



ELEKTRONIKA ANALOG

Elektronika Analog

Herman Dwi Surjono, Ph.D.

CERDAS
ULET
KREATIF
www.cerdas.co.id
PUBLISHER



Elektronika Analog

Disusun Oleh: **Herman Dwi Surjono, Ph.D.**

© 2008 All Rights Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang

Penyunting : **Tim Cerdas Ulet Kreatif**

Perancang Sampul : **Dhega Febiharsa**

Tata Letak : **Dhega Febiharsa**

Diterbitkan Oleh:

Penerbit Cerdas Ulet Kreatif

Jl. Manggis 72 RT 03 RW 04 Jember Lor – Patrang

Jember - Jawa Timur 68118

Telp. 0331-422327 Faks. 0331422327

Katalog Dalam Terbitan (KDT)

Herman Dwi Surjono, **Elektronika Analog**/Herman Dwi Surjono, Penyunting:
Tim Cerdas Ulet Kreatif, 2008, 112 hlm; 14,8 x 21 cm.

ISBN 978-602-98174-1-6

1. Hukum Administrasi	I. Judul
II. Tim Cerdas Ulet Kreatif	112

Distributor:

Penerbit CERDAS ULET KREATIF

Website : www.cerdas.co.id - email : buku@cerdas.co.id

Cetakan Kedua, 2011

Undang-Undang RI Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta

Ketentuan Pidana

Pasal 72 (ayat 2)

1. Barang Siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Kata Pengantar



Buku ini diperuntukkan bagi siapa saja yang ingin mengetahui elektronika baik secara teori, konsep dan penerapannya. Pembahasan dilakukan secara komprehensif dan mendalam mulai dari pemahaman konsep dasar hingga ke taraf kemampuan untuk menganalisis dan mendesain rangkaian elektronika. Penggunaan matematika tingkat tinggi diusahakan seminimal mungkin, sehingga buku ini bias digunakan oleh berbagai kalangan. Pembaca dapat beraktivitas dengan mudah karena didukung banyak contoh soal dalam hamper setiap pokok bahasan serta latihan soal pada setiap akhir bab. Beberapa rangkaian penguat sedapat mungkin diambilkan dari pengalaman praktikum.

Sebagai pengetahuan awal, pemakai buku ini harus memahami teori dasar rangkaian DC dan matematika dasar. Teori Thevenin, Norton, dan Superposisi juga digunakan dalam beberapa pokok bahasan. Di samping itu penguasaan penerapan hukum Ohm dan Kirchhoff merupakan syarat mutlak terutama pada bagian analisis dan perancangan.

Bab 1 membahas JFET, D-MOSFET dan E-MOSFET. Pembahasan dimulai dari konstruksi, prinsip kerja, karakteristik transfer dan output untuk ketiga keluarga FET tersebut.

Bab 2 membahas beberapa metode pemberian bias FET. Bias yang sering dipakai dalam rangkaian FET diantaranya adalah bias tetap, bias sendiri, dan bias pembagi tegangan.

Bab 3 membahas analisis penguat FET dalam tiga macam konfigurasi, yakni CS, CG dan pengikut Source. Namun di awal bab akan dijelaskan terlebih dahulu model siyal kecil FET.

Akhirnya bab 4 membahas penguat daya yakni penguat kelas A, penguat push-pull dan komplementer.

Semoga buku ini bermanfaat bagi siapa saja. Saran-saran dari pembaca sangat diharapkan.

Yogyakarta, Desember 2008

Penulis,

Herman Dwi Surjono, Ph.D.

Dosen Jurusan Pendidikan Teknik Elektronika, FT- UNY

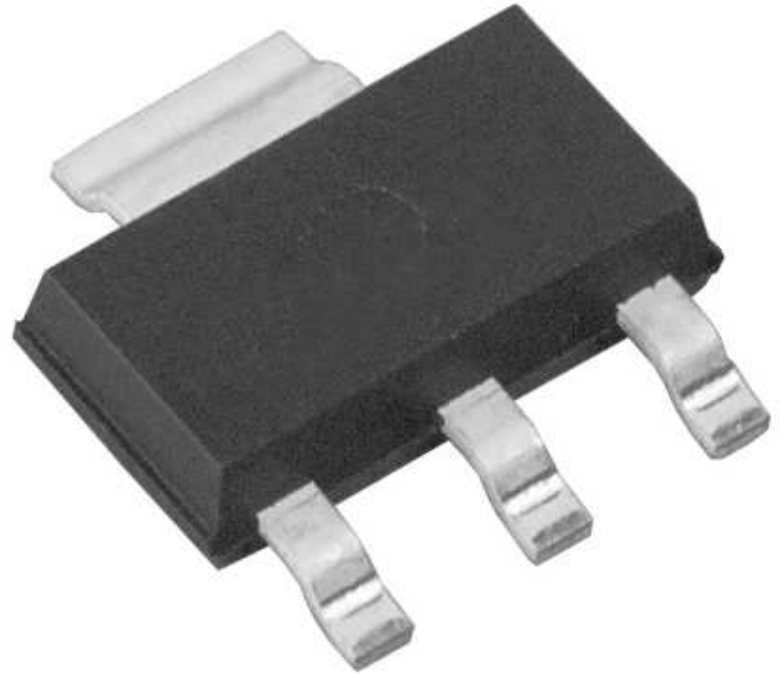
Daftar Isi

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. TRANSISTOR EFEK MEDAN	1
1.1. Pendahuluan	1
1.2. Konstruksi dan Karakteristik JFET	2
1.3. Karakteristik Transfer JFET	7
1.4. Konstruksi dan Karakteristik D-MOSFET	9
1.5. Konstruksi dan Karakteristik E-MOSFET	13
1.6. Ringkasan	18
1.7. Soal Latihan	19
2. BIAS DC FET	21
2.1. Pendahuluan	21
2.2. Bias Tetap	21
2.3. Bias Sendiri (<i>Self Bias</i>)	25
2.4. Bias Pembagi Tegangan	32
2.5. Ringkasan	38
2.6. Soal Latihan	39
3. PENGUAT FET	43
3.1. Pendahuluan	43
3.2. Model Sinyal Kecil FET	43
3.3. Analisis Penguat CS	49
3.4. Penguat CS dengan RS	53
3.5. Rangkaian Pengikut Source	61
3.6. Penguat Gate Bersama (CG)	65
3.7. Ringkasan	68
3.8. Soal Latihan	69
4. PENGUAT DAYA	73
4.1. Pendahuluan	73
4.2. Kelas Penguat	73
4.3. Penguat Daya Kelas A Beban Resistor	76
4.4. Penguat Daya Kelas A Beban Trafo	83
4.5. Penguat Daya <i>Push Pull</i> Kelas B	86
4.6. Penguat Daya Komplementer	93
4.7. Ringkasan	96
4.8. Soal Latihan	97
LAMPIRAN A	101
LAMPIRAN B	102
INDEKS	103

Herman Dwi Surjono, Ph.D.
Elektronika Analog

Bab 3

Penguat FET



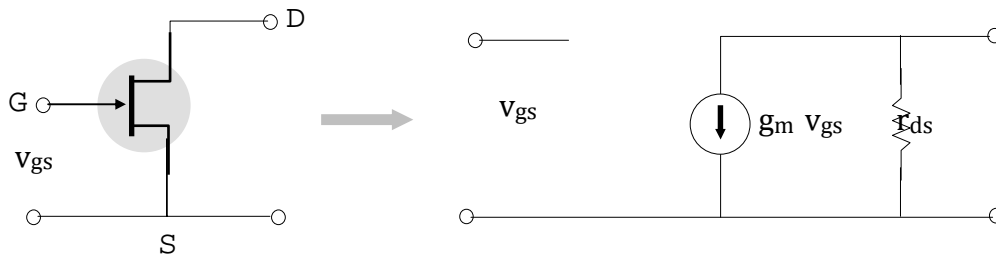
3.1 Pendahuluan

Rangkaian penguat dengan menggunakan FET, seperti juga transistor bipolar, selalu diberikan tegangan bias agar dapat bekerja sebagai penguat. Tegangan bias untuk FET dapat diberikan dengan berbagai cara. Diantara yang paling banyak digunakan untuk rangkaian penguat FET adalah self-bias. Pemberian tegangan bias yang tepat akan menjamin FET dapat bekerja pada daerah yang aktif.

Beberapa metode pemberian bias termasuk menentukan titik kerja FET akan dibahas pada bab ini. Kemudian dilanjutkan dengan analisis rangkaian penguat FET guna menentukan beberapa parameter penguat seperti penguatan tegangan (A_v), penguatan arus (A_i) dan sebagainya. Disamping analisis rangkaian, juga dikenalkan metode perancangan suatu penguat dengan FET.

3.2 Model sinyal kecil FET

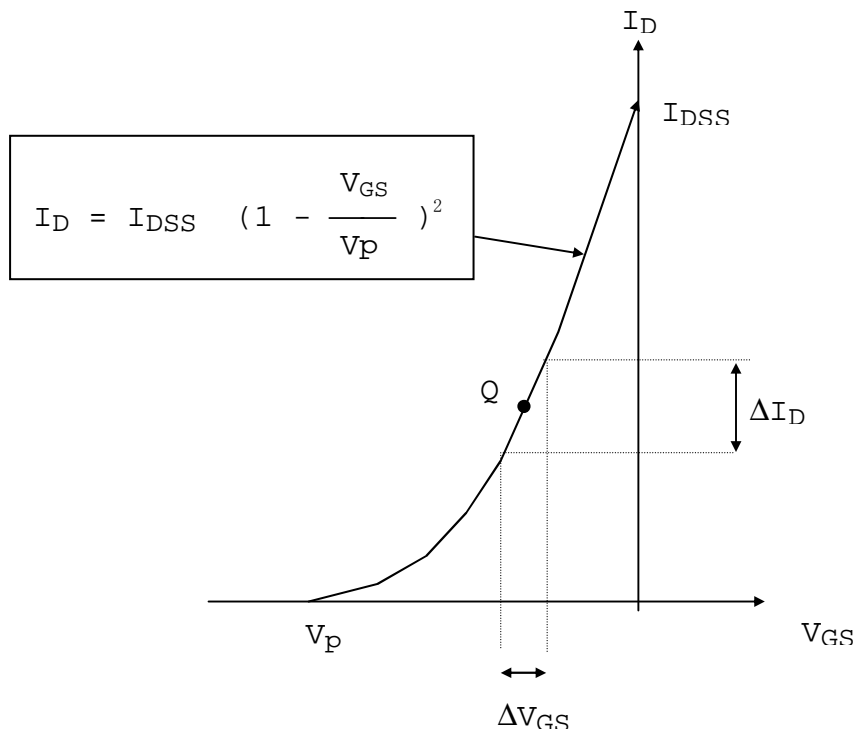
FET dapat digunakan sebagai penguat sinyal kecil dengan impedansi input yang sangat tinggi. Untuk melakukan analisis ac pada rangkaian penguat FET diperlukan rangkaian ekuivalen atau modelnya. Dengan analisis ini dapat diperoleh beberapa parameter penguat seperti: A_v , A_i , Z_i , dan Z_o . Rangkaian ekuivalen ac (model ac) suatu JFET adalah seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Rangkaian ekivalen ac JFET

Pada rangkaian ekivalen ac JFET terlihat bahwa bagian input merupakan rangkaian terbuka yang menunjukkan bahwa input JFET mempunyai impedansi yang sangat tinggi. Bagian output JFET terdiri atas sumber arus yang tergantung pada nilai g_m dan v_{gs} dan diparalel dengan r_{ds} .

Parameter FET yang penting adalah transkonduktansi atau g_m . Parameter g_m merupakan perbandingan antara perubahan arus I_D dan perubahan tegangan V_{GS} disekitar titik kerja dengan V_{DS} konstan. Nilai g_m dapat diperoleh dari kurva transfer, sehingga kurva transfer ini sering juga disebut dengan kurva transkonduktansi.



Gambar 3.2 Kurva transfer untuk menentukan transkonduktansi

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \quad \left| \quad V_{DS} = \text{konstan} \right.$$

Harga g_m tergantung dari posisi titik kerja Q, karena kurva transkonduktansi tidak linier. Harga g_m terkecil diperoleh apabila $V_{GS} = V_p$ atau pada saat JFET cut-off. Sedangkan harga g_m terbesar diperoleh saat $V_{GS} = 0$, yakni pada saat arus ID sama dengan IDSS. Harga g_m pada saat $V_{GS} = 0$ ini disebut dengan g_{m0} .

Secara matematis harga g_m dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan transfer atau persamaan Shockley:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$

sehingga didapatkan:

$$g_m = \frac{2 I_{DSS}}{|V_p|} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$

$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$(3.1)
--	------------

atau

$g_m = g_{m0} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$(3.2)
---	------------

dimana:

$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{ V_p }$(3.3)
-----------------------------------	------------

Persamaan 3.1, 3.2 dan 3.3 berlaku untuk JFET dan D-MOSFET baik kanal P maupun kanal N. Sedangkan untuk E-MOSFET karena persamaan transfernya berbeda dengan kedua keluarga FET tersebut, maka harga gmnya juga berbeda. Harga gm untuk E-MOSFET diturunkan dari persamaan transfernya (persamaan 1.2):

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

sehingga didapatkan:

$$g_m = 2 \sqrt{k I_D}$$

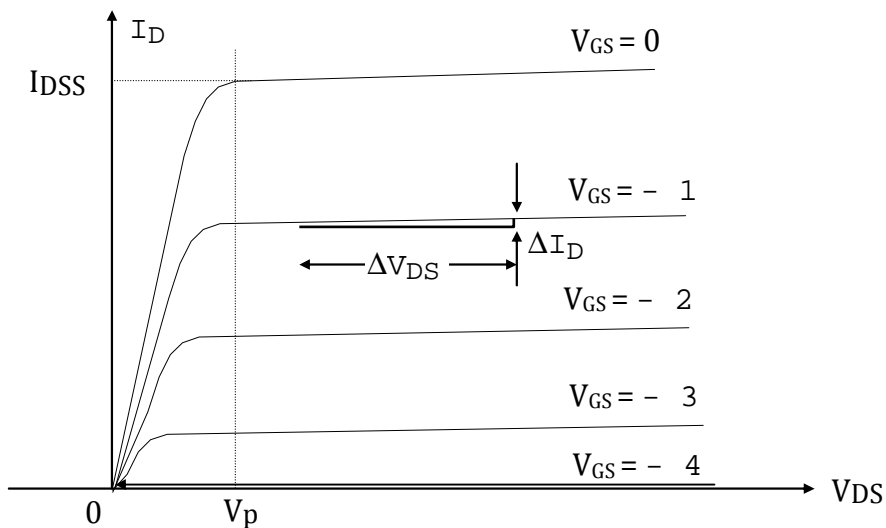
..... (3.4)

dimana:

$$k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_T)^2}$$

Persamaan 3.4 tersebut berlaku untuk E-MOSFET baik untuk kanal N maupun kanal P.

Dari rangkaian ekivalen ac JFET gambar 3.1, selain parameter gm yang merupakan parameter penting lainnya adalah parameter rds. Parameter rds merupakan resistansi output FET yang nilai tipikalnya berkisar antara 40 KΩ hingga 100 KΩ, sehingga dalam berbagai analisis praktek parameter ini sering diabaikan. Apabila parameter rds diabaikan, maka resistor tersebut dianggap terbuka atau tak terhingga.



Gambar 3.3 Kurva karakteristik JFET untuk menentukan parameter rds

Parameter r_{ds} dapat diperoleh dari kurva karakteristik output suatu FET. Gambar 3.3 menunjukkan cara mendapatkan parameter r_{ds} dari kurva output FET.

$$r_{ds} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \quad \left| \begin{array}{l} \\ V_{GS} = \text{konstan} \end{array} \right.$$

Untuk memperoleh harga r_{ds} yang akurat secara grafis, diperlukan kurva output JFET dengan skala yang teliti. Sulitnya mendapatkan parameter r_{ds} secara grafis karena kurva output terlihat mendatar. Akan tetapi pada umumnya harga r_{ds} sudah diketahui dari buku data yang dikeluarkan pabrik. Pabrik umumnya mengeluarkan spesifikasi parameter r_{ds} dalam istilah y_{os} . Parameter y_{os} ini disebut dengan admitansi output yaitu kebalikan dari resistansi output.

$$r_{ds} = \frac{1}{y_{os}}$$

..... (3.5)

dimana: r_{ds} dalam satuan Ohm (Ω)
 y_{os} dalam satuan Siemens (S)

Contoh 3.4

Hitunglah harga g_m untuk JFET yang mempunyai data $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ dan $V_p = -4 \text{ Volt}$ pada titik kerja $V_{GSQ} =$:

- (a) - 0.5 Volt
- (b) - 1.5 Volt
- (c) - 2.5 Volt

Penyelesaian:

Menentukan g_m pada saat $V_{GS} = 0$ yaitu g_{m0} dengan persamaan 3.3:

$$g_{m0} = \frac{2 I_{DSS}}{|V_p|} = \frac{2 (8\text{mA})}{|-4|} = 4 \text{ mS}$$

(a) pada $V_{GSQ} = - 0,5$ Volt:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$

$$g_m = 4\text{mS} \left(1 - \frac{- 0.5}{- 4} \right) = 3,5 \text{ mS}$$

(b) pada $V_{GSQ} = - 1,5$ Volt:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$

$$g_m = 4\text{mS} \left(1 - \frac{- 1.5}{- 4} \right) = 2,5 \text{ mS}$$

(c) pada $V_{GSQ} = - 2,5$ Volt:

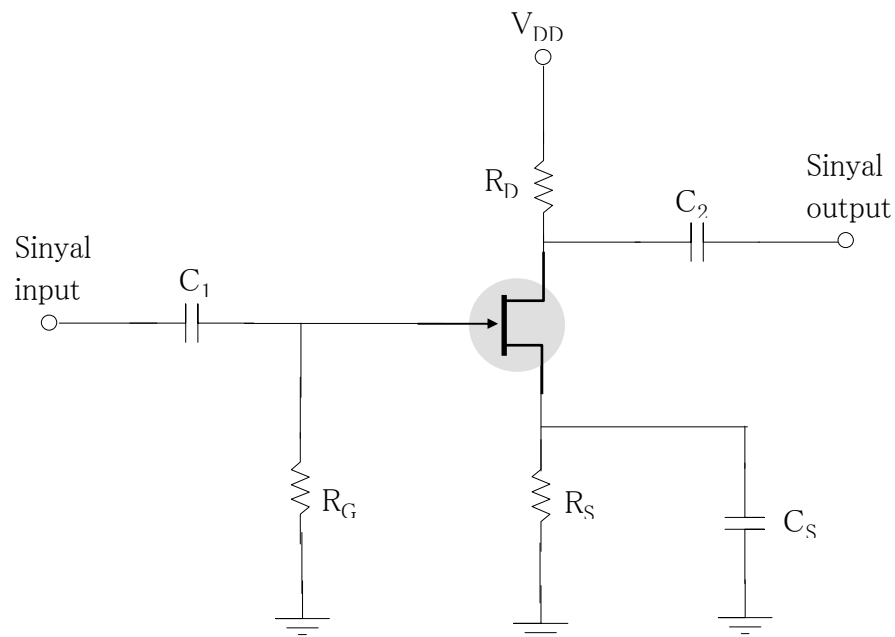
$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$

$$g_m = 4\text{mS} \left(1 - \frac{- 2.5}{- 4} \right) = 1,5 \text{ mS}$$

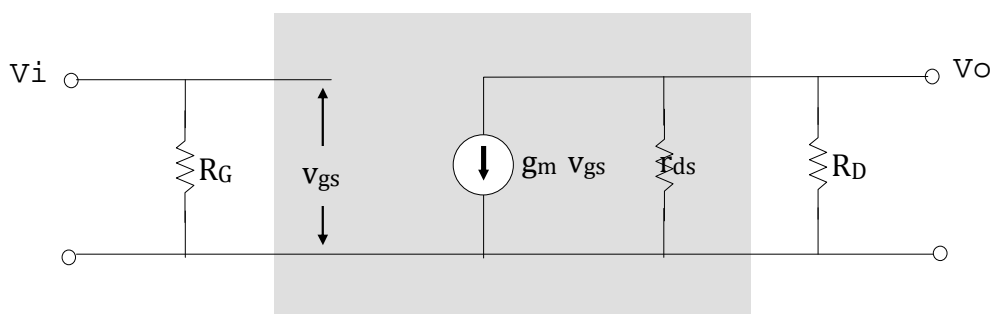
Harga g_m terbesar diperoleh pada saat $V_{GS} = 0$, kemudian apabila V_{GS} dibuat semakin negatif maka harga g_m semakin kecil.

3.3 Analisis Penguat CS

Seperti halnya pada penguat transistor bipolar, penguat FET juga dapat dirangkai dalam beberapa konfigurasi. Konfigurasi penguat JFET dengan source sebagai terminal bersama disebut dengan penguat *Common Source (CS)*. Rangkaian penguat CS dapat dilihat pada gambar 3.4. Untuk menganalisa parameter penguat seperti A_v , Z_i , dan Z_o , rangkaian penguat tersebut perlu diubah menjadi rangkaian ekuivalen ac. Gambar 3.4a merupakan rangkaian ekuivalen ac dari gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rangkaian penguat CS



Gambar 3.4a Rangkaian ekuivalen ac penguat CS

Pembuatan rangkaian ekuivalen ac tersebut didasarkan atas asumsi bahwa pada kondisi ac semua kapasitor termasuk kapasitor kopling (C_1 dan C_2) dan by-pass (C_S) dianggap

hubung singkat. Dengan demikian RS seolah-olah tidak ada karena telah dihubung singkat oleh CS. Pada rangkaian ekivalen ac terminal source langsung terhubung ke ground. Sumber tegangan VDD juga dianggap hubung singkat ke ground.

Analisis pertama adalah menentukan penguatan tegangan (A_v). Dengan menerapkan hukum Kirchhoff pada ikal output dapat diperoleh A_v sebagai berikut:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$A_v = \frac{(-g_m v_{gs})(r_{ds} || RD)}{v_{gs}}$$

$A_v = -g_m(r_{ds} RD)$ (3.6)
----------------------------	-------------

Apabila harga r_{ds} diabaikan (atau tidak diketahui) yang disebabkan karena $r_{ds} \gg RD$, maka persamaan 3.6 tersebut menjadi:

$A_v = -g_m RD$ (3.7)
-----------------	-------------

Tanda negatif pada kedua persamaan tersebut menunjukkan bahwa antara sinyal output dan input berbeda fasa 180° atau berlawanan fasa.

Impedansi input (Z_i) dari rangkaian tersebut adalah:

$Z_i = R_G$ (3.8)
-------------	-------------

Sebenarnya impedansi rangkaian penguat tersebut (Z_i) adalah paralel antara R_G dengan impedansi input FET. Akan tetapi karena impedansi input FET sangat tinggi ($\cong 10^9 \Omega$ harga tipikal untuk JFET dan 10^{12} hingga $10^{15} \Omega$ harga tipikal untuk MOSFET), maka praktis yang menentukan impedansi input rangkaian adalah R_G .

Impedansi output (Z_o) dari JFET adalah:

$$Z_o(\text{FET}) = r_{ds}$$

Sedangkan impedansi input dari rangkaian adalah paralel antara r_{ds} dengan R_D .

$$Z_o = r_{ds} \parallel R_D$$

..... (3.9)

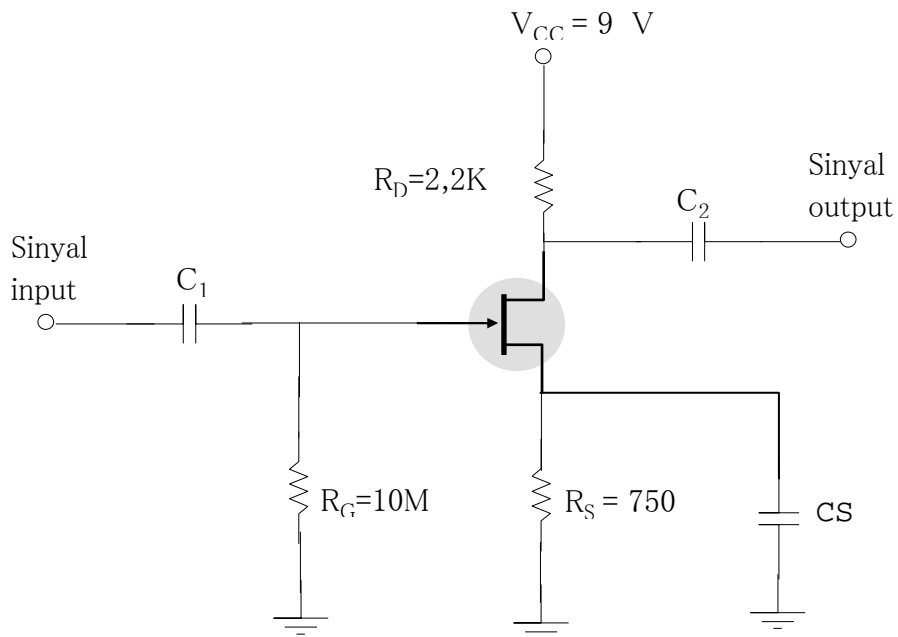
Apabila harga r_{ds} diabaikan atau tidak diketahui, maka besarnya Z_o tersebut hanya ditentukan oleh R_D , yaitu:

$$Z_o = R_D$$

Contoh 3.5

Suatu rangkaian penguat CS seperti pada gambar 3.5 mempunyai data JFET sebagai berikut: $y_{os} = 40 \mu S$, $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$, dan $V_{GS(\text{off})} = -4 \text{ Volt}$. Tentukanlah:

- (a) Titik kerja: V_{GSQ} dan I_{DQ}
- (b) Penguatan tegangan (A_v)
- (c) Impedansi input (Z_i)
- (d) Impedansi output (Z_o)



Gambar 3.5 Rangkaian penguat JFET untuk contoh 7.5

Penyelesaian:

(a) Dengan menggunakan persamaan 3.5 dan 3.6 diperoleh titik kerja:

$$V_{GSQ} = -1,8 \text{ Volt}$$

$$I_{DQ} = 2,4 \text{ mA}$$

(b) Penguatan tegangan ditentukan dengan persamaan 3.6, namun perlu dicari dulu g_{m0} , g_m , dan r_{ds} dari data JFET yang ada.

Menentukan g_{m0} dengan persamaan 3.3:

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} = \frac{2(8\text{mA})}{|-4|} = 4 \text{ mS}$$

Menentukan g_m dengan persamaan 3.1:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

$$g_m = 4\text{mS} \left(1 - \frac{-1.8}{-4}\right) = 2,2 \text{ mS}$$

Menentukan r_{ds} dengan persamaan 3.5

$$r_{ds} = \frac{1}{y_{os}} = \frac{1}{40 \mu S} = 25 \text{ k}\Omega$$

Menentukan A_v dengan persamaan 3.6:

$$\begin{aligned} A_v &= -g_m (r_{ds} \parallel R_D) \\ &= - (2,2\text{m}) (2,2\text{K} \parallel 25\text{K}) = -4,45 \end{aligned}$$

(c) Impedansi input (Z_i)

$$Z_i = R_G = 10 \text{ M}\Omega$$

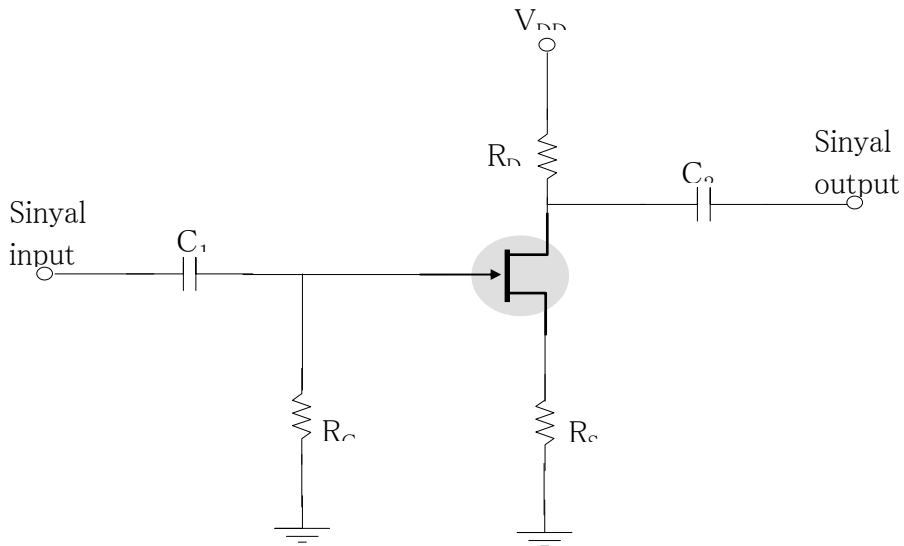
(d) Impedansi output (Z_o)

$$Z_o = r_{ds} \parallel R_D = 2,2\text{K} \parallel 25\text{K} = 2,02 \text{ k}\Omega$$

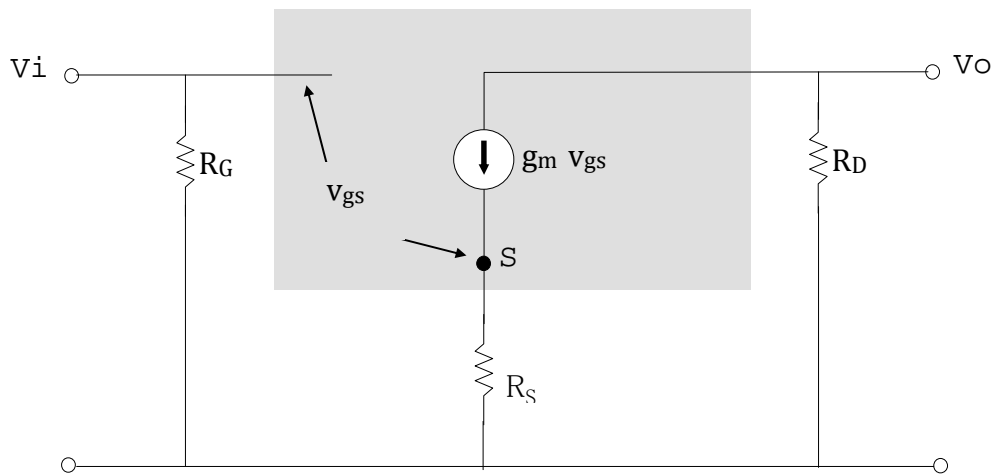
3.4 Penguat CS dengan RS

Rangkaian penguat *Common-Source* (CS) berarti bahwa kapasitor by-pass yang memparalel RS dilepas, sehingga terdapat turun tegangan ac pada resistor RS. Hal ini akan memperkecil penguatan tegangan (A_v) rangkaian penguat tersebut. Rangkaian penguat CS dengan RS dapat dilihat pada gambar 3.6.

Pada pembahasan penguat CS dengan RS ini terdapat perbedaan analisis antara r_{ds} diabaikan dan r_{ds} diperhitungkan. Tidak seperti pada penguat CS dengan C by-pass yang lalu yang hanya memparalel antara r_{ds} dengan R_D . Oleh karena itu pembahasan pertama akan dilakukan dengan menganggap r_{ds} tidak ada atau r_{ds} diabaikan. Rangkaian ekivalen ac dari penguat CS dengan RS adalah seperti pada gambar 3.7.



Gambar 3.6 Rangkaian penguat CS dengan RS



Gambar 3.7 Rangkaian ekivalen ac penguat CS dengan RS

Pada rangkaian ekivalen ac tampak bahwa r_{ds} tidak ada, hal ini disebabkan karena r_{ds} diabaikan atau dianggap terbuka. Sedangkan R_S terlihat terhubung antara S dan ground, hal ini disebabkan karena C by-pass (CS) yang memparalel R_S telah dilepas.

Dengan memperhatikan rangkaian ekivalen ac tersebut, maka penguatan tegangan (A_v) dapat diperoleh sebagai berikut:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

harga v_i dapat diperoleh dari rangkaian ekivalen, yaitu:

$$v_i = v_{gs} + v_s$$

$$v_i = v_{gs} + (g_m v_{gs}) (R_S)$$

$$v_i = v_{gs} (1 + g_m R_S)$$

Apabila harga v_i ini dimasukkan ke persamaan A_v , maka diperoleh:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$A_v = \frac{(-g_m v_{gs}) (R_D)}{v_{gs} (1 + g_m R_S)}$$

dengan meniadakan harga v_{gs} pada pembilang dan penyebut, maka akhirnya diperoleh:

$A_v = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}$ (3.10)
---------------------------------------	--------------

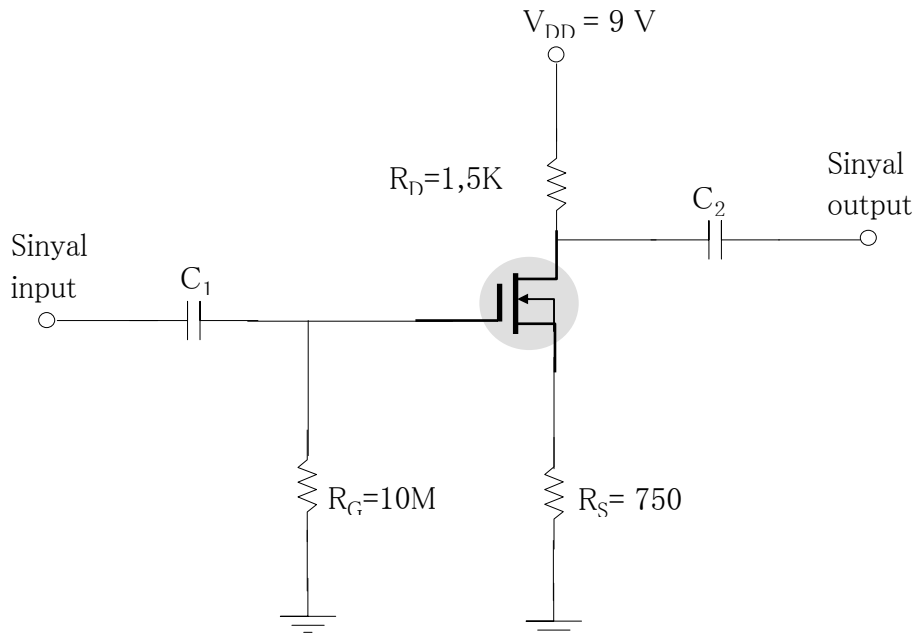
Impedansi input (Z_i) dan output (Z_o) dari rangkaian penguat CS dengan R_S ini sama seperti persamaan 3.8, yakni untuk penguat CS dengan CS (tanpa R_S).

$$Z_i = R_G$$

$$Z_o = R_D$$

Contoh 3.6

Diketahui rangkaian penguat CS seperti pada gambar 3.8, dimana data D-MOSFET yang digunakan adalah: $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, dan $V_p = - 3.5 \text{ Volt}$. Tentukan penguatan tegangan (A_v) rangkaian tersebut.



Gambar 3.8 Rangkaian penguat CS dengan RS untuk contoh 3.6

Penyelesaian:

Menentukan titik kerja V_{GSQ} dan I_{DQ} dengan persamaan 3.5 dan 3.6, diperoleh:

$$V_{GSQ} = - 1.8 \text{ Volt}$$

$$I_{DQ} = 2.3 \text{ mA}$$

Menentukan g_{m0} dengan persamaan 3.3:

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} = \frac{2(10\text{mA})}{|-3.5|} = 5,7 \text{ mS}$$

Menentukan g_m dengan persamaan 3.1:

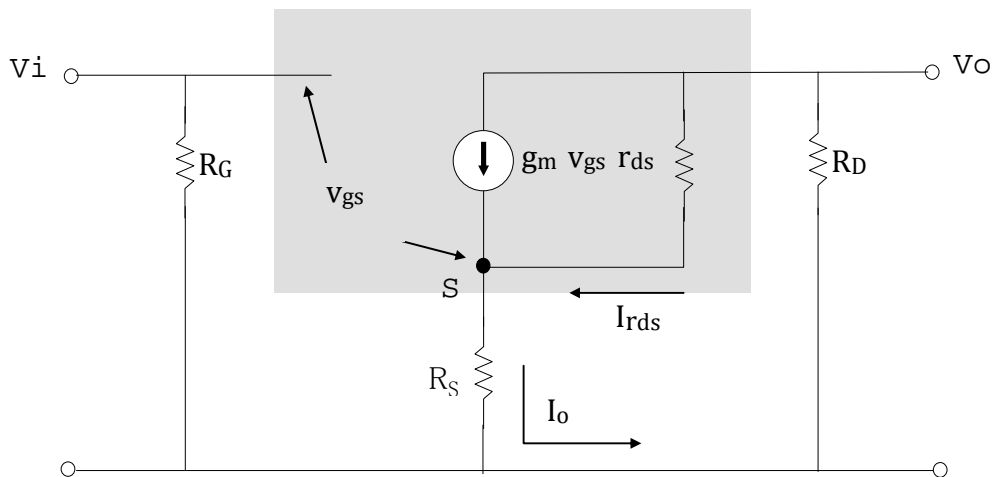
$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

$$g_m = 5,7\text{mS} \left(1 - \frac{-1,8}{-3,5} \right) = 2,77\text{ mS}$$

Menentukan A_v dengan persamaan 3.10:

$$A_v = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} = - \frac{(2,77\text{m})(1,5\text{K})}{1 + (2,77\text{m})(0,75\text{K})} = -1,35$$

Pembahasan di atas didasarkan atas anggapan bahwa r_{ds} diabaikan karena nilainya relatif sangat besar dibanding R_D maupun R_S atau karena alasan datanya tidak diketahui. Namun untuk perhitungan yang lebih teliti, maka r_{ds} perlu dimasukkan dalam analisis. Pembahasan berikut ini dengan anggapan bahwa r_{ds} diketahui. Gambar 3.9 merupakan rangkaian ekivalen ac penguat CS dengan R_S dimana harga r_{ds} diperhitungkan.



Gambar 3.9 Rangkaian ekivalen ac penguat CS dengan R_S

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut dapat dilihat bahwa arus yang mengalir pada r_{ds} sesuai hukum Ohm adalah:

$$I_{r_{ds}} = \frac{V_o - V_s}{r_{ds}}$$

Arus yang mengalir melewati RS maupun RD disebut dengan arus I_o , sehingga:

$$V_o = - I_o R_D$$

dan

$$V_s = I_o R_S$$

Dengan demikian I_{rds} dapat dinyatakan:

$$I_{rds} = \frac{(- I_o R_D) - (I_o R_S)}{r_{ds}}$$

Arus I_o sebenarnya merupakan jumlah arus dari sumber arus $g_m v_{gs}$ dan arus dari I_{rds} , yaitu:

$$I_o = g_m v_{gs} + I_{rds}$$

apabila harga arus I_{rds} dimasukkan, maka diperoleh:

$$I_o = g_m v_{gs} + \frac{(- I_o R_D) - (I_o R_S)}{r_{ds}}$$

$$I_o = g_m v_{gs} - \frac{I_o (R_D + R_S)}{r_{ds}}$$

Dari rangkaian ekivalen diperoleh juga:

$$V_i = v_{gs} + V_s$$

$$V_i = v_{gs} + I_o R_S$$

$$v_{gs} = V_i - I_o R_S$$

harga v_{gs} ini selanjutnya dimasukkan ke persamaan I_o , yaitu:

$$I_o = g_m (V_i - I_o R_S) - \frac{I_o (R_D + R_S)}{r_{ds}}$$

$$I_O = g_m V_i - g_m I_O R_S - \frac{(R_D + R_S)}{r_{ds}} I_O$$

$$I_O + g_m I_O R_S + \frac{(R_D + R_S)}{r_{ds}} I_O = g_m V_i$$

$$I_O \{1 + g_m R_S + (R_D + R_S)/r_{ds}\} = g_m V_i$$

akhirnya diperoleh:

$$I_O = \frac{g_m V_i}{1 + g_m R_S + (R_D + R_S)/r_{ds}}$$

Dengan demikian V_O adalah:

$$V_O = - I_O R_D$$

$$V_O = - \frac{g_m V_i R_D}{1 + g_m R_S + (R_D + R_S)/r_{ds}}$$

Oleh karena penguatan tegangan A_v adalah:

$$A_v = V_O/V_i$$

maka :

$$A_v = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S + (R_D + R_S)/r_{ds}} \dots (3.11)$$

Persamaan 3.11 terlihat panjang karena adanya r_{ds} dalam pembahasan. Apabila dikembalikan ke depan yaitu bila dalam persamaan 3.11 tersebut harga r_{ds} dibuat tak terhingga, maka persamaan 3.11 menjadi persamaan 3.10. Persamaan 3.10 adalah persamaan A_v dimana r_{ds} tidak ada. Selanjutnya apabila dalam persamaan 3.11 tersebut harga r_{ds} dibuat

tak terhingga dan RS adalah nol, maka persamaan 3.11 menjadi persamaan 3.3. Persamaan 3.7 ini adalah persamaan Av tanpa rds dan RS hubung singkat.

Impedansi input untuk rangkaian ekivalen gambar 3.9 adalah:

$$Z_i = R_G$$

Sedangkan impedansi output (Zo)nya adalah jumlah paralel antara rds + RS dengan RD, yaitu:

$$Z_o = (r_{ds} + R_S) \parallel R_D \dots\dots\dots (3.12)$$

Contoh 3.7

Perhatikan gambar 3.8 pada contoh 3.6. Diketahui $y_{os} = 25 \mu S$ sebagai data tambahan untuk rangkaian tersebut. Hitunglah Av sekarang.

Penyelesaian:

Menentukan rds dengan persamaan 3.5

$$r_{ds} = \frac{1}{y_{os}} = \frac{1}{25\mu S} = 40 \text{ K}\Omega$$

Dari contoh 3.6 tersebut diperoleh $g_m = 2,77 \text{ mS}$, sehingga bisa langsung dihitung Av nya dengan persamaan 3.11.

$$A_v = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S + (R_D + R_S) / r_{ds}}$$

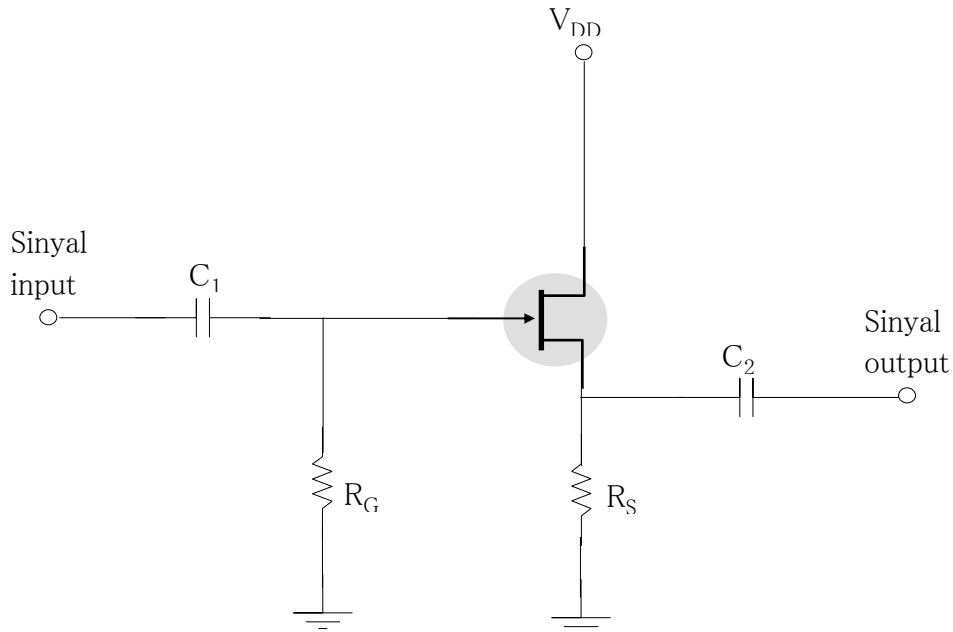
$$A_v = - \frac{(2,77\text{m})(1,5\text{K})}{1 + (2,77\text{m})(0,75\text{K}) + (1,5\text{K} + 0,75\text{K}) / 40\text{K}}$$

$$A_v = -1,3$$

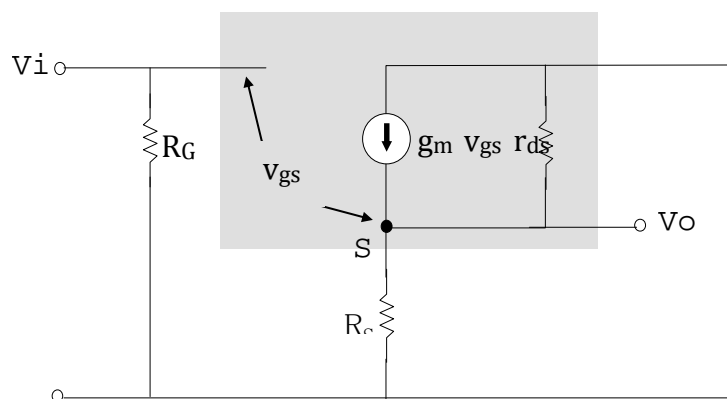
Pada contoh 3.6 dengan mengabaikan rds diperoleh Av = - 1,35, dan pada contoh 3.7 dengan memperhitungkan rds diperoleh Av = -1,3. Secara praktis perbedaan ini cukup kecil, sehingga pada kebanyakan perhitungan praktis rds selalu diabaikan.

3.5 Rangkaian Pengikut Source

Pada transistor bipolar terdapat konfigurasi common kolektor atau rangkaian pengikut emitor. Sebagai padanan dalam FET terdapat rangkaian pengikut source atau common drain. Seperti halnya pada transistor bipolar, ciri-ciri rangkaian pengikut source ini adalah mempunyai A_v kurang dari satu, Z_o rendah, dan Z_i sangat tinggi. Rangkaian pengikut source dapat dilihat pada gambar 3.10. Sedangkan gambar 3.11 merupakan rangkaian ekivalen ac pengikut source.



Gambar 3.10 Rangkaian pengikut source



Gambar 3.11 Rangkaian ekivalen ac penguat pengikut source

Dari rangkaian ekivalen ac pada gambar 3.11 dapat diturunkan formula untuk penguatan tegangan (A_v), yaitu:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

harga V_o dapat diperoleh dari rangkaian ekivalen, yaitu:

$$V_o = (g_m v_{gs}) (R_S || r_{ds})$$

Oleh karena:

$$V_i = v_{gs} + V_o$$

$$v_{gs} = V_i - V_o$$

bila v_{gs} dimasukkan ke persamaan V_o , maka:

$$V_o = (g_m) (V_i - V_o) (R_S || r_{ds})$$

$$V_o = (g_m V_i - g_m V_o) (R_S || r_{ds})$$

$$V_o = g_m V_i (R_S || r_{ds}) - g_m V_o (R_S || r_{ds})$$

$$V_o + g_m V_o (R_S || r_{ds}) = g_m V_i (R_S || r_{ds})$$

$$V_o \{1 + g_m (R_S || r_{ds})\} = g_m V_i (R_S || r_{ds})$$

Akhirnya bisa diperoleh V_o/V_i atau A_v , yaitu:

$$A_v = \frac{g_m (R_S || r_{ds})}{1 + g_m (R_S || r_{ds})}$$

Apabila pembilang dan penyebut dibagi g_m , maka diperoleh:

$$A_v = \frac{(R_S || r_{ds})}{1/g_m + (R_S || r_{ds})} \dots\dots\dots (3.13)$$

Dari persamaan 3.13 tersebut terlihat bahwa harga A_v selalu kurang dari satu. Semakin besar harga g_m , harga A_v semakin mendekati satu. Harga A_v adalah positif berarti sinyal output dan input sefasa.

Impedansi input (Z_i) rangkaian pengikut source adalah:

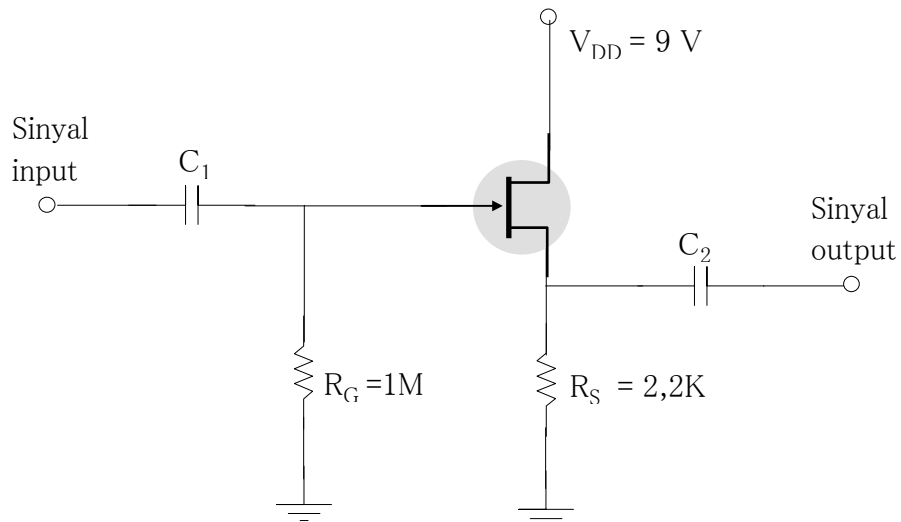
$$Z_i = R_G$$

Sedangkan impedansi output (Z_o) adalah:

$$Z_o = R_S || r_{ds} || (1/g_m) \dots\dots\dots (3.14)$$

Contoh 3.7

Perhatikan rangkaian pengikut source seperti pada gambar 3.12. Diketahui data JFET adalah: $I_{DSS} = 16 \text{ mA}$, $V_p = -4 \text{ Volt}$, dan $y_{os} = 25 \mu\text{S}$. Tentukan A_v , Z_i dan Z_o .



Gambar 3.12 Rangkaian pengikut source

Penyelesaian:

Menentukan titik kerja dengan persamaan 3.5, diperoleh:

$$V_{GSQ} = - 2,86 \text{ Volt}$$

Menentukan g_{m0} dengan persamaan 3.3:

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} = \frac{2(16 \text{ mA})}{|-4|} = 8 \text{ mS}$$

Menentukan g_m dengan persamaan 3.1:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$
$$g_m = 8 \text{ mS} \left(1 - \frac{- 2.86V}{- 4 \text{ V}} \right) = 2,28 \text{ mS}$$

Menentukan r_{ds} dengan persamaan 3.5

$$r_{ds} = \frac{1}{y_{os}} = \frac{1}{25 \mu S} = 40 \text{ K}\Omega$$

Menentukan A_v dengan persamaan 3.13:

$$A_v = \frac{(R_S || r_{ds})}{1/g_m + (R_S || r_{ds})}$$
$$A_v = \frac{(2,2K || 40K)}{1/2,28m + (2,2K || 40K)} = 0,83$$

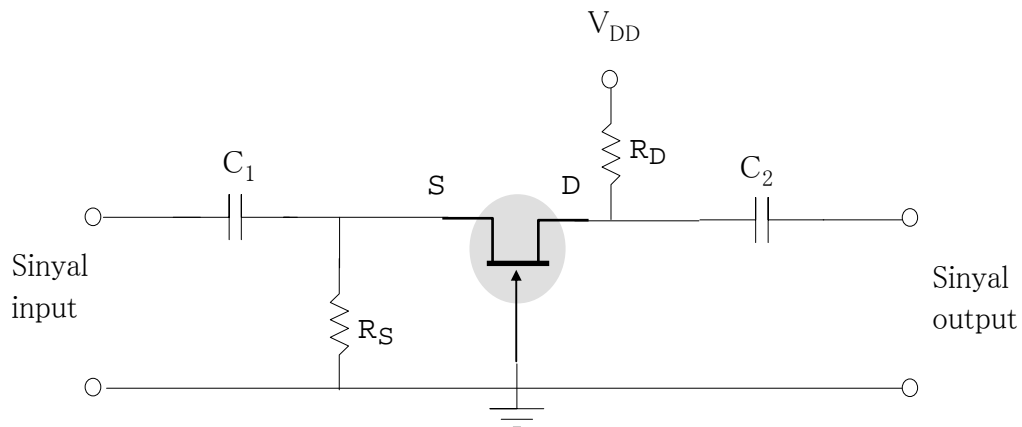
Menentukan Z_i : $Z_i = R_G = 1 \text{ M}\Omega$

Menentukan Z_o dengan persamaan 3.14:

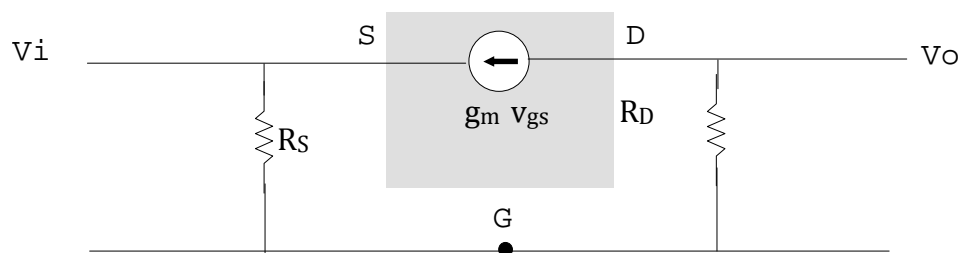
$$Z_o = R_S || r_{ds} || (1/g_m)$$
$$Z_o = (2,2K) || (40K) || (1/2,28m) = 362 \Omega$$

3.6 Penguat Gate Bersama (CG)

Konfigurasi terakhir yang dibahas sebagai penguat FET adalah penguat Gate Bersama (Common Gate = CG). Sebagaimana akan terlihat pada analisis berikut irangkaian penguat CG mempunyai impedansi input kecil, impedansi output seperti CS, dan A_v seperti CS namun tidak membalikkan. Gambar 3.13 dan 3.14 berturut-turut adalah rangkaian penguat CG dan rangkaian ekivalen ac nya.



Gambar 3.13 Rangkaian penguat CG



Gambar 3.14 Rangkaian ekivalen ac penguat CG

Dari gambar rangkaian ekivalen ac terlihat bahwa terminal G berada di bawah dan tidak terhubung baik dengan source maupun drain. Besarnya tegangan gate - source adalah: $V_{gs} = -V_i$. Penguatan tegangan A_v dapat diturunkan sebagai berikut:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

harga V_o dapat diperoleh dari rangkaian ekivalen, yaitu:

$$V_o = (-g_m V_{gs})(R_D)$$

$$V_o = (-g_m)(-V_i)(R_D)$$

$$V_o = (g_m V_i)(R_D)$$

Dengan demikian harga A_v adalah:

$A_v = g_m R_D$ (3.15)
-----------------	--------------

Penguatan A_v bertanda positif berarti sinyal input dan output sefasa. Bedanya harga A_v ini dengan A_v penguat CS adalah tanda negatifnya saja.

Apabila harga r_{ds} diketahui, maka persamaan 3.15 menjadi:

$A_v = g_m (R_D r_{ds})$ (3.16)
-----------------------------	--------------

Dengan mengabaikan r_{ds} , impedansi input (Z_i) rangkaian penguat CG adalah:

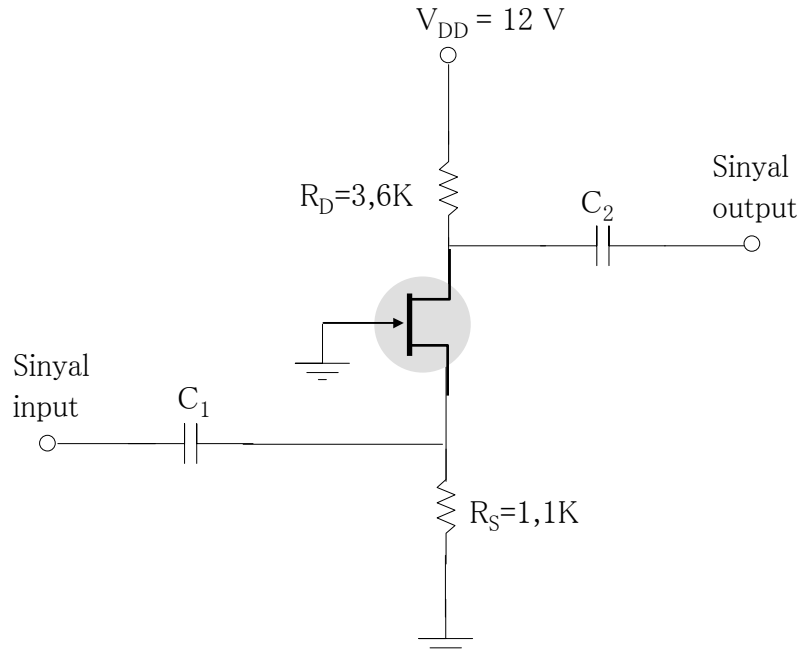
$Z_i = R_D (1/g_m)$ (3.17)
------------------------	--------------

Impedansi output (Z_o) adalah:

$Z_o = R_D r_{ds}$ (3.18)
-----------------------	--------------

Contoh 3.9

Perhatikan rangkaian penguat CG seperti pada gambar 3.15. Diketahui data JFET adalah: $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_p = -4 \text{ Volt}$. Tentukan A_v , Z_i dan Z_o .



Gambar 3.15 Rangkaian penguat CG

Penyelesaian:

Menentukan titik kerja dengan persamaan 3.5, diperoleh:

$$V_{GSQ} = - 2,2 \text{ Volt}$$

Menentukan g_{m0} dengan persamaan 3.3:

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} = \frac{2(10 \text{ mA})}{|-4|} = 5 \text{ mS}$$

Menentukan g_m dengan persamaan 3.1:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$

$$= 5 \text{ mS} \left(1 - \frac{-2.2 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right)$$

$$g_m = 5 \text{ mS} \left(1 - \frac{\quad}{-4 \text{ V}} \right) = 2,25 \text{ mS}$$

Menentukan A_v dengan persamaan 3.15:

$$A_v = g_m R_D = (2,25 \text{ m})(3,6\text{K}) = 8,1$$

Menentukan Z_i dengan persamaan 3.17:

$$Z_i = R_D \parallel (1/g_m) = (3,6\text{K}) \parallel (1/2,25\text{m}) = 395 \ \Omega$$

Impedansi output:

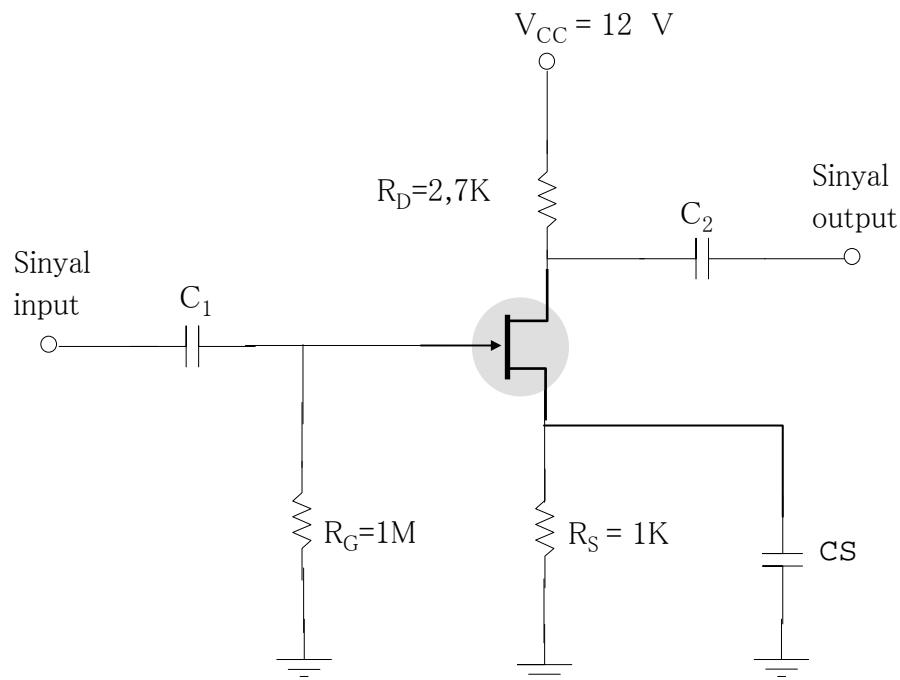
$$Z_o \cong R_D = 3,6 \text{ K}\Omega$$

3.7 Ringkasan

Konfigurasi rangkaian FET tidak jauh berbeda dengan konfigurasi pada transistor bipolar. Konfigurasi CS (Common-source) memberikan penguatan tegangan (A_v) yang besar, meskipun biasanya lebih kecil dari penguat transistor bipolar. Impedansi input (Z_i) penguat CS sangat besar. Rangkaian pengikut source yang disebut juga penguat Common Drain (CD) mempunyai A_v kurang dari satu dan Z_o rendah serta Z_i sangat tinggi. Rangkaian CG (Common Gate) mempunyai Z_i yang kecil dan A_v yang besar seperti halnya pada penguat CS tetapi bernilai positif.

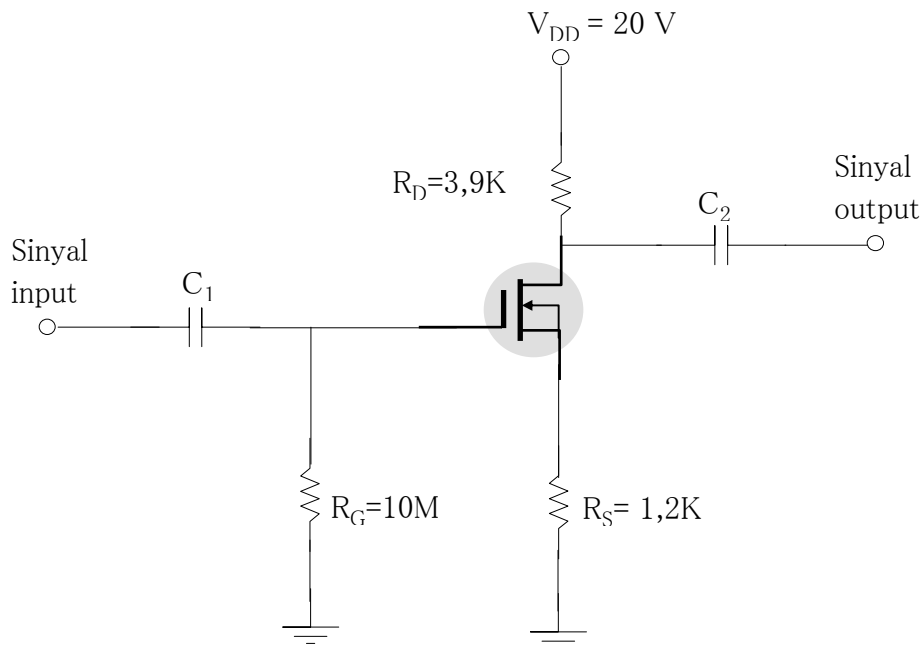
3.8 Soal Latihan

1. Suatu rangkaian penguat CS seperti pada gambar 3.16 mempunyai data JFET sebagai berikut: $y_{os} = 50 \mu S$, $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$, dan $V_{GS(off)} = -6,5 \text{ Volt}$. Tentukanlah:
 - (a) Titik kerja: V_{GSQ} dan I_{DQ}
 - (b) Penguatan tegangan (A_v)
 - (c) Impedansi input (Z_i)
 - (d) Impedansi output (Z_o)



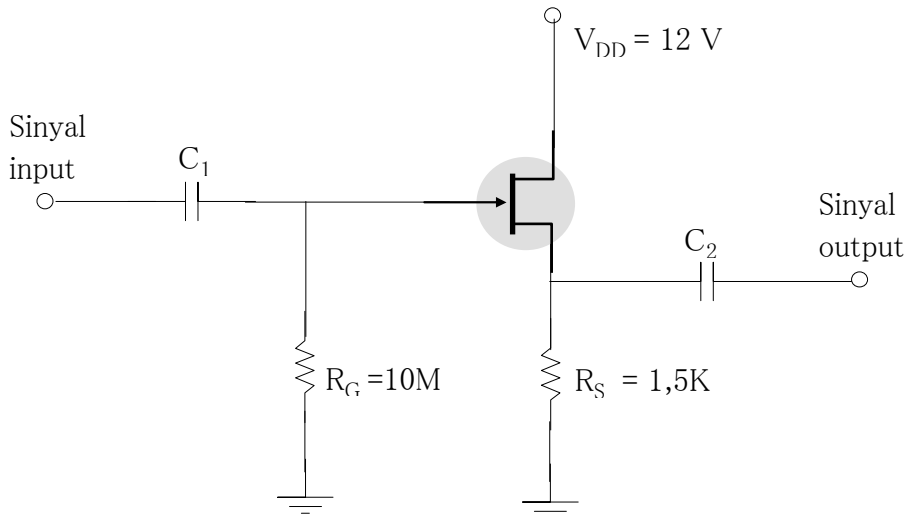
Gambar 3.16 Rangkaian penguat JFET untuk soal no. 1

2. Diketahui rangkaian penguat CS seperti pada gambar 3.17, dimana data D-MOSFET yang digunakan adalah: $I_{DSS} = 16 \text{ mA}$, dan $V_p = -6 \text{ Volt}$. Tentukan penguatan tegangan (A_v) rangkaian tersebut.



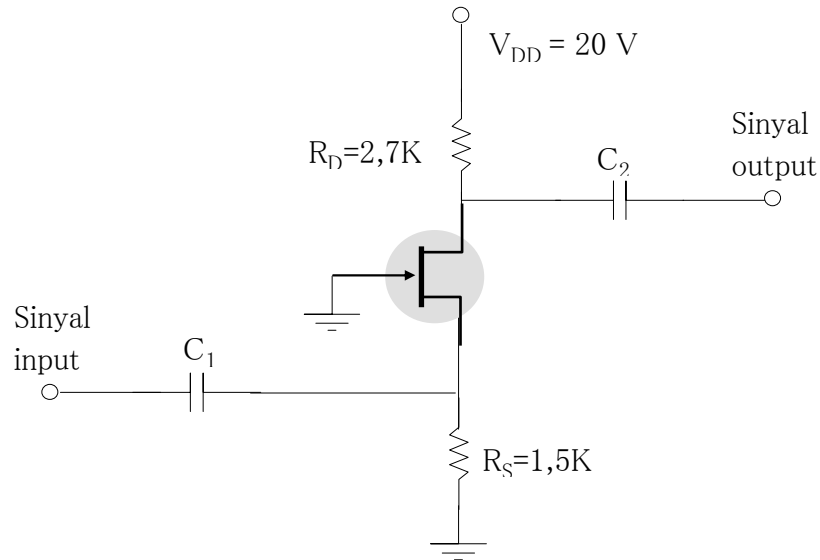
Gambar 3.17 Rangkaian penguat CS dengan RS untuk soal no. 2

3. Perhatikan gambar 3.17 pada soal no.2. Diketahui $y_{os} = 25 \mu S$ sebagai data tambahan untuk rangkaian tersebut. Hitunglah A_v sekarang.
4. Perhatikan rangkaian pengikut source seperti pada gambar 3.18. Diketahui data JFET : $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_p = -6 \text{ Volt}$, dan $y_{os} = 40 \mu S$. Tentukan A_v , Z_i dan Z_o .



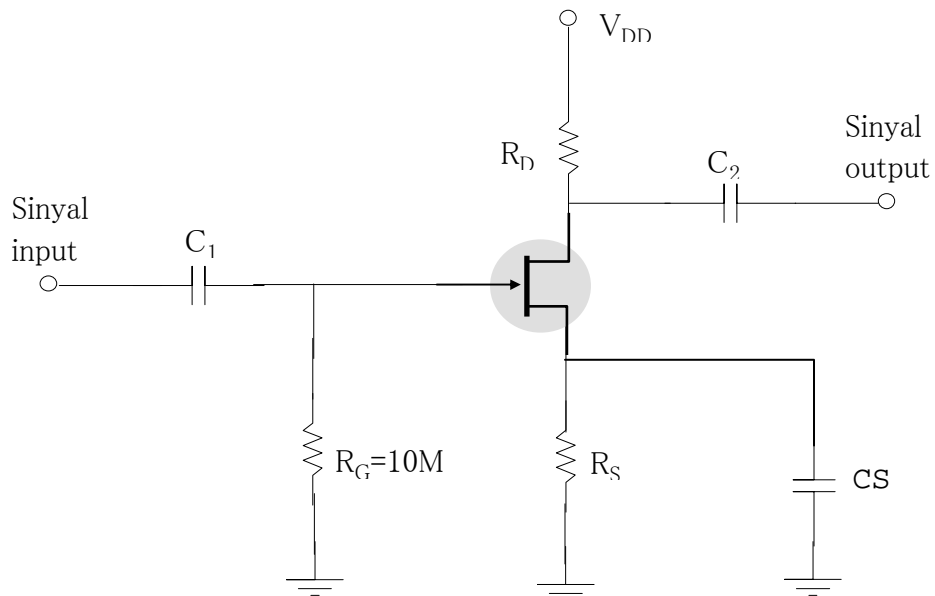
Gambar 3.18 Rangkaian pengikut source untuk soal 4

5. Perhatikan rangkaian penguat CG seperti pada gambar 3.19. Diketahui data JFET adalah: $I_{DSS} = 16 \text{ mA}$, $V_p = -6,5 \text{ Volt}$. Tentukan A_v , Z_i dan Z_o .



Gambar 3.19 Rangkaian penguat CG untuk soal no. 5

6. Rangkaian penguat CS seperti gambar 3.30 diharapkan dapat menghasilkan $A_v = -8$. Bila diketahui data JFET adalah: $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_p = -4 \text{ Volt}$, $y_{os} = 20 \mu\text{S}$, dan $V_{GSQ} = 1 \text{ Volt}$. Tentukan nilai R_S dan R_D .



Gambar 3.20 Rangkaian penguat JFET untuk soal no. 6

Sumber Pustaka

Boylestad and Nashelsky. (1992). *Electronic Devices and Circuit Theory*, 5th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.

Floyd, T. (1991). *Electric Circuits Fundamentals*. New York: Merrill Publishing Co.

Malvino, A.P. (1993). *Electronic Principles 5th Edition*. Singapore: McGraw-Hill, Inc.

Milman & Halkias. (1972). *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*. Tokyo: McGraw-Hill, Inc.

Savant, Roden, and Carpenter. (1987). *Electronic Circuit Design: An Engineering Approach*. Menlo Park, CA: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

Stephen, F. (1990). *Integrated devices: discrete and integrated*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.