

Teknik Dua Paras Terimbu untuk Kawalan Optimum Penyesuaian Keadaan Pegun Proses Tunggal

Andrew Yap Kian Chung¹ dan Marzuki Mustafa²

¹Unit Pengilangan dan Pemprosesan, MPOB
No.6 Persiaran Institusi, Bandar Baru Bangi,
43000 Kajang, Selangor

²Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik dan Sistem,
Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 Bangi, Selangor

Received Date: 13 April 2006 Accepted Date: 7 Februari 2006

ABSTRAK

Teknik dua paras terimbu merupakan kembangan daripada kaedah dua paras untuk meluaskan lagi penggunaan algoritma ini kepada masalah tidak cembung di samping mempercepatkan penumpuan kepada masalah cembung tertentu. Dari sudut struktur algoritma, teknik dua paras terimbu boleh dianggap sebagai satu jemahan kaedah dua langkah terubahsuai. Hanya yang berbeza adalah dari segi pengiraan nilai pekali Lagrange, λ , yang tidak memerlukan terbitan keluaran proses sebenar terhadap titik set kawalan. Walaupun terdapat peningkatan kos pengiraan komputer secara luar talian, kelebihan kaedah ini ialah pekali Lagrange, λ , yang ditentukan oleh paras atasan menggunakan kaedah arah tasrifan Powell yang tidak perlu mengganggu proses. Oleh yang sedemikian, teknik dua paras terimbu sesuai digunakan pada sistem yang dicemari oleh bising dan masalah kawalan dengan kekangan ketaksamaan, $G(c, y)$ yang tidak boleh dibezakan terhadap y . Manakala kaedah dua langkah terubahsuai akan menghadapi kesukaran dalam memerlukan $G_y(c, y)$ untuk mengira pekali Lagrange, λ . Keputusan simulasi menunjukkan gandingan antara pekali Lagrange sebutan kuasa dua, ρ , dan pekali kemaskini, ε , yang sesuai dapat menyelesaikan masalah tidak cembung dan mengurangkan penukaran titik set kawalan optimum dengan ketara bagi masalah cembung yang tertentu. Pekali kemaskini, ε , di antara 0.9 hingga 1.5 adalah bersesuaian bagi kebanyakan kes kajian.

Kata kunci: Dua paras terimbu, pekali Lagrange, kaedah arah tasrifan Powell, kaedah dua langkah terubahsuai, pekali kemaskini

ABSTRACT

Augmented two level technique is an extension of the previous two level method which could widen the application of the algorithm to non-convex problems while at the same time improving the convergent of certain convex problems. From the view point of algorithm's structure, the augmented two level technique may be considered as an equivalent version of the modified two step method, except the difference in calculating the Lagrange multipliers, λ , without using any derivation on process output with respect to the set point. Even though the off-line computer calculation cost may increase, the advantage of this method is the Lagrange multipliers, λ , are determined by supremal level using Powell Conjugate Direction method without disturbing

the process. Thus the augmented two level technique can be applied onto systems contaminated by noise and control problems with undifferentiable inequality constraints $G(c, y)$ respect to y . Whereas modified two step method will encounter difficulties due to the need of $G'_y(c, y)$ to determine the Lagrange multipliers, λ . Simulation results show that appropriate combination value between Lagrange multipliers for square terms, ρ , and update coefficient ε , can solve non-convex problem and reduce optimal set points changes significantly for certain convex problems. Update coefficient, ε , between 0.9 and 1.5 is appropriate for most studied cases.

Keywords: Augmented two level, Lagrange multipliers, Powell Conjugate Direction method, modified two step method, update coefficient

PENGENALAN

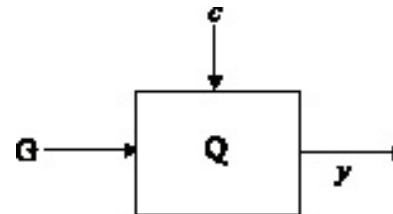
Sistem kawalan bagi proses industri yang menggunakan titik set kawalan yang optimum biasanya terdiri daripada dua lapisan iaitu lapisan kawalan susulan dan lapisan kawalan penyeliaan. Lapisan kawalan susulan bertujuan mengekalkan pemboleh ubah proses tertentu pada titik set yang dikehendaki walaupun proses terdedah kepada gangguan tindakan pantas manakala lapisan kawalan penyeliaan bertujuan menentukan dan mengekalkan nilai optimum bagi titik set di bawah gangguan proses perubahan perlahan (Brdy & Roberts 1986). Struktur kawalan yang dikaji mengandaikan bahawa sistem kawalan susulan yang cekap telah direka bentuk dan sedia diperoleh.

Dalam reka bentuk dan pengendalian loji kimia, pengoptimuman proses dapat memperbaiki kedudukan ekonomi proses berkenaan (Edgar & Himmelblau 1988). Penentuan titik kawalan optimum pada lapisan penyeliaan bagi sesuatu sistem terkawal merupakan suatu masalah pengoptimuman berkekangan. Walau bagaimanapun persamaan pemetaan masukan-keluaran sebenar sistem sukar didapati secara amali. Penggunaan persamaan model hampiran memberikan suatu penyelesaian pada titik set yang suboptimum. Kajian berdasarkan pendekatan struktur kawalan berhirarki telah digunakan untuk memperoleh titik set optimum (Mesarovic *et al.* 1970). Teknik Dua Langkah telah dibuktikan gagal memberikan penyelesaian optimum sebenar (Durbeck 1965) lalu dikembangkan menjadi teknik Dua Langkah Terubahsuai (Roberts 1979). Kelemahan kaedah pengoptimuman ini adalah ia perlu mengganggu sistem terlalu kerap untuk memperoleh maklumat terbitan keluaran yang diperlukan untuk mengira pekali Lagrange, λ pada setiap penukaran titik set. Kaedah Dua Paras telah diperkenalkan bagi mengatasi kelemahan ini (Chen & Roberts

1984) dan beberapa masalah cembung telah dikaji dan diuji dengan menggunakan struktur kawalan ini berdasarkan fungsi Lagragian biasa. Dalam kajian ini, struktur kawalan tersebut kini dikembangkan dengan menggunakan fungsi Lagragian terimbuh untuk menyelesaikan masalah tidak cembung dan mempercepatkan penumpuan masalah cembung yang tertentu.

LATAR BELAKANG TEORI

Pertimbangkan suatu sistem tunggal adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.



RAJAH 1. Sistem Kawalan Mudah

Dalam rajah ini, c adalah titik set kawalan proses, G adalah kekangan yang bertindak, y adalah keluaran sebenar dan Q adalah indeks pencapaian proses.

Masalah penentuan titik pengendalian optimum keadaan pegun bagi suatu proses industri boleh dirumuskan secara matematik dalam bentuk berikut:

$$\begin{aligned} & \min_{c, y} Q(c, y) \\ & \text{tertakluk kepada} \\ & y = F^*(c) \\ & (c, y) \in CY \triangleq \{(c, y) : G(c, y) \leq 0\} \end{aligned} \quad (1)$$

dengan $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T \in R^n$ merupakan titik kawalan proses, Q adalah indeks pencapaian, y adalah persamaan keluaran sebenar dan G adalah kekangan tak kesamaan tempatan.

Diandaikan pemetaan masukan-keluaran $F^*(c)$ tidak diketahui dengan tepat tetapi hanya model hampiran $F(c, \alpha)$, dengan α adalah parameter penganggaran model proses, diperoleh. Dengan memperkenalkan satu pembolehubah baru, v , masalah kawalan optimum (1) boleh dirumuskan dalam bentuk

$$\begin{aligned} & \min_{c, v, \alpha} q(c, \alpha) \\ & \text{tertakluk kepada} \\ & F(v, \alpha) = F^*(v) \\ & g(c, \alpha) \leq 0 \\ & v = c \end{aligned} \tag{2}$$

dengan $q(c, \alpha) = Q(c, y)$ dan $g(c, \alpha) = G(c, y)$. Fungsi Lagrangian terimbuh bagi masalah kawalan optimum (2) di atas, $L_a(\cdot) = L_a(c, v, \alpha, \lambda, \mu, \rho_1, \rho_2, \xi)$ adalah

$$L_a(\cdot) = q(c, \alpha) + \lambda^T(v - c) + \mu^T[F^*(v) - F(v, \alpha)] + \rho_1 \|v - c\|^2 + \rho_2 \|F^*(v) - F(v, \alpha)\|^2 + \tau(c, \alpha, \xi)$$

di sini

$$\tau(c, \alpha, \xi) \triangleq 0.5 \sum_{j=1}^p \rho_{2+j} ((\max(0, g_j(c, \alpha) + [\xi_j / \rho_{2+j}]))^2 - [\xi_j / \rho_{2+j}]^2)$$

dengan $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{p+2})^T$; $\rho_j > 0$ untuk setiap $j = 1, 2, \dots, (p + 2)$

dan λ, μ, ξ adalah vektor pekali Lagrange. Analisis keadaan perlu Kuhn-Tucker menghasilkan

$$\begin{aligned} \nabla_c L_a(\cdot) &= q'_c(c, \alpha) - \lambda - 2\rho_1(v - c) + \tau'_c(c, \alpha, \xi) \\ &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \nabla_v L_a(\cdot) &= \lambda + \mu[F^*(v) - F'_v(v, \alpha)] + 2\rho_1(v - c) + 2\rho_2[F^*(v) - F'_v(v, \alpha)] [F^*(v) - F(v, \alpha)] \\ &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \nabla_\alpha L_a(\cdot) &= q'_\alpha(c, \alpha) - \mu F'_\alpha(v, \alpha) - 2\rho_2 F'_\alpha(v, \alpha) [F^*(v) - F(v, \alpha)] + \tau'_\alpha(c, \alpha, \xi) = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\nabla_\lambda L_a(\cdot) = v - c = 0 \tag{7}$$

$$\nabla_\mu L_a(\cdot) = F^*(v) - F(v, \alpha) = 0 \tag{8}$$

$$\nabla_\xi L_a(\cdot) = \tau'_\xi(c, \alpha, \xi) = 0 \tag{9}$$

Penyelesaian persamaan serentak (4) hingga (9) di atas pada suatu nilai v, ξ dan α yang diberi, merumuskan masalah kawalan optimum sebagai

$$\min_c [q(c, \alpha) - \lambda^T c + \rho_1 \|v - c\|^2]$$

tertakluk kepada $g(c, \alpha) \leq 0$ (10)

dengan $\alpha \in A \triangleq \{\alpha \in R^m : \exists c \in C, F(c, \alpha) = F^*(c) \text{ dan } G(c, F(c, \alpha)) \leq 0\}$. Andaikan penyelesaian bagi masalah paras bawahan adalah $\hat{c}(\lambda)$ supaya

$$\hat{c}(\lambda) = v \tag{11}$$

Dalam struktur kawalan berhirarki dua paras terimbuh, λ dipertimbangkan sebagai suatu parameter pembolehubah yang dioptimumkan pada paras hierarki atasan dengan menggunakan kaedah arah tasrifan Powell agar (Brdys & Roberts 1986)

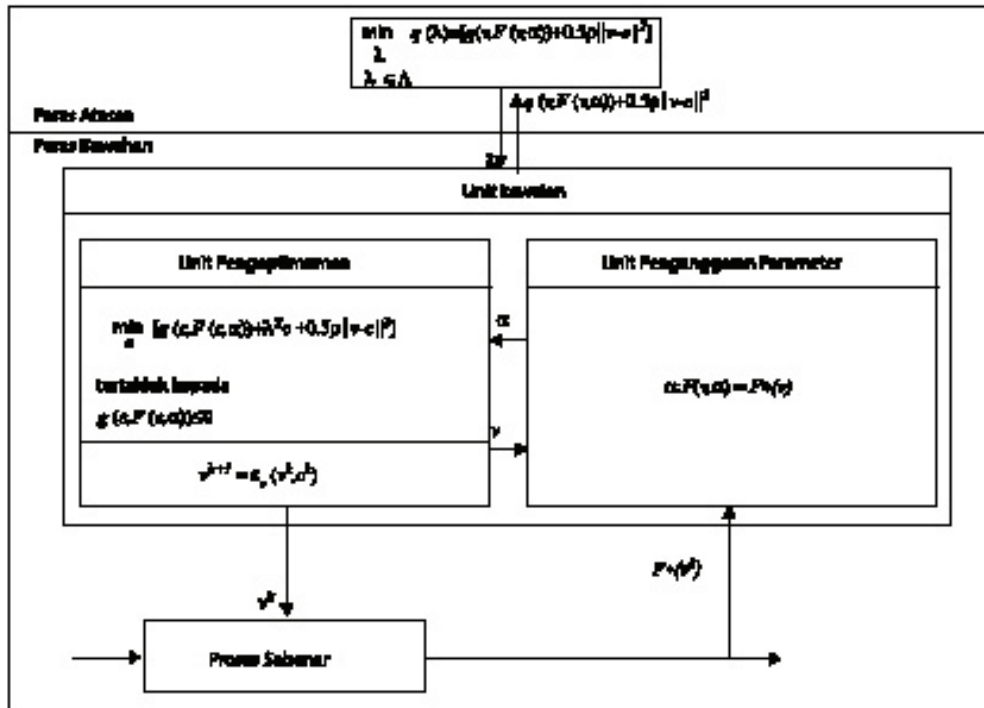
$$\lambda_{\text{opt}} = \arg \min q_f(\lambda) \tag{12}$$

dengan $q_f(\lambda) = [Q(\hat{c}(\lambda), F(\hat{c}(\lambda), \alpha(\hat{c}(\lambda)))) + 0.5\rho \|v - c\|^2]$. Hubungan fungsi $q_f(\lambda)$ tidak diketahui dengan tepat dan mungkin tidak dapat dibezakan. Diketahui bahawa λ_{opt} adalah tidak unik (Chen & Roberts 1984). Oleh itu syarat berhenti algoritma bagi paras atasan harus berdasarkan kepada fungsi pencapaian. Rajah 2 menunjukkan struktur kawalan berhirarki dua paras terimbuh.

LANGKAH SIMULASI KOMPUTER BAGI TEKNIK DUA PARAS TERIMBUH

1. Algoritma dimulakan dengan suatu nilai awal v^0, λ^0 dan pekali kemas kini $\epsilon > 0$. Setkan $i = 0$ dan $k = 0$.
2. Nilai v^i digunakan pada proses sebenar dan keluarannya $F^*(v^i)$ diukur.
3. Satu nilai parameter α^i baru ditentukan dengan memadamkan keluaran model dan keluaran proses sebenar pada v^i , iaitu $\alpha^i = \alpha^i(v^i)$. Langkah ini dikenali sebagai penganggaran parameter.
4. Masalah kawalan optimum diselesaikan dengan $\alpha = \alpha^i$ dan $v = v^i$. Katakan $\hat{c}(\lambda^k) = c(v^i, \alpha^i)$ adalah penyelesaian.
5. Pembolehubah v dikemas kini mengikut persamaan 12(a).

$$v^{i+1} = v^i + \epsilon_v (\hat{c}(\lambda^k)^i - v^i) \tag{12(a)}$$
6. Jika $\hat{c}(\lambda^k)^i = v^i$, algoritma diteruskan ke langkah 7. Jika tidak, set $i \leftarrow i + 1$ dan kembali ke langkah 2.



RAJAH 2. Struktur Kawalan Dua Paras Terimbuh Bagi Sistem Tunggal

7. Nilai $q(\lambda^k) \triangleq q(\hat{c}(\lambda^k), \alpha)$ dikira. Jika nilai minimum $q(\lambda^k)$ tercapai, algoritma dihentikan. Jika tidak, nilai λ baru dikira dengan menggunakan kaedah arah tasrifan Powell. Setkan $i = 0; k \leftarrow k+1$ dan kembali ke langkah 2.

$$\begin{aligned}
 0.5c_3 + c_4 + 2c_5 &\leq 1 \\
 4c_3^2 + 2c_3y_1 + 0.4y_1 + c_3c_5 + 0.5c_5^2 + y_1^2 &\leq 4 \\
 0 &\leq c_7 \leq 1 \\
 c_6 + y_3 + 0.5 &\geq 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

Persamaan keluaran model hampiran diberikan dalam persamaan (15) berikut.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= c_1 - c_2 + 2y_2 + \alpha_1 \\
 y_2 &= c_3 - c_4 + y_1 - 3y_4 + \alpha_2 \\
 y_3 &= 2c_4 - c_5 - y_1 + y_4 + \alpha_3 \\
 y_4 &= c_6 + 2.5c_7 - 4y_3 + \alpha_4
 \end{aligned} \tag{15}$$

Persamaan keluaran sistem sebenar diandaikan adalah seperti dinyatakan dalam persamaan berikut demi tujuan kajian.

$$\begin{aligned}
 y_1^* &= 1.3c_1 - c_2 + 2y_2^* + 0.15y_2^*c_1 \\
 y_2^* &= c_3 - c_4 + 1.2y_1^* - 3y_4^* + 0.1c_4^2 \\
 y_3^* &= 2c_4 - 1.25c_5 - y_1^* + y_4^* + 0.25c_4c_5 + 0.1 \\
 y_4^* &= 0.8c_6 + 2.5c_7 - 4.2y_3^*
 \end{aligned} \tag{16}$$

Masalah kawalan kedua mempunyai fungsi objektif yang ditunjukkan dalam persamaan (17) tertakluk kepada kekangan setempat yang dinyatakan dalam persamaan (18). Persamaan keluaran hampiran sistem diberikan oleh persamaan (19) manakala persamaan (20) adalah keluaran sebenar sistem terkawal.

SIMULASI TEKNIK DUA PARAS TERIMBUH

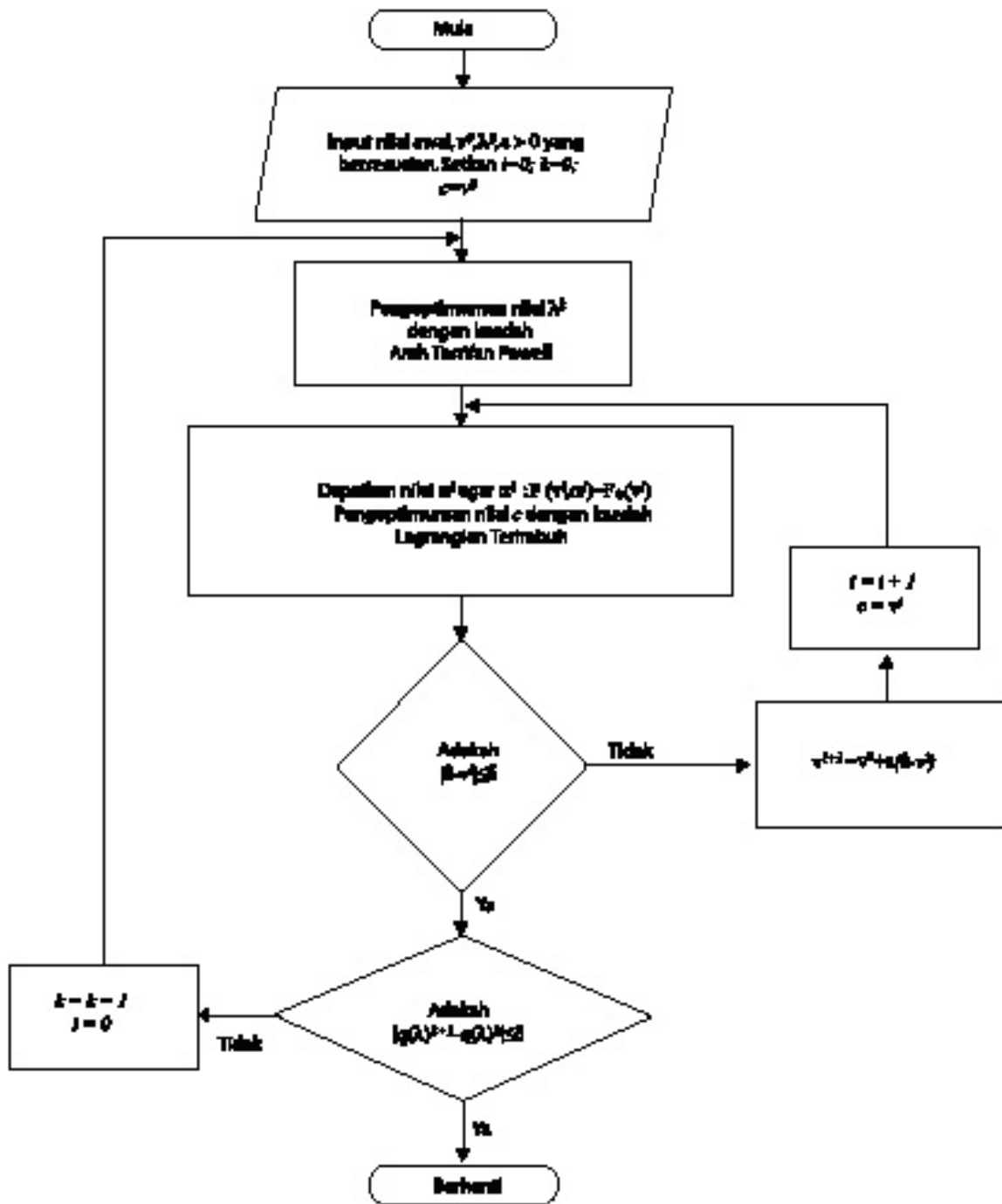
Empat masalah kawalan yang tipikal proses loji kimia telah digunakan untuk kajian simulasi teknik dua paras terimbuh. Tiga daripada empat masalah berkenaan diambil daripada Chen dan Robert (1984). Dalam masalah kawalan pertama, suatu sistem terkawal yang terdiri daripada tiga subsistem seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4. Persamaan indeks pencapaian bagi subsistem masing-masing diberikan dalam persamaan (13).

Masalah 1

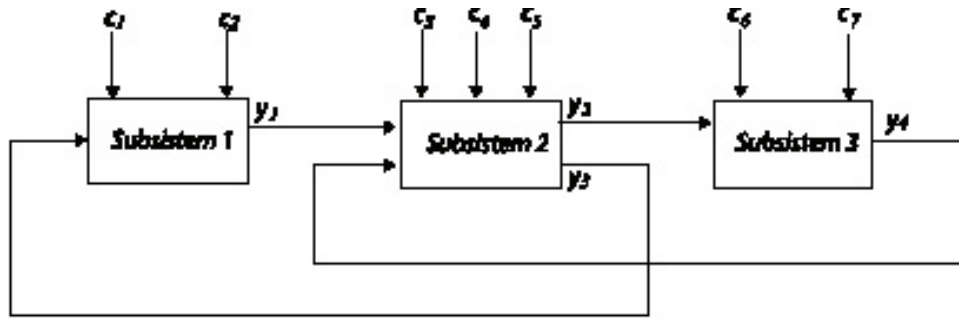
$$\begin{aligned}
 Q_1(c, y) &= (y_2 - 1)^4 + 5(c_1 + c_2 - 2)^2 \\
 Q_2(c, y) &= 4y_1^2 + y_4^2 + 2(c_3 - 2)^2 + c_4^2 + 3c_5^2 \\
 Q_3(c, y) &= (y_3 - 1)^2 + (c_6 + 1)^2 + 2.5c_7^2
 \end{aligned} \tag{13}$$

Kekangan setempat sistem terkawal ditunjukkan dalam persamaan (14).

$$\begin{aligned}
 c_1^2 + c_2^2 &\leq 1 \\
 0 &\leq y_2 \leq 0.5
 \end{aligned}$$



RAJAH 3. Carta Alir Teknik Dua Paras Terimbuhan



RAJAH 4. Sistem Terkawal Dengan Tiga Subsystem

Masalah 2

$$Q(c,y) = c_1^2 + (c_2-2)^2 + 2(c_3-2)^2 + c_4^2 + 3c_5^2 + (c_6+1)^2 + 4y_1^2 + (y_2-1)^2 + (y_3-1)^2 + y_4^2 \quad (17)$$

$$1.006 - c_1 - y_2 \geq 0$$

$$0.375 + 2.25c_6 - 2.75y_3 - y_4 \geq 0$$

$$|c_i| \leq 0.5 ; i = 1, 4, 5, 6.$$

$$0 \leq c_2 \leq 2.5$$

$$0 \leq c_3 \leq 2 \quad (18)$$

$$y_1 = 1.4375c_1 - 0.1875c_2 + 1.5y_2 + \alpha_1$$

$$y_2 = 0.5c_3 - 1.5c_4 + y_1 - 2y_4 + \alpha_2$$

$$y_3 = 2.5c_4 - 0.5c_5 - y_1 + 1.5y_4 + \alpha_3$$

$$y_4 = 1.25c_6 - 3y_3 + \alpha_4 \quad (19)$$

$$y_1^* = c_1 - c_2 + 2y_2^* - 0.5c_1^2 + 0.5(c_1 + c_2 - 2)y_2^*$$

$$y_2^* = c_3 - c_4 + y_1^* - 3y_4^*$$

$$y_3^* = 2c_4 - c_5 - y_1^* + y_4^*$$

$$y_4^* = c_6 - 4y_3^* + 0.5c_6 y_3^* \quad (20)$$

Masalah kawalan ketiga mempunyai fungsi objektif yang ditunjukkan dalam persamaan (21) tertakluk kepada kekangan setempat yang dinyatakan dalam persamaan (22). Persamaan keluaran hampiran sistem diberikan oleh persamaan (23) manakala persamaan (24) adalah keluaran sebenar sistem terkawal.

Masalah 3

$$Q(c,y) = c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 + c_4^2 + c_5^2 + (y_1 - 1)^2 + 2(y_2 - 2)^2 + (y_3 - 3)^2 \quad (21)$$

$$|c_i| \leq 1 ; i = 1, 2, 3, 4, 5.$$

$$y_i \geq 0 ; i = 1, 2, 3.$$

$$0.8 - c_2 - 0.6y_2 \geq 0$$

$$2.04 + 1.05y_1 - c_3^2 - c_4^2 - c_5^2 \geq 0 \quad (22)$$

$$y_1 = c_1 - c_2 + 2y_2 + \alpha_1$$

$$y_2 = c_3 - c_4 + y_1 + \alpha_2$$

$$y_3 = 2c_4 - c_5 - y_1 + \alpha_3 \quad (23)$$

$$y_1^* = 1.4c_1 - 0.6c_2 + 1.8y_2^*$$

$$y_2^* = 1.3c_3 - 1.1c_4 + 1.1y_1^*$$

$$y_3^* = 2.3c_4 - 0.7c_5 - 1.1y_1^* \quad (24)$$

Masalah kawalan keempat mempunyai fungsi objektif yang tidak cembung seperti ditunjukkan dalam persamaan (25) tertakluk kepada kekangan setempat yang dinyatakan dalam persamaan (26). Persamaan keluaran hampiran sistem diberikan oleh persamaan (27) manakala persamaan (28) adalah keluaran sebenar sistem terkawal.

Masalah 4

$$Q(c,y) = 0.5(y_2-1)^2 - c_1^2 - c_2^2 - 0.5(y_1-2)^2 + c_3^2 + c_4^2 \quad (25)$$

$$c_1^2 + c_2^2 \leq 1$$

$$|c_i| \leq 1 ; i = 1, 2, 3, 4.$$

$$0 \leq y_2 \leq 0.5$$

$$0.5c_3 + c_4 \leq 1$$

$$|y_1| \leq 1 \quad (26)$$

$$y_1 = 1.7c_1 - 0.5c_2 + y_2 + \alpha_1$$

$$y_2 = 2.2c_3 - 0.2c_4 + 0.5y_1 + \alpha_2 \quad (27)$$

$$y_1^* = 2.0c_1 - c_2 + 0.6y_2^* + 0.15c_1 y_2^*$$

$$y_2^* = 2.2c_3 - 0.2c_4 + 0.9y_1 + 0.1c_3 c_4 \quad (28)$$

KEPUTUSAN SIMULASI

Kesan pekali terhadap kekerapan penukaran titik set bagi masalah pertama, kedua, ketiga dan keempat diberikan dalam Jadual 1, 2, 3 dan 4 masing-masing. Keputusan simulasi ini diplotkan dalam Rajah 5, 6, 7 dan 8.

JADUAL 1. Kesan Pekali Terhadap Kekerapan Penukaran Titik Set bagi Masalah 1

ϵ	ρ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.0
0.3		1399	1417	1455	1463	1498	1505	1558	1613	1620
0.5		852	901	1086	892	1238	919	1110	959	991
0.7		573	726	745	614	891	641	662	256	996
0.9		437	612	403	445	603	451	521	526	532
1.0		405	543	546	352	574	280	444	473	485
1.1		441	606	633	258	591	409	416	419	479
1.2		520	722	753	513	677	478	475	443	472
1.5		876	883	1150	791	1112	748	705	683	662

JADUAL 2. Kesan Pekali Terhadap Kekerapan Penukaran Titik Set bagi Masalah 2

ϵ	ρ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.0
0.3		1271	1289	1297	1301	1466	1679	2566	1618	2764
0.5		745	886	893	807	1353	1512	1918	1282	2010
0.7		525	650	802	609	1193	1356	1390	1197	1453
0.9		400	485	443	446	1053	1036	1113	1094	1158
1.0		357	411	389	382	894	433	1005	1019	1009
1.1		352	329	381	360	844	370	873	912	908
1.2		616	518	376	806	563	648	401	823	1044
1.5		1438	1004	506	1307	1018	924	896	514	1213

JADUAL 3. Kesan Pekali Terhadap Kekerapan Penukaran Titik Set bagi Masalah 3

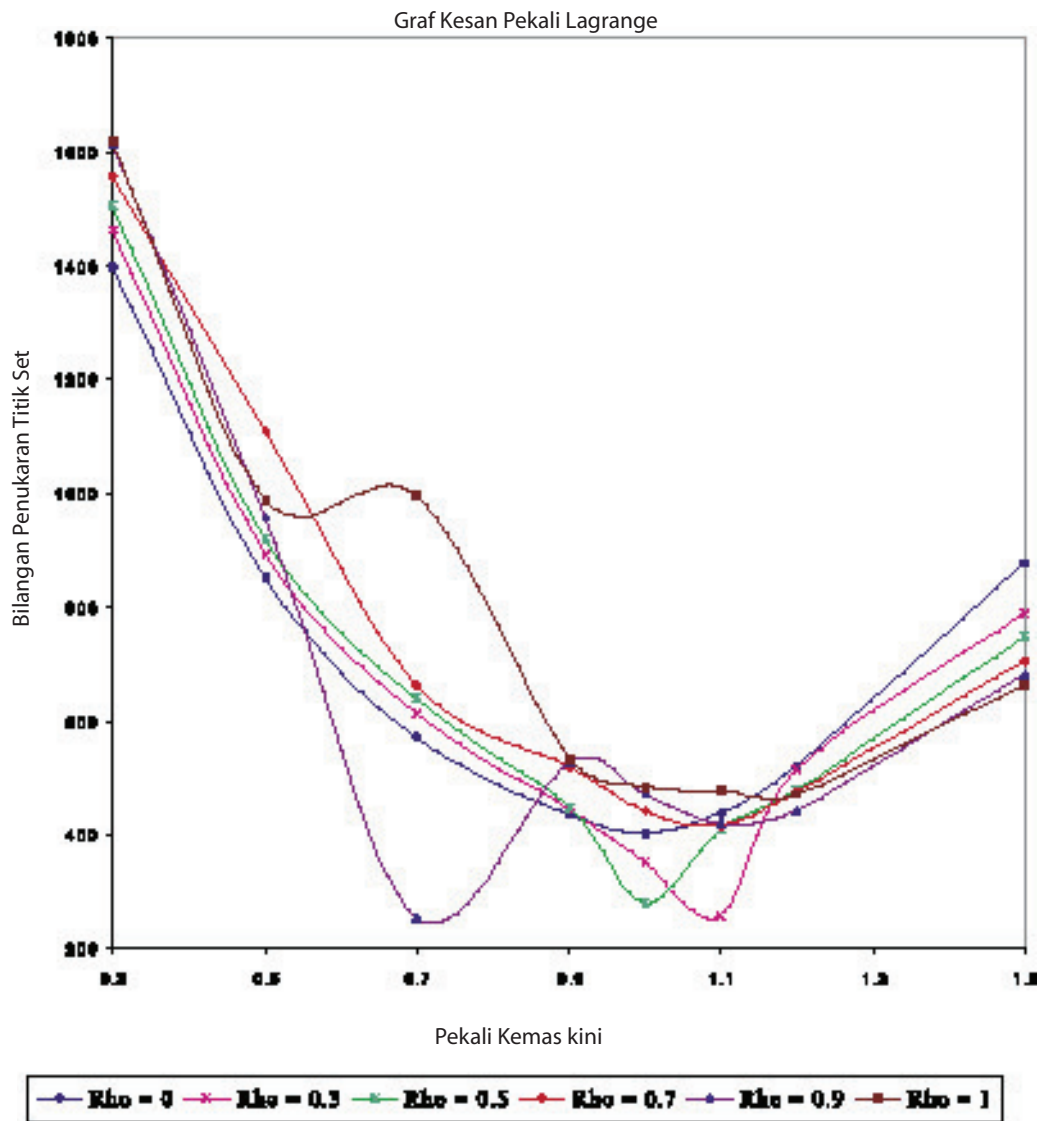
ϵ	ρ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.0
0.3		1610	1599	1319	1100	1115	3800	1803	1810	1786
0.5		929	900	916	904	976	2674	1046	1120	1106
0.7		695	771	738	752	741	1350	764	800	815
0.9		533	545	556	576	590	571	591	643	664
1.0		501	511	518	514	303	530	525	567	586
1.1		300	477	449	468	486	464	517	543	527
1.2		414	413	428	457	439	439	456	471	498
1.5		430	461	403	412	419	378	401	416	429
1.6		498	588	500	503	529	486	493	507	505

JADUAL 4. Kesan Pekali Terhadap Kekerapan Penukaran Titik Set bagi Masalah 4

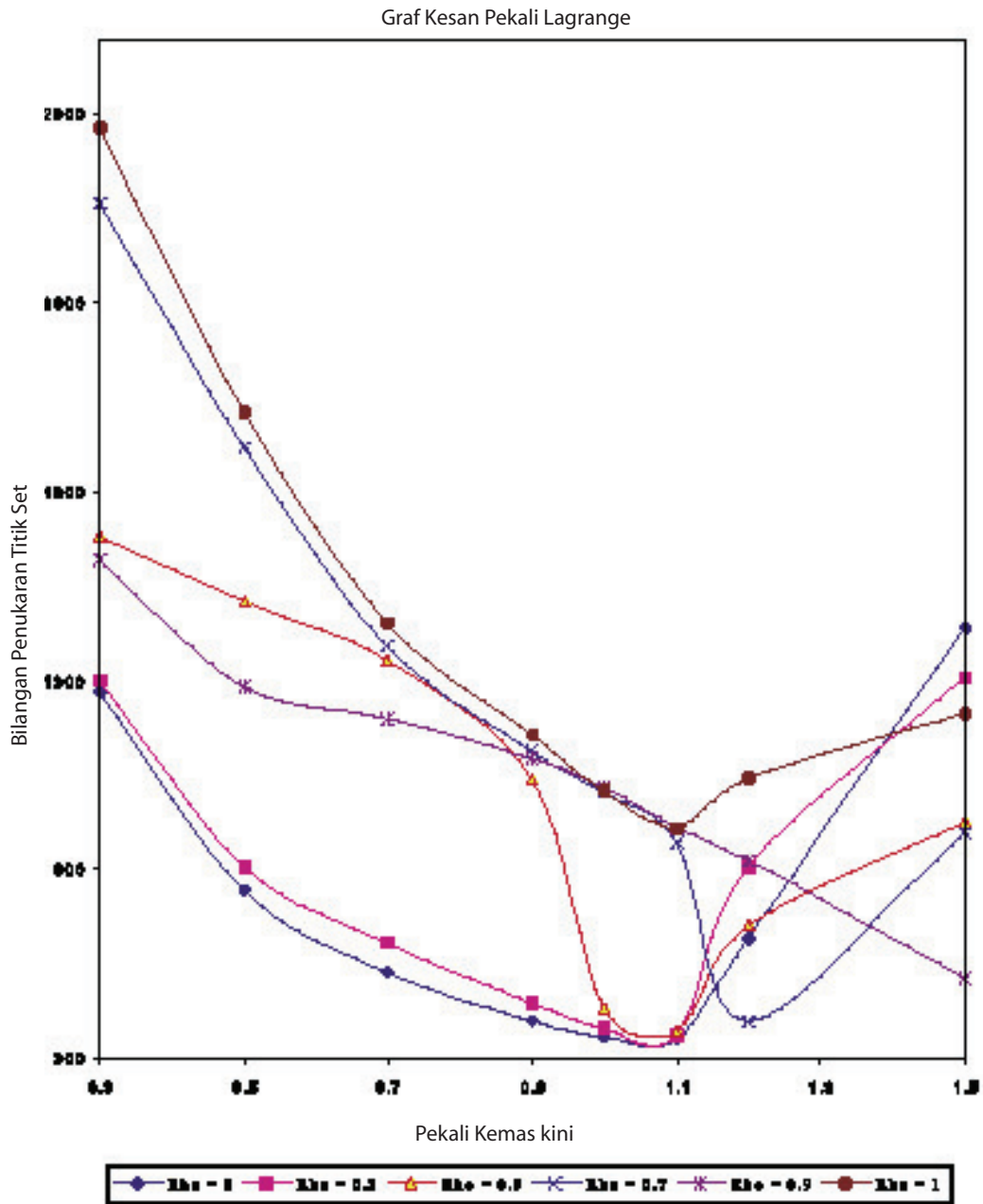
ϵ	ρ	0	1000	1500	2000	2500	3000
0.3		Tidak Menumpu	1662	758	832	1312	1610
0.5		Tidak Menumpu	1625	635	791	1132	1497
0.7		Tidak Menumpu	1436	508	748	1011	1426
0.9		Tidak Menumpu	1255	469	570	863	1281
1.0		Tidak Menumpu	930	419	1017	540	985
1.1		Tidak Menumpu	699	325	1325	1109	751
1.2		Tidak Menumpu	601	455	1445	1502	703
1.5		Tidak Menumpu	1541	527	1564	661	1632

JADUAL 5. Nilai λ Pada Titik Optimum Bagi Masalah 1

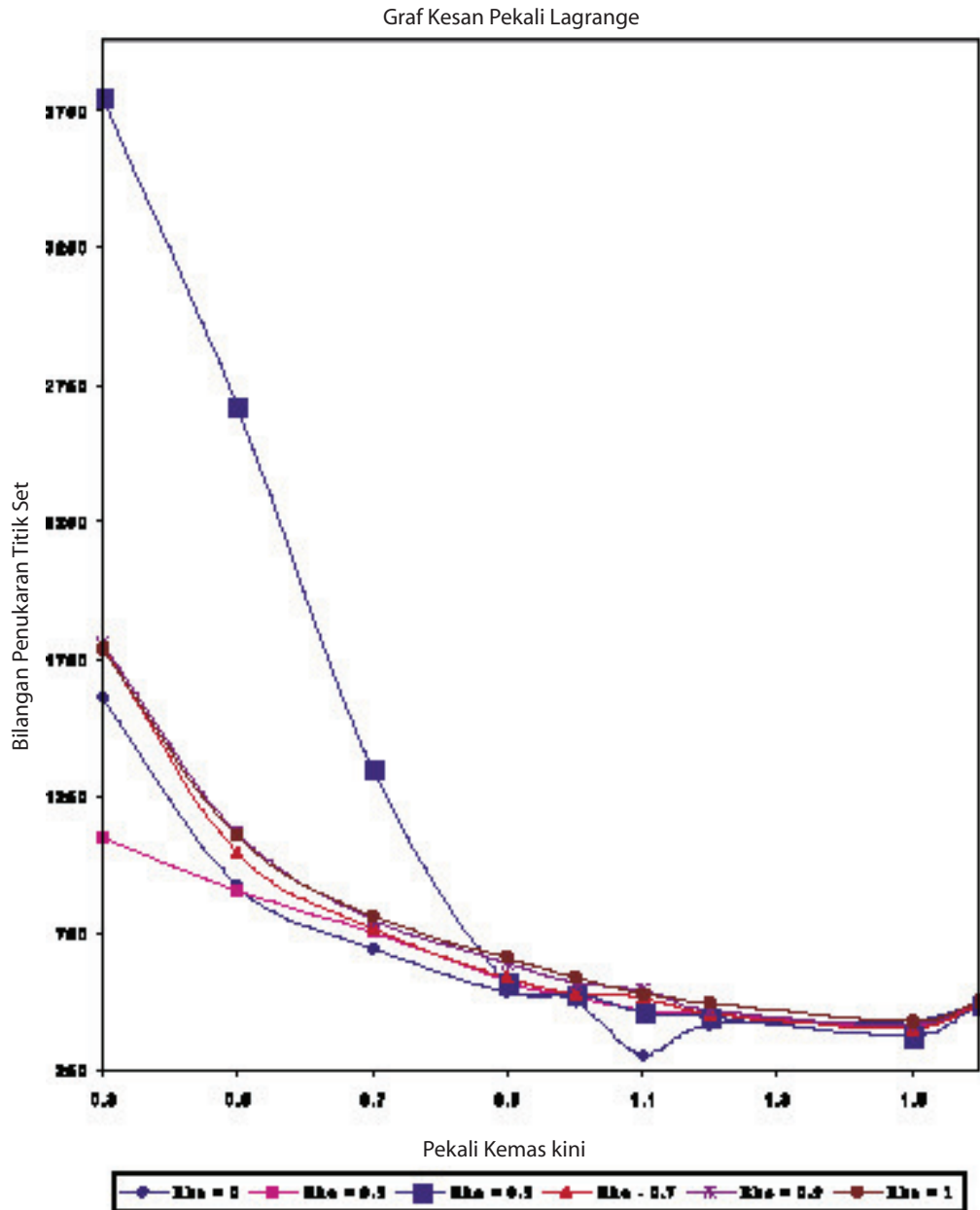
ρ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
0	0.019774	0.009130	1.244249	0.355051	0.560201	0.272723	0.619334
0.1	0.016804	0.025034	1.224901	0.454484	0.513295	0.313065	0.012750
0.2	0.028157	0.094215	1.203913	0.446679	0.502236	0.318543	0.016109
0.3	0.018513	0.007484	1.225183	0.495709	0.476289	0.300778	0.002238
0.4	-0.001808	0.020226	1.203788	0.459665	0.497197	0.311821	0.011726
0.5	0.000927	0.007350	1.222866	0.460733	0.499268	0.308756	0.008507
0.7	-0.018568	-0.039252	1.295542	0.480546	0.509918	0.307385	0.000984
0.9	-0.011797	0.024329	1.213382	0.455741	0.499789	0.315345	0.014052
1.0	0.014902	0.000001	1.358359	0.459326	0.517460	0.237565	-0.033167



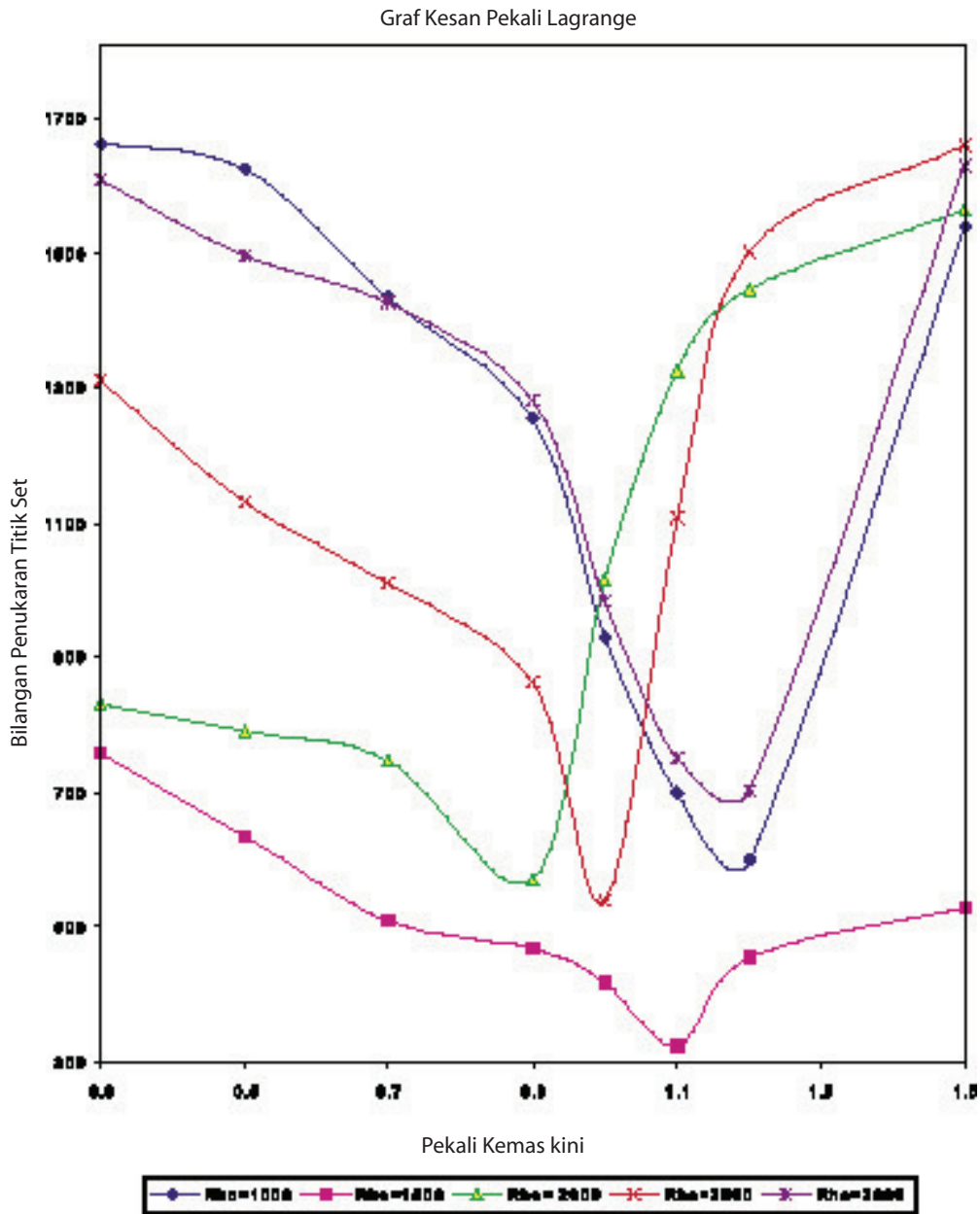
RAJAH 5. Graf Kesan Pekali Lagrange bagi Teknik Dua Paras Terimbuh Masalah 1



RAJAH 6. Graf Kesan Pekali Lagrange bagi Teknik Dua Paras Terimbuh Masalah 2



RAJAH 7. Graf Kesan Pekali Lagrange bagi Teknik Dua Paras Terimbuh Masalah 3



RAJAH 8. Graf Kesan Pekali Lagrange bagi Teknik Dua Paras Terimbuh Masalah 4.

JADUAL 6. Nilai λ Pada Titik Optimum Bagi Masalah 2

ρ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
0.0	-1.475148	-0.604741	0.605328	0.261761	1.284092	-0.536809
0.1	-1.693718	-0.135097	0.900584	0.338090	1.284872	-0.826348
0.2	-1.170121	-0.603011	0.601306	0.256757	1.295161	-0.532597
0.3	-1.673029	-0.600157	0.601572	0.257118	1.295552	-0.538039
0.4	-1.499354	-0.606476	0.600836	0.302629	1.286188	-0.546344
0.5	-0.618034	-0.612826	0.604976	0.254965	1.295528	-0.531188
0.7	-0.244142	-0.610846	0.607184	0.280276	1.288097	-0.539068
0.9	-0.386917	-0.609809	0.613848	0.274480	1.286098	-0.542666
1.0	1.833423	-0.674427	0.668257	0.385305	1.328464	-0.597258

JADUAL 7. Nilai λ Pada Titik Optimum Bagi Masalah 3

ρ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
0.0	0.878396	0.644115	7.570436	-0.536287	0.594915
0.1	0.889451	0.629614	7.679975	-0.670131	0.577296
0.2	0.875898	0.670591	2.601235	-0.638221	0.571306
0.3	0.866474	0.669952	7.170066	-0.083771	0.601387
0.4	0.872204	0.688271	2.940495	-0.228773	0.583243
0.5	0.878506	0.693033	1.618034	-0.627734	0.566680
0.7	0.871226	0.679960	2.754279	0.233416	0.587869
0.9	0.866099	0.685877	1.872045	-0.633952	0.583147
1.0	0.879238	0.659958	1.658992	-0.600830	0.587210

JADUAL 8. Nilai λ Pada Titik Optimum Bagi Masalah 4

ρ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
1000	7.312041	0.356815	0.382150	-0.002894
1500	5.145321	-3.549328	4.568894	-2.916417
2000	-0.035999	0.618034	2.648923	-0.163101
2500	-0.615313	1.046509	2.000000	3.400234
3000	1.978714	1.628568	-1.536161	-1.778837

JADUAL 9. Nilai Indeks Pencapaian Yang Optimum

Masalah Kawalan	Indeks Pencapaian Optimum	
	Sebenar	Dua Paras Terimbuh
1	6.326629	6.326642
2	2.140526	2.140517
3	5.926070	5.926133
4	-5.902517	-5.902508

Jadual 5, 6, 7 dan 8 masing-masing menunjukkan nilai pekali Lagrange, λ , bagi setiap pembolehubah kawalan dalam masalah kawalan pertama, kedua dan ketiga.

Nilai indeks pencapaian yang optimum bagi keempat-empat masalah kawalan diberikan dalam Jadual 9.

PERBINCANGAN

Teknik Dua Paras Terimbu adalah penerbitan daripada kaedah Dua Paras (Chen & Roberts 1984) berdasarkan fungsi Lagrangian terimbu. Nilai pekali Lagrange, λ , ditentukan oleh paras teratas menggunakan kaedah arah tasrifan Powell (Brdys & Roberts 1986). Kajian simulasi komputer telah dilakukan pada empat masalah tersebut di atas untuk mendapatkan pencapaian teknik dua paras terimbu untuk kawalan optimum dan penyesuaian keadaan pegun proses tunggal. Kesan pekali dendaan kuasa dua, ρ dan pekali kemas kini, ε , terhadap bilangan penukaran titik set juga dikaji dan ditentukan gandingan yang bersesuaian bagi setiap masalah simulasi.

Keputusan simulasi yang dalam Jadual 1 bagi masalah 1 menunjukkan bahawa penambahan sebutan dendaan kuasa dua dalam kaedah dua paras terimbu dapat mengurangkan kekerapan penukaran titik set dengan ketara berbanding kaedah dua paras biasa. Apabila Lagrangian biasa, iaitu $\rho = 0$ digunakan, bilangan penukaran titik set yang minimum didapati pada nilai pekali kemas kini, $\varepsilon = 1.0$, iaitu sebanyak 405 penukaran titik set. Dengan menggunakan imbuhan $\rho = 0.3$, bilangan penukaran titik set yang minimum iaitu sebanyak 258 penukaran titik set didapati pada $\varepsilon = 1.1$. Pengurangan penukaran titik set juga diperhatikan pada suatu nilai pekali kemas kini dengan imbuhan. Sebagai contoh, pada $\varepsilon = 1.0$, imbuhan $\rho = 0.5$ mengurangkan penukaran titik set sehingga 280 didapati. Begitu juga pada $\varepsilon = 0.9$, imbuhan $\rho = 0.2$ mengurangkan bilangan penukaran titik set sehingga 403 berbanding 437 menggunakan Lagrangian biasa tanpa imbuhan, iaitu $\rho = 0$. Dengan ini imbuhan, ρ membolehkan penggunaan pekali kemas kini, ε yang lebih besar untuk mencapai kekerapan penukaran titik set yang minimum.

Keputusan simulasi yang dalam Jadual 2 bagi masalah 2 juga menunjukkan bahawa kekerapan penukaran titik set berjaya dikurangkan dengan ketara berbanding kaedah dua paras biasa. Apabila Lagrangian biasa, iaitu $\rho = 0$ digunakan,

bilangan penukaran titik set yang minimum didapati pada nilai pekali kemas kini, $\varepsilon = 1.1$, iaitu sebanyak 352 penukaran titik set. Sebanyak 329 penukaran titik set didapati pada imbuhan $\rho = 0.1$ dengan $\varepsilon = 1.1$ merupakan bilangan penukaran titik set minimum. Pengurangan penukaran titik set juga diperhatikan pada suatu nilai pekali kemas kini, ε , dengan imbuhan, ρ . Sebagai contoh, pada $\varepsilon = 1.2$, imbuhan $\rho = 0.2$ mengurangkan penukaran titik set sehingga 376 didapati. Begitu juga pada $\varepsilon = 1.2$, imbuhan $\rho = 0.7$ mengurangkan bilangan penukaran titik set sehingga 401 berbanding 616 menggunakan Lagrangian biasa tanpa imbuhan, iaitu $\rho = 0$. Dengan ini imbuhan, ρ dapat mempercepatkan penumpuan.

Keputusan simulasi yang dalam Jadual 3 bagi masalah 3 menunjukkan bahawa imbuhan, ρ yang tertentu dapat memperbaiki kekerapan penukaran titik set. Apabila Lagrangian biasa, iaitu $\rho = 0$ digunakan, bilangan penukaran titik set yang minimum didapati pada nilai pekali kemas kini, $\varepsilon = 1.1$, iaitu sebanyak 300 penukaran titik set. Bilangan penukaran titik set yang hampir sama iaitu sebanyak 303 penukaran titik set didapati pada $\varepsilon = 1.0$ dengan imbuhan $\rho = 0.4$. Pengurangan penukaran titik set juga diperhatikan pada suatu nilai pekali kemas kini dengan imbuhan. Sebagai contoh, pada $\varepsilon = 0.5$, imbuhan $\rho = 0.3$ mengurangkan penukaran titik set sehingga 904 didapati. Begitu juga pada $\varepsilon = 0.5$, imbuhan $\rho = 0.1$ mengurangkan bilangan penukaran titik set sehingga 900 berbanding 929 menggunakan Lagrangian biasa tanpa imbuhan, iaitu $\rho = 0$.

Walau bagaimanapun, Teknik Dua Paras Terimbu berjaya menyelesaikan masalah tidak cembung seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 4 dengan penggunaan pekali dendaan kuasa dua, ρ yang bernilai besar iaitu $\rho = 1500$ dan $\varepsilon = 1.1$ memberikan gandingan optimum dengan bilangan penukaran titik set sebanyak 325. Penambahan sebutan dendaan kuasa dua dalam Teknik Dua Paras Terimbu mencembungkan fungsi objektif lalu memudahkan penumpuan (Brdys *et. al.* 1987). Pada suatu nilai pekali kemas kini, ε yang tertentu, kekerapan penukaran titik set didapati berkurangan apabila nilai ρ meningkat daripada 1000 menuju ke 1500 tetapi diperhatikan kekerapan penukaran titik set meningkat apabila nilai ρ meningkat daripada 1500 menuju ke nilai yang lebih besar. Sebagai contoh, pada $\varepsilon = 0.5$, imbuhan $\rho = 1000$ memberikan penukaran titik set sebanyak 1625

dan berkurangan kepada 635 dengan imbuan $\rho = 1500$. Kekerapan penukaran titik set didapati meningkat kepada 791 dengan imbuan $\rho = 2000$ dan terus meningkat kepada 1132 dengan imbuan $\rho = 2500$.

Penumpuan Teknik Dua Paras Terimbuah bergantung kepada nilai pekali dendaan kuasa dua, ρ dan pekali kemas kini ε yang digunakan seperti ditunjukkan dalam Rajah 5, 6, 7 dan 8. Dengan ini, pemilihan nilai pekali dendaan kuasa dua, ρ dan pekali kemas kini, ε yang bersesuaian, teknik dua paras terimbuah bagi proses tunggal memberikan penumpuan yang lebih baik pada kesemua kes cembung dan tidak cembung yang dikaji.

Rumusan pelegaan mudah telah digunakan dalam kemas kini titik set setiap lelaran pengiraan. Pekali kemas kini ε memainkan peranan yang penting. Nilai pekali kemas kini yang kecil memerlukan lebih banyak lelaran berbanding pekali kemas kini yang bernilai besar bagi algoritma menumpu ke titik set optimum. Walau bagaimanapun pekali kemaskini yang terlalu besar mungkin menyebabkan titik optimum dilepasi dan tidak ada penumpuan bagi algoritma. Keputusan simulasi menunjukkan nilai pekali kemas kini di antara 0.9 hingga 1.5 adalah bersesuaian bagi kebanyakan kes kajian.

Jadual 5, 6, 7 dan 8 masing-masing menunjukkan nilai pekali Lagrange, λ bagi setiap pembolehubah kawalan dalam Masalah 1, 2, 3 dan 4. Nilai pekali Lagrange adalah berbeza dan tidak unik (Chen & Roberts 1984).

Terdapat dua syarat yang perlu dipenuhi bagi sesuatu masalah pengoptimuman model memberikan penyelesaian optimum sebenar, iaitu:

1. $F(\bar{c}, \alpha) = F^*(\bar{c})$
2. $F'_c(\bar{c}, \alpha)|_{\bar{c}} = F^*_c(\bar{c})|_{\bar{c}}$

Oleh itu Kaedah Dua Langkah Terubahsuai telah dirumus untuk memenuhi kedua-dua syarat di atas lalu memberikan penyelesaian optimum sebenar dengan pekali Lagrange, λ dikira dengan rumus berikut yang diterbitkan menurut keadaan perlu Kuhn-Tucker (Robert 1979).

$$\lambda(c, v, \alpha, \xi) = [F'_v(v, \alpha) - F^*(v)] [F'_\alpha(v, \alpha)]^{-1} \times [q'_\alpha(c, \alpha) + \xi g'_\alpha(c, \alpha)] \quad (29)$$

TATANAMA

- | | | | |
|---|--|---|--|
| A | Set nilai mungkin parameter penganggaran | C | Set nilai mungkin pembolehubah kawalan |
| | | F | Model penghampiran keluaran sisitem |

Demi mengira nilai $\lambda(c, v, \alpha, \xi)$ berdasarkan rumusan di atas, proses perlu diganggu dengan kerap untuk menentukan nilai $F^*(v)$ secara gangguan. Oleh itu proses yang dicemari oleh bising sukar ditentukan nilai terbitan yang diperlukan. Keadaan menjadi lebih rumit jika masalah kawalan dengan kekangan yang tidak boleh dibezakan terhadap keluaran, y , iaitu $g'_\alpha(c, \alpha)$ tidak wujud. Kelebihan struktur kawalan dua paras terimbuah adalah dapat menghindarkan kesukaran tersebut di atas kerana nilai pekali Lagrange, λ dikira pada paras atasan dengan kaedah arah tasrifan Powell tanpa memerlukan sebarang terbitan.

KESIMPULAN

Keputusan simulasi menunjukkan Teknik Dua Paras Terimbuah berjaya menyelesaikan masalah tidak cembung melalui pencembungan fungsi objektif dengan penambahan sebutan dendaan kuasa dua. Bagi masalah cembung, kekerapan penukaran titik set dapat dikurangkan dengan penggunaan pekali dendaan kuasa dua dan kemas kini yang bersesuaian. Di samping itu pada nilai pekali kemaskini, ε yang tertentu, imbuan, ρ boleh mempercepatkan penumpuan. Nilai pekali kemas kini di antara 0.9 hingga 1.5 adalah bersesuaian bagi kebanyakan kes kajian. Walaupun kos pengiraan komputer luar talian meningkat, proses tidak perlu diusik dengan kerap seperti yang diperlukan dalam struktur kawalan kaedah Dua Langkah Terubahsuai untuk pengiraan pekali Lagrange, λ . Oleh yang sedemikian, teknik dua paras terimbuah sesuai digunakan pada sistem yang dicemari oleh bising dan masalah kawalan dengan kekangan ketaksamaan, $G(c, y)$ yang tidak boleh dibezakan terhadap y .

PENGHARGAAN

Penghargaan yang setinggi-tingginya dirakamkan kepada Dr. Normah Abdullah, pensyarah Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Universiti Kebangsaan Malaysia, atas bimbingan, cadangan dan nasihat beliau dalam projek penyelidikan ini.

F_*	Model sebenar keluaran sistem	k	Pembilang lelaran
G	Fungsi kekangan ketaksamaan yang bertindak	p	Pekali kos
L	Fungsi Lagrangian terimbuh	q	Indeks pencapaian model
N	Bilangan pembolehubah	v	Titik set semasa
Q	Indeks pencapaian sistem	y	Keluaran model sistem
Y	Set nilai mungkin keluaran model sistem	y_*	Keluaran sebenar sistem
Y_*	Set nilai mungkin keluaran sistem sebenar	Λ	Set nilai mungkin pekali Lagrange bagi pembolehubah kawalan
c	Pembolehubah kawalan	Ω	Set titik penyelesaian mungkin
\hat{c}	Titik penyelesaian pengoptimuman	α	Parameter anggaran
\bar{c}	Titik kawalan optimum	ε	Pekali kemas kini
f	Fungsi objektif	λ	Pekali Lagrange bagi pembolehubah kawalan
g	Fungsi kekangan ketaksamaan model	μ	Pekali Lagrange bagi kekangan kesamaan
i	Pembolehubah bilang	ρ	Pekali dendaan sebutan kuasa dua
j	Pembolehubah bilang	ξ	Pekali Lagrange bagi kekangan ketaksamaan

RUJUKAN

- Brdys M., Ellis J.E. dan Roberts P.D. 1987. Augmented integrated system optimization and parameter estimation technique: derivation, optimality and convergence. *IEE Proceeding*. 134(3):201 – 209.
- Brdys M. dan Roberts P.D. 1986. Optimal structures for steady-state adaptive optimizing control of large-scale industrial processes. *International Journal of Systems Science*. 17(10): 1449 – 1474.
- Brdys M. Normah Abdullah dan Roberts P.D. 1987. Augmented Model Based Double Iterative Loop Techniques for Integrated System Optimisation and Parameter Estimation of Large Scale Industrial Processes. *10th World Congress on Automatic Control Preprints*. Vol 7. Germany: International Federation of Automatic Control.
- Chen S. dan Roberts P.D. 1984. *Comparison of several On-line Integrated System Optimisation and Parameter Estimation Methods for Steady State Systems*. London: The City University (CEC/SC-PDR/15)
- Durbeck R.C. 1965. Principles for Simplification of Optimizing Control Model. PhD Thesis. Cleveland: Case Western Reserve University.
- Edgar T.F. dan Himmelblau D.M. 1988. *Optimization of Chemical Processes*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Mesarovic M.D., Macko D. dan Takahara Y. 1970. *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*. New York: Academic Press.
- Roberts P.D. 1979. An algorithm for steady-state system optimization and parameter estimation. *International Journal of System Science*. 10 (7):719-734.

