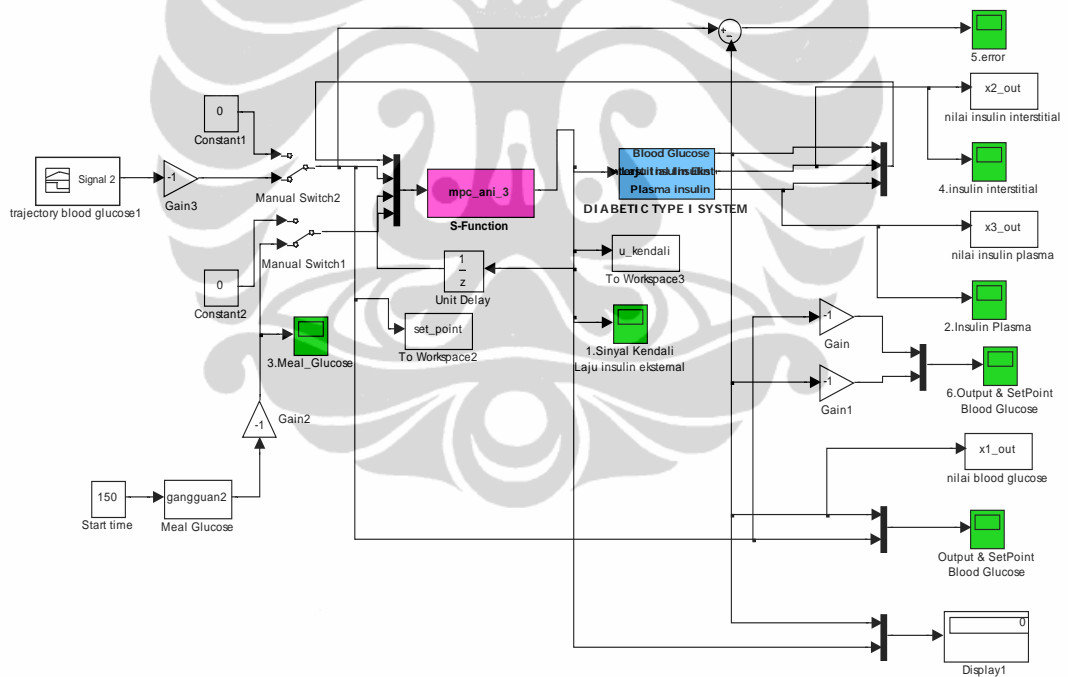


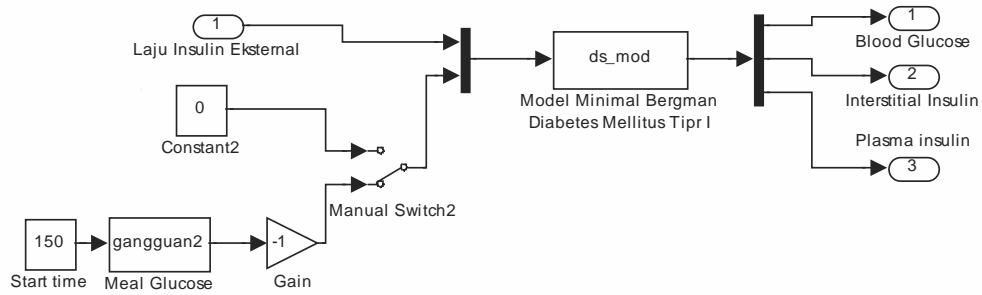
# BAB 4

## HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Bab ini membahas analisa dari uji eksperimen pengendalian kadar gula darah penderita diabetes mellitus tipe I dengan metode MPC dengan beberapa parameter penalaan yang berbeda. Simulasi dilakukan dengan menggunakan Simulink yang terdapat pada perangkat lunak MATLAB 7 seperti pada gambar 4.1.



(a)



(b)

**Gambar 4.1.** Blok diagram simulink pengendalian kadar gula darah diabetes mellitus tipe I dengan MPC

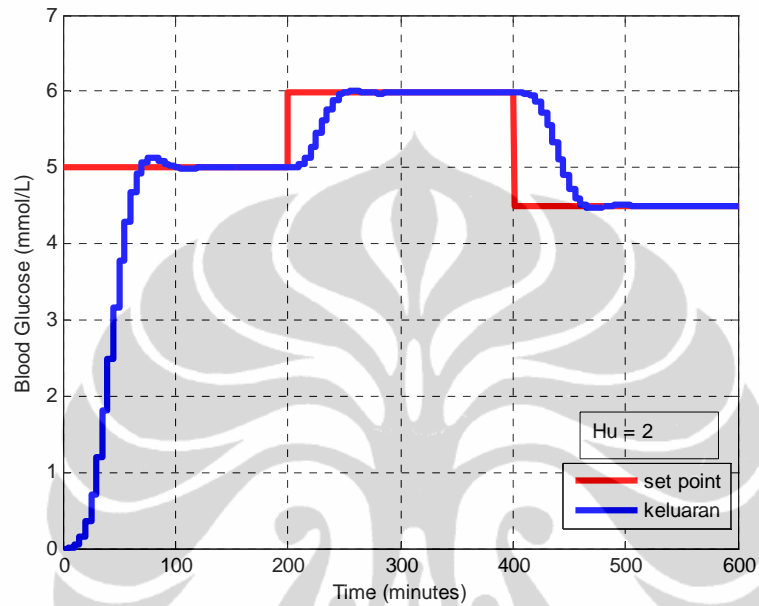
Tujuan dari uji eksperimen ini adalah untuk mengetahui kinerja MPC dengan parameter penalaan yang berbeda-beda. Model yang digunakan pada simulasi adalah persamaan ruang keadaan linier dari model minimal *Bergman* yang didiskritkan dengan waktu pencuplikan 5 menit yang terdapat pada persamaan (3.32).

#### **4.1. PENGARUH NILAI *CONTROL HORIZON* DAN *PREDICTION HORIZON* PADA HASIL PENGENDALIAN MPC**

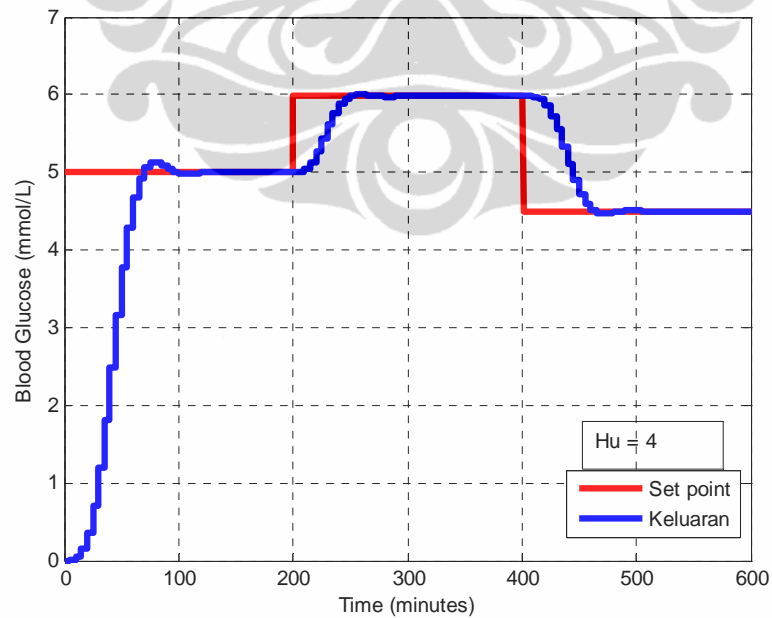
##### **4.1.1. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai *Prediction Horizon* Tetap dan Nilai *Control Horizon* Bervariasi**

Pengaruh *control horizon* ( $H_u$ ) terhadap hasil pengendalian MPC dapat dilihat dengan melakukan uji simulasi pada nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) tetap, yaitu sebesar 10, dan nilai *control horizon* dibuat bervariasi. Variasi *control horizon* yang digunakan pada uji simulasi adalah sebesar 2 dan 4. Faktor bobot kesalahan

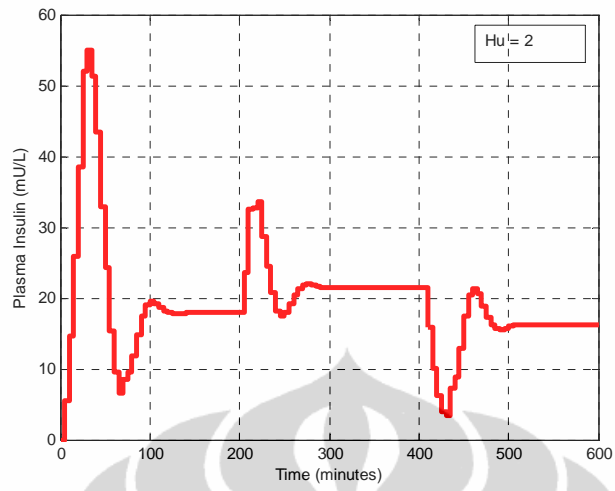
( $Q$ ) yang digunakan adalah  $L_{Hp}$  sedangkan faktor bobot perubahan sinyal kendali ( $R$ ) yang digunakan adalah  $0,0001I_{Hu}$ . Hasil uji simulasi dengan *prediction horizon* tetap dan *control horizon* yang berbeda terdapat pada gambar 4.2 dan 4.3.



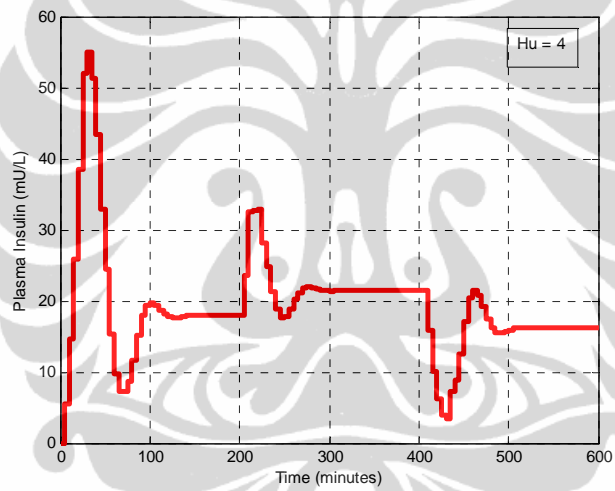
(a)



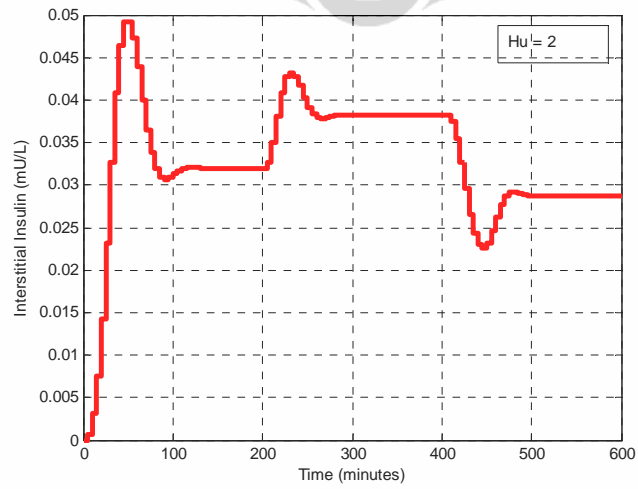
(b)



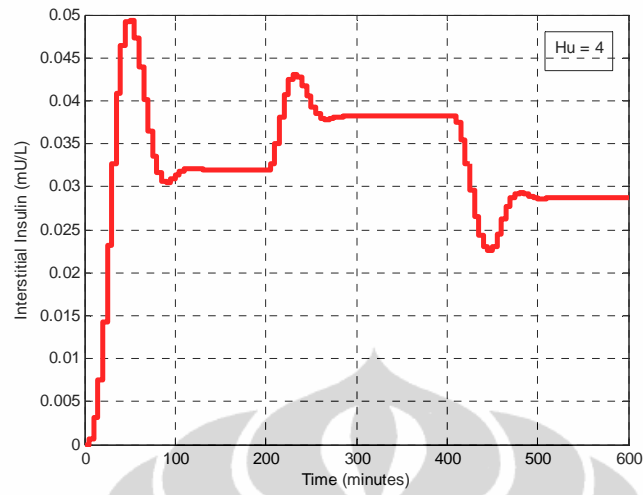
(c)



(d)

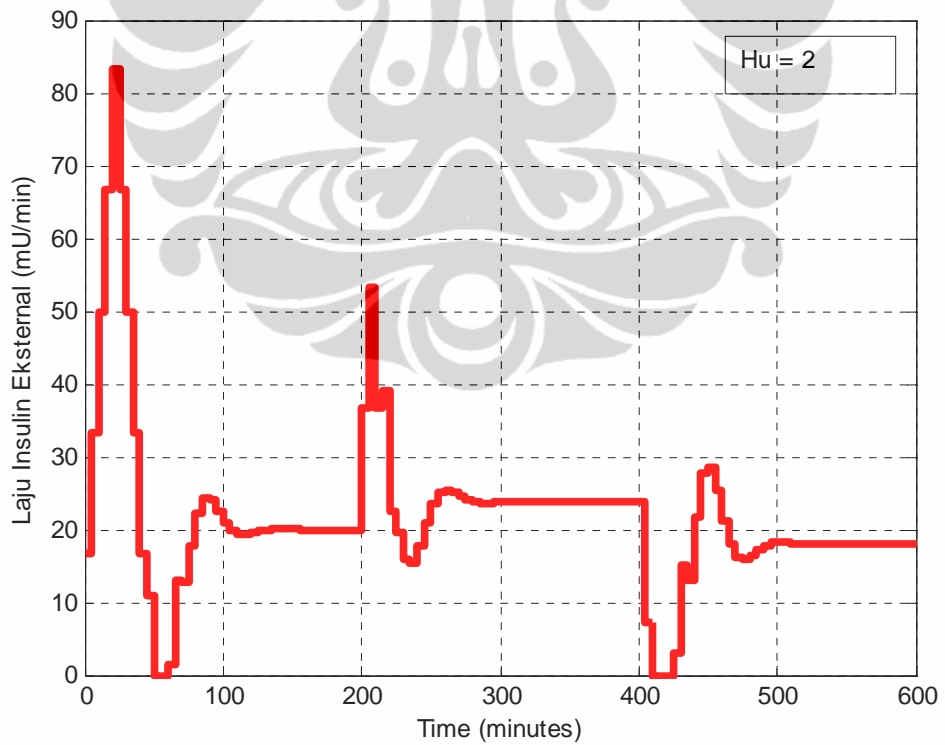


(e)

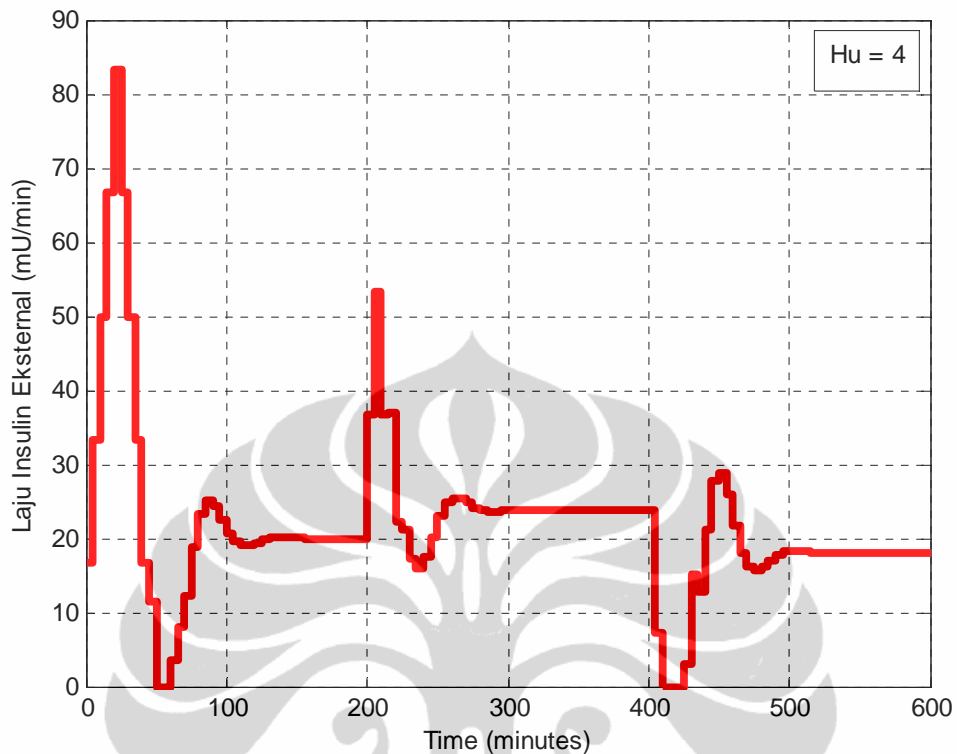


(f)

**Gambar 4.2.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) = 10 dan *control horizon* ( $H_u$ ) bervariasi



(a)



(b)

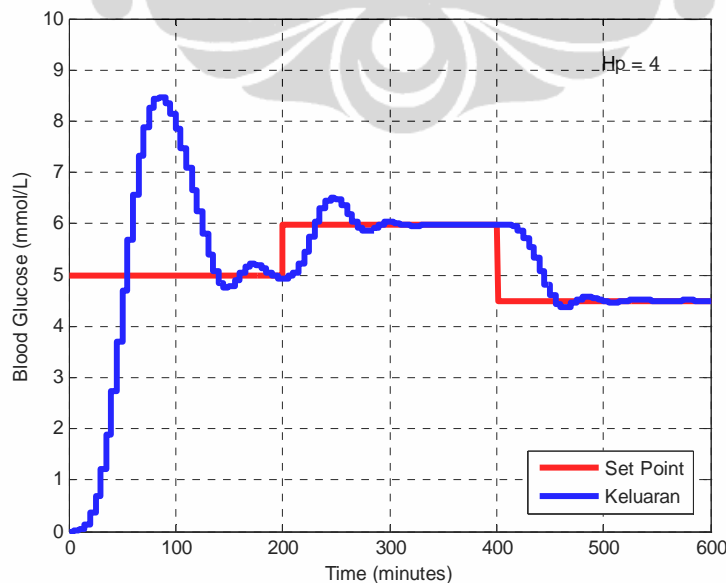
**Gambar 4.3.** Sinyal kendali sistem hasil uji simulasi dengan nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) = 10 dan *control horizon* ( $H_u$ ) bervariasi

Berdasarkan gambar 4.2 dan 4.3 ternyata hasil pengendalian sama jika *control horizon* diubah-ubah baik mendekati maupun menjauhi *prediction horizon*. Keluaran sistem tidak jauh berbeda jika *control horizon* diubah-ubah, walaupun sinyal kendali terdapat sedikit perbedaan (gambar 4.3.(a) dan 4.3.(b)). Semakin kecil nilai *control horizon*, sinyal kendali semakin cenderung berubah secepatnya dan sebesar-besarnya agar nilai keluaran sistem dapat dengan segera mencapai nilai trayektori acuan, terlebih jika bobot perubahan sinyal kendali kecil yang berarti pembebanan pada sinyal kendali kecil sehingga pergerakan sinyal kendali lebih bebas. Pada menit ke-200 sampai menit ke-300 keluaran sistem mulai

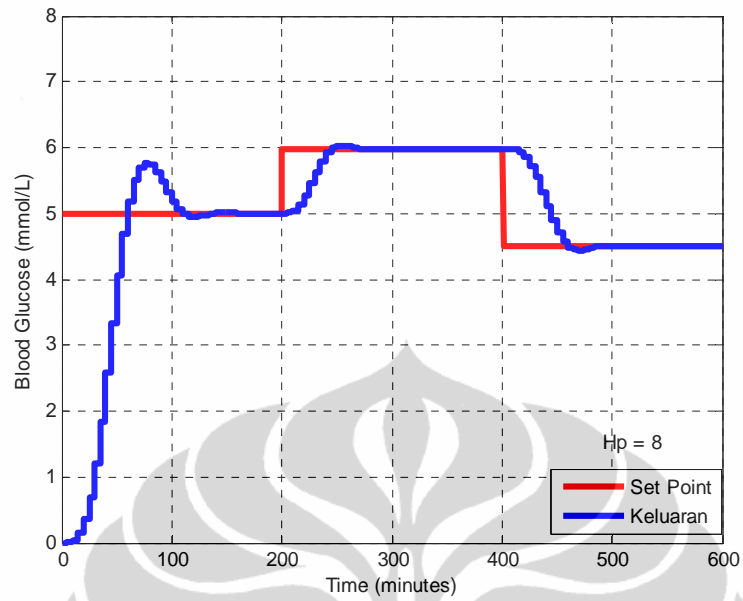
bergerak menuju trayektori acuan yang naik dari 5 mmol/L menjadi 6 mmol/L (gambar 4.2.(a) dan (b)), karena itu laju insulin eksternal (sinyal kendali) berkurang agar keluaran sistem dapat mencapai trayektori acuan (gambar 4.3.(a) dan (b)). Laju insulin eksternal yang berkurang secara otomatis mengurangi volume insulin yang disuntikkan, sehingga membuat kadar glukosa darah bergerak naik.

#### 4.1.2. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai *Control Horizon* Tetap dan Nilai *Prediction Horizon* Bervariasi

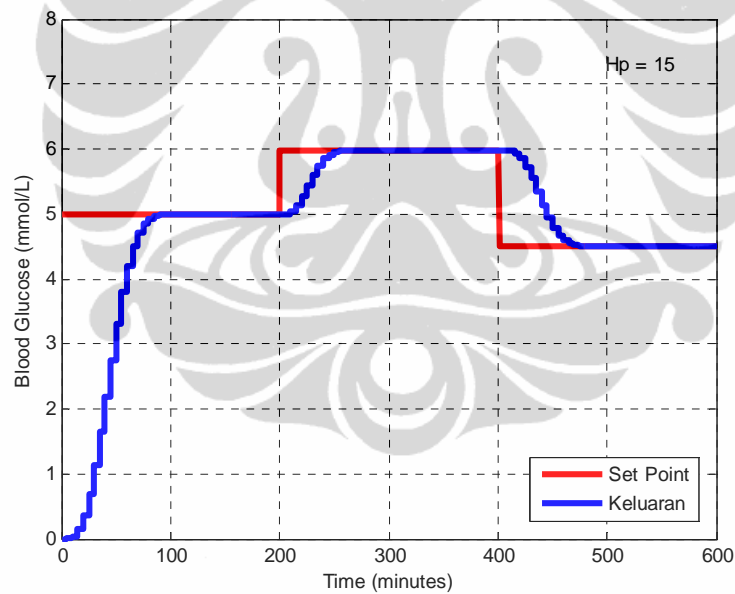
Untuk melihat pengaruh *prediction horizon* ( $H_p$ ) terhadap hasil pengendalian MPC, dilakukan uji simulasi dengan nilai *control horizon* ( $H_u$ ) tetap yaitu sebesar 2, dan nilai *prediction horizon* dibuat bervariasi. Variasi *prediction horizon* yang digunakan pada uji simulasi adalah sebesar 4, 8, dan 15. Faktor bobot kesalahan ( $Q$ ) yang digunakan adalah  $L_{Hp}$  sedangkan faktor bobot perubahan sinyal kendali ( $R$ ) yang digunakan adalah  $0,0001L_{Hu}$ .



(a)



(b)



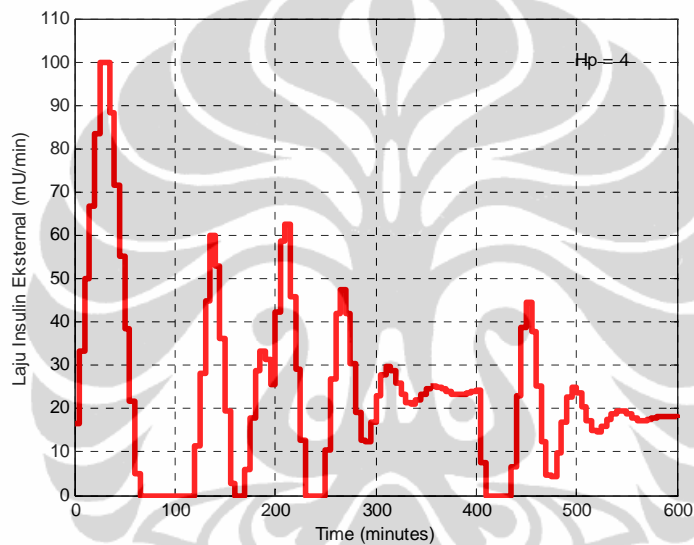
(c)

**Gambar 4.4.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi dan *control horizon* ( $H_u$ ) = 2

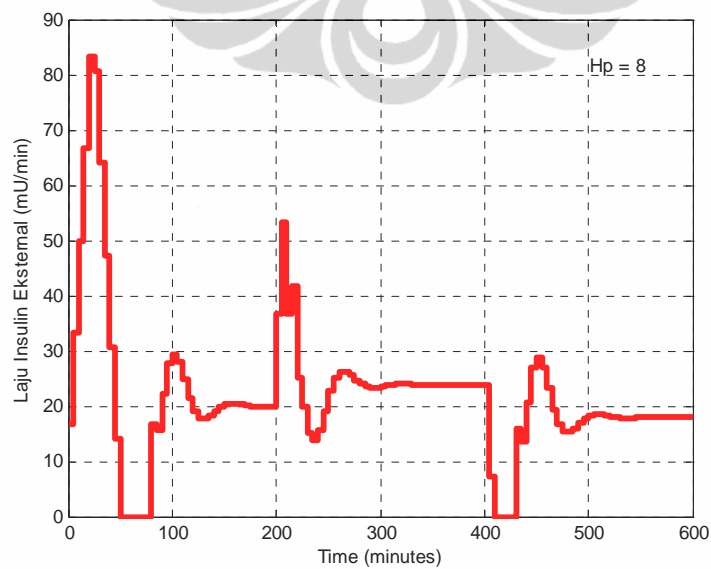
Hasil uji simulasi dengan *control horizon* tetap dan *prediction horizon* bervariasi terdapat pada gambar 4.4 dan gambar 4.5. Dari hasil uji simulasi



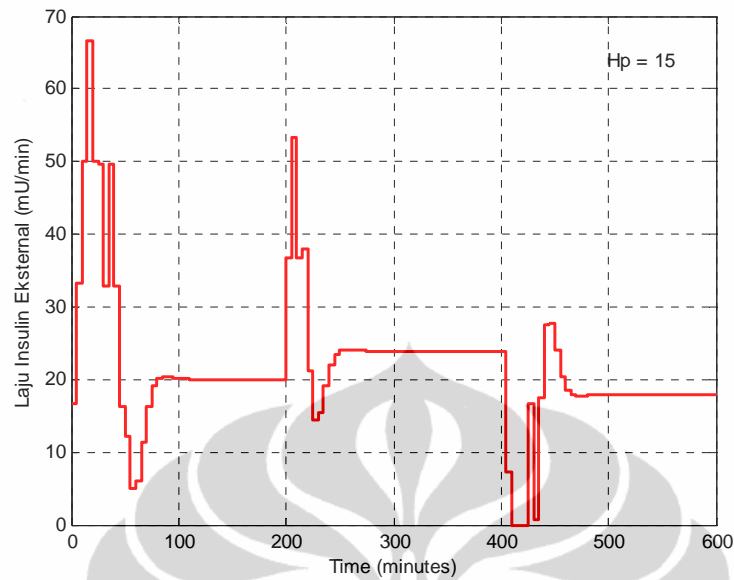
terlihat bahwa untuk nilai faktor bobot perubahan sinyal kendali  $R$  yang kecil, maka hasil pengendali akan tetap bagus jika nilai *prediction horizon* dibuat menjauhi nilai *control horizon*. Hal ini sama seperti yang terjadi pada uji simulasi pertama (nilai  $H_u$  tetap dan nilai  $H_p$  bervariasi), di mana semakin dekat nilai *control horizon* dengan nilai *prediction horizon*, maka variansi perubahan sinyal kendali saat akan terjadi perubahan trayektori acuan semakin besar.



(a)



(b)

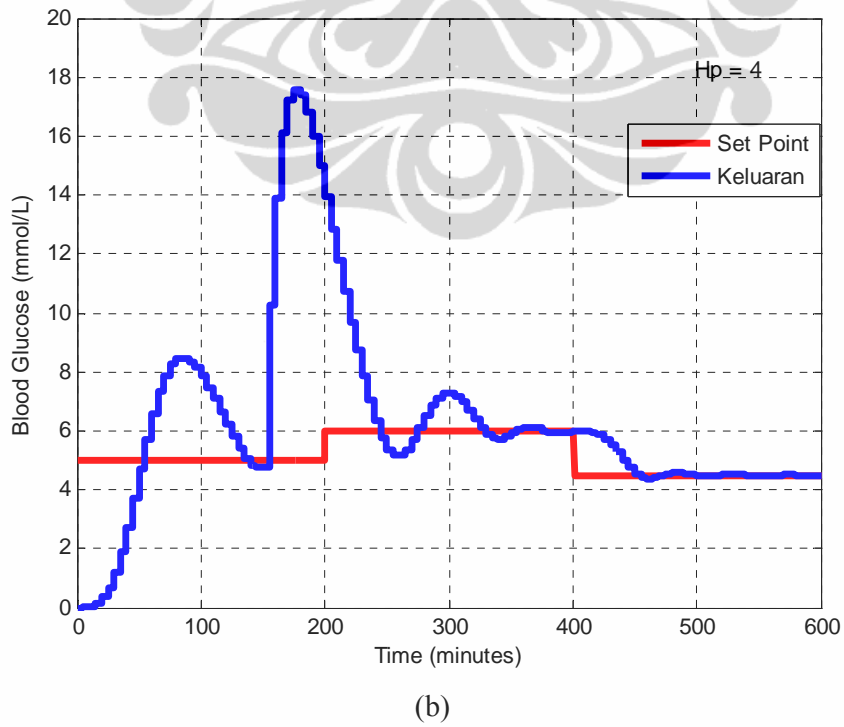
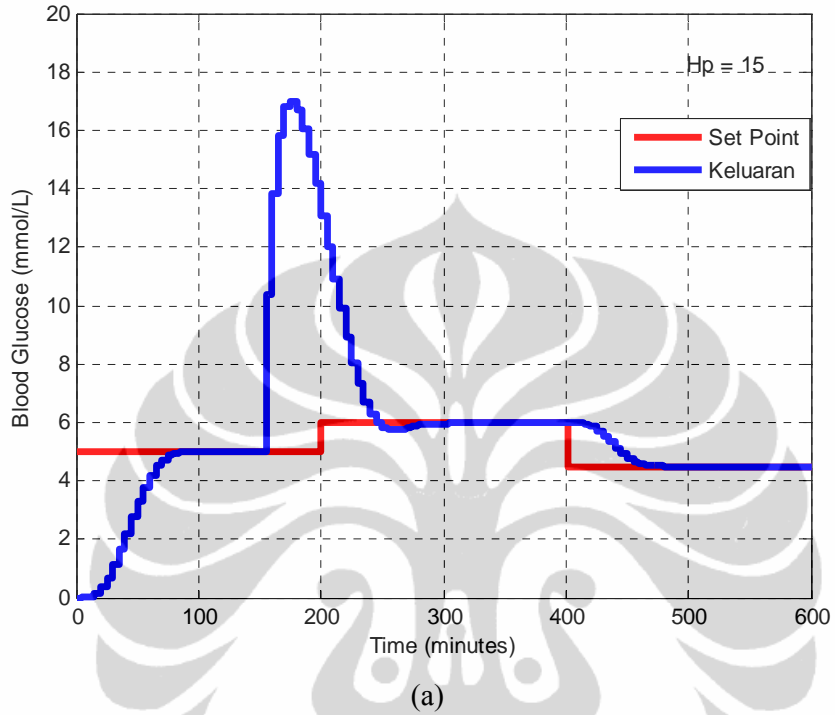


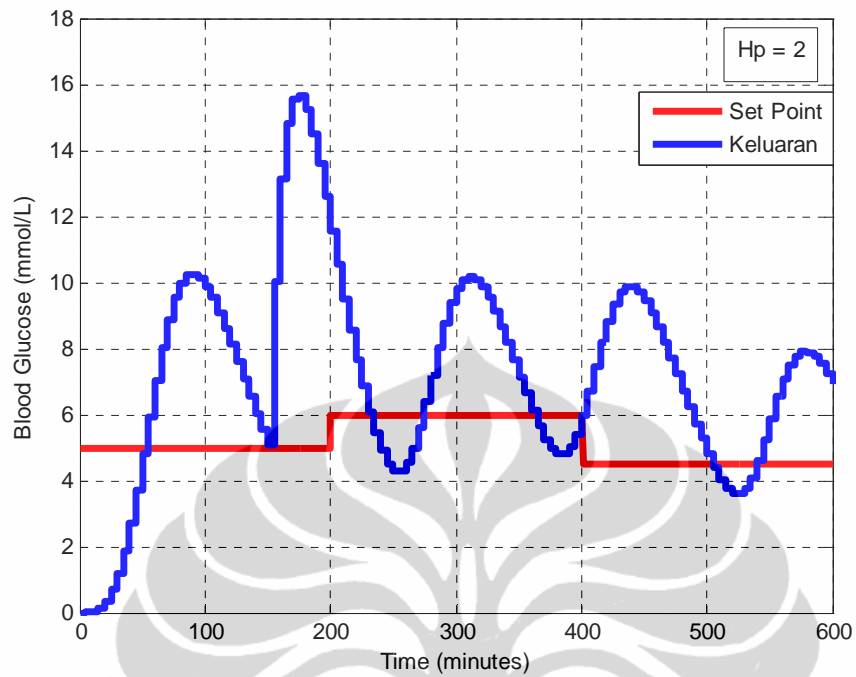
(c)

**Gambar 4.5.** Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi dan *control horizon* ( $H_u$ ) = 2

Hasil uji simulasi untuk nilai *prediction horizon* yang berbeda juga dilakukan saat sistem mendapat gangguan yaitu berupa sinyal eksponensial. Gangguan disimulasikan pada menit ke-150. Hasilnya seperti pada saat sistem bebas dari gangguan, yaitu jika *prediction horizon* dibuat sebesar-besarnya maka keluaran sistem lebih bagus dan variansi perubahan sinyal kendali lebih kecil (gambar 4.6 dan 4.7). Semakin kecil nilai  $H_p$ , semakin besar fluktuatif sinyal kendali hingga mencapai nilai batas maksimalnya yaitu 100 mU/min. Hal ini menyebabkan keluaran sistem menjadi fluktuatif jauh dari trayektori yang ditetapkan (gambar 4.6.(c)). Pada saat gangguan terjadi maka kadar glukosa darah meningkat (gambar 4.6), hal ini merespon sinyal kendali (laju insulin eksternal) bergerak meningkat

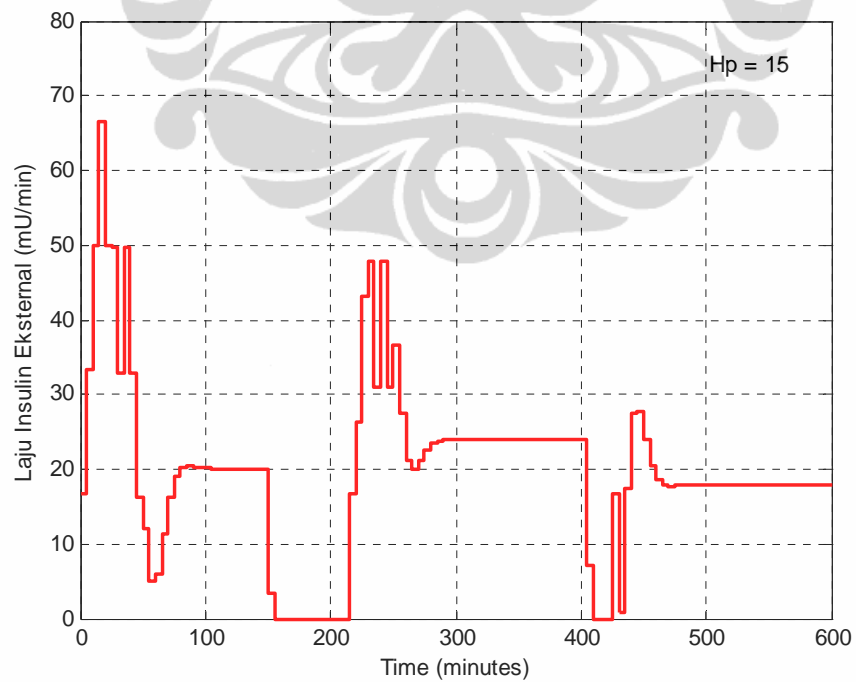
untuk menahan atau mengurangi kenaikan keluaran sistem (kadar glukosa darah) akibat gangguan berupa glukosa dari makanan (gambar 4.7.(b) dan (c)).



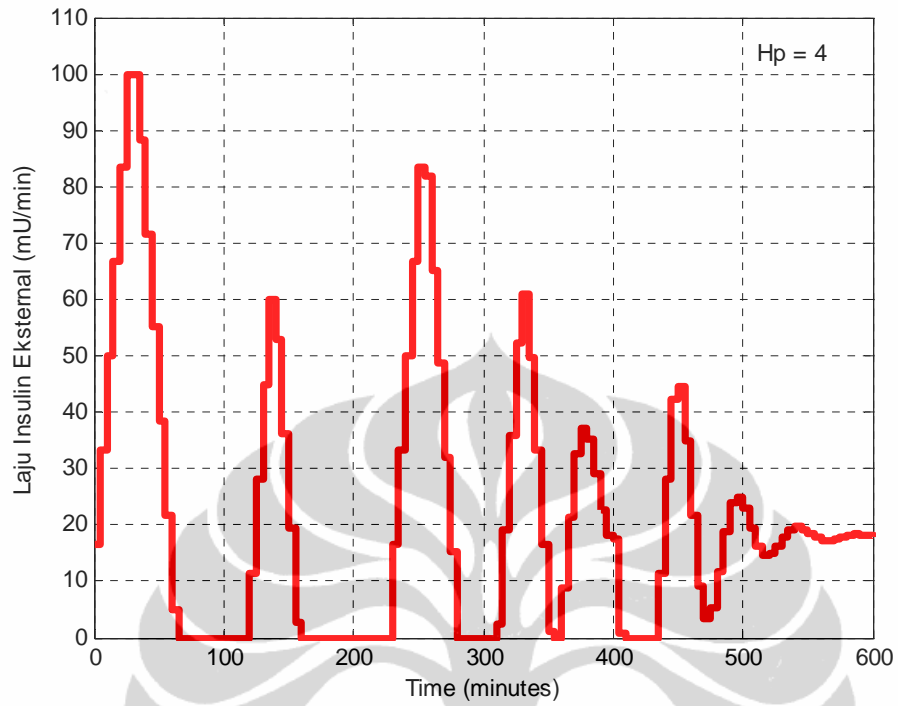


(c)

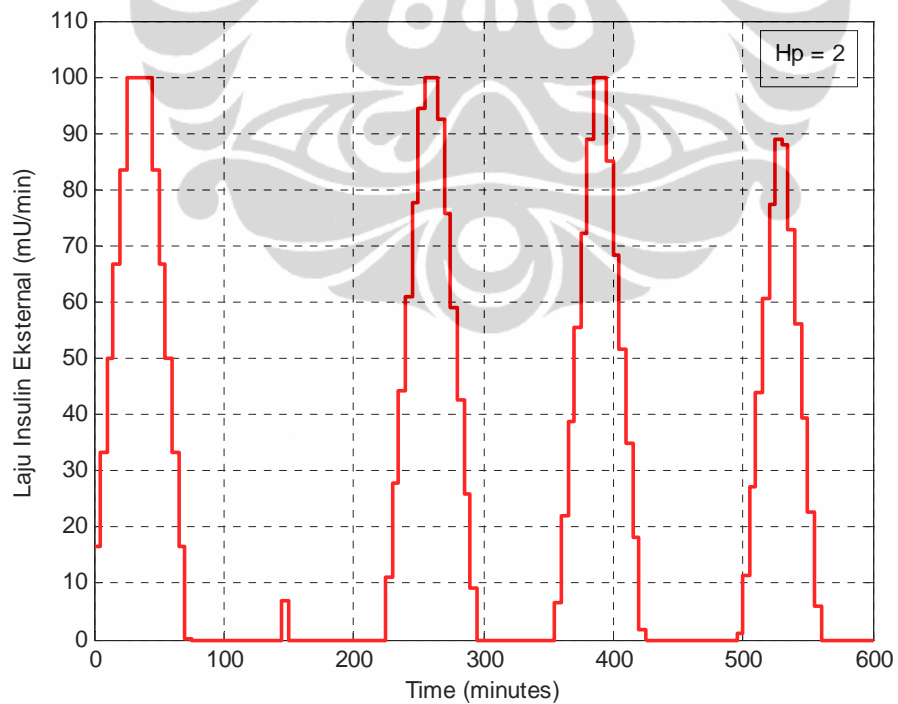
**Gambar 4.6.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi dan *control horizon* ( $H_u$ ) = 2



(a)



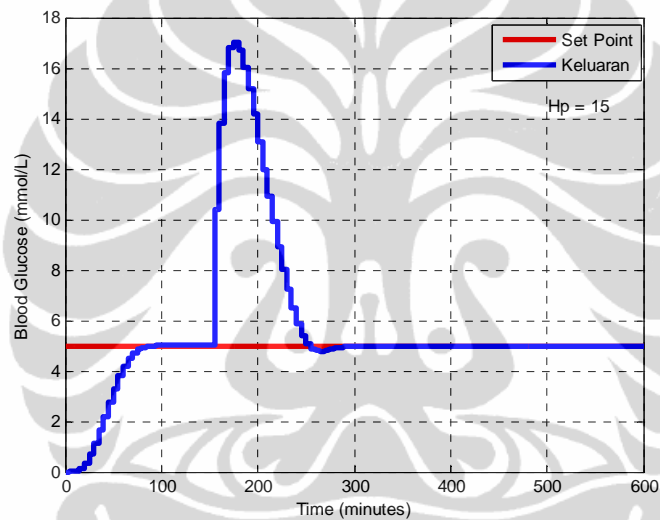
(b)



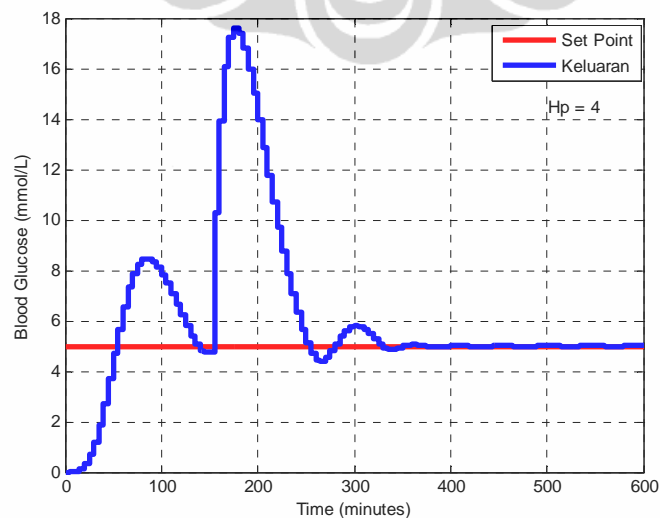
(c)

**Gambar 4.7.** Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi dan *control horizon* ( $H_u$ ) = 2

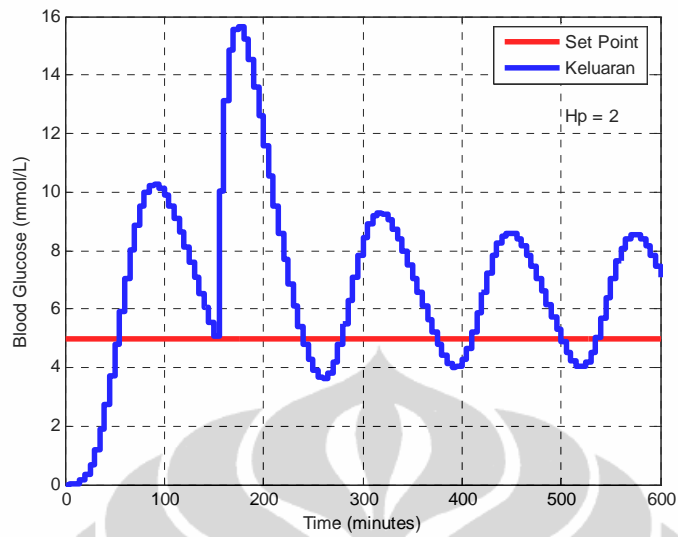
Gambar 4.8 dan 4.9 merupakan hasil uji simulasi untuk trayaktori acuan konstan pada level 5 mmol/L. Uji simulasi ini dilakukan karena pada kenyataannya kadar glukosa darah yang diharapkan adalah konstan. Seperti pada uji simulasi sebelumnya untuk nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi, uji simulasi dengan nilai trayektori acuan konstan juga menghasilkan keluaran sistem yang lebih baik jika *prediction horizon* ( $H_p$ ) dibuat menjauhi nilai *control horizon* ( $H_u$ ).



(a)

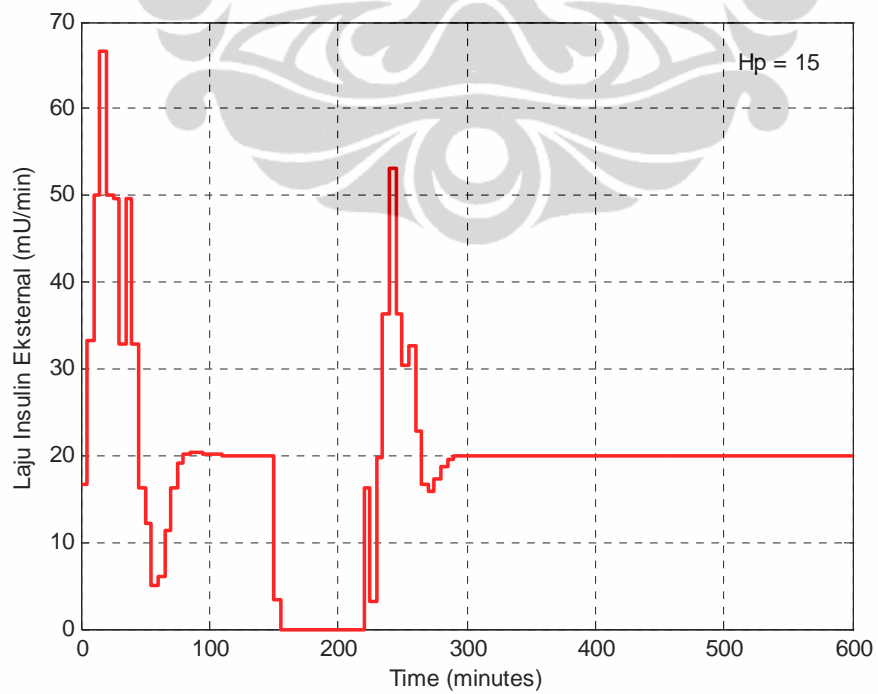


(b)

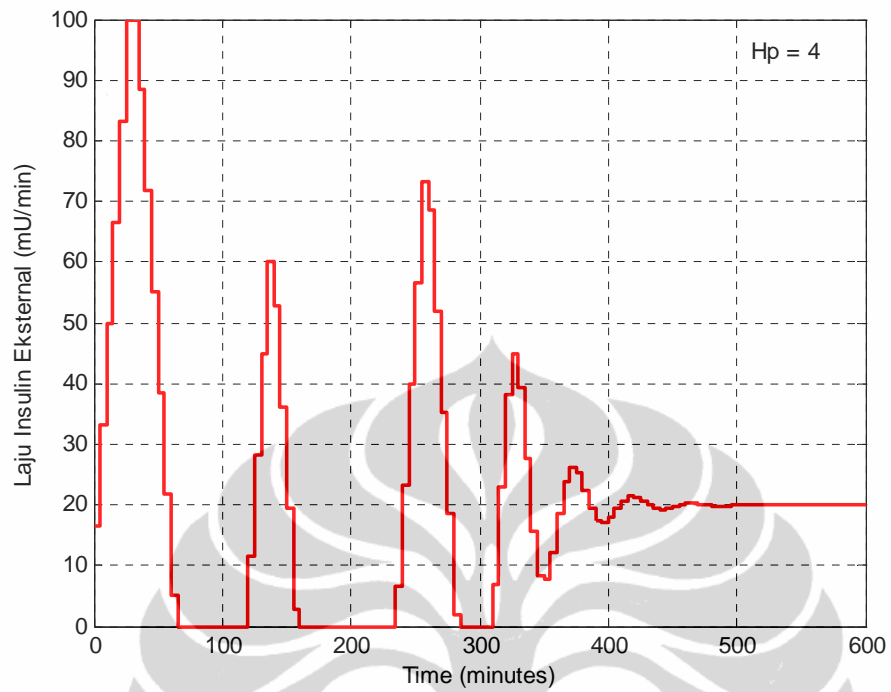


(c)

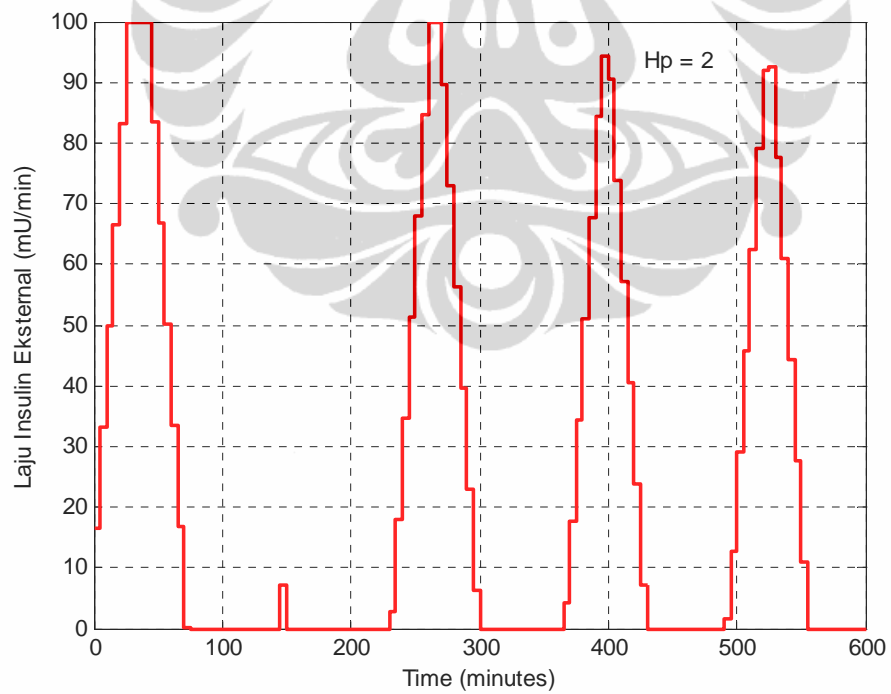
**Gambar 4.8.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan dan set point konstan 5 mmol/L pada nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi dan *control horizon* ( $H_u$ ) = 2



(a)



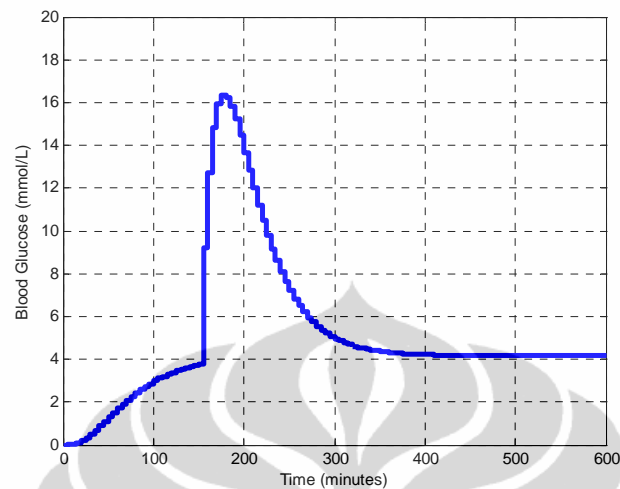
(b)



(c)

**Gambar 4.9.** Sinyal Kendali hasil uji simulasi dengan gangguan dan set point konstan 5 mmol/L pada nilai *prediction horizon* ( $H_p$ ) bervariasi dan *control horizon* ( $H_u$ ) = 2





**Gambar 4.10.** Hasil simulasi dengan gangguan dan tanpa pengendali

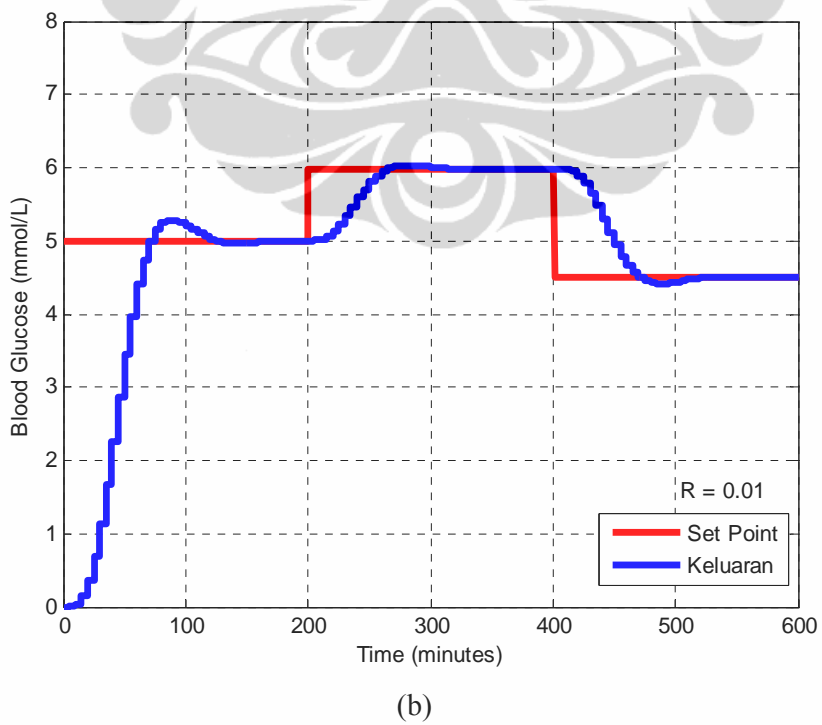
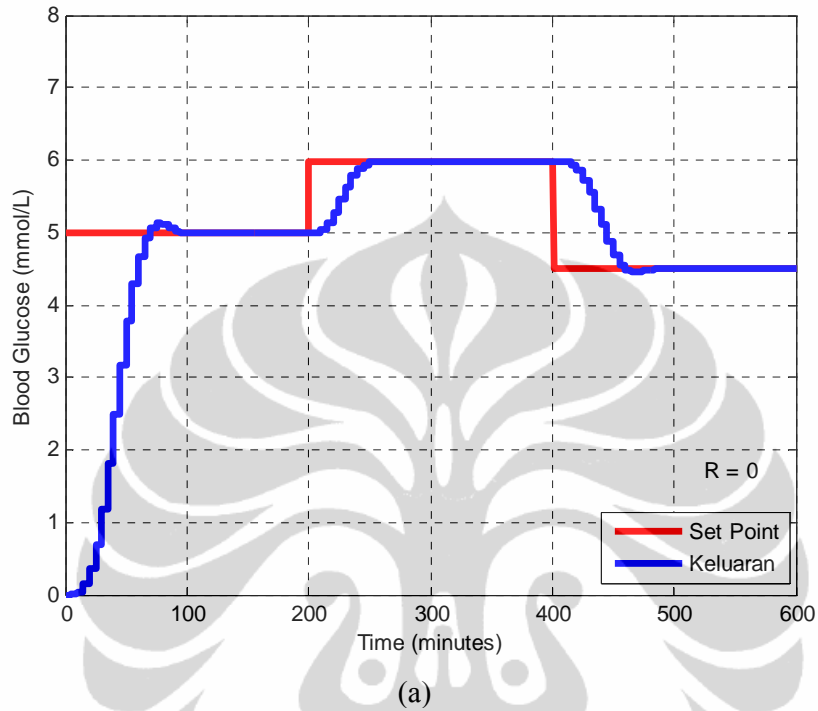
Gambar 4.10. merupakan hasil uji simulasi tanpa penengendalian saat sistem mendapat gangguan pada menit ke-100 dan mendapatkan masukan pada nilai setimbangnya ( $\underline{U} = 16,667$  mU/min). Ternyata nilai *steady* keluaran hanya mencapai 4 mmol/L dan dicapai relatif lebih lama dibandingkan jika menggunakan pengendali.

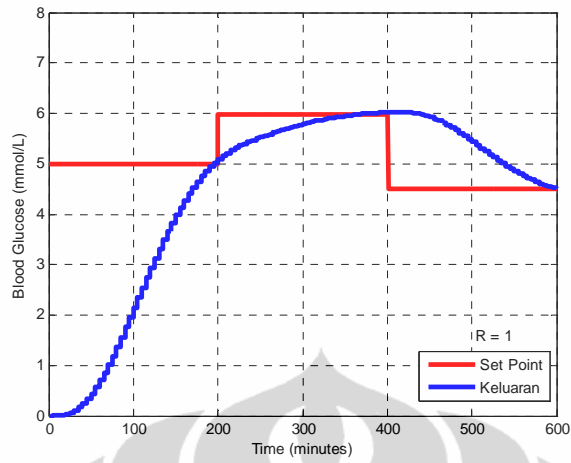
## 4.2. Pengaruh Nilai Faktor Bobot Perubahan Sinyal Kendali ( $\underline{R}$ ) dan Batas Sinyal Kendali

### 4.2.1. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai Faktor Bobot Kesalahan ( $\underline{Q}$ ) Tetap dan Nilai Faktor Bobot Perubahan Sinyal Kendali ( $\underline{R}$ ) bervariasi

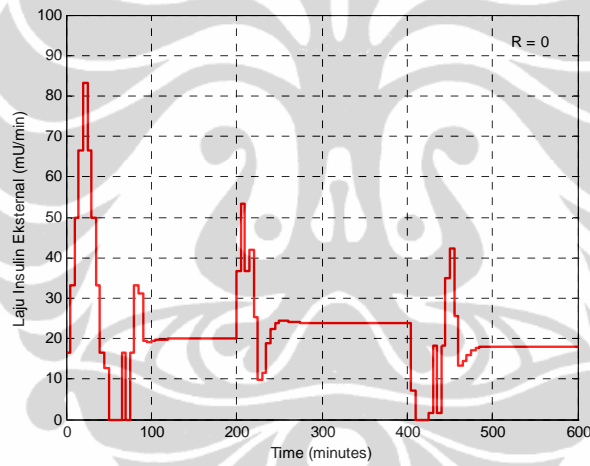
Pengaruh faktor bobot perubahan sinyal kendali  $\underline{R}$  pada hasil pengendali dapat dilihat dengan melakukan uji simulasi pada sistem dengan membuat nilai diagonal matriks  $\underline{R}$  berbeda-beda, yaitu 0; 0,01; dan 1, sedangkan nilai parameter

pengendali lainnya dibuat tetap, dengan  $H_u = 2$ ,  $H_p = 10$ , dan  $Q = I_{Hp}$ . Hasil uji simulasi ini dapat dilihat pada gambar 4.11 sampai dengan gambar 4.17.

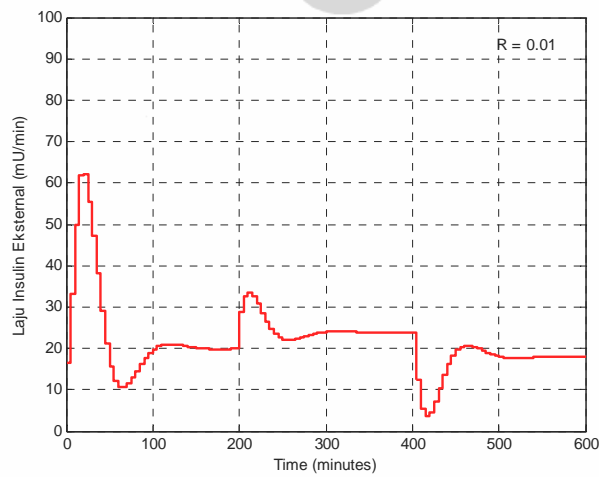




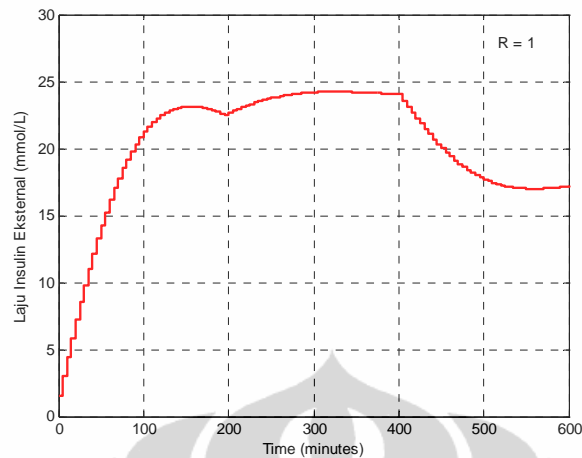
(c)  
**Gambar 4.11.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai  $Q$  tetap yaitu  $L_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi



(a)



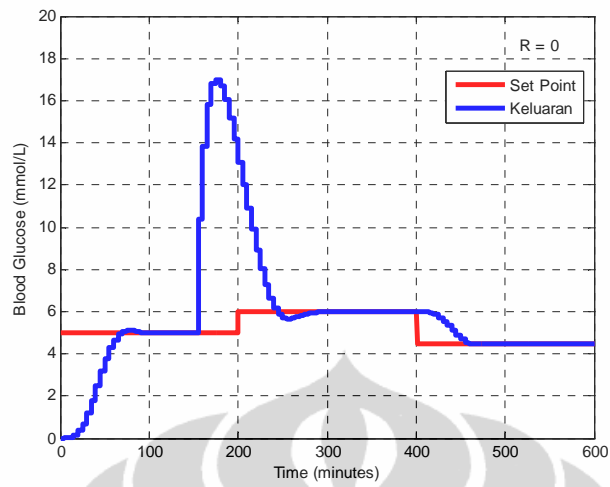
(b)



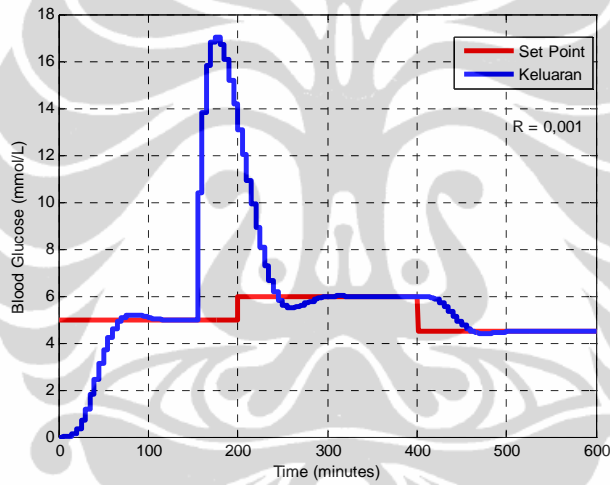
(c)

**Gambar 4.12.** Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan nilai  $Q$  tetap yaitu  $I_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi

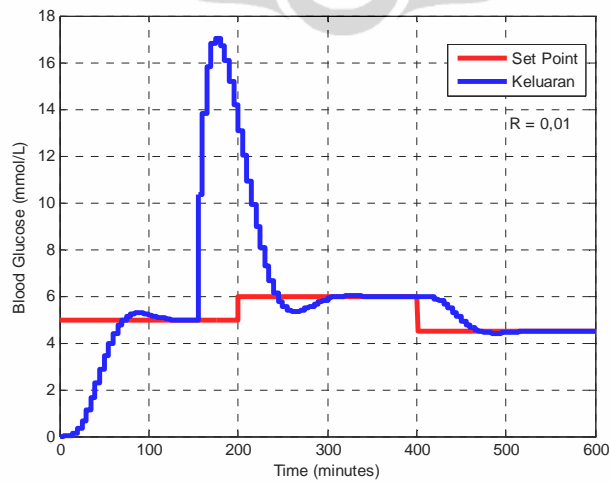
Dari hasil simulasi pada gambar 4.11 dan gambar 4.12 terlihat bahwa semakin besar nilai matriks  $R$ , perubahan sinyal kendali menjadi semakin ditekan sehingga menyebabkan keluaran sistem menjadi semakin halus. Dengan nilai matriks  $R$  yang besar ( $I_{Hu}$ ), variansi perubahan sinyal kendali sangat kecil, bahkan saat akan terjadi perubahan trayektori acuan. Hal ini menyebabkan keluaran sistem lebih lama mencapai nilai trayektori yang ditetapkan. Hasil uji simulasi ini sama jika sistem mendapat gangguan. Saat  $R$  diperbesar menjadi satu, sinyal kendali makin terbebani sehingga tidak dapat berubah secara cepat (gambar 4.14.(f)) dan hasil pergerakannya lebih halus, hal ini menyebabkan keluaran sistem mencapai level *hypoglycemia* yaitu di bawah 3,3 mmol/L (gambar 4.13.(f)). Batas nilai faktor bobot perubahan sinyal kendali  $R$  yang memungkinkan untuk mencapai kadar glukosa darah serendah-rendahnya agar tidak terjadi *hypoglycemia* adalah  $R = 0,35$ . Pada nilai  $R = 0,35$  dicapai keluaran sistem (kadar glukosa darah) pada level *normoglycemia* terendah yaitu 3,3 mmol/L (gambar 4.13.(e)).



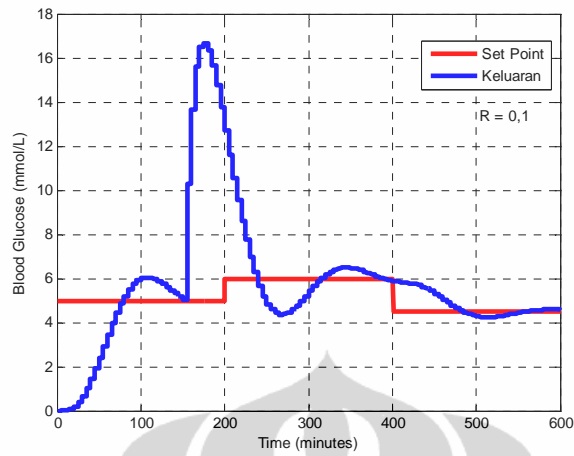
(a)



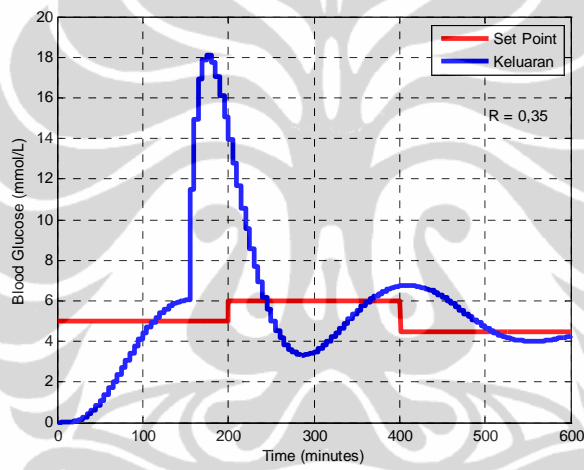
(b)



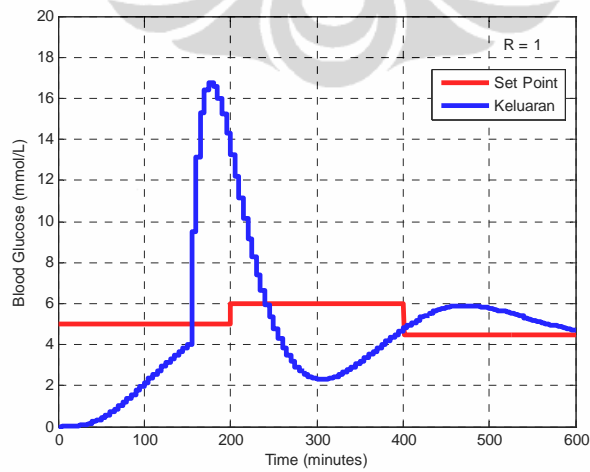
(c)



(d)

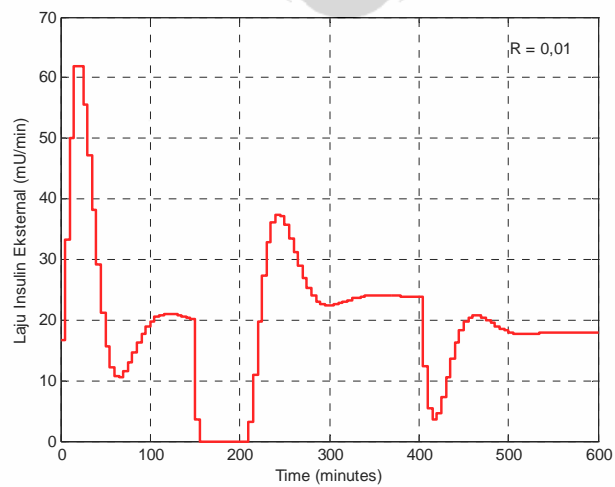
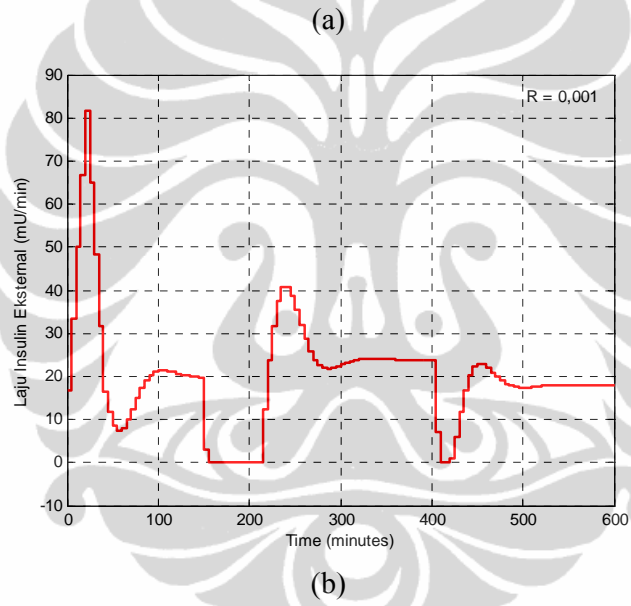
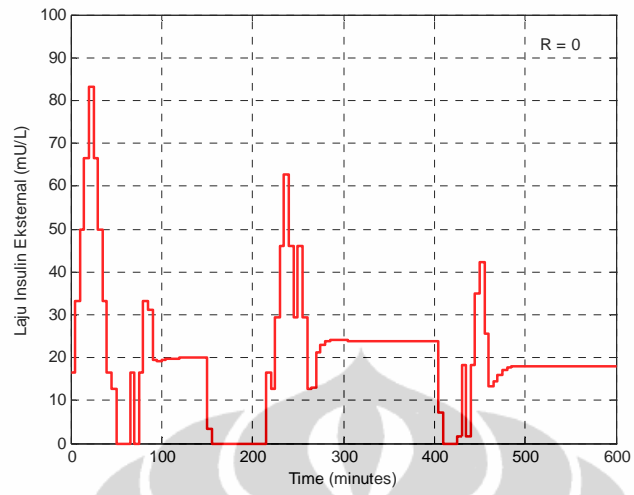


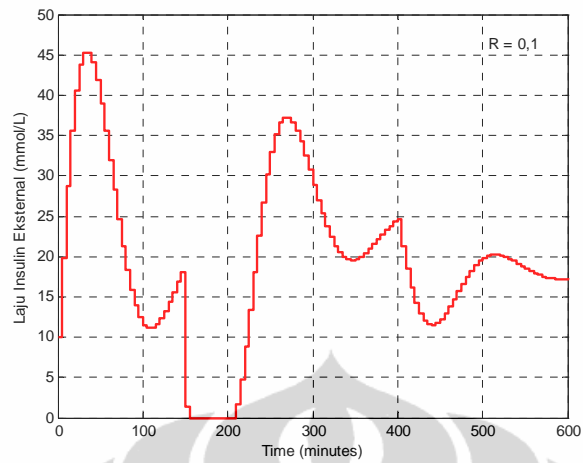
(e)



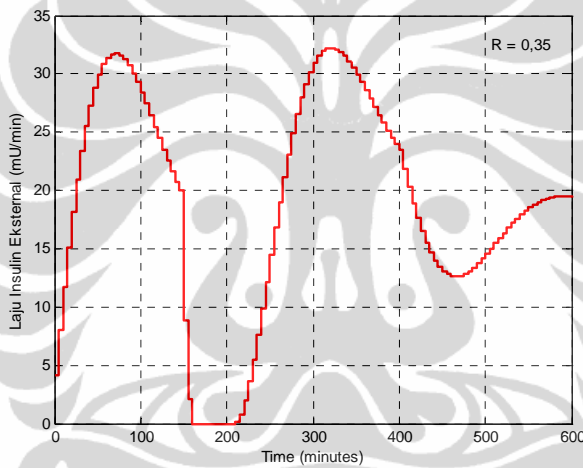
(f)

**Gambar 4.13.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai  $Q$  tetap yaitu  $L_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi

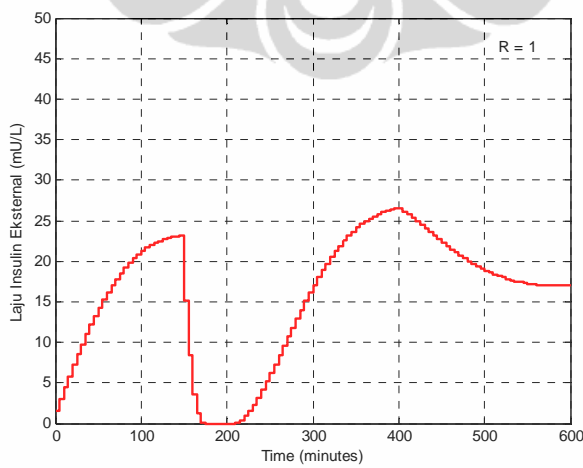




(d)



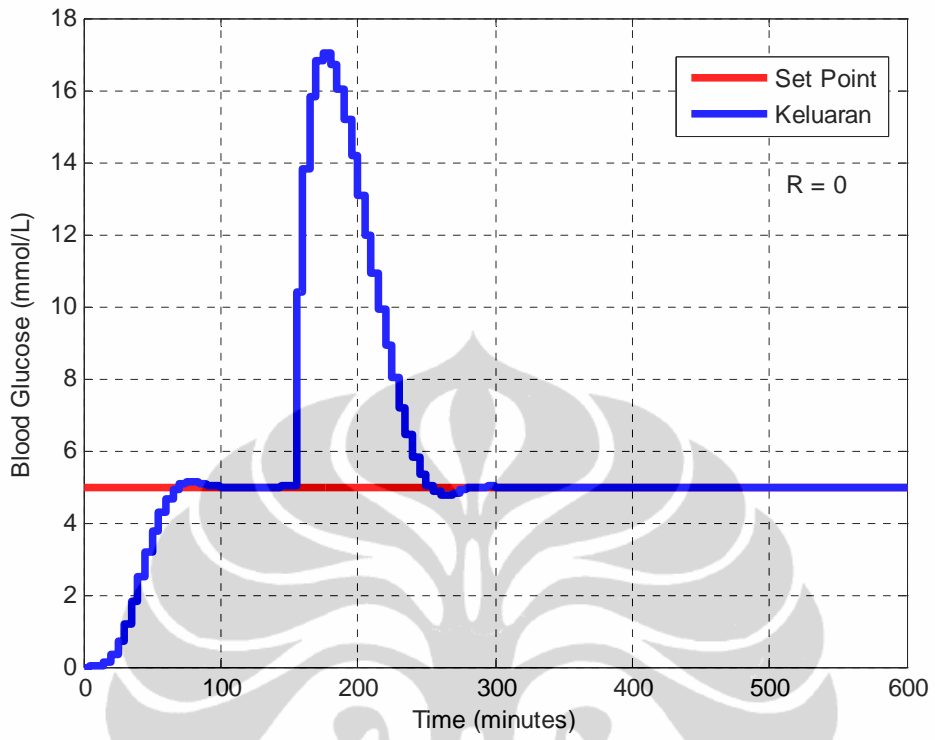
(e)



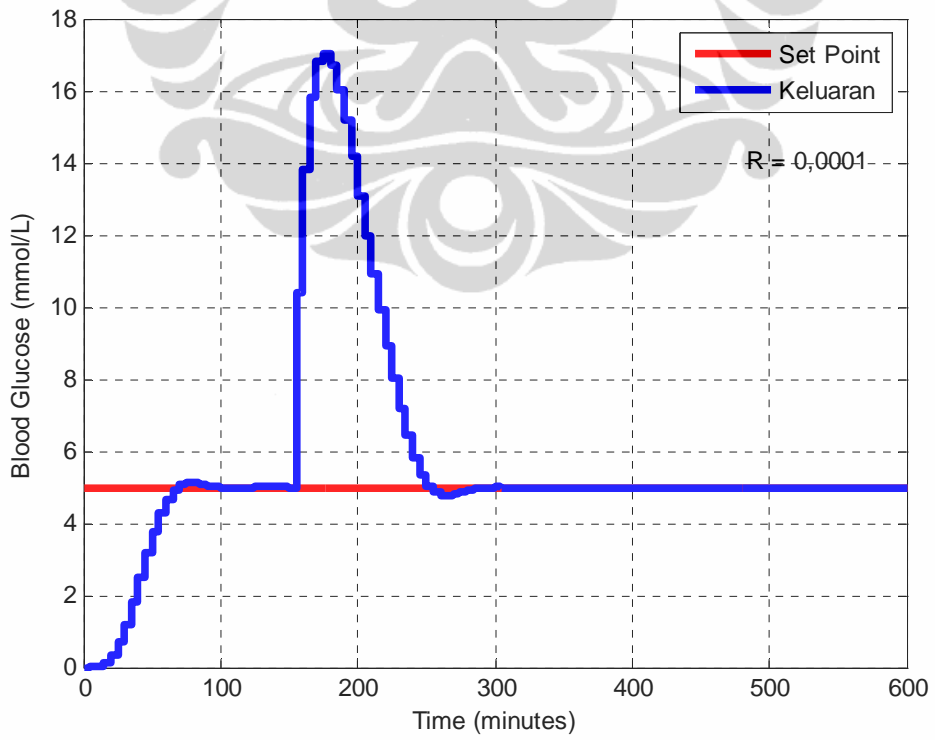
(f)

**Gambar 4.14.** Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai  $Q$  tetap yaitu  $I_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi

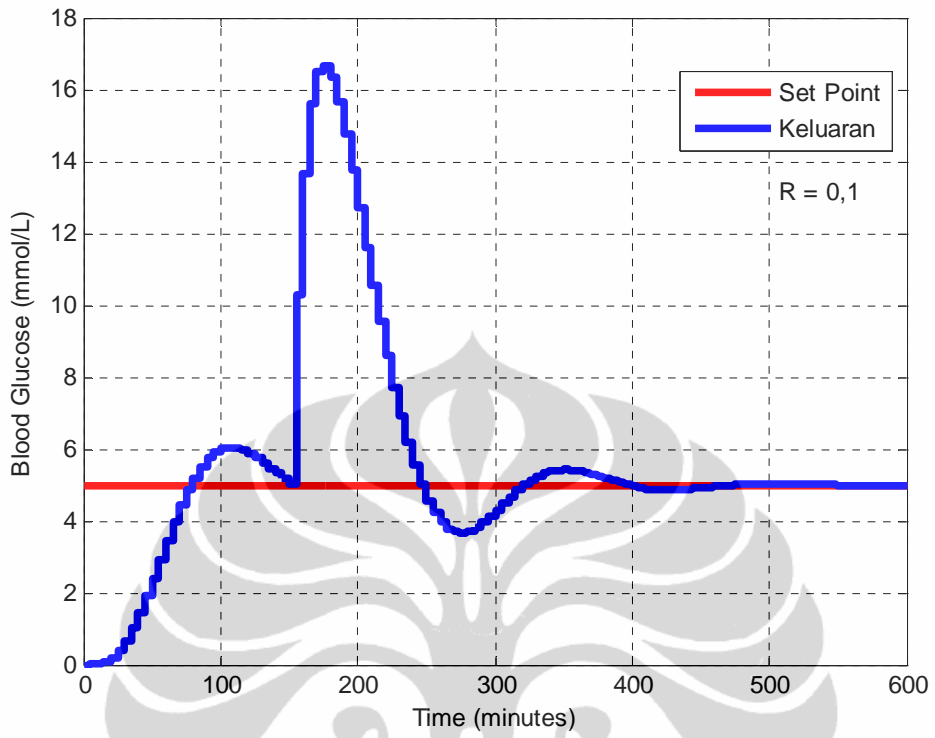




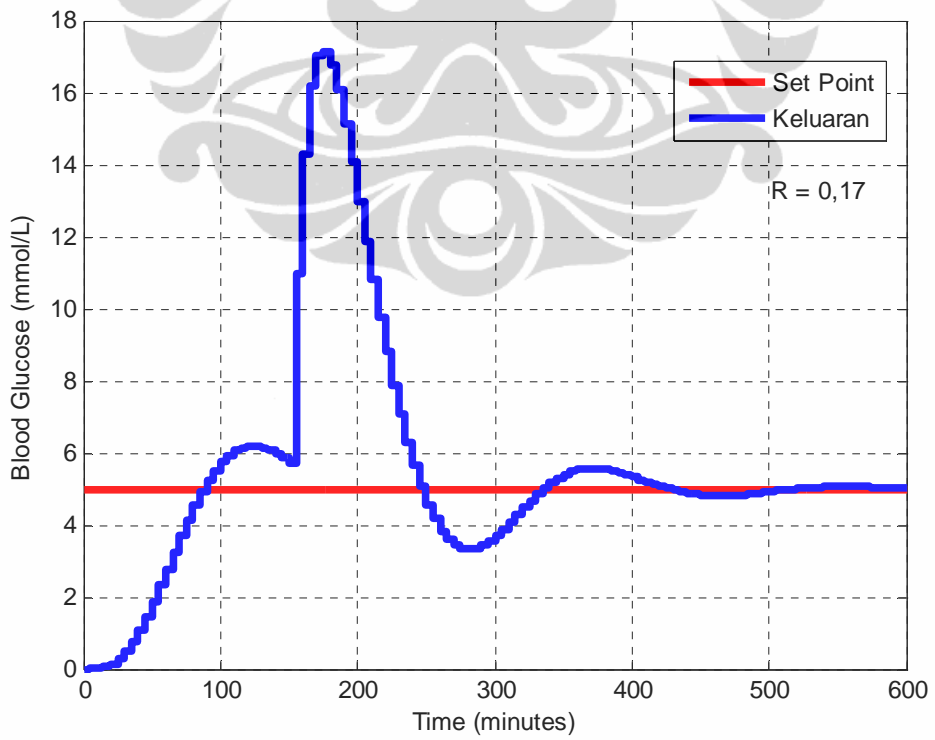
(a)



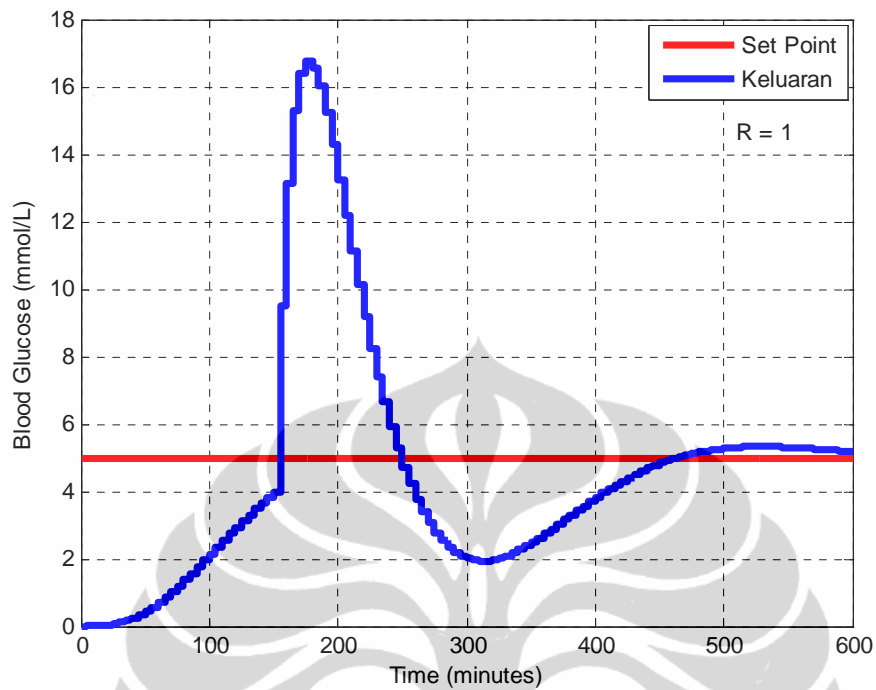
(b)



(c)

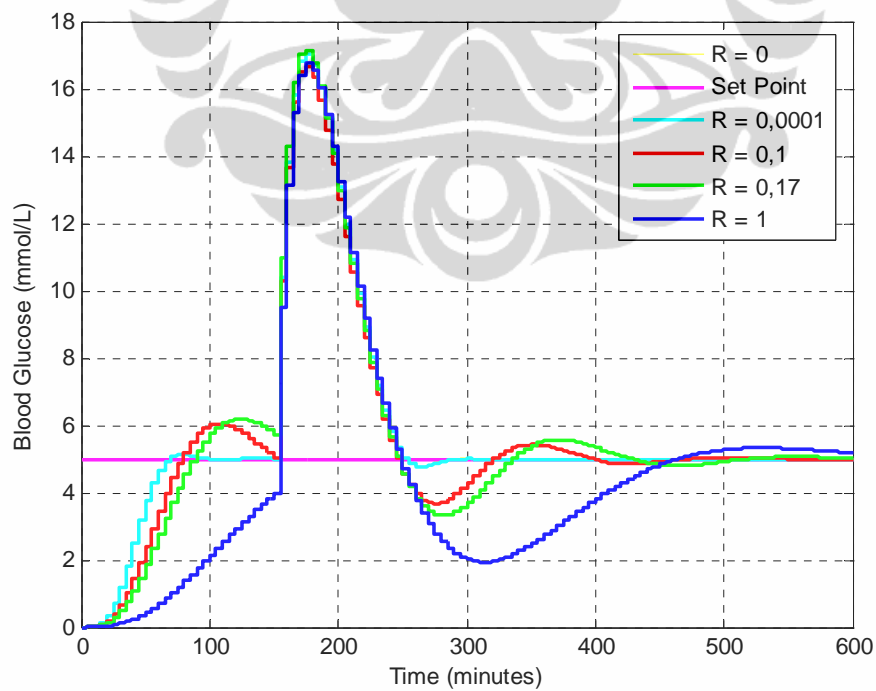


(d)



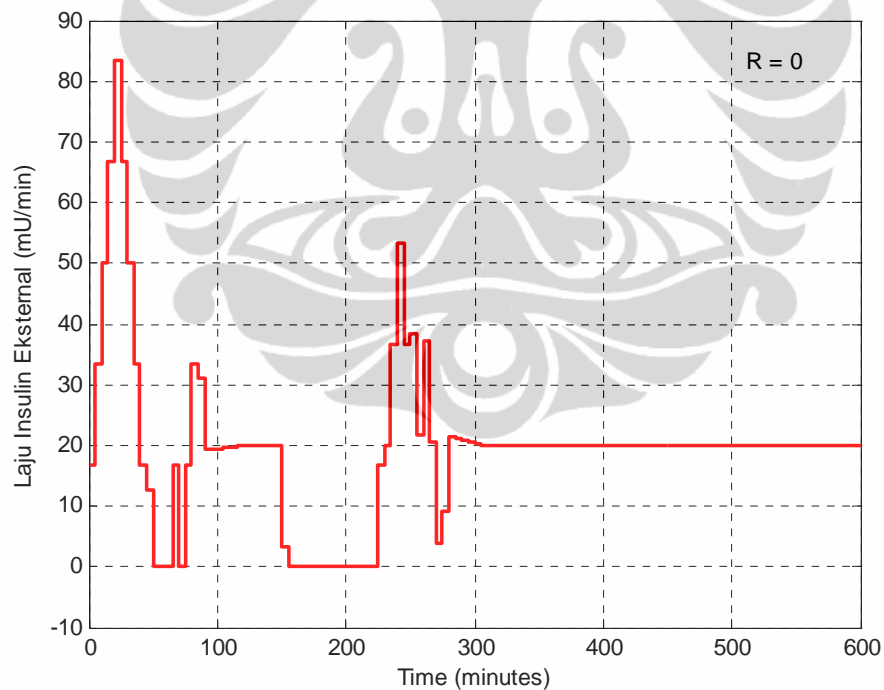
(e)

**Gambar 4.15.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan dan *set point* konstan 5 mmol/L pada nilai  $Q$  tetap yaitu  $I_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi

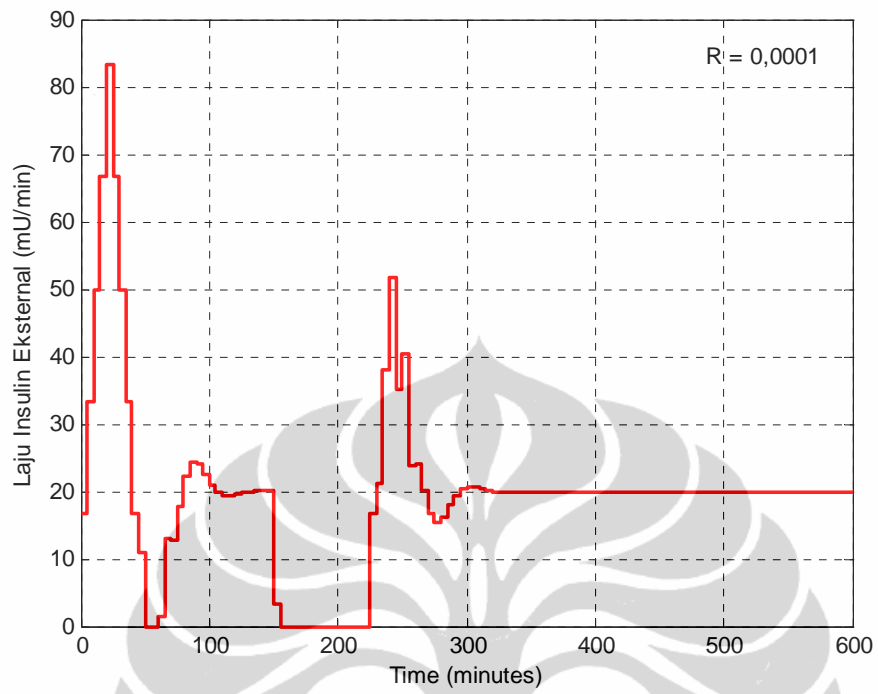


**Gambar 4.16.** Perbandingan keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan dan *set point* konstan 5 mmol/L pada nilai  $Q$  tetap yaitu  $I_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi

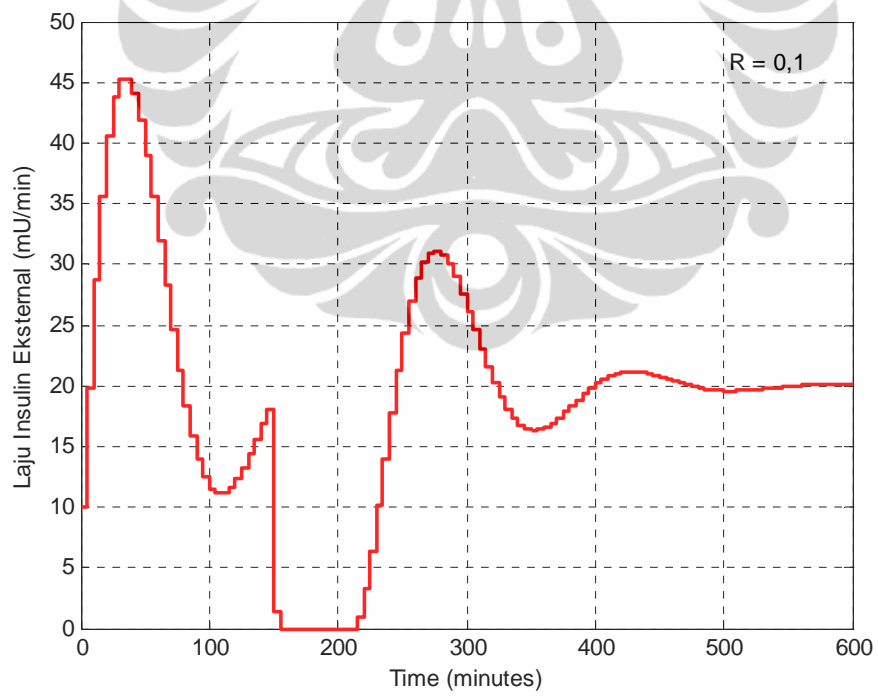
Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan keluaran sistem untuk variasi nilai  $R$  pada trayektori acuan yang dibuat konstan dengan gangguan pada menit ke-150. Pada gambar 4.16 terlihat jelas pergerakan keluaran sistem yang semakin jauh dari trayektori acuan jika nilai faktor bobot perubahan sinyal kendali  $R$  diperbesar. Nilai  $R$  yang semakin besar membuat laju insulin eksternal makin halus (gambar 4.17) karena pergerakannya terbebani dengan nilai  $R$  yang besar. Level *normoglycemia* terendah (yaitu 3,3 mmol/L) tercapai untuk nilai  $R$  sebesar 0,17. Jika nilai  $R$  diperbesar menjadi di atas 0,17 maka kadar glukosa darah memasuki *hypoglycemia* (di bawah 3,3 mmol/L).



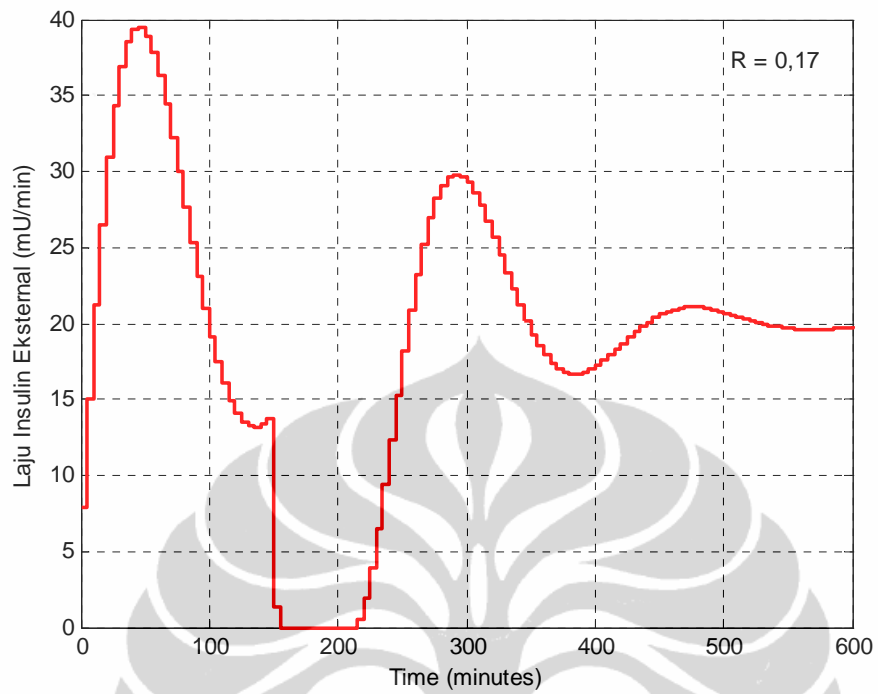
(a)



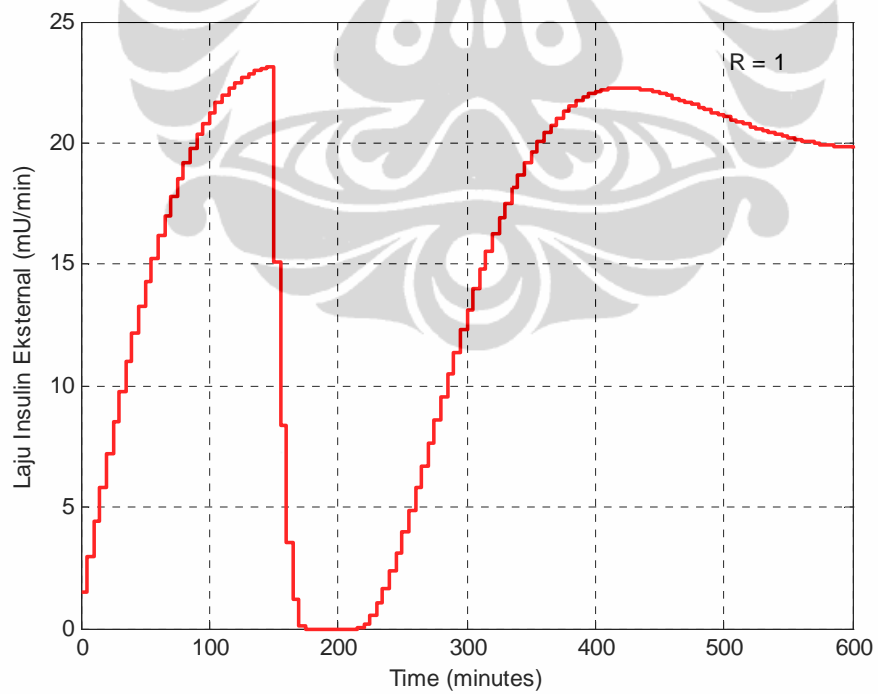
(b)



(c)



(d)

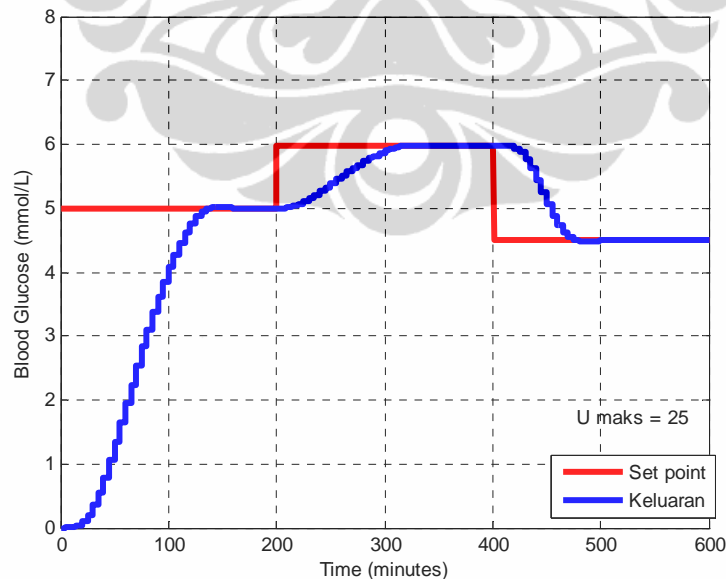


(f)

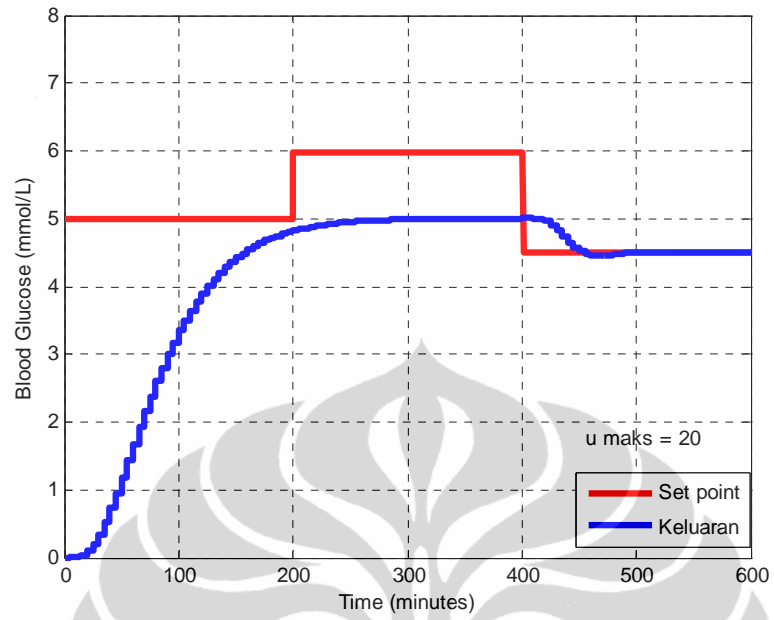
**Gambar 4.17.** Sinyal Kendali hasil uji simulasi dengan gangguan dan *set point* konstan 5 mmol/L pada nilai  $Q$  tetap yaitu  $I_{Hp}$  dan  $R$  bervariasi

#### 4.2.2. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai Batas Mimimum Sinyal Kendali Tetap dan Nilai Batas Maksimum Sinyal Kendali Bervariasi

Pengaruh batas sinyal kendali pada hasil pengendali dapat dilihat dengan melakukan uji simulasi pada sistem dengan membuat nilai batas maksimum sinyal kendali berbeda-beda, yaitu 25 dan 20, sedangkan nilai parameter pengendali lainnya dibuat tetap, dengan  $Hu = 2$ ,  $Hp = 10$ ,  $R = 0,0001I_{Hu}$ ,  $Q = I_{Hp}$ , dan  $U_{min} = 0$ . Hasil uji simulasi ini dapat dilihat pada gambar 4.18, 4.19 dan 4.20. Perubahan batas maksimum disertai perubahan *slew rate* yaitu menjadi sebesar 5. Perubahan batas maksimum sinyal kendali yang makin kecil yang berarti mempersempit rentang sinyal kendali menyebabkan pergerakan sinyal kendali semakin kecil sehingga keluaran sistem tidak dapat mencapai trayektori acuan yang ditetapkan (gambar 4.18.(b)).

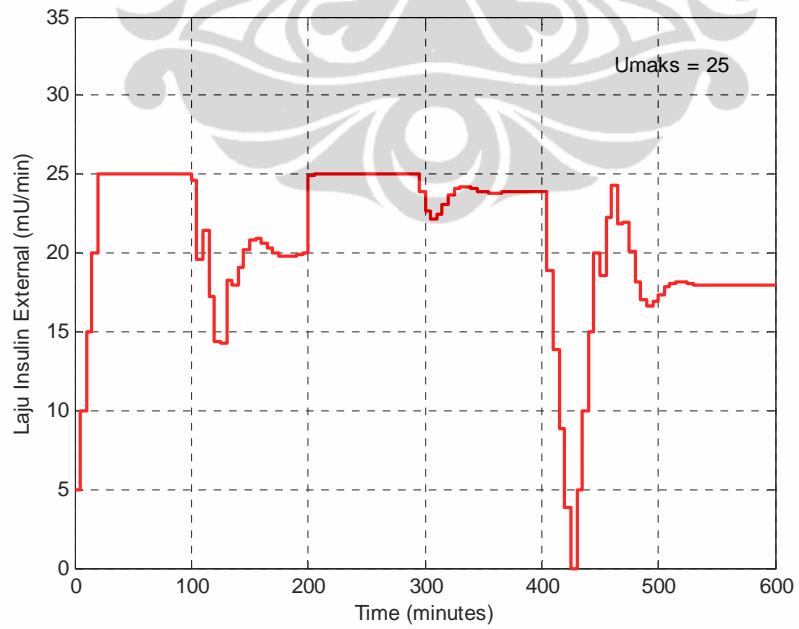


(a)



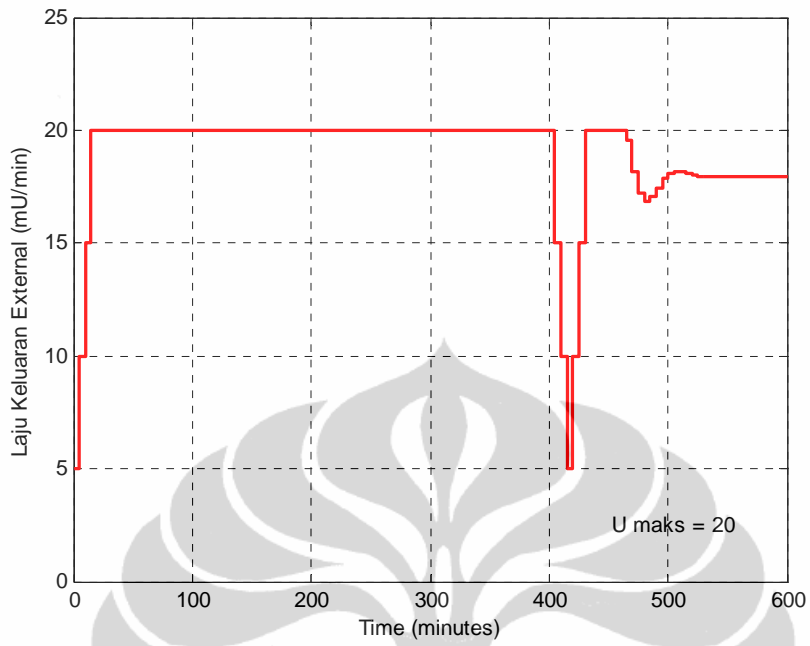
(b)

**Gambar 4.18.** Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai batas sinyal kendali minimum tetap ( $U_{\min} = 0$ ) dan batas sinyal kendali maksimum bervariasi



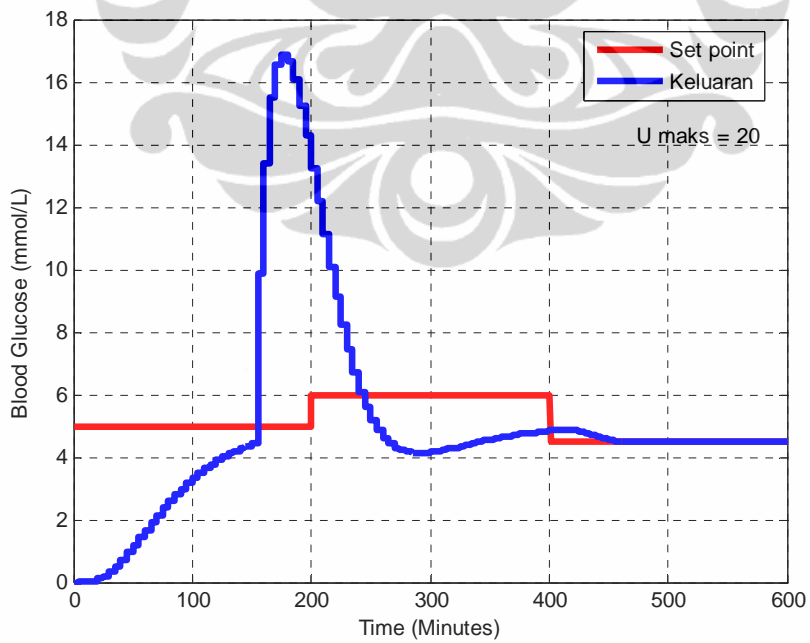
(a)



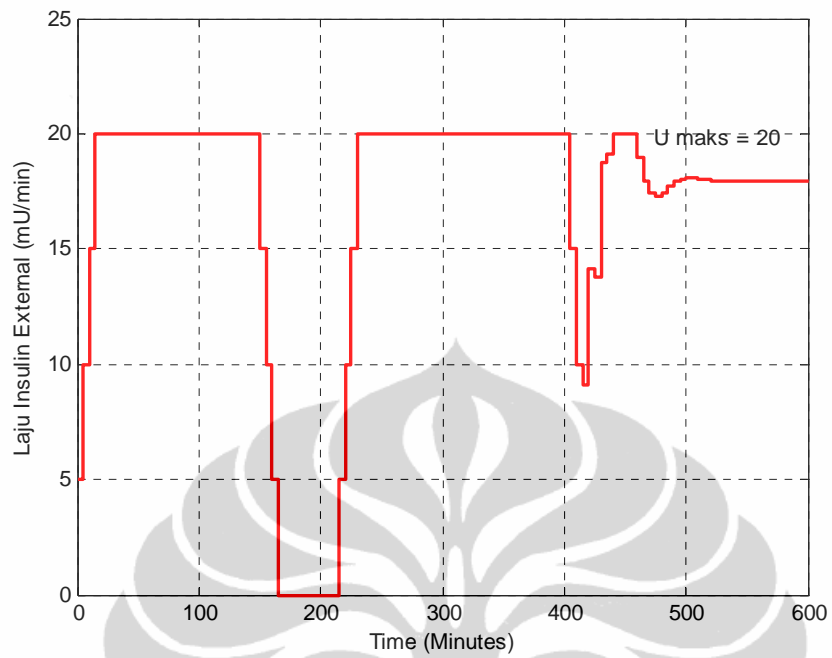


(b)

**Gambar 4.19.** Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan nilai batas sinyal kendali minimum tetap ( $U_{min} = 0$ ) dan batas sinyal kendali maksimum bervariasi



(a)



(b)

**Gambar 4.20.** Hasil simulasi dengan gangguan pada  $U_{min} = 0$ ,  $U_{max} = 20$  dan *slew rate* = 5