

Persamaan Korelasi Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi dengan Agregat Alami dan Slag Nikel

Saptahari Sugiri¹⁾
Saloma²⁾
Ria Catur Yulianti³⁾

Abstrak

Beton merupakan material konstruksi bangunan yang sering digunakan karena mudah pada waktu pelaksanaan konstruksi dan biaya pemeliharaan yang relatif murah dibandingkan material lainnya. Dengan maraknya pembangunan dimana aspek lingkungan harus diperhatikan, maka agregat kasar dan halus yang berasal dari sumber daya alam sebaiknya dibatasi, bila memungkinkan diganti dengan agregat produk limbah dari industri. Perkembangan ilmu pengetahuan di bidang teknologi beton memungkinkan penggunaan limbah menjadi bahan dasar pembentuk beton, sehingga di satu sisi penggunaan bahan alam yang merusak lingkungan dapat diatasi dan di sisi lain bahan limbah dimanfaatkan seoptimal mungkin untuk bahan dasar pembentuk beton. Dalam setiap minggu, PT. INCO menghasilkan limbah padat berupa terak nikel dalam jumlah relatif besar, yaitu 77.441 ton. Sehingga dapat dilakukan penelitian mengenai penggunaan limbah padat tersebut sebagai bahan dasar pembentuk beton, baik sebagai agregat kasar maupun halus. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mendapatkan persamaan korelasi sifat mekanik beton kinerja tinggi (high performance concrete) dengan agregat alami dan slag nikel. Terhadap seluruh bahan pembentuk beton dilakukan pengujian mengikuti standar ASTM. Bahan dasar pembentuknya terdiri dari semen, agregat kasar, agregat halus, air dan bahan tambahan lainnya. Semua pengujian sifat mekanik beton juga mengikuti standar ASTM dan dilakukan untuk umur beton 3, 7, 14, 21, 28 dan 56 hari dengan masing-masing umur sebanyak tiga sampel. Seluruh data hasil penelitian yang telah diperoleh dilakukan analisis regresi nonlinier. Selanjutnya dibahas berbagai model korelasi sifat mekanik beton yang telah diuji. Berdasarkan analisis model korelasi diperoleh bentuk persamaan sebagai berikut :

$y = ab^t f_{c28}$, dimana untuk :

Kuat tekan beton	: $a = 0,389$: $b = 0,996$: $c = 0,323$
Modulus elastisitas	: $a = 353$: $b = 1,001$: $c = 0,083$
Kuat tarik tidak langsung	: $a = 0,03$: $b = 1,002$: $c = 0,115$
Kuat lentur	: $a = 0,052$: $b = 0,998$: $c = 0,224$

Adapun kelebihan persamaan korelasi yang diusulkan dibandingkan persamaan dalam peraturan yang ada adalah dapat menganalisis sifat mekanik beton kinerja tinggi berdasarkan fungsi waktu $0 < t \leq 56$ dan mempunyai nilai standar error yang lebih kecil.

Kata-kata Kunci : beton kinerja tinggi, kuat tekan, persamaan korelasi, slag nikel.

Abstrack

Concrete is construction material of building that is often is applied by easy to when realization of construction and maintenance cost that is cheap relative compared to other material. With the hoisterous of development where environmental aspect to paid attention, hence fine and coarse aggregate coming from natural resources better be limited, if possible is changed with waste product aggregate from industry. Development of science in concrete technology area enables usage of waste becomes concrete former base material, so that in one usage sides of nature material destroying area can be overcome and on the other side waste material is exploited as optimal as possible for concrete former base material. In each week, PT. INCO yields solid waste in the form of nickel slag in number relative big, that is 77.441 tons. So can be done research about usage of the solid waste as component of concrete former basis, either as fine and coarse aggregate. Purpose of principal of this research is to get correlation equation of high performance concrete with natural aggregate and nickel slag. To all concrete former material is done assaying to follow ASTM standard. Its the former base material consisted of cements, coarse aggregate, fine aggregate, water and other admixture. All assayings of concrete mechanical

1) Staf Pengajar KK Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-ITB.

2) Staf Pengajar Universitas Sriwijaya, Palembang.

3) Mahasiswa Pasca Sarjana, Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-ITB.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 4 Januari 2007 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 15 Januari 2007 - 8 Februari 2007. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 12 Maret 2007 hingga 15 Maret 2007.

property also follows ASTM standard and done for concrete age 3, 7, 14, 21, 28 and 56 days, in which three sample specimens were tested for each age. All research result data which has been obtained done by regression analysis nonlinier. Here in after is studied various correlation models of concrete mechanical property which has been tested. Based on correlation model analysis is obtained form of equation as follows : $y = ab^t f_{c28}$, where for :

- | | | | |
|------------------------------|---------------|-------------|-------------|
| 1. Compressive strength | : $a = 0,389$ | $b = 0,996$ | $c = 0,323$ |
| 2. Modulus of elasticity | : $a = 353$ | $b = 1,001$ | $c = 0,083$ |
| 3. Indirect tensile strength | : $a = 0,03$ | $b = 1,002$ | $c = 0,115$ |
| 4. Modulus of Rupture | : $a = 0,052$ | $b = 0,998$ | $c = 0,224$ |

The advantage of this correlation equation over the standard equation is the ability to analyze the mechanical properties of high performance concrete by function of time $0 < t \leq 56$ and has a smaller standard error

Keyword : High performance concrete, compressive strength, correlation equation, nickel slag.

1. Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Penggunaan limbah menjadi bahan dasar pembentukan beton, merupakan suatu jawaban terhadap pembangunan yang berwawasan lingkungan. Terak nikel sebagai bahan konstruksi menjawab perihwal wawasan lingkungan tersebut, dimana disatu sisi agregat terak nikel yang merupakan produk limbah padat dapat digunakan sebagai agregat dalam campuran beton, dilain sisi penggunaan limbah padat tersebut dapat menggantikan atau mengurangi penggunaan batu alam, sehingga dari kedua sisi, aspek wawasan lingkungan terpenuhi (Sugiri, 2005).

Terak nikel merupakan limbah industri nikel PT. *International Nickel Indonesia* (PT. INCO) yang berlokasi di Soroako, Sulawesi Selatan. Dalam setiap minggu, PT. INCO menghasilkan limbah padat berupa terak nikel dalam jumlah yang relatif besar, yaitu 77.441 ton (www.pt-inco.co.id). Limbah ini masih berbentuk bongkahan dan mengandung *Silika* (Si) serta *Ferro* (Fe) yang merupakan unsur yang dominan. Unsur *Silika* sangat berperan dalam memperbaiki *interface* antara agregat dengan campuran pasta dan *Ferro* dapat berfungsi menambah berat material terak nikel itu sendiri (Sugiri, et.al., 1997, 1998). Sehingga, sangat memungkinkan untuk menggunakan terak nikel sebagai agregat dalam campuran beton berat (*heavyweight concrete*).

1.2. Tujuan penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Pembuatan beton dengan menggunakan terak nikel sebagai agregat halus dan agregat kasar, kemudian dibandingkan dengan agregat alami.
2. Membuat persamaan korelasi kuat tekan beton (*compression strength*), modulus elastisitas, kuat tarik belah (*splitting*) dan kuat lentur (*modulus of rupture*).

1.3 Ruang lingkup penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini direncanakan akan mencakup pembahasan sebagai berikut :

1. Metoda yang digunakan dalam perencanaan campuran beton berat adalah metoda ACI 211.4R-93 "Guide for Selecting Proportions for High-Strength with Portland Cement and Fly Ash".
2. Pengujian sifat mekanik beton meliputi pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas dan kuat lentur.
3. Membuat persamaan korelasi sifat mekanik beton.

2. Studi Pustaka

Material beton terdiri dari agregat dan matriks pasta semen. Antara agregat dan mortar terdapat interface zone (zona antar permukaan). Interface zone merupakan daerah yang paling lemah pada beton. Kehancuran pada beton biasanya terjadi pada interface, yaitu bidang kontak antara pasta semen dengan agregat, dimana ikatannya tidak sempurna. Memperkuat zona antara permukaan mortar dan agregat merupakan suatu pemecahan permasalahan untuk mendapatkan beton mutu tinggi (Sugiri, 2005).

Beberapa bahan tambahan yang dapat dipakai untuk memperbaiki interface antara lain, terak nikel, abu terbang dan silica fume, karena memiliki kandungan silika yang cukup tinggi.

Hasil pengujian komposisi kimia dan fisika terak nikel dapat dilihat pada **Tabel 2.1** dan **2.2**.

Tabel 2.1 Komposisi kimia terak nikel

Senyawa	Jumlah (%)
Silika (SiO ₂)	41,47
Alumina (Al ₂ O ₃)	2,58
Ferro oksida (Fe ₂ O ₃)	30,44
Magnesia (MgO)	22,75
Alkalis(Na ₂ O + K ₂ O)	0,68

Tabel 2.2 Sifat fisik terak nikel

Pengujian	Terak Nikel		Split Lagadar
	Berpori	Padat	
Berat Volume (gram/liter)	1327	1913	1659
Specific gravity (SSD)	2,835	3,215	2,62
Specific Gravity (Dry)	2,692	3,179	2,53
Kadar Air (%)	0,11	0,11	2,8
Absorpsi (%)	5,301	1,151	3,73

Dari hasil pengujian kimia terak nikel ternyata kandungan senyawa silika memberikan bobot persentase yang paling dominan. Menurut ASTM C618-93, material dengan komposisi kimia SiO₂, Fe₂O₃ dan Al₂O₃ lebih besar dari 70%, dapat digunakan sebagai bahan tambahan (substitusi) pada campuran beton. Hasil pengujian kimiawi terak nikel menunjukkan komposisi yang lebih besar dari 70%. Komposisi kimia terak nikel terdiri dari Silika 41,47%, Ferri Oksida 30,44% dan Alumina 2,58%. Dengan senyawa silika yang tinggi diharapkan penggunaan terak nikel sebagai agregat kasar ataupun agregat halus dapat memperkuat interface antara agregat dan pasta, sehingga kehancuran beton tidak terjadi pada interface (Sugiri, et.al., 1997, 1998).

Adapun pada pembentukan bongkahan terak nikel tersebut ada dua macam terak yang terbentuk, yaitu terak nikel yang berpori (*specific gravity* sekitar 2,835 t/m³) dan terak nikel padat (*specific gravity* 3,215 –

3,858 t/m³), sehingga dalam penggunaannya, agregat terak nikel dapat digunakan sebagai beton normal ($\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$) dan beton berat ($\gamma = 3000 \text{ kg/m}^3$) (Sugiri, 2005).

Adapun proses pembuatan nikel dan terjadinya terak nikel di perusahaan penambangan nikel PT INCO seperti terlihat pada Gambar 2.1.

3. Hasil Studi Eksperimental

3.1 Perencanaan campuran beton

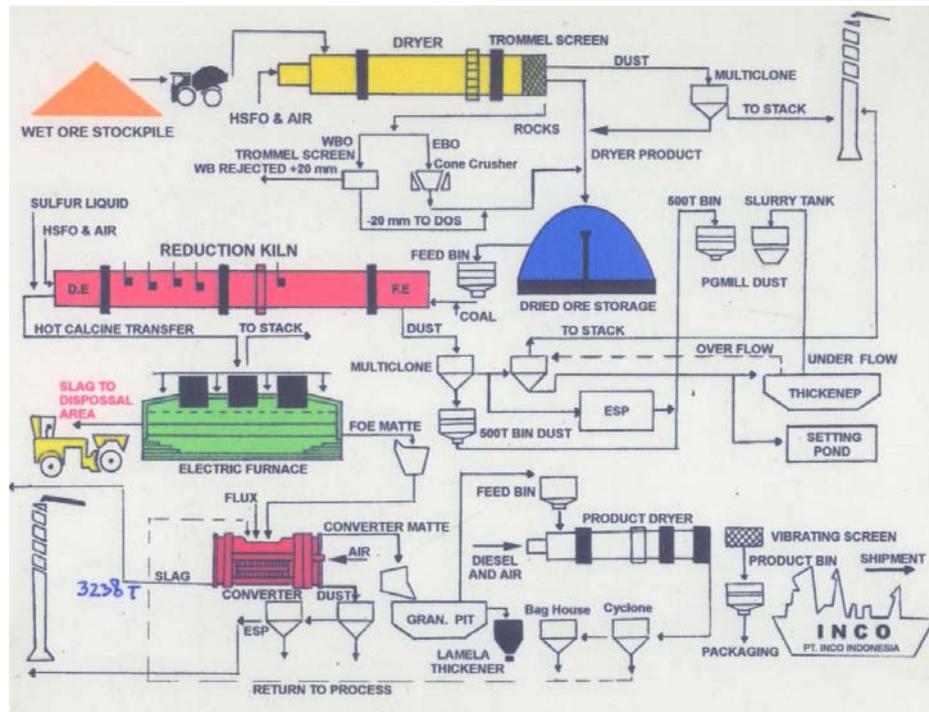
Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode ACI 211.4R-93 dan berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan komposisi campuran beton seperti terlihat pada Tabel 3.1.

3.2. Kuat tekan

Data hasil uji kuat tekan rata-rata silinder beton untuk berbagai umur diberikan pada Tabel 3.1, dimana nilai kuat tekan yang didapat terus meningkat secara parabolik hingga umur 56 hari. Gambar 3.1 merupakan penjabaran lebih lanjut dari Tabel 3.2.

Tabel 3.1. Komposisi campuran beton per m³

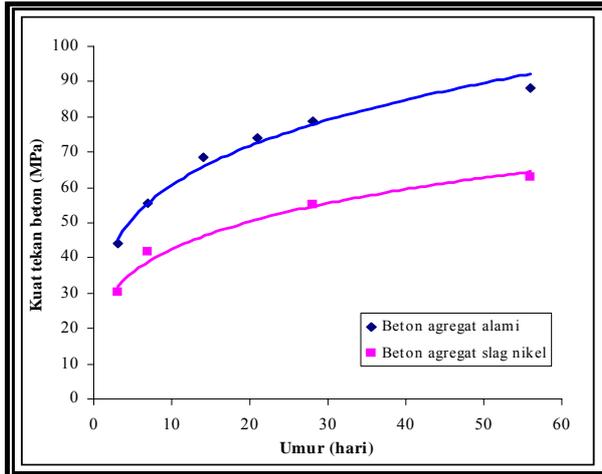
Material	Agregat	
	Alam	Terak nikel
Semen (kg)	520	461
Air (lt)	146	184
Agregat kasar (kg)	1117,9	1424,8
Agregat halus (kg)	685	981,7



Gambar 2.1. Proses pengolahan nikel (Sugiri, et.al., 1997)

Tabel 3.2. Hasil pengujian kuat tekan beton

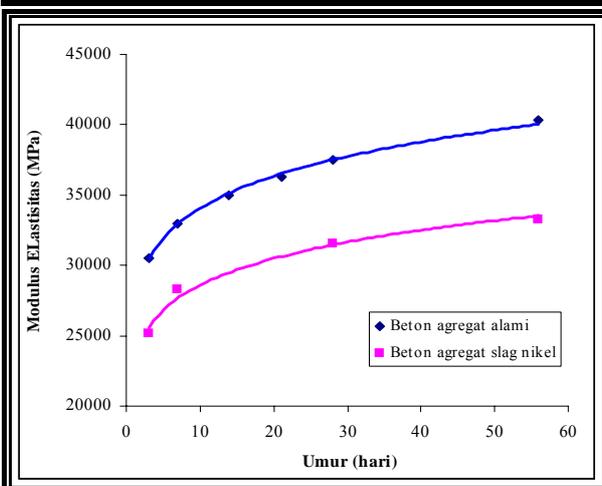
Umur (hari)	Kuat Tekan Beton Rata-rata (f_c') MPa	
	Beton agregat alami	Beton agregat slag nikel
3	44,064	30,29
7	55,433	41,60
14	68,384	
21	74,170	
28	78,760	55,16
56	88,234	62,82



Gambar 3.1. Grafik hubungan kuat tekan versus umur

Tabel 3.3. Hasil pengujian modulus elastisitas

Umur (hari)	Modulus Elastisitas (E_c) MPa	
	Beton agregat alami	Beton agregat slag nikel
3	30569,889	25172,069
7	32917,609	28313,357
14	35006,696	
21	36271,360	
28	37505,243	31557,566
56	40326,673	33214,011



Gambar 3.2. Grafik hubungan modulus elastisitas versus umur

3.3 Modulus elastisitas

Modulus elastisitas adalah nilai yang menunjukkan kekuatan beton dalam menahan deformasi. Pada beton normal makin besar kuat tekan makin besar pula nilai modulus elastisitas. Keadaan ini juga terjadi pada beton dengan campuran slag nikel. Dilihat dari hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas menunjukkan bahwa semakin besar nilai kuat tekan beton semakin besar pula modulus elastisitasnya. Beton dengan nilai modulus elastisitas yang besar akan memberikan nilai kekakuan yang makin besar bila ditinjau dari segi kekuatan struktur, yang berbanding langsung dengan nilai modulus dan inersia penampang, serta berbanding terbalik dengan panjang suatu bahan.

3.4 Kuat tarik belah (*splitting*)

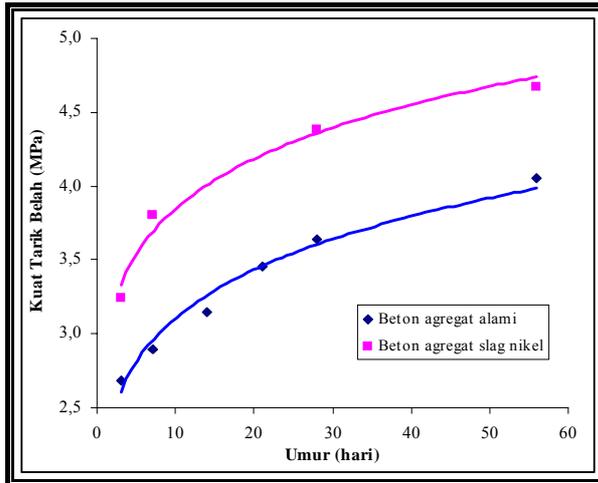
Nilai kuat tarik belah (*splitting test*) rata-rata hingga umur 56 hari diberikan pada Tabel 3.4. Pada beton normal makin besar kuat tekan makin besar pula nilai kuat tarik belahnya. Keadaan ini juga terjadi pada beton dengan agregat slag nikel. Dilihat dari hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah menunjukkan bahwa semakin besar nilai kuat tekan beton semakin besar pula kuat tarik belahnya. Selanjutnya persentase perbandingan kuat tarik belah terhadap kuat tekannya dapat dilihat pada Tabel 3.5. Besarnya persentase kuat tarik belah rata-rata terhadap kuat tekannya yaitu 4,966% untuk beton agregat alami, sedangkan untuk beton dengan agregat slag nikel sebesar 8,814%.

Tabel 3.4. Hasil pengujian kuat tarik belah

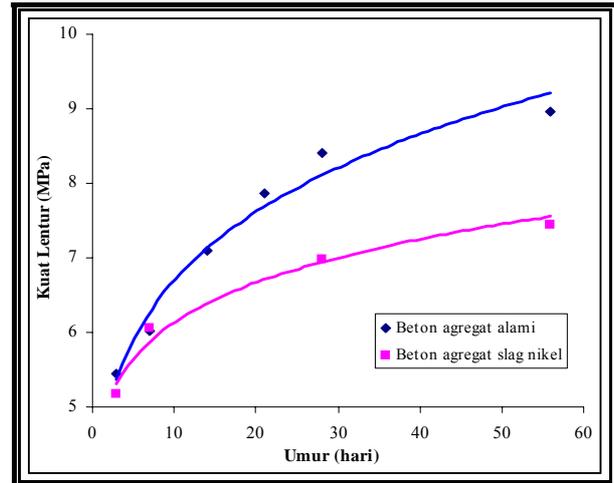
Umur (hari)	Kuat Tarik Belah (f_{sp}) MPa	
	Beton alami	beton slag nikel
3	2,687	3,247
7	2,897	3,805
14	3,144	
21	3,454	
28	3,640	4,382
56	4,057	4,676

Tabel 3.5. Perbandingan kuat tarik belah terhadap kuat tekan

Umur (hari)	Beton agregat alami			Beton agregat slag nikel		
	(f_c') MPa	(f_{sp}) MPa	f_{sp}/f_c'	(f_c') MPa	(f_{sp}) MPa	f_{sp}/f_c'
3	44,064	2,687	6,097	30,290	3,247	10,720
7	55,433	2,897	5,226	41,600	3,805	9,148
14	68,384	3,144	4,598			
21	74,170	3,454	4,657			
28	78,760	3,640	4,622	55,160	4,382	7,944
56	88,234	4,057	4,598	62,820	4,676	7,444
	Rata-rata		4,966	Rata-rata		8,814



Gambar 3.3. Grafik hubungan kuat tarik belah versus umur



Gambar 3.4. Grafik hubungan kuat lentur versus umur

3.5 Kuat lentur (*modulus of rupture*)

Nilai kuat lentur rata-rata hingga umur 56 hari diberikan pada Tabel 3.6. Pada beton normal makin besar kuat tekan makin besar pula nilai kuat lenturnya. Keadaan ini juga terjadi pada beton dengan agregat slag nikel. Dilihat dari hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur menunjukkan bahwa semakin besar nilai kuat tekan beton semakin besar pula kuat lenturnya. Selanjutnya persentase perbandingan kuat lentur terhadap kuat tekannya dapat dilihat pada Tabel 3.7. Besarnya persentase kuat lentur rata-rata terhadap kuat tekannya yaitu 10,832% untuk beton tanpa tailing, sedangkan untuk beton dengan tailing sebesar 14,043%.

Tabel 3.6. Hasil pengujian kuat lentur

Umur (hari)	Kuat Lentur (fr) MPa	
	Beton alami	beton slag nikel
3	5,439	5,173
7	6,016	6,063
14	7,097	
21	7,859	
28	8,405	6,981
56	8,958	7,450

Tabel 3.7. Perbandingan kuat lentur terhadap kuat tekan

Umur (hari)	Beton agregat alami			Beton agregat slag nikel		
	(fc') MPa	(fr) MPa	fr/fc'	(fc') MPa	(fr) MPa	fr/fc'
3	44,064	5,439	12,344	30,290	5,173	17,080
7	55,433	6,016	10,853	41,600	6,063	14,574
14	68,384	7,097	10,377			
21	74,170	7,859	10,596			
28	78,760	8,405	10,672	55,160	6,981	12,657
56	88,234	8,958	10,152	62,820	7,450	11,860
	Rata-rata		10,832	Rata-rata		14,043

4. Persamaan Korelasi

4.1 Persamaan korelasi antara kuat tekan beton dan umur

Dalam peraturan CEB/FIP Model Code 1990 diusulkan persamaan korelasi antara kuat tekan dan umur adalah :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (1)$$

dimana :

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \frac{28}{t} \right]^p \right\}$$

$$f_{cm}(t) = \text{kuat tekan beton umur } t \text{ hari}$$

$$T = \text{umur beton, hari}$$

$$S = 0,25$$

$$P = 0,5$$

$$f_{cm} = \text{kuat tekan beton umur 28 hari}$$

Persamaan korelasi antara kuat tekan beton dan umur yang didapat berdasarkan data hasil penelitian yang telah dilakukan dengan $R^2 = 0,99,87$ adalah :

$$f_{cm}(t) = 0,39(1,00)^t (t)^{0,323} (f_{c28}) \quad (2a)$$

dimana :

$$f_{cm}(t) = \text{kuat tekan beton umur } t \text{ hari, MPa}$$

$$T = \text{umur beton, } 0 < t \leq 56 \text{ hari}$$

$$f_{c28} = \text{kuat tekan beton umur 28 hari}$$

Untuk studi lebih lanjut, akan dikembangkan persamaan korelasi lain dengan mengaplikasikan persamaan umum dari **Persamaan (1)** sebagai dasar

pemodelan fungsi regresi untuk data kuat tekan beton versus umur hasil penelitian. Dari hasil analisis regresi diperoleh beberapa variasi persamaan korelasi kuat tekan untuk umur 3 sampai 56 hari sebagai berikut :

$$f_{cm}(t) = \exp(0,25(1 - (28/t)^{0,504}))f_{c28} \quad (2b)$$

$$f_{cm}(t) = \exp(0,26(1 - (28/t)^{0,5}))f_{c28} \quad (2c)$$

$$f_{cm}(t) = \exp(0,31(1 - (28/t)^{0,45}))f_{c28} \quad (2d)$$

Persamaan (2b) sampai **(2d)** diperoleh dengan cara sebagai berikut :

1. **Persamaan (2b)** diperoleh dengan menjaga parameter s sebagai konstanta yang bernilai sama dengan yang diberikan oleh **Persamaan (1)** yaitu sebesar 0,25 dan parameter p divariasikan sedemikian rupa dengan cara iterasi hingga menghasilkan kurva *fitting* yang terbaik.
2. Selanjutnya untuk memperoleh **Persamaan (2c)** yang ditetapkan sebagai konstanta adalah parameter p yang bernilai sama dengan yang diberikan oleh **Persamaan (1)** yaitu sebesar 0,5 dan parameter s divariasikan sedemikian rupa hingga menghasilkan kurva *fitting* yang terbaik.
3. Sedangkan **Persamaan (2d)** diperoleh dengan cara memvariasikan parameter s dan p dari **Persamaan (1)** sedemikian rupa dengan cara iterasi, hingga diperoleh kurva *fitting* yang terbaik terhadap data kuat tekan hasil penelitian.

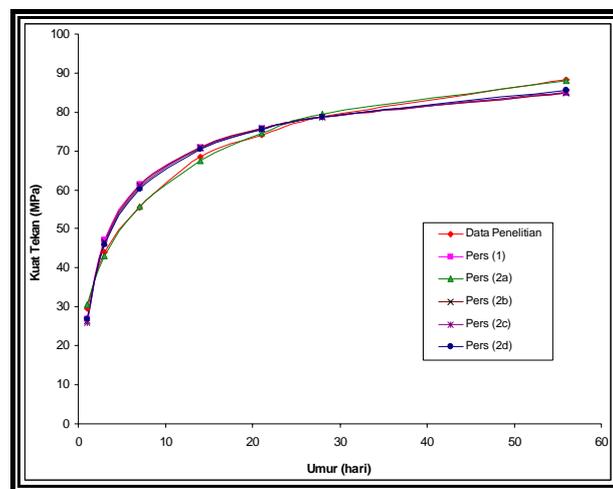
Data $f_{cm}(t)$ eksperimental dan $f_{cm}(t)$ hasil analisis menggunakan **Persamaan (1)**, **(2a)** sampai **(2d)** serta persentase perbedaan dan nilai R^2 masing-masing ditunjukkan pada **Tabel 4.1**.

Selanjutnya pada **Gambar 4.1** dijelaskan perbandingan kurva antara nilai kuat tekan hasil penelitian dan kuat tekan prediksi dengan **Persamaan korelasi (1)** dan **(2a)** sampai **(2d)**.

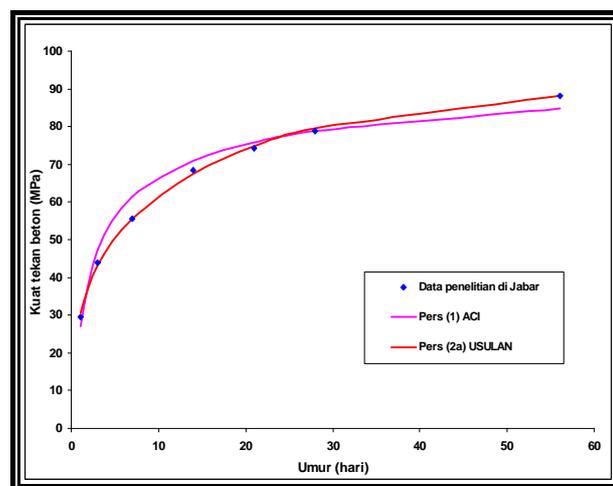
Dari berbagai alternatif model regresi yang diberikan pada **Tabel 4.1** dan **Gambar 4.1**, maka kriteria yang dipergunakan untuk menentukan model regresi terbaik adalah berdasarkan nilai R^2 terbesar yaitu **Persamaan (2a)** dengan nilai $R^2 = 0,9987$. Dengan demikian persamaan korelasi untuk hubungan kuat tekan $f_{cm}(t)$ dan umur beton yang diusulkan dalam penelitian ini adalah **Persamaan (2a)**. Untuk mengetahui perbandingan kurva antara **Persamaan (1)** dan **(2a)** dengan data hasil penelitian dapat dilihat pada **Gambar 4.2**.

Dari **Gambar 4.2** dapat dilihat bahwa nilai kuat tekan pada umur 2 dan 25 hari yang dianalisis dengan **Persamaan (1)** akan sama besar dengan nilai kuat tekan yang dianalisis dengan **Persamaan (2a)**. Pada umur

sebelum 2 hari dan setelah umur 25 hari, nilai kuat tekan yang dianalisis dengan **persamaan (2a)** akan lebih besar (*over estimate*) dibandingkan dengan nilai kuat tekan yang diprediksi dengan **Persamaan (1)**. Besarnya persentase *over estimate* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.2** yaitu pada umur 1, 28 dan 56 hari masing-masing sebesar 11,651%, 0,924% dan 3,819%. Sedangkan antara umur 2 dan 25 hari, nilai kuat tekan yang dihasilkan **Persamaan (2a)** lebih kecil (*under estimate*) dibandingkan dengan nilai kuat tekan yang dianalisis dengan **Persamaan (1)**. Besarnya persentase *under estimate* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.2** yaitu pada umur 3, 7, 14, dan 21 hari masing-masing sebesar 9,369%, 10,220%, 5,167%, dan 1,477%.



Gambar 4.1. Kurva perbandingan antara nilai kuat tekan hasil penelitian dan kuat tekan prediksi dengan Persamaan Korelasi (1) dan (2)



Gambar 4.2. Perbandingan antara kuat tekan hasil penelitian dan kuat tekan prediksi dengan Persamaan (1) dan (2a)

Tabel 4.1. Perbandingan antara nilai kuat tekan hasil penelitian dan kuat tekan prediksi dengan persamaan korelasi (1) dan (2)

Umur (hari)	Kuat Tekan $f_{cm}'(t)$		$f_c'(t)$ Pers (1)	Beda	$f_c'(t)$ Pers (2a)	Beda
	(kg/cm ²)	MPa	MPa	%	MPa	%
1	301,399	29,555	26,938	-9,717	30,490	3,066
3	449,354	44,064	47,117	6,481	43,081	-2,281
7	565,297	55,433	61,338	9,627	55,651	0,391
14	697,369	68,384	71,012	3,701	67,523	-1,275
21	756,369	74,170	75,772	2,115	74,670	0,669
28	803,179	78,760	78,760	0,000	79,494	0,924
56	899,791	88,234	84,743	-4,119	88,108	-0,143
R²			0,9247		0,9987	
$f_c'(t)$ Pers (2b)	Beda	$f_c'(t)$ Pers (2c)	Beda	$f_c'(t)$ Pers (2d)	Beda	
MPa	%	MPa	%	MPa	%	
26,464	-11,682	25,806	-14,528	26,784	-10,349	
46,796	5,838	46,159	4,539	46,036	4,283	
61,168	9,376	60,728	8,719	60,215	7,941	
70,943	3,606	70,719	3,301	70,311	2,741	
75,747	2,082	75,655	1,963	75,457	1,706	
78,760	0,000	78,760	0,000	78,760	0,000	
84,785	-4,068	84,992	-3,814	85,649	-3,018	
0,9236		0,9247		0,9375		

Tabel 4.2. Persentase perbandingan antara persamaan kuat tekan (1) dan (2a)

Umur (hari)	$f_c'(t)$ Pers (1) MPa	$f_c'(t)$ Pers (2a) MPa	Perbedaan (%)	Keterangan
1	26,938	30,490	11,651	Over estimate
3	47,117	43,081	-9,369	Under estimate
7	61,338	55,651	-10,220	Under estimate
14	71,012	67,523	-5,167	Under estimate
21	75,772	74,670	-1,477	Under estimate
28	78,760	79,494	0,924	Over estimate
56	84,743	88,108	3,819	Over estimate

Tabel 4.3. Persentase perbandingan antara persamaan kuat tekan (2a) dengan data penelitian

Umur (hari)	Beton dengan agregat alami					Beton dengan agregat slag nikel				
	Data (MPa)	Pers 1 (MPa)	Beda (%)	Pers 2a (MPa)	Beda (%)	Data (MPa)	Pers 1 (MPa)	Beda (%)	Pers 2a (MPa)	Beda (%)
1	29,555	26,938	-9,717	30,490	3,066					
3	44,064	47,117	6,481	43,081	-2,281	30,290	32,999	8,209	30,172	-0,390
7	55,433	61,338	9,627	55,651	0,392	41,600	42,959	3,163	38,976	-6,733
14	68,384	71,012	3,701	67,524	-1,274					
21	74,170	75,772	2,115	74,670	0,670					
28	78,760	78,760	0,000	79,495	0,924	55,16	55,160	0,000	55,675	0,924
56	88,234	84,743	-4,119	88,109	-0,142	62,82	59,351	-5,846	61,707	-1,803

Umur (hari)	Data penelitian Hooton. R.D.				
	Data (MPa)	Pers (1) (MPa)	Beda (%)	Pers (2a) (MPa)	Beda (%)
1	28,000	25,720	-8,864	29,112	3,820
3	39,733	44,988	11,680	41,134	3,405
21	71,200	72,347	1,586	71,295	0,133
28	75,200	75,200	0,000	75,902	0,924
56	76,400	80,913	5,578	84,126	9,184

Berdasarkan **Tabel 4.3** dapat dilihat bahwa hasil analisis dengan **Persamaan (2a)** lebih mendekati data yang sebenarnya dibandingkan hasil analisis dengan **persamaan (1)**. Selanjutnya dapat dijelaskan kembali bahwa **Persamaan Korelasi (2a)** diperoleh berdasarkan nilai kuat tekan beton pada umur 28 hari yang diperoleh dari hasil pengujian dalam penelitian ini yaitu sebesar 78,76 MPa. Untuk mengetahui perilaku **Persamaan Korelasi (2a)** untuk nilai f_{c28} yang lain, akan dibandingkan dengan data penelitian yang menggunakan agregat slag nikel dan data penelitian yang dilakukan oleh Hooton. Pada **Gambar 4.3** ditampilkan kurva f_{c28} yang diprediksi dengan **Persamaan (2a)**, dan sekaligus akan ditampilkan pula kurva f_{c28} yang dievaluasi memakai **Persamaan (1)**. Berdasarkan **Gambar 4.3** dapat dijelaskan bahwa besarnya f_{c28} hasil prediksi menggunakan **Persamaan (1)** dan **(2a)** memberikan nilai yang lebih besar (*over estimate*) rata-rata sebesar 0,924%.

4.2 Persamaan korelasi antara modulus elastisitas beton dan umur

Persamaan korelasi modulus elastisitas yang diusulkan oleh standar ACI 363R 92 dalam *State of The Art Report on High Strength Concrete* adalah :

$$E_c = 3320(f_{c28})^{0,5} + 6900 \quad (3)$$

Sedangkan persamaan korelasi untuk hubungan modulus elastisitas versus kuat tekan yang diusulkan oleh standar CEB/FIP Model Code 1990 adalah :

$$E_c = 2,15 \times 10^4 \left(\frac{f_{c28}}{10} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Persamaan (3) dan **(4)** hanya dapat dipergunakan untuk menganalisis modulus elastisitas beton kinerja tinggi umur 28 hari berdasarkan kuat tekan beton 28 harinya. Persamaan korelasi modulus elastisitas yang dikembangkan berdasarkan data hasil penelitian dengan $R^2 = 0,9997$ adalah :

$$E_c(t) = 353(1,00)^t (t)^{0,083} f_{c28} \text{ MPa} \quad (5)$$

dimana :

$E_c(t)$ = Modulus elastisitas beton, MPa

T = Umur, $0 < t \leq 56$ hari

Selanjutnya pada **Tabel 4.4** dijelaskan perbandingan kurva antara **Persamaan Korelasi (5)** dengan data modulus elastisitas hasil penelitian dengan agregat alami dan slag nikel. Berdasarkan **Tabel 4.4** dapat dilihat bahwa pada umur 3 dan 21 hari, nilai E_c yang diprediksi dengan **Persamaan (5)** lebih besar (*over estimate*) masing-masing sebesar 0,005% dan 0,212%. Sedangkan pada umur 7, 14, 28 dan 56 hari terjadi sebaliknya, yaitu menghasilkan E_c yang lebih kecil (*under estimate*) masing-masing sebesar 0,088%, 0,040%, 0,314% dan 0,107%. Seperti telah diketahui bahwa **Persamaan (3)** hanya dibatasi untuk f_{c28} antara 21–83 MPa, dan **Persamaan (4)** dibatasi maksimum 80 MPa. Sedangkan **Persamaan (5)** diperoleh berdasarkan f_{c28} hasil penelitian yaitu sebesar 78,76 MPa. Untuk pembahasan selanjutnya akan dicoba dengan mengaplikasikan ketiga persamaan tersebut, dengan nilai f_{c28} dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Gettu. R., Hooton, Wiegriink. K., dan Wee. T.H., yaitu masing-masing sebesar 75,4; 75,2; 86,5 dan 81,2 MPa. **Gambar 4.3** menampilkan kurva E_{c28} yang diprediksi menggunakan ketiga persamaan korelasi tersebut.

Selanjutnya pada **Gambar 4.3** dapat dijelaskan bahwa seluruh nilai E_{c28} yang diprediksi dengan **persamaan (3)** dan **(5)** lebih kecil (*under estimate*) dari E_{c28} yang diprediksi menggunakan **Persamaan (4)**. Bila dibandingkan dengan E_{c28} yang diprediksi dengan **persamaan (4)**, maka persentase *under estimate* yang dihasilkan oleh **Persamaan (5)** adalah 17,997%, 17,788%, 12,110% dan 7,482%. Selanjutnya, untuk f_{c28} sebesar 75,3 MPa, maka E_{c28} yang diprediksi dengan **Persamaan Korelasi (5)** akan sama besar dengan E_{c28} yang dianalisis memakai **Persamaan (3)**. Untuk f_{c28} lebih kecil dari 75,3 MPa maka E_{c28} yang dievaluasi memakai **Persamaan Korelasi (5)** akan *under estimate* bila dibandingkan dengan E_{c28} yang diprediksi dengan **Persamaan (3)**. Namun sebaliknya, untuk f_{c28} lebih besar dari 75,3 MPa, maka E_{c28} yang diprediksi dengan **persamaan korelasi (5)** akan *over estimate*.

4.3 Persamaan korelasi antar kuat tarik tidak langsung (*splitting*) dan umur

Persamaan korelasi yang diusulkan oleh ACI 363R 92 dalam *State of The Art Report on High Strength Concrete* adalah :

Tabel 4.4. Persentase perbandingan nilai modulus elastisitas antara persamaan (5) dengan data penelitian

Umur (hari)	Beton agregat alami			Beton agregat slag nikel		
	Ec(t) MPa Penelitian	Ec(t) MPa Pers (5)	Perbedaan	Ec(t) MPa Penelitian	Ec(t) MPa Pers (5)	Perbedaan
3	30569,889	30571,424	0,005	25172,069	21394,506	-17,657
7	32917,609	32888,717	-0,088	28313,357	23045,209	-22,860
14	35006,696	34992,609	-0,040			
21	36271,360	36348,444	0,212			
28	37505,243	37387,739	-0,314	31557,566	26403,850	-19,519
56	40326,673	40283,673	-0,107	33214,011	28761,194	-15,482

$$f_{sp} = 0,59(f_{c28})^{0,5} \text{ MPa} \quad (6)$$

Persamaan korelasi yang diusulkan oleh CEB/FIP Model Code 1990 adalah :

$$f_{sp} = 1,556\left(\frac{f_{c28}}{10}\right)^{2/3} \quad (7)$$

Persamaan (6) dan **(7)** hanya dipergunakan untuk memprediksi kuat tarik tidak langsung beton kinerja tinggi umur 28 hari berdasarkan kuat tekan 28 harinya. Persamaan korelasi kuat tarik tidak langsung versus umur yang dikembangkan berdasarkan data hasil penelitian yang telah dilakukan dengan $R^2=0,9884$ adalah :

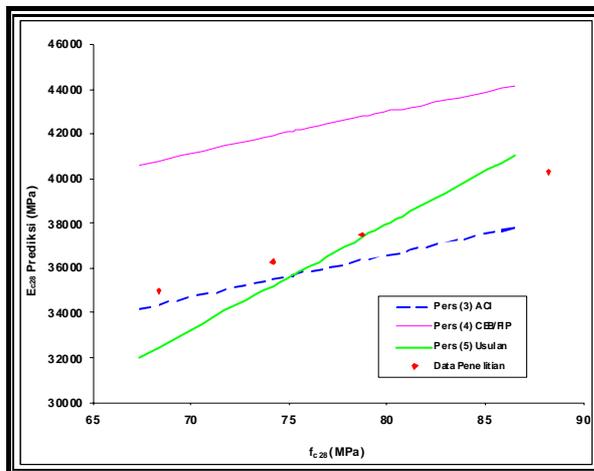
$$f_{sp}(t) = 0,03(1,00)^t (t)^{0,12} f_{c28} \text{ MPa} \quad (8)$$

dimana :

$f_{sp}(t)$ = kuat tarik tidak langsung beton umur t hari, MPa

t = umur, $0 < t \leq 56$ hari

Sebagai studi komparatif akan dikembangkan persamaan korelasi lain dengan mengaplikasikan persamaan umum dari ACI 363R 92 dan CEB/FIP Model Code 1990 terhadap data modulus elastisitas



Gambar 4.3. Hubungan antara E_{c28} prediksi dengan persamaan (3), (4) dan (5)

hasil penelitian. Selanjutnya dari **Gambar 4.4** dan **Tabel 4.5** dapat dilihat bahwa nilai kuat tarik tidak langsung hasil penelitian pada umur 5, 19 dan 52 hari akan sama besar dengan nilai kuat tarik tidak langsung yang dianalisis dengan **Persamaan (8)**. Pada umur sebelum 5 hari dan diantara umur 19 dan 52 hari, nilai kuat tarik tidak langsung yang dianalisis dengan **Persamaan (8)** akan lebih kecil (*under estimate*) dibandingkan dengan nilai kuat tarik hasil penelitian. Persentase *under estimate* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.5** yaitu pada umur 3, 21 dan 28 hari masing-masing sebesar 1,534%, 1,118% dan 1,815%. Sedangkan setelah umur 52 hari dan diantara umur 5 dan 19 hari nilai kuat tarik yang dihasilkan **Persamaan (8)** lebih besar (*over estimate*) dibandingkan dengan nilai kuat tarik hasil penelitian. Besarnya persentase *over estimate* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.5** yaitu pada umur 7, 14 dan 56 hari masing-masing sebesar 1,363%, 2,348% dan 0,339%.

Sebagai verifikasi dibandingkan pula dengan data kuat tarik tidak langsung hasil penelitian dengan menggunakan agregat slag nikel dan data hasil penelitian Ravindra.

Untuk mengetahui perilaku **Persamaan (8)** untuk nilai f_{c28} lainnya, akan dibandingkan dengan data f_{c28} hasil penelitian Gettu. R., Hooton. R.D., Wiegink Karl, dan Wee. T.H., yaitu masing-masing sebesar 75,4, 75,2, 86,5, dan 81,2 MPa. Pada **Gambar 4.5** ditampilkan kurva f_{sp} umur 28 hari yang diprediksi memakai **Persamaan Korelasi (8)**, selanjutnya pada gambar tersebut akan dijelaskan pula f_{sp} umur 28 hari yang dievaluasi dengan **Persamaan (6)** dan **(7)** untuk nilai f_{c28} yang sama.

Berdasarkan **Gambar 4.5** dapat dijelaskan bahwa kemiringan kurva f_{sp28} dari **Persamaan Korelasi (8)** hampir sama dengan kemiringan kurva f_{sp28} dari **Persamaan (6)** dan **(7)**. Selanjutnya dapat dijelaskan pula bahwa seluruh nilai f_{sp28} yang diprediksi dengan **Persamaan (8)** lebih kecil dari f_{sp28} yang diprediksi baik menggunakan **Persamaan (6)** maupun dengan **Persamaan (7)**. Jika dibandingkan dengan f_{sp28} yang diprediksi dengan **Persamaan (6)**, maka persentase

Tabel 4.5. Persentase perbandingan antara persamaan kuat tarik tidak langsung (8) dengan data penelitian lain

Umur (hari)	Beton agregat alami			Beton agregat slag nikel			Gettu. R.		
	Data (MPa)	f_{sp} Pers (8) (MPa)	Beda	Data (MPa)	f_{sp} Pers (8) (MPa)	Beda	Data (MPa)	f_{sp} Pers (8) (MPa)	Beda
3	2,687	2,649	-1,534	3,247	2,163	33,385	3,00	2,927	-2,508
7	2,897	2,941	1,363	3,805	2,414	36,568	3,50	3,248	-7,749
14	3,144	3,224	2,348				3,70	3,561	-3,891
21	3,454	3,420	-1,118				3,85	3,778	-1,904
28	3,640	3,580	-1,815	4,382	2,973	32,156	4,00	3,954	-1,159
56	4,057	4,076	0,339	4,676	3,417	26,938			

under estimate yang dihasilkan oleh **Persamaan Korelasi (8)** untuk f_{c28} sebesar 75.2, 75.4, 81.2 dan 86.5 MPa masing-masing sebesar 33,198%, 33,109%, 30,584% dan 28,354%.

4.4 Persamaan korelasi antara kuat lentur dan umur

Persamaan korelasi kuat lentur yang diusulkan oleh ACI 363R 92 dalam *State of The Art Report on High Strength Concrete* adalah :

$$f_r = 0,94(f_{c28})^{0,5} \text{ MPa} \quad (9)$$

Sedangkan persamaan korelasi kuat lentur yang diusulkan oleh CEB/FIP Model Code 1990 adalah :

$$f_r = 2,102\left(\frac{f_{c28}}{10}\right)^{2/3} \text{ MPa} \quad (10)$$

Persamaan korelasi kuat lentur yang dikembangkan berdasarkan data hasil penelitian yang telah dilakukan dengan $R^2 = 0,9811$ adalah :

$$f_r = 0,05(0,99)^t (t)^{0,224} f_{c28} \text{ MPa} \quad (11)$$

dimana :

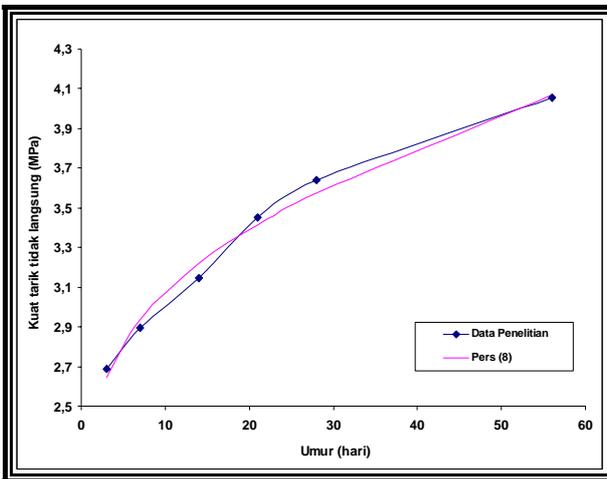
$f_r(t)$ = kuat tarik tidak langsung beton umur t hari, MPa

t = umur, $0 < t \leq 56$ hari

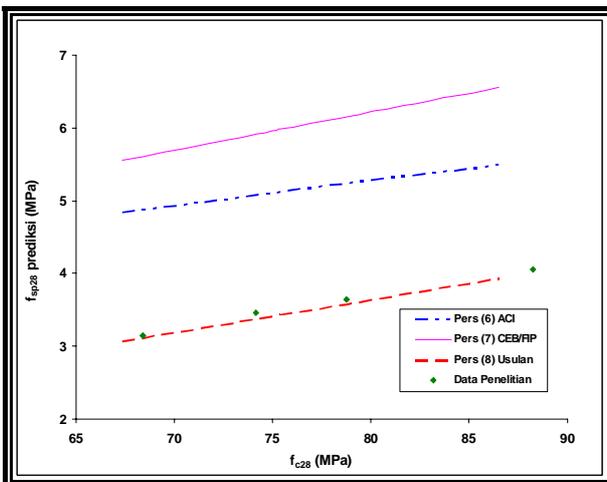
Sebagai studi komparatif akan dikembangkan persamaan korelasi lain dengan mengaplikasikan persamaan umum dari ACI dan CEB/FIP Model Code 1990 terhadap data kuat lentur hasil penelitian.

Dari **Gambar 4.6** dan **Tabel 4.6** dapat dilihat bahwa nilai kuat lentur hasil penelitian pada umur 5, 19 dan 50 hari akan sama besar dengan nilai kuat lentur yang dianalisis dengan **Persamaan (11)**. Pada umur sebelum 5 hari dan diantara umur 19 dan 50 hari, nilai kuat lentur yang dianalisis dengan **Persamaan (11)** akan lebih kecil (*under estimate*) dibandingkan dengan nilai kuat lentur hasil penelitian. Persentase *under estimate* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.6** yaitu pada umur 3, 21 dan 28 hari masing-masing sebesar 3,848%, 0,813% dan 2,596%. Sedangkan setelah umur 50 hari dan antara umur 5 sampai 19 hari, nilai kuat lentur yang dihasilkan **Persamaan (11)** lebih besar (*over estimate*) dibandingkan dengan nilai kuat lentur hasil penelitian. Besarnya persentase *over estimate* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.6** yaitu pada umur 7, 14 dan 56 hari masing-masing sebesar 4,171%, 1,774% dan 0,695%. Selanjutnya pada **Tabel 4.7** dijelaskan perbandingan antara **Persamaan (11)** dengan data penelitian yang telah dilakukan peneliti lain.

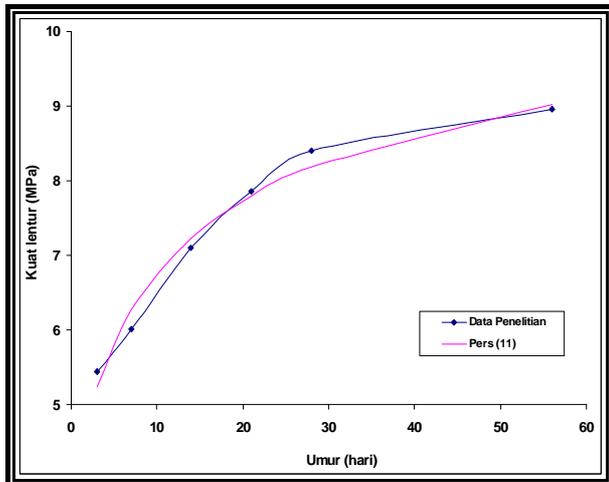
Untuk mengetahui perilaku **Persamaan Korelasi (11)** terhadap nilai f_{c28} lainnya, maka akan dibandingkan



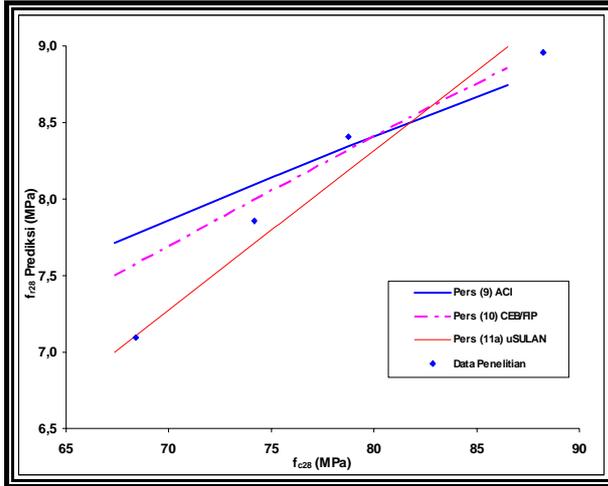
Gambar 4.4. Perbandingan kurva antara persamaan korelasi (8) dengan data kuat tarik tidak langsung hasil penelitian



Gambar 4.5. Hubungan antara f_{sp28} prediksi dengan persamaan (6), (7) dan (8a) dengan nilai f_{c28} peneliti lain



Gambar 4.6. Perbandingan kurva antara persamaan (11) dengan data kuat lentur hasil penelitian



Gambar 4.7. Hubungan antara f_{r28} prediksi dengan persamaan (9), (10), (11) dengan nilai f_{c28} peneliti lain

dengan data f_{c28} hasil penelitian Gettu. R., Hooton. R.D., Wiegrink Karl, dan Wee. T.H., yaitu masing-masing sebesar 75,4; 75,2; 86,5 dan 81,2 MPa. Pada **Gambar 4.7** ditampilkan kurva f_r umur 28 hari yang diprediksi memakai **Persamaan Korelasi (11)**, selanjutnya pada gambar tersebut akan dijelaskan pula f_r umur 28 hari yang dievaluasi dengan **Persamaan (9)** dan **(10)** untuk nilai f_{c28} yang sama.

Berdasarkan **Gambar 4.7** dapat dijelaskan bahwa untuk f_{c28} sebesar 81,799 MPa, maka f_{r28} yang diprediksi dengan **Persamaan (11)** sama besar dengan f_{r28} yang diprediksi dengan **Persamaan (9)**. Selanjutnya untuk f_{c28} lebih kecil dari 81,799 MPa, f_{r28} yang diprediksi dengan persamaan korelasi (11) akan lebih kecil (*under estimate*) dari f_{r28} yang diprediksi dengan **Persamaan (9)**. Sedangkan untuk f_{c28} lebih besar dari

81,799 MPa, maka f_{r28} yang dievaluasi dengan **Persamaan (11)** akan lebih besar (*over estimate*) dari f_{r28} yang dianalisis dengan **Persamaan (9)**. Selanjutnya untuk f_{c28} sebesar 82,739 MPa, maka f_{r28} yang diprediksi dengan **Persamaan Korelasi (11)** sama besar dengan f_{r28} yang dianalisis dengan **Persamaan (10)**. Untuk f_{c28} yang lebih kecil dari 82,739 MPa, maka f_{r28} yang diprediksi dengan **Persamaan Korelasi (11)** akan lebih kecil (*under estimate*) dari f_{r28} yang dianalisis dengan **Persamaan (10)**. Sebaliknya untuk f_{c28} yang lebih besar dari 82,739 MPa, maka f_{r28} yang dianalisis menggunakan **Persamaan Korelasi (11)** akan lebih besar (*over estimate*) dari f_{r28} yang diprediksi dengan **Persamaan (11)**.

5. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Terak nikel dapat digunakan sebagai bahan pembentuk beton, baik sebagai agregat kasar ataupun sebagai agregat halus. Pemakaian beton terak nikel dapat digunakan untuk bangunan dan agar massa bangunan tidak terlalu berat, maka campuran beton sebaiknya menggunakan agregat terak nikel yang berpori, karena berat jenis yang lebih ringan daripada agregat terak nikel padat.

2. Bentuk persamaan korelasi sifat mekanik beton yang diusulkan dalam penelitian ini adalah $y = ab^t f_{c28}^2$, dimana untuk :

1. Kuat tekan :

$$a = 0,39 \quad b = 1,00 \quad c = 0,323$$

2. Modulus elastisitas :

$$a = 353 \quad b = 1,00 \quad c = 0,083$$

Tabel 4.6. Persentase perbandingan antara nilai kuat

Umur (hari)	f_r Penelitian (MPa)	f_r (11) (MPa)	Beda (%)	Keterangan
3	5,439	5,238	-3,848	<i>Under estimate</i>
7	6,016	6,278	4,171	<i>Over estimate</i>
14	7,097	7,225	1,774	<i>Over estimate</i>
21	7,859	7,795	-0,813	<i>Under estimate</i>
28	8,405	8,192	-2,596	<i>Under estimate</i>
56	8,958	9,020	0,695	<i>Over estimate</i>

Tabel 4.7. Persentase perbandingan antara persamaan kuat lentur (11) dengan data penelitian lain

Umur (hari)	Beton Agregat alami			Beton agregat slag nikel			Wee. T.H.		
	Fr (MPa)	fr (11) (MPa)	Beda (%)	Fr (MPa)	fr (11) (MPa)	Beda (%)	fr (MPa)	fr (11) (MPa)	Beda (%)
3	5,439	5,238	-3,848	5,173	3,993	-29,552	-	-	-
7	6,016	6,278	4,171	6,063	4,789	-26,588	-	-	-
14	7,097	7,225	1,774		5,516		4,300	4,217	-1,973
21	7,859	7,795	-0,813		5,956		6,450	6,429	-0,324
28	8,405	8,192	-2,596	6,981	6,265	-11,443	8,600	8,441	-1,89
56	8,958	9,02	0,695	7,450	6,918	-7,6972	-	-	-

3. Kuat tarik tidak langsung :
 $a = 0,03$ $b = 1,00$ $c = 0,115$
4. Kuat lentur :
 $a = 0,052$ $b = 1,00$ $c = 0,224$
5. Regangan susut :
 $a = 6,7 \times 10^{-7}$ $b = 1,00$ $c = 0,455$

Untuk mengetahui perbandingan antara bentuk persamaan yang didapat dari hasil penelitian dengan yang ada dalam peraturan dapat dilihat pada **Tabel 5.1**.

Berdasarkan **Tabel 5.1** dapat dijelaskan bahwa kelebihan dari persamaan korelasi yang diusulkan dibandingkan persamaan dari ACI dan CEB/FIP adalah dapat menganalisis sifat mekanik beton seperti kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik tidak langsung, kuat lentur, dan regangan susut berdasarkan fungsi waktu. Selain itu hasil analisisnya mempunyai standar error yang kecil. Sedangkan kekurangannya adalah bentuk persamaan yang lebih rumit sehingga sulit untuk dihafal.

Daftar Pustaka

- ACI Standard 211.1, "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavy-weight Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- ACI Committee 211.4R, "Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash", American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- ACI Committee 363, "State of the Art Report on High Strength Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- ASTM C618, 1995, "Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcine Natural Pozzolans as a Mineral Admixtures in Portland Cement Concrete", American Society for Testing and Material, Philadelphia, PA.
- Boresi, A.P., Schmidt, R.J., Sidebottom, O.M., "Advanced Mechanics of Materials", John Wiley & Sons, INC.
- CEB/FIP, 1993, "Model Code 1990", Bulletin d'Information No. 213/214.
- Chapra, S.C., Chanale, R.P., "Metode Numerik", Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Chin. M.S., Mansur. M.A. and Wee. T.H., 1997, "Effect of Shape, Size and Casting Direction of Specimens on Stress-Strain Curves of High-Strength Concrete", ACI Material Journal, Vol. 94, No. 3, May-June 1997, pp. 209-219.
- Desai, C.S., Siriwardane, H.J., 1984, "Constitutive Laws for Engineering Materials", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Gettu, R., Aquado, A., and Oliveira, M.O., 1996, "Damage in High-Strength Concrete Due to Monotonic and Cyclic Compression : A Study Based on The Splitting-Tensile Strength", ACI Material Journal, Vol. 93, No. 6, Nov-Des 1996, pp. 519-523.
- Hooton, R.D., 1993, "Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing and Alkali Silica Reactivity", ACI Material Journal, Vol. 90, No. 2, March-April 1993, pp. 143-161.
- <http://www.pt-inco.co.id>, diakses 17-01-2007, 14.10 PM.
- Karl, W., Shashidhara, M., and Shah, S.P., 1996, "Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete", ACI Material Concrete, Vol. 90, No. 2, Sept-Oct 1996, pp. 409-415.
- Neville, A.M., and Brooks, J.J., 1993, "Concrete Technology", Longman, London.
- Shah, S.P., and Ahmad, S.H., 1994, "High Performance Concrete and Applications", Edward Arnold, London.
- Sugiri, S., Khosama, L.K., 1997, "Penggunaan Terak Nikel sebagai Agregat pada Beton Mutu Tinggi", Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Sugiri, S., 2005, "Penggunaan Terak Nikel sebagai Agregat dan Campuran Semen untuk Beton Mutu Tinggi", Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan Binaan, Vol. I No. 1, Juni 2005

Tabel 5.1. Perbandingan antara persamaan yang didapat dari hasil penelitian dengan persamaan dalam ACI dan CEB/FIP

Sifat Mekanik Beton	Persamaan Korelasi		
	Usulan	ACI	CEB/FIP
Kuat Tekan	$f_{cm}(t) = a(b)^t (t)^c f_{c28}$ $a = 0,39 \quad b = 1,00 \quad c = 0,323$	$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \frac{28}{t} \right]^p \right\} f_{cm}$ $s = 0,25 \quad p = 0,5$	
Modulus Elastisitas	$E_c(t) = a(b)^t (t)^c f_{c28}$ $a = 35 \quad b = 1,00 \quad c = 0,083$	$E_c = a(f_c')^b + c$ $a = 3320 \quad b = 0,5 \quad c = 6900$	$E_c = a \left(\frac{10}{f_{cmo}} \right)^b$ $a = 2,15 \times 10^4 \quad b = 1/3$
Kuat tarik tidak langsung	$f_{sp} = a(b)^t (t)^c f_{c28}$ $a = 0,03 \quad b = 1,00 \quad c = 0,115$	$f_{sp} = a(f_c')^b$ $a = 0,59 \quad b = 0,5$	$f_{sp} = a \left(\frac{f_c'}{10} \right)^b$ $a = 1,556 \quad b = 2/3$
Kuat lentur	$f_r = a(b)^t (t)^c f_{c28}$ $a = 0,05 \quad b = 1,00 \quad c = 0,224$	$f_r = a(f_c')^b$ $a = 0,94 \quad b = 0,5$	$f_r = a \left(\frac{f_c'}{10} \right)^b$ $a = 2,102 \quad b = 2/3$

