

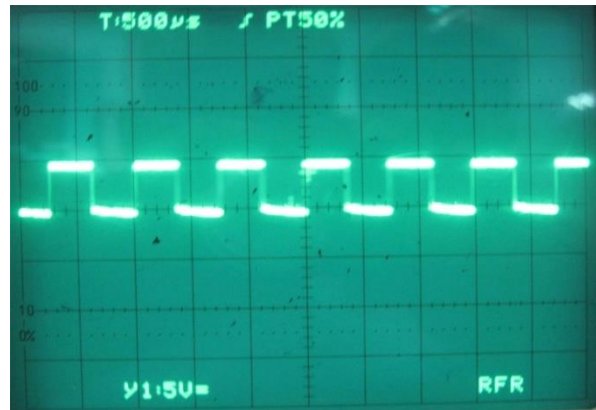
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perangkat Lunak

1. Pemograman *Mikrokontroler*

Pada penelitian ini untuk memprogram *mikrokontroler* sendiri digunakan program *CodeVision AVR* dengan menggunakan bahasa pemograman C. Program yang di tuliskan memiliki perintah yaitu, memproses masukkan dari *keypad* yang kemudian ditampilkan pada seven segmen, selanjutnya *mikrokontroller* akan memberikan *output* berupa pengaturan PWM yang berfungsi untuk mengatur proses *on-off* pada rangkaian converter arus searah.

Setiap program ini memiliki fungsi tersendiri, misalnya pada *OCR 1* dan *OCR 2* digunakan untuk *pulsa width modulation* (PWM). Setiap keluaran *timer* tersebut dihubungkan terlebih dahulu melalui driver masing-masing saklar, dan selanjutnya dihubungkan ke MOSFET, BJT dan IGBT. Bila dilihat dari osiloskop maka keluaran dari *pulsa width modulation* (PWM)

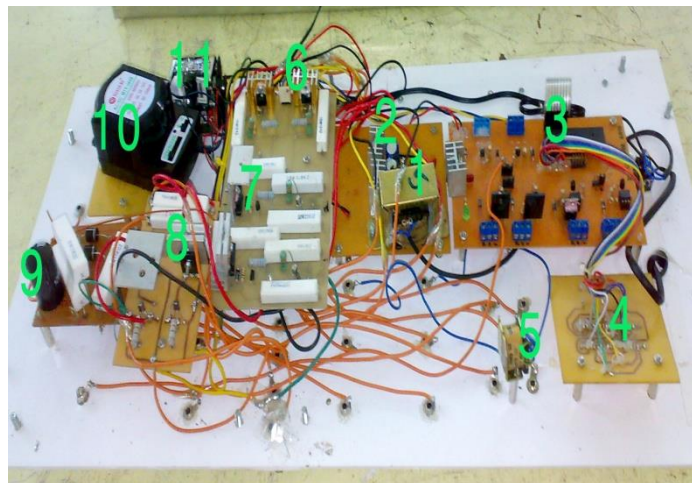


Gambar 25. Bentuk *Pulsa Width Modulation* (PWM)

B. Perangkat Keras

1. Gambar Skematik Rangkaian Perangkat Keras

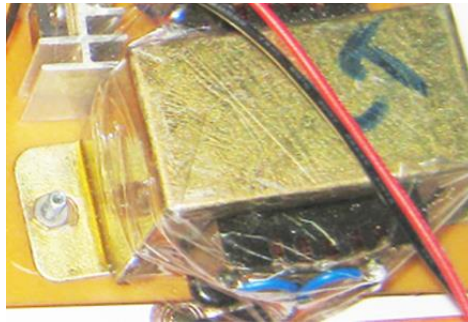
Pada penelitian ini digunakan beberapa perangkat keras yang terhubung menjadi satu sistem.



Gambar 26. Skematik Rangkaian Perangkat Keras

1. *Transformator*

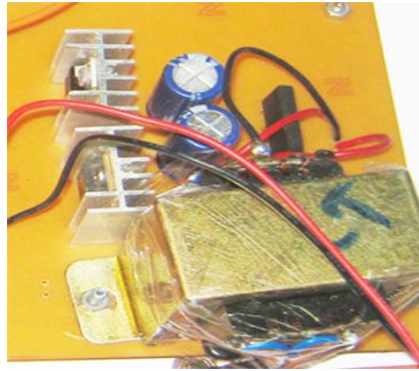
Transformator yang digunakan pada penelitian ini adalah *Center Tap Transformer*, dimana digunakan sebagai penurun tegangan dari 220 Volt ke 15 volt dan 5 Volt dengan rating arus sebesar 1 A.



Gambar 27. Transformator CT 1A

2. *Rangkaian Power Supply*

Rangkaian ini merupakan rangkaian yang digunakan sebagai sumber searah pada penggunaan peralatan elektronik yang lain. Sumber tegangan yang diberikan dari Transformator berupa sumber AC akan disearahkan dengan Dioda *bridge* dengan rating 1 A. Setelah itu keluaran dari dioda tersebut akan difilter dengan kapasitor $2200 \mu F$ untuk menghilangkan ripple dan setelah itu dirubah tegangannya dengan penambahan IC *regulator* seri 7805 untuk mengubah ke 5 Volt dan IC *regulator* seri 7815 untuk mengubah ke 15 volt sehingga rating tegangan yang diperoleh dari power supply ini yaitu 5 Volt dan 15 Volt.



Gambar 28. Rangkaian Power Supply

3. Rangkaian Pengendali Utama

Rangkaian pengendali utama yaitu sebagai pengendali keypad, seven segment dan PWM. Dalam hal ini yang dimaksud adalah rangkaian *mikrokontroler* Atmega 8535.



Gambar 29. Rangkaian Pengendali Utama

4. Rangkaian Seven Segment

Rangkaian ini digunakan untuk menampilkan nilai persentase duty cycle yang diinginkan. Pada penelitian ini digunakan tiga buah seven segment *common katoda* yang ditempatkan pada *socket*.



Gambar 30. Rangkaian Sevent Segment

5. Induktor

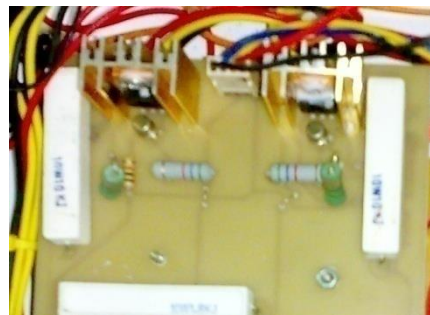
Induktor merupakan bagian dari suatu rangkaian Klasifikasi DC *chopper* yang akan digunakan pada chopper kelas B dan C.



Gambar 31. Induktor

6. Rangkaian Penguat IGBT

Rangkaian ini terdiri dari 2 buah jenis IGBT IRGBC40W, serta beberapa resistor dan transistor 2n2222 yang berfungsi sebagai penguat IGBT.



Gambar 32. Rangkaian Penguat IGBT

7. Rangkaian Penguat BJT

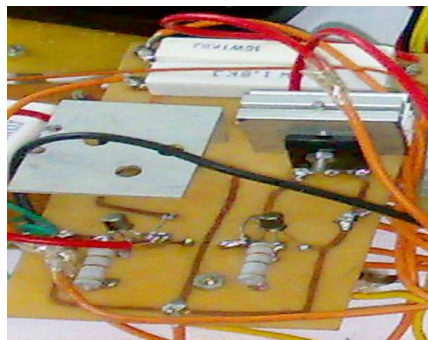
Rangkaian ini terdiri dari 2 buah jenis BJT BUV48a, beberapa resistor, transistor BC517, dan dioda yang berfungsi sebagai penguat BJT.



Gambar 33. Rangkaian Penguat BJT

8. Rangkaian Penguat MOSFET

Rangkaian ini terdiri dari 2 buah jenis Mosfet IRFP 450, beberapa resistor, transistor 2n2222, dan dioda yang berfungsi sebagai penguat mosfet.



Gambar 34. Rangkaian Penguat Mosfet

9. Kapasitor 150 μ F

Kapasitor 150 μ F ini berfungsi sebagai *filter* bagi *power supply*.



Gambar 35. Kapasitor

10. Adaptor

Adaptor dalam alat praktikum ini digunakan sebagai *power supply* kipas (*fan*).



Gambar 36. Adaptor

11. Baterai

Baterai ini memiliki tegangan 16V, yang digunakan pada saat percobaan *chopper* kelas B dan kelas C.



Gambar 37. Baterai

C. Pengujian Alat

1. Pengujian input dan output *mikrokontroller*

Pengujian pada mikrokontroller meliputi pengujian pemberian inputan ke mikrokontroller dari keypad kemudian mengamati outputnya yaitu berupa bilangan yang ditampilkan oleh seven segmen dan pengaturan PWM untuk mengatur proses *on-off* pada converter arus searah.

Misalnya bila ditekan angka 4 dan 0 pada *keypad* maka *mikrokontroller* akan memberikan *output* ke *seven segment*, sehingga *seven segment* akan menampilkan angka 40. Selanjutnya bila setelah menekan angka 4 dan 0 kemudian menekan tanda *, maka *mikrokontroller* akan memberikan *output* berupa PWM dengan lama waktu *on* 40% dari 1 periode, dalam hal ini fungsi "*" pada *keypad* seperti fungsi enter pada computer yang berfungsi Untuk me *run DC chopper*. *outputnya* ditunjukkan pada Saklar 1 (Mosfet 1, BJT 1, IGBT 1) sedangkan Saklar 2 (Mosfet 2, BJT 2, IGBT 2) adalah kebalikan dari Saklar 1. Bila Saklar 1 memiliki waktu *on* selama 40% dari periodenya, maka Saklar 2 memiliki 60% waktu off dari 1 periodenya. Selanjutnya Saklar-saklar ini akan digunakan sebagai pengaturan waktu *on-off* pada *converter* arus searah.

2. Pengujian *Chopper*

Prosedur Pengujian

Pada penelitian ini digunakan peralatan tambahan untuk mendukung pengambilan data pada *chopper* kelas A, *chopper* kelas B maupun *chopper* kelas C yaitu *Power supply* 250v. *Power supply* digunakan untuk memberikan tegangan langsung ke salah satu kaki saklar yaitu sisi drain atau collector, yang nantinya akan di ganti-ganti nilai tegangan (*variabel*) sesuai dengan yang ditentukan. Sedangkan resistor sendiri dihubungkan kerangkaian *chopper* setelah melewati saklar.

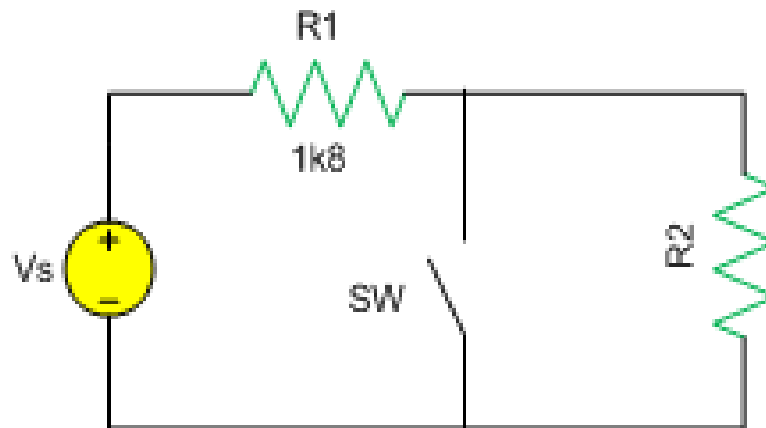
Pada dasarnya prosedur pengujian *chopper* kelas A, *chopper* kelas B dan *chopper* kelas C dilakukan sama. Prosedur pengujian ini dilakukan dengan mengukur besarnya nilai *power supply* dan menyesuaikannya dengan resistor yang dibutuhkan, setelah itu lalu merangkai rangkaian percobaan yang ingin diuji pada box praktikum klasifikasi DC *chopper* yang telah dibuat dan menghubungkan saklar ke *osciloscop*. Kemudian menghubungkan rangkaian dc *chopper* ke *Power Supply*.

Pengambilan data dilakukan dengan menghidupkan *power supply* dan menaikkan nilai tegangannya dari 20v, 40v dan 60v serta mengubah nilai resistor dari 10 k Ω dan 20 k Ω . Setelah itu mulai memainkan *dutycycle* dari 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% dan 100%.

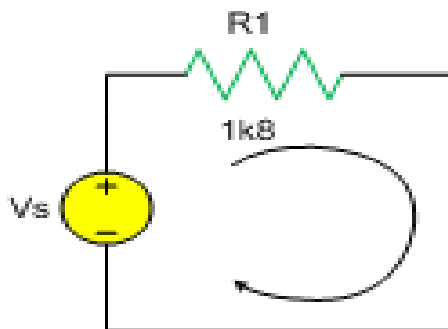
a. *Chopper* Kelas A

Pengujian Kelas A ini dilakukan dengan memvariasikan pensaklarannya dengan menggunakan tiga jenis transistor yaitu, BJT, MOSFET dan IGBT. Selanjutnya dilakukan dengan memvariasikan tegangan input, % *duty cycle* dan beban.

Dalam tugas akhir ini *chopper* Kelas A dibuat dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan, seperti yang terlihat pada rangkaian dibawah ini.

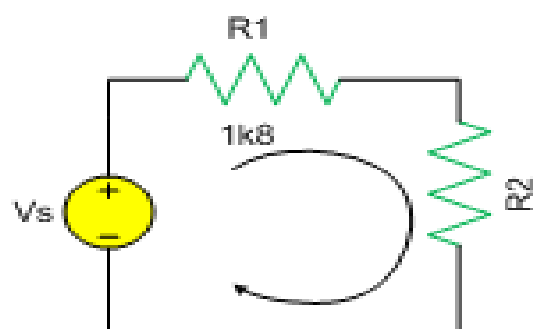


a). Rangkaian *Chopper* Kelas A



b). Rangkaian ekivalen

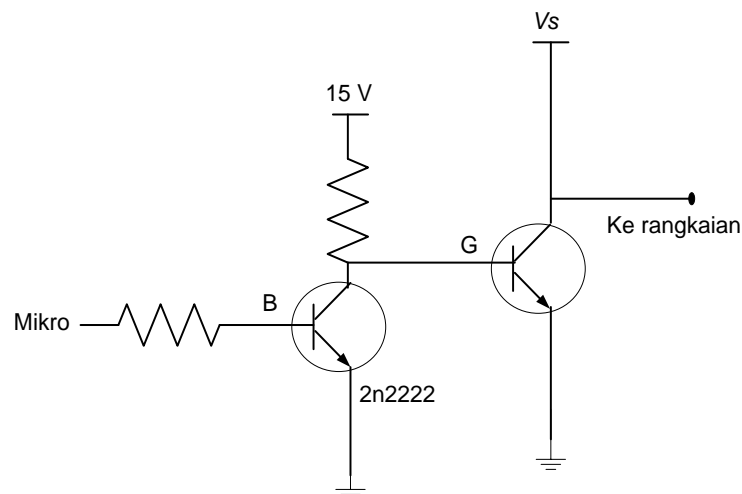
Saklar *on* = *close*



c). Rangkaian ekivalen

Saklar *off* = *open*

Gambar 38. Rangkaian *Chopper* dan Rangkaian Ekivalen Kelas A

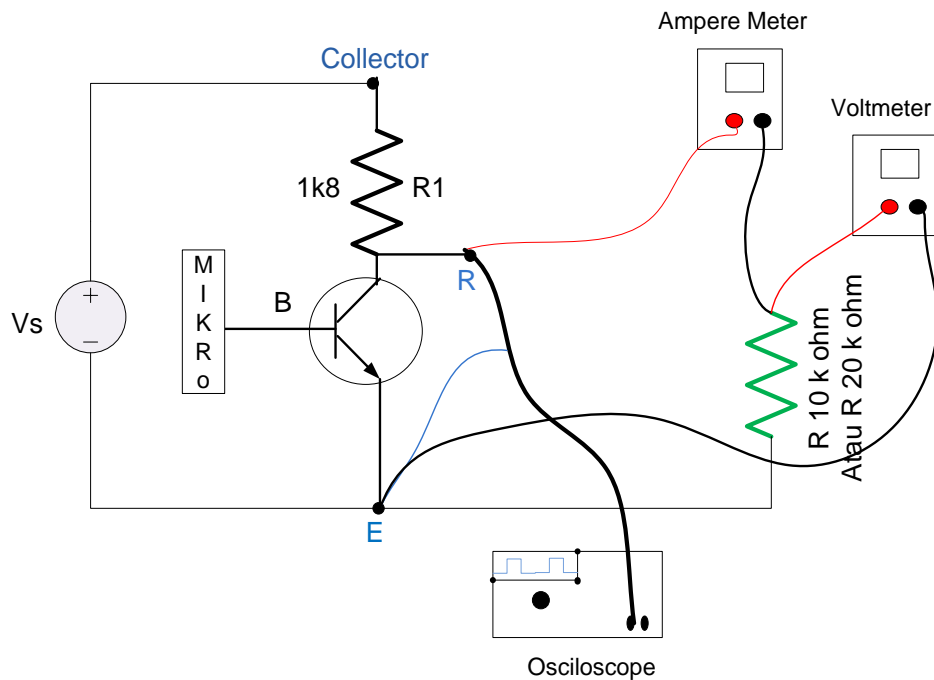


Gambar 39. Contoh Rangkaian Penguat Klasifikasi DC *Chopper*

Dengan memperhatikan gambar diatas, maka dapat dianalisa rangkaian dari *chopper* kelas A yang dapat dibagi menjadi 2 jenis rangkaian yaitu pada saat saklar *close* dan pada saat saklar *open*. Bila *duty cycle* diatur 0% maka saklar akan *close (on)* seperti pada gambar 38.b. PWM yang berasal dari *mikro* yang berupa logika low mengakibatkan transistor 2N2222 berada dalam posisi *off*, sehingga menyebabkan terdapat tegangan pada kaki basis MOSFET, BJT dan IGBT yang berasal dari supply sebesar 15v. Tegangan tersebutlah yang menyebabkan saklar akan *close (on)* dan selanjutnya arus hanya akan terus mengalir melalui R1.

Begitu juga halnya ketika *duty cycle* diatur 100%, maka saklar akan *open (off)* seperti pada gambar 38.c dan arus akan mengalir melalui R1 dan R2. PWM yang berasal dari mikro yang berupa logika high akan mengaktifkan transistor 2N2222, sehingga tegangan sebesar 15v yang berasal dari *power supply* langsung

terhubung ke ground dan menyebabkan tidak adanya supply tegangan di kaki basis sehingga saklar dapat dikatakan dalam keadaan *off*.



Gambar 40. Mode Rangkaian *Chopper* Kelas A Pada Praktikum

Dalam pengujian ini titik ukur tegangan berada pada R2 (10k/20k), dan merupakan beban yang akan dikonversikan tegangannya. Nilai tegangan pada R2 saat saklar *close* (t_2) adalah 0 (gambar 38.b) dan nilai tegangan saat saklar *open* (t_1) adalah:

$$V_{R2} = V_s \frac{R2}{R1+R2} \quad 4-1$$

Setelah nilai tegangan pada R2 diperoleh, selanjutnya adalah mencari nilai tegangan sesuai dengan variasi % dutycycle (k).

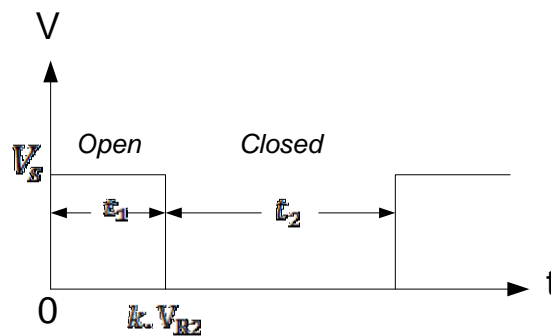
$$V_a = k \cdot V_{R2} \quad 4-2$$

Dimana,

$$k = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} \quad 4-3$$

Maka:

$$V_a = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} V_{R2} \quad 4-4$$



Gambar 41. Bentuk Gelombang Keluaran *Chopper* Kelas A

Nilai arus pada saat saklar *close* adalah 0, Sedangkan nilai arus pada saat saklar *open* adalah.

$$i_a = k \frac{V_s}{R_1+R_2} \quad 4-5$$

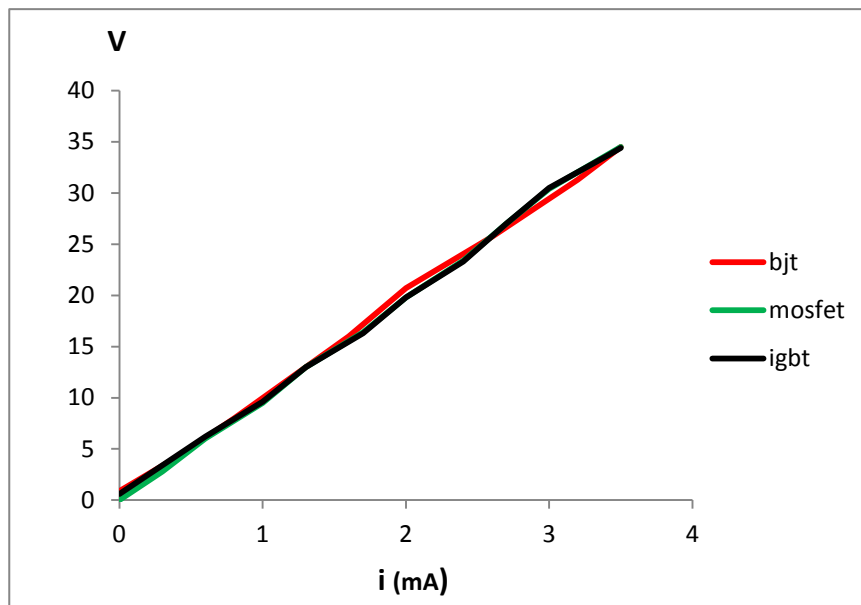
Dalam hal ini akan terjadi kenaikan tegangan dari R 10kΩ ke R 20kΩ walaupun tidak terlalu besar sekali. Sedangkan nilai arus yang didapatkan pada *chopper* kelas A ini adalah selalu bernilai positif karena arus terus mengalir dari *power supply* menuju beban (lihat gambar 38c).

Setelah melakukan pengujian didapatkan data dari hasil pegujian dengan pensaklaran yang divariasikan yaitu dengan menggunakan BJT (*Bipolar Junction*

Transistor), MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).dihasilkan data sebagai berikut:

Tabel 1. Data hasil pengujian saat $V_{in} = 40V$ dengan beban $10k\Omega$

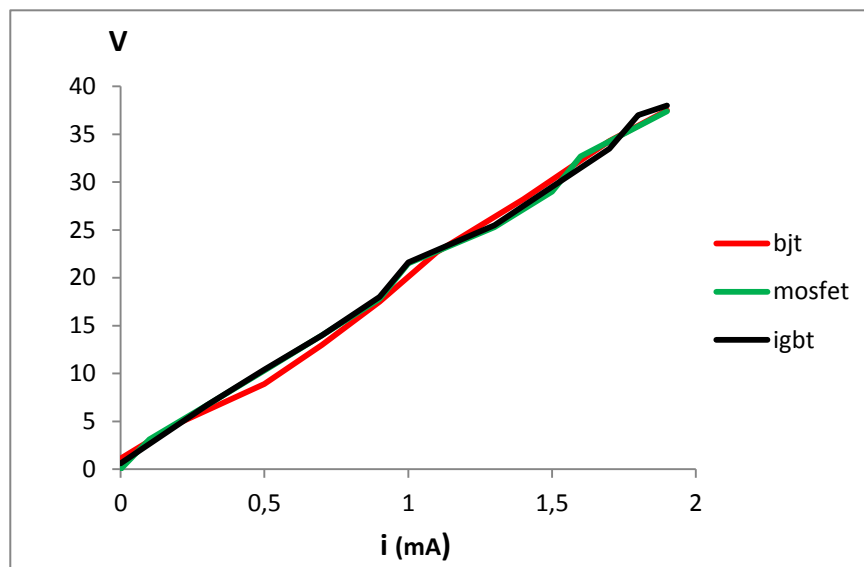
Duty cycle	MOSFET		IGBT		BJT		Perhitungan	
	I (mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}
0%	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
10%	0.3	2.8	0.6	6.2	0.0	0.0	0.3	3.4
20%	0.6	6.0	1.0	9.6	0.0	0.9	0.7	6.8
30%	1.0	9.5	1.3	13.0	0.4	4.2	1.0	10.0
40%	1.3	13.0	1.7	16.3	0.8	8.0	1.4	13.6
50%	1.7	16.4	2.0	19.8	1.2	12.0	1.7	17.0
60%	2.0	19.8	2.4	23.3	1.6	16.0	2.0	20.3
70%	2.4	23.4	2.7	27.0	2.0	20.7	2.4	23.7
80%	2.7	27.0	3.0	30.5	2.6	25.7	2.7	27.1
90%	3.0	30.4	3.4	33.6	3.2	31.3	3.0	30.5
100%	3.5	34.5	3.5	34.4	3.5	34.5	3.4	34.0



Gambar 42. Hubungan V-I BJT, MOSFET dan IGBT (kwd I) dengan beban $10k\Omega$ dan $V_{in} = 40V$

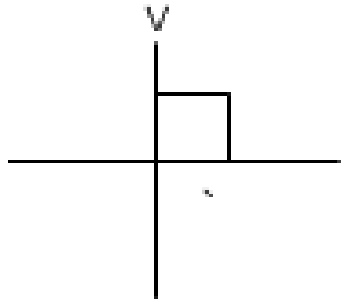
Tabel 2. Data hasil pengujian saat $V_{in} = 40V$ dengan beban $20k\Omega$

Duty cycle	MOSFET		IGBT		BJT		Perhitungan	
	I (mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}
0%	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
10%	0.1	3.1	0.3	6.7	0.0	0.0	0.2	3.7
20%	0.3	6.7	0.5	10.4	0.0	1.1	0.4	7.3
30%	0.5	10.3	0.7	14.0	0.2	4.8	0.6	11.0
40%	0.7	14.0	0.9	18.0	0.5	8.9	0.7	14.7
50%	0.9	17.8	1.0	21.6	0.7	13.0	0.9	18.4
60%	1.0	21.5	1.3	25.5	0.9	17.5	1.1	22.0
70%	1.3	25.3	1.5	29.5	1.1	22.7	1.3	25.7
80%	1.5	29.0	1.7	33.5	1.4	28.2	1.5	29.4
90%	1.6	32.7	1.8	37.0	1.7	34.3	1.7	33.0
100%	1.9	37.4	1.9	38.0	1.9	37.5	1.8	36.7

Gambar 43. Hubungan V-I BJT, MOSFET dan IGBT (kwd I) dengan beban $20k\Omega$ dan $V_{in} = 40V$

Dari tabel dan grafik diatas telah dibuktikan bahwa *Chopper* kelas A ini adalah *chopper* kuadran kesatu, artinya adalah tegangan dan arusnya selalu bernilai positif sehingga jika hubungan antara V-I digambar dalam satu kurva diagram cartesius akan jelas terlihat bahwa *chopper* kelas A ini akan selalu bekerja pada

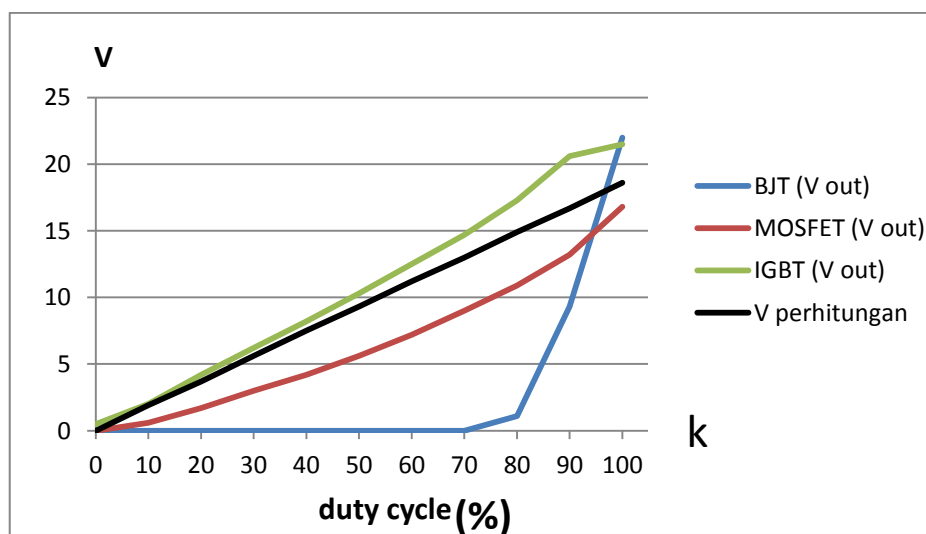
kuadran kesatu baik melalui pensaklaran dengan menggunakan BJT, MOSFET maupun IGBT (lihat gambar grafik diatas).



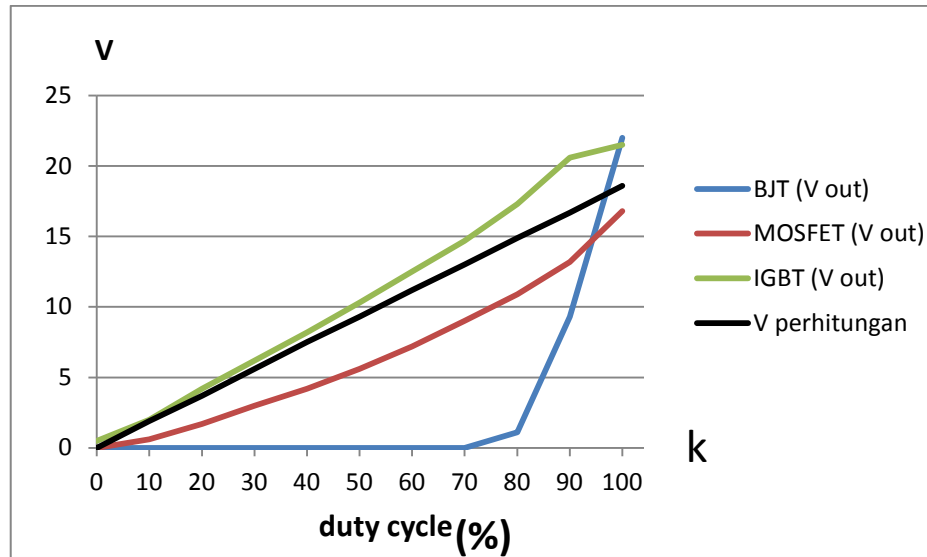
Gambar 44. Diagram Kerja Kuadran Kesatu

Pengambilan data arus dilakukan dengan menggunakan multimeter sanwa CD771 dan untuk pengukuran tegangan menggunakan multimeter sanwa CD800a.

Dari data diatas juga didapatkan grafik perbandingan V_{out} yang dihasilkan oleh BJT, MOSFET dan IGBT seperti yang diperlihatkan pada gambar:

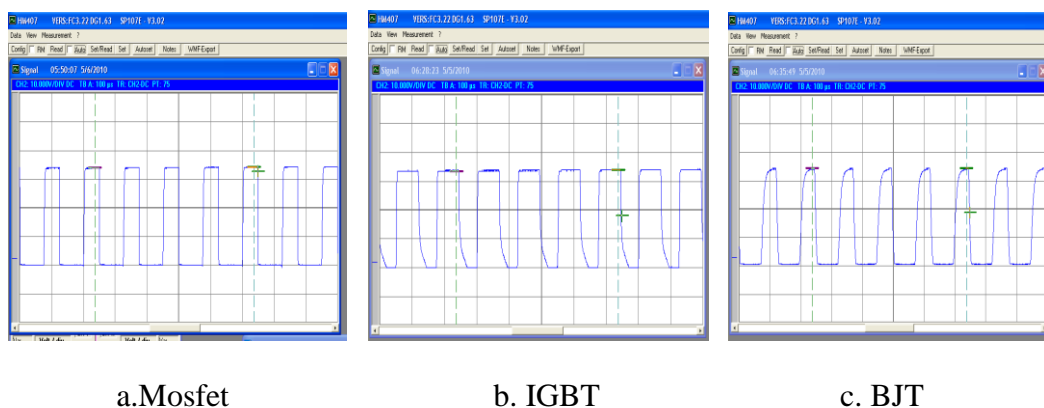


Gambar 45. Perbandingan V_{out} BJT, MOSFET dan IGBT dengan V_{in} 40V dan R 10k Ω pada pengujian *chopper* Kelas A



Gambar 46. Perbandingan V out BJT, MOSFET dan IGBT dengan V_{in} 40V dan R 20k Ω pada pengujian *chopper* Kelas A

Dari grafik perbandingan masing-masing V-out terlihat bahwa nilai tegangan saat menggunakan IGBT lebih besar daripada tegangan perhitungannya, hal ini dikarenakan waktu turun pada sinyal gelombang yang dihasilkan IGBT lebih lama dibandingkan dengan waktu naik gelombangnya. Pada grafik perbandingan terlihat saat nilai $k = 90\%$ menghasilkan nilai V output yang hampir sama dengan nilai output saat $k = 100\%$.



Gambar 47. Bentuk Sinyal Gelombang Keluaran Mosfet, IGBT dan BJT Pada $k=50\%$

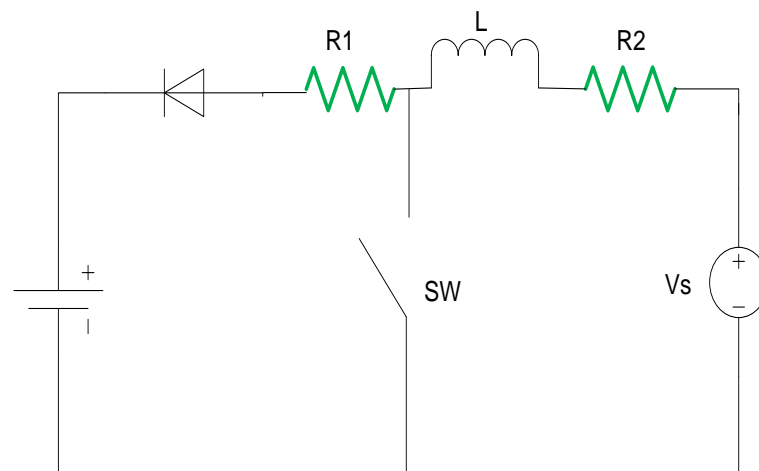
Pada BJT saat diberikan nilai $k = 0\%$ sampai dengan $k = 20\%$ dengan $V_{in} = 40\text{ V}$ dan beban $R = 10\text{ k}\Omega$ nilai tegangan keluaran masih berada di titik nol. Selanjutnya ketika diatur nilai $k = 40\%$ sampai 50% tegangan keluaran sudah ada, walaupun masih belum sesuai dengan tegangan perhitungan. Ketika diatur nilai k dari 70% sampai 100% maka akan menghasilkan nilai V_{out} yang hampir sama dengan V_{out} perhitungan. Namun bila nilai V_{in} dinaikkan pada BJT ini akan menghasilkan V_{out} yang mendekati nilai V_{out} perhitungannya jika dibandingkan saat di berikan tegangan input 40 V .

Berbeda dengan hasil pengujian IGBT dan BJT, pada MOSFET pada hasil pengujian yang didapatkan selalu menghasilkan tegangan V_{out} yang hampir sama dengan V_{out} perhitungannya. Hal ini dapat terlihat dari bentuk sinyal gelombang keluarannya, yaitu bentuk gelombang ketika naik dan turunnya sudah hampir sama (persegi). Data hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

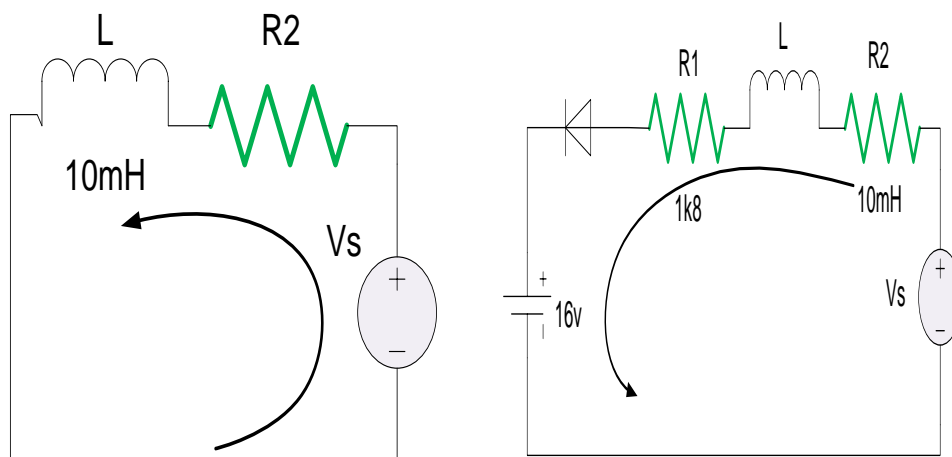
Dari hasil pengujian kelas A tersebut maka MOSFET memiliki pensaklaran yang baik, karena interval tegangan keluaran yang dihasilkannya pada saat tegangan input maupun duty cycle divariasikan tegangan v_{out} nya selalu konstan dan nilainya hampir sama dengan nilai tegangan perhitungan dan hal ini tentunya akan berbanding terbalik dengan BJT.

b. Chopper Kelas B

Sama seperti kelas A, kelas B ini juga dilakukan dengan memvariasikan pensaklarannya dengan menggunakan tiga jenis transistor yaitu, BJT, MOSFET dan IGBT. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan tegangan input, % *duty cycle* dan beban.



a. Rangkaian *Chopper* Kelas B



b). Rangkaian ekivalen

Saklar *on* = *close*

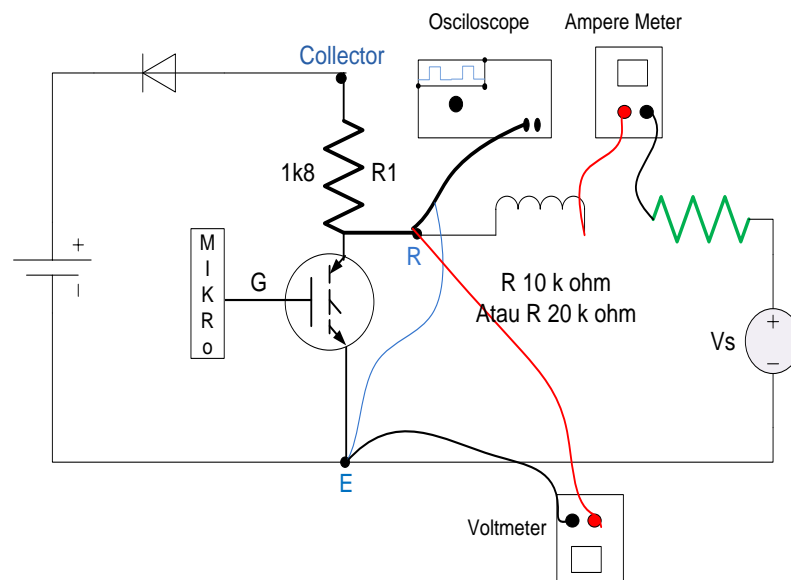
c).Rangkaian ekivalen

Saklar *off* = *open*

Gambar 48. Rangkaian *Chopper* dan Rangkaian Ekivalen Kelas B

Dengan memperhatikan gambar diatas, maka dapat dianalisa rangkaian dari chopper kelas B yang dapat dibagi menjadi 2 jenis rangkaian ekivalen yaitu pada saat saklar *close (on)* dan pada saat saklar *open (off)*. Bila *duty cycle* diatur 0%, maka posisi saklar akan close seperti pada gambar 45.b. Sehingga arus akan mengalir dari *power supply* menuju L, R2 dan langsung ke ground. Maka nilai tegangan pada R2 adalah bernilai 0. Sedangkan saat *duty cycle* diatur 100%, maka saklar akan open seperti pada gambar 45.c, sehingga arus akan mengalir melalui L, R1 dan R2.

Dalam hal ini diasumsikan bahwa R2 adalah beban yang divariasikan dan akan dikonversikan tegangannya, tetapi nilai tegangan pada R2 adalah tidak sama dengan nilai tegangan pada titik ukur. Titik ukur tegangan dalam percobaan ini ada diantara titik R1 dan titik R2 (lihat gambar 46). Nilai frekuensi *chopper* yaitu sebesar 11.0892 kHz sedangkan nilai baterai dalam hal ini diberikan konstan yang bernilai 16V.



Gambar 49. Mode Rangkaian *Chopper* Kelas B Pada Praktikum

Nilai tegangan pada R2 (10k/20k) saat saklar close (t_2) adalah 0 (gambar 45.b), dan nilai tegangan pada R2 saat saklar terbuka (t_1) adalah:

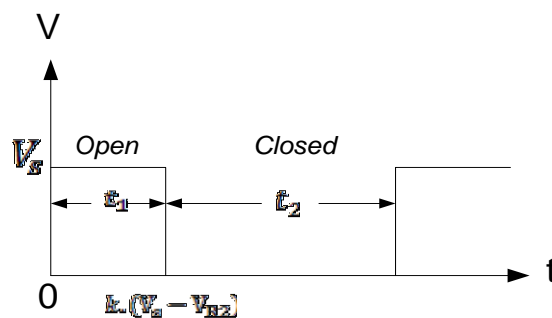
$$V_t = V_s - E - V_d \left(1 - e^{\frac{-(R_1+R_2)t}{L}}\right) \quad 4-7$$

Untuk mendapatkan nilai tegangan pada R2, maka akan menggunakan rumus pembagi tegangan.

$$V_{R2} = V_t \frac{R_2}{R_1+R_2} \quad 4-8$$

Dalam rangkaian ini nilai tegangan pada R2 adalah tidak sama dengan nilai tegangan pada titik ukur, maka untuk mencari nilai tegangan pada titik ukur yang sebenarnya yaitu dengan mengurangi nilai tegangan *power supply* terlebih dahulu dengan tegangan pada V_{R2} .

$$V_a = k(V_s - V_{R2}) \quad 4-9$$



Gambar 50. Bentuk Gelombang Keluaran Chopper Kelas B

Sedangkan untuk mendapatkan nilai arus, tetap melihat 2 jenis rangkaian ekivalen diatas. Nilai arus yang didapat pada saat saklar close/on (t_2) adalah:

$$i_t = -\frac{V_s}{R_2} \left(1 - e^{-\left(\frac{R_2}{L}\right)t}\right) \quad 4-10$$

Setelah nilai arus diperoleh, selanjutnya adalah mencari nilai arus sesuai dengan variasi % *duty cycle*.

$$i_{t2} = (1 - k)i_t \quad 4-11$$

Nilai arus yang didapat pada saat saklar open/*off* (t_1) adalah:

$$i_t = -\frac{V_s - V_d - E}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{(R_1 + R_2)t}{L}}\right) \quad 4-12$$

Setelah nilai arus pada R2 diperoleh, selanjutnya adalah mencari nilai arus sesuai dengan variasi % *duty cycle*.

$$i_{t1} = k \cdot i_t \quad 4-13$$

Sebelum lanjut lebih dalam lagi, satu hal yang perlu disepakati untuk mempermudah penghitungan adalah bahwasanya ketika *duty cycle* diatur 100%, artinya adalah 100% *on* + 0% *off*. Begitu juga jika diatur 30%, artinya adalah 30% *on* + 70% *off*. Maka Untuk mendapatkan nilai arusnya adalah dengan menjumlahkan besarnya nilai arus pada saat t_1 dengan nilai arus pada saat t_2 .

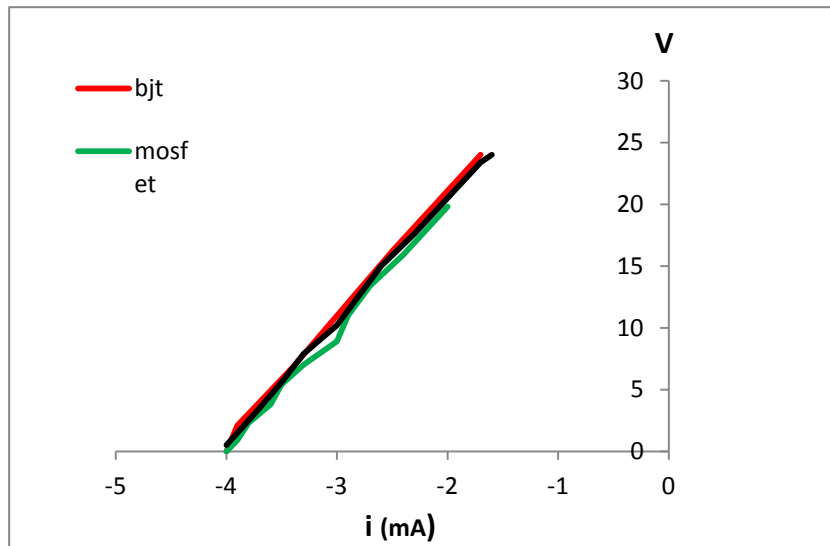
$$i_a = i_{t1} + i_{t2} \quad 4-14$$

Setelah melakukan pengujian didapatkan data dari hasil pegujian dengan pensaklaran yang divariasikan yaitu dengan menggunakan BJT (*Bipolar Junction*

Transistor), MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).dihasilkan data sebagai berikut:

Tabel 3. Data hasil pengujian saat $V_{in} = 40V$ dengan beban $10k\Omega$

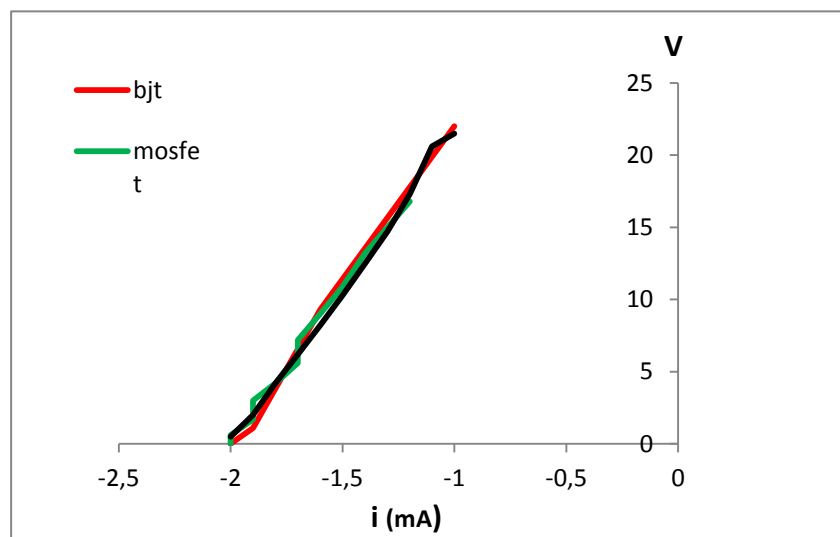
Duty cycle	MOSFET		IGBT		BJT		Perhitungan	
	I (mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}
0%	-4.0	0.0	-4.0	0.5	-4.0	0.0	-4.0	0.0
10%	-3.9	0.9	-3.7	3.5	-4.0	0.0	-3.8	2.0
20%	-3.8	2.3	-3.5	5.6	-4.0	0.0	-3.6	4.0
30%	-3.6	3.8	-3.3	7.9	-4.0	0.0	-3.4	6.0
40%	-3.5	5.4	-3.0	10.2	-4.0	0.0	-3.2	8.1
50%	-3.3	7.0	-2.8	12.6	-4.0	0.0	-3.0	10.1
60%	-3.0	8.9	-2.6	15.0	-4.0	0.0	-2.8	12.1
70%	-2.9	11.0	-2.3	17.6	-3.9	2.1	-2.6	14.2
80%	-2.7	13.4	-2.0	20.5	-3.4	6.8	-2.4	16.2
90%	-2.4	15.9	-1.7	23.4	-2.5	16.2	-2.2	18.2
100%	-2.0	19.8	-1.6	24.0	-1.7	24.0	-2.0	20.3



Gambar 51. Hubungan V-I BJT, MOSFET dan IGBT (**kwd II**) dengan beban $10k\Omega$ dan $V_{in} = 40V$

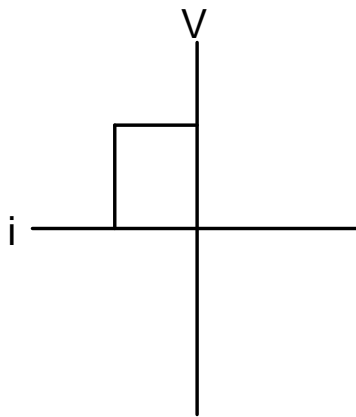
Tabel 4. Data hasil pengujian saat $V_{in} = 40V$ dengan beban $20k\Omega$

Duty cycle	MOSFET		IGBT		BJT		Perhitungan	
	I (mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}
0%	-2.0	0.0	-2.0	0.5	-2.0	0.0	-2.0	0.0
10%	-2.0	0.6	-1.9	2.0	-2.0	0.0	-1.9	1.9
20%	-1.9	1.7	-1.8	4.2	-2.0	0.0	-1.8	3.7
30%	-1.9	3.0	-1.7	6.2	-2.0	0.0	-1.7	5.6
40%	-1.8	4.2	-1.6	8.2	-2.0	0.0	-1.6	7.5
50%	-1.7	5.6	-1.5	10.3	-2.0	0.0	-1.5	9.3
60%	-1.7	7.2	-1.4	12.5	-2.0	0.0	-1.4	11.2
70%	-1.6	9.0	-1.3	14.7	-2.0	0.0	-1.3	13.0
80%	-1.5	10.9	-1.2	17.3	-1.9	1.1	-1.2	14.9
90%	-1.4	13.2	-1.1	20.6	-1.6	9.3	-1.1	16.7
100%	-1.2	16.8	-1.0	21.5	-1.0	22.0	-1.0	18.6

Gambar 52. Hubungan V-I BJT, MOSFET dan IGBT (kwd II) dengan beban $20 k\Omega$ dan $V_{in} = 40 V$

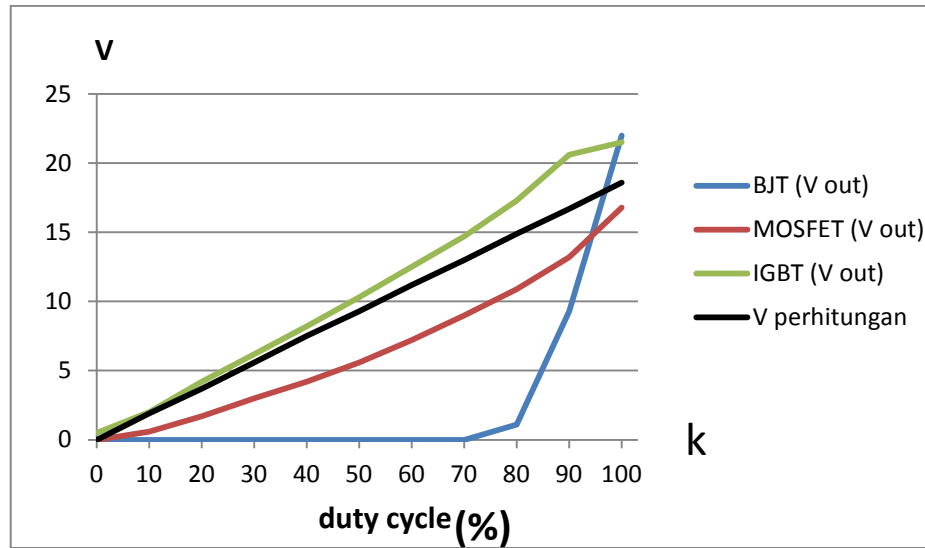
Dari tabel diatas dapat dilihat Nilai tegangan keluaran pada *chopper* kelas B ini selalu positif, sedangkan nilai arus yang didapatkan adalah selalu bernilai negatif, hal ini disebabkan karena masing –masing arus pada saat *off* maupun pada saat *on* bernilai negatif (lihat gambar 45.c). Dalam hal ini akan terjadi penurunan tegangan dari R 10k ke R 20k walaupun tidak terlalu besar sekali.

Dari tabel pengujian dan grafik diatas, telah dibuktikan bahwa *chopper* kelas B ini disebut juga sebagai *chopper* kuadran kesatu, tetapi bekerja pada kuadran kedua yang artinya adalah tegangan selalu bernilai positif sedangkan nilai arusnya selalu bernilai negatif sehingga jika melihat hubungan antar V-I seperti dalam diagram cartesius diatas maka akan terlihat jelas bahwasanya *chopper* kelas B ini akan selalu bekerja pada kuadran II (lihat grafik a dan b) baik melalui pensaklaran dengan menggunakan BJT, MOSFET maupun IGBT. Dengan melihat sistem kerja dari *chopper* kelas B ini, maka *chopper* kelas B ini sering digunakan sebagai *inverter* dan sebagai *regenerative braking* pada motor.

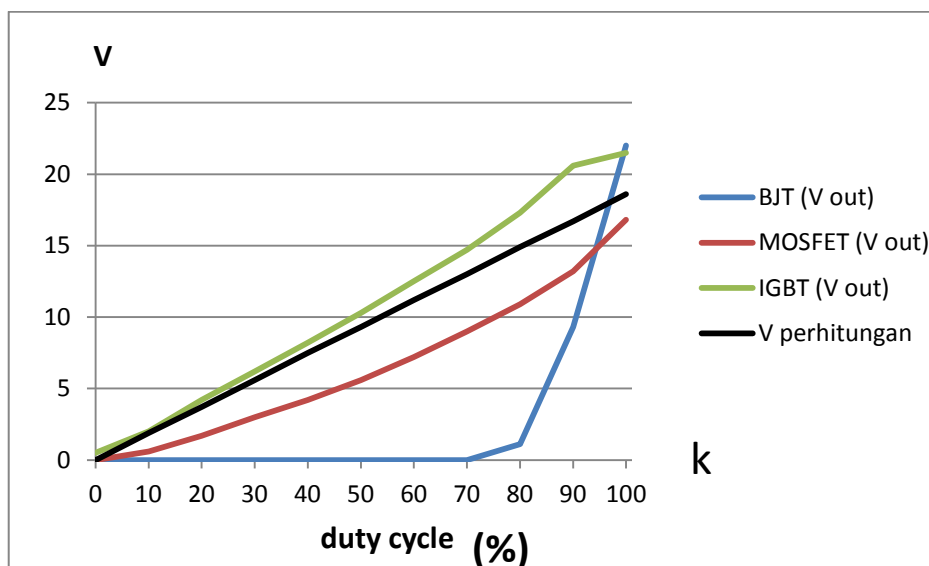


Gambar 53. Diagram kerja Kuadran kedua

Dari data diatas juga didapatkan grafik perbandingan V out yang dihasilkan oleh masing BJT, MOSFET dan IGBT terhadap tegangan perhitungannya seperti yang diperlihatkan pada gambar:



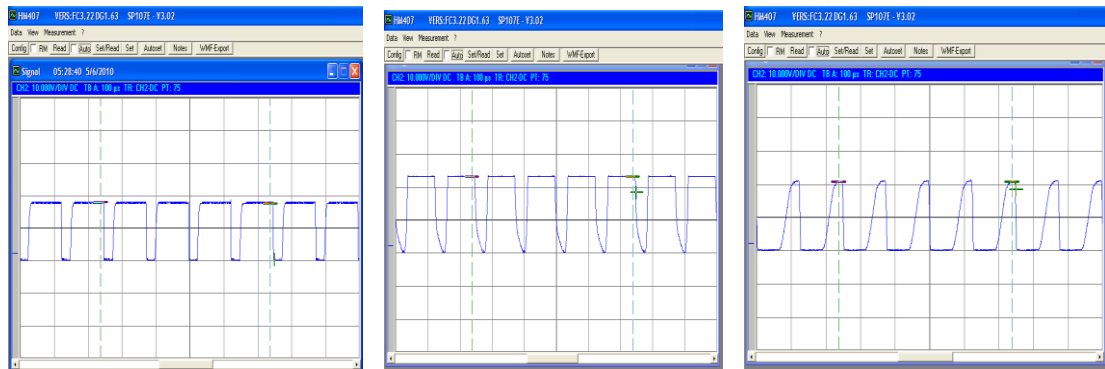
Gambar 54. Perbandingan V out BJT, MOSFET dan IGBT dengan Vin 40V dan R 10k pada pengujian *chopper* Kelas B



Gambar 55. Perbandingan V out BJT, MOSFET dan IGBT dengan Vin 40V dan R 20k pada pengujian *chopper* Kelas B

Dari grafik perbandingan tegangan output terlihat untuk IGBT sendiri, pensaklarannya cenderung sudah stabil namun nilai tegangan keluaran yang dihasilkannya selalu berada diatas dari nilai tegangan perhitungan, hal ini dikarenakan waktu on yang dihasilkan IGBT lebih lama dibandingkan dengan nilai pengaturannya. Pada grafik perbandingan terlihat saat nilai k = 90%

menghasilkan nilai V output yang hampir sama dengan nilai output saat $k = 100\%$. Gambar gelombang keseluruhan hasil dari pengujian kelas b dapat dilihat dalam lampiran.



a. Mosfet

b. IGBT

c. BJT

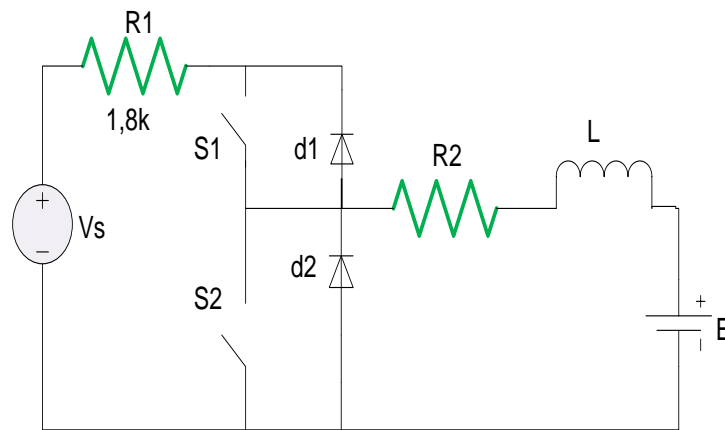
Gambar 56. Bentuk Sinyal Gelombang Keluaran Mosfet, IGBT dan BJT Pada $k=80\%$

Pada BJT saat diberikan nilai $k = 0\%$ sampai 70% dengan V_{in} 40 V dan beban $R = 10\text{ k}\Omega$ nilai tegangan masih berada pada titik nol. Selanjutnya akan terjadi kenaikan tegangan output yang signifikan dari $k=80\%$ ke $k=90\%$ dan $k=100\%$, dan hal ini pastinya sangat tidak sesuai jika dibandingkan dengan pengaturan dengan V_{out} perhitungan. Namun saat nilai V_{in} semakin dinaikkan maka BJT akan menghasilkan V_{out} yang mendekati nilai V_{out} perhitungan jika dibandingkan saat di berikan tegangan input 40 V . Hal ini membuktikan bahwa pensaklaran yang dilakukan oleh BJT kurang baik karena tegangan output yang dihasilkannya cenderung tidak stabil baik ketika dilakukan variasi tegangan maupun variasi dutycycle. Berbeda dengan hasil pengujian IGBT dan BJT, pada MOSFET hasil pengujian yang didapatkan selalu menghasilkan tegangan V_{out}

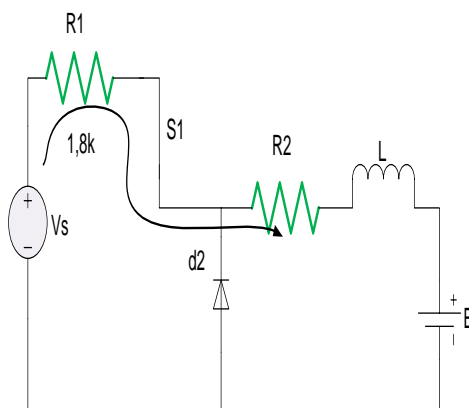
yang hampir sama dengan V_{out} perhitungan. Data hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

c. Kelas C

Sama seperti kelas B, kelas C ini juga dilakukan dengan memvariasikan pensaklarannya dengan menggunakan tiga jenis transistor yaitu, BJT, MOSFET dan IGBT. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan tegangan input, % *duty cycle* dan beban.

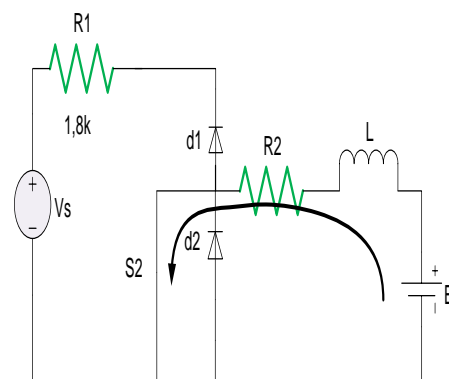


a). Rangkaian Kelas C



b). Rangkaian ekivalen

Saklar 1 *close*



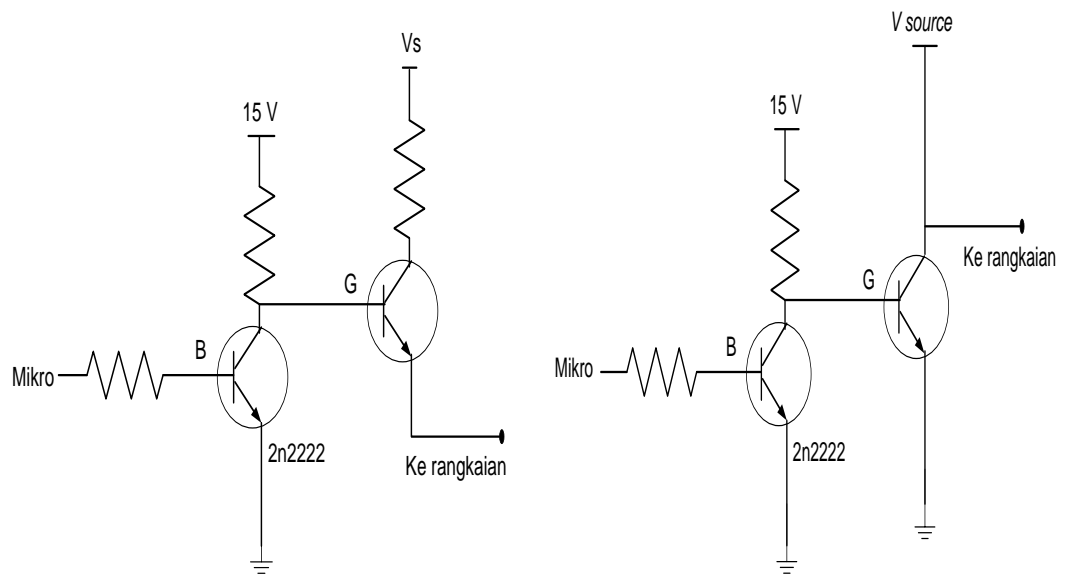
c). Rangkaian ekivalen

Saklar 2 *open*

Gambar 57. Rangkaian Ekivalen *Chopper* Kelas C

Dengan memperhatikan gambar diatas, maka dapat dianalisa rangkaian dari chopper kelas C yang dapat dibagi menjadi 2 jenis rangkaian ekivalen yaitu pada saat saklar 1 *close* = saklar 2 *open* dan pada saat saklar 2 *close* = saklar 1 *open*. Bila S1 *close* dan S2 akan *open*, maka arus akan mengalir dari *power supply* melewati R1, S1 dan langsung menuju sumber baterai. Dengan demikian nilai arus adalah positif. Sedangkan saat S1 *open* dan S2 *close* maka tegangan dari power supply akan *di block* oleh diode 1, Sehingga arus akan mengalir dari sumber baterai menuju L, R2 dan langsung ke ground. Dengan demikian nilai arusnya adalah negatif.

Proses kerja diatas merupakan proses kerja chopper ketika menggunakan saklar biasa atau saklar manual yang terlihat hanya berfungsi sebagai pemutus dan penghubung saja. Dalam penelitian ini sudah disebutkan sebelumnya bahwa saklar yang digunakan adalah saklar elektrik berupa MOSFET, BJT dan IGBT yang tentunya mempunyai karakteristik tertentu. Untuk lebih memahami proses kerja *chopper* kelas C yang tentunya sangat dibutuhkan dalam perhitungan berikutnya, ada baiknya kita lihat terlebih dahulu sebuah contoh proses rangkaian yang sebenarnya terjadi pada saklar elektrik yang dimulai dari rangkaian penguatnya.

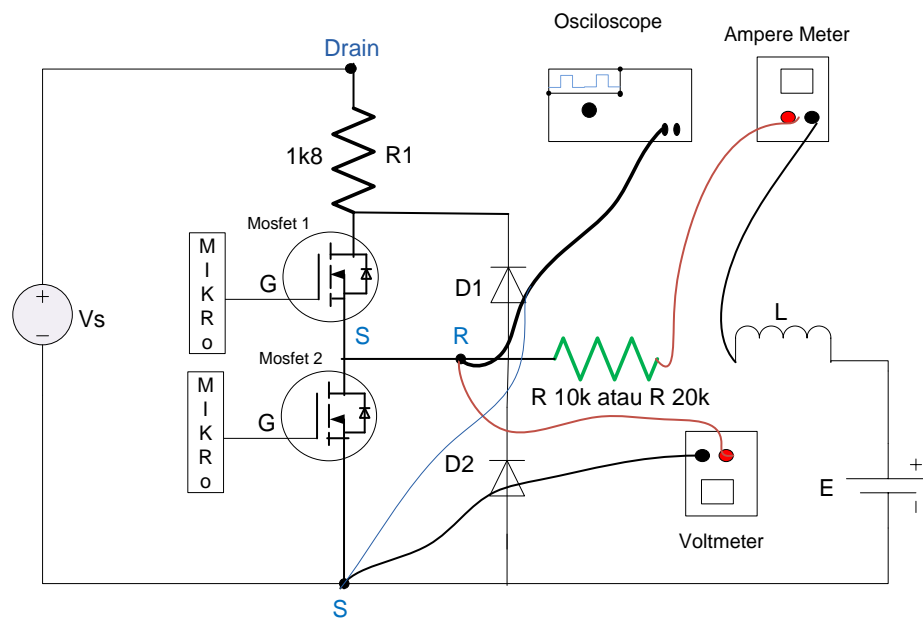


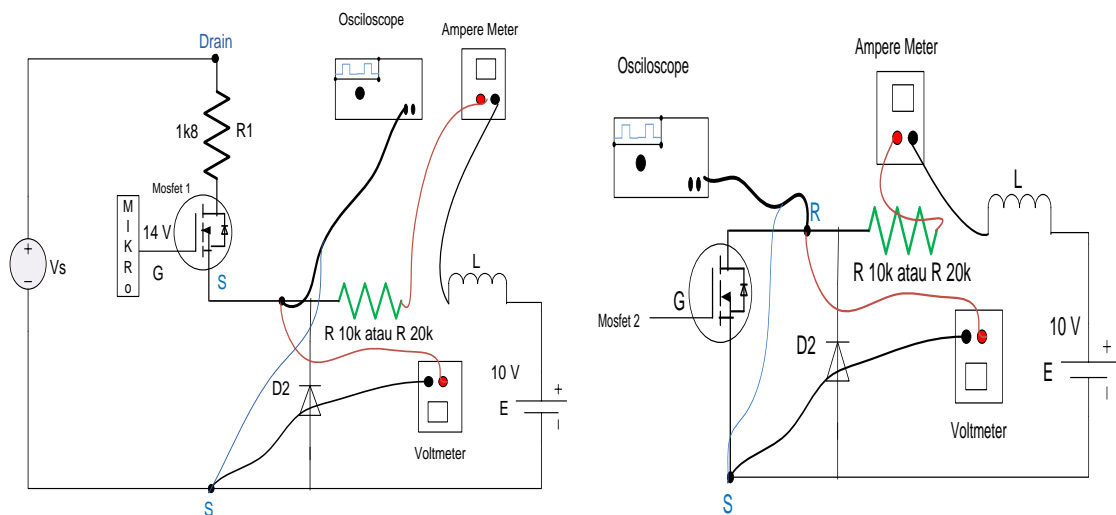
a). Rangkaian penguat

Saklar 1

b).Rangkaian penguat

Saklar 2

Gambar 58. Contoh Rangkaian Penguat *Chopper* Kelas CGambar 59. Mode Rangkaian *Chopper* Kelas C Pada Mosfet



b). Rangkaian ekivalen

Saklar 1 *close*

c).Rangkaian ekivalen

Saklar 2 *open*Gambar 60. Rangkaian Ekivalen *Chopper* Kelas C Pada Mosfet

Dengan memperhatikan gambar 55 dan gambar 56, maka proses kerja *chopper* kelas C dapat dianalisa sebagai berikut. Ketika diberikan dutycycle 0% (gambar 55 a), keluaran yang terjadi dari mikro adalah logika low sehingga tidak terdapat tegangan pada transistor 2n2222. Maka arus akan mengalir dari sumber tegangan 15 V menuju kaki G mosfet dan secara otomatis akan terdapat nilai tegangan pada kaki *sourcena* yang langsung terhubung kerangkaian selanjutnya. Dengan kata lain apabila dutycycle diatur 0%, maka saklar 1 akan *on*, saklar 2 akan *off* dan terdapat nilai tegangan pada rangkaian.

Ketika diberikan dutycle 100% (gambar 55 a), artinya diberikan logika high sehingga terdapat tegangan pada transistor 2n2222 yang menyebabkan tegangan dari *power supply* 15 V langsung menuju ground sehingga tidak terdapat tegangan

pada kaki G mosfet. Karena tidak terdapat tegangan pada kaki G, maka menyebabkan saklar *off* dan secara otomatis maka saklar 2 akan *on*.

Nilai tegangan pada R2 saat saklar 1 *close* adalah 15 V (gambar 54 b), hal ini di peroleh dari pengukuran voltmeter yang dilakukan pada keluaran kaki *source* (*emitor*). Nilai tegangan pada kaki *gate* mosfet sebesar 14 V sehingga nilai tegangan pada kaki *sourcenya* sebesar kurang lebih 15 V. Sedangkan nilai tegangan pada R2 saat saklar 2 *close* adalah 0 karena arus yang berasal dari baterai langsung menuju ground.

$$V_a = (1 - k).V_e \quad 4-15$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai arus, tetap melihat 2 jenis rangkaian ekivalen diatas. Nilai arus yang didapat pada saat saklar 1 *close* (*on*) adalah:

$$i_t = \frac{V_{source} - E}{R2} (1 - e^{-\left(\frac{R2}{L}\right)t}) \quad 4-16$$

Setelah nilai arus diperoleh, selanjutnya adalah mencari nilai arus sesuai dengan variasi % duty cycle.

$$i_{t1} = (1 - k).i_t \quad 4-17$$

Untuk mendapatkan nilai arus yang didapat pada saat saklar 2 *close* (*on*) adalah:

$$i_t = - \frac{E}{R2} (1 - e^{-\left(\frac{R2}{L}\right)t}) \quad 4-18$$

Setelah nilai arus diperoleh, selanjutnya adalah mencari nilai arus sesuai dengan variasi % *duty cycle*.

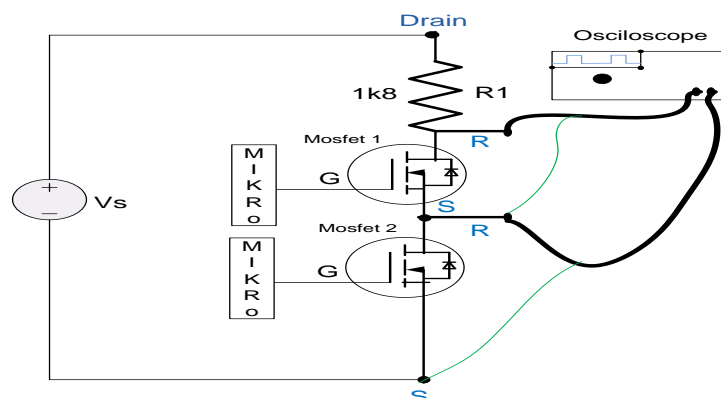
$$i_{t2} = k \cdot i_t \quad 4-19$$

Maka Untuk mendapatkan nilai arus totalnya adalah dengan menjumlahkan besarnya nilai arus pada saat t_1 dengan nilai arus pada saat t_2 .

$$i_a = i_{t1} + i_{t2} \quad 4-20$$

Signal gelombang dari chopper kelas C ini sendiri akan cenderung seperti prinsip kerja dari saklar 2 sendiri yaitu berkebalikan dengan saklar 1, hal ini disebabkan oleh rangkain penguat dari saklar 1 dan kaki *sourcanya* yang tidak langsung dihubungkan ke ground tetapi menuju rangkaian kaki collector saklar 2.

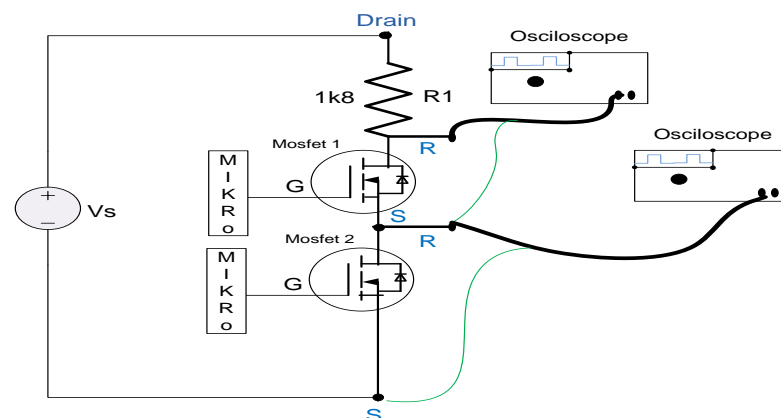
Agar *chopper* kelas C ini dapat bekerja maka, dalam percobaan kelas C ini dipastikan agar saklar satu dengan saklar dua tidak bekerja secara bersamaan. Sehingga cara yang digunakan adalah dengan mengatur signal gelombang masing-masing saklar melalui program *mikrokontroler* agar saling berkebalikan (*invert*).



Gambar 61. Pengujian Signal Gelombang Dengan Dual Channel

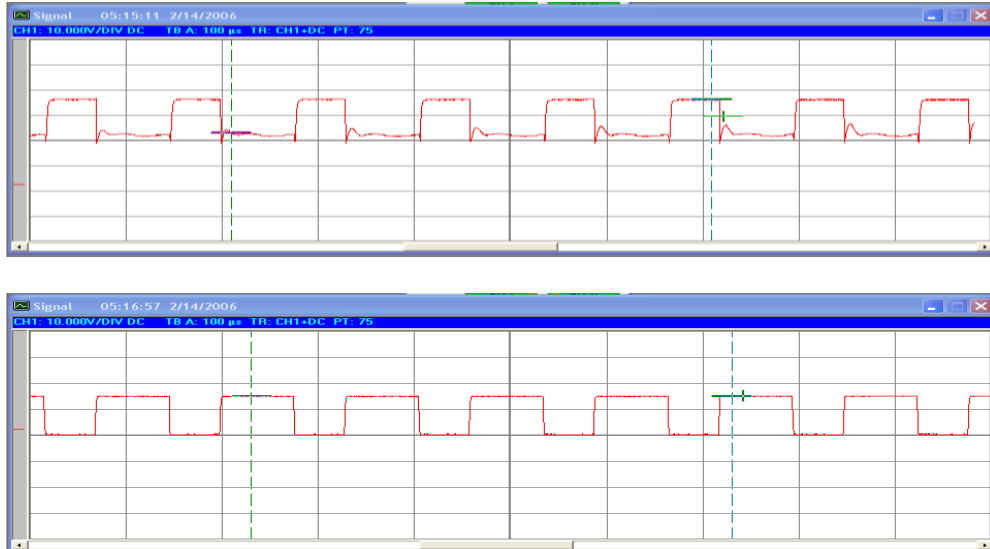
Ketika dilakukan teknik melihat signal gelombang dengan dual channel seperti gambar diatas dengan menggunakan osiloskop biasa, ternyata salah satu dari saklar tersebut seperti tidak berfungsi (berupa garis lurus). Hal ini tentu saja bisa terjadi, dengan melihat gambar diatas lebih cermat lagi. Pada gambar diatas perhubungan antara titik “S” saklar 1 dengan titik “R” saklar 2 dihubungkan ke ground osiloskop, begitu juga titik “S” pada saklar 2 dihubungkan dengan ground yang sudah terhubung juga dengan ground *power supply*. Pada kenyataanya, ground pada masing-masing osiloskop adalah saling terhubung, dengan demikian secara tidak langsung titik “S” pada saklar 1 sudah langsung terhubung dengan ground sehingga arus yang mengalir dari titik “R” saklar 1 akan selalu menuju ground ketika saklar 1 on. Tentunya hal ini tidak diinginkan, karena yang diharapkan seharusnya arus mengalir dari titik “S” saklar 1 menuju ke titik “R” saklar 2.

Solusi yang diambil untuk mengetahui signal gelombang masing-masing saklar adalah dengan menggunakan single channel yang dilakukan secara bergantian ataupun dengan menggunakan dua buah oscilloscope.



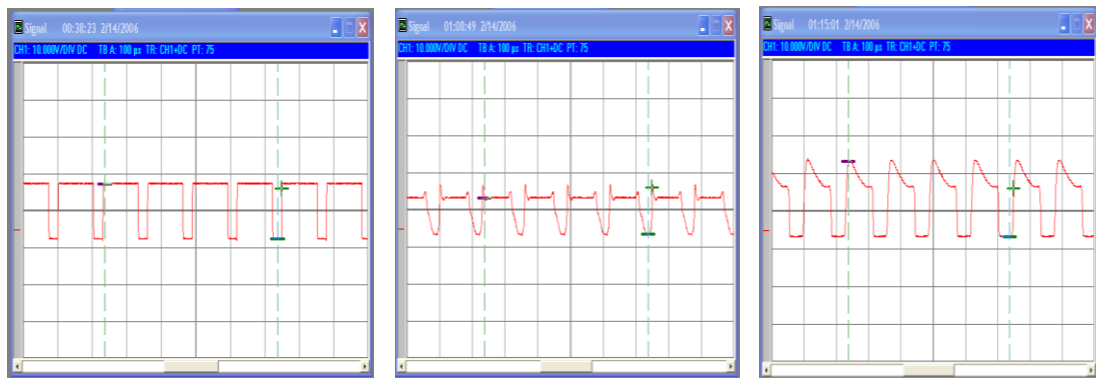
Gambar 62. Pengujian Masing-masing Signal Gelombang Dengan 2 Oscilloscope

Dari percobaan gambar diatas maka diperoleh salah satu contoh signal gelombang saklar 1 dan saklar 2.



Gambar 63. Signal Gelombang saklar 1 dan saklar 2 (40%)

Dari gambar diatas maka dapat terlihat dengan jelas bahwa saklar 1 dan saklar 2 adalah aktif dan saling berkebalikan. Kondisi diatas merupakan kondisi ketika diberikan dutycycle 40%, sehingga saklar 2 akan otomatis menjadi 60%.



a. Mosfet

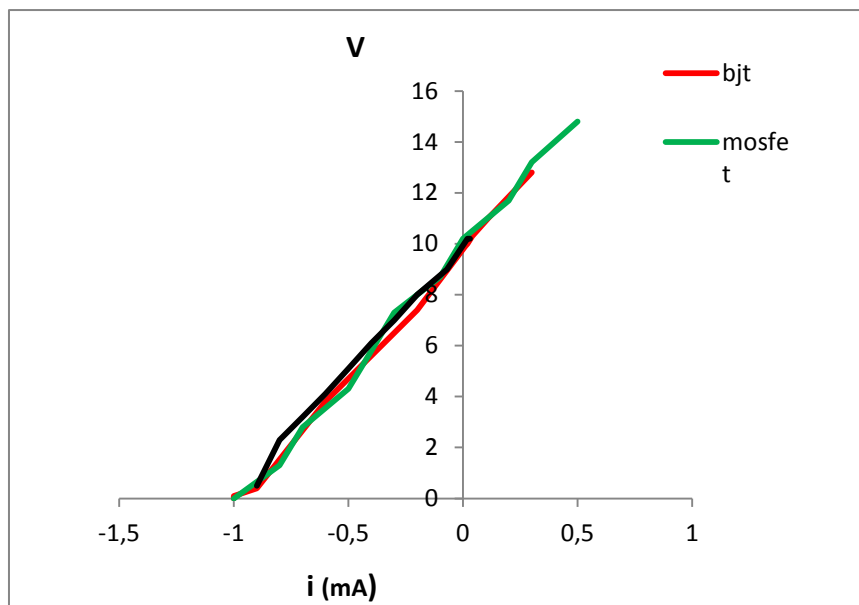
b. IGBT

c. BJT

Gambar 64. Bentuk Sinyal Gelombang Keluaran Mosfet, IGBT dan BJT Pada k=30%

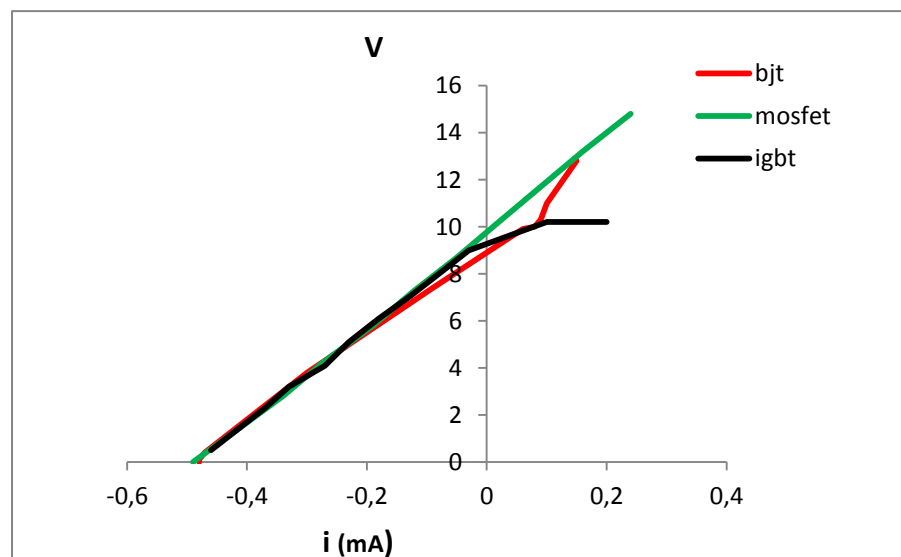
Tabel 5. Data hasil pengujian saat $V_{in} = 40V$ dengan beban $10k\Omega$

Duty cycle	MOSFET		IGBT		BJT	
	I (mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}
0%	0.5	14.7	0.03	10.2	0.3	12.8
10%	0.3	13.2	0.02	10.2	0.11	11.0
20%	0.2	11.7	-0.07	9.0	0.04	10.3
30%	0.0	10.2	-0.2	8.0	0.02	10.0
40%	-0.1	8.7	-0.3	7.0	0.01	9.9
50%	-0.3	7.2	-0.4	6.1	-0.2	7.4
60%	-0.4	5.8	-0.5	5.1	-0.6	3.8
70%	-0.5	4.3	-0.6	4.1	-0.9	0.4
80%	-0.7	2.8	-0.7	3.2	-1.0	0.1
90%	-0.8	1.3	-0.8	2.3	-1.0	0.0
100%	-1.0	0	-0.9	0.5	-1.0	0.0

Gambar 65. Hubungan V-I BJT, MOSFET dan IGBT (kwd I&II) dengan beban $10k\Omega$ dan $V_{in} = 40V$

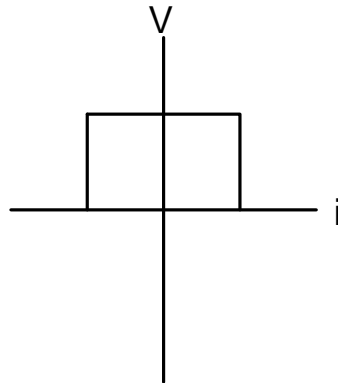
Tabel 6. Data hasil pengujian saat $V_{in} = 40V$ dengan beban $20k\Omega$

Duty cycle	MOSFET		IGBT		BJT	
	I (mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}	i(mA)	V_{out}
0%	0.24	14.8	0.2	10.2	0.15	12.8
10%	0.16	13.3	0.1	10.2	0.10	11.0
20%	0.09	11.8	-0.03	9.0	0.09	10.3
30%	0.02	10.3	-0.08	8.0	0.08	10.0
40%	-0.05	8.8	-0.13	7.0	0.06	9.9
50%	-0.12	7.3	-0.18	6.1	-0.09	7.4
60%	-0.19	5.8	-0.23	5.1	-0.30	3.8
70%	-0.27	4.3	-0.27	4.1	-0.47	0.4
80%	-0.34	2.9	-0.33	3.2	-0.48	0.1
90%	-0.42	1.4	-0.37	2.3	-0.48	0.0
100%	-0.49	0	-0.46	0.5	-0.48	0.0

Gambar 66. Hubungan V-I BJT, MOSFET dan IGBT (kwd I&II) dengan beban $20 k\Omega$ dan V_{in} 40 V

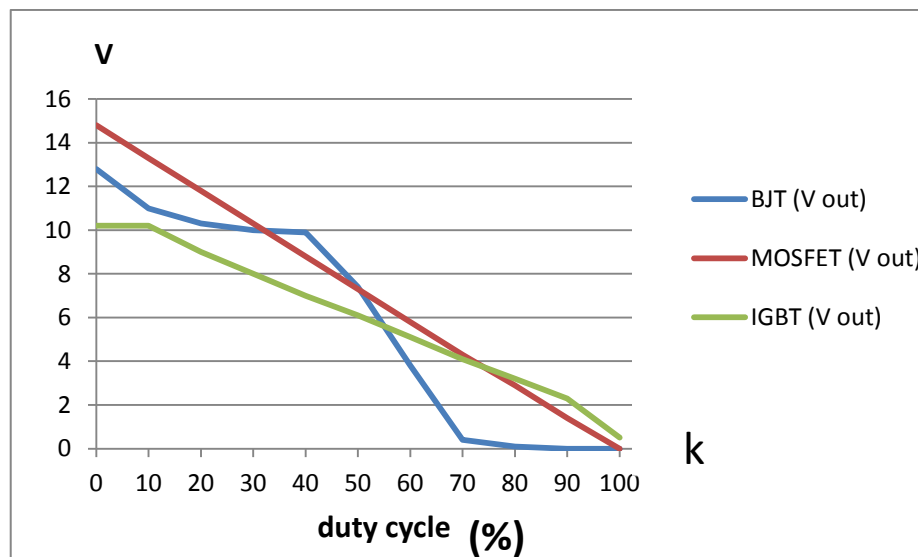
Dari tabel pengujian dan grafik diatas, telah dibuktikan bahwa *chopper* kelas C akan bekerja pada kuadran I&II. *Chopper* kelas C adalah gabungan dari *chopper* A dan *chopper* kelas B. Hal ini dapat dilihat dari tegangan keluaran dan arus keluarannya, yaitu tegangan selalu bernilai positif sedangkan nilai arusnya dapat bernilai negatif atau positif. Sehingga jika hubungan antar V-I digambar seperti

grafik diatas maka akan terlihat jelas bahwasanya *chopper* kelas C ini akan selalu bekerja pada kuadran I&II baik melalui pensaklaran dengan menggunakan BJT, MOSFET maupun IGBT.. Dengan melihat sistem kerja dari *chopper* kelas C ini, maka *chopper* kelas C ini sering digunakan sebagai *inverter* dan sebagai *regenerative braking* pada motor.

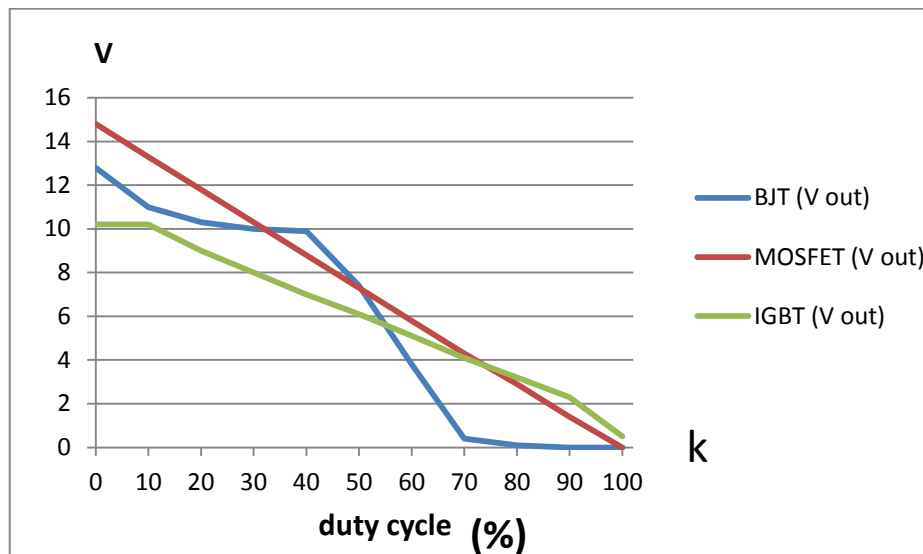


Gambar 67. Diagram kerja Kuadran I&II

Dari data diatas juga didapatkan grafik perbandingan V_{out} yang dihasilkan oleh BJT, MOSFET dan IGBT seperti yang diperlihatkan pada gambar:



Gambar 68. Perbandingan V_{out} BJT, MOSFET dan IGBT dengan V_{in} 40V dan R 10k pada pengujian *chopper* Kelas C



Gambar 69. Perbandingan V_{out} BJT, MOSFET dan IGBT dengan V_{in} 40V dan R 20k pada pengujian *chopper* Kelas C

Dari grafik perbandingan masing-masing tegangan output terlihat bahwa nilai tegangan saat menggunakan MOSFET lebih stabil dan konstan. Pada BJT sendiri terlihat bahwa tegangan keluaran yang dihasilkannya tidak stabil dan cenderung tidak beraturan (berbentuk zigzag). Berbeda dengan hasil pengujian IGBT yang V_{out} yang dihasilkannya ataupun Interval kenaikan tegangannya akan terlihat cenderung lebih stabil ketika diberikan variasi *duty cycle* dari nilai $k = 0$ sampai seterusnya.