

## BAB II

www.itk.ac.id

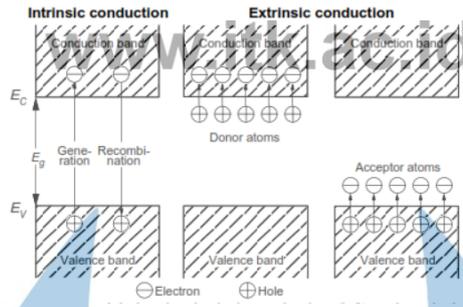
### TINJAUAN PUSTAKA

Pembahasan pada bab tinjauan Pustaka ialah mengenai landasan teori dari penelitian yang dilakukan pada tugas akhir. Penulisan landasan teori dilakukan untuk menjelaskan jalan berpikir teori dari penelitian tugas akhir. Adapun bahasan utama dari tinjauan pustaka ialah panel surya, MPPT, pengendalian *fuzzy* dan NLDPID.

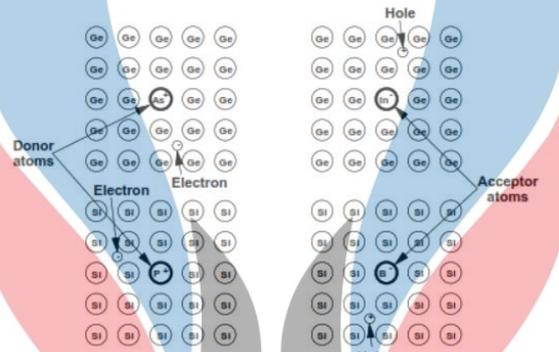
### 2.1 Sel Surya

Cahaya matahari dapat diubah menjadi energi listrik melalui *solar cell* dengan proses yang disebut PV atau *photo-voltaic*. PV adalah proses mengubah cahaya menjadi listrik. *Solar cell* terbentuk dari semikonduktor yang diberikan material khusus. Bahan yang sering digunakan sebagai bahan *solar cell* adalah *crystalline silicon* Pada umumnya sel silikon dengan diameter 4-inch dapat memproduksi lebih dari 1 W DC (*direct current*). Setiap *solar cell* tersebut digabungkan menjadi satu sehingga menjadi panel surya dan menghasilkan tegangan dan arus yang diinginkan (Robert Foster, Majid Ghassemi, 2010).

Semikonduktor dapat bekerja dengan dua hal yaitu secara intrinsik dan juga secara ekstrinsik. Konduktansi intrinsik adalah keadaan dimana elektron berpindah dari *valence band* menuju *conduction band* dan hanya dipengaruhi oleh energi listrik saja. Intrinsik juga menggambarkan bahwa hanya material semikonduktor saja yang bekerja. Pada ekstrinsik konduktansi terdapat *doping* pada saat terjadi perpindahan. *Doping* adalah terdapat substansi asing pada sel. Contoh dari wujud konduktivitas ekstrinsik adalah pada sel yang dicampur dengan aluminium. Hasil yang didapatkan dari sel adalah elektron mengalami kelebihan sehingga atom harus *donor* menuju *acceptor*. Bentuk dari *donor* dan *acceptor* adalah lapisan P dan lapisan N. Lapisan P adalah semikonduktor yang memiliki ion positif, sementara lapisan N adalah semikonduktor yang memiliki ion negatif. Adapun gambaran dari intrinsik dan ekstrinsik konduktansi dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan gambaran dari pengaruh konduktansi ekstrinsik dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Kaltschmitt, Streicher and Wiese, 2007)



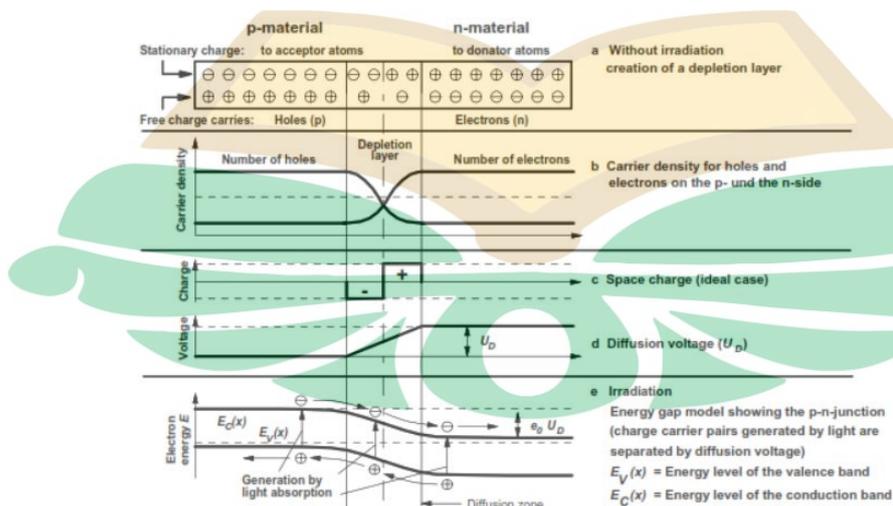
Gambar 2.1 Model instrinsik dan ekstrinsik *solar cell* (Kaltschmitt, Streicher and Wiese, 2007)



Gambar 2.2 Pengaruh konduktansi ekstrinsik (Kaltschmitt, Streicher and Wiese, 2007)

## 2.2 Proses *Photovoltaic*

Lapisan semikonduktor pada *solar cell* dapat menghasilkan listrik apabila saluran deplesinya sudah berhasil dilewati dan terjadi *loop* pada saluran. Perpindahan elektron tersebut dapat dilakukan dengan cahaya matahari. Cahaya matahari merangsang elektron agar dapat bergerak. Adapun gambaran dari proses *photovoltaic* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

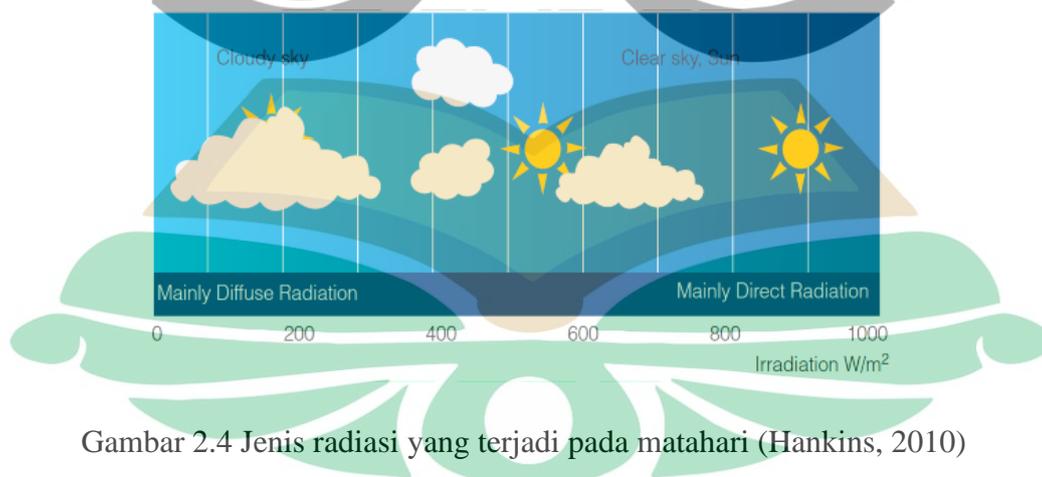


Gambar 2.3 Proses *photovoltaic* (Kaltschmitt, Streicher and Wiese, 2007)

Gambar 2.3 menggambarkan keadaan sel surya Ketika belum mendapatkan iradiasi matahari. Gambar bagian a menjelaskan bahwa tercipta daerah deplesi sehingga tidak ada arus yang mengalir. Gambar bagian b memperjelas bahwa saluran tersebut tertutup rapat, sementara bagian c adalah menjelaskan bila tertutup dalam keadaan ideal dan bagian d menjelaskan *diffusion voltage* pada daerah. Pada saat iradiasi diberikan pada sel surya maka daerah deplesi mengecil dan saluran terbuka, sehingga arus dapat mengalir. Sinar matahari yang mengenai sel surya mengakibatkan elektron di daerah N untuk bergerak naik mendekati sinar matahari sehingga daerah deplesi mengecil. Pergerakan elektron tersebut juga terjadi pada daerah P sehingga tercipta hole di kedua tempat. Sistem yang dibuat ada *looping* sehingga elektron yang mendekati cahaya turun Kembali menuju daerah N sehingga hole tersebut tertutupi dan bergerak maju kembali untuk menutupi daerah hole di P. Pergerakan elektron tersebut pada akhirnya menciptakan energi listrik.

### 2.3 Iradiasi Matahari

Matahari dapat memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Radiasi tersebut dapat mengalami perubahan nilai berdasarkan jenis pancaran. Jenis pancaran tersebut dibedakan menjadi 2 macam yaitu direct dan diffuse. *Direct radiation* merupakan radiasi matahari yang datang secara langsung diterima oleh bumi tanpa penyebaran pada permukaan atmosfer. *Diffuse radiation* merupakan jenis radiasi matahari yang melalui proses penyebaran pada atmosfer. Penyebaran tersebut menyebabkan nilai iradiasi yang sampai ke bumi menjadi berkurang. Ilustrasi jenis radiasi pada matahari terdapat pada Gambar 2.4 (Hankins, 2010)



Gambar 2.4 Jenis radiasi yang terjadi pada matahari (Hankins, 2010)

Perubahan nilai iradiasi tersebut dipengaruhi oleh kondisi cuaca yang dialami bumi. Pada kondisi cerah terjadi direct radiation dari matahari sehingga nilai iradiasi yang sampai ke bumi berkisar  $>900W/m^2$ . Pada kondisi berawan terjadi *diffuse radiation* yang menyebabkan

www.itk.ac.id

nilai iradiasi yang diterima oleh bumi menjadi menurun dengan kisaran 400-800W/m<sup>2</sup>. Pada kondisi mendung terjadi pemancaran sinar matahari berupa *direct irradiation*. Pemancaran tersebut mengalami penyebaran iradiasi di permukaan atmosfer sehingga nilai iradiasi yang diterima menjadi menurun. Penurunan yang dialami pada kondisi ini senilai 50% dari kondisi berawan (Kazem, Khatib and Sopian, 2013)

#### 2.4 *Solar Charge Controller*

*Solar charge controller* atau lebih dikenal dengan singkatan SCC, merupakan alat elektronik untuk mengatur besaran arus dan tegangan yang datang dari solar panel. Terdapat beberapa kegunaan dari *solar charge controller* yaitu menghalangi arus balik, menghindari baterai *overcharge*, *overload protection*, *monitoring*, dan *control set point*. SCC berfungsi sebagai menghalangi arus balik dari baterai menuju solar panel. Hal tersebut dapat terjadi apabila pada malam hari, ketika solar panel tidak menghasilkan tegangan listrik. Arus listrik yang sangat rendah pada solar panel memungkinkan untuk baterai memberikan arus ke alat elektronik yang rendah tegangan yaitu solar panel. SCC diberikan untuk memastikan tidak ada arus balik yang dapat memasuki solar panel pada malam hari atau ketika solar panel tidak menghasilkan arus listrik (Robert Foster, Majid Ghassemi, 2010).

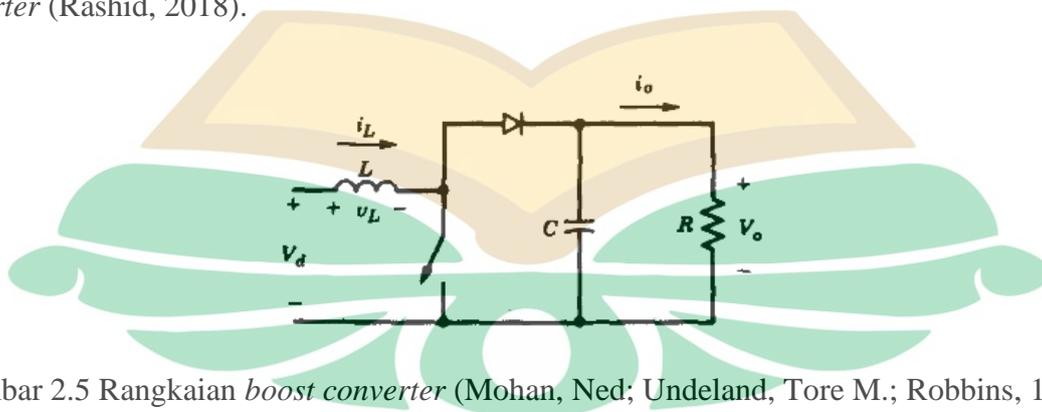
SCC juga berfungsi sebagai proteksi *overcharge* dan *overload*. *Overcharge* terjadi apabila baterai yang diisi oleh tegangan dari solar panel telah mencapai batas maksimum. Baterai yang terisi penuh dan terus menerus diisi berakibat pengurangan waktu masa pakai baterai. Sementara *overload protection* adalah menjaga solar panel dan baterai bila terjadi *short circuit* atau hubung singkat yang berakibat lonjakan arus. Apabila *overload protection* tidak diberikan maka menyebabkan panas dan pemutusan jaringan listrik solar panel dan baterai. Fungsi lainnya dari SCC adalah sebagai pemantau dan *control set point*. SCC dapat memberikan data mengenai berapa tegangan, iradiasi, temperatur, kelembaban, dan arus yang diterima oleh solar panel. Sementara *control set point* digunakan untuk mengatur referensi dari solar panel, hal tersebut meliputi pengaturan temperatur pada baterai. Baterai memiliki temperatur yang berbeda saat digunakan, apabila digunakan secara berlebihan dan juga dipengaruhi suhu lingkungan dapat mengakibatkan peningkatan suhu baterai dan merusak baterai. *Control set point* diberikan secara otomatis oleh SCC agar menjaga suhu baterai (Di Piazza and Vitale, 2013).

*Solar Charge Controller* memiliki dua jenis, jenis MPPT dan PWM. SCC berjenis MPPT bekerja dengan mencari titik daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya. Titik daya maksimum tersebut didapatkan dengan mencari nilai tegangan dan arus daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya. SCC berjenis PWM bekerja sesuai dengan nilai arus menyesuaikan kemampuan baterai pada tegangan tertentu. Hasil yang didapatkan adalah baterai diisi dengan tegangan yang sesuai. Kesesuaian dari tegangan tidak membuat panel surya bekerja secara maksimum. Hal tersebut dikarenakan nilai keluaran tegangan dan arus yang dihasilkan bergantung pada tipe baterai (Sepulveda Mora *et al.*, 2019).

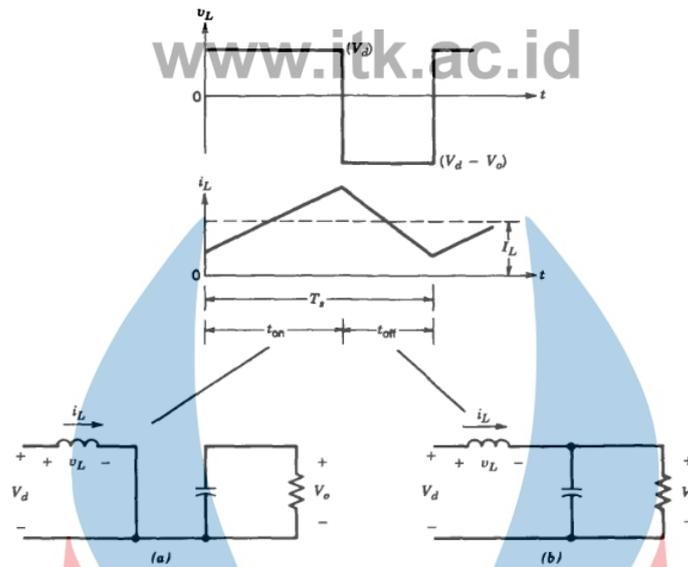
## 2.5 DC-DC Boost Converter

Konverter DC-DC digunakan untuk meregulasi saklar tegangan DC dan pada beban DC. Regulasi dilakukan untuk memastikan tegangan yang masuk kedalam beban sesuai dengan besaran yang seharusnya diterima. *Boost converter* atau rangkaian *converter* penaik tegangan digunakan untuk meningkatkan nilai dari tegangan pada suatu rangkaian dan menstabilkannya. Rangkaian tersebut terdiri dari sumber dc, *inductor*, kapasitor, switch, dan beban.

Pada bentuk sederhana switch dari rangkaian *boost converter* dapat diaktifkan dan di nonaktifkan. Ketika di aktifkan maka arus memilih melewati switch dan tidak melewati dioda, sehingga arus dalam *inductor* meningkat secara *linear*. Sementara ketika switch off maka energi yang tersimpan dalam *inductor* dilepas menuju beban RC. Gambar rangkaian *boost converter* dapat dilihat pada gambar 4.  $V_d$  adalah tegangan sumber dari *boost converter*,  $V_L$  adalah tegangan dalam induktor,  $I_L$  adalah arus yang mengalir dalam induktor,  $I_o$  adalah arus keluaran yang dihasilkan oleh *boost converter*, dan  $V_o$  adalah tegangan keluaran *boost converter* (Rashid, 2018).



Gambar 2.5 Rangkaian *boost converter* (Mohan, Ned; Undeland, Tore M.; Robbins, 1995)



Gambar 2.6 Gambaran aliran dan sinyal keluaran dari *boost converter* a) pada *switch on*, b) pada *switch off* (Rashid, 2018)

Adapun persamaan dari keluaran tegangan *boost converter* dapat dibentuk sebagai persamaan 2.1. Pada persamaan terlihat tegangan keluaran bergantung pada besaran *duty cycle* yang diterima oleh *boost converter*. Sistem penaik tegangan dari *boost converter* bekerja dengan mendefinisikan besaran *duty cycle* yang diberikan. *Boost converter* digunakan dalam sistem MPPT untuk mengatur tegangan yang dihasilkan oleh panel surya, nilai dari *duty cycle* menggunakan algoritma untuk mencari nilai yang mencapai titik daya maksimum. Penentuan model *boost converter* dapat dilakukan dengan mengatur berapa besaran *ripple* yang terdapat pada rangkaian. Berdasarkan penentuan nilai *ripple* didapatkan nilai besaran induktor dan kapasitor yang dibutuhkan pada rangkaian. Adapun persamaan pencarian induktor dan kapasitor dapat dilihat pada persamaan (Mohan, Undeland, & Robbins, 1995).

$$V_{out} = \frac{V_s}{1 - D} \quad (2.1)$$

$$\Delta V_{out} = \frac{I_o d}{f_s C}$$

$$C = \frac{I_o d}{f_s \Delta V_{out}} \quad (2.2)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} d}{f_s L}$$

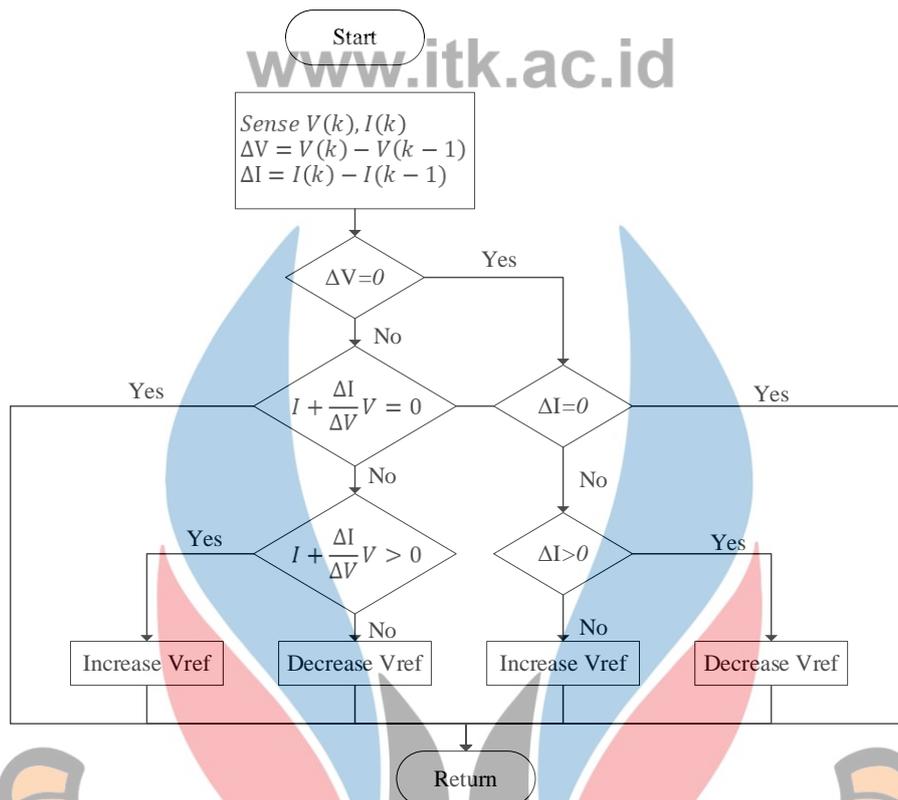
$$L = \frac{V_{in} d}{f_s \Delta I_L} \quad (2.3)$$

## 2.6 Incremental Conductance

Pengaturan arus dan tegangan pada panel surya perlu dilakukan agar didapatkan daya maksimum. Keluaran daya maksimum dari panel surya didapatkan melalui sebuah algoritma atau sistem yang disebut MPPT atau *maximum power point tracking*. Salah satu metode dalam pencarian nilai daya maksimum dari keluaran panel surya adalah *incremental conductance*. *Incremental conductance* adalah sebuah teknik mencari nilai maksimum atau *maximum power point tracking* (MPPT) dengan membandingkan nilai *incremental conductance* dengan *instantaneous conduction*. Persamaan dari *incremental conductance* dapat dilihat pada persamaan (2.4) (EL, MEHDI and ZAZI, 2016).

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dV} &= 0 \\ I + V \frac{dI}{dV} &= 0 \\ \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} &= 0 \\ \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V}\end{aligned}\quad (2.4)$$

Persamaan 2.4 menjelaskan bahwa nilai daya maksimum telah tercapai dikarenakan tidak ada lagi kenaikan ataupun penurunan tegangan yang dibutuhkan. Hal tersebut dapat dilihat dengan nilai perbandingan perubahan daya dan perubahan tegangan menghasilkan nilai nol. Pencapaian tersebut menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh panel surya telah mencapai nilai tegangan maksimum. Parameter keberhasilan algoritma dilihat dari tegangan, dikarenakan panel surya hanya menghasilkan arus, tegangan berhasil dibangkitkan oleh pengaturan dari beban atau SCC. Berdasarkan persamaan 2.4 dapat diturunkan untuk melihat pengaruh dari arus dalam pencarian titik daya maksimum. Terlihat bahwa perbandingan antara perubahan arus dan perubahan tegangan berbanding lurus dengan nilai negatif perbandingan arus dan tegangan keadaan seketika. Analisis dari algoritma dapat dilakukan dengan melakukan beberapa perbandingan melalui persamaan 2.4. Melihat dari hasil perbandingan daya dan tegangan, nilai arus seketika, nilai tegangan seketika, nilai perubahan arus, dan nilai perubahan tegangan. Penggambaran mengenai penentuan tegangan berdasarkan algoritma *incremental conductance*, perlu dinaikkan atau diturunkan dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Ghosh and Mahendran, 2013).



Gambar 2.7 Flowchart incremental conductance (Ghosh and Mahendran, 2013)

Gambar 2.7 menjelaskan bagaimana cara kerja dari algoritma *incremental conductance*. Tahap pertama adalah mencari nilai kenaikan atau perbedaan nilai tegangan dan arus dari waktu sebelumnya dengan waktu seketika. Apabila tidak terdapat perubahan pada nilai tegangan maka dilihat dari nilai arusnya. Bila tidak terdapat perubahan pada nilai arusnya maka nilai daya maksimum telah tercapai. Jika terdapat perubahan nilai arus maka dilihat apakah perubahan nilai arus melebihi dari 0 atau kurang dari 0, bila melebihi dari 0 maka  $V_{ref}$  diturunkan dan bila kurang dari 0 maka nilai  $V_{ref}$  dinaikkan. Apabila nilai tegangan yang mengalami perubahan maka tidak perlu memeriksa arus tetapi langsung memeriksa apakah persamaan 2.4 sama dengan nol, bila sama dengan nol maka nilai daya maksimum telah tercapai. Apabila nilai tidak sama dengan nol dan nilainya lebih besar dari nol maka nilai dari  $V_{ref}$  dinaikkan, jika sebaliknya yaitu nilai kurang dari nol maka nilai dari  $V_{ref}$  diturunkan (Eltamaly and Abdelaziz, 2020).

## 2.7 Nonlinear Discrete PID

Controller PID merupakan algoritma pengendalian berulang yang menggunakan mekanisme *feedback*. Sistem *feedback* adalah nilai keluaran dari sistem dibaca Kembali oleh *controller*. Nilai keluaran dibandingkan dengan nilai yang telah disiapkan atau nilai *set point*.

Nilai *error* dari perbandingan tersebut diperbaiki dengan menggunakan nilai *proportional* atau nilai set yang harus dicapai, nilai *integral* atau nilai untuk mempercepat kenaikan nilai, nilai *differential* atau nilai batasan atau turunan agar tidak terjadi nilai *overshoot*. Terdapat kelemahan pada *controller PID* yaitu *variable gain* yang dapat diatur adalah *constant*, diperlukan sistem pengendalian yang dapat menerima masukan sinyal secara fluktuasi. Sistem pengendalian MPPT panel surya membutuhkan sistem yang dapat adaptasi dengan fluktuasi iradiasi matahari dan temperatur lingkungan. Penggunaan *nonlinear discrete PID* membantu menyelesaikan permasalahan tersebut (Sreenivasappa and Udaykumar, 2010).

### **2.7.1 Controller Proportional**

Pengaturan menggunakan *proportional* adalah pengaturan sesuai besaran *error* yang dihasilkan. Nilai *gain* pada *proportional* menentukan keluaran sinyal dengan menggunakan nilai *error* dan besaran *gain* yang dihasilkan. Hasil dari sinyal adalah mengalami pendekatan sangat dekat terhadap nilai berdasarkan *error* yang dihasilkan. Terdapat kelemahan dari *controller proportional* dimana keluaran dari sistem mengalami osilasi dikarenakan melakukan pendekatan terhadap *error* sehingga sistem memakan waktu lama untuk mencapai *steady state* (Franklin, G. F.; Powell, J. D.; Emami-Naeni, 2009).

### **2.7.2 Controller Integral**

Pengaturan menggunakan *integral* adalah pengaturan yang membaca nilai *error* yang dihasilkan dan memberikan nilai *gain*. Nilai *gain* yang diberikann terus meningkat dan melihat nilai *error* yang diberikann. Jika nilai *error* masih cukup besar maka nilai *gain integral* ditingkatkan hingga mencapai 100 persen. Hasil yang didapatkan nilai *steady state* lebih cepat didapatkan tetapi dapat terjadi *overshoot* dikarenakan nilai *gain integral* yang berlebihan sehingga sinyal dihasilkan melebihi batas target yang ditentukan (Franklin, G. F.; Powell, J. D.; Emami-Naeni, 2009).

### **2.7.3 Controller Differential**

Pengaturan dengan menggunakan *differential* adalah pengaturan yang membatasi *gain-gain* yang telah dihasilkan. Pengaturan *differential* tidak bisa berdiri sendiri, sehingga membutuhkan pengaturan lainnya. Pada sistem *controller differential* nilai *error* sebelumnya menjadi titik nilai *gain*. Fungsi dari *gain* tersebut adalah untuk membatasi agar nilai tidak melebihi batasan yang ada. Hal ini dilakukan agar sistem tidak terjadi *overshoot* berlebihan

dan mencapai nilai *steady state* lebih cepat (Franklin, G. F.; Powell, J. D.; Emami-Naeni, 2009).

### 2.7.4 Controller PID

Pengaturan dengan menggunakan *proportional*, *integral*, dan *differential* atau controller PID merupakan gabungan dari tiga pengendalian. Nilai yang dihasilkan sangat cepat untuk mencapai keadaan *steady state*. Nilai *gain* dari *proportional* membuat nilai sinyal bergerak sebesar *error* yang diberikann. Nilai *gain* dari *integral* naik sampai nilai *error* mengecil dan tidak ada. Nilai *gain* dari *differential* menjaga sinyal agar tidak melebihi batas yang ada. Hasil yang diberikann adalah sinyal yang tidak mengalami *overshoot*, osilasi dan memiliki waktu kenaikan yang cepat (Franklin, G. F.; Powell, J. D.; Emami-Naeni, 2009).

### 2.7.5 Pengaturan Gain Metode Ziegler Nichols

Nilai *gain* yang digunakan dalam percobaan PID dan NLDPID dicari terlebih dahulu dengan metode *Ziegler Nichols*. Metode *Ziegler Nichols* terdapat dua macam metode pengaturan, metode pertama ialah menggunakan percobaan dengan rangkaian *open loop* untuk melihat respon sistem dan mencoba *tuning* dari respon tersebut. Metode pengaturan tersebut membutuhkan respon sistem berbentuk S. Jika sistem membentuk S maka dapat ditarik garis singgung, dari garis tersebut didapatkan waktu *delay* dan juga waktu *constant* dari sistem. Waktu *delay* adalah waktu sebelum sistem mengalami kenaikan nilai, sementara waktu *constant* adalah waktu yang digunakan sistem untuk meningkat secara *linier*. Adapun tabel perhitungan pengaturan *gain* metode *Ziegler Nichols* dapat dilihat pada Tabel 2.1 (Ogata, 2010).

Tabel 2.1 Parameter PID Ziegler Nichols I<sup>\*)</sup>

Tipe Kendali	$K_P$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

\*) (Ogata, 2010)

Kekurangan dari metode pertama *Ziegler Nichols* adalah jika sistem mengalami respon *ripple* dan fluktuasi secara besar, garis singgung tidak bisa dibuat pada respon sistem.

Pencarian nilai *gain* tersebut tentu membutuhkan cara baru untuk mendapatkan nilai. Metode kedua dari *Ziegler Nichols* ialah melakukan respon sistem pada *closed loop*, selanjutnya sistem diberikan nilai  $K_p$  dari nol hingga mencapai *critical gain* atau  $K_{cr}$ . Tanda sistem telah mencapai nilai *critical gain* ialah bila respon sistem telah stabil. Berdasarkan bentuk gelombang yang dihasilkan maka bisa diambil nilai  $P_{cr}$ . Nilai  $K_{cr}$  dan  $P_{cr}$  digunakan untuk mencari nilai *gain* PID. Adapapun persamaan untuk mencari *gain* PID metode *Ziegler Nichols* II dapat dicari pada Tabel 2.2 (Ogata, 2010). Tabel 2.2 Parameter PID *Ziegler Nichols* II <sup>\*)</sup>

Tipe Kendali	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$0.5 K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$0.125 P_{cr}$

<sup>\*)</sup> (Ogata, 2010)

### 2.7.6 Controller NLDPID

Penggunaan pengaturan PID tidak mencukupi dalam sistem panel surya. Hal tersebut disebabkan oleh fluktuasi iradiasi matahari dan temperatur lingkungan. Hal tersebut menyebabkan nilai *steady state* sangat sulit dicapai oleh PID. Pembentukan analisis secara *discrete* membantu pengendalian dikarenakan nilai yang diambil lebih teliti dan lebih dalam dibandingkan pengendalian PID. Persamaan *nonlinear discrete* PID dapat dilihat pada persamaan (2.3) – (2.5) (Pathak, Sagar and Gaur, 2020).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

$$\frac{u(n) - u(n-1)}{T_s} = K_p \frac{e(n) - e(n-1)}{T_s} + K_i e(n) + \frac{K_d \left( \frac{e(n) - e(n-1)}{T_s} - \frac{e(n-1) - e(n-2)}{T_s} \right)}{T_s} \quad (2.6)$$

$$u_{N-DPID} = K_p + K_i T_s \frac{1}{z-1} k(e) + K_d \frac{z-1}{T_s z} \quad (2.7)$$

Persamaan *nonlinear discrete* PID merupakan hasil diskritisasi pengendalian PID. Pengendalian PID diberikan perhitungan *backward difference*, sehingga hasil penggambaran nilai error berubah menjadi persamaan (2.6). Pengubahan nilai *backward difference* merupakan salah satu metode diskritisasi, sistem menghitung satu nilai sebelum nilai pada waktu sesungguhnya. Nilai yang sudah diubah dengan menggunakan *backward difference* dikonversi

menjadi nilai Z. Hasil dari konversi nilai tersebut ialah persamaan (2.7) (Sreenivasappa and Udaykumar, 2010).

## 2.8 Kestabilan Routh

Kestabilan *routh* merupakan salah satu metode untuk menentukan apakah sistem dikatakan telah stabil atau tidak. Berdasarkan teori kestabilan menyatakan bahwa jika sistem dikatakan stabil apabila seluruh *closed loop poles* berada pada sisi kiri *s plane*. Penentuan kestabilan sistem sulit ketika persamaan polynomial dari sistem memiliki orde yang cukup tinggi. *Routh stability criterion* digunakan untuk menyelesaikan persamaan polynomial dari orde tinggi. Keluaran dari percobaan kestabilan *routh* ialah akar dari persamaan polynomial. Langkah awal dari kestabilan *routh* ialah menuliskan persamaan polynomial dari sistem. Apabila terdapat nilai negatif atau nilai nol pada persamaan yang memiliki satu nilai positif, sistem dapat dipastikan memiliki satu atau lebih akar yang bernilai imajiner atau memiliki bilangan positif nyata. Jika hal tersebut terjadi maka sistem dapat dikatakan tidak stabil. Apabila hal sebaliknya semua memiliki nilai yang negatif atau positif semua maka perlu dilakukan pengujian lebih lanjut. Matriks *routh* dibentuk untuk menginvestigasi nilai yang dihasilkan oleh sistem. Adapun matriks *routh* dapat dilihat pada Gambar 2.8.

$s^n$	$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$	$a_{n-6} \dots$	
$s^{n-1}$	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$	$a_{n-7} \dots$	
$s^{n-2}$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	
$s^{n-3}$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	
•					
•					
•					
$s^2$	$k_1$	$k_2$			
$s^1$	$l_1$				
$s^0$	$m_1$				

$$b_1 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix} \quad b_2 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{vmatrix} \dots$$

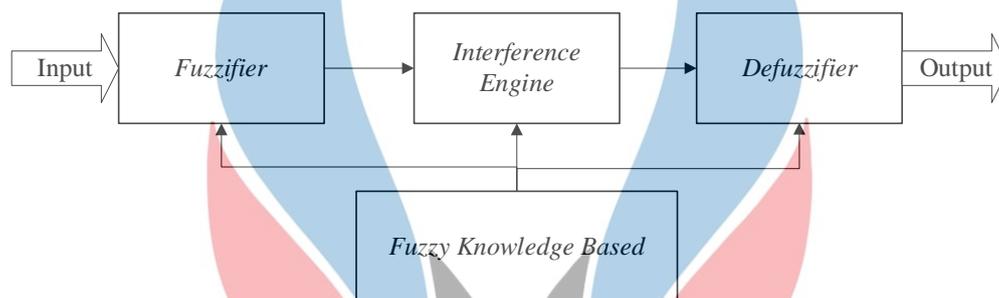
$$c_1 = -\frac{1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \quad c_2 = -\frac{1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-5} \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix} \dots$$

Gambar 2.8 Matriks kestabilan *routh* (Ogata, 2010)

Gambar 2.8 menunjukkan perhitungan yang dilakukan dalam kestabilan *routh*. Penggunaan kestabilan *routh* selain memeriksa keadaan sistem, bisa juga digunakan untuk menentukan nilai kompensator untuk penguatan sistem. Nilai penguat yang didapatkan ialah rekomendasi nilai penguat untuk mencapai *critical gain*.

## 2.9 Fuzzy Logic

*Fuzzy logic*, atau logika kabur merupakan suatu logika yang dapat digunakan untuk membantu menentukan keluaran dari suatu permasalahan yang telah didefinisikan. *Fuzzy logic* membantu penentuan keputusan dengan sangat cepat. Hal tersebut terjadi karena definisi suatu masalah sudah didefinisikan dari awal. Penentuan keluaran dari *fuzzy* langsung melihat peraturan yang telah dibuat. Adapun gambaran algoritma *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.9 (Dernoncourt, 2013).



Gambar 2.9 Gambaran logika *fuzzy* (Dernoncourt, 2013)

Gambar 2.9 terlihat bagaimana proses dari algoritma *fuzzy*. Data yang dimasukkan kedalam logika *fuzzy* dibentuk dalam *input*. Algoritma *fuzzy* memproses nilai *input* yang telah berubah menjadi variabel *fuzzy* melalui proses fuzifikasi. Nilai masukan yang sudah berubah menjadi bahasa *fuzzy* akan dilakukan proses sistem melalui algoritma yang telah diberikan didalam *fuzzy rule*. Algoritma melakukan perhitungan dan memproses berdasarkan *fuzzy rule* dan menghasilkan keluaran dalam bahasa *fuzzy*. Keluaran tersebut akan diubah menjadi bilangan nyata sesuai variabel yang telah dibuat dalam *fuzzy interference system*. Proses pengubahan nilai keluaran *fuzzy* menjadi nilai nyata dilakukan dalam proses defuzifikasi. Algoritma *fuzzy*, *fuzzy rule*, proses fuzifikasi dan defuzifikasi disimpan didalam pengetahuan *fuzzy* berbentuk *fuzzy interference system*. Pada penelitian digunakan *fuzzy* dengan algoritma dari Takagi-Sugeno (Dernoncourt, 2013)

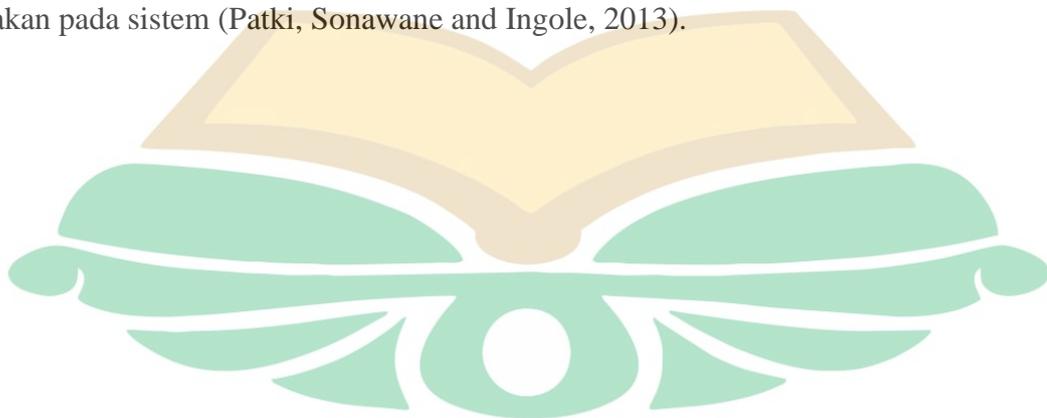
*Fuzzy* yang digunakan dalam sistem ialah *fuzzy* dengan menggunakan metode Takagi-Sugeno. Sistem takagi-sugeno bekerja dengan merespon nilai-nilai yang diberikan melalui sebuah fungsi. Peraturan dan pengaturan yang diberikan dalam *fuzzy* merupakan deskripsi fungsi-fungsi yang dimasukkan kedalam sistem. Kelebihan utama dari sistem *fuzzy* Takagi-Sugeno ialah memiliki sistem yang dapat bekerja pada *closed loop*. Penentuan dari peraturan *fuzzy* ialah metode “jika dan jika maka respon yang diberikan adalah”. Perbedaan utama dari *fuzzy* Takagi-Sugeno adalah pada defuzifikasi yang diberikan sistem. Proses defuzifikasi dari

Takagi-Sugeno ialah dengan melalui perhitungan nilai rata-rata. Pada setiap perhitungan peraturan dilakukan pemeriksaan respon yang dihasilkan melalui fungsi yang telah dibuat dalam *fuzzy*. Hasil dari setiap perhitungan peraturan *fuzzy* dilakukan perhitungan rata-rata dan didapatkan respon *fuzzy* yang diberikan sistem (Lilly, 2010).

## 2.10 PID Fuzzy Tuning

Penelitian mengimplementasikan *fuzzy* untuk mengatur penguat PID. Pada percobaan dilakukan *fuzzy gain scheduling*. Pengaturan penguat dilakukan dengan menggunakan logika *fuzzy*, nilai error dan perubahan error sistem digunakan sebagai masukan dari sistem *fuzzy*. Dasar pemikiran dari *tuning* menggunakan *fuzzy* ialah terdapat respon sistem yang tidak *linear*, hasil yang diciptakan ialah sistem merespon diluar dari respon seharusnya. Menciptakan osilasi dan juga menciptakan *overshoot* yang berlebihan. Penyesuaian nilai penguat berdasarkan nilai error yang diterima oleh sistem menciptakan sistem yang lebih *adaptive* ketika diberikan respon error.

.Besaran pada nilai penguat yang dihasilkan diatur dengan *range* penguat. Penggunaan pengaturan *fuzzy* dapat dilakukan dengan mengatur respon keluaran nilai penguat proporsional dan penguat differensial. Menggunakan perhitungan perbandingan antara proporsional dan differensial didapatkan nilai dari penguat integral. Adapun nilai penguat yang diberikan berbentuk suatu gelombang sehingga membuktikan bahwa sistem melakukan penyesuaian terhadap setiap hasil respon sistem (Zhao, Tomizuka and Isaka, 1993). Sistem pengendalian *fuzzy* pengaturan penguat juga dapat digunakan pada sistem NLDPID. Hal tersebut dapat dilakukan karena perbedaan dari sistem terdapat pada respon sistem, sistem direspon secara diskrit. Respon pengaturan penguat memiliki kesamaan sehingga jenis *tuning* apapun bisa digunakan pada sistem (Patki, Sonawane and Ingole, 2013).



## 2.11 Penelitian Terdahulu

Nama	Judul Penelitian	Metode	Keterangan
(Abdulkadir and Yatim, 2014)	Hybrid maximum power point tracking technique based on PSO and incremental conductance	PSO dan Incremental conductance	Penggabungan Teknik <i>incremental conductance</i> dengan <i>particle swarm organization</i> . Hasil yang didapatkan adalah dapat mendeteksi dan mengikuti perubahan iradiasi dan temperatur, tetapi terdapat osilasi disekitar nilai MPP.
(Radjai et al., 2014b)	Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE	Fuzzy dan Incremental Conductance	Penggabungan Teknik <i>incremental conductance</i> dengan <i>fuzzy logic</i> untuk menyelesaikan permasalahan variasi iradiasi dan temperatur. Didapatkan efisiensi dari sistem adalah 96 persen.
(Ali, Li and He, 2016)	Performance Analysis of Incremental Conductance MPPT with Simple Moving Voltage Average Method for Distributed PV System	Incremental Conductance dan Simple Moving Voltage Average	Penggabungan teknik <i>incremental conductance</i> dengan Simple Moving Average (SMA) untuk menentukan nilai MPPT.
(Kler, Rana and Kumar, 2018)	A Nonlinear PID Controller Based Novel Maximum Power Point Tracker for PV Systems	Incremental Conductance, NLPID, TLBO	Penggabungan Teknik NLPID dengan <i>incremental conductance</i> dan optimasi NLPID melalui TLBO.
(Harrag and Messalti, 2019)	IC-based variable step size neuro-fuzzy MPPT Improving PV system performances	Incremental Conductance, fuzzy dan neural networks	Penggabungan Teknik <i>neural network</i> dan <i>fuzzy logic</i> untuk menyelesaikan permasalahan variasi iradiasi dan temperatur. Didapatkan hasil <i>respond time</i> dan <i>ripple</i> yang sangat kecil.
(Pathak, Sagar and Gaur, 2020)	An Application of Intelligent Non-linear Discrete-PID Controller for MPPT of PV System	Incremental Conductance, NLDPID, GA dan PSO	Penggabungan Teknik NLDPID dengan <i>incremental conductance</i> , dan menggunakan <i>AI</i> untuk optimasi nilai NLDPID. <i>AI</i> yang digunakan adalah <i>pso</i> dan <i>GA</i> .
(Rifqi Bagja Rizqullah, 2021)	Analisis optimasi fuzzy logic pada nonlinear discrete PID untuk meningkatkan kemampuan MPPT dengan algoritma Incremental Conductance	Incremental Conductance, NLDPID, Fuzzy Logic	Penggabungan teknik NLDPID dengan <i>incremental conductance</i> dalam mencari nilai titik daya maksimum dan menggunakan <i>fuzzy logic</i> untuk optimasi nilai NLDPID