

Ramalan Kekuatan Tegangan Pecah Konkrit Prestasi Tinggi

Muhammad Fauzi Mohd. Zain, Ade Ilham, Hilmi Mahmud,
Wan Hamidon Wan Badaruzzaman, Faizal Mahmud
dan Kamarudin Mohd Yusof

ABSTRAK

Kekuatan tegangan pecah merupakan salah satu parameter ciri-ciri mekanikal konkrit yang memiliki peranan penting dalam reka bentuk struktur. Ianya dipengaruhi oleh kekuatan mampatan, nisbah air simen, dan usia konkrit. Jadi kekuatan tegangan konkrit merupakan fungsi daripada ketiga-tiga parameter berkenaan. Selama ini para penyelidik hanya mempertimbangkan kekuatan mampatan saja dalam menentukan formula kekuatan tegangan pecah. Kajian ini dilakukan bagi menentukan formula empirikal hubungan antara kekuatan tegangan pecah dengan kekuatan mampatan, nisbah air-simen, dan usia konkrit. Dengan menggunakan formula ini, ketepatan kekuatan tegangan pecah dapat diperolehi. Dicadangkan bahawa persamaan dengan parameter umur konkrit (t) boleh digunakan untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah konkrit prestasi tinggi.

Kata kunci: Konkrit prestasi tinggi, kekuatan mampatan, kekuatan tegangan pecah, nisbah air-pengikat

ABSTRACT

Splitting tensile strength is one of the concrete mechanical properties that is used in structural design. It can be related to numerous parameters which include compressive strength, water-binder ratio and concrete age. Until now, most researchers estimated the splitting tensile strength (STS) directly from compressive strength data. This paper suggests formulae that relate splitting tensile strength with that of compressive strength, water-binder ratio and concrete age. The predicted STS can be obtained accurately using these formulae. It is proposed that the equation with the concrete age (t) parameter be used in predicting the splitting tensile strength of high performance concrete.

Keywords: High performance concrete, compressive strength, splitting tensile strength, water-binder ratio

PENGENALAN

Setakat ini, penyelidikan dan penggunaan konkrit prestasi tinggi (KPT) telah meningkat dengan pesatnya. Secara relatifnya ia merupakan produk yang masih baru dengan sifat-sifatnya yang berbeza daripada konkrit berkekuatan normal. Menurut Zia et al. 1998 di dalam penerbitan American Concrete Institute (ACI), KPT ditakrifkan sebagai konkrit yang memenuhi prestasi dan

keperluan keseragaman yang istimewa yang tidak dicapai dengan menggunakan bahan-bahan konvensional, kaedah reka bentuk, bantuan, perletakan dan cara pengawetan yang biasa. Ini meliputi cara-cara perletakan dan pemasangan tanpa pengasingan, sifat-sifat mekanikal jangka panjang, kekuatan awal, ketabilan isipadu, atau hayat perkhidmatan di dalam keadaan dedahan sekitaran yang teruk. Kuennen, 1998 mengatakan KPT mampu meningkatkan ciri-ciri mekanikal kepada elemen struktur konkrit pracetak, juga meningkatkan kekuatan tegangan dan mampatan serta modulus elastik (kekakuan) daripada konkrit.

Kekuatan mampatan dan kekuatan tegangan kedua-duanya diperlukan untuk perancangan struktur. Kekuatan tegangan digunakan pada struktur-struktur konkrit tanpa tetulang, seperti empangan yang direka-bentuk bagi menahan keadaan gempa bumi. Selain itu struktur seperti lebuh raya dan landasan kapal terbang direka-bentuk dengan lebih mementingkan kekuatan lenturannya berbanding kekuatan tegangannya. Bahkan pada perancangan jalan raya dan landasan kapal terbang kekuatan tegangan lebih penting daripada kekuatan mampatannya.

Dari laporan kajian-kajian penyelidik terdahulu (De Larrard & Malier, 1992 dan Kim et al. 1998), formula-formula daripada piawai yang telah diterima pakai perlu mendapat perhatian semula. Mereka melaporkan bahawa hubungan kekuatan tegangan dan kekuatan mampatan di dalam punca kuasa dua. Persamaan ini adalah seperti yang digunakan di dalam peraturan Amerika serta tidak konsisten dengan data yang diperolehnya. Ramai penyelidik mengembangkan formula-formula kekuatan tegangan untuk konkrit prestasi tinggi atau kekuatan tinggi namun hasilnya tetap sama seperti persamaan punca kuasa dua tersebut.

Kekuatan tegangan dipengaruhi oleh kekuatan mampatan, nisbah air simen, dan usia. Ini menunjukkan terdapatnya hubungan antara satu parameter dengan yang lain. Dengan demikian, kekuatan tegangan konkrit merupakan fungsi daripada parameter kekuatan mampatan, nisbah air simen, dan usia konkrit. Dalam kertas kerja ini, kajian telah dilakukan bagi menentukan formula empirikal hubungan antara kekuatan tegangan pecah dan kekuatan mampatan, nisbah air-simen, dan usia konkrit. Pendekatan yang digunakan untuk mendapatkan formula berkenaan adalah dengan menggunakan kaedah empirikal iaitu dengan menggunakan data eksperimen yang telah diperolehi penyelidik-penyelidik sebelumnya. Data kekuatan mampatan dan tegangan yang dipakai dalam analisa ini tidak mangambil kira jenis bahan tambah yang digunakan, sama ada wasap silika, abu terbang, abu sekam padi atau lain-lain. Kriteria yang dipakai adalah kekuatan konkrit (yang memenuhi syarat kekuatan konkrit prestasi tinggi) dan kebolehkerjaannya (yang merupakan bahagian daripada KPT).

KAJIAN PUSTAKA

KEKUATAN MAMPATAN

Kekuatan mampatan konkrit terutamanya dipengaruhi oleh saiz nisbah air-simen (W/C). Selain itu kekuatan mampatan ini dipengaruhi juga oleh kualiti bahan yang digunakan, cara pelaksanaan dan cara pengawetan. Oleh itu Neville (1995) secara umum telah menyimpulkan bahawa kekuatan mampatan

diperolehi oleh nisbah air-simen. Semakin kecil nisbah air-simen, kekuatan mampatan yang dihasilkan semakin tinggi dan sebaliknya.

Kekuatan mampatan yang termasuk dalam kategori konkrit prestasi tinggi, menurut Aitcin & Mehta 1990 ialah konkrit yang memiliki kekuatan mampatan lebih besar daripada 40 MPa pada usia 28 hari.

Kekuatan tegangan konkrit lebih rendah daripada kekuatan mampatannya. Keadaan ini disebabkan oleh retak kecil yang merambat secara perlahan-lahan pada keadaan pembebanan tegangan. Walaupun kekuatan tegangan biasanya tidak dipertimbangkan secara langsung dalam perancangan (dianggap sifar), ianya sangat penting ketika keretakan di dalam konkrit cenderung menghasilkan kegagalan tegangan. Menurut Marzouk dan Chen (1995) konkrit seperti ini sering disebut sebagai bahan yang rapuh dan kekuatan tegangan dalam bahan yang rapuh akan mudah mengalami kegagalan walaupun hanya disebabkan oleh kerosakan atau retak kecil. Konkrit kekuatan tinggi memiliki sifat lebih rapuh dan kaku daripada konkrit kekuatan normal.

KEKUATAN TEGANGAN PECAH

Ujian kekuatan tegangan pecah dilakukan oleh ramai penyelidik, kerana kaedah eksperimennya ringkas dan keputusannya berguna sebagai salah satu parameter ciri-ciri mekanikal konkrit. Wiegrink et al. (1996) memperolehi pola perkembangan kekuatan untuk kekuatan tegangan pecah yang serupa dengan kekuatan mampatannya. Mindess dan Young (1981) menjelaskan bahawa hubungan antara kekuatan tegangan dan kekuatan mampatan bukan sesuatu yang ringkas, kerana semua ini bergantung pada usia dan kekuatan konkrit, jenis pengawetan, jenis aggregat, jumlah kandungan udara dan kadar pemandatan.

Banyak formula empirikal yang membincangkan hubungan kekuatan tegangan (f_t) dan kekuatan mampatan, f_c' seperti:

$$f_t = kf_c'^n, \quad (1)$$

dengan k dan n adalah pemalar yang diperoleh daripada regresi. Nilai n biasanya digunakan antara $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$.

Hasil eksperimen kekuatan tegangan pecah yang dilakukan oleh Kim et al., 1998, lebih mendekati persamaan Kod Perancis

$$f_{t,j} = 0.6 + 0.06 f_{c,j}, \quad (2)$$

dengan $f_{t,j}$ dan $f_{c,j}$ adalah purata kekuatan tegangan pecah dan kekuatan mampatan pada j hari dalam MPa.

Persamaan yang dicadangkan oleh Irivani, 1996 untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah f'_{sp} , adalah

$$f'_{sp} = 0.57 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ untuk } 50 \text{ MPa} < f'_c < 100 \text{ MPa}. \quad (3)$$

Sedangkan persamaan yang dicadangkan oleh ACI 363r-84 untuk menentukan kekuatan tegangan pecah dalam Irivani, 1996

$$f'_{sp} = 0.59 \cdot \sqrt{f'_c}, \quad 21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa}, \quad (4)$$

dan yang dicadangkan oleh Kod Committee Euro International du Beton (CEB-FIP 1993) dalam Kim et al. (1998)

$$f_t = 0.301 f_c^{0.67} \quad (5)$$

Persamaan-persamaan di atas akan digunakan sebagai ukuran bagi persamaan-persamaan yang akan diperolehi dalam kajian ini.

ANALISIS DAN PERBINCANGAN

Analisis yang diperolehi adalah berdasarkan data yang sedia ada daripada penyelidik-penyalidik terdahulu. Neville (1995) menyatakan bahawa kekuatan tegangan berkait rapat dengan kekuatan mampatan, tetapi tidak terdapat perkadarannya yang terus. Nisbah kedua-dua kekuatan ini bergantung pada paras am kekuatan konkrit. Dengan ertikata lain, apabila kekuatan mampatan, f_c' meningkat, maka kekuatan tegangan f_t juga meningkat tetapi pada kadar yang menurun. Marzouk dan Chen (1995) menjelaskan pula bahawa kekuatan tegangan juga meningkat seperti meningkatnya kekuatan mampatan. Walaupun begitu, peningkatan kekuatan tegangan adalah lebih rendah berbanding dengan peningkatan kekuatan mampatan. Ini bermakna bahawa hubungan antara kekuatan tegangan pecah dan kekuatan mampatan akan membentuk suatu lengkung.

Perkembangan kekuatan dipengaruhi pula oleh nisbah air-pengikat, jenis simen dan suhu pengawetan (Gardner 1990). Jika nisbah air-pengikat berkesan ke atas kekuatan mampatan, maka ia juga mempengaruhi kekuatan tegangan. Selain nisbah air-pengikat, usia konkrit juga memiliki peranan yang sangat besar ke atas kekuatan konkrit. Kekuatan tegangan merupakan fungsi daripada masa, kekuatan konkrit meningkat terus seiring dengan meningkatnya usia pengawetan, walaupun begitu peningkatan ini tidak linear.

Berdasarkan kepada pernyataan di atas, kekuatan tegangan pecah merupakan fungsi parameter-parameter kekuatan mampatan, nisbah air-pengikat dan usia konkrit atau secara matematik dapat ditulis sebagai berikut

$$f_{ts} = f(f_c'), \quad (6)$$

$$f_{ts} = f(f_c', (W/B)), \quad (7)$$

$$f_{ts} = f(f_c', t). \quad (8)$$

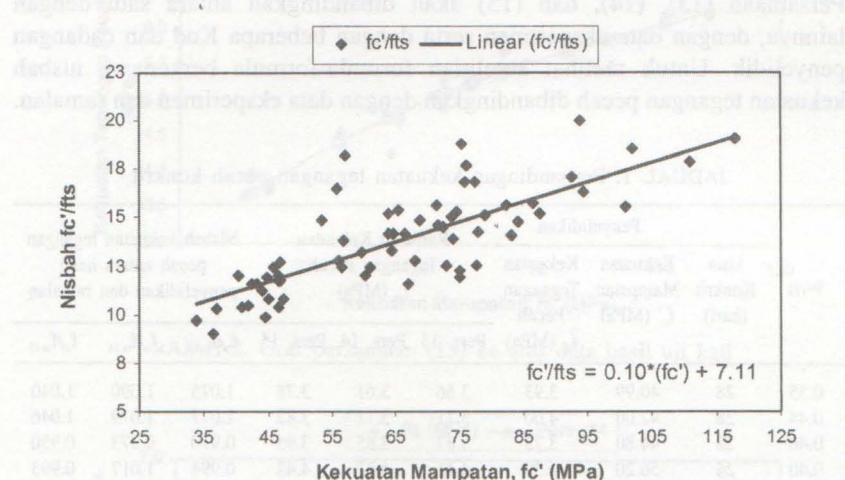
Daripada persamaan (6), (7), dan (8) dicadangkan hubungan antara parameter-parameter berkenaan ditulis dalam bentuk berikut

$$f_{ts} = \frac{f_c'}{a \cdot f_c' + b}, \quad (9)$$

$$f_{ts} = a \cdot \sqrt{f_c'} \cdot \left(\frac{W}{B} \right)^b, \quad (10)$$

$$f_{ts} = a \cdot \sqrt{f_c'} \cdot \left(\frac{t}{t_{28}} \right)^b, \quad (11)$$

dengan f'_c adalah kekuatan mampatan silinder konkrit pada usia 28 hari dalam MPa, f'_{ts} adalah kekuatan tegangan pecah pada usia yang sama, w/b adalah nisbah air-pengikat, t adalah usia konkrit ketika diuji, t_{28} adalah usia konkrit 28 hari, sedangkan a dan b adalah pemalar yang akan ditentukan dengan cara regresi ke atas data eksperimen. Analisis empirikal dilakukan menggunakan data eksperimen seperti yang tersedia pada lampiran. Pertamanya, tentukan nisbah f'_c/f'_{ts} , kemudian plotkan nisbah f'_c/f'_{ts} kepada paksi menegak dan plotkan juga data f'_c kepada paksi mendatar seperti ditunjukkan pada Rajah 1.



RAJAH 1. Graf regresi linear nisbah f'_c/f'_{ts} dan kekuatan mampatan

Dengan cara regresi linear, diperolehi persamaan

$$\frac{f'_c}{f'_{ts}} = 0.1f'_c + 7.11, \quad (12)$$

maka hubungan antara kekuatan tegangan pecah dan kekuatan mampatan dapat ditetapkan sebagai berikut

$$f'_{ts} = \frac{f'_c}{0.1f'_c + 7.11}. \quad (13)$$

Dengan cara serupa ketika mendapatkan persamaan (13), hubungan antara kekuatan tegangan pecah, kekuatan mampatan, dan nisbah air-pengikat, bentuk yang diperoleh

$$f'_{ts} = 0.54 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \left(\frac{W}{B} \right)^{-0.07}, \quad (14)$$

sedangkan hubungan antara kekuatan tegangan, kekuatan mampatan, dan masa (usia konkrit) diperolehi dalam bentuk

$$f_{ts,t} = 0.59 \cdot \sqrt{f'_{c,t}} \cdot \left(\frac{t}{t_{28}} \right)^{0.04}, \quad (15)$$

dengan $f_{ts,t}$ adalah kekuatan tegangan pecah konkrit pada usia t hari, $f'_{c,t}$ adalah kekuatan mampatan pada usia t hari, dan t adalah masa t hari ketika konkrit diuji.

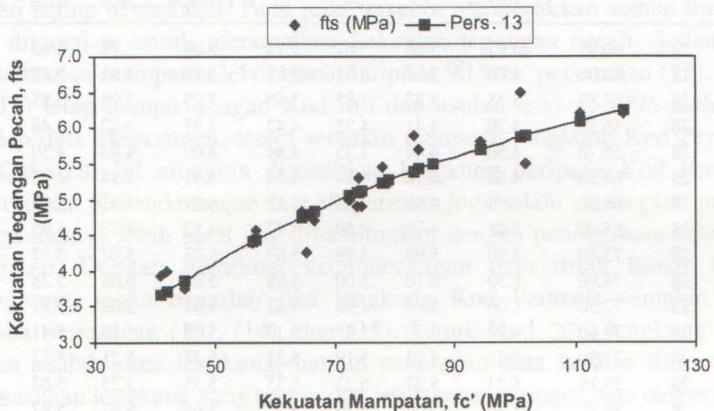
Untuk menguji ketepatan formula-formula di atas, beberapa data eksperimen penyelidik-penyelidik sebelumnya telah diuji seperti Jadual 1. Persamaan (13), (14), dan (15) akan dibandingkan antara satu dengan lainnya, dengan data eksperimen serta dengan beberapa Kod dan cadangan penyelidik. Untuk melihat ketelitian formula-formula berkenaan, nisbah kekuatan tegangan pecah dibandingkan dengan data eksperimen dan ramalan.

JADUAL 1. Perbandingan kekuatan tegangan pecah konkrit

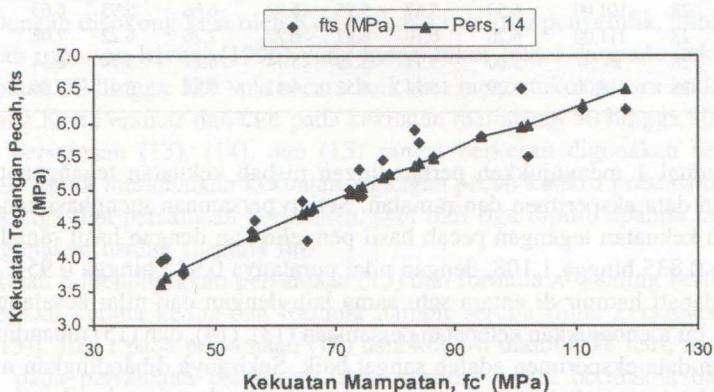
| W/B | Usia Konkrit (hari) | Penyelidikan | | Ramalan Kekuatan Tegangan Pecah f_{ts} (MPa) | | | Nisbah kekuatan tegangan pecah antara hasil penyelidikan dan ramalan | | |
|------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------|----------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | Kekuatan Mampatan f'_c (MPa) | Kekuatan Tegangan Pecah f_{ts} (MPa) | Pers. 13 | Pers. 14 | Pers. 15 | $f_{ts}/f_{ts,13}$ | $f_{ts}/f_{ts,14}$ | $f_{ts}/f_{ts,15}$ |
| 0.55 | 28 | 40.99 | 3.93 | 3.66 | 3.61 | 3.78 | 1.075 | 1.090 | 1.040 |
| 0.44 | 28 | 42.00 | 4.00 | 3.71 | 3.71 | 3.82 | 1.077 | 1.079 | 1.046 |
| 0.40 | 28 | 44.80 | 3.75 | 3.87 | 3.85 | 3.95 | 0.970 | 0.973 | 0.950 |
| 0.40 | 28 | 56.20 | 4.39 | 4.41 | 4.32 | 4.42 | 0.994 | 1.017 | 0.993 |
| 0.40 | 28 | 53.40 | 3.60 | 4.29 | 4.21 | 4.31 | 0.839 | 0.856 | 0.835 |
| 0.38 | 28 | 56.70 | 4.56 | 4.44 | 4.35 | 4.44 | 1.028 | 1.048 | 1.026 |
| 0.38 | 28 | 64.50 | 4.84 | 4.76 | 4.64 | 4.74 | 1.018 | 1.043 | 1.021 |
| 0.36 | 28 | 66.50 | 4.70 | 4.83 | 4.73 | 4.81 | 0.973 | 0.994 | 0.977 |
| 0.36 | 28 | 65.40 | 4.25 | 4.79 | 4.69 | 4.77 | 0.887 | 0.906 | 0.891 |
| 0.35 | 28 | 73.80 | 4.90 | 5.09 | 4.99 | 5.07 | 0.962 | 0.982 | 0.967 |
| 0.35 | 28 | 74.00 | 5.30 | 5.10 | 5.00 | 5.08 | 1.039 | 1.060 | 1.044 |
| 0.34 | 28 | 72.50 | 5.00 | 5.05 | 4.96 | 5.02 | 0.990 | 1.008 | 0.995 |
| 0.32 | 28 | 74.60 | 4.90 | 5.12 | 5.05 | 5.10 | 0.957 | 0.970 | 0.962 |
| 0.30 | 28 | 77.90 | 5.45 | 5.23 | 5.19 | 5.21 | 1.042 | 1.051 | 1.047 |
| 0.30 | 28 | 79.10 | 5.23 | 5.27 | 5.22 | 5.25 | 0.993 | 1.001 | 0.997 |
| 0.30 | 28 | 84.20 | 5.70 | 5.42 | 5.39 | 5.41 | 1.051 | 1.057 | 1.053 |
| 0.30 | 28 | 83.30 | 5.90 | 5.40 | 5.36 | 5.38 | 1.094 | 1.100 | 1.096 |
| 0.29 | 28 | 75.40 | 4.00 | 5.15 | 5.11 | 5.12 | 0.777 | 0.782 | 0.781 |
| 0.29 | 28 | 86.50 | 5.49 | 5.49 | 5.48 | 5.49 | 1.000 | 1.002 | 1.000 |
| 0.28 | 28 | 102.00 | 5.50 | 5.89 | 5.96 | 5.96 | 0.933 | 0.923 | 0.923 |
| 0.27 | 28 | 101.00 | 6.50 | 5.87 | 5.95 | 5.93 | 1.108 | 1.093 | 1.096 |
| 0.25 | 28 | 111.00 | 6.20 | 6.10 | 6.27 | 6.22 | 1.017 | 0.989 | 0.997 |
| 0.25 | 28 | 94.50 | 5.80 | 5.71 | 5.79 | 5.74 | 1.016 | 1.002 | 1.011 |
| 0.22 | 28 | 118.00 | 6.20 | 6.24 | 6.52 | 6.41 | 0.994 | 0.952 | 0.967 |
| | | | | Purata | | 0.948 | | 0.954 | 0.945 |

Rajah 2, 3, dan 4 memperlihatkan lengkung ramalan daripada persamaan (13), (14), dan (15) ke atas data eksperimen. Semua lengkung ramalan membentuk lengkungan. Ini bermakna formula-formula tersebut sesuai dengan yang dicadangkan, dan menunjukkan pola pengembangan kekuatan tegangan pecah yang selalunya meningkat sebagaimana meningkatnya kekuatan mampatan. Walaupun begitu, peningkatan ini tidak linear malah semakin

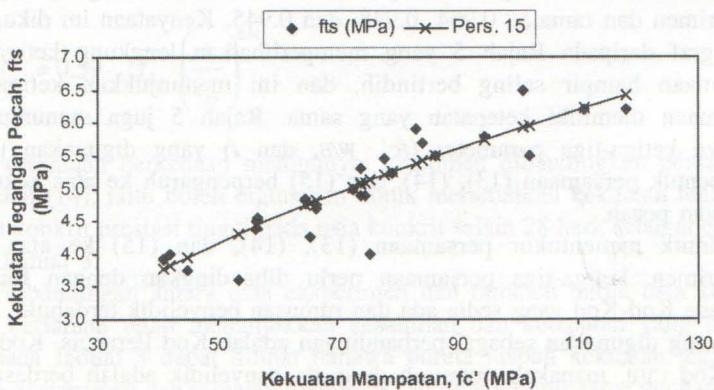
menurun. Kelakuan lengkung ini sesuai dengan hasil rujukan daripada Neville (1995) mahupun Marzouk dan Chen (1995). Peningkatan kekuatan tegangan adalah lebih kecil berbanding dengan peningkatan kekuatan mampatannya. Ini bermakna bahawa konkrit kekuatan tinggi lebih rapuh daripada konkrit yang memiliki kekuatan rendah.



RAJAH 2. Graf persamaan (13) ke atas data hasil uji kaji



RAJAH 3. Graf persamaan (14) ke atas data hasil uji kaji



RAJAH 4. Graf persamaan (15) ke atas data hasil uji kaji

JADUAL 2. Perbandingan kekuatan tegangan pecah antara hasil penyelidikan, ramalan dan kod-kod serta cadangan dari beberapa penyelidik

| W/B | Usia Konkrit (hari) | Penyelidikan | | Ramalan Kekuatan Tegangan Pecah f_{ts} (MPa) | | | | | | | | |
|------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|------------|------------|--------|--|--|
| | | Kekuatan Mampatan f_c' (MPa) | Kekuatan Tegangan Pecah f_{ts} (MPa) | Pers. | Pers. | Pers. | Kod Perancis | Kod ACI | Kod CEB | Irvani | | |
| | | | | 13 | 14 | 15 | | | | | | |
| 0.55 | 28 | 40.99 | 3.93 | 3.66 | 3.61 | 3.78 | 3.06 | 3.78 | 3.62 | 3.65 | | |
| 0.44 | 28 | 42.00 | 4.00 | 3.71 | 3.71 | 3.82 | 3.12 | 3.82 | 3.68 | 3.69 | | |
| 0.40 | 28 | 44.80 | 3.75 | 3.87 | 3.85 | 3.95 | 3.29 | 3.95 | 3.85 | 3.82 | | |
| 0.40 | 28 | 56.20 | 4.39 | 4.41 | 4.32 | 4.42 | 3.97 | 4.42 | 4.48 | 4.27 | | |
| 0.38 | 28 | 56.70 | 4.56 | 4.44 | 4.35 | 4.44 | 4.00 | 4.44 | 4.50 | 4.29 | | |
| 0.38 | 28 | 64.50 | 4.84 | 4.76 | 4.64 | 4.74 | 4.47 | 4.74 | 4.91 | 4.58 | | |
| 0.36 | 28 | 66.50 | 4.70 | 4.83 | 4.73 | 4.81 | 4.59 | 4.81 | 5.01 | 4.65 | | |
| 0.36 | 28 | 65.40 | 4.25 | 4.79 | 4.69 | 4.77 | 4.52 | 4.77 | 4.95 | 4.61 | | |
| 0.35 | 28 | 73.80 | 4.90 | 5.09 | 4.99 | 5.07 | 5.03 | 5.07 | 5.37 | 4.90 | | |
| 0.35 | 28 | 74.00 | 5.30 | 5.10 | 5.00 | 5.08 | 5.04 | 5.08 | 5.38 | 4.90 | | |
| 0.34 | 28 | 72.50 | 5.00 | 5.05 | 4.96 | 5.02 | 4.95 | 5.02 | 5.31 | 4.85 | | |
| 0.32 | 28 | 74.60 | 4.90 | 5.12 | 5.05 | 5.10 | 5.08 | 5.10 | 5.41 | 4.92 | | |
| 0.30 | 28 | 77.90 | 5.45 | 5.23 | 5.19 | 5.21 | 5.27 | 5.21 | 5.57 | 5.03 | | |
| 0.30 | 28 | 79.10 | 5.23 | 5.27 | 5.22 | 5.25 | 5.35 | 5.25 | 5.63 | 5.07 | | |
| 0.30 | 28 | 84.20 | 5.70 | 5.42 | 5.39 | 5.41 | 5.65 | 5.41 | 5.87 | 5.23 | | |
| 0.30 | 28 | 83.30 | 5.90 | 5.40 | 5.36 | 5.38 | 5.60 | 5.38 | 5.83 | 5.20 | | |
| 0.29 | 28 | 86.50 | 5.49 | 5.49 | 5.48 | 5.49 | 5.79 | 5.49 | 5.98 | 5.30 | | |
| 0.28 | 28 | 102.00 | 5.50 | 5.89 | 5.96 | 5.96 | 6.72 | 5.96 | 6.67 | 5.76 | | |
| 0.27 | 28 | 101.00 | 6.50 | 5.87 | 5.95 | 5.93 | 6.66 | 5.93 | 6.63 | 5.73 | | |
| 0.25 | 28 | 111.00 | 6.20 | 6.10 | 6.27 | 6.22 | 7.26 | 6.22 | 7.06 | 6.01 | | |
| 0.25 | 28 | 94.50 | 5.80 | 5.71 | 5.79 | 5.74 | 6.27 | 5.74 | 6.34 | 5.54 | | |
| 0.22 | 28 | 118.00 | 6.20 | 6.24 | 6.52 | 6.41 | 7.68 | 6.41 | 7.36 | 6.19 | | |

Jadual 1 menunjukkan perbandingan nisbah kekuatan tegangan pecah dengan data eksperimen dan ramalan. Setiap persamaan menghasilkan julat nisbah kekuatan tegangan pecah hasil penyelidikan dengan hasil ramalan di antara 0.835 hingga 1.108, dengan nilai puratanya 0.945 hingga 0.954. Nilai ini didapati hampir di antara satu sama lain dengan dan nilai kesalahan $\pm 5\%$. Ini menunjukkan ketepatan persamaan (13), (14), dan (15) dibandingkan dengan data eksperimen adalah sangat baik. Sekiranya dibandingkan nisbah ketepatan antara ketiga-tiga persamaan maka berdasarkan hasil pengiraan daripada Jadual 1, ketepatan yang baik ialah persamaan 14, persamaan 13, dan persamaan 15 dengan nilai purata nisbah kekuatan tegangan pecah eksperimen dan ramalan 0.954, 0.948, dan 0.945. Kenyataan ini dikuatkan oleh graf daripada Rajah 5 yang memperlihatkan lengkung ketiga-tiga persamaan hampir saling bertindih, dan ini menunjukkan ketiga-tiga persamaan memiliki ketepatan yang sama. Rajah 5 juga menunjukkan bahawa ketiga-tiga parameter (f_c' , W/B , dan t) yang digunakan untuk membentuk persamaan (13), (14), dan (15) berpengaruh ke atas kekuatan tegangan pecah.

Untuk menenturk persamaan (13), (14), dan (15) ke atas data eksperimen, ketiga-tiga persamaan perlu dibandingkan dengan formula daripada Kod-Kod yang sedia ada dan rumusan penyelidik terdahulu. Kod-Kod yang digunakan sebagai perbandingan adalah Kod Perancis, Kod ACI, dan Kod CEB, manakala rumusan daripada penyelidik adalah berdasarkan formula Irivani, 1996.

Jadual 2 atau Rajah 6, menunjukkan hasil perbandingan lengkung persamaan (13), (14), dan (15) dengan persamaan perbandingan. Pada kekuatan mampatan kurang daripada 50 MPa, semua lengkung hampir saling bertindih dengan semua formula kecuali formula daripada Kod Perancis. Ini bermakna ketiga-tiga persamaan sesuai untuk kekuatan mampatan 50 MPa atau lebih kecil. Dalam julat antara 50 hingga 90 MPa, semua formula didapati saling berdekatan. Pada julat tersebut menunjukkan semua formula dapat digunakan untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah. Sedangkan pada kekuatan mampatan lebih besar daripada 90 MPa, persamaan (13), (14), dan (15) tetap hampir dengan Kod ACI dan usulan Irivani, 1996 mahupun terhadap data eksperimen, tetapi semakin menjauhi lengkung Kod Perancis dan Kod CEB. Ini mungkin disebabkan lengkung daripada Kod Perancis adalah linear. Kecenderungan data eksperimen juga selalu meningkat, namun peningkatannya lebih kecil jika dibandingkan dengan peningkatan kekuatan mampatan. Dengan demikian kecenderungan data tidak linear tetapi melengkung, maka benarlah jika lengkung Kod Perancis semakin jauh daripada persamaan (13), (14), dan (15). Untuk Kod CEB, lengkung yang berlaku adalah garis lengkung, namun penerapan data ke atas formula ini menghasilkan lengkung yang meningkat lebih besar daripada data eksperimen, terutama selepas kekuatan mampatan 70 MPa, dan semakin menjauhi persamaan (13), (14), dan (15) manakala kekuatan mampatan lebih tinggi lagi (lihat Rajah 6).

Dengan disokong kuat oleh Kod-kod dan rumusan penyelidik, iaitu Kod ACI dan rumusan Irivani (1996) yang menentur mulai daripada kekuatan mampatan 50 hingga 120 MPa secara baik dan menentur secara baik pula daripada Kod Perancis dan CEB pada kekuatan mampatan 50 hingga 90 MPa, maka persamaan (13), (14), dan (15) sangat berkesan digunakan sebagai formula untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah konkrit prestasi tinggi. Dari ketiga-tiga persamaan berkenaan, satu dari tiga dipilih apabila hendak menggunakan usulan formula ini.

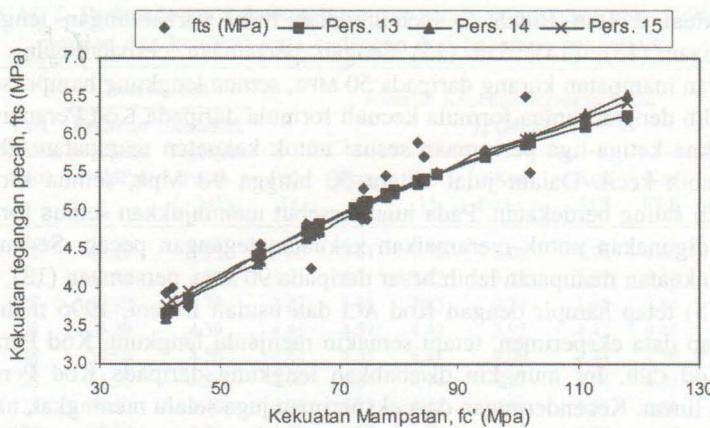
Rajah 6 menunjukkan persamaan (15) dan formula ACI saling bertindih, ini berlaku kerana kedua-dua formula hampir serupa [lihat Persamaan (4) dan (15)]. Jika t pada persamaan (15) usia konkrit diambil 28 hari, maka $(t/t_{28})^{0.04}$ pada persamaan berkenaan akan bernilai 1, ini bermakna bahawa persamaan (15) serupa dengan formula ACI untuk t sama dengan 28 hari.

Persamaan (15) memiliki pemalar masa, dimana t usia konkrit.

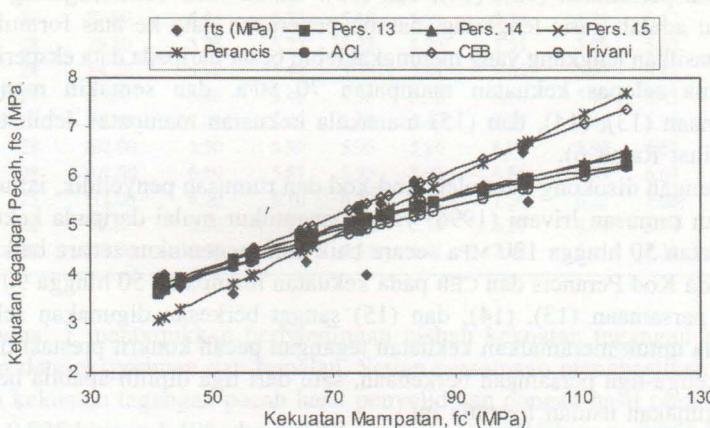
$$f_{ts,t} = 0.59 \cdot \sqrt{f_{c,t}} \cdot \left(\frac{t}{t_{28}} \right)^{0.04}.$$

Persamaan berkenaan mempunyai kelebihan dibandingkan persamaan (13) dan (14), iaitu boleh digunakan untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah konkrit prestasi tinggi pada usia konkrit selain 28 hari, sebagai contoh lihat Jadual 3.

Perbandingan antara data eksperimen dan ramalan untuk usia konkrit yang berlainan tetap menunjukkan kesahihan dan ketepatan yang tinggi. Daripada Jadual 3 dapat dilihat bahawa purata nisbah kekuatan tegangan pecah eksperimen dan ramalan menunjukkan nilai hampir sama dengan satu.



RAJAH 5. Graf perbandingan kekuatan tegangan pecah persamaan (13), (14), dan (15)



RAJAH 6. Graf perbandingan kekuatan tegangan pecah antara persamaan (13), (14), dan (15) dengan Kod Perancis, ACI, dan CEB dan rumusan Irivani (1996)

Ini bermakna bahawa persamaan (15) sesuai digunakan untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah konkrit prestasi tinggi pada usia 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari (Jadual 1), dan 56 hari.

KESIMPULAN

Persamaan (13), (14), dan (15) sesuai dengan yang dicadangkan, iaitu membentuk lengkung mengikut pola daripada data eksperimen. Persamaan (13), (14), dan (15) menunjukkan ketelitian yang memuaskan, dengan nisbah kekuatan tegangan pecah antara hasil penyelidikan dan ramalan nilai puratanya hampir satu, iaitu antara 0.945 hingga 0.954, dengan nilai kesalahannya lebih kurang 5 %. Setelah ditentukurkan ke atas Kod-Kod yang sedia ada dan rumusan penyelidik lain serta dibandingkan dengan data eksperimen, persamaan (13), (14), dan (15) dapat digunakan sebagai formula untuk

JADUAL 3. Ramalan kekuatan tegangan pecah pada berbagai usia t (hari)

| Usia Konkrit | Eksperimen | | Ramalan Kekuatan Tegangan Pecah $f_{ts,t}$ (MPa) | Nisbah eksperimen Dan ramalan $f_{ts,t}$ |
|-----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| | Kekuatan Mampatan $f'_{c,t}$ (MPa) | Kekuatan Tegangan Pecah $f_{ts,t}$ (MPa) | | |
| 3 hari | 19.0 | 2.3 | 2.35 | 0.98 |
| | 20.0 | 2.4 | 2.41 | 0.99 |
| | 28.6 | 2.9 | 2.89 | 0.99 |
| | 28.9 | 3.0 | 2.90 | 1.02 |
| | 36.1 | 3.3 | 3.24 | 1.03 |
| | 44.5 | 3.7 | 3.60 | 1.03 |
| Purata | | | | 1.01 |
| 7 hari | 23.0 | 2.5 | 2.68 | 0.93 |
| | 33.0 | 3.5 | 3.21 | 1.09 |
| | 40.5 | 3.2 | 3.55 | 0.91 |
| | 48.2 | 4.1 | 3.88 | 1.06 |
| | 58.0 | 4.2 | 4.25 | 0.98 |
| | 69.0 | 4.5 | 4.64 | 0.98 |
| Purata | | | | 0.99 |
| 14 hari | 36.0 | 3.3 | 3.44 | 0.95 |
| | 42.8 | 3.9 | 3.75 | 1.03 |
| | 59.3 | 4.0 | 4.42 | 0.91 |
| | 63.3 | 4.5 | 4.57 | 0.99 |
| | 67.7 | 4.7 | 4.72 | 1.00 |
| | 77.0 | 5.1 | 5.04 | 1.01 |
| Purata | | | | 0.98 |
| 56 hari | 49.9 | 4.3 | 4.29 | 1.00 |
| | 53.1 | 5.4 | 4.42 | 1.22 |
| | 61.7 | 4.6 | 4.76 | 0.97 |
| | 73.2 | 5.1 | 5.19 | 0.99 |
| | 86.5 | 5.5 | 5.64 | 0.98 |
| | 92.3 | 5.9 | 5.83 | 1.01 |
| Purata | | | | 1.03 |

meramalkan kekuatan tegangan pecah konkrit prestasi tinggi. Selain parameter f'_c yang sudah biasa digunakan untuk meramal kekuatan tegangan pecah, parameter W/B dan usia konkrit, t turut memberikan kesan yang baik ke atas persamaan yang diperolehi, bahkan mungkin lebih sesuai digunakan memandangkan W/B atau usia t berpengaruh dalam menentukan nilai kekuatan tegangan pecah. Persamaan (15) cukup sesuai digunakan untuk meramal kekuatan tegangan pecah pada usia konkrit 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari ke atas konkrit prestasi tinggi. Hubungan kekuatan tegangan dan kekuatan mampatan di dalam punca kuasa dua seperti formula ACI, ternyata masih relevan untuk meramalkan kekuatan tegangan pecah konkrit prestasi tinggi. Sebaliknya, bentuk persamaan lengkung linear sebagaimana formula Perancis, nampak kurang relevan terutama untuk kekuatan konkrit sangat tinggi.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaannya kepada Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar, Malaysia dan Universiti Kebangsaan Malaysia yang telah memberikan peruntukan untuk kajian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan buat syarikat Ready Mixed Concrete (M) Sdn. Bhd. dan syarikat MBT (M) Sdn. Bhd. yang telah sudi menyumbangkan bahan-bahan keperluan untuk kajian ini.

RUJUKAN

- ACI 363R-84. 1993. State-of-the-art report on high-strength concrete, *ACI Annual of Concrete Practice*, Part 1, Detroit: American Concrete Institute.
- Aitcin, P. C. and Mehta, P. K. 1990. Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *ACI Materials Journal* 87(2): 103-107.
- CEB-PIP Model code 1990. 1993. *Committee Euro-International du Beton (CEB-PIP)*. London: Thomas Telford.
- De Larrard, F. and Malier, Y. 1992. Engineering properties of very high performance concrete. *High Performance Concrete: From Material to Structure*. London: E & FN Spon.
- Gardner, N. J. 1990. Effect of temperature on the early-age properties of type I, type III, and type I/fly ash concrete. *ACI Materials Journal* 87(1): 68-78.
- Iravani, S. 1996. Mechanical properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal* 93(5): 416-426.
- Kim, J. K., Han, S. H., Park, Y. D. dan Noh, J. H. 1998. Material properties of self-flowing concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 10(4): 244-249.
- Kuennen, T. 1998. What is "high-performance concrete"? *Transportation Research Board American Concrete Pavement Association*. The Expressway Publishing Project.
- Marzouk, H. and Chen, Z. W. 1995. Fracture energy and tension properties of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 7(2): 108-116.
- Mindes, S. and Young J. F. 1981. *Concrete*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Neville, A. M. 1995. *Properties of Concrete*, 4th Edition, Burnt Mill, Harlow: Longman Group Limited.
- Wiegrink, K., Marikunte, S. dan Shah, S. P. 1996. Shrinkage cracking of high-strength concrete. *ACI Materials Journal* 93(5): 409-415.
- Zia, P., Ahmad, S. and Leming, M. 1998. High-performance concrete: a state-of-art report (1989-1994). *Transportation Research Board American Concrete Pavement Association*. The Expressway Publishing Project.

Muhammad Fauzi Mohd. Zain

Jabatan Seni Bina

Fakulti Kejuruteraan

Universiti Kebangsaan Malaysia

Ade Ilham, Hilmi Mahmud

Wan Hamidon Wan Badaruzzaman

Kamarudin Mohd Yusof

Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur

Fakulti Kejuruteraan

Universiti Kebangsaan Malaysia.

Faizal Mahmud,

Ranhill Bersekutu Sdn Bhd