

# Penerapan *Model Predictive Control* (MPC) Pada Optimisasi Portofolio Saham

Wawan Hafid Syaifudin<sup>1</sup>, Subchan<sup>2</sup>, Endah Rochmati<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, wawan.hafid@gmail.com

<sup>2</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, s.subchan@gmail.com

<sup>3</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, endahrmp@yahoo.com

**Abstrak.** Salah satu jenis investasi pada aset finansial adalah saham. Portofolio saham merupakan kumpulan aset yang dimiliki oleh perusahaan maupun perseorangan. Penentuan portofolio saham yang optimal merupakan salah satu hal yang sangat penting bagi kalangan investor. Pada penelitian ini digunakan metode pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi portofolio saham dengan adanya kendala di dalam pembentukan portofolio saham. Data yang digunakan adalah data 3 perusahaan yang tergabung dalam *Jakarta Islamic Index* (JII) mulai tanggal 3 juni 2013 sampai dengan tanggal 31 Mei 2014. Pengendali MPC dapat diterapkan dengan baik pada permasalahan optimisasi portofolio saham. Dari hasil simulasi terlihat bahwa jumlah modal yang dimiliki investor yang merupakan *output* dari sistem menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan. Selain itu *state* dan *input* dari sistem selalu berada di dalam batas *constraint* yang diberikan.

**Kata Kunci:** *Model Predictive Control* (MPC), *Optimisasi Portofolio Saham*, *Kendala Pada Portofolio Saham*

## 1 Pendahuluan

Portofolio merupakan kombinasi atau gabungan atau sekumpulan aset, baik berupa aset finansial maupun aset real yang dimiliki oleh investor [1]. Penentuan portofolio saham yang optimal merupakan sesuatu yang sangat penting bagi kalangan investor. Portofolio saham yang optimal akan menghasilkan *return* yang optimal dengan risiko yang dapat dipertanggungjawabkan.

Penelitian terkait portofolio sendiri pertama kali dilakukan oleh Markowitz pada tahun 1952. Ia memperkenalkan teori pemilihan portofolio optimal, dimana portofolio tersebut mampu memberikan *expected return* yang maksimum sekaligus meminimumkan varians. Teori ini kemudian berkembang menjadi teori portofolio yang dikenal dengan istilah *Mean Variance Efficiency* (MV) portofolio [2]. Penelitian lainnya yang berkaitan dengan optimisasi portofolio dilakukan oleh Primbs. Dalam penelitiannya, ia menggunakan *Stochastic Receding Horizon* dalam menyelesaikan permasalahan optimisasi portofolio [3]. Ketika portofolio saham dipilih, hal utama yang perlu diperhatikan adalah mekanisme atau aturan dalam manajemen portofolio saham tersebut. Berikut ini akan dijelaskan model matematika dari manajemen portofolio saham.

Pada awal waktu, seorang investor memiliki sejumlah kekayaan yang dapat digunakan untuk berinvestasi pada  $i$  aset, dengan  $i = 1, 2, \dots, n$ . Secara umum

kekayaan yang dimaksud dalam hal ini adalah uang yang dimiliki oleh investor yang diinvestasikan pada  $i$  saham. Selain itu kekayaan investor juga berasal dari aset bebas risiko, yaitu aset yang terdapat di bank yang menghasilkan *yield*. Aset investor yang terdapat di bank selanjutnya disebut aset ke-  $n+1$ . Berikutnya, ketika seorang investor memutuskan untuk meminjam sejumlah dana yang akan digunakan untuk berinvestasi, maka aset ini disebut aset ke-  $n+2$  atau disebut dengan kredit.

Model manajemen portofolio untuk  $n$  aset dapat dituliskan sebagai berikut [4]:

$$x_i(k+1|k) = [1 + \eta_i(k)][x_i(k) + p_i(k) - q_i(k)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

variabel  $\eta_i(k)$  menunjukkan *return* dari saham, di mana

$$\eta_i(k) = \mu_i(k) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}(k)w_j(k) \quad (2)$$

dengan

$p_i(k)$  : jumlah transfer dari aset bebas risiko ke aset berisiko ke- $i$

$q_i(k)$  : jumlah transfer dari aset berisiko ke- $i$  ke aset bebas risiko

$p_i(k) \geq 0$  dan  $q_i(k) \geq 0$

Biaya transaksi yang dibayarkan didefinisikan sebagai  $\alpha$  dan  $\beta$ , di mana masing-masing menunjukkan biaya transaksi dalam pembelian dan biaya transaksi dalam penjualan saham. Persamaan di bawah ini menunjukkan perubahan dari aset bebas risiko.

$$x_{n+1}(k+1) = [1 + r_1(k)][x_{n+1}(k) - v(k) - (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n p_i(k) + (1 - \beta) \sum_{i=1}^n q_i(k)] \quad (3)$$

dengan

$r_1(k)$  menunjukkan tingkat suku bunga bank

$v(k)$  menunjukkan transfer antara rekening bank dan rekening kredit

Apabila  $v(k) > 0$  menunjukkan bahwa investor meminjam modal, dan apabila  $v(k) < 0$  menunjukkan bahwa investor membayar pinjaman. Perubahan dari pinjaman modal dapat dituliskan sebagai berikut.

$$x_{n+2}(k+1) = [1 + r_2(k)][x_{n+2}(k) + v(k)] \quad (4)$$

dengan  $r_2(k)$  menunjukkan bunga dari pinjaman modal.

Berdasarkan penjelasan yang telah diuraikan di atas, jumlah modal dari seorang investor dalam portofolio saham dapat dituliskan sebagai berikut

$$V(k) = \sum_{i=1}^n x_i(k) - x_{n+2}(k) \quad (5)$$

Seperti yang terlihat pada persamaan (5) di atas, jumlah modal dari investor merupakan penjumlahan dari kekayaan investor pada aset-aset berisiko serta aset bebas risiko yang dimiliki oleh investor dan dikurangi dengan pinjaman modal.

Permasalahan optimisasi portofolio saham pada dasarnya merupakan permasalahan dinamis yang melibatkan dinamika stokastik dari harga asset. Selain itu, terdapat beberapa permasalahan kontrol di dalam alokasi portofolio yang digunakan untuk mengontrol kekayaan/modal dari investor. Pada optimisasi portofolio saham juga terdapat beberapa kendala yang mengikuti, diantaranya adalah pembagian alokasi yang terbatas, jumlah minimum modal pada aset bebas risiko, jumlah maksimum pinjaman, dan lainnya.

Salah satu metode kontrol yang dapat digunakan dalam mengatasi kendala pada sebuah sistem adalah *Model Predictive Control* (MPC). Penelitian mengenai aplikasi dari *Model Predictive Control* (MPC) telah banyak dilakukan pada berbagai bidang keilmuan. Salah satunya adalah penerapan MPC pada kendali haluan kapal [5]. Pada penelitian tersebut, pengendali dengan menggunakan MPC

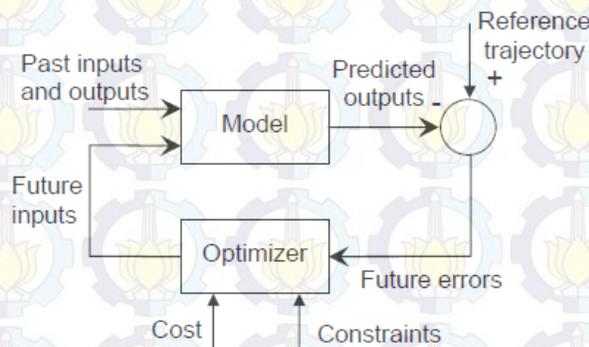
dapat diterapkan dengan baik pada kendali haluan kapal, dimana *state* dan *input* dari sistem berada dalam batas *constraint* yang diberikan dan gerakan dari kapal dapat mengikuti *reference trajectory* yang diinginkan, baik pada sistem tanpa gangguan maupun pada sistem dengan gangguan.

Tipe pengendali ini termasuk dalam kategori pengendali berbasis model proses, yaitu model proses digunakan secara eksplisit untuk mendesain pengendali, dengan meminimumkan suatu fungsi kriteria. Selain itu, MPC dapat menggabungkan semua tujuan menjadi fungsi objektif tunggal serta optimasi yang diberikan sangat efektif untuk menangani sistem yang memiliki kendala pada input dan ruang keadaan [6].

MPC banyak digunakan dalam bidang industri. Salah satu alasan utama untuk keberhasilan MPC di aplikasi industri adalah kemampuan dalam menerapkan berbagai jenis kendala pada proses. Keunggulan dari metode MPC adalah kemampuannya dalam mengatasi kendala pada kontrol dan variabel *state*. Dalam penelitian ini akan digunakan *Model Predictive Control* dalam menyelesaikan permasalahan pada optimasi portofolio saham.

*Model Predictive Control* atau MPC adalah suatu metode proses kontrol lanjutan yang banyak diterapkan pada proses industri. Dari sekian banyak algoritma *multivariable control*, MPC adalah salah satunya [6].

Metodologi MPC dijelaskan di bawah ini.



Gambar 1. Struktur dasar MPC [7]

Langkah kerja dari MPC seperti yang terlihat pada Gambar 1 dapat diilustrasikan sebagai berikut: awalnya, sistem telah memiliki model dari *plant*. Data *input* dan *output* sebelumnya masuk melalui *port input* MPC. Dari *input* dan *output* ini dilakukan estimasi berdasarkan model *plant* yang telah didefinisikan sebelumnya. Estimasi ini menghasilkan output yang disebut *predicted output* yang kemudian nilainya dibandingkan dengan *reference trajectory*. Dari hasil perbandingan ini, akan menghasilkan kesalahan yang disebut *future error*. *Future error* ini kemudian masuk ke dalam blok *optimizer*. Di sini, *optimizer* berfungsi untuk bekerja di dalam rentang *constraint* yang telah diberikan dengan tujuan untuk meminimumkan *cost function*, yang merupakan fungsi kriteria yang dibentuk dari fungsi kuadratik kesalahan antara sinyal *predicted output* dengan *reference trajectory*.

MPC kemudian mengambil keputusan untuk meminimalkan *future error* tersebut dengan keputusan yang masih berada dalam *constraint* yang telah ditetapkan. Hasil dari blok ini disebut *future input* yang dikembalikan bersama-sama dengan data *input* dan *output* sebelumnya untuk diestimasi kembali. Perhitungan ini berlangsung seterusnya dan berulang-ulang. Karena adanya koreksi *input* berdasarkan *output* terprediksi inilah yang membuat MPC mampu bekerja menghasilkan respon yang semakin mendekati *reference trajectory* [6].

Dalam pemodelan ini digunakan ruang keadaan diskrit dan linier. Persamaan ruang keadaan diskrit yang digunakan adalah sebagai berikut [8]:

$$\tilde{x}(k+1|k) = A\tilde{x}(k|k) + B\tilde{u}(k|k) \quad (6)$$

$$\tilde{y}(k|k) = C\tilde{x}(k|k) \quad (7)$$

dengan:

$\tilde{x}(k|k)$  = vektor ruang keadaan berdimensi- $n$

$\tilde{y}(k|k)$  = vektor keluaran terukur berdimensi- $n$

$\tilde{u}(k|k)$  = vektor masukan berdimensi- $m$

$A$  = matriks keadaan berdimensi  $n \times n$

$B$  = matriks masukan berdimensi  $n \times m$

$C$  = matriks keluaran berdimensi  $n \times n$

$a(m|n)$  menyatakan nilai  $a$  saat  $m$  yang diprediksi ketika berada dalam tahap  $n$

Untuk lebih memudahkan dalam penulisan,  $\tilde{x}(k|k)$  bisa ditulis dalam bentuk  $\tilde{x}(k)$ . Dalam perhitungan prediksi keluaran dengan MPC, sinyal masukan yang digunakan adalah  $\tilde{u}(k)$ .

## 2 Hasil dan Pembahasan

### 2.1 Model Matematika Manajemen Portofolio Saham

Berdasarkan persamaan (1) sampai dengan persamaan (5) dapat dibentuk persamaan ruang keadaan diskrit:

$$\tilde{x}(k+1|k) = A\tilde{x}(k|k) + B\tilde{u}(k|k)$$

$$\tilde{y}(k|k) = C\tilde{x}(k|k)$$

dengan

$$\tilde{x}(k+1) = \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \\ x_{n+1}(k+1) \\ x_{n+2}(k+1) \end{bmatrix}, \quad \tilde{u}(k) = \begin{bmatrix} p_1(k) \\ \vdots \\ q_1(k) \\ \vdots \\ v(k) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 + \eta_1(k) & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 + \eta_i(k) & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 + r_1(k) & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 + r_2(k) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 + \eta_1(k) & \dots & 0 & -(1 + \eta_1(k)) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 + \eta_i(k) & 0 & \dots & -(1 + \eta_i(k)) & 0 \\ (1 + r_1(k))(-1 - \alpha) & \dots & (1 + r_1(k))(-1 - \alpha) & (1 + r_1(k))(1 + \beta) & \dots & (1 + r_1(k))(1 + \beta) & 1 + r_1(k) \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 + r_2(k) \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \dots 1 - 1]$$

## 2.2 Kendala Pada Manajemen Portofolio Saham

Pada permasalahan real, setiap sistem memiliki kendala yang berkaitan dengan *input*, *state*, dan *output*. Pengendali MPC memiliki kemampuan dalam mengatasi kendala tersebut. Pada kasus ini kendala yang terdapat pada sistem didefinisikan sebagai:

$$p_i(k) \geq 0, \text{ dengan } i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$q_i(k) \geq 0, \text{ dengan } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Selain itu *state*  $x_{n+1}$  yang merupakan jumlah modal yang dimiliki oleh investor di bank, tidak mungkin bernilai negatif, sehingga didefinisikan kendala untuk *state*  $x_{n+1}$  adalah:

$$x_{n+1}(k) - v(k) - (1 + \alpha) \sum_{i=1}^n p_i(k) + (1 - \beta) \sum_{i=1}^n q_i(k) \geq 0 \quad (10)$$

Jumlah pinjaman modal yang disimbolkan dengan  $x_{n+2}$  memberikan kesempatan kepada investor untuk mendapatkan tambahan modal dengan tingkat bunga tertentu. Namun jumlah pinjaman yang diperbolehkan seharusnya dibatasi. Jumlah pinjaman modal haruslah lebih besar dari 0 dan memiliki nilai maksimum  $d_0(k)$ . Dengan demikian dapat didefinisikan kendala untuk *state*  $x_{n+2}$  adalah

$$x_{n+2}(k) + v(k) \geq 0 \quad (11)$$

$$x_{n+2}(k) + v(k) \leq d_0(k) \quad (12)$$

## 2.3 Optimisasi Pada MPC Linear

Metode pengendalian optimal yang digunakan pada MPC linear ini adalah *quadratic programming* (QP). QP digunakan karena MPC termasuk salah satu dari *closed-loop control*. Sistem yang digunakan bekerja dalam kondisi waktu diskrit, sehingga didefinisikan fungsi objektif:

$$J(\mathbf{u}(k), \mathbf{e}(k)) = \sum_{j=1}^{N_p} \mathbf{e}^T(k+j) \mathbf{Q} \mathbf{e}(k+j) + \sum_{j=1}^{N_p} \mathbf{u}^T(k+j) \mathbf{R} \mathbf{u}(k+j) \quad (13)$$

dengan  $\mathbf{e}(k+j) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{r}(k)$ ,  $\mathbf{r}(k)$  adalah *reference trajectory*,  $N_p$  adalah *prediction horizon*,  $\mathbf{u}(k+j)$  menunjukkan kontrol dari sistem pada saat langkah ke-  $k+j$ , dan  $\mathbf{e}(k+j)$  menunjukkan error pada saat langkah ke-  $k+j$ . Matriks  $\mathbf{Q}$  dan  $\mathbf{R}$  masing-masing merupakan matriks bobot semi definit positif yang berkaitan dengan  $\mathbf{e}$  dan  $\mathbf{u}$ .

Dari persamaan (6) dan (7), fungsi objektif pada persamaan (13) dapat dituliskan kembali dalam bentuk QP standar sebagai berikut:

$$J(\hat{\mathbf{u}}(k)) = \hat{\mathbf{u}}^T(k) \mathbf{H} \hat{\mathbf{u}}(k) + 2\mathbf{f}^T \hat{\mathbf{u}}(k) \quad (14)$$

dengan

$$\mathbf{H} = (\hat{\mathbf{B}}^T \hat{\mathbf{Q}} \hat{\mathbf{B}} + \hat{\mathbf{R}})$$

$$\mathbf{f} = (\hat{\mathbf{B}}^T \hat{\mathbf{Q}} (\mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{r}(k)))$$

di mana  $\hat{\mathbf{u}}(k) = [\tilde{\mathbf{u}}(k|k), \tilde{\mathbf{u}}(k+1|k), \dots, \tilde{\mathbf{u}}(k+N_p-1|k)]$

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CA^2B} & \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CA^3B} & \mathbf{CA^2B} & \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA^{N_p-1}B} & \mathbf{CA^{N_p-2}B} & \mathbf{CA^{N_p-3}B} & \mathbf{CA^{N_p-4}B} & \dots & \mathbf{CB} \end{bmatrix}_{N_p \times N_p}$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA^2} \\ \mathbf{CA^3} \\ \vdots \\ \mathbf{CA^{N_p}} \end{bmatrix}_{N_p \times 1}$$

$$\hat{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{Q} \end{bmatrix}_{N_p \times N_p}$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{R} \end{bmatrix}_{N_p \times N_p}$$

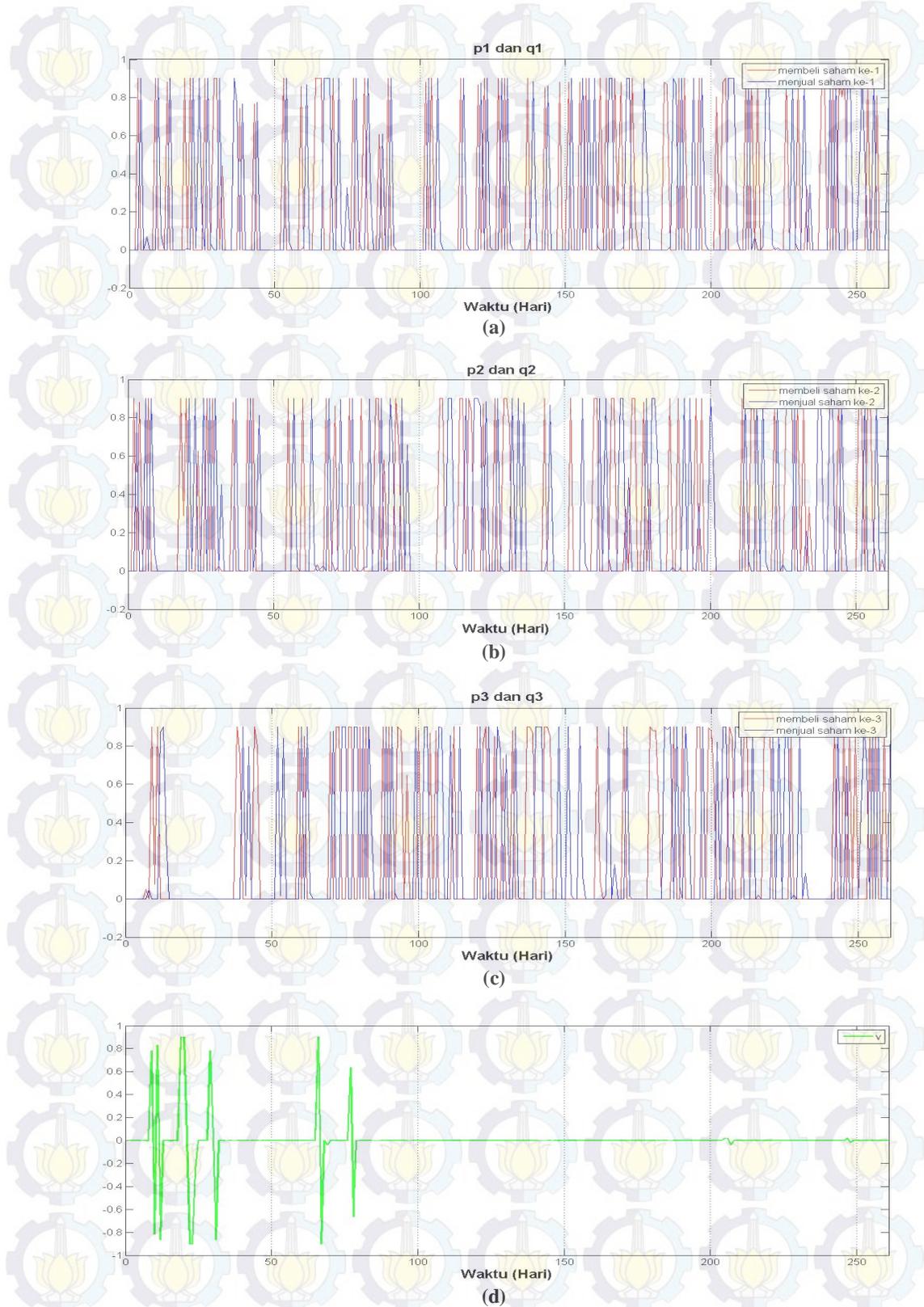
## 2.4 Simulasi Numerik

Berdasarkan hasil analisis pengendali MPC yang telah dijelaskan di atas, selanjutnya akan dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* MATLAB. Data yang digunakan adalah data 3 perusahaan (Unilever, Perusahaan Gas Negara, dan Semen Indonesia) yang tergabung dalam *Jakarta Islamic Index* (JII) mulai tanggal 3 juni 2013 sampai dengan tanggal 31 Mei 2014. Pada simulasi ini diberikan beberapa nilai parameter yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

TABEL 1 Nilai parameter.

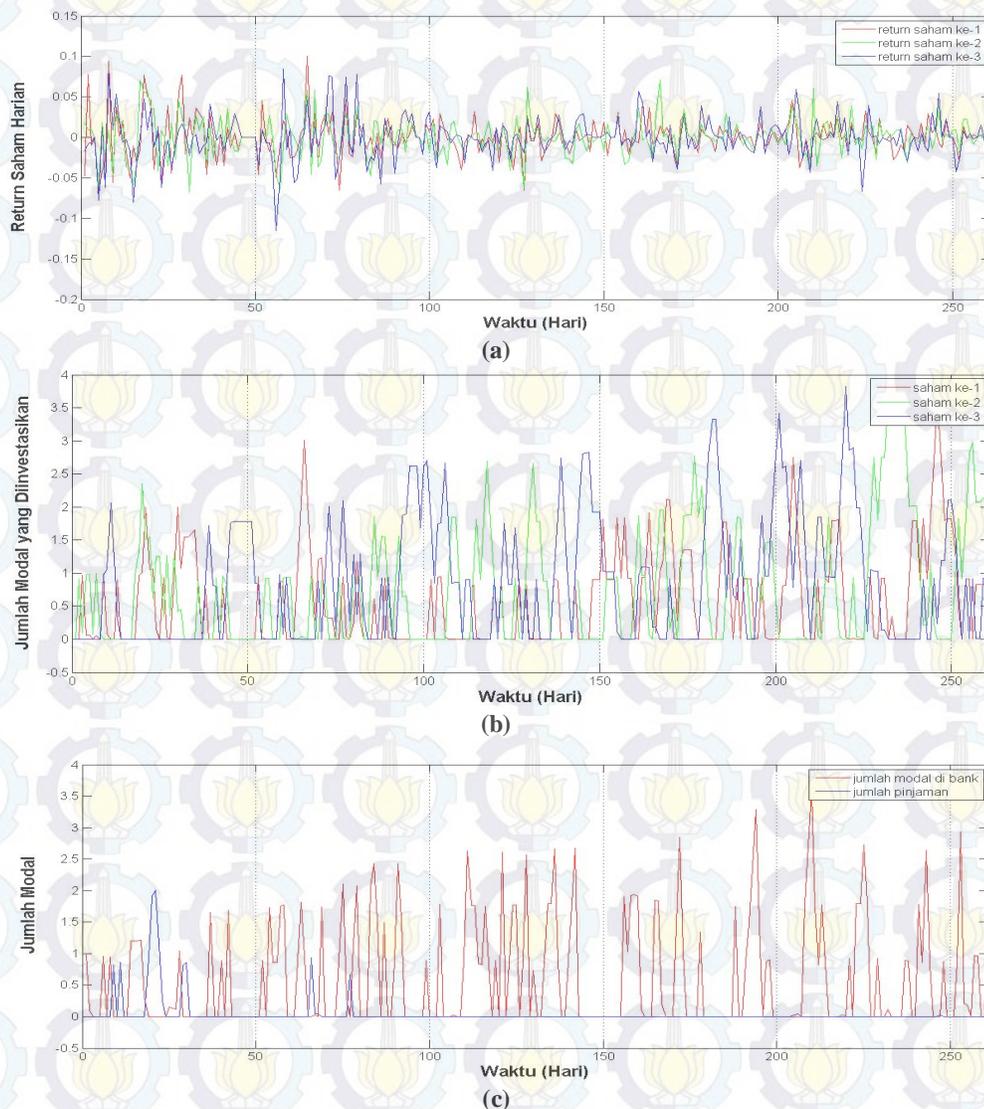
| Variabel        | Nilai       |
|-----------------|-------------|
| $\alpha$        | 0,01        |
| $\beta$         | 0,01        |
| $r_1$           | 0,001       |
| $r_2$           | 0,004       |
| $d_0(k)$        | 3           |
| $d_1(k)$        | 0           |
| $\mathbf{x}(0)$ | [0 0 0 1 0] |
| $N_p$           | 10          |
| $Q$             | 1           |
| $R$             | 0,1         |
| $r(k)$          | 10          |
| $p_i \max$      | 0,9         |
| $q_i \max$      | 0,9         |
| $v(k) \max$     | 0,9         |
| $v(k) \min$     | -0,9        |

Pada kondisi awal, diasumsikan bahwa seluruh modal investor diinvestasikan ke dalam aset bebas risiko (bank). Hasil simulasi pada kontrol dari sistem dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 2 Kontrol Pada Sistem : (a)  $p_1$  dan  $q_1$ , (b)  $p_2$  dan  $q_2$ , (c)  $p_3$  dan  $q_3$ , (d)  $v$ .

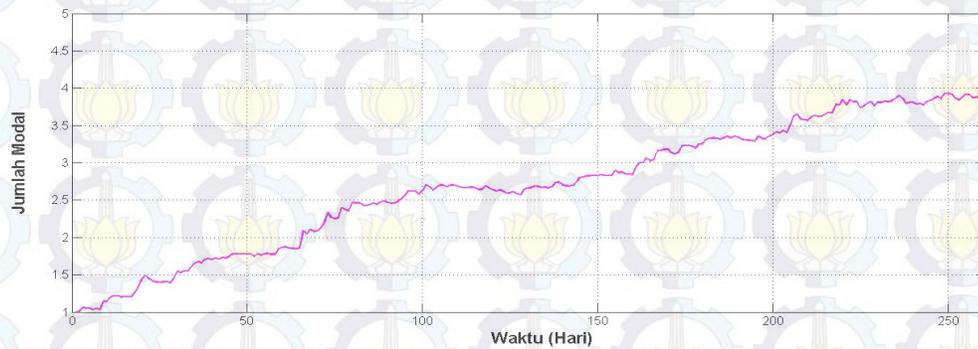
Berdasarkan Gambar 2 diketahui bahwa seluruh kontrol dari sistem berada dalam batas *constraint* yang diberikan. Pada  $p_i$  maupun  $q_i$ , seluruh nilainya berada diantara nilai minimumnya yaitu 0, dan nilai maksimumnya yaitu 0,9. Hal ini menunjukkan bahwa *controller* dari sistem berusaha untuk mendapatkan performansi terbaik pada sistem tersebut. Gambar 2(d) menunjukkan transfer antara jumlah modal yang dimiliki oleh investor di bank dan jumlah dana yang dipinjam oleh investor. Nilai positif pada  $v(k)$  menunjukkan bahwa investor mendapatkan pinjaman modal yang dapat digunakan untuk membeli saham. Sedangkan nilai negatif pada  $v(k)$  menunjukkan bahwa investor membayarkan kembali modal yang telah ia pinjam sebelumnya. Gambar 3 di bawah ini menunjukkan data *return* saham harian dari ketiga perusahaan, dan perubahan modal yang dimiliki oleh investor pada masing-masing aset di saham, bank, serta pada pinjaman.



**Gambar 3** (a)Return Saham Harian (b)Perubahan Modal yang Dimiliki Investor Pada Masing-Masing Saham (c)Perubahan Modal yang Dimiliki Investor di Bank dan Pinjaman

Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa nilai *return* saham harian berpengaruh terhadap jumlah modal yang diinvestasikan pada masing-masing saham setiap harinya. Pengontrol MPC berusaha untuk mengurangi kerugian yang akan dialami oleh investor ketika harga saham pada salah satu perusahaan mengalami penurunan. Berdasarkan Gambar 3(c) terlihat bahwa perubahan pada aset bebas risiko dan jumlah pinjaman memiliki korelasi yang sangat besar. Pengontrol MPC bertindak sebagai pengambil keputusan mengenai kapan waktu yang tepat untuk meminjam modal dan kapan waktu yang tepat untuk mengembalikan modal. Ketika jumlah uang di bank akan mencapai 0, maka pengontrol MPC akan memutuskan untuk meminjam sejumlah uang agar dapat menutupi seluruh biaya transaksi yang digunakan untuk membentuk portofolio saham.

Jumlah modal yang dimiliki oleh investor pada seluruh asetnya dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4 Jumlah Modal yang Dimiliki Investor

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat bahwa modal yang dimiliki oleh investor pada seluruh asetnya mengalami kenaikan. Pada kondisi awal jumlah modal yang dimiliki investor adalah 1, dan pada kondisi akhir jumlah modal yang dimiliki investor adalah 3,91. Kenaikan ini terjadi karena jumlah modal yang diinvestasikan pada portofolio saham berusaha untuk mencapai *reference trajectory* yang ditetapkan sebelumnya, yaitu 10. Pada beberapa hari terlihat bahwa modal investor mengalami penurunan, hal ini terjadi karena pada hari tersebut *return* dari seluruh saham bernilai negatif, sehingga investor mengalami kerugian. Akan tetapi, kerugian ini dapat ditutupi oleh keuntungan di beberapa hari berikutnya, sehingga secara keseluruhan jumlah modal investor mengalami kenaikan.

### 3 Kesimpulan

Pengendali *Model Predictive Control* pada Manajemen Portofolio Saham terbukti dapat diterapkan dengan baik. MPC dapat memberikan nilai kontrol yang optimal dengan adanya kendala pada *state* dan kontrol pada sistem. Seluruh nilai kontrol berada pada batasan *constraint* yang diberikan. Jumlah modal yang dimiliki oleh investor yang merupakan *output* dari sistem mengalami kenaikan, karena berusaha untuk mencapai *reference trajectory* yang diberikan. Pada kondisi akhir jumlah modal yang dimiliki oleh investor naik 3,91 kali lipat dari kondisi awal.

#### 4 Daftar Pustaka

- [1] Halim, A. 2003. **Analisis Investasi**. Jakarta: Salemba Empat.
- [2] Markowitz, H. 1952. *Portfolio Selection*. Journal of Finance, Vol. 7, No. 1, Hal. 77-91.
- [3] Primbs, J.A. 2007. *Portfolio Optimization Applications of Stochastic Receding Horizon Control*. Proceedings of the 2007 American Control Conference, Hal. 1811- 1816.
- [4] Dombrovsky, V. & Lashenko, E.A. 2003. *Dynamic Model of Active Portfolio Management With Stochastic Volatility in Incomplete Market*. SICE 2003 Annual Conference, Vol. 1, Hal. 516 – 521
- [5] Syaifudin, W.H. 2013. **Penerapan Model Predictive Control Pada Kendali Haluan Kapal**. Tugas Akhir, Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6] Bordons, C. & Camacho, E. F. 1999. **Model Predictive Control**. Sevilla: Springer-Verlag London Limited.
- [7] Yuninda, N.H. 2008. **Simulasi Pengendalian Kadar Glukosa Penderita Diabetes Mellitus Tipe 1 Berbasis Metode Aktif Set Model Predictive Control (MPC) Dengan Constraints**. Tesis S2, Program Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik, Prodi Teknik Elektro, UI.
- [8] Wang, L. 2009. *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB*. Melbourne: Springer