

Aplikasi Kaedah Unsur Terhingga Secara Dua Dimensi Dalam Kejuruteraan Angin

Siti Aminah Osman, Abdul Khalim Abdul Rashid, Taksiah Majid and Khor Eng Choon

Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur
Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 Bangi, Selangor Darul Ehsan.
email: saminah@vlsi.eng.ukm.my

Received Date: 1st June 2005 Accepted Date: 21st April 2006

ABSTRAK

Ramalan terhadap kesan beban angin secara numerik melalui penggunaan berkomputer ke atas model bangunan nyata memberikan beberapa kelebihan berbanding dengan penggunaan model berskala di makmal terowong angin. Oleh itu kajian ini akan melihat keberkesanan dan kesesuaian kaedah unsur terhingga yang digunakan melalui kaedah numerik dengan menggunakan perisian FEMLAB dalam menganggarkan tindakan angin ke atas struktur bangunan. Taburan aliran dan tekanan yang terhasil di sekeliling model diperoleh melalui simulasi aliran gelora k-e dua dimensi. Dua model kajian bangunan rendah telah dipilih bagi tujuan perbandingan antara keputusan simulasi dengan pengukuran sebenar dan pengukuran di makmal terowong angin. Keputusan pekali tekanan yang diperoleh untuk setiap permukaan telah dibandingkan dengan penyelidik lain yang menggunakan kaedah pembezaan terhingga dan kaedah isipadu terhingga. Secara keseluruhannya, keputusan dari dua model kajian tersebut menunjukkan aplikasi kaedah unsur terhingga yang dijalankan dalam dua dimensi adalah setanding dengan kaedah lain di permukaan hadapan. Manakala di permukaan belakang dan bumbung pula telah memberikan keputusan taburan pekali tekanan C_p yang lebih besar berbanding pengukuran sebenar.

Katakunci : Kaedah unsur terhingga, Pekali tekanan C_p , Aliran gelora k-e

ABSTRACT

The use of numerical prediction of wind loads onto the structural model by computer simulation offers certain advantages compared to the model tested in the wind tunnel. This study will look into the effectiveness and the suitability of Finite Element Method (FEM) through numerical simulation using FEMLAB software in the prediction of wind load effects to the structure. The wind flow and pressure distribution around the model are obtained from two-dimensional simulation of turbulence flow k-e. Two models of low rise buildings are chosen in order to compare the simulation results of the full scale and of the wind tunnel measurements. The predicted pressure coefficients C_p obtained from the simulation are then compared to previous studies using other methods such as Finite Difference Method (FDM) and Finite Volume Method (FVM). Overall results of

these two models show that the application of Finite Element Method (FEM) in two dimensional simulation are acceptable and comparable to the other methods for the windward face. Whilst, for leeward face the predicted pressure coefficient (C_p) obtained are much larger compared to the real measurement..

Keywords: Finite Element Method, Pressure Coefficient C_p , Turbulence Flow k - ϵ

PENGENALAN

Fenomena angin yang bertiup secara semulajadi di permukaan bumi pada umumnya boleh memberi kesan ke atas reka bentuk bangunan dan juga ke atas sebarang bentuk struktur kejuruteraan. Tindakan beban angin dan tindak balasnya ke atas struktur merupakan satu aspek penting yang perlu dipertimbangkan oleh para jurutera dan arkitek berikutan struktur bangunan yang semakin tinggi serta boleh dibina dengan pelbagai bentuk. Kajian kesan tindakan angin ke atas struktur yang dikenali sebagai bidang kejuruteraan angin adalah berasaskan tiga prinsip utama iaitu sains, matematik dan kejuruteraan yang telah bermula sejak tiga dekad lalu berikutan dengan adanya peralatan moden dan kemudahan saintifik (Shahir Liew 2004). Melalui tiga prinsip tersebut maka kaedah pengujian di makmal terowong angin bagi mengkaji kesan tindakannya telah digunakan sejajar dengan pembangunan teknologi komputer yang semakin meningkat dengan kaedah simulasi berkomputer mula diperkenalkan.

Kajian tindakan angin ke atas struktur melalui kaedah simulasi berkomputer yang digunakan adalah berasaskan kepada metodologi Dinamik Bendalir Berkomputer (CFD). Walaupun terdapat tiga kaedah pendiskritan yang digunakan dalam aplikasi CFD iaitu kaedah unsur terhingga (FEM), kaedah isipadu terhingga (FVM) dan kaedah pembezaan terhingga (FDM), namun setiap kaedah tersebut mempunyai kelebihan masing-masing (Douglas et al. 2001). Bagi analisis struktur, penggunaan FEM merupakan kaedah pendiskritan yang paling utama digunakan sejak beberapa tahun yang lalu tetapi ianya tidak begitu berjaya dalam bidang mekanik bendalir. Walau bagaimanapun pada tahun 1980an satu pendekatan baru telah diperkenalkan menunjukkan FEM bukan saja berkesan tetapi juga agak sesuai untuk aliran yang lebih kompleks dan juga lebih fleksibel untuk bentuk struktur yang lebih rumit (Hughes dan Jansen 1993).

Oleh itu bagi mengkaji kesan tindakan angin terus ke atas struktur penggunaan FEM melalui aplikasi CFD dalam kejuruteraan angin adalah

wajar diselidiki. Ketepatan dan kesesuaiannya dalam meramalkan taburan beban angin yang terhasil ke atas model struktur berbanding dengan kaedah lain seperti FVM dan FDM akan dibincangkan. Dalam kajian ini kaedah simulasi berkomputer ke atas dua model pilihan dibuat dengan menggunakan perisian multifizik FEMLAB versi 2.3 yang berasaskan kaedah FEM.

KAEDAH SIMULASI

Ramalan ke atas taburan aliran angin dan tekanan yang terhasil ke atas model kajian dibuat dengan menggunakan simulasi aliran gelora model k - ϵ dua dimensi. Konsep dan persamaan asas yang digunakan bagi model k - ϵ untuk menganggarkan aliran angin di sekeliling model struktur adalah berdasarkan kepada persamaan purata Navier-Stokes (RANS) dan persamaan keselantaran seperti berikut:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \eta \cdot \nabla U + \rho U \cdot \nabla U + \nabla P + \nabla(u' \otimes u') = F \quad (1)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

di mana $\nabla = \partial / \partial x$, U merupakan halaju purata, ρ ialah ketumpatan aliran, η merupakan kelikatan aliran, manakala P ialah tekanan dan sebutan $\overline{u' \otimes u'}$ pula ialah tegasan tegangan Reynolds. Sete-rusnya melalui model k - ϵ ini hubungan di antara tenaga kinetik gelora k dan kadar lesapan tenaga gelora ϵ dengan kelikatan gelora ν_T dapat ditunjukkan melalui persamaan

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

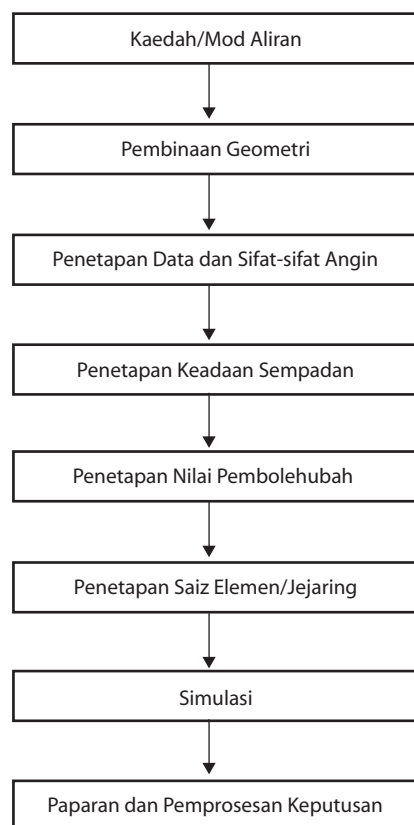
Manakala nilai k dan ϵ boleh ditentukan berdasarkan persamaan (FEMLAB 2002) Terdapat lima tetapan bagi pekali model yang digunakan di dalam persamaan di atas dan nilai-nilai tersebut boleh berubah. Walau bagaimanapun dari pelbagai penyelidikan dan ujian makmal terowong angin yang telah

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \rho \frac{V_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \varepsilon \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \rho \frac{V_T}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho U \cdot \nabla \varepsilon = \rho C_{\varepsilon 1} C_{\mu k} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

dijalankan, maka Versteeg dan Malalasekara (1995) telah menghasilkan pekali model $C_m = 0.09; s_k = 1.00; s_e = 1.3; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92$ dengan s_k dan s_e merupakan nombor Prandtl yang menghubungkan tenaga kinetik k dan kadar lesapan tenaga gelora e dengan kelikatan gelora n_r .

Pendiskritan ke atas semua persamaan di atas dibuat melalui kaedah FEM dengan berdasarkan elemen jejaring yang telah dipilih dalam ruang domain pengiraan untuk setiap model kajian tersebut. Manakala penyelesaian anggaran terhadap persamaan pula adalah dengan menggunakan penyelesaian algorithma iterasi. Carta aliran yang dipaparkan dalam Rajah 1



Rajah 1. Carta aliran dalam proses simulasi
Sumber: Choon (2005)

menunjukkan bagaimana proses permodelan simulasi dijalankan melalui perisian FEMLAB.

MODEL KAJIAN

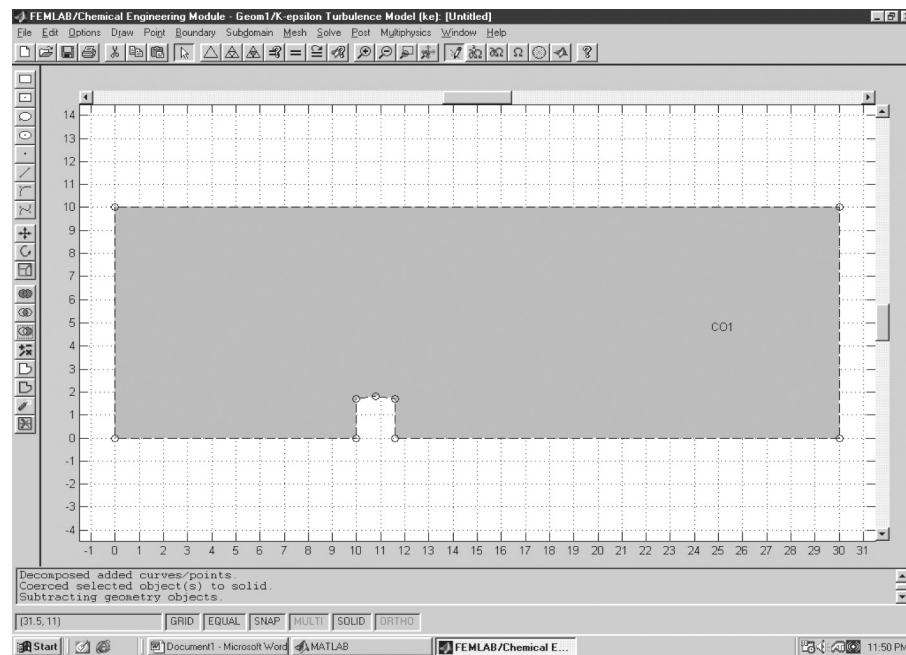
Dua model kajian yang dipilih untuk tujuan simulasi merupakan model bangunan rendah dan model berbentuk kiub. Bagi menunjukkan kesesuaian penggunaan kaedah FEM melalui perisian FEMLAB dalam meramalkan taburan aliran dan tekanan yang terhasil di permukaan model, perbandingan keputusan dengan kaedah FVM dan FDM turut dibuat dan dibincangkan.

MODEL 1

Model ini bangunan rendah dengan dimensi panjangnya ialah 1.5m, 3.05m lebar dan ketinggian 1.705m. Manakala kecerunan bumbung bangunan adalah 5.7% dengan bentuk seperti di Rajah 2. Melalui pengujian model sebenar di tapak dan di makmal terowong angin, parameter angin dengan halaju 10 m/s dan kekasaran permukaan tanah $z_0 = 0.0095m$ telah digunakan (Mikkelsen dan Livesey 1995). Penetapan kepada saiz domain pengiraan yang bersesuaian berdasarkan Osman et al. (2003) adalah perlu diguna bagi mendapatkan satu ruang aliran angin yang terhasil tanpa mengalami gangguan. Saiz domain yang dipilih juga boleh menyerupai saiz makmal terowong angin yang digunakan. Keadaan sempadan yang dipilih untuk model ini adalah pada aliran masuk ke domain bagi halaju angin ufuk telah diungkapkan melalui persamaan halaju logaritma. Halaju angin pugak pada kedudukan tersebut dianggap sebagai sifar. Manakala pada aliran keluar, keadaan tekanan telah diungkapkan sebagai sifar.

MODEL 2

lanya merupakan model kiub yang berukuran 6 m yang di bina di Institiut Penyelidikan Silsoe, United Kingdom untuk tujuan pengukuran dan perbandingan terhadap interaksi antara struktur dan angin. Profil halaju di tapak tersebut telah diukur dan direkod pada ketinggian kiub dengan $u = 9.52$ m/s manakala panjang kekasaran berkesan z_0 adalah di antara 0.01 dan 0.04 m (Hoxey et al. 1993). Saiz domain pengiraan yang dipilih untuk model ini adalah berukuran 42 m tinggi x 102 m panjang yang masih mengikut



Rajah 2. Kedudukan model 1 dalam domain pengiraan yang digunakan

ketetapan digunakan oleh Osman et al. (2003). Ungkapan halaju ufuk pada aliran masuk masih menggunakan persamaan logaritma dan halaju pugak pula bersamaan sifar. Tekanan aliran keluar domain juga telah disetkan kepada sifar.

KEPUTUSAN SIMULASI DAN PERBINCANGAN

Ketepatan keputusan simulasi yang terhasil bagi dua model kajian dalam aliran gelora $k-\epsilon$ dua dimensi ini perlu dipastikan. Antara faktor yang boleh mempengaruhi keputusan ialah taburan dan bilangan elemen yang digunakan, model aliran serta jenis dimensi yang dipilih. Keputusan yang diperoleh dari simulasi yang dijalankan adalah dalam bentuk tekanan P dan seterusnya pekali tekanan C_p boleh ditentukan melalui persamaan (ASCE 1987),

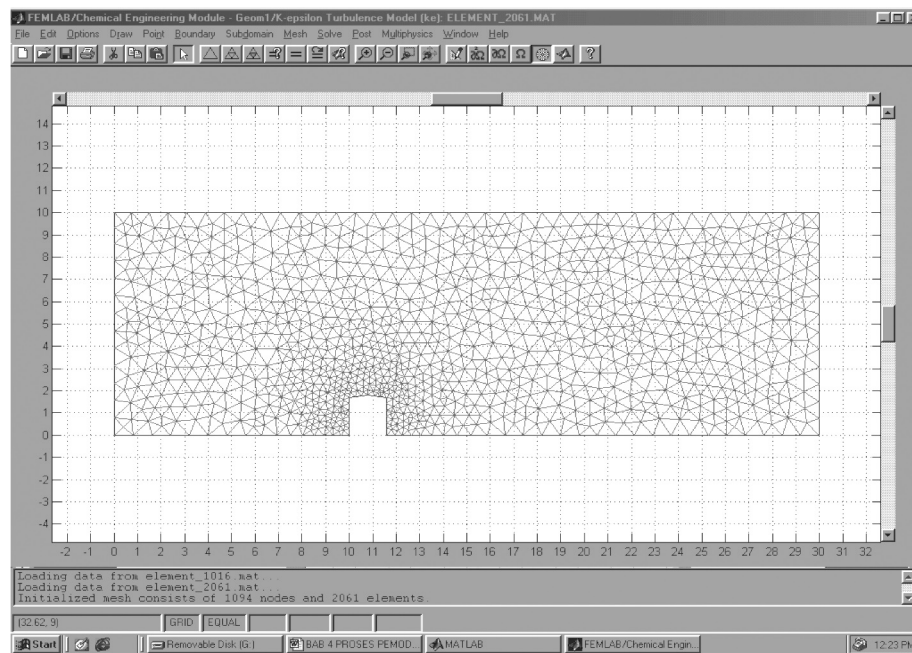
$$C_p = \frac{P - P_o}{q} \quad (6)$$

Nilai P_o merupakan tekanan angin sebelum gangguan yang biasanya disetkan kepada sifar bagi mendapatkan perbezaan nilai P pada titik tertentu dalam domain tersebut (Selvam 1992). Manakala tekanan dinamik q pula bergantung kepada nilai ketumpatan angin ρ dan nilai halaju angin u sebelum mengalami gangguan dengan $q = \frac{1}{2} \rho u^2$.

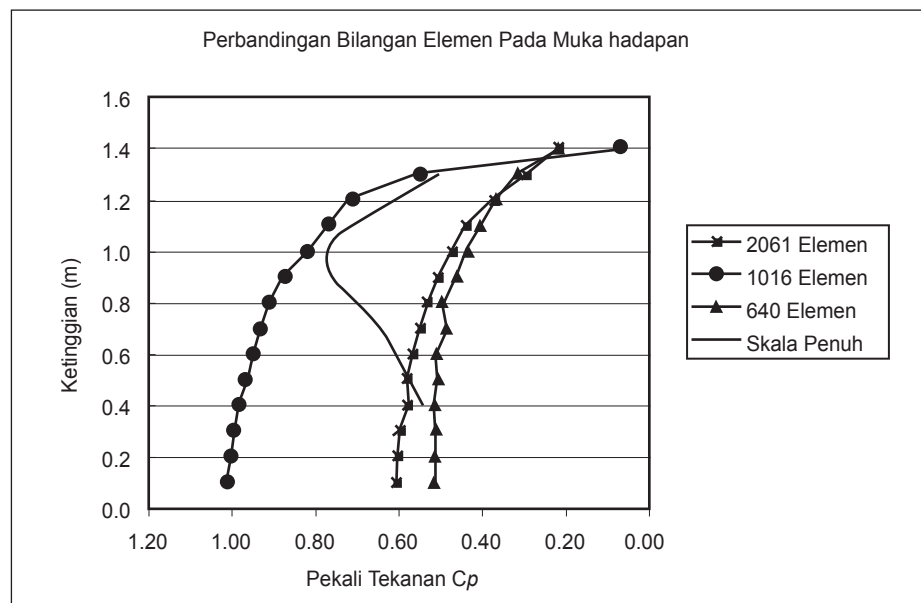
TABURAN DAN PERBANDINGAN TEKANAN BAGI MODEL 1

Taburan, saiz dan bilangan elemen yang dipilih dalam domain pengiraan ternyata boleh memberi kesan kepada keputusan taburan tekanan yang terhasil. Bagi perisian FEMLAB penggunaan elemen segitiga telah digunakan dan taburan elemen telah dkecilkan pada kawasan sekitar permukaan model seperti dalam Rajah 3. Oleh itu bagi model ini 3 kes bilangan elemen yang berbeza telah dipilih iaitu elemen 2061, 1016 dan 640. Bilangan elemen yang dipilih diambil secara rawak berdasarkan kualiti elemen yang dibenarkan untuk setiap kes tertentu dan juga bergantung kepada masa pemprosesan yang terhasil. Keputusan taburan pekali tekanan seterusnya diplotkan untuk setiap permukaan model pada permukaan hadapan, permukaan bambung dan permukaan belakang.

Perbandingan elemen dibuat bagi mendapatkan lengkung pekali tekanan C_p yang terbaik dan paling hampir dengan pengukuran data. Pemilihan yang dibuat di antara ketiga-tiga lengkung untuk bilangan elemen yang berbeza ialah melalui bentuk lengkung dan ralat yang didapati berbanding dengan pengukuran sebenar pada skala penuh. Berdasarkan Rajah 4a didapati lengkung C_p di permukaan hadapan model tidak begitu dipengaruhi oleh pemilihan bilangan elemen



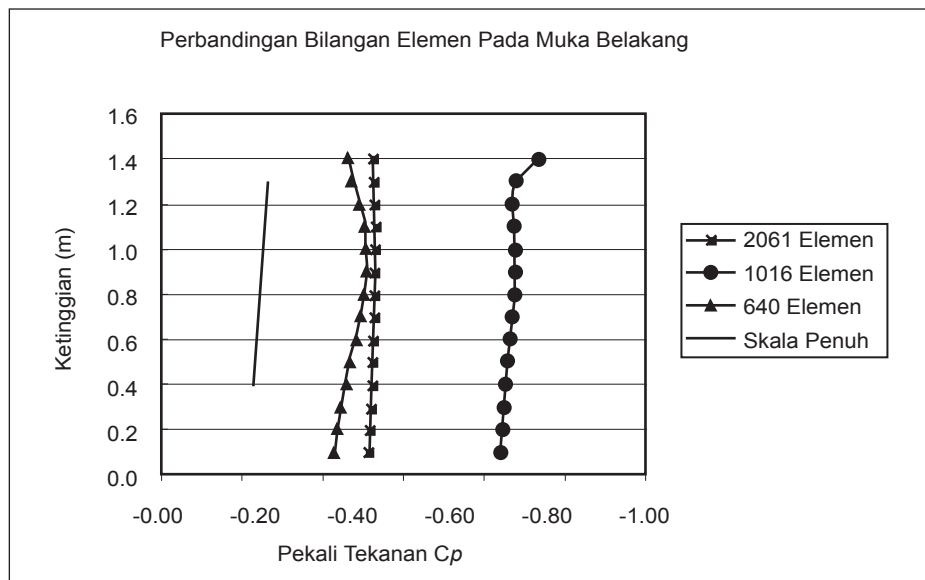
Rajah 3. Taburan elemen di sekeliling model 1 dengan 2061 elemen



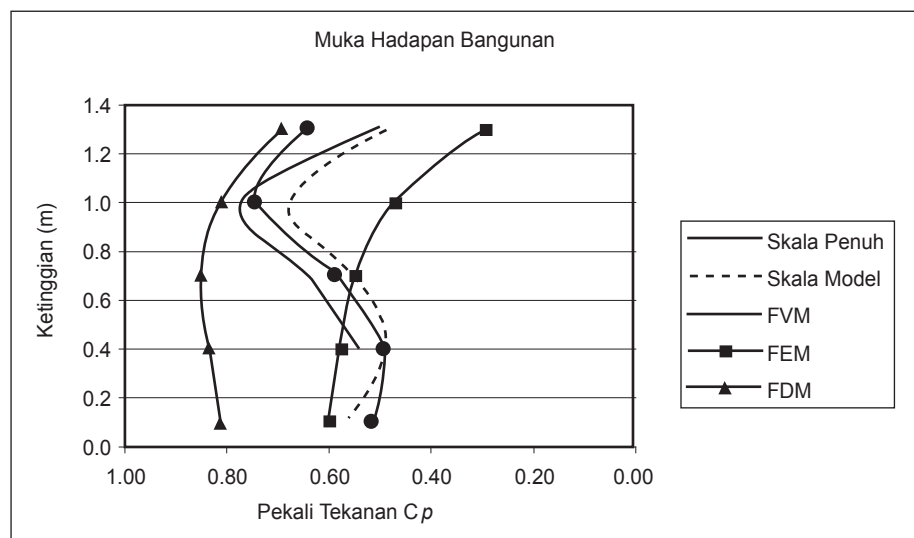
Rajah 4a. Pengaruh bilangan elemen terhadap taburan pekali tekanan yang terhasil di permukaan hadapan

pada ketinggian 1.4 m. Walau bagaimanapun apabila berada pada ketinggian 0.2m sehingga ke 1.3m, ternyata pengaruh bilangan elemen telah memainkan peranan. Tetapi keadaan sebaliknya berlaku pada permukaan belakang model dalam Rajah 4b di mana bilangan elemen yang terbanyak (2061) telah memberikan nilai julat 0.43 dengan bentuk lengkung C_p yang terbaik dan hampir sama berbanding dengan bentuk lengkung pengukuran sebenar. Walau bagaimanapun masa penumpuan yang lebih

lama telah diambil iaitu selama 2 jam berbanding dengan kes lain. Seterusnya keputusan lengkung C_p yang diperoleh melalui kaedah FEM ini telah dibandingkan dengan keputusan pengukuran sebenar, pengukuran di makmal, kaedah FVM dan kaedah FDM. Data pengukuran bagi skala penuh dan skala model diperoleh dari Mikkelsen dan Livesey (1995). Perbandingan masih dibuat untuk ketiga-tigapermukaan bagi mengenalpasti kaedah yang sesuai lengkung dan ralat yang didapati digunakan dalam analisis kejuruteraan angin.



Rajah 4b. Pengaruh bilangan elemen terhadap taburan pekali tekanan yang terhasil di permukaan belakang

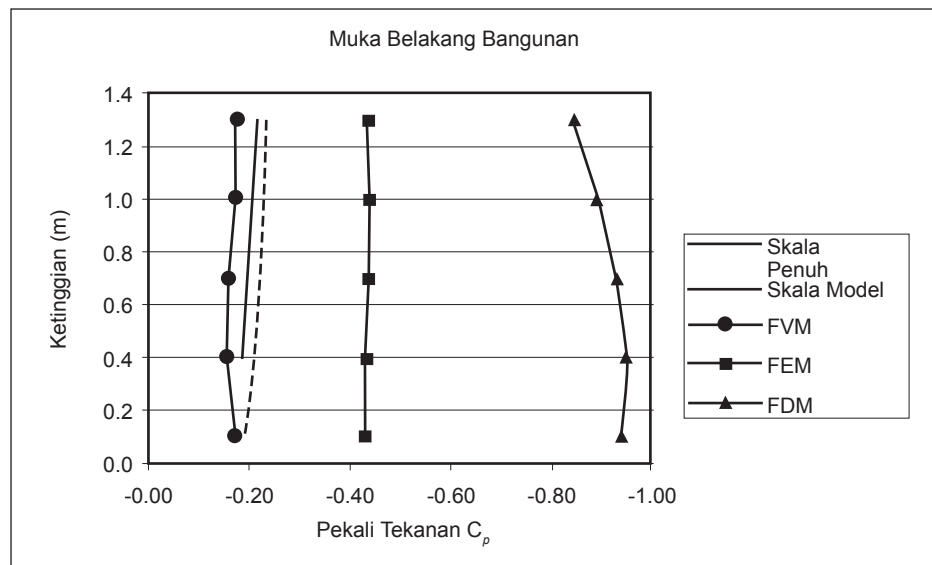


Rajah 5. Perbandingan keputusan pekali tekanan C_p pada muka hadapan model

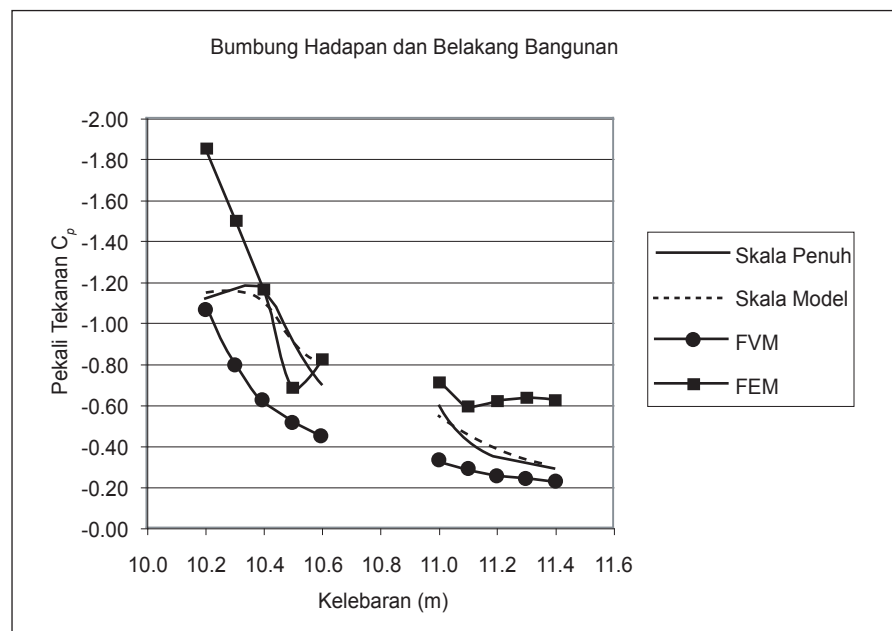
Hasil perbandingan di permukaan hadapan model pada Rajah 5 menunjukkan keputusan simulasi nilai C_p berdasarkan kaedah FVM yang lebih menghampiri skala penuh (pengukuran sebenar) di mana lengkung yang diperoleh mempunyai bentuk yang hampir sama. Begitu juga nilai C_p pada ketinggian 0.4-1.3m telah memberikan nilai yang terhampir dengan nilai skala penuh dengan julat perbezaan antara 2-11%. Manakala keputusan nilai C_p melalui kaedah FEM dan FDM pula mempunyai bentuk lengkung yang agak berbeza dengan skala penuh dan skala model. Di permukaan belakang model

pula dalam Rajah 6, didapati semua kaedah telah memberikan bentuk lengkung yang hampir sama dengan skala penuh dan skala model, di mana keputusan nilai C_p melalui kaedah FVM sahaja yang berjaya memberikan nilai yang paling hampir dengan julat perbezaan yang paling sedikit, dalam lingkungan 10%. Walau bagaimanapun kaedah FEM masih lagi boleh diterima berbanding dengan kaedah FDM di mana kaedah FEM telah memberikan perbezaan sebanyak 50% dibandingkan dengan skala penuh.

Bagi perbandingan di permukaan bumbung



Rajah 6. Perbandingan keputusan pekali tekanan C_p pada permukaan belakang model



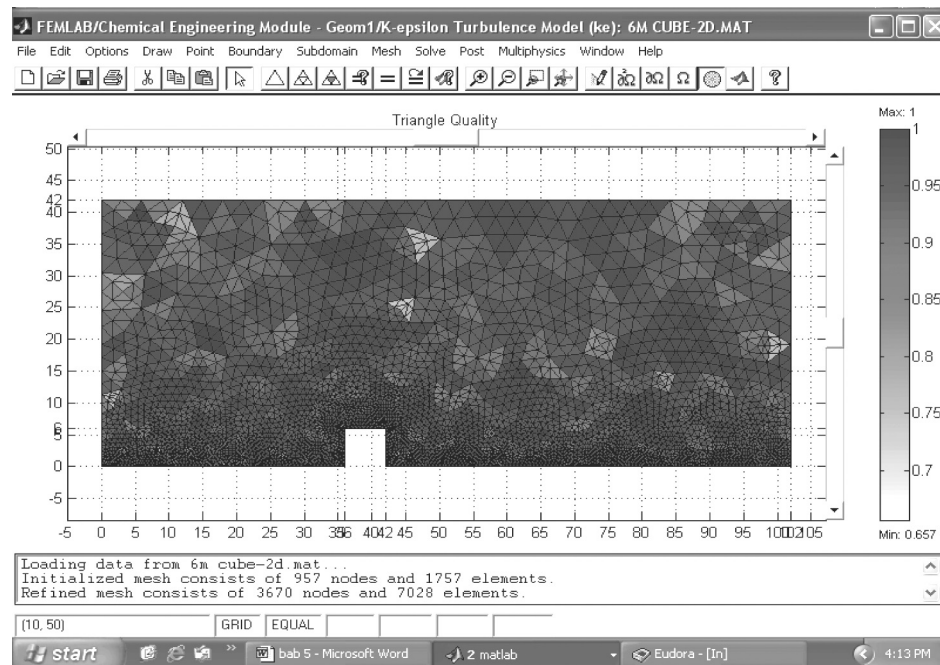
Rajah 7. Perbandingan keputusan pekali tekanan C_p pada permukaan bumbung hadapan dan belakang

pula, keputusan nilai C_p diplot berdasarkan pada bumbung hadapan dan bumbung belakang seperti dalam Rajah 7. Nilai C_p daripada analisis FEM dan FVM mempunyai bentuk lengkung yang hampir sama dengan lengkung skala penuh. Nilai C_p yang didapati dari kaedah FEM pada pepenjur bumbung hadapan mempunyai nilai paling maksimum sebanyak 80 peratus berbanding dengan nilai skala penuh. Keadaan sebaliknya berlaku di permukaan bumbung belakang di mana hanya 20% perbezaan diperolehi antara kaedah FEM dengan skala

penuh. Ini menunjukkan kaedah FEM secara keseluruhannya telah memberikan perbezaan yang agak besar berbanding dengan kaedah FVM.

TABURAN DAN PERBANDINGAN TEKANAN BAGI MODEL 2

Konsep yang sama terhadap taburan dan kedudukan elemen yang digunakan ke atas model 1 digunakan pula untuk model 2. Walau bagaimanapun disebabkan saiz domain bagi model 2 adalah berbeza dengan model 1 maka



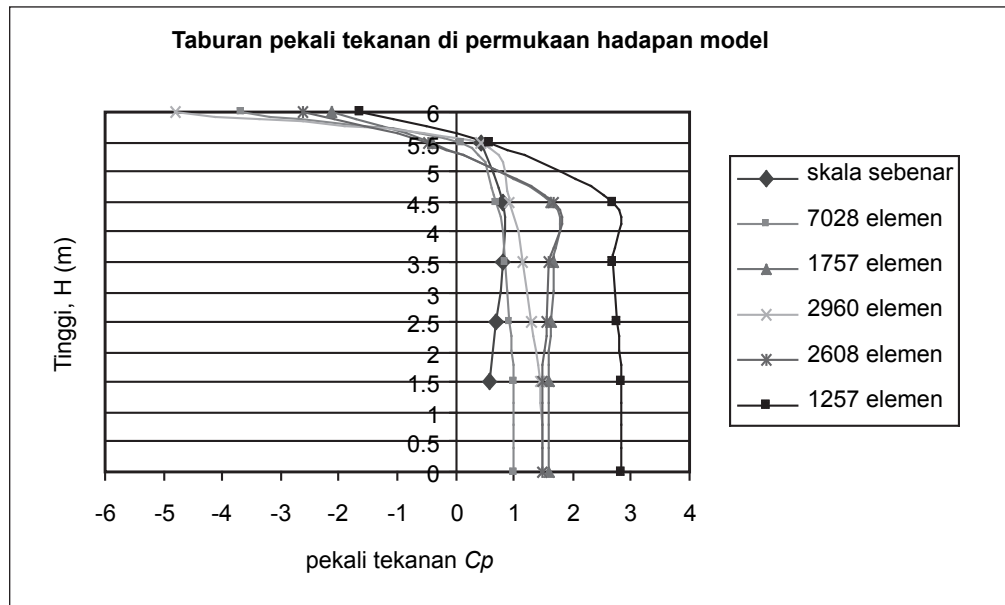
Rajah 8. Taburan elemen dalam domain pengiraan sebanyak 7028 elemen

bilangan elemen yang diperoleh juga turut berbeza. Terdapat lima kes kajian dengan saiz dan bilangan elemen yang berlainan telah dicuba untuk model ini iaitu elemen 7028, 1757, 2960, 2608 dan 1257. Rajah 8 menunjukkan model 2 dengan taburan elemen sebanyak 7028 yang dipilih di sekelilingnya. Perbandingan terhadap pengukuran pekali tekanan C_p antara model sebenar di tapak dengan model simulasi FEMLAB dibuat untuk tiga permukaan sahaja iaitu permukaan hadapan, bumbung rata dan permukaan belakang model kiub tersebut.

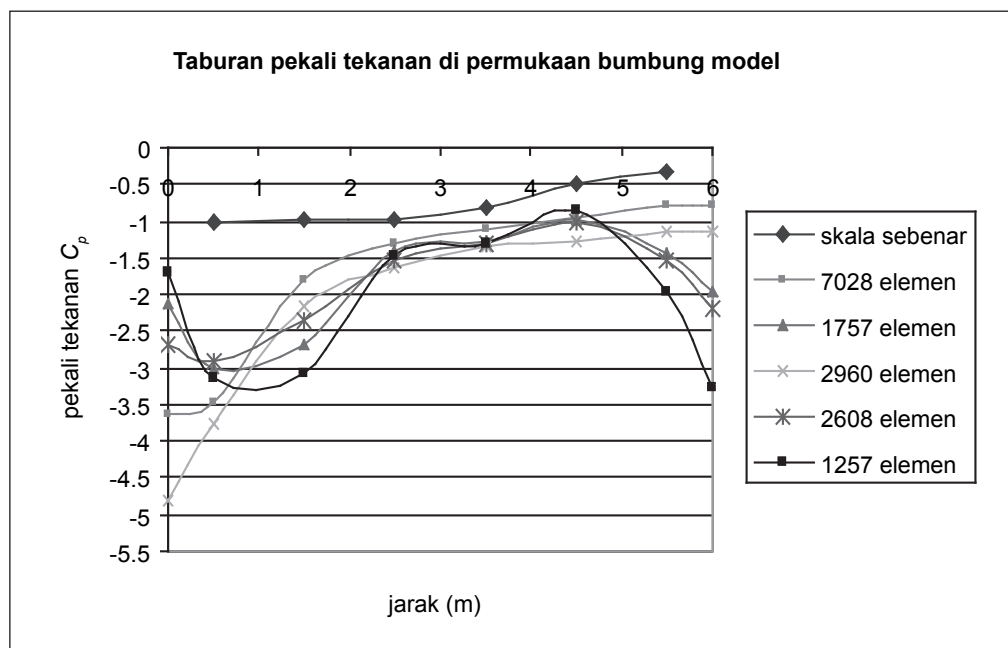
Rajah 9a, 9b dan 9c seterusnya menunjukkan keputusan taburan pekali tekanan C_p yang diperoleh untuk setiap permukaan model bagi setiap kes dengan bilangan elemen yang berlainan. Hasil simulasi yang dijalankan untuk setiap kes tersebut telah mendapati elemen 7028 berjaya memberikan keputusan taburan C_p yang paling hampir dengan pengukuran data sebenar di tapak walaupun telah mengambil masa yang paling lama iaitu selama 2 jam 40 minit. Ini menunjukkan bahawa saiz jejaring yang lebih kecil dan halus di sekitar model berupaya untuk menyelesaikan regim aliran seperti zon pemisahan yang berlaku di bahagian hadapan pada permukaan bumbung sepertimana yang diperoleh oleh Murakami dan Mochida

(1988) dalam kajian mereka ke atas pengaruh jejaring dan domain pengiraan dalam proses simulasi. Pembesaran kadar pertumbuhan jejaring pada keseluruhan permukaan model ternyata mempengaruhi aliran dan memberikan keputusan yang amat berbeza dengan pekali tekanan C_p sebenar di tapak sepertimana yang berlaku pada bilangan elemen 1257.

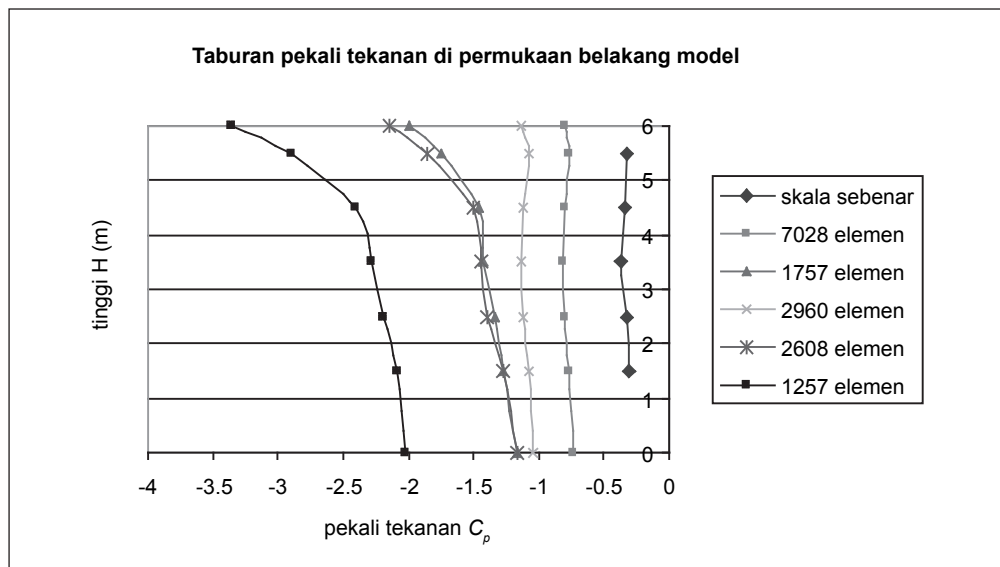
Keputusan taburan pekali tekanan C_p yang terbaik dengan elemen 7028 melalui kaedah FEM telah dibandingkan dengan keputusan simulasi penyelidik lain (Easom 2000). Beliau telah menggunakan perisian CFX dalam simulasi aliran gelora bagi model piawai k- ϵ tiga dimensi dengan penggunaan kaedah FDM. Rajah 10a menunjukkan perbandingan yang dibuat antara aplikasi kaedah FEM dan FDM dengan keputusan pengukuran sebenar di tapak pada permukaan hadapan model kiub 6m. Didapati lengkung C_p bagi FEM dua dimensi telah memberikan anggaran tekanan yang agak besar sedikit (35%) dibandingkan dengan pengukuran sebenar pada bahagian bawah sekitar 0-4m. Tekanan yang berlebihan telah terkumpul di permukaan hadapan model di mana serakan angin ke sisi tidak berlaku berbanding dengan simulasi dalam tiga dimensi yang membolehkan aliran angin bergerak ke sisi kiri dan kanan sekaligus



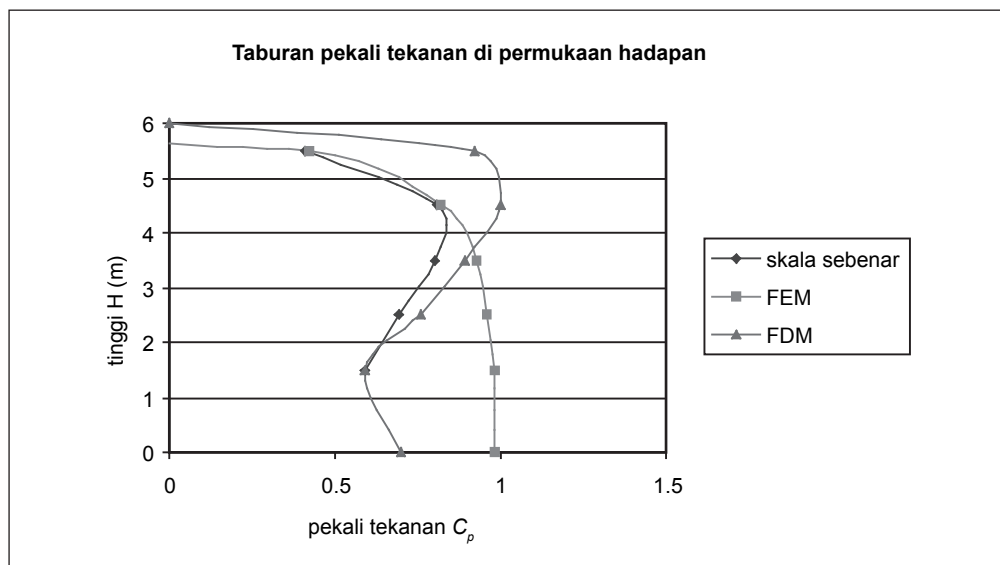
Rajah 9a. Keputusan taburan pekali tekanan C_p di permukaan hadapan model dengan pelbagai bilangan elemen



Rajah 9b. Keputusan taburan pekali tekanan C_p di permukaan bumbung model dengan pelbagai bilangan elemen



Rajah 9c. Keputusan taburan pekali tekanan C_p di permukaan belakang model dengan pelbagai bilangan elemen



Rajah 10a. Perbandingan taburan pekali tekanan C_p pada permukaan hadapan model kiub 6 m

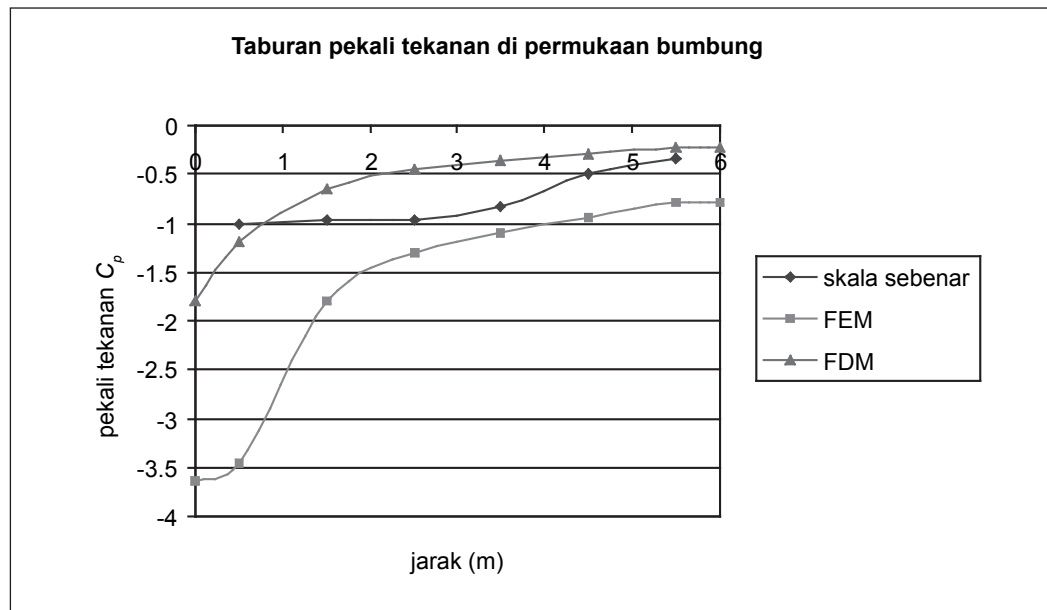
mengurangkan hentaman aliran di permukaan hadapan. Simulasi Easom (2000) dengan kaedah FDM yang dijalankan dalam tiga dimensi telah berjaya mendapatkan bentuk lengkung yang menyerupai nilai C_p di tapak. Walau bagaimanapun nilai C_p yang diperoleh masih lebih besar berbanding nilai sebenar di tapak.

Manakala di permukaan bumbung (Rajah 10b), keputusan FEM telah menganggarkan tekanan sedutan yang berlebihan berbanding FDM. Anggaran yang berlebihan dan bentuk lengkung yang lebih kurang sama juga diperoleh dalam simulasi kaedah FDM. Keadaan yang sama juga berlaku di permukaan belakang model

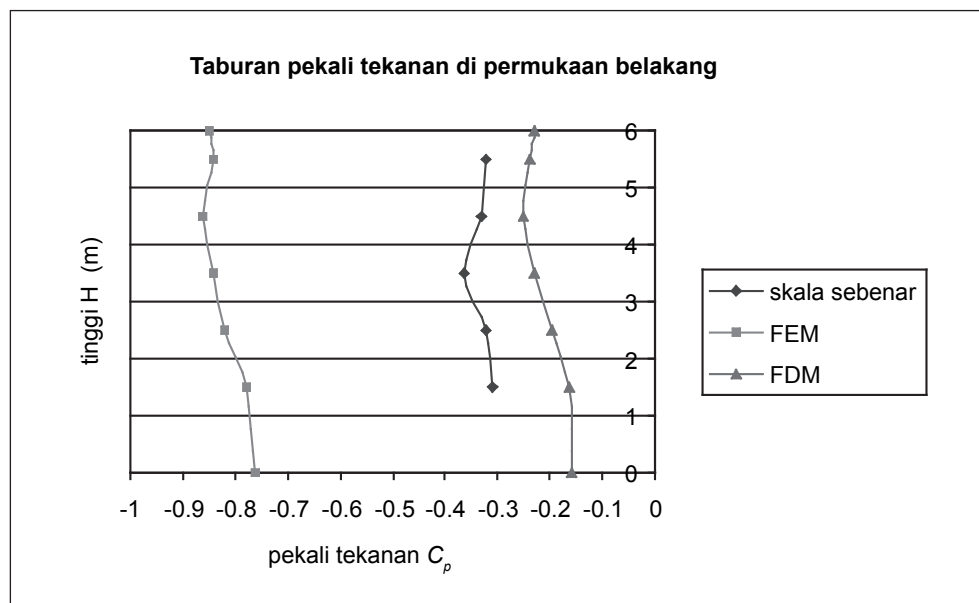
(Rajah 10c) di mana keputusan simulasi FEM memberikan anggaran tekanan berlebihan hampir 60% berbanding dengan skala sebenar. Walau bagaimanapun keputusan lengkung C_p yang diperoleh dalam kaedah FEM masih mengikut bentuk yang sama seperti lengkung C_p dari pengukuran sebenar berbanding dengan kaedah FDM.

KESIMPULAN

Berdasarkan keputusan simulasi ke atas dua model dalam kajian ini, kesimpulan dapat dibuat bahawa pekali tekanan C_p yang



Rajah 10b. Perbandingan taburan pekali tekanan C_p pada permukaan bumbung model kiub 6 m



Rajah 10c. Perbandingan taburan pekali tekanan C_p pada permukaan belakang model kiub 6 m

diperoleh dengan kaedah FEM melalui simulasi aliran gelora $k-\epsilon$ berupaya digunakan dalam menganggar taburan aliran dan beban angin yang terhasil. Ini adalah kerana corak dan profil lengkung C_p yang diperoleh menghampiri profil skala sebenar dan setanding dengan kaedah FDM dan FVM yang telah lama digunakan dalam teknik Dinamik Bendalir Berkomputer (CFD). Walau bagaimanapun pada permukaan bumbung dan permukaan belakang keputusan jelas menunjukkan kaedah FEM memberi anggaran yang lebih besar berbanding dengan kaedah yang lain dalam kajian ini. Keadaan ini mungkin berlaku kerana pembahagian elemen yang tidak cukup kecil dalam kawasan kajian serta pengaruh panjang sesuatu model tidak diambil kira apabila simulasi dijalankan dalam dua dimensi. Memandangkan aplikasi kaedah FEM dalam dua dimensi masih boleh diterima

walaupun dengan keputusan anggaran yang lebih besar maka kajian selanjutnya dalam tiga dimensi perlulah dikembangkan berbanding dengan kaedah FDM dan FVM yang telahpun diuji dengan meluas dalam tiga dimensi. Begitu juga aplikasi kaedah FEM terhadap tindakan angin ke atas pelbagai bentuk struktur juga perlu diselidiki bagi mengesahkan dan meyakinkan para jurutera terhadap penggunaan teknologi kejuruteraan angin berkomputer yang setanding dengan keputusan pengukuran di makmal terowong angin.

PENGHARGAAN

Penghargaan dan ucapan terima kasih kepada Prof. Madya Dr. Shahrir Abdullah yang telah meminjamkan perisian FEMLAB versi 2.3 untuk kajian ini.

RUJUKAN

- ASCE. 1987. Wind Loading and Wind-Induced Structural Response. A State-of-the-art report prepared by the Committee on Wind Effects of the Committee on Dynamic Effects of the Structural Division of the American Society of Civil Engineers. ASCE, New York.
- Choon, K.E. 2005. *Penggunaan Kaedah Unsur Terhingga Dalam Kejuruteraan Angin*. Tesis Sarjana Muda. Bangi: Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Douglas, J.F., Gasiorek, J.M. & Swaffield, J.A. 2001. *Fluid Mechanics*, 4th Edition. Harlow, London: Prentice Hall.
- Easom G. 2000. *Improved Turbulence Models for Computational Wind Engineering*. Ph.D Thesis. University of Nottingham, United Kingdom.
- FEMLAB Multiphysics in MATLAB Version 2.3, 2002. User's Guide (atas-talian) <http://C:\Matlab6p1\FEMLAB23\doc\chem\index.htm>. (30 Oktober 2002).
- Hoxey, R.P., Robertson, A.P., Basara, B. & Younis, B.A. 1993. Geometric Parameters That Affect Wind Loads on Low-Rise Buildings: Full-scale and CFD Experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50: 243-252.
- Hughes, T.J.R. & Jansen, K. 1993. Finite Element Methods in Wind Engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46 & 47: 297-313.
- Mikkelsen, A.C. & Livesey, F.M. 1995. Evaluation of The Use of The Numerical $k-\epsilon$ Model Kameleon II For Predicting Wind Pressures on Building Surfaces. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57: 375-389.
- Murakami, S. & Mochida, A. 1988. 3-D Numerical Simulation of Airflow Around A Cubic Model By Means of The $k-\epsilon$ Model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31: 283-303.
- Osman, S.A., Khalim, A.R., Majid, T. & Karim, O.A. 2003. Proceeding of The 3rd International Conference on Advances in Strategic Technologies, Vol. II, pp. 1065-1070. Bangi: Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Selvam, R.P. 1992. Computation of Pressures on Texas Tech Building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44: 1619-1627.
- Shahrir L.M. 2004. Understanding Wind And Its Interaction With Structure. *A Quaterly Newsletter of The Malaysian Structural Steel Association* 1: 11-15.
- Versteeg H.K. & Malalasekera W. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*. London: Longman Scientific and Technical.