

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam merencanakan dan merealisasikan sebuah *Penyangraai Biji Kopi Otomatis Untuk Rumah Tinggal*, dibutuhkan pemahaman akan berbagai hal yang mendukung sistem ini. Pemahaman ini akan bermanfaat untuk merancang perangkat keras dan perangkat lunak sistem. Pengetahuan yang mendukung perencanaan dan realisasi alat meliputi Pengertian *coffee roasting*, proses *coffee roasting*, parameter penilaian kopi, sensor suhu *thermocouple* jenis-k, IC AD595, mikrokontroler ATMega328, prinsip kerja motor DC, *Solid State Relays* dan metode PID.

2.1 Penyangraian Biji Kopi (Coffee Roasting)

Proses roasting kopi adalah proses perubahan sifat kimia dan fisik dari biji kopi olahan (*green bean*) menjadi produk kopi yang telah tersangrai (*roasted coffee*). Proses *coffee roasting* pada dasarnya adalah proses pemanggangan/penyangraian biji kopi (*green bean*). Kopi yang telah tersangrai (*roasted coffee*) dapat ditinjau kelasnya dengan dilihat dari tingkat warnanya, dari terang hingga gelap, berdasar pada seberapa gelap perubahan pada biji kopi. Proses *roasting* bisa dilakukan dengan menggunakan peralatan dapur biasa (wajan penggorengan, *grill*, oven, *popcorn popper*) atau *drum roaster* maupun beragam model *coffee roaster* lainnya bergantung pada pilihan selera pengguna. Seberapa lama waktu proses *roasting* dan seberapa tinggi tingkat suhunya, perbedaan perlakuan itulah yang akan menyebabkan perbedaan rasa yang radikal ketika kopi disajikan.

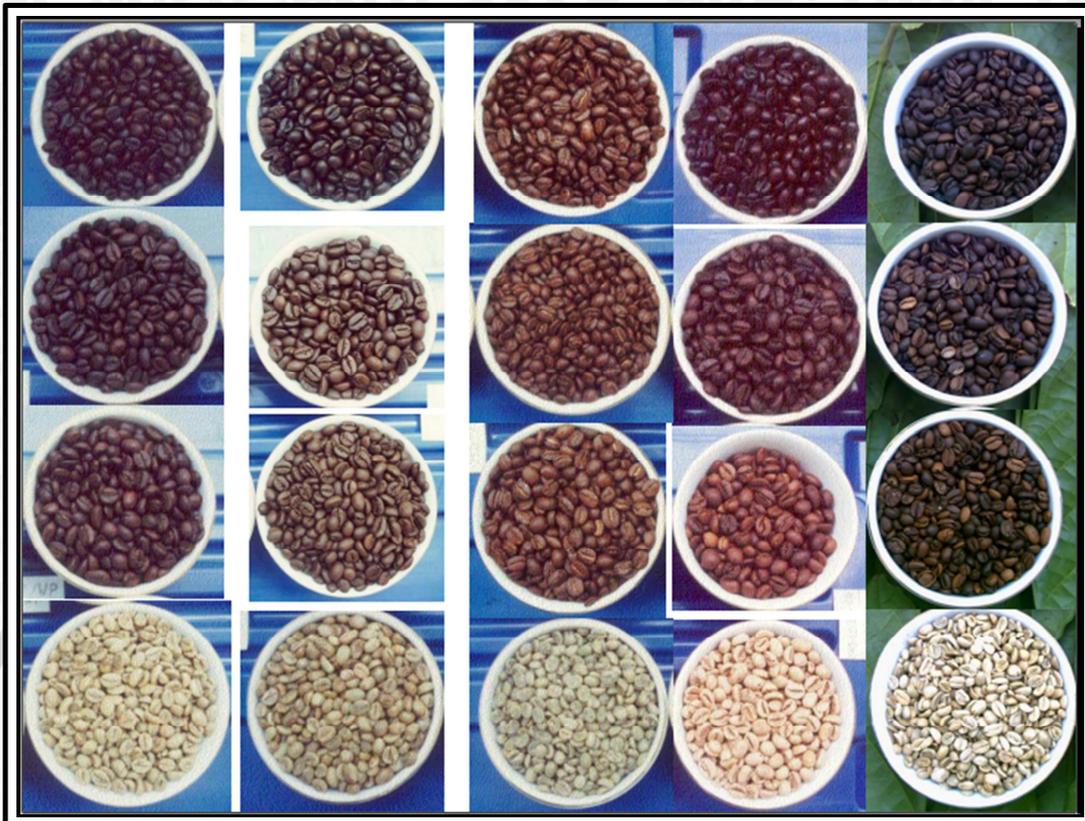
Kandungan gula, lemak, sari pati yang terkandung dalam biji kopi akan teremulsi (*emulsified*), terkaramelisasi (*caramelized*) dan terlepas. Proses tersebut akan memicu terjadinya minyak dari kopi (*coffee oil*) yang lezat. Minyak ini adalah sesuatu yang memberikan kopi sebuah aroma dan cita rasa yang khas.

Secara umum, kopi hasil penyangraian (*roasted coffee*) yang berwarna lebih cerah memiliki ketajaman dan keasaman yang lebih jika dibandingkan dengan yang berwarna lebih gelap, tetapi *roasted coffee* yang berwarna gelap lebih kaya akan rasa. Biji kopi yang telah disangrai berlebihan akan terbakar tak bersisa serta hanya akan berasa seperti asap dan arang. Kandungan kafein pada *roasted* kopi yang berwarna gelap cenderung lebih sedikit dibanding dengan *roasted* kopi yang berwarna lebih terang.

Proses *roasting* itu sendiri tidaklah menentukan cita rasa alami dan kualitas kopi yang dihasilkan karena tempat kopi itu sendiri berasal mempunyai peranan penting dalam hal perbedaan rasa. Biji kopi dari Indonesia tentunya akan memiliki cita rasa yang berbeda dari pada biji kopi yang berasal dari Ethiopia, walaupun keduanya diroasting hingga tahap *French roast*.

Tabel 2. 1 Warna Derajat Kematangan dan Karakteristiknya

Roast Degree	Karakteristik
Light	Warna coklat terang menuju <i>cinnamon</i> . <i>body</i> rendah dan tingkat keasaman (<i>acidity</i>) tinggi. Bijinya cenderung kering. Terlalu ringan dan tidak memungkinkan kopi untuk berkembang dari potensi maksimalnya.
Medium - Light	Berwarna coklat terang medium. Tingkat keasaman (<i>acidity</i>) menurun sedikit dan <i>body</i> bertambah sedikit. Bijinya masih kering.
Medium	Berwarna coklat medium. Tingkat keasamannya (<i>acidity</i>) berkurang lagi dan <i>body</i> nya menjadi lebih kuat. Pada umumnya bijinya kering.
Medium - Dark	Berwarna coklat kaya. Terdapat tetesan minyak dalam jumlah kecil pada permukaan. Keasaman (<i>acidity</i>) secara perlahan berkurang dan <i>body</i> semakin kuat.
Dark	<i>Deep brownish</i> /coklat sangat tua. Biji memiliki bintik – bintik minyak atau benar – benar berminyak. Nuansa halus berkurang. Rasa (<i>flavor</i>) menurun, sementara <i>body</i> semakin mendominasi.
Very Dark	Permukaannya gelap dan seluruhnya tertutup minyak. Semua nuansa halus hilang, aromanya cukup ringan, dan memiliki <i>body</i> yang kurus.



Gambar 2. 1 Tingkat perubahan warna biji kopi yang telah disangrai

2.1.1 Alasan Penyangraian Biji Kopi dilakukan

Banyak orang yang menggiling sendiri biji kopi mereka sampai halus untuk memastikan tingkat kesegaran dan kesempurnaan aroma atas secangkir kopi. Tapi tidak banyak diantara mereka yang melakukan proses *roasting* sendiri. *Roasting* adalah proses terakhir sebelum kopi sampai kepada konsumen. Sebenarnya, seseorang yang melakukan proses *roasting* sendiri bertujuan agar mendapatkan kendali penuh atas cita rasa kopi sesuai selera mereka.

Ada sebuah kisaran dari setiap jenis biji kopi yang dikenal sebagai *roast profile* dimana menentukan seberapa lama waktu dan kondisi dalam proses *roasting* biji kopi. Sehingga aroma, keasaman dan komponen rasa lainnya diubah dengan cara yang seharusnya meningkatkan rasa (*flavor*), *acidity*, *aftertaste*, dan *body* dari kopi sesuai dengan hasrat dari pe-roaster. Untuk lebih memahami istilah yang telah tercantum sebelumnya, berikut adalah *glosarium* mengenai beberapa istilah utama yang berkaitan dengan cita rasa kopi.

- **Acidity:** Adalah atribut positif dalam cita rasa kopi, bisa juga disebut sebagai kehidupan dan gairah. Ia menambahkan persona brilliant kedalam secangkir kopi, sedangkan kopi dengan tingkat keasaman rendah akan terasa datar.
- **Aftertaste:** Adalah mengacu pada seberapa lama sensasi akan tertinggal di mulut setelah kopi telah diteguk.
- **Aroma:** Adalah mengacu pada sensasi yang dirasakan oleh indra penciuman yang disampaikan ke otak, apakah melalui hidung atau kerongkongan.
- **Body:** Adalah rasa berat dan ketebalan dari minuman itu, atau dengan kata lain viskositasnya.
- **Flavor:** Merupakan segala keseluruhan kesan yang ada didalam mulut, termasuk karakter asal yang sama halnya terasa serta segala hal yang ditimbulkan oleh proses *roasting*.

2.1.2 Proses Penyangraian Biji Kopi

Cara yang paling populer tetapi teramat tidak akurat yang menjadi metode dalam menentukan derajat kematangan pada proses *roasting* adalah dengan menilai dengan menggunakan mata telanjang (kecuali menggunakan detektor warna untuk mengukur tingkat kecerahan warna biji kopi dibawah penerangan cahaya inframerah dan dibandingkan dengan standar yang biasa digunakan seperti *Agtron scale*).

Ketika biji kopi menyerap panas (*endothermic*), warna dari biji kopi berubah menjadi kekuningan dan akan terus berubah semakin gelap hingga akhirnya dipindah dari sumber panas. Kebanyakan alat roaster menggunakan kombinasi dari suhu, bau, warna dan suara untuk memantau proses *roasting*. Untuk lebih jelasnya, berikut adalah beberapa tahapan dalam proses *roasting* secara umum :

- **Yellowing:** Ini merupakan fase awal dimana terjadi proses *endothermic* (penyerapan panas) dimana *green bean* secara perlahan mengering, warna berubah menjadi kuning muda dan biji kopi beraroma seperti *popcorn* atau roti panggang.
- **Steam:** Pada fase ini air yang terkandung dalam biji kopi mulai menguap .
- **First Crack:** Tercium bau harum dari biji kopi. Segera setelah itu akan terdengar suara retakan pertama (*first crack*) sebagai pertanda bahwa proses *roasting* yang sesungguhnya telah dimulai. Kandungan gula mulai

terkaramelisasi, ikatan air mulai terlepas, minyak mulai keluar dan ukuran dari biji menjadi dua kali lebih besar. Biasanya terjadi pada suhu 205°C (400°F) dan diperkirakan bobot biji berkurang hingga 5%. Biasanya biji berwarna coklat terang.

- **First Roasted Stage:** Setelah pada fase *first crack*, proses *roasting* boleh dianggap selesai pada waktu kapanpun tergantung pada selera. Suara retakan yang terdengar jelas dan beserta apa yang terlihat dan tercium, merupakan isyarat untuk mengetahui sudah mencapai tahapan apa. Ini biasa dikenal dengan istilah *city roast*. Ini terjadi pada kisaran suhu 205°C hingga mendekati 220°C. Dimana terjadi proses kimia yang disebut *pyrolysis* dan dicirikan dengan perubahan komposisi kimia pada biji kopi serta terjadi pelepasan CO₂. Biasanya biji berubah dari warna coklat terang menuju coklat medium.
- **Caramelization:** Proses karamelisasi berlanjut, kandungan minyak berpindah, ukuran biji semakin membesar dan warna mulai semakin gelap. Fase ini biasa disebut dengan *city + roast*. Banyak yang merekomendasikan untuk berhenti pada fase ini. Dan ketika berada pada tepi fase suara retakan kedua (*second crack*), ini dikenal sebagai *full city roast*. Dan terjadi pada kisaran suhu antara 170°C – 200°C.
- **Second Crack:** Pada titik ini, suara retakan yang terjadi terdengar jauh lebih kencang dari pada yang awal. Ini merupakan proses *endothermic* yang singkat yang diikuti fase *exothermic*. Biasanya terjadi pada kisaran suhu antara 225°C – 230°C. Dan biji kopi cenderung berwarna coklat tua medium. Pada fase ini, karakter yang ditimbulkan dari proses *roasting*, memudahkan karakter alami dari biji kopi. Dan kondisi ini biasa dikenal dengan sebutan *vienna roast*.
- **Darkening Roast:** Ketika biji kopi menjadi semakin gelap, bau asap semakin menusuk dan kandungan gula terbakar habis. Struktur alami dari biji kopi semakin lama semakin rusak. Ini dikenal dengan istilah *french roast*.

dasarnya segala sesuatu yang salah dengan sebuah kopi akan berakhir pada roda kesalahan dan noda (*faults and taints wheel*). Kopi tidak bisa tetap konstan pada kondisi seimbang karena telah melalui kelompok – kelompok pada tahapan tersebut. Pada akhirnya, hal tersebut merupakan masalah dari sisi bagan roda rasa untuk pencicip kopi (*Coffee Taster's Flavor Wheel*).

Flavor wheel ini berdasar pada referensi berupa buku berjudul “*The Coffee Cupper's Handbook*” oleh Ted Lingle yang terbit pada tahun 1985. Menurut buku tersebut, jika hasil perubahan dari sebuah cacat rasa minor, biasanya terbatas pada sifat aromatic dari rasa, itu disebut sebagai noda dari rasa. Apakah noda dari rasa itu menyenangkan atau malah menyebalkan, bergantung pada tipe dan derajat sebaik pilihan selera personal si *cupper*. Jika proses kimia telah merubah hasil dari sebuah kegagalan utama (*major failing*), biasanya berimbas kepada sifat cita rasa dari rasa kopi itu sendiri. Ini yang disebut dengan kesalahan rasa (*flavor fault*). Kesalahan rasa ini hampir selalu tidak menyenangkan tanpa mempertimbangkan pilihan selera si *cupper*.



Gambar 2. 3 Proses *coffee cupping*

Namun *flavor wheel* bukanlah alat pembatas, tetapi agaknya merupakan jalan bagi tester untuk menggali lebih dalam, mengenai memori aroma dan rasa serta untuk mengeluarkan istilah yang akan diinterpretasikan melalui kopi yang dirasakan. Pada bagian kanan bagan *roasting wheel*, adalah mengenai aroma dan rasa, tetapi itu tidak ditujukan untuk membatasi rasa yang terkandung dalam kopi. Dalam biji kopi mentah (*greenbean*) terkandung lebih dari 200 senyawa kimia. Itu sebelum melalui proses penyangraian. Tentunya setelah proses roasting dilakukan, senyawa kimianya akan lebih banyak lagi. Setidaknya itu berarti ada lebih dari 36 aroma dan 4 cita rasa dasar. Hal itu menjadi masuk akal bahwa para *cupper* akan senantiasa berusaha keluar dari

batas *flavor wheel* ketika menjumpai sebuah memori khusus akan aroma dimana berdasar pada pengalaman dan akses ke kosakata yang sudah ada (*a priori*). Namun demikian, *flavor wheel* ditujukan untuk menciptakan kosakata umum.

2.1.3 Waktu Yang Tepat Untuk Melakukan Penyangraian Biji Kopi

Pada waktu dipanen, biji kopi mentah perlu pergi melewati serangkaian proses diantaranya adalah proses pengeringan dan pengupasan kulit sebelum kopi dalam kondisi layak untuk proses *roasting*. Dan biji kopi yang telah melewati tahapan penggilingan, pengupasan, pemolesan, pembersihan dan seleksi dikenal sebagai *green bean*. Ketika *green bean* sudah siap untuk menjalani proses *roasting*, ternyata proses *roasting* masih belum juga dilakukan. Karena ada beberapa alasan untuk menunggu sebelum kopi *roasting* dilakukan. Hal tersebut antara lain :

- Yang pertama adalah karena *green bean* lebih stabil daripada *roasted coffee*. Untuk keperluan pemindahan adalah cukup beralasan untuk membiarkan kopi masih dalam bentuk *green bean* karena untuk mengurangi resiko kerusakan dan untuk melakukan proses *roasting* ketika berada sedekat mungkin dengan konsumen. Sehingga unsur kimia kompleks dari *profile* kopi akan senantiasa terjaga. Sebagai orang yang terbiasa mengkonsumsi kopi tua yang tersangrai akan mengetahui, bahwa kopi akan kehilangan ketajaman cita rasanya jika disimpan terlalu lama.
- Adapun alasan lain untuk menunggu kopi sebelum melalui tahapan *roasting* adalah *profile* rasa dari varietas biji kopi tertentu bergantung pada seberapa cepat proses *roasting* itu berlangsung setelah tahapan *pre-roasting*. Sebagian orang sepakat bahwa puncak dari *green bean* ketika disimpan adalah 1 tahun. Dalam jangka waktu yang lebih lama, *green bean* akan mulai kehilangan minyak kopi (*coffee oil*) yang terkandung didalamnya yang mengakibatkan hilangnya cita rasa khas dari *green bean* itu sendiri.

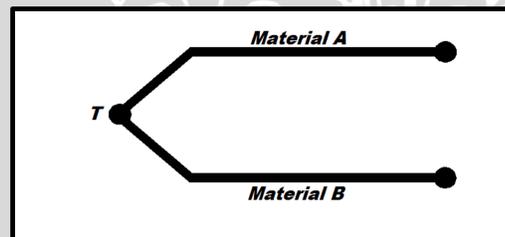
2.1.4 Home Roasting

Home roasting adalah sebuah proses *roasting* biji kopi dalam takaran sedikit yang ditujukan untuk keperluan konsumsi pribadi. Bahkan hingga pergantian abad ke-20, ini merupakan hal paling umum yang dilakukan oleh para penikmat kopi. Budaya ini memang sempat memudar popularitasnya seiring dengan gencar beredarnya kopi *instant* dipasaran. Tetapi semenjak kopi telah menjadi bagian dari gaya hidup beberapa

tahun belakangan ini, *home roasting* telah mengalami kebangkitannya kembali. Pada beberapa kasus, hal tersebut mungkin dilakukan karena ditinjau dari sisi keuntungan ekonomi, tetapi sebenarnya hal ini lebih ditujukan untuk mendapatkan pengendalian terbaik atas kualitas dan karakteristik dari produk yang dihasilkan. Dengan demikian, hal tersebut menjadi sebuah alasan utama bagi penulis untuk melakukan penelitian ini.

2.2 Thermocouple

Thermocouple adalah sensor suhu yang terdiri dari 2 material yang berbeda. Seperti yang terlihat dalam Gambar 2.4 dimana 2 buah material yang berbeda disambung pada kedua ujungnya. Persambungan dari kedua material yang berbeda pada thermocouple biasa disebut dengan junction, dimana junction dalam Gambar 2.4 hanya satu yaitu T. Jika ujung – ujung yang lain dari kedua material yang berbeda tersebut dengan voltmeter, maka akan terdeteksi adanya beda potensial. Secara teoritis, dua bahan konduktif tak sejenis dapat digunakan untuk membentuk *thermocouple*. Tetapi pada kenyataannya, bahan dan kombinasi tertentu lebih baik dari yang lainnya dan beberapa secara praktis menjadi standar untuk memberikan *range* suhu. Terdapat beberapa macam *thermocouple*, seperti dalam Tabel 2.2. Selain itu juga terdapat grafik respon suhu dari beberapa thermocouple, yang terdapat dalam Gambar 2.5.



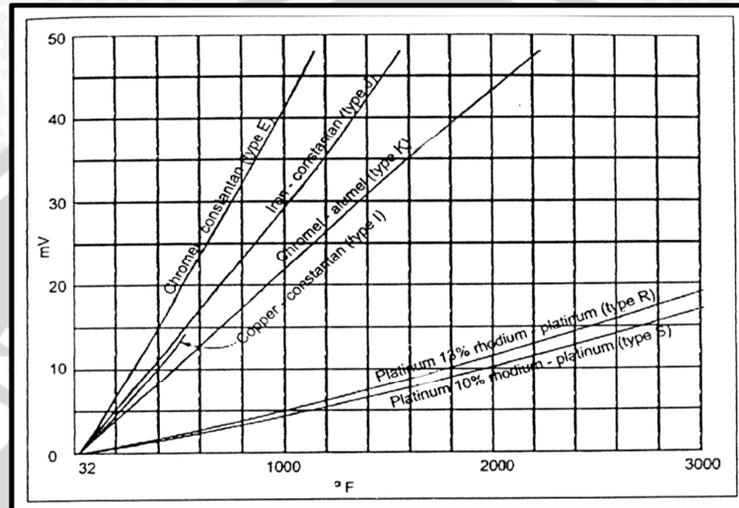
Gambar 2. 4 Single Junction Thermocouple
Sumber: James, William, & Kenneth, 1993: 241

Tabel 2. 2 Tipe – tipe Thermocouple

Tipe	Bahan/Material	Kisaran Suhu
K	Chromel/Alumel	-200 s/d 1250
J	Iron/Constantan	0 s/d 750
T	Copper/Constantan	-200 s/d 350

E	Chromel/Constantan	-200 s/d 900
S	Platinum/Platinum 10% Rhodium	0 s/d 1450
R	Platinum/Platinum 13% Rhodium	0 s/d 1450

Sumber: Diefenderfer & Halton, 1994 : 480

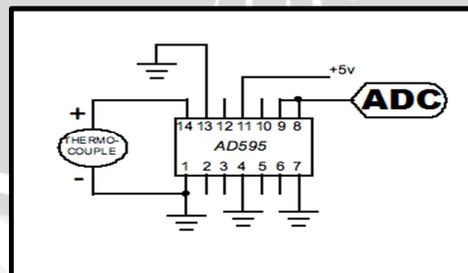


Gambar 2. 5 Grafik Respon Suhu Thermocouple

Sumber: Diefenderfer & Halton, 1994: 489

2.2.1 IC AD595

IC AD595 merupakan modul sensor suhu (*thermocouple*). Keluaran *thermocouple* berupa tegangan, tetapi tegangan keluaran *thermocouple* tidak berbanding lurus dengan perubahan suhu atau dengan kata lain adalah tidak linier. Sehingga diperlukan komponen yang dapat melinierkan keluaran dari *thermocouple*, yaitu AD595. Gambar 2.6 Menunjukkan skematik rangkain modul sensor suhu :



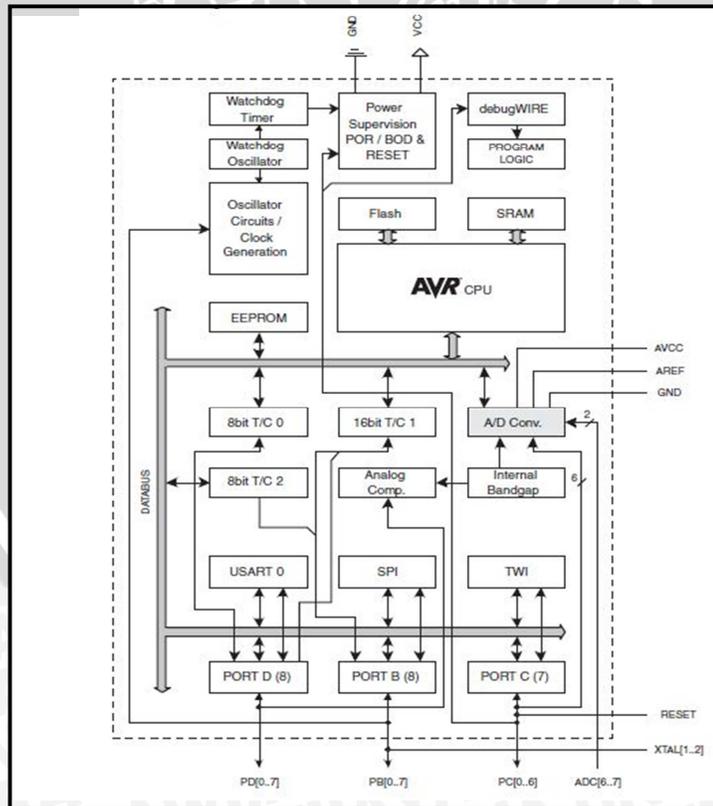
Gambar 2. 6 Modul Thermocouple dan IC AD595

Agar keluaran dari *thermocouple* dapat dibaca oleh unit ADC pada mikrokontroller, maka diperlukan tambahan IC yaitu AD595. Penambahan IC ini

berguna untuk memperkuat sinyal keluaran dari *thermocouple* yang sangat kecil yaitu dalam orde μV menjadi mV dan melinierkannya. Keluaran dari AD595 sebesar $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ menjadi masukan bagi ADC.

2.3 Mikrokontroler AVR

AVR merupakan mikrokontroler produksi Atmel yang menggunakan arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) 8 bit. AVR pertama kali diperkenalkan pada tahun 1996. AVR mengkombinasikan arsitektur RISC, memori *flash* internal dan jumlah *register* yang besar (32 buah) untuk memperoleh ukuran code program, kinerja, dan konsumsi daya yang optimal. Sebagian besar instruksi AVR dieksekusi dalam satu siklus *clock*. AVR menggunakan konsep arsitektur Harvard dengan memori dan bus terpisah untuk data dan program. Lebar bus program pada AVR adalah 16 bit sedangkan lebar bus data 8 bit. Memori program dieksekusi dengan *pipeline* satu tingkat. Saat instruksi sedang dieksekusi, instruksi yang berikutnya dibaca dari memori program. Konsep ini memungkinkan instruksi untuk dieksekusi dalam tiap-tiap siklus *clock*. Arsitektur keseluruhan AVR ditunjukkan dalam Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Arsitektur mikroprosesor keluarga AVR

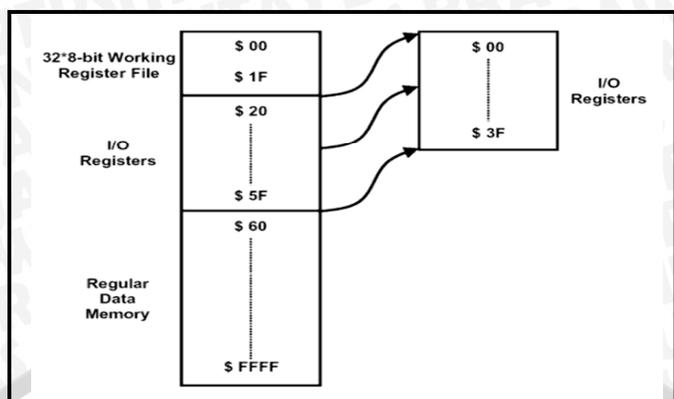
Sumber : ATMEL, 2009:5

AVR memiliki jumlah *register* yang relatif besar untuk ukuran mikrokontroler 8 bit, yaitu 32 buah *general purpose registers*. AVR tidak memiliki *accumulator* seperti yang dimiliki sebagian besar mikroprosesor/mikrokontroler. Seluruh *register* terhubung ke ALU (*Arithmetic Logic Unit*) sehingga operasi ALU dapat dilaksanakan dengan menggunakan *general purpose registers* sebagai *operand*. Dua *operand* diambil dari *register*, operasi ALU dijalankan, dan hasil operasi disimpan ke dalam *register*, semuanya dilakukan dalam satu siklus *clock*. Dalam skala operasi yang relatif besar, operasi ALU dapat dijalankan dengan lebih cepat. Semua *general purpose registers* juga dapat digunakan untuk mengakses data dari dan ke memori dengan instruksi *load* dan *store*.

Enam dari 32 *register* dapat digunakan sebagai pasangan *register* 16 bit. Pasangan *register* 16 bit dapat digunakan sebagai *register* pointer untuk pengalamatan area data sehingga memungkinkan perhitungan alamat menjadi lebih efisien. Ketiga *register* tersebut adalah *register* X (R26 dan R27), Y (R28 dan R28), dan Z (R30 dan R31).

Peta memori data AVR dapat dilihat dalam Gambar 10. Memori data dibagi menjadi 4 bagian. 32 alamat paling bawah (0000 – 001F) ditempati oleh *general purpose registers*. 64 alamat berikutnya (0020 – 005F) ditempati oleh *register* I/O yang mengatur piranti CPU seperti *register* kontrol, *timer/counter*, ADC, dan fungsi I/O lainnya. Alamat berikutnya digunakan oleh SRAM internal dan eksternal. Perlu dicatat, ukuran SRAM internal tidak sama untuk masing-masing tipe AVR, dan tidak semua tipe memiliki SRAM internal atau SRAM eksternal. Peta memori dari AVR ditunjukkan dalam Gambar 2.8.

Selama *interrupt* dan pemanggilan *subroutine*, alamat pada *Program Counter* (PC) disimpan pada *stack*. Pada tipe AVR yang memiliki SRAM internal atau eksternal, *stack* dialokasikan di SRAM sehingga ukuran *stack* hanya terbatas oleh total ukuran dan pemakaian SRAM. Semua program harus menginisialisasi *Stack Pointer* (SP) di dalam rutin *reset*, sebelum *subroutines* atau *interrupt* dieksekusi. Sedangkan tipe AVR yang tidak memiliki SRAM, alamat pada PC disimpan di *stack hardware* yang memiliki ukuran terbatas.

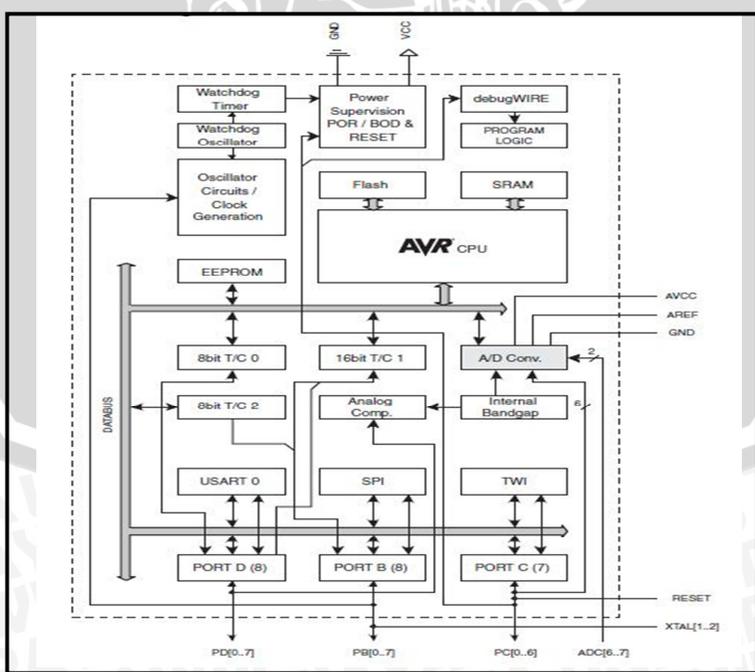


Gambar 2. 8 Peta memori AVR

Sumber : ATMEL, 2006

2.3.1 ATmega328

ATmega328 adalah mikrokontroler CMOS 8-bit daya-rendah berbasis arsitektur RISC yang ditingkatkan dengan 8 kbytes *In-system Self-programmable* memori program *Flash*, 1 kilobytes EEPROM dan 2 kilobyte SRAM internal. Mikrokontroler ini dibuat menggunakan teknologi *high-density nonvolatile memory* milik Atmel. *On-chip downloadable flash* memungkinkan memori program untuk diprogram ulang di dalam sistem melalui sebuah antarmuka serial SPI atau dengan sebuah programmer memori *nonvolatile* yang konvensional. Gambar Arsitektur Mikrokontroler ATmega328 ditunjukkan dalam Gambar 2.9.



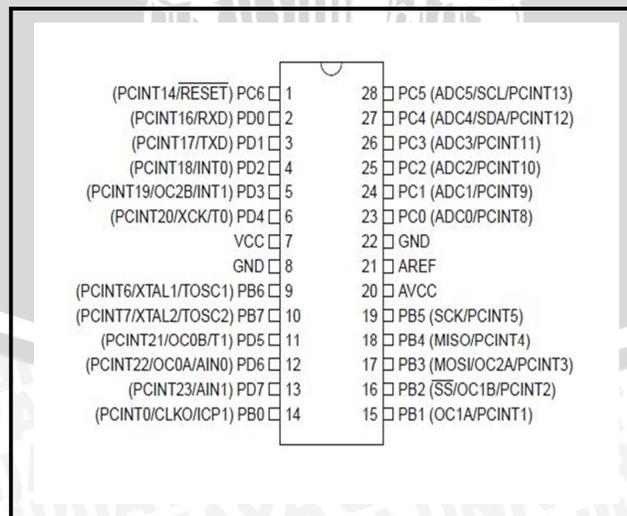
Gambar 2. 9 Arsitektur ATmega328

Sumber: Atmel, 2009: 2

Mikrokontroler ATmega328 memiliki kelengkapan sebagai berikut:

- CPU dengan lebar data 8 bit;
- *Programmable I/O Lines* sebanyak 23 buah;
- ADC (*Analog to Digital Converter*) 10 bit sebanyak 6 buah;
- Saluran PWM sebanyak 4 buah;
- SRAM sebesar 2 kilo *byte*;
- Memori Flash sebesar 32 kilo *byte*;
- EEPROM sebesar 1 kilo *byte* ;
- Siklus tulis dan hapus Memori Flash sebanyak 10.000 kali dan EEPROM 100.000 kali;
- *Timer/counter* 8 bit sebanyak 2 buah;
- *Timer/counter* 16 bit sebanyak 1 buah;
- *Programmable USART* untuk komunikasi serial;
- *Interrupt* internal dan eksternal;
- *Master/Slave SPI serial interface*;
- Power-On-Reset;
- Frekuensi kerja 0 sampai 20 MHz; dan
- Tegangan operasi antara 4, 8 volt sampai 5, 5 volt.

2.3.1.1 Konfigurasi Pin



Gambar 2. 10 Konfigurasi Pin ATmega328

Sumber: Atmel, 2010: 2

Mikrokontroler ATmega328 memiliki 3 buah port seperti ditunjukkan dalam konfigurasi pin dalam Gambar 8. Tiga buah port tersebut memiliki 8 dan 6 buah jalur I/O. Beberapa karakteristik port mikrokontroler ATmega328 dijelaskan secara singkat berikut ini:

- ICPI (PB0), berfungsi sebagai *Timer / Counter* 1 input capture pin.
- OC1A (PB1), OC1B (PB2) dan OC2 (PB3) dapat difungsikan sebagai keluaran PWM (pulse width modulation).
- MOSI (PB3), MISO (PB4), SCK (PB5), SS (PB2) merupakan jalur komunikasi SPI. Selain itu pin ini juga berfungsi sebagai jalur pemrograman serial (ISP).
- TOSC1 (PB6) dan TOSC2 (PB7) dapat difungsikan sebagai sumber clock external untuk *timer*.
- XTAL1 (PB6) dan XTAL2 (PB7) merupakan sumber clock utama mikrokontroler. Perlu diketahui, jika kita menggunakan clock internal (tanpa crystal) maka PB6 dan PB7 dapat difungsikan sebagai input/output digital biasa. Namun jika kita menggunakan clock dari crystal external maka PB6 dan PB7 tidak dapat kita gunakan sebagai input/output.
- PORTC merupakan jalur data 7bit yang dapat difungsikan sebagai input/output digital. Selain itu PORTB juga dapat memiliki fungsi alternatif, yaitu:
 - ADC 6 *channel* (PC0, PC1, PC2, PC3, PC4, PC5) dengan resolusi sebesar 10bit. ADC dapat kita gunakan untuk mengubah input yang berupa tegangan analog menjadi data digital.
 - I2C (SDA dan SDL) merupakan salah satu fitur yang terdapat pada PORTC. I2C digunakan untuk komunikasi dengan sensor atau device lain yang memiliki komunikasi data tipe.
 - RESET merupakan salah satu pin penting di mikrokontroler, RESET dapat digunakan untuk merestart program. Pada ATmega328 pin RESET digabungkan dengan salah satu pin IO (PC6). Secara default PC6 ini di-*disable* dan diganti menjadi pin RESET. Namun fungsi pin RESET tersebut dapat di-*disable* kembali untuk menjadikan PC6 sebagai pin input/output.

- PORTD merupakan jalur data 8bit yang masing-masing pin-nya juga dapat difungsikan sebagai input/output. Sama seperti PORTB dan PORTC, PORTD juga memiliki fungsi alternatif, yaitu:
- USART (TXD dan RXD) merupakan jalur data komunikasi serial dengan level sinyal TTL. Pin TXD berfungsi untuk mengirimkan data serial, sedangkan RXD kebalikannya yaitu sebagai pin yang berfungsi untuk menerima data serial.
- Interrupt (INT0 dan INT1) merupakan pin dengan fungsi khusus sebagai interupsi hardware. Interupsi biasanya digunakan sebagai selaan dari program, misalkan pada saat program berjalan kemudian terjadi interupsi hardware/software maka program utama akan berhenti dan akan menjalankan program interupsi.
- XCK dapat difungsikan sebagai sumber clock external untuk USART, namun kita juga dapat memanfaatkan clock dari CPU, sehingga tidak perlu membutuhkan external clock.
- T0 dan T1 berfungsi sebagai masukan counter external untuk *timer* 1 dan *timer* 0.

2.3.1.2 Timer dan PWM

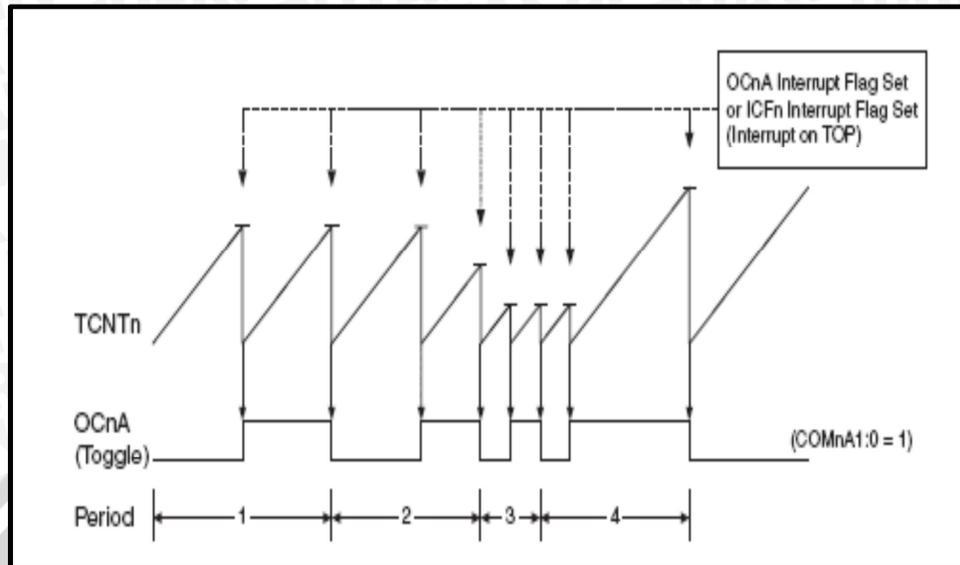
Mikrokontroller ATMEGA 328 dilengkapi dengan fasilitas *timer* yang bisa dipakai untuk menghasilkan sinyal PWM (*timer*1 dan *timer*2 saja). Sumber clock pada *timer* ini bisa dipilih antara sumber internal dan sumber eksternal. Sedangkan mode operasi timer 1 dan timer 2 terdiri sebagai berikut:

a) Mode normal :

Mode normal ini merupakan fungsi utama sehingga setiap *timer* (0, 1, dan 2) bisa bekerja dalam mode ini. Mode ini bekerja dengan menghitung dari nol sampai *overflow*. Kemudian hitungan dimulai dari nol lagi.

b) *Clear time on compare match* (CTC):

Pada mode ini, penghitungan dipengaruhi oleh register OCR1A atau ICR1 (*timer* 1) dan register OCR2 (*timer* 2). Nilai *timer* akan dikembalikan menjadi nol (*dirreset*) saat nilai *timer* sama dengan nilai pada register OCR1A atau ICR1 (*timer* 1) atau OCR2 (*timer* 2). Diagram pewaktuan dijelaskan dalam Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Diagram pewaktuan untuk mode CTC

Sumber: datasheet ATmega328, 2010:102

Sedangkan frekuensi dari sinyal yang terbentuk pada pin OC1A (*timer 1*) dan OC2 (*timer 2*) bisa dihitung dengan rumus sebagai berikut :

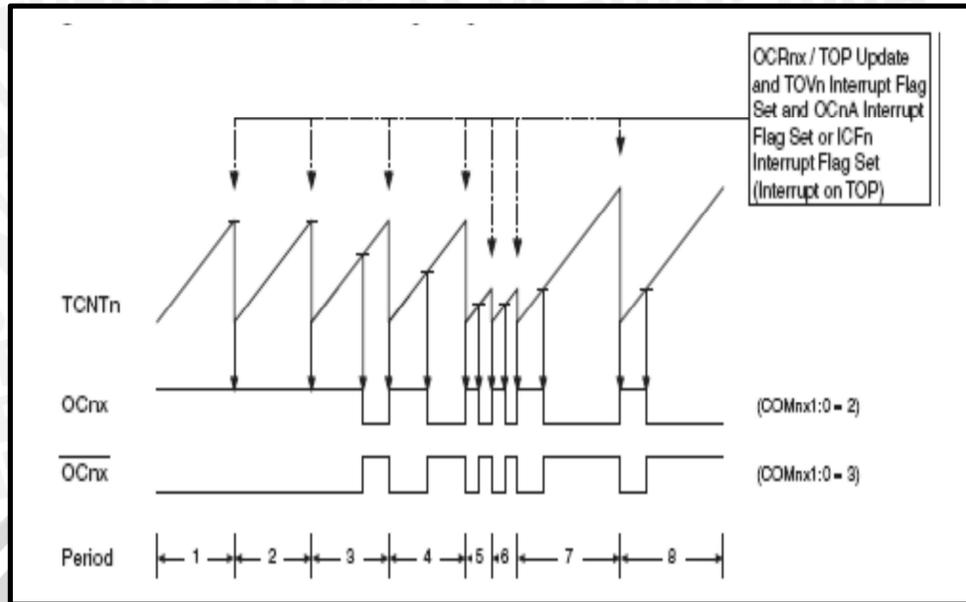
$$f_{OC1A} = \frac{f_{osilator}}{2 \cdot N \cdot (1 + OCR1A)} \quad (2-1)$$

$$f_{OC2} = \frac{f_{osilator}}{2 \cdot N \cdot (1 + OCR2)} \quad (2-2)$$

Dengan N merupakan nilai prescaler (1, 8, 32, 64, 128, 256, atau 1024).

c) *Fast PWM*:

Mode ini menyediakan pembentukan sinyal PWM dengan frekuensi tinggi. *Timer* akan menghitung dari BAWAH sampai ATAS yang nilainya bisa diatur saat inialisasi, kemudian akan kembali lagi menghitung dari BAWAH. Apabila keluaran PWM diset menjadi keluaran tak membalik (*non-inverting*), maka keluaran akan berlogika “0” saat nilai *timer* sama dengan OCRnx dan berlogika “1” saat nilai *timer* sama dengan nilai BAWAH. Operasi akan menjadi terbalik apabila keluaran diset menjadi keluaran membalik. Karena karakteristik ini, mode ini cocok untuk regulator daya, penyearah, dan DAC. Diagram pewaktuan bisa dijelaskan dalam Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Diagram pewaktuan untuk mode fast PWM

Sumber: datasheet ATmega328, 2010:103

OCnx merupakan keluaran sinyal tak membalik sedangkan \overline{OCnx} merupakan keluaran sinyal membalik. Resolusi dari sinyal PWM bisa dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Resolusi (bit)} = \frac{\log(\text{nilai ATAS}+1)}{\log 2} \quad (2-3)$$

Sedangkan untuk frekuensinya bisa dihitung sebagai berikut :

$$f_{OC1xPWM} = \frac{f_{osilator}}{N \cdot (1 + \text{nilai ATAS})} \quad (2-4)$$

$$f_{OC2PWM} = \frac{f_{osilator}}{N \cdot 256} \quad (2-5)$$

Dengan N adalah pembagi prescaler (1, 8, 32, 64, 128, 256, dan 1024). Variabel x bisa bernilai A (keluaran bagian A) atau B (keluaran bagian B).

2.3.2 Analog to Digital Converter (ADC)

Mikrokontroler ATmega328 memiliki fasilitas ADC yang terintegrasi dengan resolusi sebesar 10-bit. ADC terhubung pada analog *multiplexer* delapan *channel* yang memungkinkan ADC untuk memproses delapan buah sinyal analog. Delapan *channel* tersebut terhubung pada PIN A pada mikrokontroler. ADC pada mikrokontroler ATmega328P memiliki beberapa fitur:

- Resolusi 10-bit
- Akurasi mencapai ± 2 LSB

- Waktu konversi 13-260 μ s
- Batas tegangan input ADC 0 s.d V_{cc}
- Memiliki tegangan referensi internal 2,56 V dan 1,1 V
- Memiliki mode *free running* atau *single conversion*
- *Interrupt* ketika konversi selesai

2.4 LCD (*Liquid Crystal Display*)

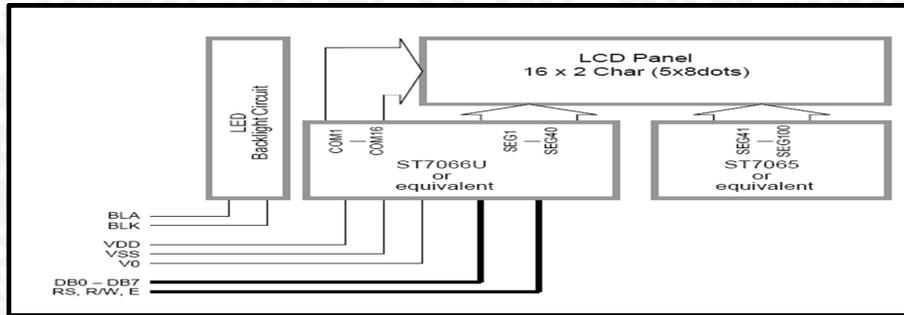
Liquid Crystal Display (LCD) merupakan komponen elektronika yang digunakan untuk menampilkan karakter baik berupa karakter angka, huruf, atau karakter lainnya, sehingga tampilan tersebut dapat dilihat secara visual.

Pada perancangan sistem ini memakai. Tipe ini mempunyai konsumsi daya rendah dan menggunakan teknologi CMOS. Adapun spesifikasi dari LCD ini adalah sebagai berikut:

- Mempunyai 16 karakter dengan 5 x 8 dot matrik dan kursor
- Membutuhkan tegangan negatif pada *contrast adjustment*-nya.
- Rasio kerja : 1/16
- Otomatis *reset* saat catu daya dinyalakan.
- Memiliki *Character Code* ROM
- Memiliki *Character Generator* RAM (CGRAM) dan *Display Data* RAM (DDRAM)
- Antarmuka dengan MPU empat bit dan delapan bit
- Tegangan masukan sebesar $5V \pm 6\%$

LCD ini menggunakan komunikasi 4 bit yaitu DB4-DB7. Hal ini dilakukan untuk menghemat pin mikrokontroler yang digunakan untuk komunikasi data ke LCD. Masukan yang diperlukan untuk mengendalikan modul ini berupa bus data yang masih termultiplek dengan bus alamat serta 3 bit sinyal kontrol.

Sementara pengendalian dot matrik LCD dilakukan secara internal oleh kontroler yang sudah terpasang pada modul LCD. Fungsi pin LCD LMB162ADC dapat dilihat dalam Tabel 2.3, untuk blok diagram LCD ditunjukkan dalam Gambar 2.13 dan konfigurasi Pin ditunjukkan oleh Tabel 2.4.



Gambar 2. 13 Diagram Blok LCD LMB162A

Sumber: Topway, 2004: 2

Tabel 2. 3 Fungsi masing – masing PIN pada LCD

Penyemat	Fungsi
DB ₀ -DB ₇	Merupakan saluran data, berisi perintah dan data yang akan ditampilkan di LCD
Enable	Sinyal operasi awal, sinyal ini mengaktifkan data tulis atau baca
R/W	Sinyal seleksi tulis atau baca - 0 : tulis 1 : baca
RS	Sinyal pemilih <i>register</i> - 0 : instruksi <i>register</i> (tulis) 1 : data <i>register</i> (baca dan tulis)

Sumber: Topway, 2004: 4

Tabel 2. 4 Konfigurasi PIN pada LCD

No	Simbol	Level	Fungsi
1	Vss	GND	
2	Vcc	5 volt	
3	Vee	LCD Drive (<i>contrast</i>)	
4	RS	H/L	H=Data Input ; L=Ins Input
5	R/W	H/L	H=Read ; L=Write
6	E	H	Enable Signal
7	DB0	H/L	Data Bit
8	DB1	H/L	Data Bit
9	DB2	H/L	Data Bit
10	DB3	H/L	Data Bit
11	DB4	H/L	Data Bit

12	DB5	H/L	Data Bit
13	DB6	H/L	Data Bit
14	DB7	H/L	Data Bit
15	V+BL		LED Anoda
16	V-BL		LED Katoda

Sumber: H2004A Datasheet, 2002

Modul LMB162ADC menggunakan *Driver* HD4780 milik Hitachi, sebuah *driver* LCD yang paling banyak digunakan. *Driver* tersebut digunakan untuk mengontrol karakter yang akan ditampilkan pada LCD.

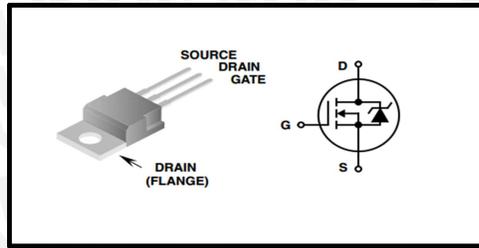
Mode pengiriman data antara mikrokontroler dengan LCD dapat dilakukan dengan dua macam mode, yaitu:

1. Mode *interface* data 4 bit. Hanya 4 buah jalur data *bus* (DB4 sampai DB7) yang digunakan untuk mengirim data. Jalur *bus* data D0 sampai D3 diabaikan. Pada mode ini 4 bit data MSB dikirim terlebih dahulu, kemudian 4 bit LSB. *Busy flag* harus diperiksa setelah 4 bit data dikirim dua kali.
2. Mode *interface* data 8 bit, semua jalur *bus* data (D0 sampai D7) digunakan dalam proses pengiriman.

2.5 MOSFET IRF540N

MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor*) merupakan bagian dari keluarga transistor, perbedaannya dengan transistor bipolar adalah struktur desain dan peruntukannya. Untuk transistor bipolar di dalam strukturnya, terdapat dua polaritas (P dan N) untuk membawa arus listrik, sedangkan pada MOSFET di dalam strukturnya hanya ada satu polaritas saja untuk membawa arus listrik.

Dalam sistem ini, MOSFET digunakan untuk switching dengan menghubungkan dan memutuskan sambungan terhadap bagian negatif rangkaian *driver* dan juga mampu menahan arus beban balik serta memiliki kecepatan switching yang sangat cepat untuk mengimbangi frekuensi gelombang PWM yang dikirimkan. MOSFET yang digunakan adalah tipe IRF540N yang memiliki karakteristik yang dapat dilihat dalam Tabel 2.5 dan memiliki konfigurasi internal yang ditunjukkan dalam Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Konfigurasi internal IRF540N
 Sumber: Fairchild Semiconductor Datasheet, 2002: 1

Tabel 2. 5 Spesifikasi MOSFET IRF540N

Electrical Specification $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$

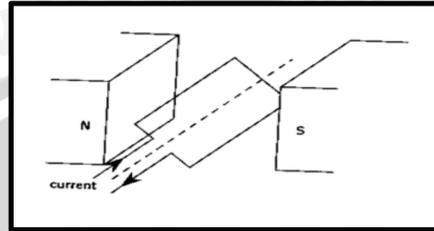
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
OFF STATE SPECIFICATIONS						
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	$I_D = 250\mu\text{A}, V_{GS} = 0\text{V}$	100	-	-	V
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 95\text{V}, V_{GS} = 0\text{V}$	-	-	1	μA
		$V_{DS} = 90\text{V}, V_{GS} = 0\text{V}, T_C = 150\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$	-	-	± 100	nA
ON STATE SPECIFICATIONS						
Gate to Source Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\mu\text{A}$	2	-	4	V
Drain to Source On Resistance	$r_{DS(ON)}$	$I_D = 33\text{A}, V_{GS} = 10\text{V}$	-	0.033	0.04	Ω
THERMAL SPECIFICATIONS						
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$	TO-220	-	-	1.25	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$		-	-	62	$^\circ\text{C/W}$
SWITCHING SPECIFICATIONS (VGS= 10V)						
Turn-On Time	t_{ON}		-	-	100	nS
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$		-	9.5	-	nS
Rise Time	t_r	$V_{DD} = 50\text{V}, I_D = 33\text{A}$	-	57	-	nS
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$	$V_{GS} = 10\text{V}, R_{GS} = 9.1\Omega$	-	40	-	nS
Fall Time	t_f		-	55	-	nS
Turn-Off Time	t_{OFF}		-	-	145	nS

Sumber: Fairchild Semiconductor Datasheet, 2002: 2

2.6 Motor DC

Motor DC atau motor arus searah adalah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus searah menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, yang tenaga gerak tersebut berupa putaran dari rotor. Prinsip kerja motor DC hampir sama

dengan generator AC, perbedaannya hanya terletak dalam konversi daya. Prinsip dasarnya adalah apabila suatu kawat berarus diletakkan diantara kutub-kutub magnet (U-S), maka pada kawat itu akan bekerja suatu gaya yang menggerakkan kawat tersebut.

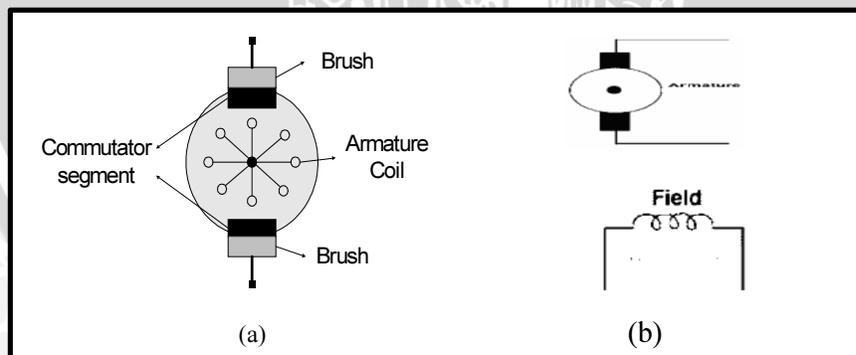


Gambar 2. 15 Prinsip Kerja Motor DC

Apabila sebuah belitan terletak dalam medan magnet yang homogen, arah gerakan ditunjukkan dalam Gambar 2.15, karena kedua sisi lilitan mempunyai arus yang arahnya berlawanan.

2.6.1 Konstruksi Motor DC

Bagian-bagian penting motor DC ditunjukkan dalam Gambar 2.16, statornya mempunyai kutub menonjol dan diterjal oleh satu atau lebih kumparan medan. Pembagian fluks celah udara yang dihasilkan oleh lilitan medan secara simetris berada di sekitar tengah kutub medan, sumbu ini dinamakan sumbu medan atau sumbu langsung.



Gambar 2. 16 Motor DC

a. Konstruksi Motor DC

b. Diagram Skematik Motor

Kumparan penguat dihubungkan seri, jangkar merupakan besi laminasi yang bergerak untuk mengurangi arus eddy. Letak kumparan jangkar pada slot besi disebelah luar permukaan jangkar. Pada jangkar terdapat komutator yang terbentuk silinder dan isolasi

sisi kumparan dihubungkan dengan segmen komutator pada beberapa bagian yang berbeda, sesuai dengan jenis lilitannya.

2.6.2 Karakteristik Motor DC

Untuk menentukan karakteristik motor DC, hal yang harus diingat adalah dua persamaan dasar, yaitu karakteristik kecepata putaran dan karakteristik torsi.

Persamaan karakteristik kecepata putaran adalah:

$$n = \frac{V_s - I_a R_a}{C \cdot \emptyset} \quad (2-6)$$

N = Kecepatan Putaran

V_s = Tegangan Shunt (Volt)

I_a = Arus Armature (Ampere)

R_a = Resistansi Armature (Ohm)

C = Copel

\emptyset = Fluks (Wb/m²)

Perasamaan karakteristik torsi:

$$\tau = K \cdot I_a \cdot \emptyset \quad (2-7)$$

τ = Torsi

K = Konstanta

I_a = Arus Armature (Ampere)

\emptyset = Fluks (Wb/m²)

2.6.3 Pengaturan Kecepatan Motor DC

$$n = \frac{V_{in} - I_a \cdot R_a}{C \emptyset} \quad (2-8)$$

Dari Persamaan (1-3) terlihat bahwa kecepatan motor sebanding dengan tegangan masukan (V_{in}) [Zuhal, 1993: 91]. Jadi apabila tegangan masukan besar maka kecepatan motor akan cepat, demikian pula sebaliknya, jika tegangan masukan kecil maka kecepatan motor akan lambat.

2.7 Solid State Relay

Solid State Relay (SSR) adalah relay/saklar elektronik semikonduktor yang memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan relay konvensional (elektro mekanik). Sistem isolasi pada *solid state relays* pada umumnya terisolasi secara optik sedangkan relay konvensional (elektro mekanik) terisolasi secara fisik, kondisi ini akan memberikan keuntungan dan kerugian tersendiri antara solid state relay dan relay konvensional. Kelebihan dan kekurangan antara solid state relay dengan relay konvensional (elektro mekanik) dapat dilihat dari sisi pengoperasiannya dan performasinya.

2.7.1 Kelebihan Solid State Relay (SSR)

1. Pada solid-state relay tidak terdapat bagian yang bergerak seperti halnya pada relay. Relay mempunyai sebuah bagian yang bergerak yang disebut kontaktor dan bagian ini tidak ada pada solid-state relay. Sehingga tidak mungkin terjadi 'no contact' karena kontaktor tertutup debu bahkan karat.
2. Tidak terdapat 'bounce', karena tidak terdapat kontaktor yang bergerak pada solid-state relay tidak terjadi peristiwa 'bounce' yaitu peristiwa terjadinya pantulan kontaktor pada saat terjadi perpindahan keadaan. Dengan kata lain dengan tidak adanya bounce maka tidak terjadi percikan bunga api pada saat kontaktor berubah keadaan.
3. Proses perpindahan dari kondisi 'off' ke kondisi 'on' atau sebaliknya sangat cepat hanya membutuhkan waktu sekitar 10 μ s sehingga solid-state relay dapat dengan mudah dioperasikan bersama-sama dengan zero-crossing detektor. Dengan kata lain opsai kerja solid-state relay dapat disinkronkan dengan kondisi zero crossing detektor.
4. Solid state relay kebal terhadap getaran dan guncangan. Tidak seperti relay mekanik biasa yang kontaktornya dapat dengan mudah berubah bila terkena guncangan/getaran yang cukup kuat pada body relay tersebut.
5. Tidak menghasilkan suara 'klik', seperti relay pada saat kontaktor berubah keadaan.
6. Kontaktor output pada solid-state relay secara otomatis 'latch' sehingga energi yang digunakan untuk aktivasi solid-state relay lebih sedikit jika dibandingkan dengan energi yang digunakan untuk aktivasi sebuah

relay. Kondisi ON sebuah solid-state relay akan di-late sampai solid-state relay mendapatkan tegangan sangat rendah, yaitu mendekati nol volt.

7. SolidState relay sangat sensitif sehingga dapat dioperasikan langsung dengan menggunakan level tegangan CMOS bahkan level tegangan TTL. Rangkaian kontrolnya menjadi sangat sederhana karena tidak memerlukan level konverter.
8. Masih terdapat couple kapasitansi antara input dan output tetapi sangat kecil sehingga arus bocor antara input output sangat kecil. Kondisi diperlukan pada peralatan medical yang memerlukan isolasi yang sangat baik.

2.7.2 Kekurangan Solid State Relay (SSR)

1. **Resistansi Tegangan transien.** Tegangan yang diatur/dikontrol oleh solid-state relay benar-benar tidak bersih. Dengan kata lain tidak murni tegangannya berupa sinyal sinus dengan tegangan peak to peak 380 vpp tetapi terdapat spike-spike yang dihasilkan oleh induksi motor atau peralatan listrik lainnya. Spike ini level tegangannya bervariasi jika terlalu besar maka dapat merusakkan solid-state relay tersebut. Selain itu sumber-sumber spike yang lain adalah sambaran petir, imbas dari selenoid valve dan lain sebagainya.
2. **Arus bocor-‘Leakage current’.** Pada saat solid-state relay ini dalam keadaan off atau keadaan open maka dalam kondisi yang idel seharusnya tidak ada arus yang mengalir melewati solid-state relay tetapi tidak demikian pada komponen yang sebenarnya. Besarnya arus bocor cukup besar untuk jika dibandingkan arus pada level TTL yaitu sekitar 10mA rms.
3. Harga solid state relay jauh lebih mahal dari relay konvensional (elektro mekanik) dengan kemampuan sama dengan relay konvensional.

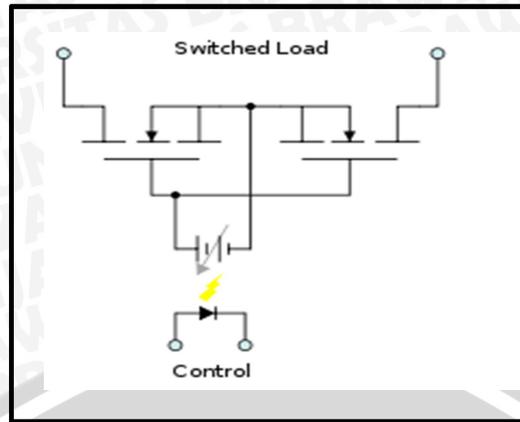
2.7.3 Jenis – Jenis Solid State Relay (SSR)

- **Reed-Relay-Coupled SSR's** di mana sinyal kontrol diterapkan (secara langsung, atau melalui Preamplifier) ke kumparan relay yang buluh. Penutupan buluh lalu mengaktifkan sirkuit yang tepat dengan saklar memicu thyristor. Jelas, input-output isolasi dicapai adalah bahwa dari buluh relay, yang biasanya sangat baik.

- **Transformer-Coupled SSR's** di mana sinyal kontrol diterapkan (melalui DC-AC converter, jika sudah DC, atau secara langsung, jika itu AC) ke domain utama trafo berdaya rendah, dan sekunder yang dihasilkan dari eksitasi primer yang digunakan (dengan atau tanpa rektifikasi, amplifikasi, atau lainnya modifikasi) untuk memicu thyristor saklar. Dalam jenis ini, tingkat isolasi input-output tergantung pada desain transformator.
- **Opto-coupler SSR's** di mana sinyal kontrol diterapkan pada sebuah sumber cahaya atau inframerah (biasanya, sebuah dioda pemancar cahaya atau LED), dan dari sumber yang terdeteksi dalam foto - sensitive semiconductor (misalnya, sebuah dioda fotosensitif, sebuah foto-sensitif transistor, atau foto-sensitif thyristor). Output dari foto-perangkat sensitif kemudian digunakan untuk memicu (gerbang) yang TRIAC atau SCR itu aktifkan arus beban. Jelas, satu-satunya yang signifikan "coupling path" antara input dan output adalah cahaya atau sinar infra - radiasi merah, dan isolasi listrik yang sangat baik. "Optically coupled" or SSR yang juga disebut sebagai "optikal yang digabungkan" atau foto terisolasi.

2.7.4 Cara Kerja Solid State Relay (SSR)

Pada *solid-state relays*, switching unitnya menggunakan TRIAC sehingga solid-state relay ini dapat menghasilkan arus baik positif maupun negatif. Untuk mengontrol triac ini digunakan SCR yang mempunyai karakteristik gate yang sensitif. Kemudian untuk mengatur trigger pada SCR sendiri diatur dengan menggunakan rangkaian transistor. Rangkaian transistor ini menjadi penguat level tegangan dari optocoupler. Penggunaan SCR untuk mengatur gate TRIAC karena gate SCR mempunyai karakteristik yang lebih sensitif daripada gate TRIAC. Antara bagian input dan output dipisahkan dengan menggunakan optocoupler dan dengan sinyal yang kecil, cukup untuk menyalakan dioda saja, maka cukup untuk menggerakkan sebuah beban AC yang besar melalui solid-stare relay.

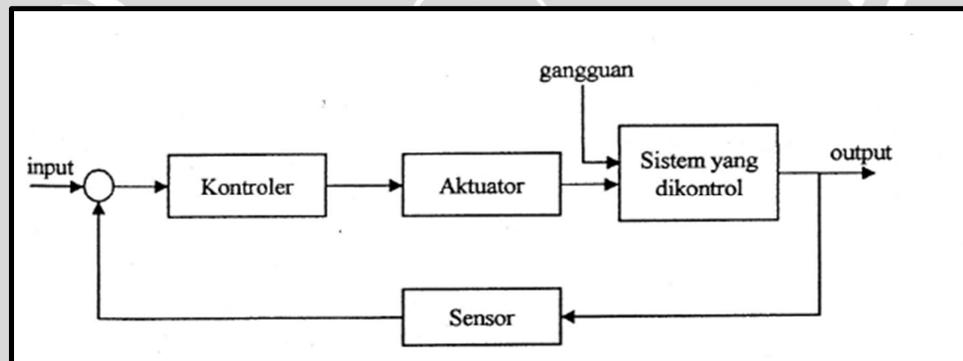


Gambar 2. 17 Diagram Solid State Relay (SSR)

Sumber : Sharp S202S02 Datasheet, 2002

2.8 Sistem Kontrol

Desain sistem kontrol meliputi penentuan parameter sistem dan atau penambahan subsistem untuk mencapai karakteristik sistem yang diinginkan



Gambar 2. 18 Sistem Kontrol

Sumber : A. Frank D'Souza, 1998:105

Karakteristik atau spesifikasi performansi berkaitan dengan *error steady state*, respon transien, kestabilan dan ketahanan terhadap gangguan. Respon transien digunakan untuk menganalisis performansi *rise time* (t_r), *settling time* (t_s), *peak/maksimum overshoot* (M_p), dan *time to peak overshoot* (t_p) seperti yang ditunjukkan pada gambar 19.

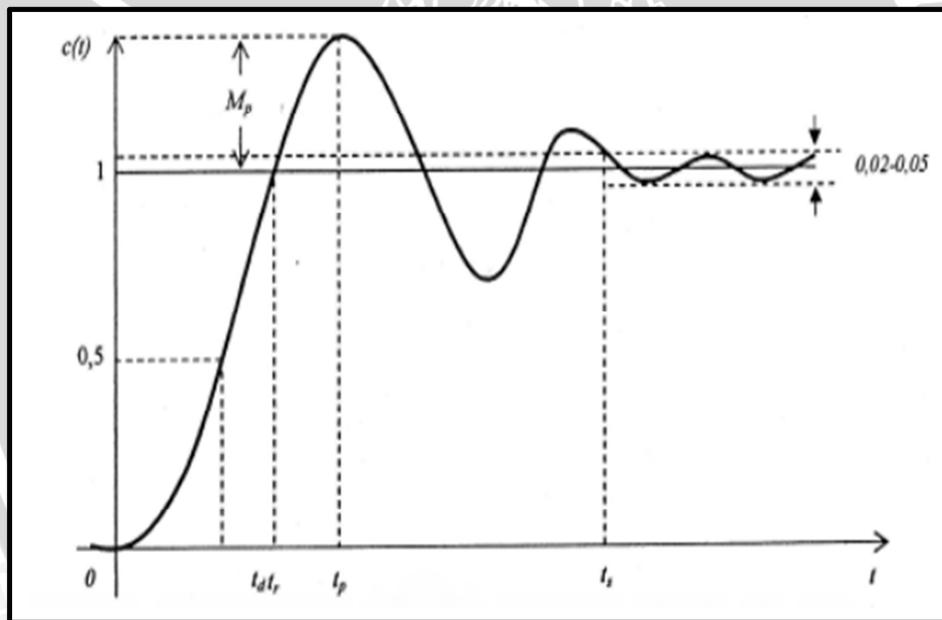
- *Rise time* (t_r)

Rise time adalah waktu yang diperlukan untuk mencapai respon lebih dari 90% dari nilai akhir.

- *Settling time* (t_s)

Settling time adalah waktu yang diperlukan oleh respon untuk menetap pada nilai 2% - 5% dari nilai akhir (*steady state*)

- *Peak/maksimum overshoot (M_p)*
Peak/maksimum overshoot adalah nilai puncak saat pertama kali respon yang biasanya dinyatakan dalam presentase perbandingan antara nilai puncak dengan nilai akhir (*steady state*).
- *Time to peak overshoot (t_p)*
Time to peak overshoot adalah waktu yang diperlukan untuk mencapai peak overshoot.
- *Error steady state (e_{ss})*
Error steady state adalah selisih antara nilai pengukuran dengan nilai yang sebenarnya setelah t_s tercapai.



Gambar 2. 19 Spesifikasi Tanggapan Transien

Sumber : A.Frank D'Souza, 1998:134

2.8.1 Jenis – jenis kontroler

Prinsip kerja kontroler adalah membandingkan nilai aktual keluaran *plant* dengan nilai referensi, kemudian menentukan nilai kesalahan dan akhirnya menghasilkan sinyal kontrol untuk meminimalkan kesalahan. Berdasarkan aksi kontrolnya, jenis – jenis kontroler adalah sebagai berikut :

1. Kontroler Proporsional

Pada pengendali proporsional hubungan antara keluaran kontroler $m(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2-9)$$

Dengan K_p adalah penguatan proporsional. Keluaran $m(t)$ hanya tergantung pada *magnitude* dari error, dimana semakin besar *error* maka semakin besar pula aksi koreksi yang dilakukan. Ciri-ciri kontroler proporsional harus diperhatikan ketika kontroler tersebut diterapkan pada suatu sistem. Secara eksperimen, pengguna controller proporsional harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut ini:

- Kalau nilai K_p kecil, kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
- Kalau nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantabnya.
- Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi (Pakpahan, 1988, 193).

2. Kontroler Integral

Nilai keluaran kontroler $m(t)$ diubah pada laju proporsional dari sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$, sehingga dengan K_i adalah konstanta integral. Jika sinyal kesalahan $e(t)$, sehingga dengan K_i adalah konstanta integral. Jika sinyal kesalahan $e(t) = 0$, maka laju perubahan sinyal kendali integral $\frac{dm(t)}{dt} = 0$ atau sinyal keluaran kendali akan tetap berada pada nilai yang telah dicapai sebelumnya. Aksi kontrol integral digunakan untuk menghilangkan kesalahan posisi dalam keadaan mantap (*error steady state*) tanpa memperhitungkan kecepatan respon. Ketika digunakan, kontroler integral mempunyai beberapa karakteristik berikut ini:

- Keluaran kontroler membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga kontroler integral cenderung memperlambat respon.

- Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran kontroler akan bertahan pada nilai sebelumnya.
- Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i (Johnson, 1993, 376).
- Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran kontroler (Guterus, 1994, 7-4).

3. Kontroler Diferensial

Nilai sinyal keluaran kontroler $m(t)$ sebanding dengan perubahan laju sinyal kesalahan $\frac{d}{dt} e(t)$. Hubungan ini dapat ditulis sebagai kontroler diferensial akan memberikan sinyal kendali keluaran $m(t) = 0$ untuk sinyal kesalahan $e(t)$ yang konstan. Kontroler diferensial digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respon transien sebuah sistem serta dapat meredam osilasi. Karakteristik kontroler diferensial adalah sebagai berikut:

- Kontroler ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
- Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan kontroler tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan. (Powel, 1994, 184).
- Kontroler diferensial mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga kontroler ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi kontroler diferensial dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif, dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem (Ogata, 1997, 240).

Berdasarkan karakteristik kontroler tersebut, kontroler diferensial umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Kerja kontroler diferensial hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh

sebab itu kontroler diferensial tidak pernah digunakan tanpa ada kontroler lain sebuah sistem (Sutrisno, 1990, 102).

Dari ketiga aksi kontrol diatas dapat dibuat kombinasi diantara ketiganya yaitu :

1. Kontroler Proporsional ditambah Integral (PI)

Aksi kontrolnya dinyatakan dalam persamaan :

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2-10)$$

Kontroler ini mengintegrasikan sinyal kesalahan $\int e(t) dt$ yang kemudian ditambahkan dengan sinyal kesalahan $e(t)$.

2. Kontroler Proporsional ditambah Diferensial (PD)

Aksi kontrolnya dinyatakan sebagai :

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-11)$$

Kontroler PD selalu mengukur kemiringan (*slope*) sinyal kesalahan $\frac{d}{dt} e(t)$ dan memperkirakan besar M_p yang akan terjadi serta memberikan koreksi sebelum terjadi lewatannya sehingga diperoleh *maksimum overshoot* yang kecil. Jika kesalahan keadaan mantap tidak berubah terhadap waktu maka turunannya terhadap waktu sama dengan 0, sehingga kontroler PD tidak mempunyai pengaruh terhadap kesalahan mantap, tapi jika terdapat perubahan kesalahan, kontroler PD akan mengurangi besar kesalahan keadaan mantap. Jadi, pengendali PD digunakan untuk memperbaiki suatu sistem pengendalian yang tanggapan peralihannya mempunyai *maksimum overshoot* berlebihan tanpa memperhitungkan kecepatan responnya.

3. Kontroler Proporsional ditambah integral ditambah Diferensial (PID).

Aksi kontrolnya dinyatakan sebagai :

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-12)$$

Dan dalam bentuk diskrit adalah sebagai berikut

$$v(KT) = k_p \left[e(KT) + \frac{1}{T_i} \sum_{k=1}^n T e(KT) + \frac{T d e(KT) - e(KT-T)}{T} \right] + \mu_0 \quad (2-13)$$

Jenis kontroler ini digunakan untuk memperbaiki kecepatan respon, mencegah terjadinya kesalahan keadaan mantap serta mempertahankan kestabilan.

Penalaan parameter kontroler PID (*Proporsional Integral Diferensial*) selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*Plant*). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu plant, perilaku plant tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter PID itu dilakukan. Karena penyusunan model matematik plant tidaklah mudah, maka dikembangkan suatu metode eksperimental. Metode ini didasarkan pada reaksi plant yang dikenai suatu perubahan. Dengan menggunakan metode itu; model matematik perilaku plant tidak diperlukan lagi, karena dengan menggunakan data yang berupa kurva keluaran, proses kontroler PID telah dapat dilakukan. (Sumber: Tutorial Elektro Indonesia edisi ke XII, Ir. Chairuzzaini, 1998)

Keberadaan controller dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Pada prinsipnya, hal itu disebabkan oleh tidak dapat diubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik plant harus diterima sebagaimana adanya, sehingga perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan suatu sub sistem, yaitu kontroler. Salah satu tugas komponen kontroler adalah mereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal setting dan sinyal aktual. Hal ini sesuai dengan tujuan sistem kontrol adalah mendapatkan sinyal aktual senantiasa (diinginkan) sama dengan sinyal setting. Semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi, semakin baiklah kinerja sistem kontrol yang diterapkan.

Apabila perbedaan antara nilai setting dengan nilai keluaran relatif besar, maka kontroler yang baik seharusnya mampu mengamati perbedaan ini untuk segera menghasilkan sinyal keluaran untuk mempengaruhi plant. Dengan demikian sistem secara cepat mengubah keluaran plant sampai diperoleh selisih antara setting dengan besaran yang diatur sekecil mungkin. (Sumber: Rusli, 1997)

2.8.2 Metode Manual Tuning PID

Dalam metode penentuan parameter secara manual, langkah pertama adalah memberikan nilai nol pada parameter K_i dan K_d . Kemudian parameter K_p dinaikan sampai output loop mencapai osilasi. Parameter K_i kemudian dinaikan sampai error steady state tereliminasi. Terlalu banyak nilai K_i akan menyebabkan ketidakstabilan sistem. Terakhir nilai parameter K_d ditingkatkan jika dibutuhkan, sampai loop dirasakan cukup cepat untuk mencapai setpoint setelah ada gangguan beban. Namun terlalu banyak nilai pada K_d akan menyebabkan respon yang terlalu cepat dan menyebabkan *overshoot*. Loop PID yang cepat biasanya memperbolehkan adanya *overshoot*.

Tabel 2. 6 Kondisi – kondisi saat menaikan parameter control

RESPONSE	RISE TIME	OVERSHOOT	SETTLING TIME	SS ERROR
K_p	Menurun	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Eliminasi
K_d	Perubahan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan Kecil

