

Kesan Agregat ke Atas Kelakuan Dinamik Konkrit Menggunakan Kaedah Unsur Terhingga

Aggregate Impact on Dynamic Behavior of Concrete Using Finite Element Method

Siew Feng Yong, Azrul A. Mutalib* & Firdaus Mohd Hamzah

ABSTRACT

Konkrit merupakan bahan komposit yang penting dan sering digunakan dalam sektor pembinaan kerana konkrit mempunyai sifat kekuatan mampatan yang tinggi. Agregat terdiri daripada 70% isi padu konkrit, maka sifat agregat dipercayai memberi kesan yang besar terhadap tingkap laku konkrit semasa struktur konkrit dikenakan beban dinamik yang kuat (contohnya letupan gas atau senjata, kejatuhan batu dan gempa bumi). Kelakuan konkrit di bawah beban dinamik boleh diketahui dengan mengenal pasti faktor peningkatan dinamik (DIF). Semasa konkrit di bawah tekanan statik yang rendah, corak keretakan konkrit berlaku pada zon peralihan antara muka (ITZ) tetapi jika konkrit di bawah tekanan yang tinggi, keretakan berlaku melalui agregat, maka ia akan meningkatkan kekuatan konkrit. Penyelidikan ini bermatlamat untuk mengkaji kesan agregat biasa ke atas kelakuan dinamik konkrit dengan menggunakan kaedah unsur terhingga yang menggunakan perisian LS-DYNA. Model konkrit yang berlainan agregat iaitu agregat granit, basalt, batu kapur, dan batu pasir telah digunakan dalam kajian ini. Simulasi berangka model konkrit di bawah mampatan pada kadar tekanan yang berbeza dijalankan. Pada kadar terikan yang rendah, kerosakan pada konkrit berlaku pada mortar sahaja dan tidak ketara. Manakala, pada terikan yang tinggi, kerosakan berlaku pada agregat dan juga mortar dan kerosakan adalah menonjol. Basalt mempunyai kekuatan yang tinggi mempunyai nilai DIF yang paling tinggi berbanding dengan agregat yang lain di mana batu kapur mencatatkan nilai DIF yang paling rendah.

Kata kunci: Agregat; faktor peningkatan dinamik; kadar terikan

ABSTRAK

Concrete is a composite material that is important and is often used in construction because concrete has a high compressive strength. Aggregates consisting of 70% by volume of concrete, thus the aggregate properties is believed to affect the behavior of concrete during concrete structures subjected to dynamic loads strongly (e.g. gas explosions or weapons, falling rocks and earthquakes). The behavior of concrete under dynamic loads can be found by identifying the dynamic increase factor (DIF). When concrete under static and low-rate loading, concrete material damage is governed by the relatively weaker strength of mortar and the interface transition zone (ITZ), but if the concrete under high-speed loading, cracking propagate through aggregates, therefore results in increase the strength of concrete. This research aims to study the effects of normal aggregates on the dynamic behavior of concrete by using the finite element method using LS-DYNA software. Models of concrete with different types of aggregates such as granite, basalt, limestone, and sandstone are used in this study. Numerical simulation of model concrete under compressive stress at different strain rate is carried out. At low strain rate loading, concrete failure only occurred in the mortar and not too obvious. While, at high strain rate loading, failure occurred in the aggregate and failure in the mortar is apparent. Basalt that is high strength has high DIF value and limestone has the lowest value of DIF.

Keywords: Aggregate; dynamic increase factor; strain rate

PENGENALAN

Konkrit adalah salah satu daripada bahan binaan yang paling banyak digunakan dalam struktur awam dan struktur tentera. Struktur tersebut mungkin terdedah kepada hentaman dan beban letupan semasa hayat perkhidmatan dan oleh itu struktur perlu direka bentuk untuk menentang kadar beban dinamik yang tinggi. Bagi reka bentuk yang boleh dipercayai dan penilaian yang tepat mengenai prestasi struktur konkrit di bawah beban dinamik, pemahaman sifat dinamik konkrit

adalah diperlukan (Hao et al. 2010). Sebilangan besar uji kaji makmal telah menunjukkan bahawa kekuatan dinamik konkrit adalah yang lebih tinggi berbanding dengan kekuatan statik (Hasan et al. 2010; Hao et al. 2010; Hao & Hao 2013; Malvar & Crawford 1998; Xu et al. 2012) . Peningkatan faktor dinamik (DIF), didefinisikan sebagai nisbah kekuatan dinamik terhadap kekuatan statik, lazimnya dianggap sebagai ciri bahan yang dicadangkan untuk digunakan dalam reka bentuk dan analisis struktur konkrit terhadap beban dinamik. Sifat-sifat dinamik boleh didapati melalui uji kaji,

dari spesimen konkrit, menurut ujian piawai kaedah ASTM C 215 (Giner et al. 2011).

Berdasarkan kepada data uji kaji, banyak hubungan DIF berkenaan dengan kadar terikan adalah didapati daripada rujukan mengenai pemampatan dan ketegangan (Hasan et al. 2010; Hao et al. 2010; Hao & Hao 2013; Xu et al. 2012). Beberapa kod amalan seperti Comité Euro-International du Béton (CEB) juga memberikan cadangan DIF bahan konkrit yang boleh digunakan dalam reka bentuk dan analisis (Malvar & Crawford 1998). Pelbagai cara telah dilakukan untuk mengkaji konkrit pada kadar terikan dan tekanan yang tinggi. Teknik yang selalu digunakan adalah dengan menggunakan radas Bar Tekanan Hopkinson Terbelah (Hao & Hao 2013) dan sistem hentaman jatuhnya berat badan (Xu et al. 2012). Oleh kerana kadar terikan yang didapati di dalam eksperimen tidak boleh mencapai kadar terikan yang tinggi (beban letupan), beberapa kajian telah dijalankan dengan menggunakan kaedah unsur terhingga untuk memodelkan konkrit terhadap beban kadar terikan tinggi. Hasan et al. (2010) telah menjalankan kajian simulasi spesimen konkrit kekuatan biasa berbentuk silinder dengan 36 mm garis pusat dan panjang 36 mm untuk menyiasat kelakuan dinamik di bawah kadar terikan 350, 500 dan 700 s-1 menggunakan perisian ABAQUS/Explicit. Didapati, DIF spesimen konkrit meningkat pada kadar 3 hingga 5. Perisian AUTODYN digunakan di dalam kajian dalam Hao et al. (2010) untuk menjalankan analisis berangka ujian SHPB pada kadar terikan yang berbeza menggunakan dua tipikal paksi simetri model mesoskala dan homogen untuk menyiasat kesan sisi kurungan inersia pada dinamik konkrit kerana dipercayai bahawa sisi kurungan inersia dipengaruhi oleh saiz spesimen. DIF diperolehi daripada model mesoskala menjadi semakin besar berbanding dengan model homogen kerana kekuatan agregat juga menyumbang kepada kekuatan dinamik konkrit disebabkan kerosakan agregat. Pemerhatian ini menunjukkan kekuatan dinamik mampatan meningkat pada kadar terikan tinggi disebabkan kelakuan bahan konkrit dan kesan sisi kurungan inersia.

Parameter-parameter yang mempengaruhi ubah bentuk, penyusutan bebas, ubah bentuk konkrit dibawa beban kadar tinggi belum difahami dengan jelas. Bentuk, tesktur, sifat mineralogi dan kekuatan agregat kasar adalah antara beberapa parameter yang penting dalam menentukan ciri

konkrit memandangkan agregat terdiri daripada lebih kurang 80% isipadu konkrit (Mucteba 2012). Elastik modulus konkrit juga dipengaruhi oleh bentuk dan tekstur agregat. Kajian oleh Makani et al. (2010) telah mendapati bahawa konkrit campuran agregat berbentuk ellipsoid mempunyai elastik modulus yang lebih tinggi berbanding dengan agregat berbentuk bulat. Selain itu, zon peralihan antara muka (ITZ) berlaku pada konkrit juga berbeza semasa dibawa beban yang berlainan. Pada kadar beban yang rendah dan statik, keretakan konkrit berlaku pada mortar yang berkekuatan lemah dan zon peralihan antara muka (ITZ) iaitu di antara mortar dan agregat. Pada kadar beban yang tinggi, keretakan yang disebabkan oleh kelajuan gelombang kejutan yang tinggi tidak berlaku di zon berkekuatan lemah, malah keretakan melalui agregat, dan menyebabkan peningkatan kekuatan konkrit (Hao et al. 2010).

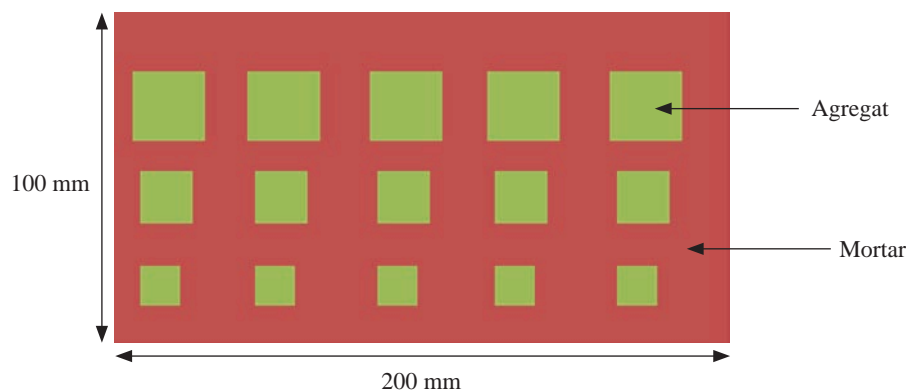
Untuk mengetahui keberkesanan agregat dalam konkrit, analisis yang terperinci boleh dilakukan untuk mengenai kesan agregat ke atas tindak balas dinamik konkrit terhadap beban terikan tinggi yang dikenakan. Ubah bentuk dan terikan plastik dan agihan tegasan konkrit harus dianalisis dan dikaji untuk memahami sifat dan tahap kebolehtahanlasakan konkrit dengan pelbagai jenis agregat.

PEMODELAN ANALISIS UNSUR TERHINGGA

Dalam kajian ini, agregat, mortar, bar tuju dan bar pemindah Bar Tekanan Terbelah Hopkinson (SPHB) dimodelkan secara mesoskala dan model homogen juga dibangunkan untuk membuat perbandingan dengan model mesoskala. Perisian LS-DYNA digunakan untuk menjalankan analisis unsur terhingga dan model bahan akan disahkan dengan kajian lepas oleh Hao et al. (2010).

GEOMETRI KONKRIT

Rajah 1 menunjukkan geometri model mesoskala dengan kumulatif taburan saiz agregat yang dibangunkan dalam kajian ini. Kajian ini hanya memberi tumpuan kepada kesan jenis dan peratusan agregat yang berbeza. Maka, agregat disusun dengan secara teratur dan berbentuk segi empat sama bagi memudahkan kerja permodelan.



RAJAH 1. Geometri konkrit

MODEL BAHAN

Model bahan hidro-dinamik iaitu model keplastikan konkrit (*Mat_Concrete_Damage_REL3) diguna pakai untuk mensimulasikan simen mortar dan agregat. Bar tuju dan bar pemindah dalam ujian SHPB dimodelkan menggunakan model bahan satu isotropik bahan elastik (*Mat_Elastic). Sifat bahan adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Jadual 1 (Hao et al. 2010).

JADUAL 1. Sifat bahan

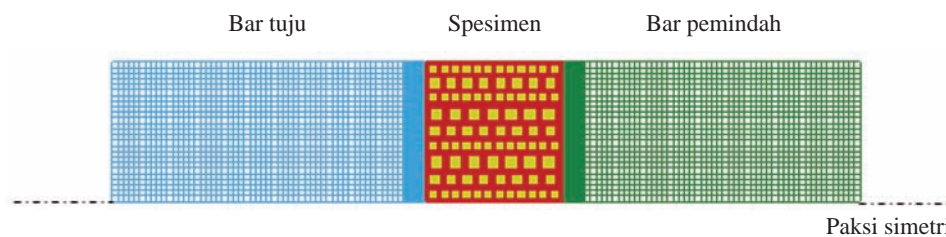
Input parameter	Agregat	Mortar	Bar SPHB
Ketumpatan asal, ρ_o (kg/m ³)	2700	2750	7800
Kekuatan mampatan tidak terkurung, f'_c (MPa)	200	80	-
Nisbah Poisson, ν	0.25	0.2	0.3
Modulus ricih, G (GPa)	17.4	15.8	-
Faktor penukaran, a_0	-1.45×10^{-4}	-1.45×10^{-4}	-
Modulus pukal, K (GPa)	50	14	-
Modulus keanjalan, E (GPa)	60	30	200

KESAN KADAR TERIKAN

Persamaan DIF yang disyorkan oleh CEB digunakan di dalam kajian ini untuk menentukan kadar terikan kekuatan mampatan dan tegangan mortar (Malvar & Crawford 1998). Manakala, DIF untuk kekuatan mampatan dan kekuatan tegangan bagi agregat adalah berdasarkan formula yang dicadangkan daripada uji kaji Zhou dan Hao (2008).

KEADAAN SEMPADAN

Keadaan sempadan bagi model sampel konkrit, bar tuju dan bar pemindah telah menggunakan ketetapan peralihan pada arah X dan Z tanpa putaran. Manakala, permukaan atas dan bawah model SHPB menggunakan ketetapan peralihan pada X sahaja, iaitu tidak putar pada arah Y dan Z. Keadaan sempadan pada hujung bar pemindah adalah hujung tetap, tidak berputar atau teralih pada arah X, Y, dan Z. Kumpulan nod-nod telah ditetapkan terlebih dahulu bagi memudahkan proses penetapan sempadan dilakukan. Konfigurasi pemodelan SHPB adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 2.



RAJAH 2. Konfigurasi pemodelan SHPB

PERMUKAAN SENTUHAN

Bagi mensimulasikan hubungan antara bar tuju dan bar pemindah dengan spesimen, algoritma sentuhan 2D LS-DYNA, iaitu, automatik permukaan kepada permukaan (ASTS) digunakan untuk mensimulasikan permukaan sentuhan mortar dengan bar. Manakala, algoritma sentuhan pemutus permukaan kepada permukaan (ASTST) digunakan bagi permukaan mortar dengan agregat.

MENENTUKAN PERATUSAN DAN SAIZ AGREGAT

Dalam model mesoskala yang dibangunkan dalam kajian berangka ini, taburan saiz zarah agregat dihasilkan mengikut lengkung pengredan Fuller (Hao et al. 2010). Jumlah isi kandungan agregat di dalam konkrit adalah ditetapkan berdasarkan jumlah isi kandungan agregat yang diperlukan dalam menghasilkan konkrit kekuatan ciri sebanyak 35 MPa. Berdasarkan kepada kaedah Jabatan Alam Sekitar (DoE), bagi menghasilkan konkrit kekuatan ciri sebanyak 35 MPa, jumlah isi padu agregat kasar adalah sebanyak 47% daripada jumlah isi padu keseluruhan. Bagi memudahkan pemodelan komputer, bentuk agregat dianggap empat segi sama dalam spesimen bersaiz 200 mm × 100 mm, maksimum saiz agregat adalah 12 mm, agregat dibahagikan kepada

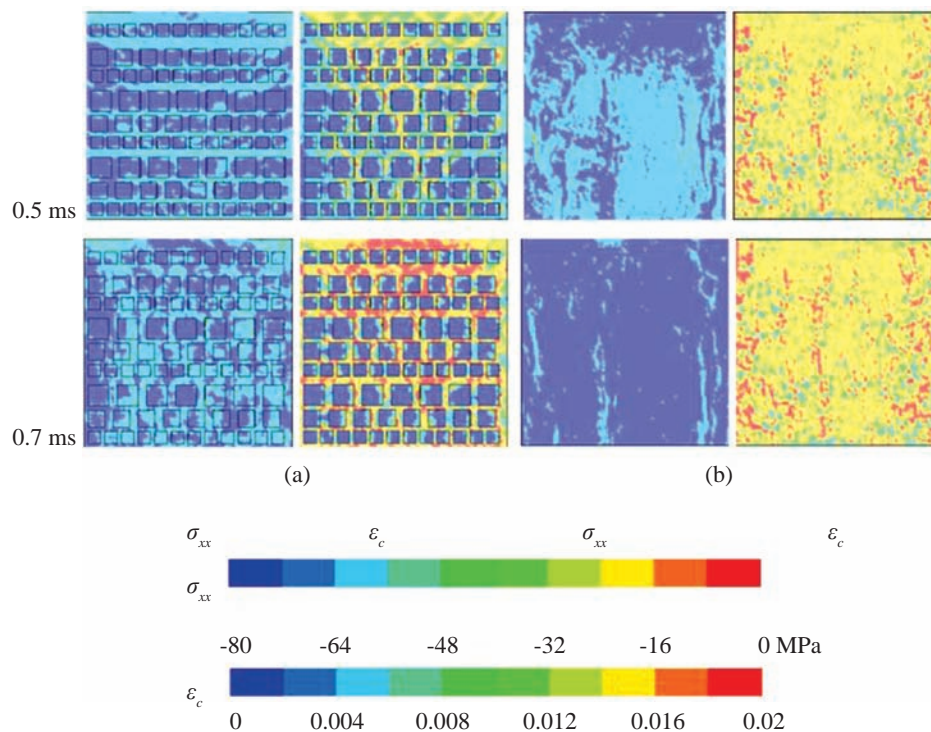
tiga kumpulan yang bergaris pusat 6 ~ 8 mm, 8 ~ 10 mm dan 10 ~ 12 mm. Berdasarkan lengkung Fuller, peratusan bagi ketiga-tiga kumpulan agregat adalah sebanyak 17.6%, 15.5% dan 13.9%.

PENGESAHAN MODEL

Satu ujian jejaringan sensitif dianalisis pada model unsur terhingga. Empat saiz jejaring yang berbeza, iaitu 2.0, 1.0, 0.8 dan 0.4 mm digunakan untuk memodelkan spesimen konkrit yang berlainan agregat. Kajian penumpuan menunjukkan bahawa dengan menggunakan saiz jaring 0.4 dan 0.8 mm, beban pada spesimen yang dicatatkan adalah hampir sama. Maka saiz jejaring 0.8 mm digunakan di dalam kajian seterusnya.

SIFAT DINAMIK KONKRIT PADA KADAR TERIKAN TINGGI

Rajah 3 menunjukkan sifat ubah bentuk, agihan tegasan dan terikan plastik bagi spesimen konkrit mesoskala dan homogen model pada kadar terikan 10s⁻¹. σ_{xx} adalah tegasan paksi x, ϵ_c adalah terikan plastik efektif. Semasa konkrit di bawah kadar terikan yang rendah, agihan tegasan dan terikan plastik meningkat dengan seragam. Pada masa 0.5 ms, konkrit



RAJAH 3. Ubah bentuk, agihan tegasan dan terikan plastik dalam spesimen konkrit di bawah tekanan 10s-1: (a) mesoskala, (b) homogen

homogen model telah mencapai terikan plastik yang tinggi, hampir keseluruhan konkrit telah mengalami hakisan, di mana ia menunjukkan keruntuhan konkrit tersebut. Tetapi, konkrit mesoskala model mencapai nilai maksimum terikan plastik pada 0.7 ms dan ini menunjukkan bahawa agregat memberi sumbangan kepada nilai kekuatan konkrit. Selain daripada itu, model konkrit mesoskala juga memberikan ubah bentuk konkrit dan agregat yang jelas. Pada kadar terikan yang rendah dan juga tinggi, ubah bentuk konkrit dan agregat boleh diperhatikan dalam model mesoskala. Konkrit adalah bahan heterogen yang bercampuran mortar, agregat, dan ITZ, keputusan mungkin tidak tepat jika menggunakan sifat mortar dalam menentukan sifat dinamik konkrit.

FAKTOR PENINGKATAN DINAMIK

Faktor peningkatan dinamik boleh didapati dengan membahagikan nilai kekuatan mampatan dinamik kepada nilai kekuatan mampatan statik. Konsep ini telah dicadangkan untuk digunakan dalam reka bentuk dan analisis struktur konkrit terhadap beban dinamik.

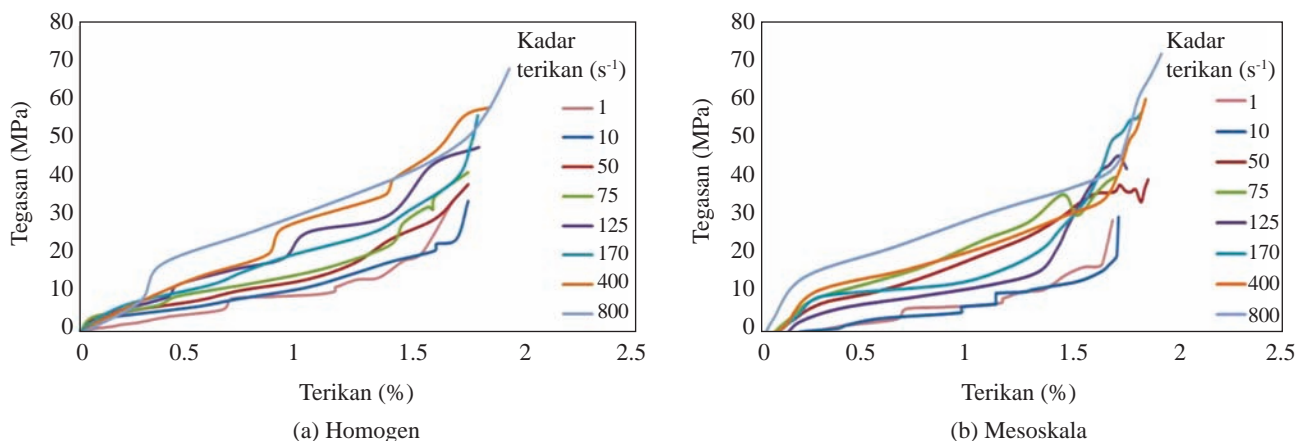
MODEL MESOSKALA DAN HOMOGEN

Rajah 4a dan 4b menunjukkan tegasan melawan terikan bagi model konkrit mesoskala dan homogen. Faktor peningkatan dinamik bagi kekuatan mampatan untuk model konkrit homogen dan mesoskala di bawah pelbagai jenis kadar terikan telah diplotkan dalam Rajah 5. Rajah tersebut juga memberi perbandingan antara DIF yang didapati daripada kajian Hao et al. (2010) yang telah menjalankan kajian tentang analisis

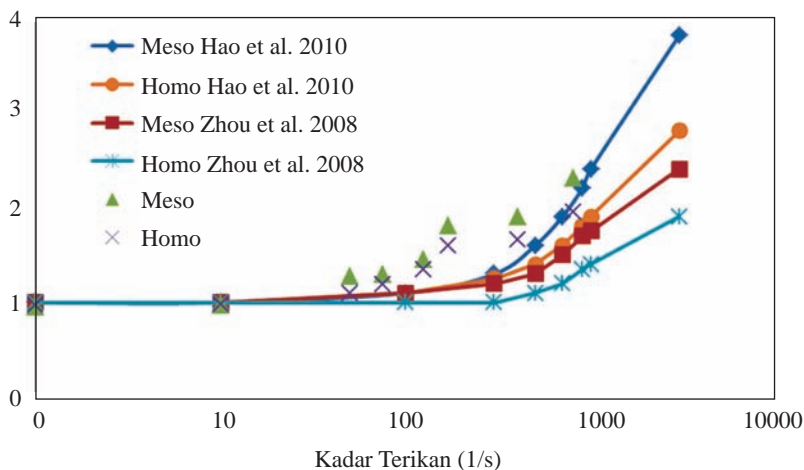
berangka kesan sisi kurung inersia ke atas sifat mampatan konkrit pada kadar terikan yang tinggi. Dalam kajian Hao et al. (2010), saiz spesimen konkrit adalah 200 mm × 100 mm (jejari × panjang). Saiz spesimen pula adalah 12 mm × 6 mm (jejari × panjang). Keputusan menunjukkan bahawa model konkrit homogen dan model konkrit mesoskala mempunyai DIF yang sama pada kadar terikan yang rendah contohnya sebelum 50 s⁻¹. Tetapi, pada kadar terikan yang tinggi, DIF bagi model konkrit mesoskala adalah lebih besar daripada model konkrit homogen. Hal ini kerana kekuatan agregat menyumbang kepada kekuatan mampatan dinamik konkrit yang disebabkan oleh kerosakan agregat pada kadar terikan yang tinggi. Keputusan ini adalah konsisten dengan keputusan Hao et al. (2010). Selain daripada itu, didapati juga bahawa saiz spesimen juga mempengaruhi nilai DIF.

JENIS AGREGAT BERLAINAN

Dalam kajian ini, agregat jenis granit, basalt, batu kapur dan batu pasir digunakan untuk menentukan kesan jenis agregat ke atas sifat dinamik konkrit pada kadar terikan yang tinggi. Berbanding dengan agregat granit, agregat basalt mempunyai graviti tentu yang lebih tinggi, dan nilai penyerapan dan lelasan yang lebih rendah. Konkrit beragregat basalt mempunyai kekuatan mampatan, tegangan kekuatan dan modulus pecah yang lebih tinggi (Hamadallah 2008). Konkrit beragregat batu kapur yang kebaikkan dari segi teknikal dan ekonomi menunjukkan perlindungan optimum terhadap hakisan bertetulang dalam konkrit bertetulang. Penambahan batu kapur dalam bancuhan konkrit mengurangkan kedalaman pengkarbonatan dan jumlah keliangan dalam mortar (Tsvilisa et al. 2000). Agregat batu pasir lebih ringan dan murah,



RAJAH 4. Tegasan melawan terikan bagi model konkrit



RAJAH 5. DIF melawan kadar terikan bagi model konkrit mesoskala dan homogen

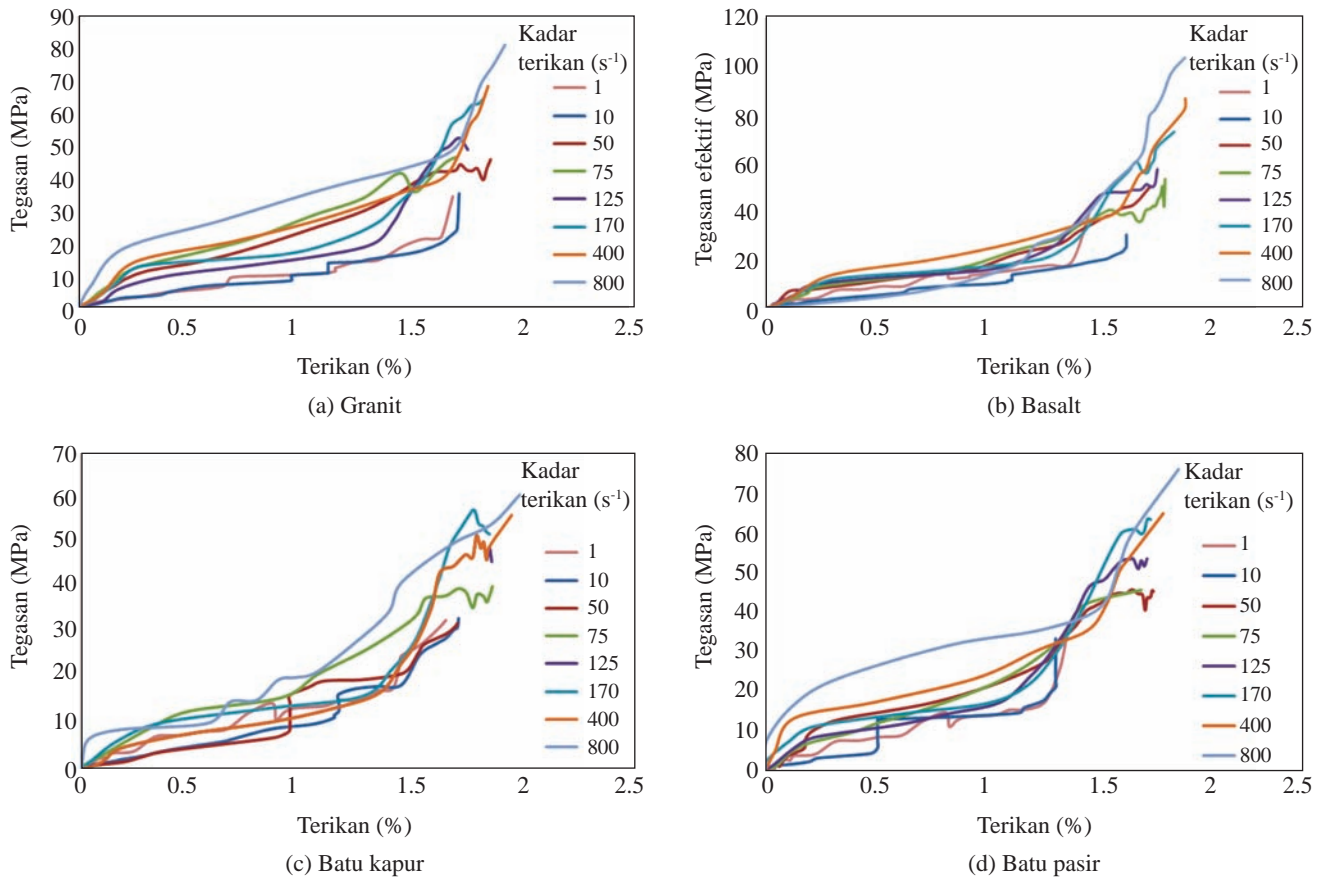
keberaliran haba yang rendah menyejuk pedalaman pada cuaca panas. Agregat batu pasir dengan wasap silica (silica fume) bertambah kekuatan mampatan dan modulus keanjalan konkrit. Agregat batu pasir membolehkan tekanan diagihkan dengan lebih seragam dalam konkrit dan rasuk menunjukkan kekuatan lenturan yang lebih tinggi pada beban muktamad (Kumar et al. 2007). Jadual 2 menunjukkan cirian parameter-parameter bagi agregat basalt, batu kapur dan batu pasir.

Rajah 6 menunjukkan tegasan melawan terikan bagi model konkrit mesoskala yang berlainan agregat. Faktor

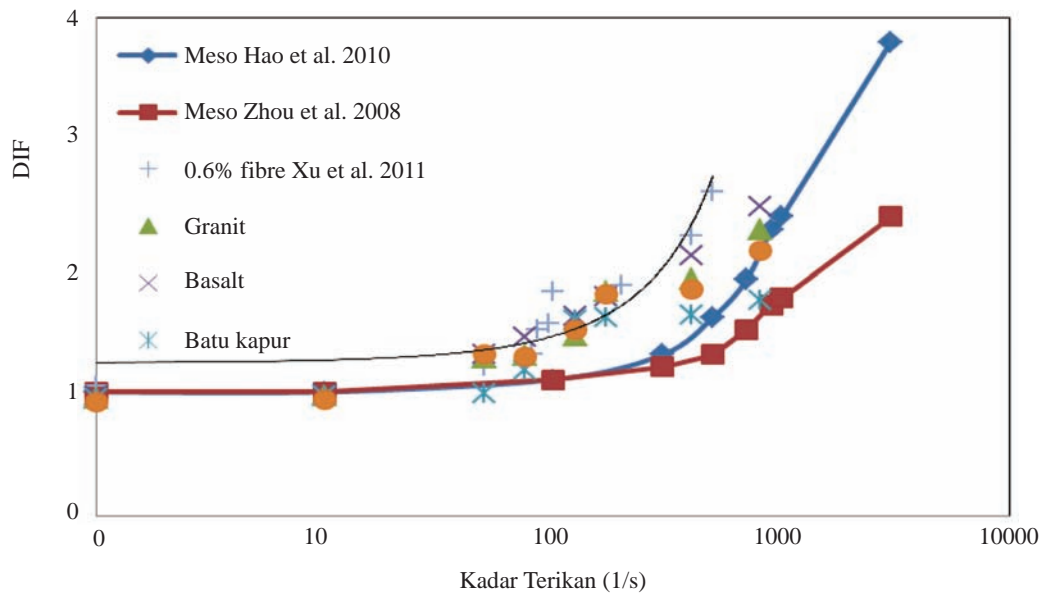
peningkatan dinamik bagi kekuatan mampatan untuk konkrit beragregat granit, basalt, batu kapur dan batu pasir di bawah pelbagai jenis kadar terikan pula diplotkan dalam Rajah 7. Rajah tersebut juga memberi perbandingan antara DIF yang didapati daripada kajian Hao et al. (2010) yang menjalankan kajian tentang analisis berangka kesan sisi kurungan inersia ke atas sifat mampatan konkrit pada kadar terikan yang tinggi.

JADUAL 2. Parameter agregat bagi model konkrit (Price 2009)

Sifat Bahan	Granit	Basalt	Batu kapur	Batu pasir
Ketumpatan asal ρ_o (kg/m ³)	2700	2770	2700	2000
Kekuatan mampatan tidak terkurung f'_c (MPa)	250	300	250	170
Nisbah Poisson ν	0.16	0.15	0.26	0.30
Modulus ricih g (GPa)	17.4	35	30	16.9
Modulus keanjalan E (GPa)	40	50	35	10
Faktor penukaran a_0	-1.45×10^{-4}	-1.45×10^{-4}	-1.45×10^{-4}	-1.45×10^{-4}
Modulus pukal K (GPa)	50	70	51	25
Rumusan unsur	14	14	14	14



RAJAH 6. Tegasan melawan terikan bagi model konkrit berlainan agregat



RAJAH 7. DIF bagi konkrit beragregat granit, basalt, batu kapur, dan batu pasir

Daripada rajah tersebut, konkrit yang beragregat berlainan mempunyai DIF yang berbeza di bawah kadar terikan yang berbeza. Keputusan menunjukkan bahawa model konkrit mempunyai DIF yang sama pada kadar terikan yang rendah contohnya sebelum 50 s⁻¹ bagi kesemua model konkrit yang berlainan agregat. Ini menunjukkan bahawa pada kadar

terikan yang rendah, jenis agregat yang digunakan dalam konkrit tidak mempengaruhi kekuatan mampatan dinamik konkrit. Keadaan yang sama ini juga dicatatkan dalam kajian Hao et al. (2010). Kajian Hao et al. (2010) menyatakan bahawa apabila model konkrit dikenakan beban pada kadar terikan yang rendah, model konkrit mesoskala dan homogen

memberikan nilai DIF yang rendah, dan ini menunjukkan bahawa agregat dalam model konkrit mesoskala tidak menyumbang kepada nilai kekuatan dinamik konkrit. Hal ini kerana kerosakan konkrit hanya berlaku pada mortar. Walau bagaimanapun, DIF konkrit meningkat dengan peningkatan kadar terikan dan keadaan ini boleh diperhatikan selepas pada kadar terikan 50 s^{-1} . Keputusan ini adalah konsisten dengan keputusan Hao et al. (2010) di manatelah menyatakan bahawa DIF konkrit meningkat selepas kadar terikan 100 s^{-1} .

Dalam kajian ini, didapati bahawa konkrit beragregat basalt memberikan DIF yang paling tinggi manakala konkrit beragregat batu kapur memberikan DIF yang paling rendah. Daripada keempat-empat jenis agregat ini, basalt mempunyai kekuatan yang paling tinggi berbanding dengan agregat yang lain. Ini membuktikan bahawa kekuatan agregat mempengaruhi kekuatan mampatan dinamik konkrit. Oleh itu, jenis agregat juga memainkan peranan yang penting dalam menentukan kekuatan mampatan konkrit. Jadual 3 adalah penjadualan keputusan DIF bagi kekuatan mampatan konkrit mesoskala yang berlainan agregat dalam ujian analisis berangka ini.

JADUAL 3. Keputusan DIF bagi kekuatan mampatan ujian analisis berangka

Kadar Terikan (s^{-1})	Faktor Peningkatan Dinamik (DIF)			
	Granit	Basalt	Batu Kapur	Batu Pasir
1	0.95	0.97	0.95	0.92
10	0.97	0.98	0.97	0.94
50	1.27	1.30	0.99	1.30
75	1.29	1.44	1.17	1.28
125	1.45	1.61	1.58	1.50
170	1.80	1.76	1.60	1.78
400	1.90	2.09	1.62	1.82
800	2.30	2.48	1.74	2.13

KESIMPULAN

Berdasarkan kepada analisis unsur terhinnga kesan agregat terhadap sifat dinamik konkrit pada beban berkadar tinggi, kesimpulan berikut telah diperolehi;

1. Faktor peningkatan dinamik (DIF) bagi model konkrit mesoskala adalah lebih tinggi berbanding dengan model konkrit homogen.
2. Pada kadar terikan yang rendah iaitu kadar terikan yang kurang daripada 50 s^{-1} , DIF konkrit tidak dipengaruhi oleh jenis agregat dalam konkrit, DIF konkrit adalah seragam walaupun beragregat berlainan digunakan. Ini membuktikan bahawa pada kadar terikan yang rendah, kekuatan konkrit dipengaruhi oleh bahan mortar sahaja.
3. Pada kadar terikan yang tinggi, iaitu lebih daripada 100 s^{-1} , DIF konkrit yang beragregat berlainan adalah berbeza. Konkrit beragregat basalt mempunyai DIF yang lebih

tinggi dan konkrit beragregat batu kapur mempunyai DIF yang lebih rendah. Tambahan pula, DIF konkrit semakin meningkat dengan peningkatan kadar terikan selepas kadar terikan 100 s^{-1} . Ini membuktikan bahawa jenis agregat yang digunakan dalam konkrit mempengaruhi kekuatan dinamik konkrit.

Memandangkan agregat terdiri daripada 70% isi padu konkrit dan corak keretakan konkrit berlaku melalui agregat semasa dikenakan beban dinamik yang kuat, maka sifat agregat memberi kesan yang besar terhadap kelakuan konkrit. Oleh yang demikian, jurutera boleh mereka bentuk struktur menggunakan agregat yang berbeza dan meramal kekuatan maksimum struktur semasa dikenakan beban dinamik yang tinggi.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Geran Penyelidikan FRGS/1/2015/TK01/UKM/02/4 dan AP-2015-011 kerana membantu menjayakan kajian ini.

RUJUKAN

- Giner, V. T., Ivorra, S., Baeza, F. J., Zornoza, E. & Ferrer, B. 2011. Silica fume admixture effect on the dynamic properties of concrete. *Construction and Building Materials* 25(8): 3272-3277.
- Hamadallah Mohammad Al-Baijat. 2008. The use of basalt aggregate in concrete mix in Jordan. *Jordan Journal of Civil Engineering* 2(1).
- Hao, Y., Hao, H., Li, Z. & Publishing, M. 2010. Numerical analysis of lateral inertial confinement effects on impact test of concrete compressive material properties. *International Journal of Protective Structures* 1(1): 145-176.
- Hao, Y. & Hao, H. 2013. Dynamic compressive behavior of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests. *Construction and Building Materials* 48: 521-532.
- Kumar, P.S., Mannan, M.A., Kurian, V.J. & Achuytha, H. (2007). Investigation on the flexural behaviour of high-performance reinforced concrete beams using sandstone aggregates. *Building and Environment* 42: 2622-2629.
- Malvar, L. J. & Crawford, J.E. 1998 Dynamic increase factors for concrete. Twenty eight DDES Seminar, Orlando, FL. August 1998.
- Makani, A., Vidal, T., Pons, G. & Escadeillas, G. 2010. Time-dependent behaviour of high performance concrete: influence of coarse aggregate characteristics, *EPJ Web of Conferences* 6(2010), 03002.
- Mucteba, U. 2012. The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 37: 533-540
- Price, D. G. 2009. *Engineering Geology – Principles and Practices*. de Freitas, M.H. (Ed.), Springer, 450.

- Tsivilisa, S., Batisa, G., Chaniotakisb, E., Grigoriadis, Gr. & Theodossisa, D. 2000. Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research* 30: 1679-1683.
- Xu, Z., Hao, H. & Li, H. N. 2012. Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading. *Construction and Building Materials* 26(1): 274-288.
- Zhou, X.Q. & Hao, H. 2008. Modelling of compressive behavior of concrete-like materials at high strain rate. *International Journal of Solids and Structures* 45: 4648-4661.

Yong Siew Feng
Azrul A. Mutalib*
Firdaus Mohd Hamzah
Jabatan Kejuruteraan Awam & Struktur
Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Malaysia
Phone: +603-8921 6755

*Penulis koresponden; email: azrulaam@ukm.edu.my