nilai C dan *RL* juga menentukan tegangan riak puncak ke puncak (V_{rpp}). Riak dapat diperkecil dengan menggunakan kapasitor dengan nilai kapasitansi yang besar [22]. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan persamaan berikut [24]:

$$V_{rpp} = \frac{i}{2fC} \quad (2.25)$$

Dimana V_{rpp} adalah tegangan riak puncak ke puncak, *i* adalah arus beban DC, *f* adalah frekuensi dan *C* adalah kapasitansi.

$$V_{rms} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} \quad (2.26)$$

Dengan demikian dapat dihitung besarnya tegangan searah (V_{DC}) untuk penyearah gelombang penuh dengan kapasitor yaitu sebagai berikut [24]:

$$V_{DC} = V_{maks} - \frac{V_{rpp}}{2} \quad (2.27)$$

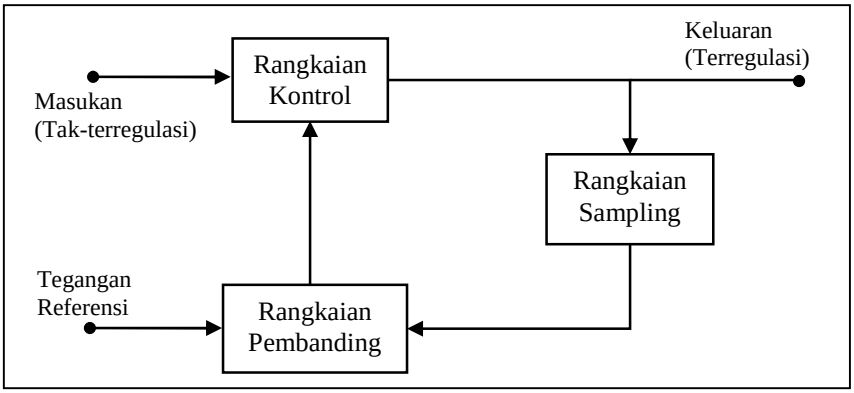
Berdasarkan **Persamaan 2.25** semakin besar kapasitansi maka V_{rpp} akan semakin kecil, dengan demikian bila diberikan kapasitansi yang cukup besar maka nilai V_{rpp} dapat diabaikan [24].

2.3.4 Penstabil dan Pengatur (Regulator)

Regulator tegangan merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk menstabilkan nilai tegangan keluaran yang berasal dari masukan yang belum stabil tanpa dipengaruhi oleh suhu, arus beban dan tegangan masukan yang berasal dari keluaran filter [16]. Rangkaian regulator tegangan secara sederhana terbagi menjadi tiga bagian utama yaitu rangkaian kontrol, rangkaian pembanding dan rangkaian sampling. Terdapat tiga jenis rangkaian regulator, yaitu rangkaian regulator seri, rangkaian regulator tegangan paralel dan rangkaian regulator terpadu (IC) [16].

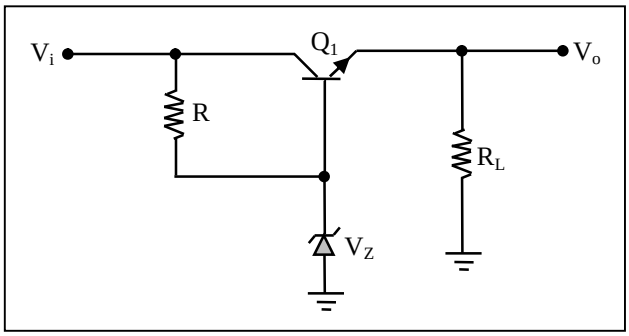
a) Regulator tegangan seri

Pada regulator tegangan seri, rangkaian kontrol dihubungkan secara seri dengan beban untuk mengontrol tegangan masukan yang menuju keluaran. Tegangan keluaran dicuplik oleh rangkaian sampling sehingga diperoleh tegangan umpan balik yang kemudian dibandingkan terhadap tegangan referensi. Diagram blok regulator tegangan seri dapat dilihat pada **Gambar 2.11** sebagai berikut [22]:



Gambar 2.11 Blok diagram regulator tegangan seri [22]

Saat tegangan keluaran naik, maka rangkaian pembanding akan memberikan sinyal kontrol kepada rangkaian kontrol. Sehingga rangkaian kontrol akan menurunkan besarnya tegangan keluaran. Pada saat tegangan keluaran turun, maka rangkaian pembanding akan memberikan sinyal kontrol kepada rangkaian kontrol. Sehingga rangkaian kontrol akan menaikkan besarnya tegangan keluaran. **Gambar 2.12** merupakan contoh rangkaian regulator tegangan seri secara sederhana dengan menggunakan sebuah transistor [22].

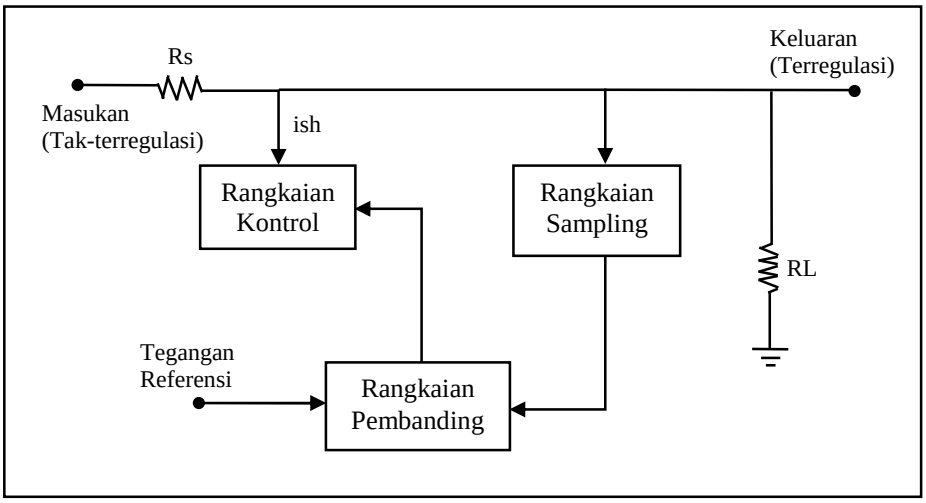


Gambar 2.12 Skema rangkaian regulator tegangan seri dengan satu transistor [22]

Pada **Gambar 2.12**, transistor Q1 berfungsi sebagai rangkaian kontrol sedangkan dioda zener berfungsi untuk memberikan tegangan referensi sebesar V_z. Ketika tegangan masukan (V_i) menurun, maka tegangan keluaran (V_o) cenderung akan turun dan bila dibandingkan dengan tegangan referensi (V_z) yang tetap maka akan menyebabkan tegangan V_{BE} menjadi lebih besar sehingga transistor Q1 menjadi lebih menghantar dimana arus i_C menjadi lebih besar. Apabila arus i_C menjadi lebih besar maka V_{CE} akan lebih kecil dan turun tegangan pada *RL* menjadi lebih besar. Dengan demikian apabila tegangan V_i turun maka transistor Q1 akan berusaha menstabilkan tegangan V_o dengan cara menaikkan teganganya. Begitu pula pada saat tegangan naik maka berlaku sebaliknya [22].

b) Regulator tegangan paralel

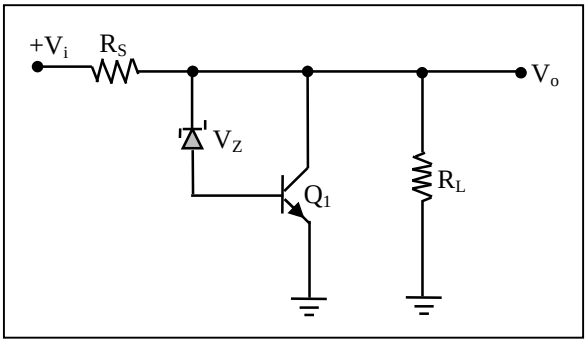
Pada regulator tegangan paralel, pengontrolan tegangan keluaran dilakukan dengan cara melewatkan sebagian arus beban melalui rangkaian kontrol yang terhubung secara paralel terhadap beban. Diagram blok regulator tegangan paralel dapat dilihat pada **Gambar 2.13** sebagai berikut [22]:



Gambar 2.13 Blok diagram regulator tegangan paralel [22]

Saat terjadi perubahan beban (i_L naik atau turun), maka tegangan keluaran juga cenderung untuk berubah. Perubahan ini dirasakan oleh rangkaian sampling yang

kemudian akan memberikan sinyal umpan balik kepada pembanding. Rangkaian pembanding berdasarkan sinyal umpan balik dan tegangan referensi akan memberikan sinyal ke pengontrol agar dapat mengalirkan arus i_{sh} sesuai dengan kebutuhan, sehingga memberikan efek penstabilan pada tegangan keluaran V_o. **Gambar 2.14** merupakan contoh rangkaian regulator tegangan paralel secara sederhana dengan menggunakan sebuah transistor [22].



Gambar 2.14 Skema rangkaian regulator tegangan paralel dengan satu transistor [22]

Pada **Gambar 2.14**, transistor Q1 berfungsi sebagai rangkaian kontrol yang melewatkan sebagian arus untuk menstabilkan tegangan keluaran. Sedangakan dioda zener berfungsi untuk memberikan tegangan referensi sebesar V_z. Ketika tegangan pada beban (*RL*) turun, maka tegangan V_{BE} menjadi turun. Sehingga transistor Q1 menjadi kurang mengantar dimana arus i_C menjadi turun dan arus beban menjadi naik. Dengan demikian transistor Q1 akan berusaha untuk menaikkan tegangan keluaran agar menjadi stabil dengan cara menurunkan jumlah arus yang melewati transistor dan menaikkan arus pada beban. Nilai tegangan keluaran akan sesuai dengan persamaan berikut [22]:

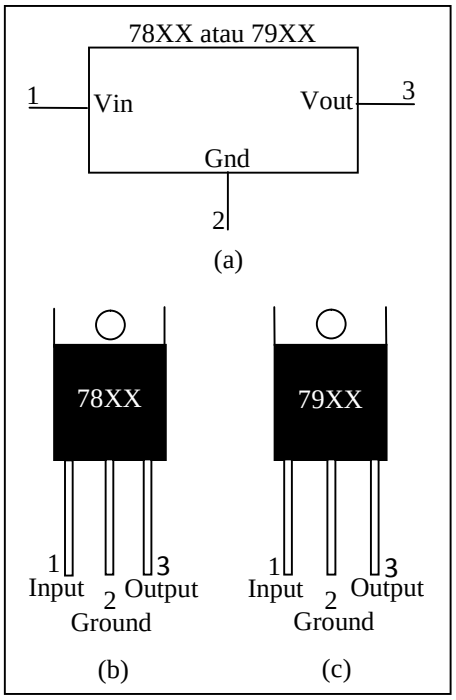
$$V_o = V_z + V_{BE} \tag{2.28}$$

c) Rangkaian regulator terpadu dalam paket IC

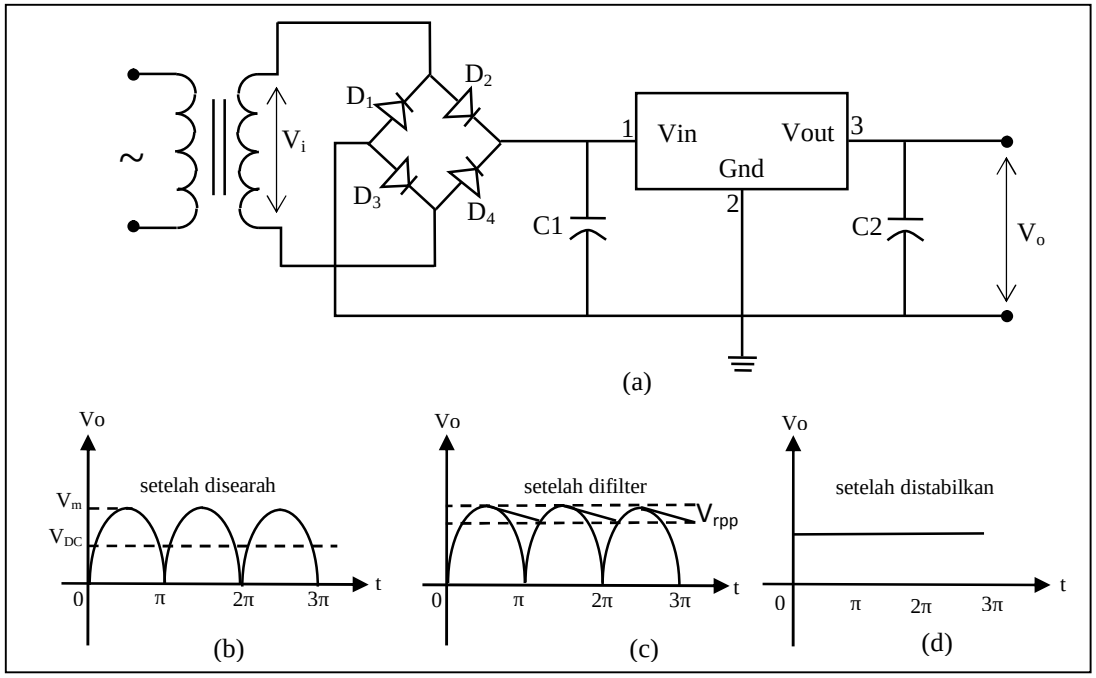
Selain regulator tegangan seri dan paralel, terdapat pula regulator dimana fungsi-fungsi seperti pengontrol, sampling, komparator, referensi dan proteksi dirangkai dan

dikemas dalam satu komponen terpadu yang disebut dengan komponen terpadu IC (*integrated circuit*) [22]. Selain lebih kompak (praktis) dan menghasilkan penstabil tegangan yang lebih baik, regulator tegangan menggunakan IC pada umumnya dilengkapi dengan rangkaian perlindungan atas hubungan singkat (*short sircut protection*), rangkaian pembatas arus (*current limiting*), dan rangkaian perlindungan dari kelebihan tegangan (*over voltage protection*) [23].

Terdapat dua jenis regulator tegangan menggunakan IC yaitu regulator tegangan tetap dan regulator tegangan variabel. IC regulator tetap memiliki tiga terminal yaitu masukan, keluaran dan *ground*. Terdapat beberapa tipe yang sering digunakan dan dikategorikan menjadi dua jenis yaitu 78XX dan 79XX. Tegangan keluaran dari rangkaian regulator tetap ini dapat dilihat dari dua digit terakhir serinya. Sedangkan untuk dua digit didepan menunjukkan polaritas tegangan yang dihasilkan. Seri 78XX menunjukkan polaritas positif sedangkan seri 79XX menunjukkan polaritas negatif. **Tabel 2.1** menujukkan spesifikasi nilai tegangan masukan minimum dan tegangan keluaran pada IC regulator tetap [23].



Gambar 2.15 (a) Simbol regulator tegangan dalam paket IC (b) Bentuk fisik regulator tetap positif (c) Bentuk fisik regulator tetap negatif [25]

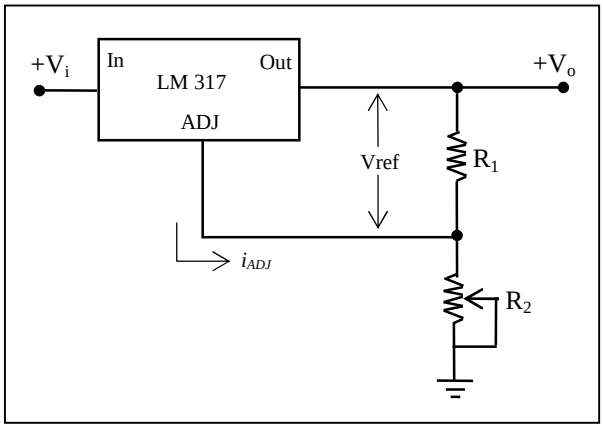


Gambar 2.16 (a) Skema rangkaian catu daya DC menggunakan regulator tegangan tetap (b) Bentuk tegangan keluaran setelah disearahkan (c) Bentuk tegangan keluaran setelah difilter (d) Bentuk tegangan keluaran setelah distabilkan [23]

Tabel 2.1 Spesifikasi tegangan IC regulator LM78XX dan LM79XX [25]

LM78XX / LM79XX (series)		Tegangan keluaran (volt)		Tegangan masukan minimal (volt)	
LM 7805	LM 7905	+5	-5	+7.3	-7.3
LM 7806	LM 7906	+6	-6	+8.3	-8.3
LM 7808	LM 7908	+8	-8	+10.5	-10.5
LM 7810	LM 7910	+10	-10	+12.5	-12.5
LM 7812	LM 7912	+12	-12	+14.6	-14.6
LM 7815	LM 7915	+15	-15	+17.7	-17.7
LM 7818	LM 7918	+18	-18	+21.0	-21.0
LM 7824	LM 7924	+24	-24	+27.1	-27.1

Selain berupa regulator tetap, terdapat juga IC regulator dengan tegangan keluaran yang dapat diatur (variabel), misalnya LM317 untuk regulator perubah positif dan LM 337 untuk regulator peubah negatif [23].



Gambar 2.17 Rangkaian regulator tegangan variabel IC LM317 [23]

Perbedaan antara rangkaian regulator tetap dan regulator variabel yaitu resistor R1 dan R2 berada diluar IC. Dengan demikian nilai tegangan keluaran pada regulator variabel dapat diatur berdasarkan perbandingan nilai resistor R1 dan R2 yang sesuai dengan persamaan berikut [25]:

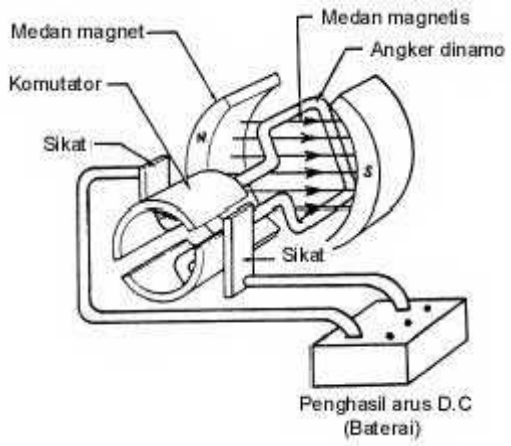
$$V_o = V_{ref}\left(1 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right) + i_{adj}.R_2 \qquad (2.29)$$

Dimana pada IC LM 317 nilai V_{ref} dan i_{adj} adalah 1.25V dan 100µA [25].

2.4 Motor *Direct Current* (DC)

Motor listrik merupakan perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi mekanik. Energi mekanik ini pada umumnya digunakan untuk memutar *impeller* pompa, fan atau *blower*, menggerakan kompresor, mengangkat bahan, dan lainnya. Motor listrik digunakan juga pada peralatan rumah tangga (*mixer*, bor listrik, *blower*) dan di industri [9].

Motor DC memerlukan tegangan masukan searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor DC disebut *stator* (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut *rotor* (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam medan magnet, maka akan timbul tegangan (GGL) yang berubah-ubah arahnya pada setiap setengah putaran sehingga menjadi tegangan bolak-balik. Prinsip kerja dari arus searah adalah membalik phasa tegangan dari gelombang yang mempunyai nilai positif dengan menggunakan komutator sehingga arus pada kumparan jangkar yang berputar dalam medan magnet akan berbalik arah. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas di antara kutub-kutub magnet permanen [9].

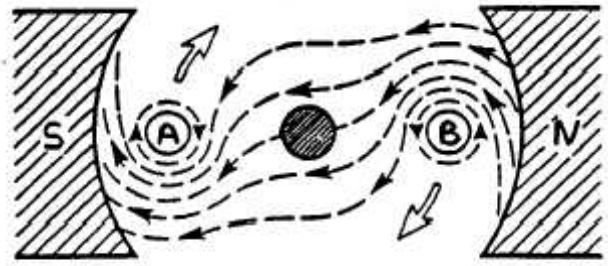


Gambar 2.18 Bagan sederhana motor DC [9]

Pada **Gambar 2.18**, catu daya DC dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator dengan dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan satu lilitan tersebut adalah angker dinamo. Angker dinamo merupakan sebutan untuk komponen yang berputar diantara medan magnet [9].

2.6.1 Prinsip Dasar Motor DC

Jika arus melewati suatu konduktor maka akan timbul medan magnet di sekitar konduktor tersebut. Arah medan magnet ditentukan oleh arah aliran arus pada konduktor. Arah garis fluks disekitar konduktor dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah tangan kanan. Dimana ibu jari merupakan arah aliran arus dan jari-jari yang melingkupi konduktor merupakan arah garis fluks [9]. **Gambar 2.19** menunjukkan medan magnet yang terbentuk di sekitar konduktor mengalami perubahan arah karena bentuk U. jika konduktor berbentuk U (angker dinamo) diletakkan di antara kutub utara dan selatan, maka kuat medan magnet konduktor akan berinteraksi dengan medan magnet kutub.



Gambar 2.19 Reaksi garis fluks [9]

Lingkaran bertanda A dan B merupakan ujung konduktor yang dilengkungkan (*looped conductor*). Arus mengalir masuk melalui ujung A dan keluar melalui ujung B. medan magnet konduktor A yang searah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat dibawah konduktor. Konduktor akan

berusaha bergerak ke atas untuk keluar dari medan kuat ini. Medan konduktor B yang berlawanan arah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di atas konduktor. Konduktor akan berusaha untuk bergerak turun agar keluar dari medan yang kuat tersebut [9].

Pada motor DC, daerah kumparan medan yang dialiri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang melingkupi jangkar dengan arah tertentu. Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya berlangsung melalui medan magnet. Dengan demikian, medan magnet pada motor DC berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan energi serta sebagai tempat berlangsungnya proses perubahan energi. Agar proses perubahan energi mekanik dapat berlangsung secara sempurna maka tegangan sumber harus lebih besar daripada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Dengan memberikan arus pada kumparan jangkar yang dilindungi oleh medan magnet, maka akan menimbulkan perputaran pada motor [9].

2.5 Sensor

Sensor merupakan komponen elektronika yang berfungsi untuk mengubah besaran fisik menjadi besaran listrik seperti tegangan, arus dan lainnya. Pada perhitungan nilai kecepatan putaran, sensor yang dapat digunakan diantaranya adalah *optocoupler*, *photodioda* dan *encoder* (magnetik dan optik). Masing-masing komponen memiliki kelebihan dan kekurangan dilihat dari sisi ketepatan, ketelitian, ataupun ekonomi [24].

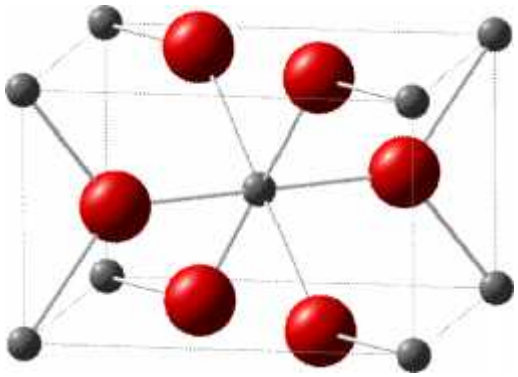
2.6 Titanium Dioksida (TiO_2)

Titanium dioksida (TiO_2) merupakan bahan semikonduktor yang dapat menghantarkan listrik, memiliki sifat logam yang kuat, ringan, sifat optik yang baik dan memiliki kerapatan yang rendah [13]. TiO_2 memiliki berat molekul 79.90 g/mol, densitas 4.26 g/cm^{-3}. TiO_2 dapat diaplikasikan pada perangkat optik, sensor gas, fotokatalis, sel surya dan pandu gelombang planar. Selain itu, TiO_2 merupakan bahan

semikonduktor yang keberadaannya melimpah di bumi dan harganya relatif murah dan tidak menimbulkan efek yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan [26].

2.6.1 Struktur Kristal Titanium Dioksida (TiO_2)

Pada umumnya, di alam TiO_2 memiliki tiga fasa yaitu *rutile* (tetragonal), *antase* (tetragonal) dan *brookite* (orthorombik). *Rutile* dan *anatase* cukup stabil, sedangkan *brookite* sulit ditemukan, biasanya terdapat dalam mineral dan sulit dimurnikan. Perbedaan struktur kristal antara *anatase* dan *rutile* adalah pada distorsi oktahedral dan pola penyusunan rantai oktahedralnya. Masing-masing ion Ti^{4+} dikelilingi oleh enam ion O^{2-}. Kisi kristal *rutile* adalah trigonal primitif seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.20** [13].



Gambar 2.20 Kisi kristal rutile (TiO_2) [13]

Tabel 2.2 Perbedaan antara struktur kristal *anatase* dan *rutile* [13]

Parameter		TiO_2 *anatase*	TiO_2 *rutile*
Sistem Kristal		Tetragonal	Tetragonal
Parameter Kisi	a (Å)	*3.7852*	*4.5933*
	c (Å)	*9.5139*	*2.9592*
Vol (Å)		*136.25*	*62.07*
Massa Jenis (g/cm^3)		*3.8950*	*4.2743*
Celah Pita Energi (eV)		*3.2*	*3.0*

Jarak antara Ti-Ti *anatase* lebih besar dibandingkan pada *rutile* yaitu 3.79 Å dan 3,04 Å pada *anatase*, sedangkan pada *rutile* adalah 3.57 Å dan 3.96 Å. Jarak Ti-O *anatase* lebih kecil dibanding dengan *rutile* yaitu 1.934 Å dan 1.980 Å pada *anatase* sedangkan pada *rutile* adalah 1.949 dan 1.980 Å. Setiap oktahedron pada struktur *rutile* dikelilingi oleh sepuluh oktahedron tetangga, sedangkan pada struktur *anatase* setiap oktahedron hanya dikelilingi delapan oktahedron tetangga. Distorsi orthorombik menyebabkan terjadinya perbedaan luasan aktif, *anatase* memiliki simetri geometris yang lebih mendukung untuk mengabsorbsi cahaya karena luasan aktifnya lebih besar daripada *rutile*. **Tabel 2.2** memperlihatkan beberapa perbedaan antara struktur kristal *anatase* dan *rutile* [13].