

SIMULASI LAJU PENURUNAN GLUKOSA DARAH DIABETES TIPE 1 SETELAH MELAKUKAN AKTIVITAS FISIK

M. Khalid,* A. Kartono.

*Bagian Fisika Teori, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor, Dramaga-Bogor, 16680
muhammad.khalid.fis47@gmail.com

ABSTRACT

Decline rate modeling of blood glucose in type 1 diabetes after exercise that made by Roy² not attach consumption glucose factor. In the fact, type 1 diabetes mellitus (T1DM) consume the glucose before exercise. Consumption of glucose can from food or drinks. In the research, we modify Roy's² model by attached glucose consumption. Result of modification model isn't too different to experiment data. This is evident from R² value obtained for 99.30%. In addition, this modification result isn't much different with Anirban Roy's model that have R² value is 99.25%. Parameter values used for this model modification it's identic, they are insulin injection (u_1) is 15 $\mu\text{U min}^{-1}$, exercise duration is 60 minute, patient body mass is 80 kg, and glucose consumption (D) is around to 10 mg $\text{min}^{-1} \text{dl}^{-1}$ (for parameter values in modification model). Hypoglycemia will occur if amount of insulin injected into patient too much, while hyperglycemia can occur if amount of insulin injected into patient too little.

Keywords: diabetes mellitus, exercise, glucose, hyperglycemia, hypoglycemia

ABSTRAK

Pemodelan laju penurunan Glukosa darah diabetes tipe 1 setelah melakukan aktivitas fisik yang dibuat oleh Roy² tidak menambahkan faktor konsumsi glukosa. Pada kenyataannya, penderita diabetes melitus tipe 1 (DMT1) mengonsumsi glukosa sebelum melakukan aktivitas fisik. Konsumsi glukosa tersebut dapat berasal dari makanan ataupun minuman. Pada penelitian ini, kami memodifikasi pemodelan yang dibuat oleh Roy² dengan menambahkan konsumsi glukosa. Hasil modifikasi model tidak jauh berbeda dengan data eksperimen. Hal ini terbukti dari nilai R² yang diperoleh sebesar 99.30%. Selain itu, hasil modifikasi model ini tidak jauh berbeda pula dengan pemodelan yang dibuat oleh Anirban Roy yang memiliki nilai R² sebesar 99.25%. Nilai parameter yang digunakan untuk modifikasi model tersebut diatur sama dengan jumlah insulin yang disuntikan (u_1) sebesar 15 $\mu\text{U min}^{-1}$, durasi melakukan aktivitas fisik selama 60 menit, berat badan penderita sebesar 80 kg, dan konsumsi glukosa (D) sekitar 10 mg $\text{min}^{-1} \text{dl}^{-1}$ (untuk nilai parameter modifikasi model). Hipoglikemia akan terjadi jika jumlah insulin yang disuntikan ke penderita terlalu banyak, sedangkan hiperglikemia dapat terjadi bila jumlah insulin yang disuntikan ke penderita terlalu sedikit.

Kata kunci :aktivitas fisik, diabetes melitus, glukosa, hiperglikemia, hipoglikemia

PENDAHULUAN

Penyakit diabetes melitus tipe 1 merupakan penyakit yang disebabkan pankreas tidak mampu produksi insulin yang diperlukan oleh tubuh. Pankreas tersebut tidak berfungsi dengan baik. Penyakit diabetes timbul disebabkan mengkonsumsi glukosa yang berlebihan. Jika glukosa yang tersimpan dalam tubuh melebihi batas normal dan tidak mengalami penurunan setelah melakukan aktivitas ataupun olahraga dapat menimbulkan berbagai macam penyakit. Penyakit tersebut dapat mengganggu sistem metabolisme tubuh. Adapun dampak penyakit yang dapat ditimbulkan selanjutnya yakni kencing manis, luka sobek tidak cepat sembuh atau bahkan membusuk, gangguan pada penggunaan hormon, dan masih banyak lagi dampak yang ditimbulkan oleh pengakit diabetes. Penyakit diabetes diperkirakan pada tahun 2030 akan menempati urutan ketujuh penyebab kematian. Pada koran Harian Nasional yang terbit tanggal 14 September 2013 disebutkan bahwa menurut International Diabetes Federation (IDF) terdapat 371 juta jiwa di dunia yang berumur 20-70 tahun memiliki penyakit diabetes.¹ Indonesia menempati posisi ketujuh di bawah negara China, India, USA, Brazil, Rusia, dan Meksiko.

Berbagai upaya dilakukan untuk mengurangi jumlah manusia yang terkena diabetes. Upaya tersebut berupa pengobatan secara medis maupun non-medis. Pengobatan secara medis dilakukan dengan memberikan insulin dari luar tubuh agar kadar Glukosa darah yang terkandung di dalam tubuh berkurang. Aktivitas fisik baik ringan, sedang, maupun berat merupakan bentuk pengobatan secara non-medis. Ketika penderita diabetes tipe 1 melakukan aktivitas fisik, insulin yang diperlukan akan disuntikan atau diminum ke dalam tubuh dengan jumlah tertentu. Upaya untuk mengetahui berapa kadar insulin yang diperlukan untuk disuntikan ke dalam tubuh ketika penderita melakukan aktivitas fisik merupakan hal yang menarik untuk diteliti. Salah satu cara melihat berapa jumlah insulin yang diperlukan oleh penderita diabetes tipe 1 adalah model matematika.

Pemodelan yang sudah ada hanya untuk kondisi ketika penderita melakukan olahraga dan besar jumlah insulin yang diperlukan. Namun bagaimana ketika pasien sebelumnya mengonsumsi glukosa yang dalam hal ini bisa makanan ataupun minuman belum pernah dimodelkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan cara memodifikasi model yang sudah ada dengan menambahkan konsumsi glukosa, agar dapat sesuai dengan kondisi sebenarnya.

EKSPERIMENTAL

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan adalah *notebookAcer* dengan spesifikasi *Harddisk* 150 GB, RAM 1 GB. Sistem operasi yang digunakan

adalah Windows 7 Home Premium. Perangkat lunak yang digunakan adalah Microsoft Office 2013 dan MATLAB 2012b.

Studi Literatur

Pemodelan laju penurunan glukosa darah yang dikembangkan oleh Roy² belum memperhatikan faktor konsumsi glukosa. Adapun pemodelan hasil pengembangan oleh Roy² adalah sebagai berikut:

$$\frac{dG(t)}{dt} = -p_1[G(t) - G_b] - p_4X(t)G(t) + \frac{\{W[G_{prod}(t) - G_{gly}(t) - G_{upt}(t)] + u_2(t)\}}{Vol_g}$$

$$G(0) = G_b \quad (1)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = -nI(t) - I_e(t) + p_5u_1(t)I(0) = I_b \quad (2)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = -p_2X(t) + p_3[I(t) - I_b]X(0) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dG_{prod}(t)}{dt} = a_1PVO_2^{max}(t) - a_2G_{prod}(t)G_{prod}(0) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dG_{upt}(t)}{dt} = a_3PVO_2^{max}(t) - a_4G_{upt}(t)G_{upt}(0) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dI_e(t)}{dt} = a_5PVO_2^{max}(t) - a_6I_e(t)I_e(0) = 0 \quad (6)$$

Variabel $G_{upt}(t)$ merupakan laju penyerapan glukosa, sedangkan variabel $G_{prod}(t)$ merupakan laju produksi Glukosa hepatic dan $G_{gly}(t)$ adalah laju penurunan *glycogenolysis* selama aktivitas fisik akibat berkurangnya jumlah glikogen hati. $I_e(t)$ merupakan laju pemindahan insulin dari sistem peredaran darah karena perubahan fisiologi akibat aktivitas fisik. Laju *glycogenolysis* mulai berkurang ketika energi yang dikeluarkan melebihi nilai ambang batas kritis (A_{TH}) yang merupakan fungsi dari intensitas dan durasi. Ambang batas kritis (A_{TH}) dimodelkan dengan fungsi:

$$A_{TH} = -1.1521[u_{ex}(t)]^2 + 87.471u_{ex}(t) \quad (7)$$

dengan laju *glycogenolysis* dirumuskan sebagai:

$$\frac{dG_{gly}(t)}{dt} = \begin{cases} 0 & A(t) < A_{TH} \\ k & A(t) \geq A_{TH} \\ -\frac{G_{gly}(t)}{T_1}u_{ex} = 0 & \end{cases} \quad (8)$$

dimana $A(t)$ merupakan integrasi dari intensitas aktivitas fisik. Adapun persamaan integrasinya adalah sebagai berikut:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \begin{cases} u_{ex} & u_{ex} > 0 \\ -\frac{A(t)}{T_2} & u_{ex} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

dengan u_{ex} adalah intensitas aktivitas fisik dan $T_2 = 0.001$ min. Pada modifikasi pemodelan tersebut, Roy² menambahkan faktor konsumsi oksigen selama melakukan aktivitas fisik dengan bentuk pemodelannya sebagai berikut:

$$\frac{dPVO_2^{max}(t)}{dt} = -0.8PVO_2^{max}(t) + 0.8u_{ex}(t)PVO_2^{max}(0) = 0 \quad (10)$$

Modifikasi Pemodelan

Modifikasi pemodelan yang dilakukan yakni memberikan faktor baru berupa laju penyerapan glukosa akibat adanya konsumsi glukosa yang bersumber dari makanan ataupun minuman sebelum melakukan aktivitas fisik. Bentuk persamaan yang digunakan mengacu pada penelitian yang dilakukan Friis³ dan memiliki bentuk sebagai berikut:

$$\frac{dD(t)}{dt} = -rate \cdot D(t) \quad D(0) = D_0 \quad (11)$$

dengand *rate* merupakan parameter penyerapan glukosa di dalam tubuh yang bersumber dari makanan ataupun minuman. Persamaan tersebut disubstitusikan pada Persamaan (1) menghasilkan persamaan dibawah ini:

$$\frac{dG(t)}{dt} = -p_1[G(t) - G_b] - p_4X(t)G(t) + \frac{\{W[G_{prod}(t) - G_{gly}(t) - G_{upt}(t)] + u_2(t)\}}{Vol_g} + X(t)D(t)$$

$$G(0) = G_b \quad (12)$$

Modifikasi ini dilakukan untuk mengembangkan pemodelan tersebut agar sesuai dengan kondisi sebestarnya yakni penderita mengonsumsi glukosa sebelum melakukan aktivitas fisik.

Justifikasi Modifikasi Pemodelan

Pemodelan yang sudah dimodifikasi dilakukan pengujian pemodelan untuk mengetahui kelayakan pemodelan tersebut. Adapun bentuk pengujian pemodelan yang dilakukan tertera pada Tabel 1.

Tabel 1 Justifikasi pemodelan

Jutifikasi	Kondisi		
	Penyuntikan Insulin	Aktivitas Fisik	Konsumsi Glukosa
1	-	-	-
2	√	-	-
3	-	√	-
4	√	√	-
5	√	√	√

Variasi Insulin dan Konsumsi Glukosa

Pemodelan yang digunakan sudah layak dilakukan variasi insulin dan konsumsi glukosa. Variasi insulin dan konsumsi glukosa dilakukan untuk mengetahui kadar insulin yang dibutuhkan ketika penderita sebelum melakukan aktivitas fisik terlebih dahulu mengonsumsi glukosa. Adapun variasi yang dilakukan tertera pada Tabel 2.

Tabel 2 Variasi insulin dan konsumsi glukosa

Variasi	$u_1(\mu\text{U min}^{-1})$	$D(\text{mg min}^{-1} \text{dl}^{-1})$
1	15	10
2	20	10
3	15	15
4	15	20
5	15	100

Analisa Data

Metode analisa data yang digunakan untuk pengujian kelayakan pemodelan adalah metode koefisien deterministik atau koefisien korelasi (R^2). Hasil simulasi akan diuji tingkat korelasinya dengan data eksperimen penderita diabetes tipe 1. Metode koefisien korelasi tersebut dirumuskan sebagai:

$$R^2 = 1 - \frac{X^2}{SST} \quad (13)$$

dengan X^2 dan SST adalah sebagai berikut:

$$X^2 \equiv \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - y(t_i, \theta_1, \dots, \theta_M)}{\sigma} \right]^2 \quad (14)$$

$$SST \equiv \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma} \right]^2 \quad (15)$$

dimana y_i merupakan data hasil eksperimen dengan standar deviasi sebesar σ , $y(t_i, \theta_1, \dots, \theta_M)$ merupakan data hasil pemodelan, N banyak data, dan \bar{y} merupakan nilai rata-rata data eksperimen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Justifikasi Hasil Modifikasi

Justifikasi dilakukan untuk menentukan kelayakan suatu pemodelan dan membandingkannya dengan data eksperimen. Hasil modifikasi pemodelan terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan untuk memproses simulasi. Parameter yang digunakan untuk justifikasi tertera pada Tabel 3.

Tabel 3 Parameter simulasi pemodelan

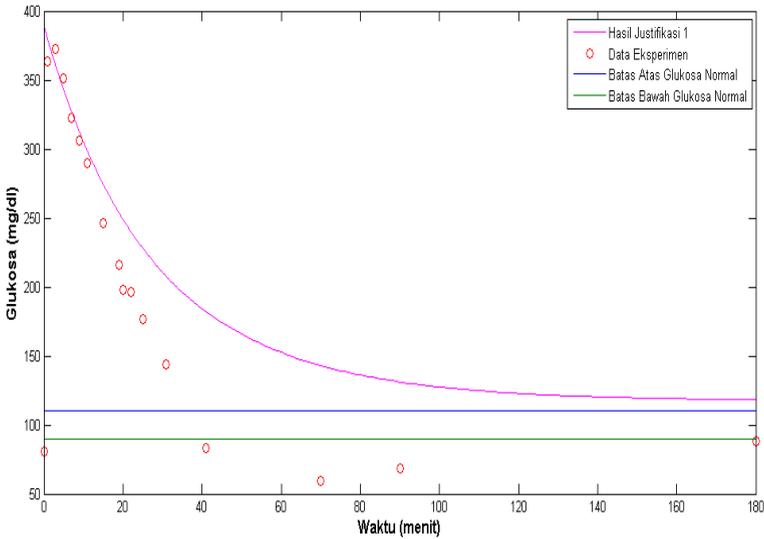
Parameter	Nilai Parameter	Satuan
p_1	0.035	min ⁻¹
p_2	0.05	min ⁻¹
p_3	0.000028	ml μU^{-1} min ⁻²
p_4	1	min ⁻¹
p_5	0.098	ml ⁻¹
n	0.142	min ⁻¹
Vol_G	117.0	dl
G_b	98.0	mg dl ⁻¹
a_1	0.0013	mg kg ⁻¹ min ⁻²
a_2	0.0441	min ⁻¹
a_3	0.0015	mg kg ⁻¹ min ⁻²
a_4	0.0617	min ⁻¹
a_5	0.0010	μU ml ⁻¹ min ⁻¹
a_6	0.0912	min ⁻¹
k	0.0131	mg kg ⁻¹ min ⁻²
T_1	10.14	min

Data eksperimen yang digunakan berasal dari jurnal penelitian Brun *et al.*⁴ Data eksperimen ini digunakan untuk pembandingan pada justifikasi dan variasi insulin dan konsumsi glukosa. Data eksperimen tersebut tertera pada tabel 4.

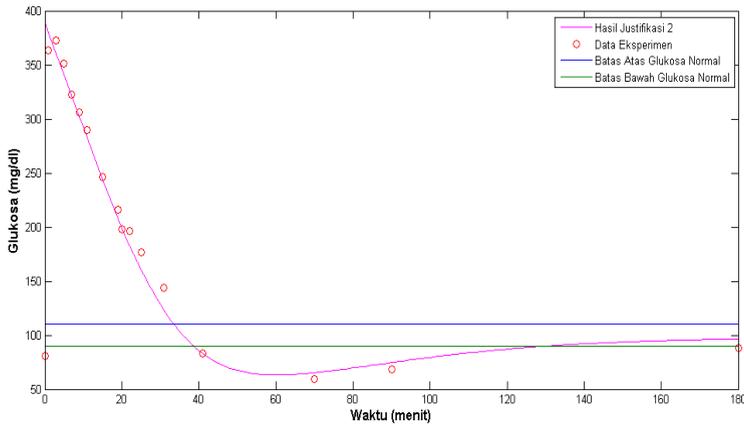
Tabel 4 Data eksperimen

Waktu (min)	Glukosa (mg dl ⁻¹)	Waktu (min)	Glukosa (mg dl ⁻¹)
0	81	20	198
1	363.6	22	196.2
3	372.6	25	176.4
5	351	31	144
7	322.2	41	82.8
9	306	70	59.4
11	289.8	90	68.4
15	246.6	180	88.2
19	216		

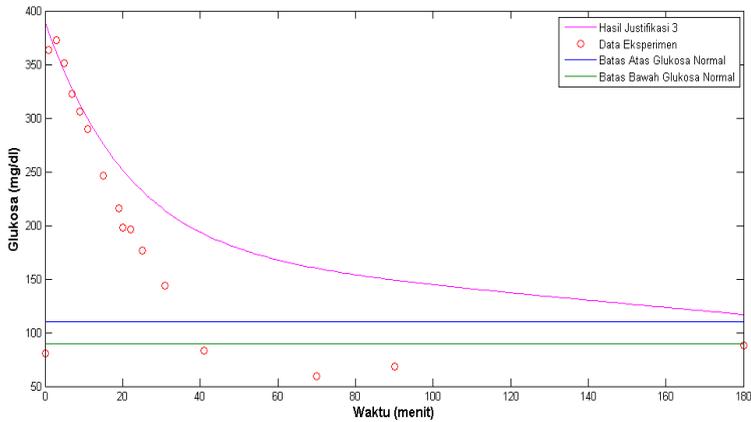
Pada justifikasi diasumsikan kondisi penderita diabetes tipe 1 memiliki berat badan sebesar 80 kg, melakukan aktivitas fisik selama 60 menit, penyuntikan insulin (u_1)= 15 μ U min⁻¹, stimulus glukosa (u_2)= 10 mg min⁻¹, dan konsumsi glukosa sebesar 10 mg min⁻¹ dl⁻¹.



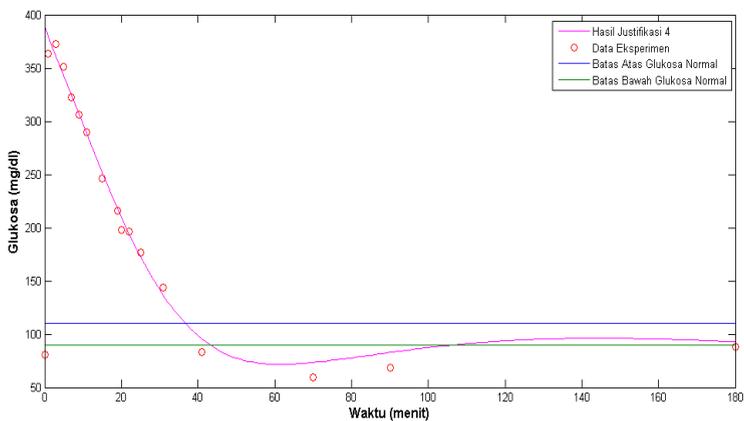
Gambar 1 Justifikasi 1: Pemodelan tanpa penyuntikan insulin, tanpa aktivitas fisik, dan tanpa konsumsi glukosa. Nilai $R^2 = 82.01\%$.



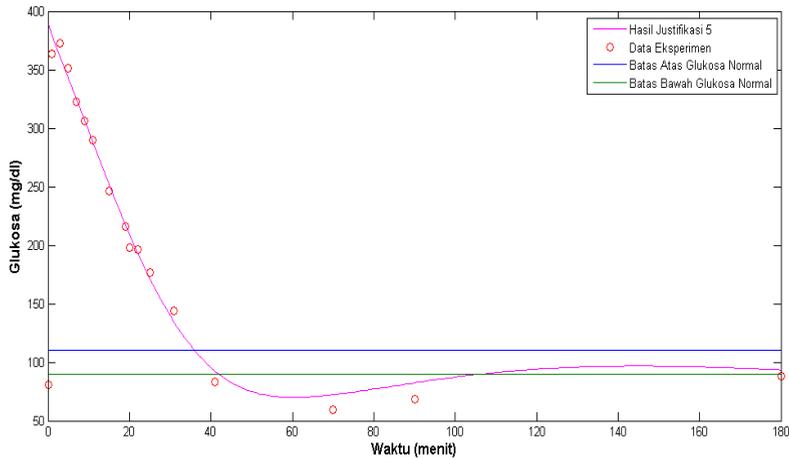
Gambar 2 Justifikasi 2: Pemodelan dengan penyuntikan insulin, tanpa aktivitas fisik, dan tanpa konsumsi glukosa. Nilai $R^2 = 99.07\%$.



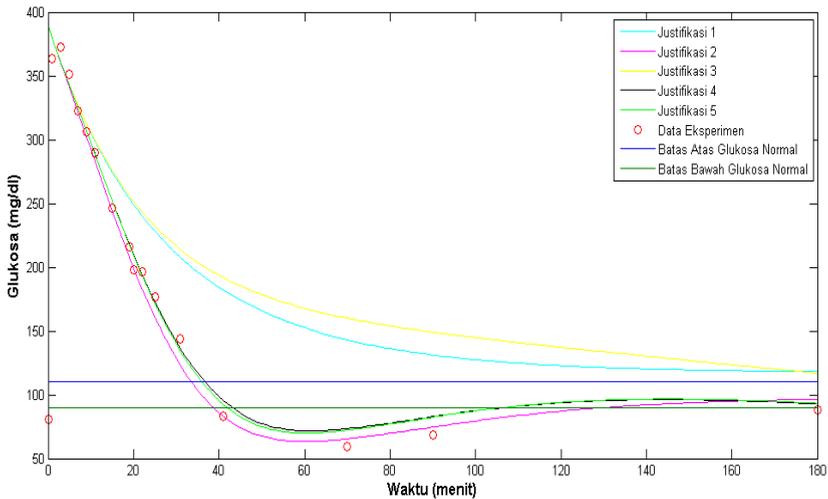
Gambar 3 Justifikasi 3: Pemodelan dengan aktivitas fisik, tanpa penyuntikan insulin, dan tanpa konsumsi glukosa. Nilai $R^2 = 77.65\%$.



Gambar 4 Justifikasi 4: Pemodelan dengan penyuntikan insulin, aktivitas fisik, dan tanpa konsumsi glukosa. Nilai $R^2 = 99.25\%$



Gambar 5 Justifikasi 5: Pemodelan dengan penyuntikan insulin, aktivitas fisik, dan konsumsi glukosa. Nilai $R^2 = 99.30\%$



Gambar 6 Hasil justifikasi 1, 2, 3, 4, dan 5

Justifikasi 1 dengan mengatur kondisi tidak ada penyuntikan insulin, tidak melakukan aktivitas fisik, dan tidak mengonsumsi glukosa diperoleh grafik pada Gambar 1. Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa ketika pada kondisi tersebut kadar Glukosa darah menurun akan tetapi tidak mencapai daerah basal glukosa normal di dalam tubuh yakni $90-110 \text{ mg dl}^{-1}$. Hasil uji statistik dengan metode koefisien deterministik diperoleh nilai R^2 sebesar 82.01% . Kondisi justifikasi ini tidak mungkin terjadi karena penderita diabetes melitus tipe 1 sangat membutuhkan insulin. Kadar Glukosa darah tidak dapat turun apabila tidak ada penyuntikan insulin dari luar tubuh. Namun pada penelitian ini mengasumsikan bahwa masih terdapat sisa insulin dalam tubuh yakni sebesar $9 \mu\text{U ml}^{-1}$. Justifikasi 2 dengan mengatur kondisi ada penyuntikan insulin, tidak melakukan aktivitas fisik, dan tidak mengonsumsi glukosa diperoleh grafik pada Gambar 2. Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa ketika pada kondisi tersebut kondisi tersebut kadar

Glukosa darah menurun dan mencapai daerah basal glukosa normal. Nilai R^2 pada kondisi ini sebesar 99.07%. Hal ini menandakan bahwa penderita diabetes tipe 1 sangat membutuhkan insulin. Justifikasi 3 dengan mengatur kondisi tidak ada penyuntikan insulin, melakukan aktivitas fisik, dan tidak mengonsumsi glukosa diperoleh grafik pada Gambar 3. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa ketika pada kondisi tersebut kadar Glukosa darah menurun akan tetapi tidak mencapai daerah basal glukosa normal. Kondisi pada justifikasi 3 tidak jauh berbeda dengan kondisi justifikasi 1 dan dengan nilai R^2 sebesar 77.65%. Namun penurunan kadar Glukosa darah pada justifikasi 3 tidak curam dibandingkan dengan justifikasi 3. Nilai R^2 pada kondisi justifikasi 3 sebesar 88.56%. Aktivitas fisik membantu untuk menurunkan kadar Glukosa darah sebagaimana yang telah dibuktikan pada penelitian Roy².

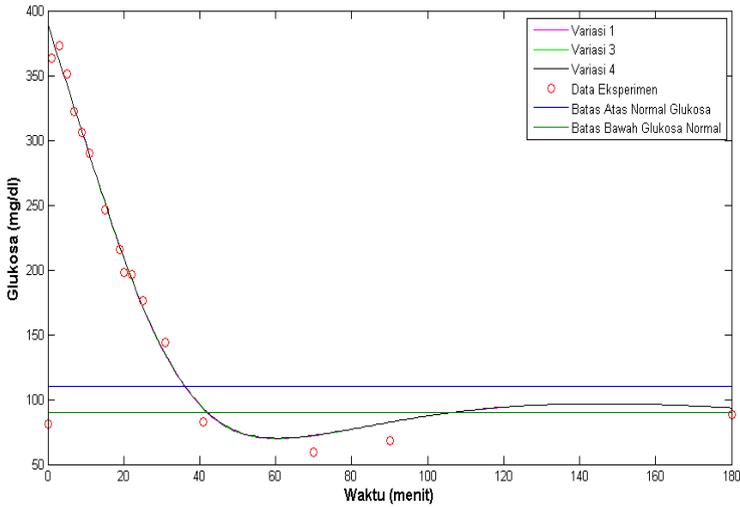
Justifikasi 4 dengan mengatur kondisi ada penyuntikan insulin, melakukan aktivitas fisik, dan tidak mengonsumsi glukosa diperoleh grafik pada Gambar 4. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa kadar Glukosa darah menurun dan semakin mendekati pola grafik dari data eksperimen yang dilakukan oleh Brun *et al.*⁴ serta masih berada di dalam rentang basal glukosa normal. Nilai R^2 yang diperoleh yakni 99.25%. Justifikasi 5 dengan mengatur kondisi ada penyuntikan insulin, melakukan aktivitas fisik, dan mengonsumsi glukosa diperoleh grafik pada Gambar 7. Pada Gambar 5 terlihat bahwa kadar Glukosa darah menurun dan semakin mendekati dengan pola grafik dari data eksperimen dibandingkan dengan justifikasi 4. Namun untuk kondisi akhir pada menit 180, grafik justifikasi 5 berada sedikit di atas grafik justifikasi 4. Hal ini mengindikasikan bahwa konsumsi glukosa mempengaruhi kadar Glukosa darah. Nilai R^2 pada justifikasi 5 sebesar 99.30%. Semua perbedaan grafik hasil justifikasi dapat terlihat jelas pada Gambar 6 akan tetapi grafik dari beberapa justifikasi seperti justifikasi 2, 4, dan 5 terlihat berdekatan. Hasil justifikasi menunjukkan bahwa modifikasi pemodelan yang dilakukan sudah layak dan sesuai dengan keadaan sebenarnya. Hal ini terlihat pada nilai R^2 pada justifikasi 5 yang merupakan hasil modifikasi pemodelan pada penelitian sebesar 99.30%.

Hasil Variasi Insulin dan Konsumsi Glukosa

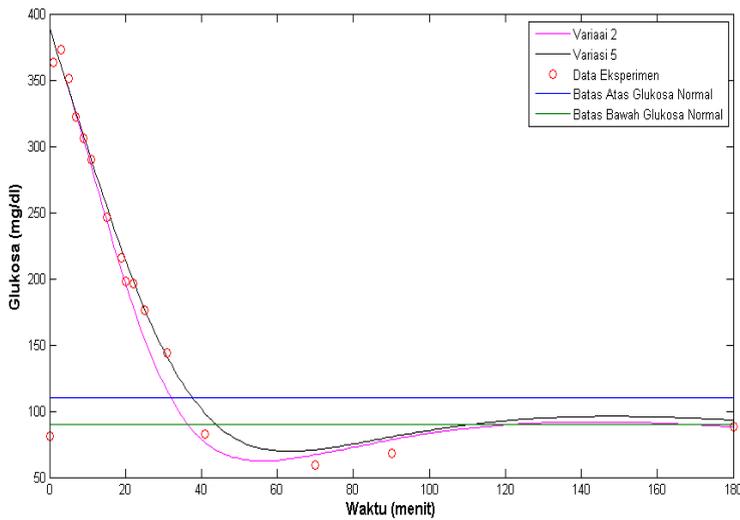
Modifikasi pemodelan yang sudah dijustifikasi dilakukan variasi penyuntikan insulin (u_1) dan konsumsi glukosa (D). Insulin tersebut disuntikan ke tubuh penderita diabetes tipe 1 dengan laju aliran dari alat suntik ke bagian tubuh yang disuntikan sebesar μU selama satu menit. Sebelum melakukan aktivitas fisik, penderita tersebut juga mengonsumsi glukosa sebanyak mg dl^{-1} selama satu menit. Adapun nilai R^2 hasil variasi insulin (u_1) dan konsumsi glukosa (D) tertera pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai R^2 hasil variasi insulin dan konsumsi glukosa

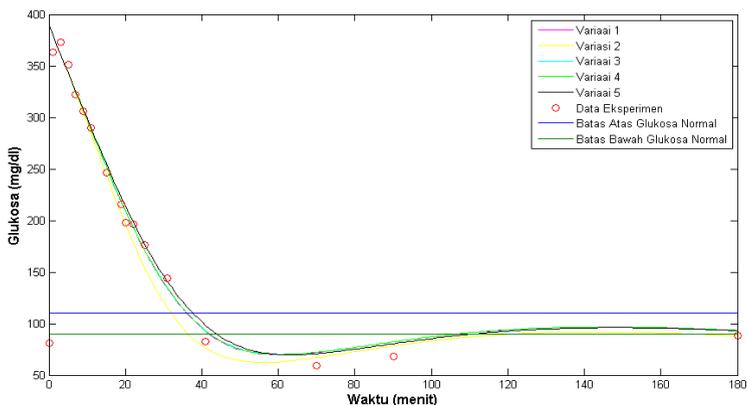
Variasi	$u_1 (\mu\text{U min}^{-1})$	$D (\text{mg min}^{-1} \text{dl}^{-1})$	Nilai R^2
1	15	10	99.30%
2	20	10	98.67%
3	15	15	99.29%
4	15	20	99.28%
5	15	100	99.15%



Gambar 7 Hasil Variasi 1, 3, dan 4



Gambar 8 Hasil variasi 2 dan 5



Gambar 9 Hasil Variasi 1, 2, 3, 4, dan 5

Variasi pertama ($u_1 = 15 \mu\text{U min}^{-1}$, $D = 10 \text{ mg min}^{-1} \text{ dl}^{-1}$), variasi ketiga ($u_1 = 15 \mu\text{U min}^{-1}$, $D = 15 \text{ mg min}^{-1} \text{ dl}^{-1}$), dan variasi keempat ($u_1 = 15 \mu\text{U min}^{-1}$, $D = 20 \text{ mg min}^{-1} \text{ dl}^{-1}$) memiliki bentuk grafik yang sama dan saling berhimpit satu sama lain dan hal ini terlihat pada Gambar 7. Namun variasi kedua ($u_1 = 20 \mu\text{U min}^{-1}$, $D = 10 \text{ mg min}^{-1} \text{ dl}^{-1}$) memiliki bentuk grafik yang tidak berhimpit dengan yang lainnya dan berada di bawah dari ketiga grafik hasil variasi. Nilai R^2 untuk masing-masing variasi tertera pada Tabel 5. Pada Gambar 8 menunjukkan bahwa ketika jumlah insulin yang disuntikan diperbanyak (variasi 2), laju penurunan Glukosa darah begitu cepat dan berada dibawah rentang basal glukosa normal pada menit ke-36. Kondisi seperti ini mengakibatkan penderita mengalami hipoglikemia lebih cepat. Hipoglikemia merupakan keadaan dimana kadar Glukosa darah seseorang di bawah basal glukosa normal. Variasi 1, 3, dan 4 mengalami kondisi hipoglikemia pada menit ke-42. Variasi kelima ($u_1 = 15 \mu\text{U min}^{-1}$, $D = 100 \text{ mg min}^{-1} \text{ dl}^{-1}$) pada Gambar 8 menunjukkan bahwa ketika konsumsi glukosa diperbesar maka laju penurunan kadar Glukosa darah berjalan lambat. Kondisi ini berpotensi menyebabkan penderita mengalami hiperglikemia. Hiperglikemia merupakan keadaan dimana kadar Glukosa darah seseorang di atas basal glukosa normal. Selain itu, variasi 5 mengalami kondisi hipoglikemia pada menit ke-45. Pada kondisi menit ke-32 sampai dengan menit ke-120 merupakan kondisi penderita mengalami hipoglikemia dan menyebabkan insulin tidak bekerja serta tubuh kembali menghasilkan glukosa. Pada menit ke-120 sampai dengan menit ke-180 insulin bekerja kembali dan menjaga kadar Glukosa darah berada pada rentang basal glukosa normal. Namun pada menit ke-180 variasi 2 menyebabkan penderita mengalami hipoglikemia kembali. Laju penurunan yang begitu cepat pada waktu 0-45 untuk setiap variasi disebabkan glukosa yang terdapat di dalam tubuh di konversi menjadi energi sebagai akibat adanya aktivitas fisik. Jumlah insulin yang optimum untuk disuntikan ke penderita diabetes melitus tipe 1 untuk mempertahankan kadar glukosa akhir ($t = 180$ menit) adalah sebesar $15 \mu\text{U min}^{-1}$ ($15 \mu\text{U}$ selama satu menit).

SIMPULAN

Justifikasi 1 dan 3 tidak mungkin terjadi karena penderita sangat bergantung pada insulin dan grafik yang dihasilkan menyimpang dari data eksperimen. Hasil justifikasi yang mendekati data hasil eksperimen terdapat pada justifikasi 4 dan 5. Hal ini dapat dibuktikan dari hasil uji statistik dengan metode koefisien deterministik (R^2). Nilai R^2 untuk pemodelan dengan kondisi ada penyuntikan insulin, melakukan aktivitas fisik, dan tidak mengonsumsi glukosa (justifikasi 4) sebesar 99.25%, sedangkan nilai R^2 untuk pemodelan dengan kondisi ada penyuntikan insulin, melakukan aktivitas fisik, dan mengonsumsi glukosa (justifikasi 5) sebesar 99.30%. Hasil modifikasi pemodelan dapat dikatakan sudah layak dengan kondisi sebenarnya dan dibuktikan dengan nilai R^2 yang sangat tinggi.

Penambahan faktor konsumsi glukosa mempengaruhi laju penurunan kadar Glukosa darah. Jumlah insulin yang diberikan secara berlebihan menyebabkan penderita diabetes melitus tipe 1 mengalami hipoglikemia. Hal ini terlihat pada variasi 2 (Gambar 10) yang menunjukkan data hasil pemodelan berada di bawah data hasil eksperimen. Jika jumlah insulin yang diberikan rendah atau konsumsi glukosa yang berlebihan berpotensi menyebabkan hiperglikemia. Hal ini terlihat pada variasi 5 (Gambar 10) yang menunjukkan data hasil pemodelan berada di atas data hasil eksperimen dari menit ke-3 sampai menit ke-60. Kadar insulin yang optimal yang harus disuntikan ke penderita diabetes melitus tipe 1 sebesar $15 \mu\text{U min}^{-1}$ dengan kondisi penderita memiliki berat badan 80 kg dan melakukan aktivitas fisik selama 60 menit serta jumlah kadar glukosa yang diperbolehkan untuk dikonsumsi berada pada kisaran $10\text{-}20 \text{ mg min}^{-1} \text{ dl}^{-1}$.

DAFTAR PUSTAKA

1. [Anonim]. DM Renggut 1,3 Juta Jiwa. *Harian Nasional*. Rubik Kesra (Kesejahteraan Rakyat): A4 (kol1), 14 September 2013.
2. Roy, Anirban. *Dynamic Modeling of Free Fatty Acid, Glucose, and Insulin During Rest and Exercise in Insulin Dependent Diabetes Mellitus Pasien*. Disertasi, Pennsylvania (US): University of Pittsburgh, 2008.
3. Friis, Esben, Jensen. *Modeling and Simulation of Glucose-Insulin Metabolism*. Tesis, Denmark: Technical University of Denmark, 2007.
4. Brun *et al.* *Influence of Short-Term Submaximal Exercise on Parameter of Glucose Assimilation Analyzed With Minimal Model*. Metabolism, WB Saunders, 1995.