

**SIMULASI PENGENDALIAN KADAR GLUKOSA
PENDERITA DIABETES MELLITUS TIPE 1
BERBASIS METODE AKTIF SET MODEL
PREDICTIVE CONTROL (MPC) DENGAN
CONSTRAINTS**

TESIS

oleh :

NUR HANIFAH YUNINDA

64 05 03 0392



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

**SIMULASI PENGENDALIAN KADAR GLUKOSA
PENDERITA DIABETES MELLITUS TIPE 1
BERBASIS METODE AKTIF SET MODEL
PREDICTIVE CONTROL (MPC) DENGAN
CONSTRAINTS**

TESIS

oleh :

NUR HANIFAH YUNINDA

64 05 03 0392



**TESIS INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI MAGISTER TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul :

***SIMULASI PENGENDALIAN KADAR GLUKOSA PENDERITA
DIABETES MELLITUS TIPE 1 BERBASIS METODE AKTIF
SET MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) DENGAN
CONSTRAINTS***

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar Magister di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Januari 2008

(Nur Hanifah Yuninda)

6405030392

LEMBAR PERSETUJUAN

Tugas tesis ini berjudul :

***SIMULASI PENGENDALIAN KADAR GLUKOSA PENDERITA
DIABETES MELLITUS TIPE 1 BERBASIS METODE AKTIF
SET MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) DENGAN
CONSTRAINTS***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian tesis.

Dosen Pembimbing II

Depok, Januari 2008

Mengetahui/Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Ir. Aries Subiantoro, M.Sc

NIP. 132137887

Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng

NIP. 132090912

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya tugas tesis ini saya bersyukur kepada Allah SWT atas karunianya dan mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng

dan

Ir. Aries Subiantoro, M. Sc

Sebagai dosen pembimbing Konsentrasi Teknik Kontrol Industri Departemen Elektro FTUI, yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan pengarahan, diskusi dan bimbingan dengan penuh kesabaran sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.

Depok, Januari 2008

Nur Hanifah Yuninda

NPM. 6405030392

ABSTRAK

Nur Hanifah Yuninda
NPM 64 05 03 0392
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing I
Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng
NIP. 132090912
Dosen Pembimbing II
Ir. Aries Subiantoro, M.Sc
NIP. 132137887

SIMULASI PENGENDALIAN KADAR GLUKOSA PENDERITA DIABETES MELLITUS TIPE 1 BERBASIS METODE AKTIF SET MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) DENGAN CONSTRAINTS

ABSTRAK

Perawatan dengan injeksi insulin secara kontinu setiap harinya diperlukan bagi penderita *Diabetes Mellitus* tipe I yang telah kronis, di mana pankreas sama sekali tidak menghasilkan insulin, untuk mengontrol kadar gula darahnya. Model minimal *Bergman* terdiri dari tiga persamaan diferensial yang memodelkan dengan cukup akurat penderita DM tipe I sesederhana mungkin.

Simulai model ini dilakukan dengan memberikan sinyal masukan laju insulin dengan batasan antara 0 sampai 100 mU/min dan gangguan glukosa makanan dimodelkan sebagai fungsi eksponensial $1,157 \exp(-0,05.t)$ mmol/L.min yang dimulai pada menit ke-100, dengan batasan perubahan laju insulin eksternal yang merupakan sinyal kendali sistem sebesar $\pm 16,667$ mU/min. Sinyal masukan insulin diberikan untuk mengurangi kadar gula darah, tetapi tetap menjaga agar tidak terjadi *hypoglycemia* ($< 3,33$ mmol/L). Perancangan pengendali MPC (*Model Predictive Control*) dengan *constraints* yang berbasiskan metode aktif set menggunakan persamaan ruang keadaan linier, dan analisa simulasi dilakukan dengan mengubah parameter-parameter pengendali berupa *control horizon*, *prediction horizon*, batas maksimal dan batas minimal sinyal kendali serta matriks bobot R dan Q

Nur Hanifah Yuninda
NPM 64 05 03 0392
Electrical Department

Lecture 1
Dr. Ir. Feri Yusifar, M.Eng
NIP. 132090912

Lecture 2
Ir. Aries Subianto, M.Sc
NIP. 132137887

**CONTROLLING SIMULATION OF BLOOD GLUCOSE
IN TYPE I DIABETIC BASED ON ACTIVE SET METHOD
MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) WITH
CONSTRAINTS**

ABSTRACT

Diabetes Mellitus refers to condition in which the pancreas produces no effective insulin. Treatment consist of daily injection or continuous infusions of insulin to maintain blood glucose levels between critical values (3,33 – 6,67 mmol/L). The Bergman minimal model consist of three differential equations as powerful modeling to describe the dynamics of type 1 diabetic system as simply as possible.

This simulation model is done by giving inputs are the manipulated insulin infusion rate with range between 0 and 100 mU/min, and the meal glucose disturbance described as exponential function ($1,157 \exp(-0,05.t)$ mmol/L.min) and simulated at minute 100. The manipulated insulin infusion rate is given for prevention of long-term complications due to hyperglycemia and hypoglycemia ($<3,33$ mmol/L). MPC (Model Predictive Control) with constraints is designed based on active set method using linier state space equation and analyze the simulation by altering controller parameters are control horizon (H_u), prediction horizon (H_p), maximum and minimum of control signal (U_{maks} and U_{min}), and also weight matrix of R and Q .

DAFTAR ISI

| | hal |
|---|-----|
| Halaman Judul | i |
| Pernyataan Keaslian Seminar | ii |
| Persetujuan | iii |
| Ucapan Terima Kasih | iv |
| Abstrak | v |
| Daftar Isi | vii |
| Daftar Gambar | ix |
| Daftar Tabel | xi |
| Daftar Simbol | xii |
| Bab 1. Pendahuluan | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Tujuan Pembahasan | 3 |
| 1.3. Batasan Masalah | 3 |
| 1.4. Sistematika Penulisan | 4 |
| Bab 2. Pemodelan Sistem Diabetes Mellitus Tipe I | 6 |
| 2.1. Sejarah dan Konsep Dasar MPC | 6 |
| 2.2. Formulasi <i>Model Predictive Control</i> | 10 |
| 2.2.1. Model Proses | 10 |
| 2.2.2. Pembentukan <i>Constraints</i> | 14 |
| 2.2.3. Fungsi Kriteria | 16 |
| 2.3. Strategi Penurunan Sinyal Kendali MPC tanpa <i>Constraints</i> | 18 |
| 2.4. Strategi Penurunan Sinyal Kendali MPC dengan <i>Constraints</i> | 20 |
| 2.5. Metode <i>Quadratic Programming</i> | 20 |
| 2.6. Diskritisasi Persamaan Continuous-Time State Space | 23 |
| Bab 3. Pemodelan Dan Perancangan Pengendali MPC Diabetes Mellitus Tipe I | 27 |
| 3.1. Sistem Diabetes Mellitus | 27 |
| 3.2. Pemodelan Diabetes Mellitus Tipe I | 29 |
| 3.2.1. Model Minimal <i>Bergman</i> | 29 |
| 3.2.2. Pemodelan Ruang Keadaan | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.3. Penurunan Model Acuan dan Sinyal Kendali MPC dengan Gangguan.. | 39 |
| 3.4. Algoritma <i>Model Predictive Control</i> dengan <i>Constraints</i> | 41 |
| 3.5. Perhitungan Sinyal Kendali untuk Sistem Diabetes Mellitus Tipe I..... | 47 |
| Bab 4. Hasil Simulasi Dan Analisa | 58 |
| 4.1. Pengaruh Nilai <i>Control Horizon</i> dan <i>Prediction Horizon</i> Pada Hasil Pengendali MPC | 59 |
| 4.1.1. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai <i>Prediction Horizon</i> Tetap dan Nilai <i>Control Horizon</i> Bervariasi | 59 |
| 4.1.2. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai <i>Control Horizon</i> Tetap dan Nilai <i>Prediction Horizon</i> Bervariasi..... | 64 |
| 4.2. Pengaruh Nilai Faktor Bobot Perubahan Sinyal Kendali (R) dan Batas Sinyal Kendali | 74 |
| 4.2.1. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai Faktor Bobot Kesalahan (Q) Tetap dan Nilai Faktor Bobot Perubahan Sinyal Kendali (R) Bervariasi | 74 |
| 4.2.2. Hasil Uji Simulasi dengan Nilai Batas Mimimum Sinyal Kendali Tetap dan Nilai Batas Maksimum Sinyal Kendali Bervariasi | 88 |
| Bab 5. Kesimpulan | 92 |
| Daftar Acuan | 94 |
| Lampiran | 95 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Strategi <i>receding horizon</i> | 8 |
| Gambar 2.2 | Struktur dasar pengendali MPC | 9 |
| Gambar 2.3 | Blok diagram proses MPC | 10 |
| Gambar 3.1 | Regulasi glukosa oleh pankreas | 28 |
| Gambar 3.2 | Diagram blok simulink linierisasi sistem diabetes mellitus tipe I model minimal <i>Bergman</i> | 37 |
| Gambar 3.3 | Blok diagram pengendali MPC dengan <i>constraints</i> | 41 |
| Gambar 3.4 | Diagram alir algoritma MPC dengan <i>constraints</i> | 43 |
| Gambar 3.5 | Diagram alir metode <i>Active Set</i> untuk menyelesaikan Quadratic Programming | 46 |
| Gambar 4.1 | Blok diagram simulink pengendalian kadar gula darah diabetes mellitus tipe I dengan MPC | 59 |
| Gambar 4.2 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) = 10 dan <i>control horizon</i> (H_u) bervariasi | 62 |
| Gambar 4.3 | Sinyal kendali sistem hasil uji simulasi dengan nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) = 10 dan <i>control horizon</i> (H_u) bervariasi | 63 |
| Gambar 4.4 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) bervariasi dan <i>control horizon</i> (H_u) = 2 | 65 |
| Gambar 4.5 | Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) bervariasi dan <i>control horizon</i> (H_u) = 2 | 67 |
| Gambar 4.6 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) bervariasi dan <i>control horizon</i> (H_u) = 2 | 69 |
| Gambar 4.7 | Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) bervariasi dan <i>control horizon</i> (H_u) = 2 | 70 |
| Gambar 4.8 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan dan set point konstan 5 mmol/L pada nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) bervariasi dan <i>control horizon</i> (H_u) = 2 | 72 |
| Gambar 4.9 | Sinyal Kendali hasil uji simulasi dengan gangguan dan set point konstan 5 mmol/L pada nilai <i>prediction horizon</i> (H_p) bervariasi dan <i>control horizon</i> (H_u) = 2 | 73 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.10 | Hasil simulasi dengan gangguan dan tanpa pengendali | 74 |
| Gambar 4.11 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 76 |
| Gambar 4.12 | Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 77 |
| Gambar 4.13 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 79 |
| Gambar 4.14 | Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan gangguan pada nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 81 |
| Gambar 4.15 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan dan <i>set point</i> konstan 5 mmol/L pada nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 84 |
| Gambar 4.16 | Perbandingan keluaran sistem hasil uji simulasi dengan gangguan dan <i>set point</i> konstan 5 mmol/L pada nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 84 |
| Gambar 4.17 | Sinyal Kendali hasil uji simulasi dengan gangguan dan <i>set point</i> konstan 5 mmol/L pada nilai Q tetap yaitu I_{Hp} dan R bervariasi | 87 |
| Gambar 4.18 | Keluaran sistem hasil uji simulasi dengan nilai batas sinyal kendali minimum tetap ($U_{min} = 0$) dan batas sinyal kendali maksimum bervariasi | 89 |
| Gambar 4.19 | Sinyal kendali hasil uji simulasi dengan nilai batas sinyal kendali minimum tetap ($U_{min} = 0$) dan batas sinyal kendali maksimum bervariasi | 90 |
| Gambar 4.20 | Hasil simulasi dengan gangguan pada $U_{min} = 0$, $U_{max} = 20$ dan <i>slew rate</i> = 5 | 91 |

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter-parameter model minimal *Bergman*

30



DAFTAR SIMBOL

| | |
|----------------------|---|
| G | = konsentrasi glukosa plasma darah (mmol/L). |
| X | = konsentrasi insulin <i>interstitial</i> (mU/L) |
| I | = konsentrasi insulin plasma (mU/L). |
| $D_{(t)}$ | = gangguan berupa glukosa dari makanan (mmol/L.min) |
| $U_{(t)}$ | = laju pemberian insulin manipulasi (mU/min) |
| G_b | = konsentrasi glukosa plasma basal (4,5 mmol/L) |
| I_b | = konsentrasi insulin plasma basal (15 mU/L) |
| P_1 | = tingkat laju pemindahan glukosa dari aliran darah terlepas dari pengaruh insulin. |
| P_2 | = tingkat hilangnya insulin di bagian antar jaringan. |
| P_3 | = tingkat kemunculan insulin di bagian antar jaringan. |
| $\underline{\psi}$ | = matriks variabel keadaan |
| $\underline{\Gamma}$ | = matriks masukan |
| $\underline{\Theta}$ | = matriks perubahan masukan |
| $\underline{\Xi}$ | = matriks gangguan |
| α | = faktor koreksi pergerakan nilai optimal |
| λ | = nilai pengali <i>Langrange</i> |
| d | = pergerakan Δu |
| $\underline{\Omega}$ | = matriks batasan (<i>constraints</i>) |
| Δu | = perubahan sinyal masukan/sinyal kendali (perubahan laju insulin eksternal) |

- ω = batasan (*constraints*)
- $r(k)$ = trayektori acuan
- $\underline{V}(k)$ = fungsi kriteria
- $\underline{E}(k)$ = matriks penjejukan kesalahan
- \underline{Q} = faktor bobot kesalahan
- \underline{R} = faktor bobot perubahan sinyal kendali
- Hu = *control horizon*
- Hp = *prediction horizon*
- \underline{C}_y = matriks keluaran

