

BAB IV

PERANCANGAN RANGKAIAN

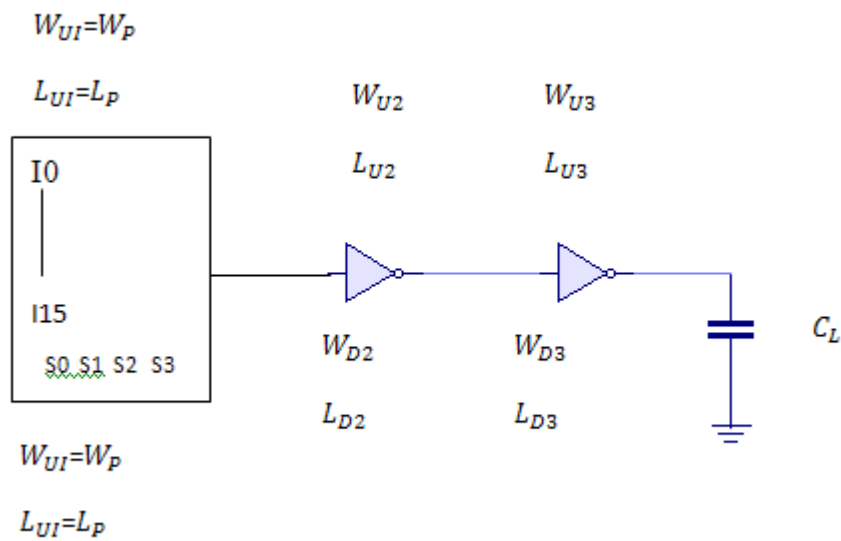
Bab ini membahas mengenai tahapan-tahapan dalam merancang IC Multiplexer 16 to 1 meliputi penentuan rangkaian logika multiplexer 16 to 1, penentuan spesifikasi dari IC yang akan dirancang, parameter-parameter transistor NMOS dan PMOS yang akan digunakan dalam perhitungan, perbandingan nilai W/L yang digunakan, nilai VTC, *propagation delay*, dan penggambaran *layout* pada microwind2.

4.1 Konfigurasi IC multiplexer 16 to 1

Gambar 4.1 menunjukkan konfigurasi gerbang Multiplexer 16 to 1 HCMOS. Inisial W menunjukkan pullup transistor MOSFET tipe-p dan W menunjukkan pulldown transistor MOSFET tipe-n. Kedua tipe MOSFET ini tersusun dalam konfigurasi CMOS pada tiap gerbang. CL adalah semua kapasitansi baik internal maupun eksternal yang digerakkan oleh gerbang. C adalah semua kapasitansi baik internal maupun eksternal yang digerakkan oleh gerbang. C meliputi kapasitansi jalur interkoneksi, bonding pad, jalur konduktor internal, pin IC, jalur konduktor eksternal serta termasuk kapasitansi masukkan IC lain yang digerakkan oleh gerbang.

Komponen pembebanan lain selain kapasitansi adalah resistansi keluaran. Namun yang dipakai C karena hanya komponen kapasitansi yang mempengaruhi *propagation delay* rangkaian dan dalam perancangan ini dilakukan optimalisasi *propagation delay* gerbang.

Berdasarkan konfigurasi gerbang, satu-satunya perbedaan yang mendasar antara Multiplexer HCMOS dan CMOS adalah terdapatnya konfigurasi pasangan inverter dalam rangkaian HCMOS. Rangkaian multiplexer memanfaatkan keuntungan dari konfigurasi pasangan inverter ini yang dikenal dengan teknik driver kaskada. Dengan pengaturan nilai W dan L sistem yang tepat, maka akan diperoleh *propagation delay* yang lebih cepat dibanding sistem CMOS.



Gambar 4.1 konfigurasi multiplexer 16 to 1

Aturan perancangan gerbang awalnya dilakukan dengan Persamaan (2.66), nilai k adalah 3 (gerbang dasar dan 2 buah kaskada), nilai optimum untuk $\alpha = 3$ untuk gerbang dasar,

$$W_{U1} = W_p$$

$$L_{U1} = L_p$$

$$W_{D1} = W_N$$

$$L_{D1} = L_N$$

Untuk kaskada pertama :

$$W_{U2} = W_{D2} = 3W_N$$

$$L_{U2} = L_{D2} = L_N$$

$$W_{D2} = 3W_{D1} = 3W_N$$

$$L_{D2} = L_{D1} = L_N$$

(4-1)

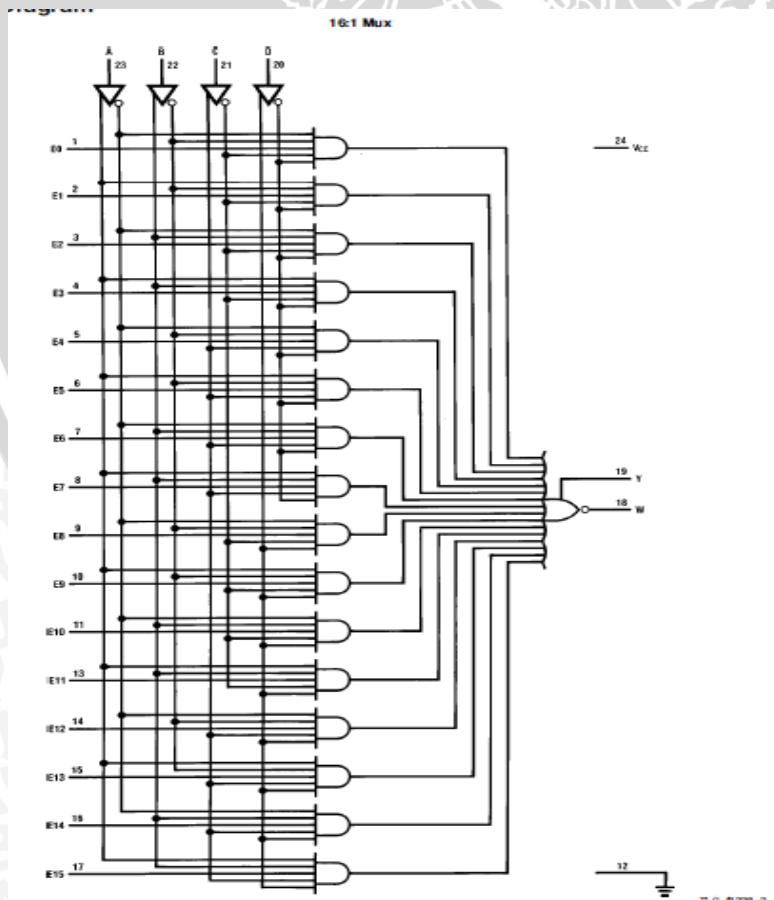
(4-2)

Untuk kaskada kedua :

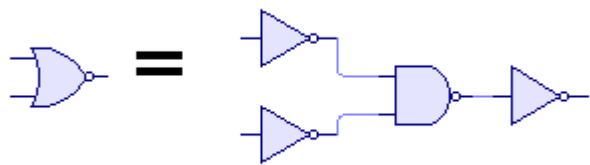
$$\begin{aligned} W_{U3} &= W_{D3} = 9W_N \\ L_{U3} &= L_{D3} = L_N \\ W_{D3} &= 9W_{D1} = 9W_N \\ L_{D3} &= L_{D1} = L_N \end{aligned} \tag{4-3}$$

4.1 Perancangan Rangkaian Logika dan Rangkaian Transistor Multiplekser 16 to 1

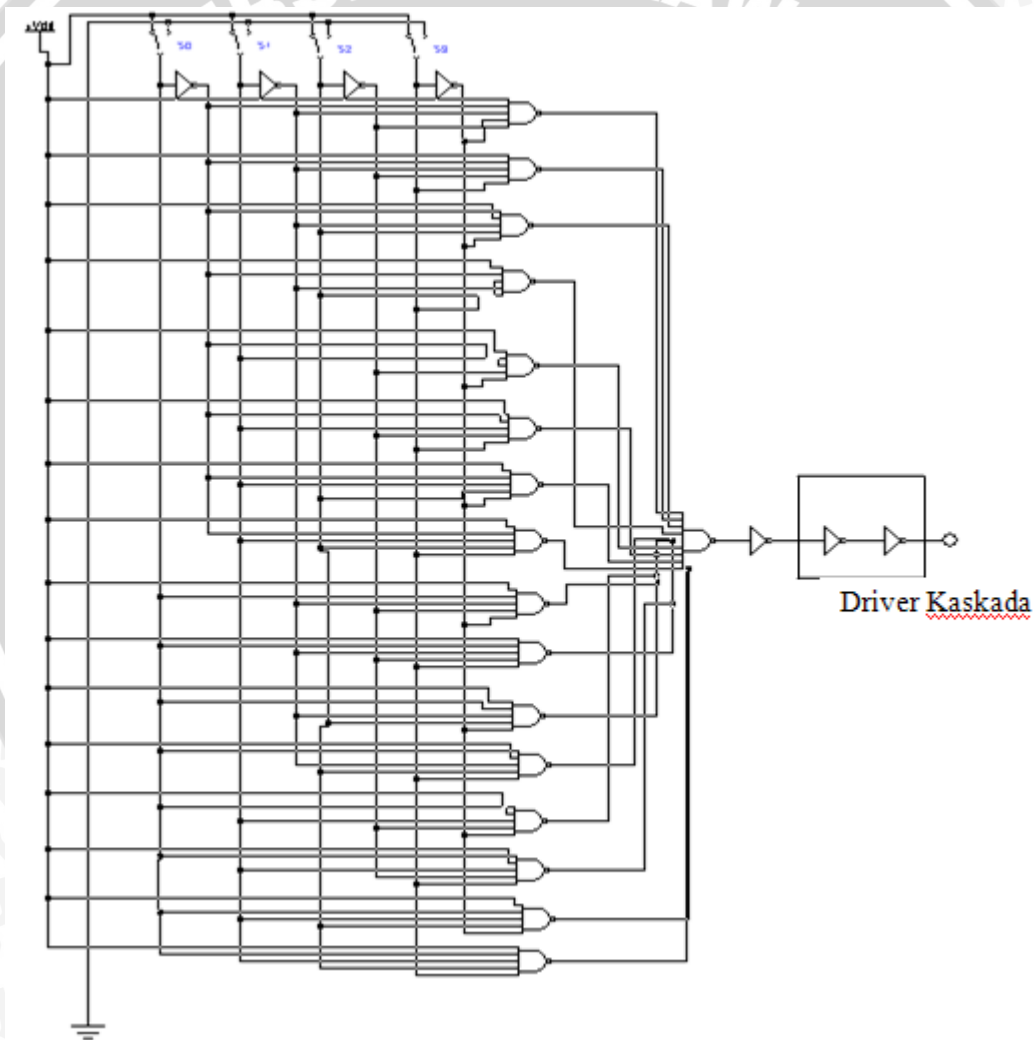
Dalam perancangan gerbang-gerbang Multiplekser 16 to 1 yang harus diketahui pertama kali adalah konfigurasi rangkaian transistor yang akan menyusun gerbang-gerbang logika tersebut. Multiplekser yang akan dirancang berdasarkan *datasheet* ditunjukkan dalam gambar 4.2, konfigurasi rangkain logikanya terdiri dari gerbang AND dan NOR, sedangkan pada skripsi ini akan dirancang konfigurasi hanya dengan gerbang logika NAND yang ditunjukkan oleh gambar 4.4. Proses pergantian gerbang NOR menjadi NAND ditunjukkan dalam gambar 4.3.



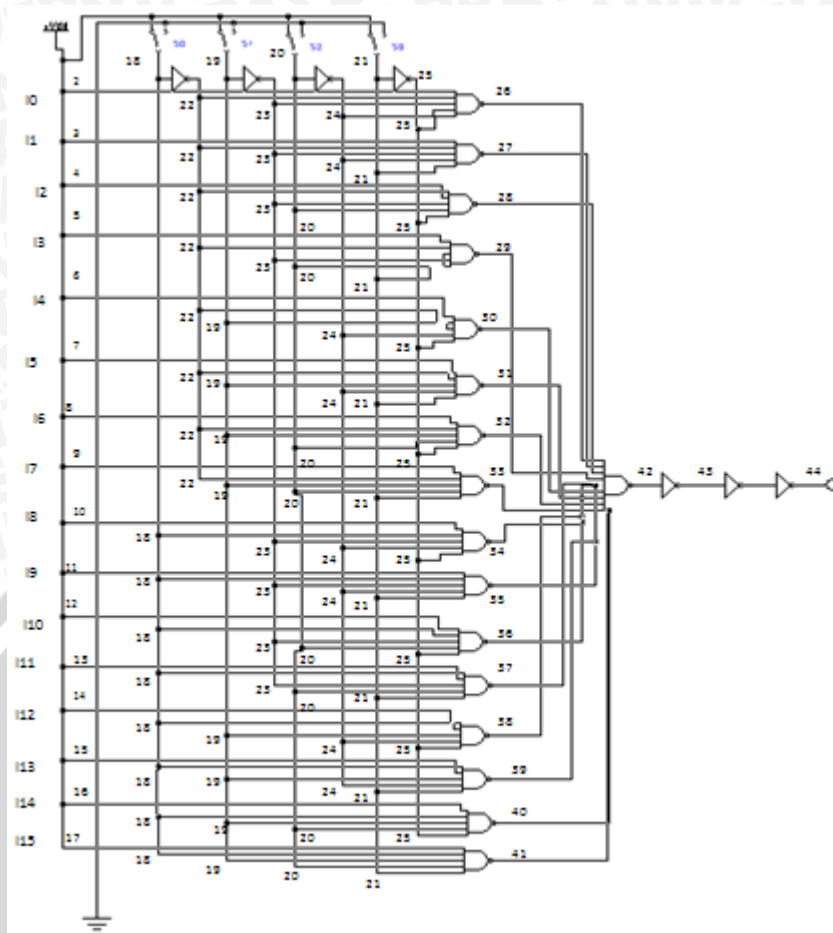
Gambar 4.2 Rangkaian gerbang Logika multiplekser 16 to 1 sesuai *datasheet*



Gambar 4.3 Persamaan gerbang Logika NOR dengan NAND



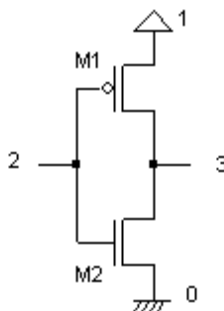
Gambar 4.4 Rangkaian gerbang Logika multiplekser 16 to 1



Gambar 4.5 Rangkaian logika multiplekser 16 to1 dengan node

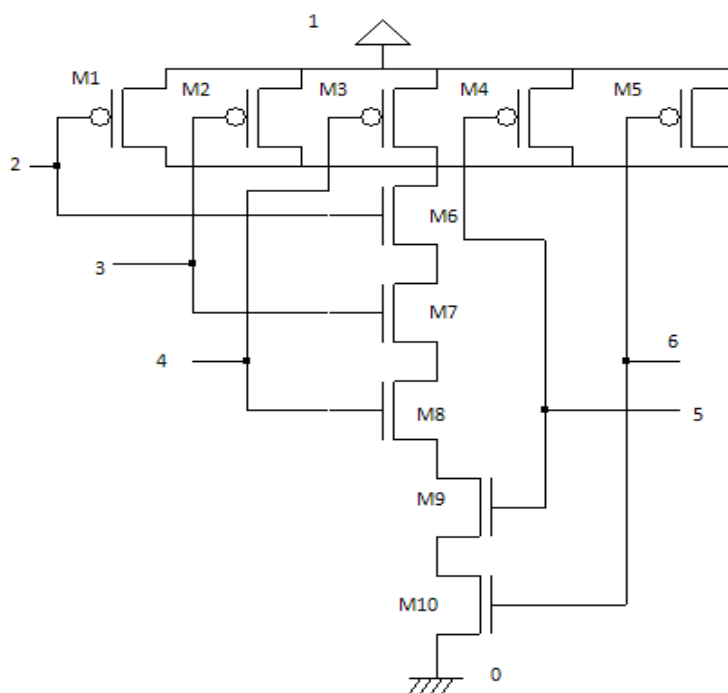
4.3 Perancangan Transistor Multiplekser 16 to 1

Dalam merancang transistor pada Multiplekser 16 to 1 dilakukan pada tiap gerbang penyusun IC, diamna tiap gerbang tersusun atas rangkaian transistor PMOS dan NMOS yang disusun untuk menghasilkan logika pada tiap gerbang. Inverter tersusun atas satu pasang transistor PMOS dan NMOS yang dilakukan perancangan node dengan memberikan penomeran pada tiap node yang akan menjadi panduan dalam penyusunan listing program pada PSPICE, Gambar 4.3 menunjukkan gambar inverter dan menunjukkan bahwa gate pada PMOS dan NMOS terhubung menjadi node 2, source pada PMOS terhubung pada VCC, drain pada NMOS terhubung pada ground sedangkan drain pada PMOS dan source pada NMOS terhubung menjadi satu pada node 3.



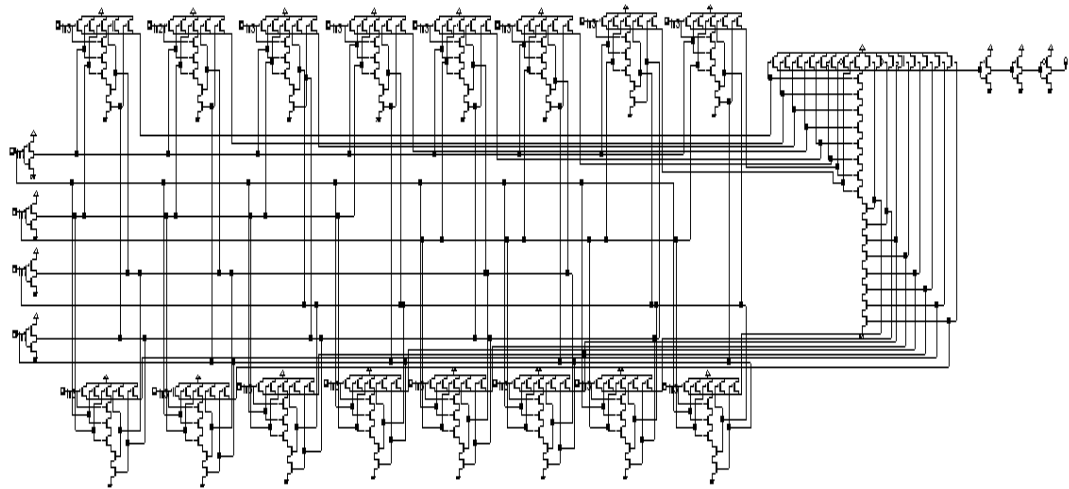
Gambar 4.6 rangkaian transistor inverter

Gerbang logika NAND 5 input tersusun dari 5 pasang transistor PMOS yang dirangkai secara paralel dan 5 pasang transistor NMOS yang dirangkai secara seri. *Source* pada transistor PMOS terhubung pada VCC yang disimbolkan sebagai *node 1* sedangkan *drainnya* terhubung pada *node 7*. *Gate* M1 dan M6 terhubung menjadi *node 2*, *Gate* M2 dan M7 terhubung menjadi *node 3*, *Gate* M3 dan M8 terhubung menjadi *node 4*, *Gate* M4 dan M9 terhubung menjadi *node 5*, dan *Gate* M5 dan M10 terhubung menjadi *node 6*. *Drain* pada NMOS terhubung pada *ground*. Gambar rangkaian transistor NAND 5 input ditunjukkan dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.7 Rangkaian transistor NAND 5 input

Rangkaian Multiplexer 16 to 1 HCMOS tersusun dari 5 gerbang inverter yang terdiri dari 10 transistor PMOS dan NMOS, 16 gerbang NAND 5 input yang terdiri dari 160 transistor PMOS dan NMOS, 1 gerbang NAND 16 input yang tersusun dari 32 transistor PMOS dan NMOS, dan 1 inverter kaskada yang tersusun dari 4 transistor PMOS dan NMOS, sehingga jumlah transistor CMOS yang dibutuhkan untuk membentuk IC Multiplexer 16 to 1 HCMOS adalah 206 transistor. Gambar 4.6 adalah gambar rangkaian transistor Multiplexer 16 to 1.



Gambar 4.8 Rangkaian transistor Multiplexer 16 to 1 HCMOS

4.4 Parameter Perancangan

Dalam perancangan IC Multiplexer 16 to 1 HCMOS terdapat karakteristik rangkaian yang ditentukan berdasarkan karakteristik yang terdapat dalam gerbang dasarnya yang bergantung pada keadaan bahan pembuat transistor. Adapun beberapa parameter dasar tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4.1 yang sesuai dengan owners manual dan rule file dalam perangkat lunak Microwind2 dengan teknologi $0.6 \mu\text{m}$ CMOS proses ($= 0.3\mu\text{m}$)

Parameter Transistor CMOS			
Simbol	NMOS	PMOS	Keterangan
ϵ_{ox}	$3,45 \times 10^{-13} F/cm$		Konstanta dielektrik polisilikon
μ_n / μ_p	$580 cm^2 / V.s$	-	Mobilitas rata-rata electron dalam saluran drain dan source
μ_n / μ_p		$230 cm^2 / V.s$	Mobilitas rata-rata electron dalam saluran drain dan source
V_T	0,8V	-0,8V	Tegangan ambang pada PMOS dan NMOS
γ		$0,4 V^{0,5}$	GAMMA blk threshold parameter
$2\phi_F$		0,3V	PHI, surface potential at strong inversion
t_{ox}		15nm	Ketebalan oksidasi gerbang (gate)
V_{DD}		5V	Tegangan catu
K_N	$300 \mu A / V^2$		Parameter transkonduksi transistor NMOS
K_P		$120 \mu A / V^2$	Parameter transkonduktansi transistor PMOS

Tabel 4.1 Parameter desain Transistor

4.5 Desain nilai W dan L Transistor

Nilai W dan L untuk MOS tipe-n dan tipe-p pada gerbang dasar ditentukan dengan mempertimbangkan interaksi antara tegangan masukan dan keluaran gerbang. Penentuan W dan L untuk inverter CMOS didasari oleh analisis yang dilakukan pada nilai $K_R=1$ seperti ditunjukkan dalam gambar 16, untuk menghasilkan suatu grafik karakteristik alih tegangan masukan dan keluaran simetris. Untuk menentukan W dan L pada masing-masing transistor pada gerbang inverter harus dilakukan analisis seperti berikut:

$$V_{th}(inv) = \frac{V_{T,n} + \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} (V_{DD} - |V_{T,p}|)}{1 + \sqrt{\frac{1}{k_R}}}$$

$$k_R = \frac{k_n}{k_p}$$

$$V_{TH}(INV) = \frac{V_{T,n} + \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} (V_{DD} - |V_{T,p}|)}{1 + \sqrt{\frac{k_p}{k_n}}}$$

$$2,5 = \frac{1 + \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} (5 - 0,8)}{1 + \sqrt{\frac{k_p}{k_n}}}$$

$$2,5 + 2,5 \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} = 0,8 + 4,2 \sqrt{\frac{k_p}{k_n}}$$

$$1,7 \sqrt{\frac{k_n}{k_p}} = 1,7 \Leftrightarrow \sqrt{\frac{k_n}{k_p}} = 1 \Leftrightarrow k_n = k_p$$

$$\frac{k_n}{k_p} = 1 = \frac{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_n}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_p}$$

$$= \frac{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_n}{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_p}$$

Dengan $\mu_n = 580 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ dan $\mu_p = 230 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, maka

$$\frac{k_n}{k_p} = \frac{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_n}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_p}$$

$$\frac{k_n}{k_p} = \frac{580 \text{ cm}^2 / \text{V.s} \left(\frac{W}{L}\right)_n}{230 \text{ cm}^2 / \text{V.s} \left(\frac{W}{L}\right)_p} \Leftrightarrow 1 = 2,52 \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_n}{\left(\frac{W}{L}\right)_p}$$

$$\frac{W_P}{L_P} \approx 2,5 \frac{W_n}{L_n} \quad (4.4)$$

Dalam menentukan nilai W/L pada masing-masing transistor harus dilakukan analisis silang dan aturan perancangan IC. Lebar polisilikon dalam suatu persilangan transistor MOS disimbolkan L dan lebar difusi disimbolkan dengan W. Sesuai dengan aturan perancangan IC, lebar minimum polisilikon adalah 2λ pada L_N dan L_p maka Persamaan menjadi :

$$\frac{W_P}{2\lambda} \approx 2,5 \frac{W_n}{2\lambda}$$

$$W_P \approx 2,5 W_N \quad (4.5)$$

Nilai C_{ox} berubah sesuai dengan ketebalan oksida gate t_{ox} . Nilai t_{ox} ditetapkan sebesar 15nm.

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$C_{ox} = \frac{3,45 \times 10^{-13}}{15 \times 10^{-9}} = 2,3 \times 10^{-5} \text{ F/cm}^2$$

$$k_n = \mu_n C_{ox} \frac{W_n}{L_n}$$

Dengan memasukkan nilai parameter dasar $\mu_n = 580 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ dan $k_n = 300 \mu\text{A/V}^2$ serta

$$C_{ox} = 2,3 \times 10^{-5} \text{ F/cm}^2$$

$$\frac{W_n}{L_n} = \frac{k_n}{\mu_n C_{ox}}$$

$$\frac{W_n}{L_n} = \frac{300 \times 10^{-6}}{580 \times 2,33 \times 10^{-7}} = 2,25$$

$$\frac{W_n}{L_n} \approx 2 \quad (4.6)$$

Dengan memasukkan W_n ; L_n kedalam Persamaan (4-4) diperoleh $W_p : L_p$,

$$\frac{W_p}{L_p} = 2,5 \times 2 \rightarrow \frac{W_p}{L_p} \approx 5 \quad (4.7)$$

Berdasarkan persamaan 4.6 dan 4.7 dapat memberikan analisis awal. Dengan ukuran polisilikon 2λ , maka akan diperoleh nilai W_p dan W_n sebesar 4λ dan 10λ . Dalam perancangan dengan menggunakan microwind2 (0,6 μ m CMOS Process), nilai $\lambda=0,3\mu$ m. Nilai W dan L untuk gerbang-gerbang dasar adalah sebagai berikut:

$$W_p = 10\lambda = 3\mu\text{m} \text{ dan } L_p = 2\lambda = 0,6\mu\text{m}$$

$$W_n = 4\lambda = 1,2\mu\text{m} \text{ dan } L_n = 2\lambda = 0,6\mu\text{m}$$

Sedangkan nilai W dan L untuk kaskada, yaitu:

- Kaskada pertama

$$W_p = W_n = 3,6\mu\text{m} \text{ dan } L_p = L_n = 0,6\mu\text{m}$$

- Kaskada kedua

$$W_p = W_n = 10,8\mu\text{m} \text{ dan } L_p = L_n = 0,6\mu\text{m}$$

Nilai W dan L gerbang-gerbang dasar dan kaskada berdasarkan persamaan 4.1 – 4.3 dan secara lengkap sebagai berikut:

$$M_1 W_p = 3\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_2 W_n = 1,2\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

Nilai W dan L transistor untuk gerbang NAND 5 input,

$$M_1 W_p = 3\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_2 W_p = 3\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_3 W_p = 3\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_4 W_p = 3\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_5 W_p = 3\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_6 W_n = 1,2\mu\text{m} \quad L_p = 0,6\mu\text{m}$$

$$M_7 W_N = 1,2 \mu m$$

$$L_P = 0,6 \mu m$$

$$M_8 W_N = 1,2 \mu m$$

$$L_P = 0,6 \mu m$$

$$M_9 W_N = 1,2 \mu m$$

$$L_P = 0,6 \mu m$$

$$M_{10} W_N = 1,2 \mu m$$

$$L_P = 0,6 \mu m$$

4.6 Noise Margin (Batas Derau) Rangkaian

Noise margin menunjukkan kekebalan relative sebuah family logika terhadap noise. Untuk mengetahui noise margin rangkaian, maka harus diketahui terlebih dahulu nilai V_{IH} , V_{IL} , V_{OH} dan V_{OL} pada gerbang logika.

4.6.1 Analisis Matematis V_{IL} dan V_{OH} .

Nilai V_{IL} merupakan nilai tegangan tertentu dari tegangan masukan (V_{in}) yang membuat tegangan keluaran menjadi V_{OH} , perhitungan V_{IL} dapat dihitung dengan Persamaan (2-33).

$$V_{IL} = \frac{2V_{out} + V_{T,p} - V_{DD} + k_R V_{T,n}}{1 + k_R} \quad (2.33)$$

Dalam perancangan nilai k_R merupakan perbandingan antara k_n dan k_p , dimana nilai ini menentukan kesimetrisan dari suatu grafik karakteristik alih tegangan dengan nilai $k_R = 1$. Dengan mensubstitusikan nilai $V_{DD} = 5V$, $V_{T,n} = 0,8V$ dan $V_{T,p} = -0,8V$, maka didapat fungsi V_{IL} sebagai fungsi V_{out} sebagai berikut,

$$V_{IL} = \frac{2V_{out} + V_{T,p} - V_{DD} + k_R V_{T,n}}{1 + k_R} = \frac{2V_{out} + (-1) - 5 + (1 \times 1)}{1 + 1} = \frac{2V_{out} - 5}{2}$$

$$V_{IL} = \frac{2V_{out} - 5}{2} = V_{out} - 2,5$$

Untuk memperoleh nilai V_{out} , maka digunakan Persamaan (2-33). Dimana $V_{IN} = V_{IL}$ terjadi saat transistor NMOS dalam keadaan saturasi dan transistor PMOS dalam daerah kerja linier.

$$\frac{k_n}{2} (V_{GS,n} - V_{T,n})^2 = \frac{k_p}{2} [2 V_{IN} - V_{DD} - V_{T,p} \quad V_{out} - V_{DD} - V_{out} - V_{DD}^2]$$

$$\frac{k_n}{k_p} = k_R = 1,$$

$$V_{in} - V_{T,n}^2 = [2 \times V_{IN} - V_{DD} - V_{T,p} \quad V_{out} - V_{DD} - V_{out} - V_{DD}^2]$$

$$V_{out} - 2,5 - 0,8^2 = [2 \times V_{out} - 2,5 - 5 + 0,8 \quad V_{out} - 5 - V_{out} - 5^2] \quad 13,4$$

$$V_{out} - 3,3^2 = V_{out}^2 - 13V_{out} + 40 \quad V_{out} - 3,5^2 = [2 \times V_{out} - 6,7 \quad V_{out} - 5 - V_{out} - 5^2]$$

$$V_{out}^2 - 6,6V_{out} + 10,89 = [2 \times V_{out}^2 - 11,7V_{out} + 33,5 - V_{out}^2 - 10V_{out} + 25]$$

$$V_{out}^2 - 6,6V_{out} + 10,89 = [2V_{out}^2 - 23,4V_{out} + 67 - V_{out}^2 - 10V_{out} + 25]$$

$$(V_{out}^2 - 6,6V_{out} + 10,89) \Rightarrow (V_{out}^2 - 13,4V_{out} + 42)$$

$$6,8V_{out} = 31,11$$

$$V_{out} = 4,575V$$

Maka nilai V_{IL} adalah

$$V_{IL} = V_{out} - 2,5 = 4,575 - 2,5 = 2,075V$$

Nilai V_{IH} diperoleh dengan menggunakan Persamaan (2-42), dengan mensubstitusikan nilai $k_R = 1, V_{DD} = 5V, V_{T,n} = 0,8V$ dan $V_{T,p} = -0,8V$, maka didapat fungsi V_{IL} sebagai fungsi V_{out} sebagai berikut

$$V_{IH} = \frac{V_{DD} + V_{T,p} + k_R \quad 2V_{out} + V_{T,n}}{1 + k_R}$$

$$V_{IH} = \frac{5 - 0,8 + 1 \times 2V_{out} + 0,8}{1 + 1}$$

$$V_{IH} = \frac{4,2 + 2V_{out} + 0,8}{2} = \frac{5 + 2V_{out}}{2}$$

$$V_{IH} = 2,5 + V_{out}$$

Untuk memperoleh nilai V_{out} , maka digunakan Persamaan (2-39).

$$\frac{k_n}{2} \times [2 V_{in} - V_{T,n} \quad V_{out} - V_{out}^2] = \frac{k_p}{2} V_{in} - V_{DD} - V_{T,p}^2$$

Dengan $V_{in} = V_{IH} \Rightarrow V_{IH} = 2,5 + V_{out}$, $\frac{k_p}{k_n} = k_R = 1$, $V_{DD} = 5V$, $V_{T,n} = 0,8V$ dan $V_{T,p} = -0,8V$

maka,

$$\left[2 \times V_{IH} - V_{T,n} V_{out} - V_{out}^2 \right] = V_{IH} - V_{DD} - V_{T,p}^2$$

$$\left[2 \times 2,5 + V_{out} - 0,8 V_{out} - V_{out}^2 \right] = 2,5 + V_{out} - 5 + 0,8^2$$

$$V_{out}^2 + 3,2V_{out} = V_{out} - 1,7^2$$

$$V_{out}^2 + 3,4V_{out} = V_{out}^2 - 3,4V_{out} + 2,89$$

$$6,8V_{out} = 2,89$$

$$V_{out} = 0,425V$$

Dengan mensubstitusikan kembali nilai V_{out} kedalam Persamaan (4-2), maka

$$V_{IH} = 2,5 + V_{out} \quad (4-2)$$

$$V_{IH} = 2,5 + 0,425 \Rightarrow V_{IH} = 2,925V$$

Dari analisis perhitungan, diperoleh nilai V_{IH} , V_{IL} , V_{OH} dan V_{OL} sebagai berikut,

$$V_{OH} = 4,575V, \text{ saat } V_{IL} = 2,075V$$

$$V_{OL} = 0,425V, \text{ saat } V_{IH} = 2,925V$$

Dari nilai-nilai tersebut dapat diketahui nilai *noise margin* sesuai dengan Persamaan (2-54) dan (2-55) dan ditunjukkan dalam Gambar 4.9

$$NM_H = V_{OH} - V_{IH} \quad (2-54)$$

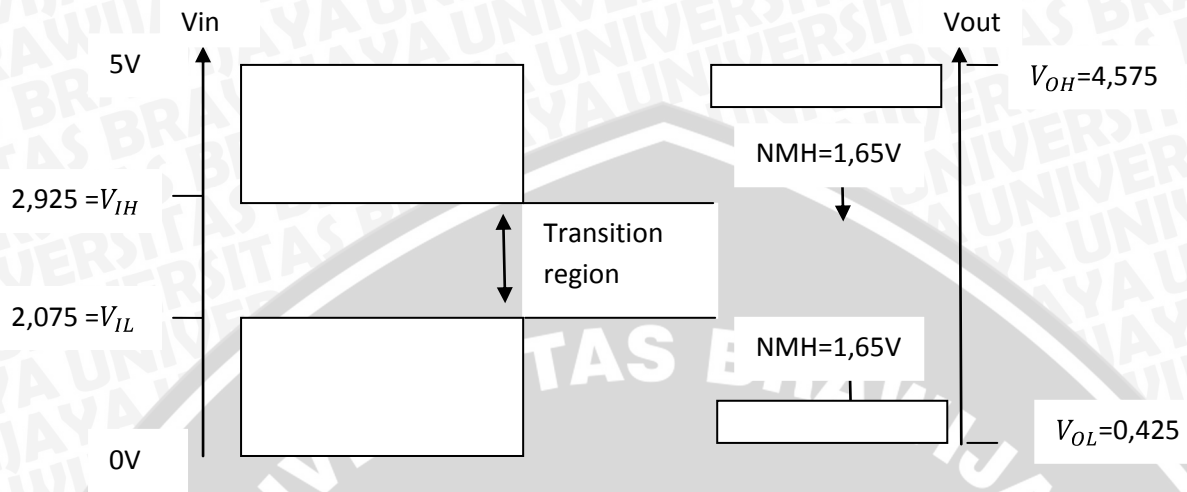
$$NM_H = 4,575 - 2,925 = 1,65V$$

$$NM_L = V_{IL} - V_{OL} \quad (2-55)$$

$$NM_L = 2,075 - 0,425 = 1,65V$$

Gambar 4.9 menunjukkan *Noise Margin* hasil perhitungan, dimana *range* tegangan input yang dinyatakan sebagai logika *LOW* adalah $0V-2,075V$ dan *range* tegangan input yang dinyatakan sebagai logika *HIGH* adalah $2,925V-5V$. sedangkan *range*

tegangan output yang dinyatakan sebagai logika *LOW* adalah 0V-0,425V dan *range* tegangan output yang dinyatakan sebagai logika *HIGH* adalah 4,575V-5V.



Gambar 4.9 Batas Derau Multiplekser 16 to 1

Sedangkan tegangan Threshold yang terjadi karena $V_{in} = V_{out} = V_T$ dapat dihitung dengan Persamaan (3-28) dan mensubstitusi nilai $k_R = 1, V_{DD} = 5V, V_{T,n} = 0,8V$ dan $V_{T,p} = -0,8V$ yaitu

$$V_T = \frac{V_{T,n} + V_{DD} + V_{T,p} \sqrt{\frac{1}{k_n}}}{\left(1 + \sqrt{\frac{1}{k_R}}\right)}$$

$$V_T = \frac{0,8 + 5 - 0,8 \sqrt{1}}{1 + \sqrt{1}} = \frac{5}{2} = 2,5V$$

4.7 Analisis Propagation Delay

Propagation Delay atau waktu tunda rambatan dapat dilakukan dengan menentukan nilai kapasitor yang mungkin dapat digunakan. Parameter yang digunakan sebagai pembanding adalah nilai *Propagation Delay* pada lembar data (*datasheet*) IC TTL DM74LS450 dan IC CMOS CD4067B . Dalam lembar data ditunjukkan IC TTL

DM74LS450 mempunyai nilai $t_{PD} = 25ns$ dengan nilai $C=50pF$. Sedangkan IC CMOS CD4067B mempunyai nilai $t_{PD} = 30ns$ dengan nilai $C=50pF$ Dengan demikian dalam perancangan IC HCMOS harus mempunyai kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan IC TTL dan IC CMOS tersebut. Dalam perancangan ini, nilai t_{PLH} dan t_{PHL} adalah 20ns. Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan t_{PLH} dan t_{PHL} dari karakteristik IC TTL dan IC CMOS.

Mengacu pada pernyataan nilai parameter transkonduksi (K) maka analisis perancangan secara manual menggunakan nilai K yang bervariasi. Perancangan nilai K ini bertujuan untuk mendapatkan propagation delay yang lebih cepat dengan perbandingan K_N / K_P adalah 2,5. Variasi parameter transkonduksi K ditunjukkan dalam

Nilai *propagation delay* yang dibutuhkan dalam perancangan ini adalah nilai yang lebih kecil dari parameter *datasheet* , karena semakin kecil nilai *propagation delay* maka kecepatan proses IC akan semakin cepat. Keluaran yang dihasilkan akan bersifat *symmetric output drive* jika diambil nilai yang umum untuk parameter transkonduktansi $K_N = 2,5K_P$, maka $\frac{L_N W_P}{W_N L_P} = \frac{K_N}{K_P} = 2,5$ sehingga dapat menghasilkan *propagation delay* yang lebih kecil. Parameter transkonduktansi ditunjukkan dalam Tabel 4.2. Penentuan nilai transkonduktansi dilakukan dengan menentukan *Average Propagation Delay* dan membandingkan dengan parameter *datasheet* yaitu 20ns.

Tabel 4.2 Variasi Parameter transkonduksitansi

parameter	Variasi nilai							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Kn	5	10	15	20	25	30	35	40
Kp	2	4	6	8	10	12	14	16
C	0,5pF,1pF, 5pF, 15pF, 50pF							

$$1) \quad K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 5 \mu A/V^2 \text{ dan } K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 2 \mu A/V^2$$

✓ Untuk $C_1 = 0,5 pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 16 ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 5 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 16 ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 16 \cdot 10^{-9} = 32 ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 16 \cdot 10^{-9} = 32 ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{16 ns + 16 ns}{2} = \frac{32 ns}{2} = 16 ns$$

✓ Untuk $C_2 = 1 pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 32 ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 5 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 32 ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 32 \cdot 10^{-9} = 64 ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 32 \cdot 10^{-9} = 64 ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{32 ns + 32 ns}{2} = \frac{64 ns}{2} = 32 ns$$

✓ Untuk $C_2 = 5 pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 160 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 5 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 160 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 160 \cdot 10^{-9} = 320 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 160 \cdot 10^{-9} = 320 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{160 \text{ ns} + 160 \text{ ns}}{2} = \frac{320 \text{ ns}}{2} = 160 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_3 = 15 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 480 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 5 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 480 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 480 \cdot 10^{-9} = 960 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 480 \cdot 10^{-9} = 960 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{480 \text{ ns} + 480 \text{ ns}}{2} = \frac{960 \text{ ns}}{2} = 480 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_5 = 50 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 1600 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 5 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 1600 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 1600 \cdot 10^{-9} = 3200 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 1600 \cdot 10^{-9} = 3200 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{1600 \text{ ns} + 1600 \text{ ns}}{2} = \frac{3200 \text{ ns}}{2} = 1600 \text{ ns}$$

2) $K_N = \mu_n \cdot C_{ox} = 10 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_p \cdot C_{ox} = 4 \mu\text{A/V}^2$

✓ Untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 8 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 8 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 8 \cdot 10^{-9} = 16 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 8 \cdot 10^{-9} = 16 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{8 \text{ ns} + 8 \text{ ns}}{2} = \frac{16 \text{ ns}}{2} = 8 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 16 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 16 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 16 \cdot 10^{-9} = 32 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 16 \cdot 10^{-9} = 32ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{16ns + 16ns}{2} = \frac{32ns}{2} = 16ns$$

✓ Untuk $C_2 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 80ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 80ns$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 80 \cdot 10^{-9} = 160ns$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 80 \cdot 10^{-9} = 160ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{80ns + 80ns}{2} = \frac{160ns}{2} = 80ns$$

✓ Untuk $C_3 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 240ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 240ns$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 240 \cdot 10^{-9} = 480ns$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 240 \cdot 10^{-9} = 480ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{240ns + 240ns}{2} = \frac{480ns}{2} = 240ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 800ns$$

$$t_{pHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 800 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 800 \cdot 10^{-9} = 1600 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 800 \cdot 10^{-9} = 1600 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{800 \text{ ns} + 800 \text{ ns}}{2} = \frac{1600 \text{ ns}}{2} = 800 \text{ ns}$$

3) $K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 15 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 6 \mu\text{A/V}^2$

✓ Untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{pLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 6 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 5,33 \text{ ns}$$

$$t_{pHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 15 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 5,33 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 5,33 \cdot 10^{-9} = 10,66 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 5,33 \cdot 10^{-9} = 10,66 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{5,33 \text{ ns} + 5,33 \text{ ns}}{2} = \frac{10,66 \text{ ns}}{2} = 5,33 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{pLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 6 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 10,67 \text{ ns}$$

$$t_{pHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 15 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 10,67 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 10,67 \cdot 10^{-9} = 21,34 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 10,67 \cdot 10^{-9} = 21,34 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{10,67ns + 10,67ns}{2} = \frac{21,34ns}{2} = 10,67ns$$

✓ Untuk $C_3 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 6 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 53,35ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 15 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 53,35ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 53,35 \cdot 10^{-9} = 106,7ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 53,35 \cdot 10^{-9} = 106,7ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{53,35ns + 53,35ns}{2} = \frac{106,7ns}{2} = 53,35ns$$

✓ untuk $C_4 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 6 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 160ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 15 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 160ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 160 \cdot 10^{-9} = 320ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 160 \cdot 10^{-9} = 320ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{160ns + 160ns}{2} = \frac{320ns}{2} = 160ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 6 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 533,33ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 15 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 533,33 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 533,33 \cdot 10^{-9} = 1066,66 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 533,33 \cdot 10^{-9} = 1066,66 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{533,33 \text{ ns} + 533,33 \text{ ns}}{2} = \frac{1066,66 \text{ ns}}{2} = 533,33 \text{ ns}$$

4) $K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 20 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 8 \mu\text{A/V}^2$

✓ Untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 4 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 4 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 4 \cdot 10^{-9} = 8 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 4 \cdot 10^{-9} = 8 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{4 \text{ ns} + 4 \text{ ns}}{2} = \frac{8 \text{ ns}}{2} = 4 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 8 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 8 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 8 \cdot 10^{-9} = 16 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 8 \cdot 10^{-9} = 16ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{8ns + 8ns}{2} = \frac{16ns}{2} = 8ns$$

✓ Untuk $C_3 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 40ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 40ns$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 40 \cdot 10^{-9} = 80ns$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 40 \cdot 10^{-9} = 80ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{40ns + 40ns}{2} = \frac{80ns}{2} = 40ns$$

✓ Untuk $C_4 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 120ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 120ns$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 120 \cdot 10^{-9} = 240ns$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 120 \cdot 10^{-9} = 240ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{120ns + 120ns}{2} = \frac{240ns}{2} = 120ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 400ns$$

$$t_{pHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 400 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{pHL} = 2 \times 400 \cdot 10^{-9} = 800 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{pHL} = 2 \times 400 \cdot 10^{-9} = 800 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{pHL} + t_{pLH}}{2} = \frac{400 \text{ ns} + 400 \text{ ns}}{2} = \frac{800 \text{ ns}}{2} = 400 \text{ ns}$$

5) $K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 25 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 10 \mu\text{A/V}^2$

✓ Untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{pLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 3,2 \text{ ns}$$

$$t_{pHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 25 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 3,2 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{pLH} = 2 \times 3,2 \cdot 10^{-9} = 6,4 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{pHL} = 2 \times 3,2 \cdot 10^{-9} = 6,4 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{pHL} + t_{pLH}}{2} = \frac{3,2 \text{ ns} + 3,2 \text{ ns}}{2} = \frac{6,4 \text{ ns}}{2} = 3,2 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{pLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 6,4 \text{ ns}$$

$$t_{pHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 25 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 6,4 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{pLH} = 2 \times 6,4 \cdot 10^{-9} = 12,8 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{pHL} = 2 \times 6,4 \cdot 10^{-9} = 12,8 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{6,4ns + 6,4ns}{2} = \frac{12,8ns}{2} = 6,4ns$$

✓ Untuk $C_3 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 32ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 25 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 32ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 32 \cdot 10^{-9} = 64ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 32 \cdot 10^{-9} = 64ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{32ns + 32ns}{2} = \frac{64ns}{2} = 32ns$$

✓ Untuk $C_4 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 96ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 25 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 96ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 96 \cdot 10^{-9} = 192ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 96 \cdot 10^{-9} = 192ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{96ns + 96ns}{2} = \frac{192ns}{2} = 96ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 320ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 25 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 320 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 320 \cdot 10^{-9} = 640 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 320 \cdot 10^{-9} = 640 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{320 \text{ ns} + 320 \text{ ns}}{2} = \frac{640 \text{ ns}}{2} = 320 \text{ ns}$$

6) $K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 30 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 12 \mu\text{A/V}^2$

✓ Untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 2,66 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 30 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 2,66 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 2,66 \cdot 10^{-9} = 5,32 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 2,66 \cdot 10^{-9} = 5,32 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{2,66 \text{ ns} + 2,66 \text{ ns}}{2} = \frac{5,32 \text{ ns}}{2} = 2,66 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 5,33 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 30 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 5,33 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 5,33 \cdot 10^{-9} = 10,66 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 5,33 \cdot 10^{-9} = 10,66 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{5,33ns + 5,33ns}{2} = \frac{10,66ns}{2} = 5,33ns$$

✓ Untuk $C_3 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 26,65ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 30 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 26,65ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 26,65 \cdot 10^{-9} = 53,3ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 26,65 \cdot 10^{-9} = 53,3ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{26,65ns + 26,65ns}{2} = \frac{53,3ns}{2} = 26,65ns$$

✓ Untuk $C_4 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 80ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 30 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 80ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 80 \cdot 10^{-9} = 160ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 80 \cdot 10^{-9} = 160ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{80ns + 80ns}{2} = \frac{160ns}{2} = 80ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 266,66ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 30 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 266,66 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 266,66 \cdot 10^{-9} = 533,32 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 266,66 \cdot 10^{-9} = 533,32 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{266,66 \text{ ns} + 266,66 \text{ ns}}{2} = \frac{533,32 \text{ ns}}{2} = 266,66 \text{ ns}$$

7) $K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 35 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 14 \mu\text{A/V}^2$

✓ untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 14 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 2,29 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 35 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 2,29 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 2,29 \cdot 10^{-9} = 4,58 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 2,29 \cdot 10^{-9} = 4,58 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{2,29 \text{ ns} + 2,29 \text{ ns}}{2} = \frac{4,58 \text{ ns}}{2} = 2,29 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 14 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 4,57 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 35 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 4,57 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 4,57 \cdot 10^{-9} = 9,14 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 4,57 \cdot 10^{-9} = 9,14 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{4,57ns + 4,57ns}{2} = \frac{9,14ns}{2} = 4,57ns$$

✓ Untuk $C_3 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 14 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 22,85ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 35 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 22,85ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 22,85 \cdot 10^{-9} = 45,7ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 22,85 \cdot 10^{-9} = 45,7ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{2,29ns + 22,85ns}{2} = \frac{45,7ns}{2} = 22,85ns$$

✓ Untuk $C_4 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 14 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 68,57ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 35 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 68,57ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 68,5 \cdot 10^{-9} = 137,14ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 68,57 \cdot 10^{-9} = 137,14ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{68,57ns + 68,57ns}{2} = \frac{137,14ns}{2} = 68,57ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 14 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 228,57ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 35 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 228,57 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 228,57 \cdot 10^{-9} = 457,14 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 228,57 \cdot 10^{-9} = 457,14 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{228,57 \text{ ns} + 228,57 \text{ ns}}{2} = \frac{457,14 \text{ ns}}{2} = 228,57 \text{ ns}$$

8) $K_N = \mu_N \cdot C_{ox} = 40 \mu\text{A/V}^2$ dan $K_P = \mu_P \cdot C_{ox} = 16 \mu\text{A/V}^2$

✓ untuk $C_1 = 0,5 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 16 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 2 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 0,5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 40 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 2 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 2 \cdot 10^{-9} = 4 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 2 \cdot 10^{-9} = 4 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{2 \text{ ns} + 2 \text{ ns}}{2} = \frac{4 \text{ ns}}{2} = 2 \text{ ns}$$

✓ Untuk $C_2 = 1 \text{ pF}$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_P \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_P \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 16 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 4 \text{ ns}$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 1 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 40 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 4 \text{ ns}$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 4 \cdot 10^{-9} = 8 \text{ ns}$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 4 \cdot 10^{-9} = 8 \text{ ns}$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:



$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{4ns + 4ns}{2} = \frac{8ns}{2} = 4ns$$

✓ Untuk $C_3 = 5pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 16 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 20ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 5 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 40 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 20ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 20 \cdot 10^{-9} = 40ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 20 \cdot 10^{-9} = 40ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{20ns + 20ns}{2} = \frac{40ns}{2} = 20ns$$

✓ Untuk $C_4 = 15pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 16 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 60ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 15 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 40 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 60ns$$

Rise time (waktu naik), t_r , $t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 60 \cdot 10^{-9} = 120ns$

Fall time (waktu turun), t_f , $t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 60 \cdot 10^{-9} = 120ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{60ns + 60ns}{2} = \frac{120ns}{2} = 60ns$$

✓ Untuk $C_5 = 50pF$

$$t_{PLH} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_p \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 16 \times 10^{-6} A/V^2 \times \left(\frac{5}{1}\right) \times 5} = 200ns$$

$$t_{PHL} = \frac{0,8 \cdot C}{\frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_N \cdot V_{DD}} = \frac{0,8 \times 50 \times 10^{-12}}{\frac{1}{2} \times 40 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2 \times \left(\frac{2}{1}\right) \times 5} = 200ns$$

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 200 \cdot 10^{-9} = 400ns$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 200 \cdot 10^{-9} = 400ns$

Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{200ns + 200ns}{2} = \frac{400ns}{2} = 200ns$$

Tabel 4.3 Data hasil perhitungan analisis *propagation delay*

K _N / K _P	Parameter (ns)	C _L (pF)					
		0,5	1	5	10	15	50
K _N = 5 μA/V ² K _P = 2 μA/V ²	t _{PLH}	16	32	160	320	480	1600
	t _{PHL}	16	32	160	320	480	1600
K _N = 10 μA/V ² K _P = 4 μA/V ²	t _{PLH}	8	16	80	160	240	800
	t _{PHL}	8	16	80	160	240	800
K _N = 15 μA/V ² K _P = 6 μA/V ²	t _{PLH}	5,33	10,67	53,35	106,66	160	533,33
	t _{PHL}	5,33	10,67	53,35	106,66	160	533,33
K _N = 20 μA/V ² K _P = 8 μA/V ²	t _{PLH}	4	8	40	80	120	400
	t _{PHL}	4	8	40	80	120	400
K _N = 25 μA/V ² K _P = 10 μA/V ²	t _{PLH}	3,2	6,4	32	64	96	320
	t _{PHL}	3,2	6,4	32	64	96	320
K _N = 30 μA/V ² K _P = 12 μA/V ²	t _{PLH}	2,66	5,33	26,65	53,33	80	266,66
	t _{PHL}	2,66	5,33	26,65	53,33	80	266,66
K _N = 35 μA/V ² K _P = 14 μA/V ²	t _{PLH}	2,29	4,57	22,85	45,71	68,57	228,57
	t _{PHL}	2,29	4,57	22,85	45,71	68,57	228,57
K _N = 40 μA/V ² K _P = 16 μA/V ²	t _{PLH}	2	4	20	40	60	200
	t _{PHL}	2	4	20	40	60	200

Berdasarkan hasil analisis manual variasi nilai parameter transkonduktansi (K) maka perancangan Multiplexer 16 to 1 $K_N = 40\mu A/V^2$ dan $K_P = 16\mu A/V^2$ dengan nilai kapasitansi =5pF. Alasan pemilihan nilai standart pada parameter desain dan kapasitansi CL=5pF sesuai dengan perancangan datasheet.

Rise time (waktu naik), $t_r, t_{TLH} = 2 \times t_{PLH} = 2 \times 20 \cdot 10^{-9} = 40 \times 10^{-9} = 40ns$

Fall time (waktu turun), $t_f, t_{THL} = 2 \times t_{PHL} = 2 \times 20 \cdot 10^{-9} = 40 \times 10^{-9} = 40ns$



Average Propagation Delay (Rata-rata rambatan waktu tunda) adalah:

$$t_{PD} = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} = \frac{20ns + 20ns}{2} = \frac{20ns}{2} = 20ns$$

Perencanaan nilai disipasi daya dilakukan dengan membandingkan nilai pada datasheet dan menggunakan variasi frekuensi dan nilai kapasitor pada $K_N = 40\mu A / V^2$ dan $K_P = 16\mu A / V^2$

Disipasi daya pada frekuensi 1MHz adalah:

$$\begin{aligned} PD &= C_L V_{DD}^2 f \\ &= 5 \cdot 10^{-12} \cdot 5^2 \cdot 1 \cdot 10^6 \\ &= 125\mu W = 0,125mW \end{aligned}$$

Dengan nilai propagation delay 20 ns maka:

$$\begin{aligned} PDP &= t_{PD} PD \\ &= 20 \cdot 10^{-9} \cdot 125 \cdot 10^{-6} \\ &= 2,5pJ \end{aligned}$$

