

Pengecilan Gelombang Tekanan dan Kilasan dalam Konkrit

Kamarudin Mohd. Yusof
Mohamad Pauzi Ismail

ABSTRAK

Penggunaan amplitud relatif gelombang ultrasonik bagi menilai kualiti konkrit diterangkan dalam kertas kerja ini. Selain frekuensi, serakan gelombang tekanan dan kilasan juga dipengaruhi oleh kesan ketakhomogen medium yang dirambat. Pengecilan gelombang tekanan dan kilasan yang disebabkan oleh serakan juga berbeza bagi sesuatu frekuensi. Ujikaji bagi memeriksa hubungan di antara kekuatan mampatan konkrit dengan amplitud relatif gelombang tekanan/kilasan dan halaju telah dilakukan. Keputusan ujikaji menunjukkan amplitud relatif dan halaju gelombang tekanan mempunyai kaitan yang rapat dengan kekuatan. Model gabungan amplitud dan halaju gelombang tekanan dicadangkan.

ABSTRACT

The use of relative amplitude of ultrasonic waves to evaluate concrete quality is described in this paper. Other than frequency, the scattering of pressure and shear waves is also influenced by inhomogenities of the propagated media. The attenuation of pressure and shear waves due to scattering differ for certain frequency. Experiments to examine the correlation between concrete compressive strength with relative amplitude of pressure/shear waves and velocity were performed. The results of experiment show that relative amplitude and pressure wave velocity have a good correlation with strength. Finally, a model of combined velocity and relative amplitude is proposed.

PENGENALAN

Penilaian kekuatan mampatan konkrit merupakan kaedah penentuan kualiti yang utama dalam industri pembinaan struktur konkrit. Penggunaan kaedah ujian tanpa musnah (NDT) telah digunakan dengan meluas disebabkan oleh tekniknya yang cepat, ekonomik dan tidak merosakkan struktur yang diuji. Teknik ultrasonik merupakan kaedah NDT yang paling sesuai bagi menganggarkan kekuatan konkrit. Walau bagaimanapun kaedah pengukuran halaju denyut ultrasonik hanya mampu memberikan ketepatan 20% sahaja [5, 12]. Gabungan halaju denyut dengan tukul lantunan seperti yang disarankan oleh ramai penyelidik [8, 12, 13, 17] boleh memberi ketepatan yang lebih tinggi, tetapi kaedah ini menambahkan kos dan masa. Tambahan pula tukul lantunan hanya memberi ukuran kekuatan permukaan bukannya kekuatan pukal. Pengukuran pengecilan gelombang tekanan [15, 16] pula terlalu dipengaruhi oleh kesan gandingan dan kelicinan permukaan yang mana memerlukan kepada penyediaan yang rapi bagi memperolehi keputusan yang memuaskan. Selain dari itu pembetulan terhadap jarak laluan alur perlu juga dipertimbangkan.

Tujuan utama kertaskerja ini ialah untuk memperkenalkan satu kaedah baru penentuan pengecilan iaitu dengan mengukur amplitud relatif bagi gelombang tekanan dan gelombang kilasan. Kaedah-kaedah klasik juga diuji dan dibandingkan dengan kaedah baru ini. Kaedah klasik yang dimaksudkan ialah pengukuran halaju gelombang tekanan, pengecilan gelombang tekanan dan penentuan modulus Young.

TEORI ASAS

RAMBATAN GELOMBANG ULTRASONIK DALAM PEPEJAL

Dalam media homogen, isotrop dan kenyal, halaju gelombang tekanan boleh diberikan sebagai berikut:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

dimana,

$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

dengan ν = nisbah Poisson, V_p = halaju gelombang tekanan, V_s = halaju gelombang kilasan, E = modulus Young dan ρ = ketumpatan jisim. Dari persamaan (1) dapat diperhatikan bahawa modulus Young berkadar terus dengan kuasa dua halaju atau boleh ditulis sebagai:

$$E = k V_p^2 \quad (3)$$

dengan k ialah pemalar yang bergantung kepada ketumpatan dan nisbah Poisson. Diketahui juga bahawa kedua-dua modulus Young dan kekuatan konkrit dipengaruhi oleh ikatan di antara atom dan molekul. Dari model gelombang sinus [11] hubungan tegasan-terikan bagi bahan (seperti logam atau kaca) boleh diterbitkan hubungan kekuatan dengan modulus Young sebagai:

$$K = \sqrt{\frac{E\gamma}{a_0}} \quad (4)$$

dengan K = kekuatan mampatan bahan, γ = tenaga separa permukaan dan a_0 = jarak antara atom. Hubungan teori di antara K dan E boleh diperolehi dengan menggabungkan persamaan (3) dan (4):

$$K = \sqrt{\frac{k\gamma}{a_0}} V_p \quad (5)$$

Daripada persamaan (4), didapati kekuatan adalah fungsi linear bagi halaju. Sementara itu persamaan (5) tidak selalunya benar bagi konkrit kerana konkrit tidak homogen dan tidak isotrop. Tinjauan bahan bertulis yang dibuat mendapati bahawa terdapat tiga bentuk hubungan emperik yang mungkin bagi konkrit iaitu linear [6, 7], eksponen [5, 8, 9, 12] dan kuasa [9,12]. Hubungan kuasa dicadangkan bagi konkrit berkekuatan rendah.

Penganggaran kekuatan dengan cara mendapatkan nilai E melalui penentuan ketumpatan, halaju gelombang tekanan dan nisbah Poisson (dari kaedah resonan) dan kemudiannya membuat hubungan empirik dengan kekuatan juga pernah dilakukan [8]. Tetapi kebanyakan penguji menggunakan hubungan empirik secara terus dengan halaju denyut gelombang tekanan. Ini disebabkan oleh penentuan titik awal isyarat denyut (iaitu masa transit gelombang tekanan) agak sukar ditentukan terutamanya bagi konkrit yang bermutu rendah dengan nilai V_p tidak menepati persamaan (1).

PENGECILAN GELOMBANG ULTRASONIK DALAM PEPEJAL

Pada asasnya pengecilan keamatan gelombang ultrasonik disebabkan oleh pencapahan alur, serapan dan serakan. Keamatan gelombang berubah-ubah secara tidak menentu di dalam zon dekat tetapi akan berubah secara sistematik dalam zon jauh. Capahan alur yang berlaku dalam zon jauh menyebabkan keamatan berkadar songsang dengan jarak dari transduser.

Pengecilan juga disebabkan oleh serapan yang mana geseran di antara atom-atom menukarkan sebahagian tenaga gelombang ultrasonik kepada haba. Manakala serakan pula disebabkan oleh ketidakseragaman dalam pepejal kerana wujudnya rongga udara, saiz zarah, benda asing dan sebagainya.

Pengecilan amplitud, samada sesaran zarah atau tekanan bunyi (tanpa mengambilkira kesan capahan geometri) boleh ditulis sebagai fungsi eksponen [9, 10, 14]:

$$A = A_0 e^{-\alpha r} \quad (6)$$

dengan A_0 ialah amplitud tuju, A ialah amplitud selepas bergerak melalui jarak r dan α ialah pekali pengecilan amplitud.

Diketahui bahawa keamatan adalah berkadar terus dengan gandadua amplitud, maka keamatan asal I_0 juga akan mengecil kepada keamatan akhir I dengan cara yang sama:

$$I = I_0 e^{-2\alpha r} \quad (7)$$

Dalam logam tak isotrop α dibahagikan kepada dua bahagian; pekali serapan α_a dan pekali serakan α_s :

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (8)$$

daripada [10]:

$$\alpha_a \propto f \quad (9)$$

dan daripada [14]:

$$\alpha_s \propto \begin{cases} 1/D & \text{bagi julat pembauran (diffusion), iaitu } \lambda \leq D \\ Df & \text{bagi julat fasa rambang (stokastik), iaitu } \lambda \approx D \\ D^3 f^4 & \text{bagi julat Rayleigh, iaitu } \lambda \gg D \end{cases} \quad (10)$$

dengan f ialah frekuensi, λ ialah jarak gelombang dan D ialah purata ketakhomogen. Unit bagi pengecilan biasanya dalam decibel (dB) per unit jarak. Pengecilan gelombang ultrasonik dari satu titik r_1 ke r_2 dan $r_1 < r_2$ diberi oleh:

$$\alpha = \frac{1}{(r_2 - r_1)} 20 \log \frac{A(r_1)}{A(r_2)} \quad (11)$$

PROGRAM KAJIAN

PENYEDIAAN SPESIMEN

Simen Portland Biasa yang memenuhi piawaian MS 522 telah digunakan bagi penyediaan kiub konkrit 150 mm. Agregat yang digunakan ialah campuran pasir sungai dan granit hancur dengan saiz maksimum 20 mm. Bagi mendapatkan kekuatan yang berbagai-bagai, kaedah reka bentuk bancuhan DoE, UK telah digunakan. Jadual 1 menunjukkan kandungan campuran yang digunakan. Kebolehkkerjaan konkrit ialah sederhana iaitu dengan ujian runtuh antara 30 mm hingga 60 mm. Kiub-kiub konkrit ini telah direndam dalam air mengikut suhu sekitaran (25 - 30°C) selama 28 hari bagi tujuan pengawetan, dan kemudiannya disimpan di tepi bangunan makmal sehingga mencapai umur 180 hari sebelum diuji. Sebanyak empat sampel untuk setiap campuran telah dibuat menjadikan jumlah sampel kesemuanya 36, tetapi hanya 30 sampel diuji dan 6 sampel yang mewakili campuran 1, 2, 3, 5, 7 dan 9 dipotong untuk pemeriksaan struktur dalaman.

JADUAL 1. Kandungan Campuran Sampel

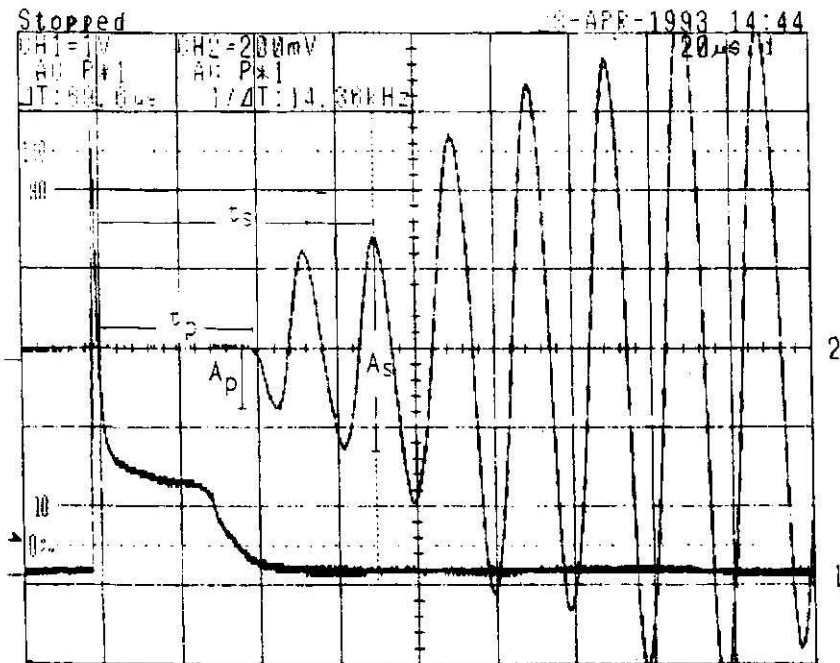
Bahan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Simen Portland	210	245	295	330	350	390	420	485	595
Air	210	205	205	205	205	205	205	205	205
Agregat Halus	1085	1010	915	880	850	810	775	715	650
Agregat Kasar	890	930	970	975	980	990	985	980	940

PENGUJIAN

Penentuan Ketumpatan Ketumpatan sampel ditentukan menurut kaedah yang disarankan oleh BS 1881 yang mana isipadu sampel ditentukan dengan cara sesaran air.

Ujian Ultrasonik Ujian ultrasonik dilakukan menggunakan gabungan penjana dan pengesan denyut ultrasonik (PUNDIT) dan osiloskop digit (YOKOGAWA

DL 1200) dengan transduser 54kHz bergaris pusat 50 mm. Isyarat yang diterima oleh transduser penerima dikaji dan masa transit dan amplitud bagi gelombang tekanan dan kilasan ditentukan. Masa transit gelombang tekanan t_p diambil dari bacaan digit pada PUNDIT. Manakala amplitud gelombang tekanan A_p dan kilasan A_s serta masa transit gelombang kilasan t_s ditentukan dari layar osiloskop. Masa tiba gelombang kilasan ditakrifkan sebagai titik permulaan berlaku penurunan amplitud gelombang dan lebih kurang 2 kali masa ketibaan gelombang tekanan. Rajah 1 menunjukkan contoh isyarat yang dipamerkan pada osiloskop dan penakrifan bagi t_p , t_s , A_p dan A_s .



RAJAH 1. Contoh Isyarat denyut ultrasonik yang dipamerkan pada osiloskop

Halaju gelombang tekanan V_p dan kilasan V_s , pengecilan gelombang tekanan α dan amplitud relatif β (antara amplitud gelombang tekanan A_p dan kilasan A_s) ditentukan dengan formula berikut:

$$V_p = \frac{r}{t_p} \quad (12)$$

$$V_s = \frac{r}{t_s} \quad (13)$$

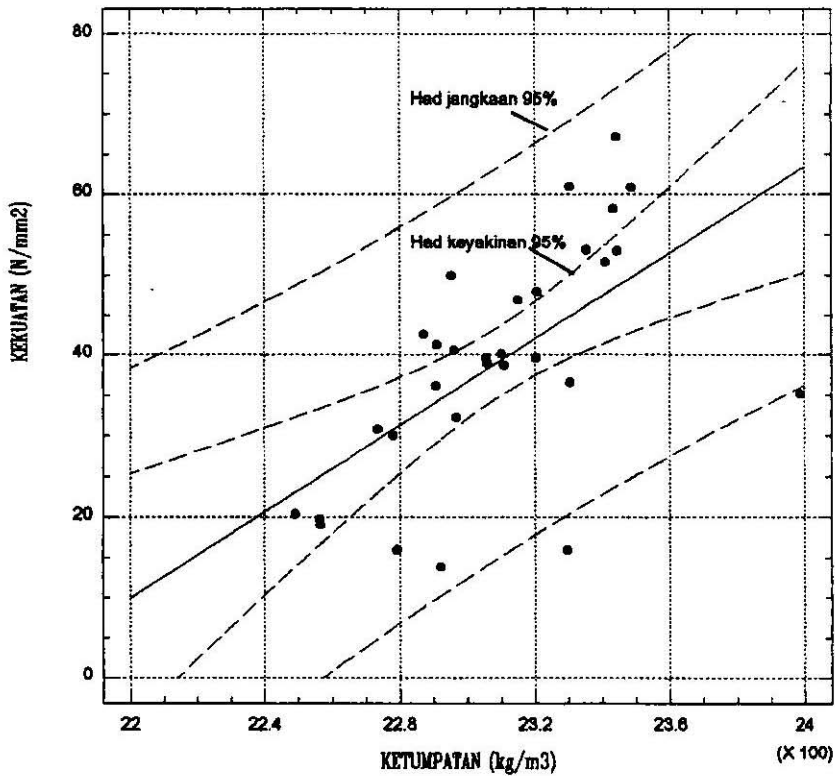
$$\alpha = \frac{20}{r} \log \left(\frac{A_s}{A_p} \right) \quad (14)$$

$$\beta = \frac{20}{r} \log \left(\frac{A_p}{A_s} \right) \quad (15)$$

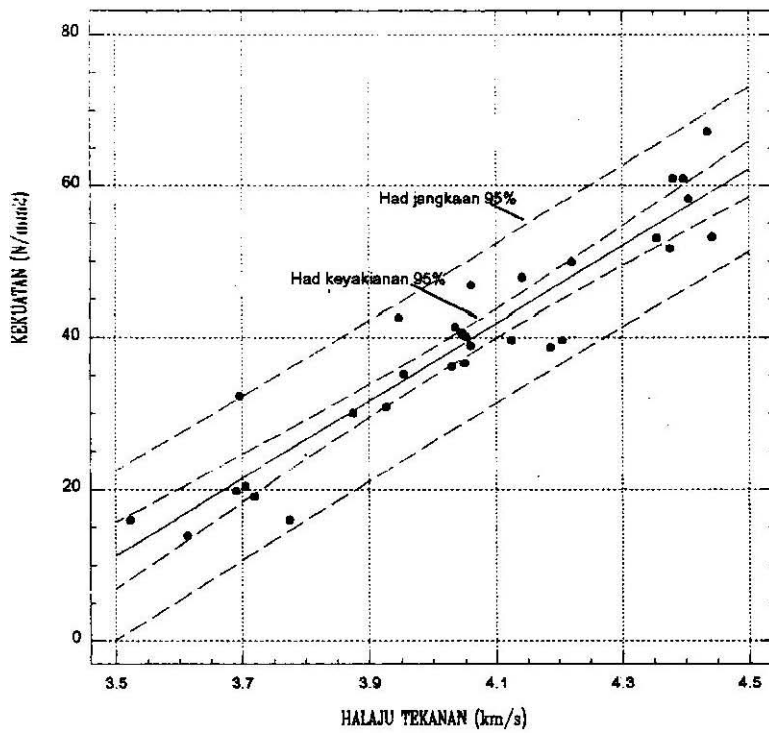
Ujian Mampatan Akhir sekali, ujian mampatan dilakukan ke atas kiub saranan BS 1881 menggunakan mesin mampatan automatik 3000 kN (WYKEHAM FARRANCE).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

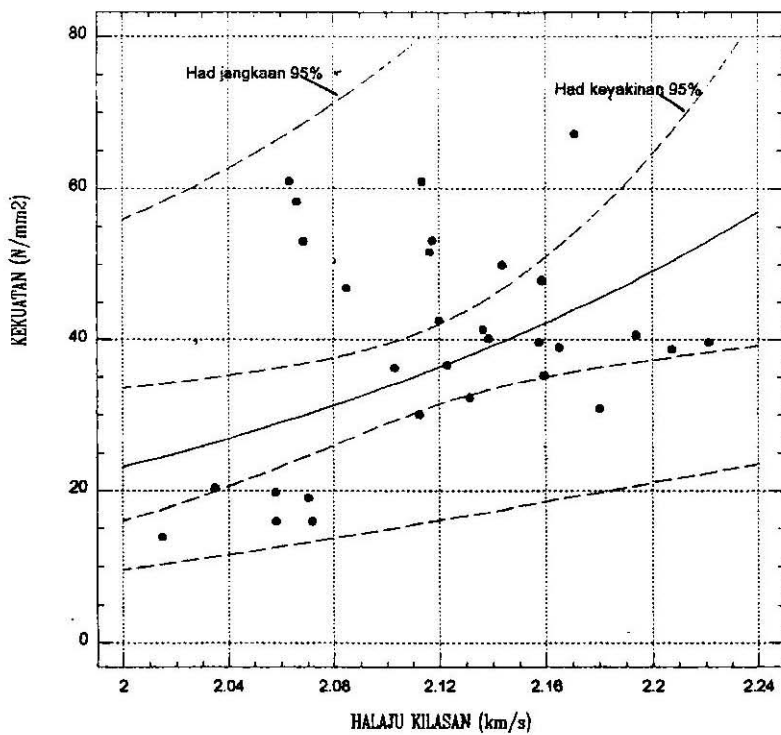
Rajah 2 hingga 7 masing-masing menunjukkan plot kekuatan melawan ketumpatan, halaju gelombang tekanan, halaju gelombang kilasan, modulus kekenyalan, amplitud relatif dan pengecilan. Hasil analisis regresi statistik mendapati bahawa kekuatan mempunyai hubungan yang rapat dengan halaju gelombang tekanan, amplitud relatif dan modulus kekenyalan.



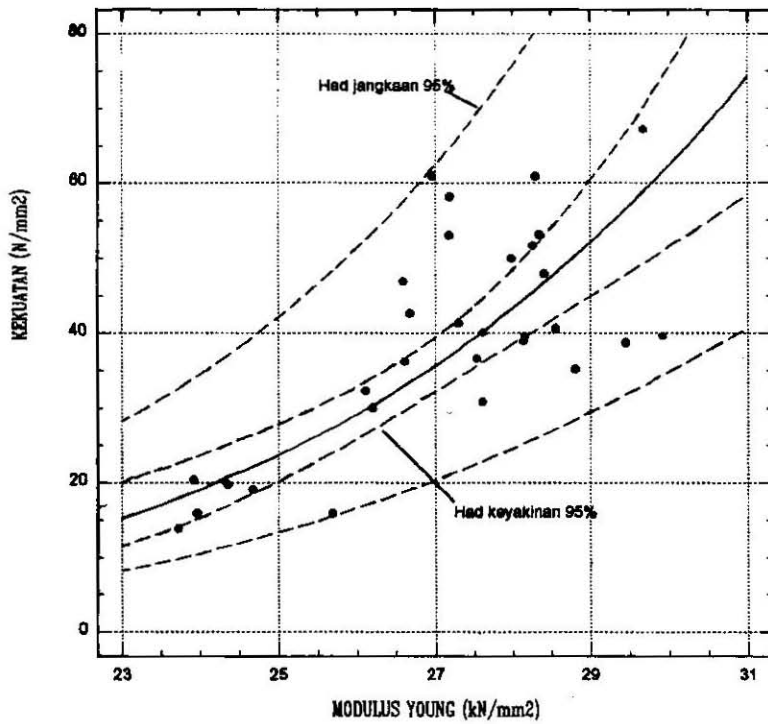
RAJAH 2. Kekuatan melawan ketumpatan



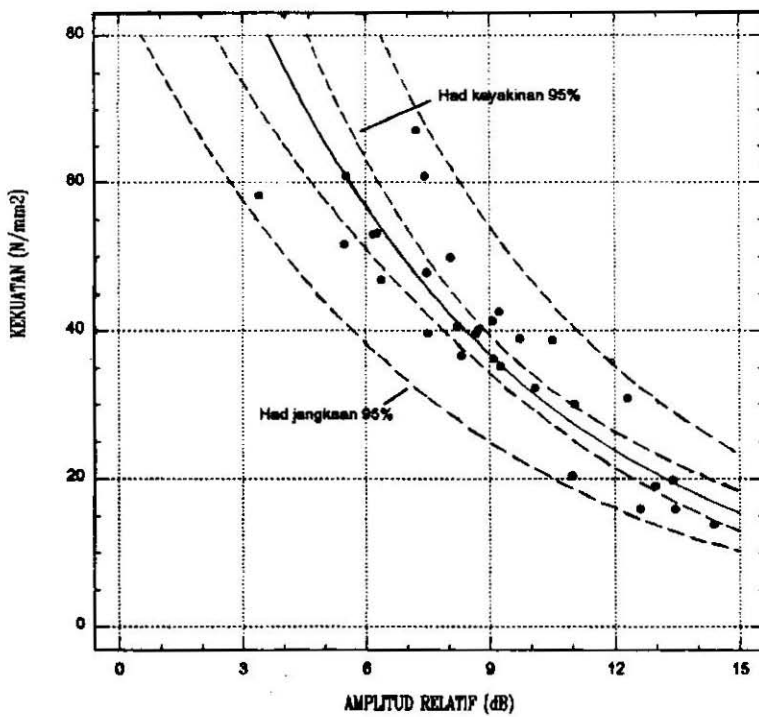
RAJAH 3. Kekuatan mampatan melawan halaju gelombang tekanan



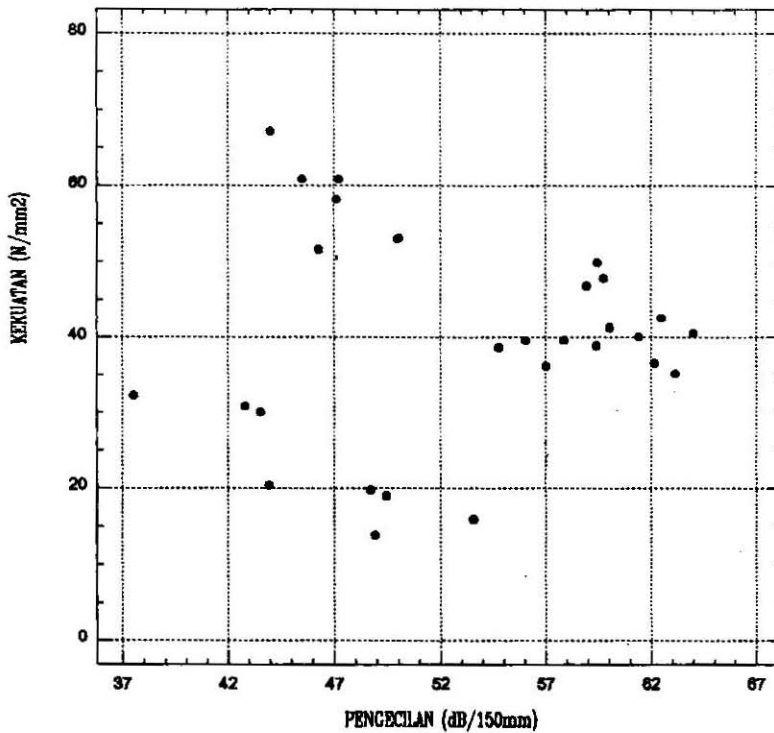
RAJAH 4. Kekuatan mampatan melawan halaju gelombang kilasan



RAJAH 5. Hubungan kekuatan dengan modulus kenyataan



RAJAH 6. Hubungan kekuatan mampatan dengan amplitud relatif



RAJAH 7. Hubungan kekuatan dengan pengecilan gelombang tekanan

Regresi mudah memberikan hubungan empirik linear di antara kekuatan dengan halaju gelombang tekanan. Keputusan ini bersesuaian dengan teori seperti persamaan (5). Ini menunjukkan penggunaan agregat granit dengan perkadaran bancuhan menurut rekabentuk Jabatan Alam Sekitar UK, yang mana perkadarannya adalah seimbang bukan sekadar mengubah nisbah air-simen bagi mengubah kekuatan seperti formula klasik Abrams [1] menghasilkan konkrit yang isotrop dan homogen pada 'pandangan' gelombang berjarak gelombang yang lebih besar dari saiz agregat.

Persamaan (10) pula menunjukkan pengecilan dipengaruhi oleh frekuensi yang sama tetapi berlainan jarak gelombang (iaitu antara gelombang tekanan dan kilasan), pengecilan juga berbeza yang mana pengecilan kilasan adalah lebih tinggi dari tekanan (jarak gelombang kilasan adalah lebih kecil dari tekanan). Konkrit yang mempunyai ketakhomogen yang tinggi (mutu atau kekuatan yang rendah) juga memberi pengecilan yang tinggi kepada gelombang tekanan dan kilasan berbanding dengan konkrit yang lebih homogen. Disebabkan kadar pengecilan gelombang tekanan dan kilasan yang berbeza pada sesuatu jarak, beza amplitud kilasan dan tekanan bagi konkrit heterogen juga lebih besar dari konkrit homogen. Regresi mudah bagi data ujikaji memberikan hubungan eksponen di antara kekuatan dengan amplitud relatif.

Hubungan yang linear juga diperolehi bagi kekuatan lawan modulus, tetapi hubungannya tidaklah lebih baik dari hubungan terus kekuatan-halaju. Manakala hubungan antara kekuatan dengan halaju gelombang kilasan,

pengecilan dan ketumpatan adalah meragukan. Jadi untuk analisis seterusnya hanya halaju V_p dan amplitud relatif β dipertimbangkan. Oleh itu bagi mengurangkan ralat penganggaran kekuatan dan mendapatkan hubungan yang lebih erat di antara kekuatan dengan ultrasonik, maka satu model empirik dikembangkan menggunakan kaedah multiregresi. Model diasaskan dari saling tindak hubungan linear, eksponen dan kuasa bagi kekuatan/halaju gelombang tekanan dengan hubungan eksponen kekuatan/pengecilan. Hubungan yang mungkin bagi kekuatan/halaju dan amplitud relatif ialah:

$$\begin{array}{ll} K = a + bV_p & \text{atau} \\ K = ce^{dV_p} & \text{atau} \\ K = fV_p^g & \text{dan} \\ K = he^{i\beta} & \end{array} \quad (16)$$

dengan a, b, c, d, f, g, h dan i ialah pemalar. Dengan mengenakan log jati pada persamaan (16) dan membuat gabungan antara halaju dan amplitud relatif akan diperolehi model asas bagi kaedah gabungan halaju dan amplitud relatif, iaitu:

$$\ln K = a_0 + b_0 V_p + b_1 \beta + b_2 \ln V_p \quad (17)$$

Seterusnya model asas ini dikembangkan dengan mengambil kira saling tindak dan persamaan peringkat kedua:

$$\ln K = a_0 + b_0 V_p + b_1 \beta + b_2 \ln V_p + b_3 V_p \beta + b_4 \beta \ln V_p + b_5 \ln(V_p \beta) + b_6 (V_p \beta)^2 \quad (18)$$

Jadual 2 menunjukkan hasil multiregresi bagi persamaan (18). Jadual 3 pula menunjukkan hasil multiregresi bagi formula linear persamaan di atas. Model 11 pada jadual II adalah yang terbaik bagi kaedah gabungan halaju dan amplitud relatif. Perbandingan di antara nilai ujikaji dan teori ditunjukkan pada Rajah 8.

KESIMPULAN

Dari ujikaji ini yang menggunakan data sebanyak 30 poin yang diwakili oleh sekurang-kurangnya 3 sampel bagi setiap campuran (gred) iaitu bilangan data minimum yang disyorkan oleh BS 1881 dapat disimpulkan bahawa hubungan empirik bagi kekuatan/ultrasonik adalah seperti pada jadual 4. Didapati bahawa:

1. Hubungan kekuatan dengan halaju gelombang tekanan adalah linear bagi julat konkrit normal (kekuatan sederhana).
2. Jadual 4 juga menunjukkan hubungan yang baik di antara kekuatan dengan amplitud relatif. Kebaikan yang paling ketara dengan kaedah ini ialah pengaruh gandingan dan perbezaan jarak laluan alur semasa ujian dapat diabaikan.

JADUAL 2. Pekali padanan terbaik bagi persamaan (18)

$$\ln k = a_0 + b_0 V_p + b_1 \beta + b_2 \ln V_p + b_3 V_p \beta + b_4 \beta \ln V_p + b_5 \ln(V_p \beta) + b_6 (V_p \beta)^2$$

Model	ao	bo	b1	b2	b3	b4	b5	b6	Ra ^{2*}
1	-2.462	1.495	0	0	0	0	0	0	0.8396
2	4.908	0	-0.1448	0	0	0	0	0	0.8148
3	-4.822	0	0	6.024	0	0	0	0	0.8484
4	0.6519	0.8796	-0.0685	0	0	0	0	0	0.877
5	-9.845	-5.731	-0.0647	26.66	0	0	0	0	0.893
6	5.494	-0.304	-0.5724	0	0.1251	0	0	0	0.919
7	4.918	-0.1643	-0.6818	0	0	0.4414	0	0	0.917
8	-0.696	0.4769	-0.2188	0	0	0	1.222	0	0.914
9	-2.449	1.397	0.1695	0	0	0	0	-0.0008	0.89
10	24.47	8.125	-0.9973	-37.97	0.2293	0	0	0	0.9261
11	28.43	10.52	-1.367	-47.73	0	0.9295	0	0	0.9262
12	-3.136	-1.106	-0.2024	6.551	0	0	1.096	0	0.911
13	-12.28	-4.932	0.1598	25.41	0	0	0	-0.0008	0.905
14	28.37	10.48	-1.362	-47.59	0.0032	0.9615	0	0	0.923
15	33.19	10.64	-1.258	-50.47	0.3111	0	-0.5739	0	0.925
16	34.68	11.35	-1.354	-54.26	0.2894	0	0	0.0004	0.9246
17	8.407	-1.008	0.2464	0	0.9311	-2.925	0	0	0.9238
18	3.726	-0.118	-0.4862	0	0.0912	0	0.4108	0	0.9137
19	3.846	0.0078	-0.4329	0	0.1129	0	0	-0.0003	0.9183
20	2.759	0.0332	-0.5268	0	0	0.281	0.5516	0	0.9163
21	3.002	0.1919	-0.5032	0	0	0.3925	0	-0.0004	0.917
22	0.9924	-0.0378	-0.4427	0	0	0	1.676	0.0006	0.9137
23	31.28	9.259	-1.033	-45.01	0.4702	-0.6177	-0.621	0	0.9213
24	33.57	10.57	-1.228	-51.19	0.3782	-0.3508	0	0.0004	0.9213
25	34.54	11.24	-1.337	-53.66	0.2969	0	-0.1575	0.0003	0.9213
26	32.94	10.11	-1.154	-49.11	0.4244	-0.491	-0.2217	0.0003	0.9178

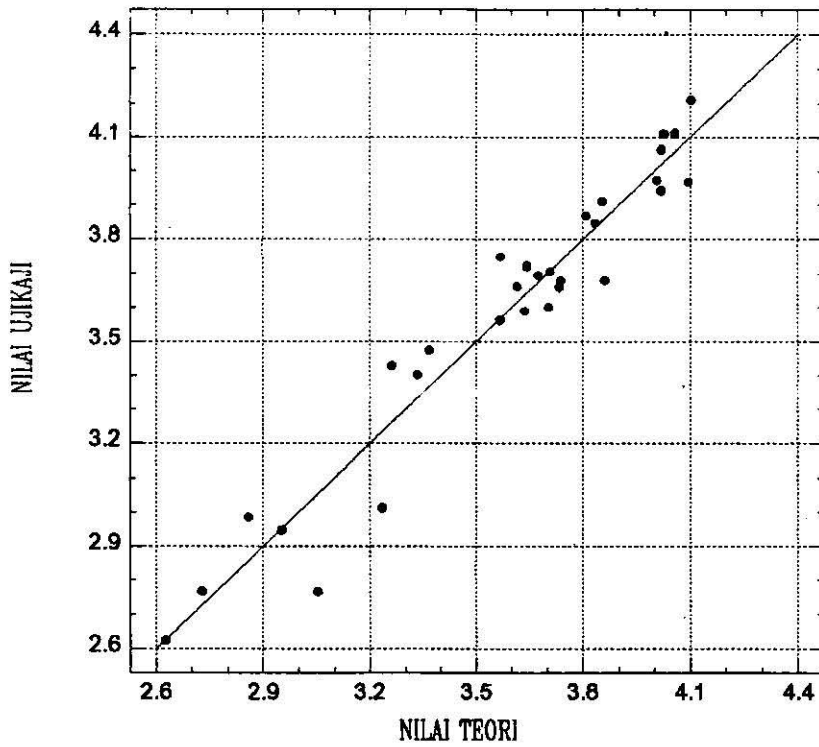
* Ganda dua pekali korelasi yang dilaraskan mengambilkira darjah kebebasan

JADUAL 3. Pekali padanan terbaik bagi persamaan linear

$$\ln k = a_0 + b_0 V_p + b_1 \beta + b_2 \ln V_p + b_3 V_p \beta + b_4 \beta \ln V_p + b_5 \ln(V_p \beta) + b_6 (V_p \beta)^2$$

Model	ao	bo	b1	b2	b3	b4	b5	b6	Ra ^{2*}
27	-166.9	50.93	0	0	0	0	0	0	0.8772
28	83.01	0	-4.809	0	0	0	0	0	0.8069
29	-86.73	35.07	-1.764	0	0	0	0	0	0.8985
30	13.03	97.9	-1.8	-253.4	0	0	0	0	0.8963
31	-63.04	29.29	-4.229	0	0.6122	0	0	0	0.8956
32	-98.07	34.17	3.998	0	0	-1.827	0	0	0.8993
33	-101.7	30.59	-3.439	0	0	0	13.6	0	0.8993
34	-159.6	47.22	3.824	0	0	0	0	-0.0196	0.9034
35	876.1	446.4	-25.25	-1878.8	5.768	0	0	0	0.9133
36	969.6	503.9	-34.34	-2112.7	0	23.23	0	0	0.9131
37	187.8	218.4	-5.388	-777.4	0	0	28.55	0	0.9059
38	-49.18	118.3	3.933	-285.4	0	0	0	-0.0201	0.9017
39	91.45	-8.037	39.19	0	43.35	-155.1	0	0	0.9109
40	-195.4	41.19	2.227	0	-1.932	0	30.78	0	0.899
41	-169.6	49.43	4.785	0	-0.1801	0	0	-0.0204	0.8996
42	-195	42.57	4.876	0	0	-7.586	31.69	0	0.899
43	-173.2	50.22	5.502	0	0	-0.9793	0	-0.0207	0.997
44	779.5	388	-16.23	-1640	11.37	-22.69	0	0	0.9098
45	1031	491.2	-29.89	-2102	7.224	0	-10.22	0	0.9101
46	1112	520.9	-33.49	-2255	7.155	0	0	0.0091	0.9105
47	1129	534.5	-35.62	-2330	6.204	0	19.78	0.0214	0.9068
48	926.7	390.5	-12.45	-1742	21.98	-58.56	0	0.0116	0.907
49	848.5	359	-8.454	-1579	22.44	-59.06	-14.72	0	0.9066
50	964.4	418.2	-16.88	-1865	19.23	-50.2	13.22	0.019	0.9029

* Ganda dua pekali korelasi yang dilaraskan mengambilkira darjah kebebasan



RAJAH 8. Hubungan $\ln K$ ujikaji dengan teori

JADUAL 4. Model regresi mudah dan multiregresi

Kaedah	Formula	R^2	Ralat Piawai
Halaju V_p	$K = 50.93 V_p - 166.9$	0.8814	5.037
Amplitud Relatif β	$K = 135.4 e^{(-0.1448\beta)}$	0.8212	0.185
Modulus Dinamik E	$K = 8.951E^{5.31} \times 10^{-7}$	0.6238	0.2689
Gabungan V_p & β	$\ln K = 28.43 + 10.52V_p - 1.367\beta - 47.31 \ln V_p + 0.9295\beta \ln V_p$	0.9364	0.1171

Unit: $K = \text{N/mm}^2$, $V_p = \text{km/s}$, $\beta = \text{dB}$, $E = \text{kN/mm}^2$

3. Hubungan kekuatan/modulus tidak sebaik hubungan kekuatan/halaju. Ini disebabkan oleh kesukaran menentukan masa transit gelombang kilasan dengan tepat yang mana bacaannya turut dipengaruhi oleh kekuatan isyarat. Kaedah ini juga memerlukan kepada penentuan ketumpatan (iaitu satu parameter berasingan).
4. Gabungan halaju tekanan dan amplitud relatif boleh meningkatkan ketepatan penganggaran kekuatan.

TATATANDA

α	pengecilan gelombang tekanan
α_s	pekali serapan
α_s	pekali serakan
β	amplitud relatif
γ	tenaga separa permukaan
λ	jarak gelombang
ν	nisbah Poisson
ρ	ketumpatan bahan
A	amplitud pada jarak r
A_0	amplitud tuju (atau pada jarak zero)
a_0	jarak di antara atom
A_p	amplitud gelombang tekanan
A_s	amplitud gelombang kilasan
D	purata ketakhomogen
E	modulus Young
f	frekuensi
I	keamatan pada jarak r
I_0	keamatan pada jarak zero
K	kekuatan mampatan
r	jarak laluan alur
V_p	halaju gelombang tekanan
V_s	halaju gelombang ricih

RUJUKAN

1. Abrams, Duff A. 1918. Design of concrete mixtures, Bulletin No. 1, *Structural Materials Research Laboratory*, Lewis Institute, Chicago, pp 20.
2. British Standard Institution. 1983. *Methods for determination of density of hardened concrete*, BS 1881, Part 114.
3. British Standard Institution. 1983. *Methods for determination of compressive strength of concrete cubes*, BS 1881. Part 116, 1983.
4. British Standard Institution. 1986. *Measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete*, BS 1881, Part 203.

5. Bungey, J.H. 1984. *The use of ultrasonic for NDT of concrete*, *British Journal of NDT*, 26, (5): 366-369.
6. Chye, L.E., & Yong, H.N. 1991. *Assessment of insitu strength of concrete structures*. National Seminar on NDE of non-metallic materials (concrete), Singapura.
7. Di Maio, A.A., Traversa, L., and Giovambattista, A. 1985. Nondestructive combined methods applied to structural concrete members, *Cement, Concrete and Aggregates*, *CCAGDP*, 7(2): 89-94.
8. Facaoaru, I. 1970. Non-destructive testing of concrete in Romania, Symposium on NDT of concrete and timber, Institute of Civil Engineers and the British National Committee for NDT 11-12 June 1969, London, 39-49.
9. Filipczynski, L., Powlowski, Z. & Wehr, J. 1966. *Ultrasonic Methods of Testing Materials*, Butterworths, London: 257-264.
10. Krautkramer, J., & Krautkramer, H. 1983. *Ultrasonic Testing of Materials*, 3rd edition, Springer-Verlag, New York.
11. Mindness, S., Young, J.F. 1981. *Concrete*, U.S.A.: Prentice-Hall, Inc.,
12. Popovics, S. 1986. Present state of the determination of concrete strength by pulse velocity in America, *II CEMENTO*. 83, (3): 117-128.
13. Reynolds, W.N. 1984. Measuring concrete quality nondestructively. *British Journal of NDT*. 26, (1): 11-14.
14. Szilard, J. 1982. *Ultrasonic Testing*. USA: John Wiley & Sons,
15. Teodoru, G.V.M. 1989. *A new answer to old question: The NDT of Concrete*, *NDT* (Proceedings 12th World Conference) edited by Boogard, J., van Dijk, G.M., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1237-1242.
16. Tharmaratnam, K. & Tan, B.S., 1990. Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 20 (3): 335-345.
17. Tomsett, H.N. 1980. The practical use of ultrasonic pulse velocity measurement in assessment of concrete quality. *Magazine of Concrete Research*. 32, (110): 7-16.

Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 UKM Bangi
 Selangor D.E.