

Prediksi Kuat Tekan Beton Berbahan Campuran *Fly Ash* dengan Perawatan Uap Menggunakan Metode Kematangan

Candra Irawan, Januarti Jaya Ekaputri, Pujo Aji dan Triwulan

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: januarti@ce.its.ac.id

Abstrak— Penambahan *fly ash* dan penggunaan *steam curing* membuat produksi beton lebih ekonomis, baik dari segi waktu maupun biaya. Selain ekonomis, kualitas beton juga harus dikontrol, salah satunya adalah kuat tekan. Di Indonesia prediksi kuat tekan beton diatur PBI 1971. Peraturan ini hanya dapat digunakan untuk prediksi kekuatan beton normal, sehingga tidaklah akurat jika peraturan ini kita gunakan untuk memprediksi kuat tekan beton berbahan campuran *fly ash* yang dirawat dengan *steam curing*. Sebagai solusinya Day (2006) mengusulkan prediksi menggunakan metode kematangan (*maturity method*).

Penelitian ini mencoba memprediksi kuat tekan beton umur 7, 14 dan 28 hari berdasarkan data kuat tekan dan faktor waktu-suhu umur dasar 1 dan 2 hari. Benda uji beton yang digunakan berbentuk silinder 15 x 30 cm, berbahan campuran *fly ash* tipe F dan dirawat dengan perawatan uap (*steam curing*).

Dari hasil penelitian ini diketahui nilai *error* antara kuat tekan prediksi dengan kuat tekan aktual kurang dari 5% untuk umur 7 dan 28 hari untuk semua benda uji, sedangkan untuk umur 14 hari untuk benda uji 2 memberikan *error* di atas 5%, namun kurang dari 10%. Secara ilmu statistik dapat dikatakan kuat tekan prediksi sama dengan kuat tekan aktualnya. Hal ini dibuktikan dengan nilai *t* hitung berada di daerah penerimaan.

Kata Kunci— *fly ash*, kematangan, prediksi kuat tekan, *steam curing*.

I. PENDAHULUAN

PENGGUNAAN *fly ash* sebagai *admixture* (bahan tambahan) pada beton telah banyak digunakan, baik pada beton pracetak maupun beton cor di tempat (*cast in place*) [1]. Penggunaan *fly ash* membuat *workability* beton menjadi lebih bagus, membuat beton lebih kedap air (*impermeable*), dan yang pasti harga *fly ash* lebih ekonomis dibandingkan semen [2]. Penambahan *fly ash* pada beton juga dapat meningkatkan ketahanan (*durability*) beton terhadap lingkungan korosif, serta meningkatkan kekuatan beton. Selain itu pemakaian *fly ash* pada beton memperlama *setting time* (waktu pengikatan dalam beton) serta mengurangi panas hidrasi [3].

Penurunan panas hidrasi pada beton dengan campuran *fly ash* mengakibatkan perkembangan kekuatan beton menjadi lebih lama dibandingkan dengan beton normal. Salah satu cara untuk mempercepat proses hidrasi adalah merawat beton menggunakan medium uap (*steam curing*). *Steam curing*

membuat laju hidrasi dalam beton akan meningkat seiring dengan peningkatan temperatur [2]. Temperatur *steam curing* yang sesuai baik untuk beton normal maupun beton yang memakai *fly ash* sekitar 70 °C. Dengan menggunakan perawatan *steam curing* didapatkan kuat tekan beton yang tinggi di umur awal [1].

Penambahan *fly ash* dan penggunaan *steam curing* membuat produksi beton lebih ekonomis, baik dari segi waktu maupun biaya. Beton yang ekonomis akan lebih menguntungkan apabila kekuatan beton yang terjadi setelah pengecoran bisa kita kontrol. Hal ini penting untuk menjamin kualitas beton. Di Indonesia prediksi kuat tekan beton diatur dalam tabel 4.1.4 PBI 1971. Namun peraturan ini hanya dapat digunakan untuk prediksi kekuatan beton normal menggunakan semen portland biasa atau semen portland dengan kekuatan awal tinggi [4]. Sehingga tidaklah akurat jika peraturan ini kita gunakan untuk memprediksi kuat tekan beton berbahan campuran *fly ash* yang dirawat dengan *steam curing*.

Tabel 1
Koefisien prediksi PBI 1971 [4]

Umur Beton	3	7	14	21	28	90	365
Semen portland biasa	0.4	0.65	0.88	0.95	1	1.2	1.35
Semen portland dengan kekuatan awal tinggi	0.55	0.75	0.9	0.95	1	1.15	1.2

Penggunaan metode kematangan (*maturity method*) untuk memprediksi kuat tekan beton. Metode kematangan adalah suatu metode prediksi kuat tekan beton berdasarkan data suhu dan kuat tekan beton di umur muda (1 sampai 7 hari) [2].

Metode kematangan merupakan metode yang berbasis pada pengukuran suhu di dalam beton, maka bagaimanapun kondisi beton (baik bahan ataupun perawatannya) asalkan diketahui rekaman suhunya maka dapat diprediksi kuat tekannya. Oleh karena itu metode ini sangat berguna digunakan untuk memprediksi kuat tekan beton dengan campuran *fly ash* yang dirawat dengan perawatan uap.

Pada dasarnya ada dua tahap dalam prediksi kuat tekan metode kematangan. Tahap pertama adalah pembuatan kurva kematangan. Kurva kematangan merupakan kurva hubungan data waktu-suhu dan kuat tekan beton. Dari kurva tersebut

dapat dibuat suatu fungsi kematangan. Tahap kedua adalah memprediksi kuat tekan beton di umur akhir menggunakan fungsi kematangan dari tahap pertama.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari keakuratan metode kematangan untuk memprediksi kuat tekan beton dengan campuran *fly ash* yang dirawat dengan suhu *steam curing* 70 °C dimana dengan suhu ini menghasilkan kuat tekan yang tinggi untuk umur panjang (91 hari) [1]. Umur akhir yang akan diprediksi adalah umur 7, 14 dan 28 hari. Data umur awal yang digunakan adalah kuat tekan dan suhu beton umur 1 dan 2 hari.

Dengan adanya penelitian ini diharapkan pekerjaan konstruksi di lapangan akan menjadi lebih optimal. Pelaksana dapat memeriksa kuat tekan beton terhadap persyaratan yang ada tanpa perlu menunggu waktu 28 hari dan memutuskan melakukan kegiatan selanjutnya berdasar hasil tersebut. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi kerja dari suatu kontraktor dengan signifikan yang tentu saja berimbas terhadap peningkatan keuntungan yang didapatkan. Selain itu, karena output yang dihasilkan lebih akurat maka *quality control* dan *quality assurance* terhadap pekerjaan beton menjadi semakin meningkat.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Tahap Pembuatan Kurva Kematangan

Berikut ini langkah-langkah untuk membuat kurva kematangan.

1. Pembuatan benda uji beton.

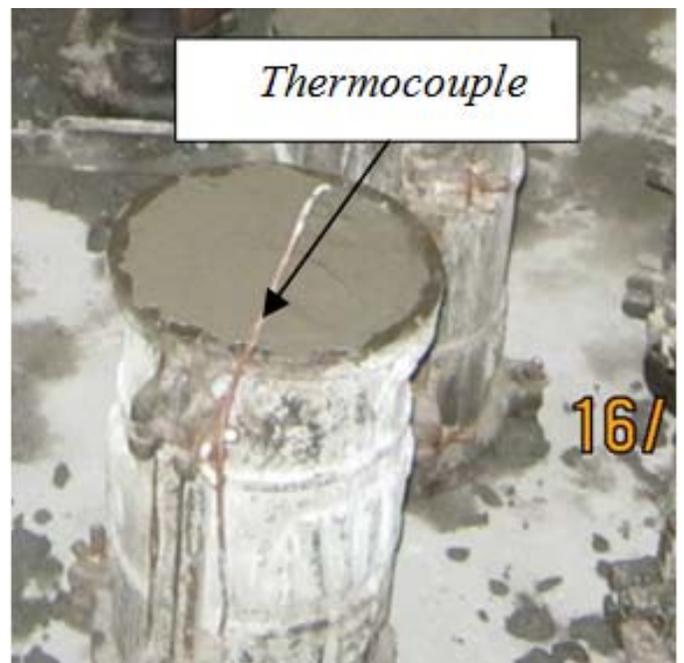
Benda uji yang dibuat adalah benton silinder dengan ukuran 15 x 30 cm. Ketika pengecoran dimasukkan *thermocouple* ke dalam 2 benda uji untuk direkam perkembangan temperaturnya hingga umur 28 hari. *Thermocouple* dimasukkan tepat di tengah benda uji, yaitu sedalam 15 cm.



Gambar 1. Pengadukan beton



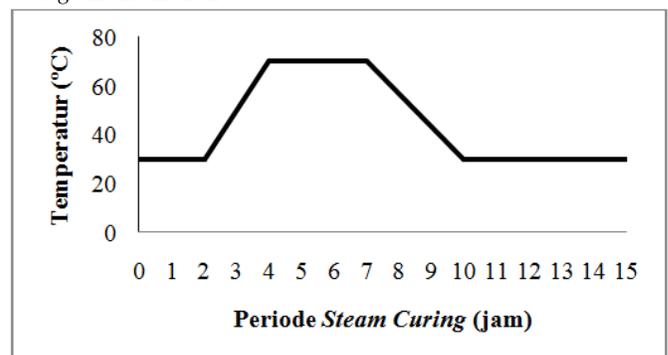
Gambar 2. Proses pencetakan benda uji beton



Gambar 3. *Thermocouple* di dalam benda uji beton

2. Perawatan beton dengan *steam curing*

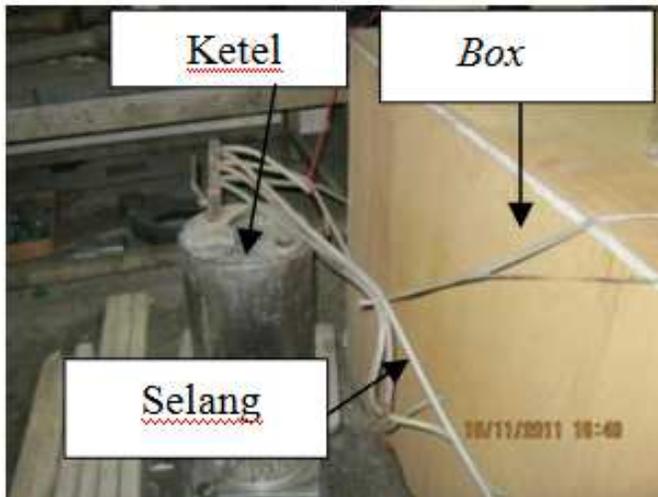
Dalam proses *steam curing* suhu maksimum dalam *box curing* direncanakan 70°C.



Gambar 4. Siklus temperatur *steam curing*

Perawatan dengan uap atau *steam curing* merupakan hal yang penting dalam penelitian ini. Karena itu, alat dan

pelaksanaan perlu diperhatikan dengan baik. Peralatan yang diperlukan dalam proses *steam curing* adalah *box steam curing*, kompor, ketel *steamer*, selang.



Gambar 5. Peralatan *steam curing*

Prosedur pelaksanaan *steam curing* dimulai dengan memasukkan air kedalam ketel *steamer*. Kemudian selang dipasang sebagai penyalur uap dari ketel ke dalam *box steam*. Selanjutnya kompor dinyalakan dan taruh ketel diatasnya. Selama proses *curing* kenaikan temperatur dalam box dikontrol dan direkam dengan menggunakan *data logger*.

3. Perawatan beton dengan *moist curing*

Setelah perawatan uap, maka berikutnya beton dirawat secara normal (*moist curing*) hingga umur 28 hari.

4. Pendataan suhu beton

Pendataan temperatur di dalam beton dilakukan mulai dari waktu pengecoran hingga umur 28 hari. Ketika proses *steam curing* temperatur dicatat setiap 10 menit (0.167 jam) hingga umur 2 hari, setelah itu interval waktu pendataan temperatur adalah 12 jam. Dari data rekaman suhu yang telah didapat, berikutnya kita menghitung *temperature-time factor* (TTF) dengan rumus (1).

5. Tes kuat tekan beton

Tes kuat tekan beton dilakukan pada umur 1, 2, 7, 14 dan 28 hari.

Berdasarkan data kuat tekan beton dengan nilai waktu-suhu kumulatif yang telah didapat pada umur 1, 2, 7, 14 dan 28 hari maka dapat dibuat kurva kematangan. Dari kurva tersebut dapat dibuat suatu fungsi kematangan dengan menggunakan pendekatan regresi tertentu. Dalam penelitian ini akan digunakan pendekatan regresi logaritmik (ln).

B. Tahap Prediksi Kuat Tekan

Kuat tekan yang akan diprediksi adalah kekuatan pada umur 7, 14 dan 28 hari dari data kuat tekan umur 1 dan 2 hari. berikut ini adalah langkah-langkah prediksi kuat tekan:

1. Dilakukan tes kuat tekan umur 1 dan 2 hari.
2. Hitung nilai waktu-suhu kumulatif. Untuk prediksi kuat tekan dari umur 1 hari suhu beton di rekam hingga umur 1 hari, untuk umur 2 hingga 28 hari menggunakan suhu prediksi. Begitu pula untuk prediksi dari umur 2 hari, suhu beton didata hingga umur 2 hari, kemudian umur 3

hingga 28 hari menggunakan suhu prediksi. Dalam penelitian ini suhu prediksi diambil 27°C (Ken W Day 2006).

3. Dengan data kuat tekan umur 1 dan 2 hari dan nilai waktu-suhu kumulatif di umur 1, 2, 7, 14 dan 28 hari serta fungsi kematangan maka kita dapat menghitung kuat tekan prediksi. Persamaan prediksi yang digunakan adalah persamaan ASTM.

III. HASIL PENELITIAN

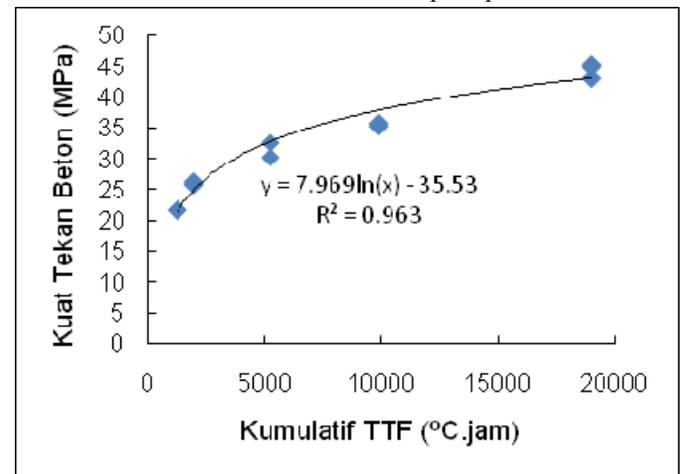
A. Kurva Kematangan

Tabel 2 adalah nilai kum. TTF dan kuat tekan beton yang digunakan untuk membuat kurva kematangan.

Tabel 2.

Kum. TTF dan kuat tekan			
Umur (Hari)	Umur (Jam)	Kumulatif TTF (°C.jam)	Kuat Tekan (MPa)
1	24	1272	21.6
2	48	1973	21.7
7	168	5252	25.8
14	336	9888	26.3
28	672	19005	32.6
			30.2
			35.3
			35.8
			45.4
			43.1
			44.8

Dari data pada Tabel 2 dapat dibuat suatu grafik hubungan antara kuat tekan dan nilai kum. TTF seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan kum. TTF dan kuat tekan beton

Kemudian dilakukan regresi terhadap grafik kematangan didapatkan persamaan prediksi sebagai berikut:

$$y = 7.969\ln(x) - 35.53 \tag{4}$$

Persamaan (4) ini akan digunakan untuk memprediksi kuat tekan beton umur 7, 14 dan 28 hari berdasarkan data kum. TTF dan kuat tekan beton umur 1 dan 2 hari.

B. Prediksi dengan Persamaan ASTM C 918-02

Persamaan ASTM C 918-02 yang digunakan adalah [5]:

$$S_M = S_m + b(\log M - \log m) \tag{5}$$

Dimana:

- S_M = kuat tekan beton prediksi pada umur target(MPa)
- S_m = kuat tekan beton pada umur dasar (MPa)
- b = kemiringan kurva kematangan (MPa)
- M = indeks kematangan di umur target (°C.jam)
- m = indeks kematangan di umur dasar (°C.jam)

Berdasarkan persamaan 5, data-data yang diperlukan untuk menghitung kuat tekan prediksi adalah:

1. Kuat tekan beton di umur dasar (S_m)

Tabel 3.
Kuat tekan beton di umur dasar (S_m)

Umur dasar (hari)	Kuat tekan (S_m), (Mpa)	
	Benda Uji 1	Benda Uji 2
1	16.75	17.95
2	21.07	22.23

2. Kemiringan kurva kematangan (b)

Nilai b merupakan selisih dari nilai fungsi kum. TTF satu siklus seperti yang terlihat pada Gambar 4, yaitu selisih antara nilai fungsi kum. TTF = 10000 °C.jam dengan kum. TTF = 1000 °C.jam (ASTM C 918-02).

$$y = 7.969 \ln(x) - 35.53$$

$x_1 = 1000$ maka:

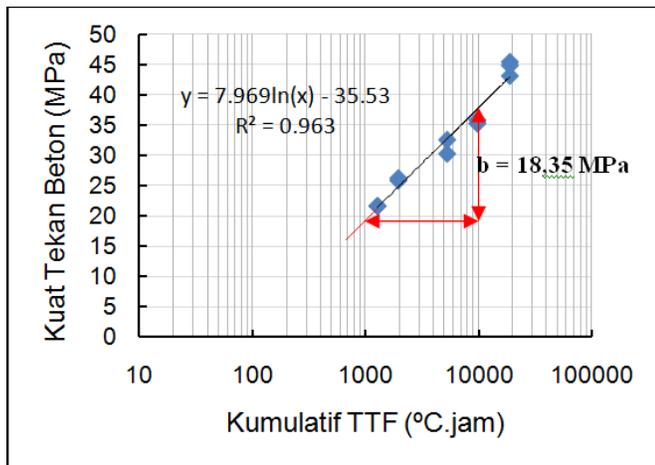
$$y_1 = 7.969 \ln(1000) - 35.53 = 15.52 \text{ MPa}$$

$x_2 = 10000$ maka:

$$y_2 = 7.969 \ln(10000) - 35.53 = 37.87 \text{ MPa}$$

$$b = y_2 - y_1 = 37.87 - 19.52 = 18.35 \text{ MPa}$$

Sehingga nilai $b = 18.35$ MPa.



Gambar 7. Kemiringan kurva kematangan (nilai b)

3. Indeks kematangan di umur target (M)

- Umur dasar 1 hari

Tabel 4.
Nilai indeks kematangan di umur target (M)

Umur dasar (hari)	Kum. TTF di umur target (M) (°C.jam)		
	7 hari	14 hari	28 hari
1 hari	5029	9565	18637
2 hari	5019	9555	18627

4. Indeks kematangan di umur dasar (m)

- Umur dasar 1 hari $m = 1141$ °C.jam
- Umur dasar 2 hari $m = 1779$ °C.jam

Berikut ini adalah cara memprediksi kuat tekan beton umur 7 hari dengan umur dasar 1 hari dengan menggunakan persamaan ASTM C918-02.

Diketahui :

- $b = 18.35$ MPa
- $m = 1141$ °C.jam
- $M = 5029$ °C.jam
- $S_m = 16.75$ MPa (benda uji 1)
- $S_m = 17.95$ MPa (benda uji 2)

Permasalahan :

- Berapakan kuat tekan prediksi (S_M) di umur 7 hari ?

Penyelesaian :

- Benda uji 1

$$S_M = S_m + b(\log M - \log m)$$

$$S_M = 16.75 + 18.35(\log 5029 - \log 1141)$$

$$S_M = 28.57 \text{ MPa}$$

- Benda uji 2

$$S_M = S_m + b(\log M - \log m)$$

$$S_M = 17.95 + 18.35(\log 5029 - \log 1141)$$

$$S_M = 29.77 \text{ MPa}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh nilai prediksi kuat tekan beton umur 7 hari dengan umur dasar 1 hari sebesar $S_M = 28.57$ MPa untuk benda uji 1 dan $S_M = 29.77$ MPa untuk benda uji 2.

Kuat tekan prediksi umur 14 dan 28 dapat dihitung dengan cara tersebut. Rekap nilai prediksi kuat tekan di umur target 7, 14 dan 28 hari dengan persamaan ASTM dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5.
Kuat tekan prediksi dengan persamaan ASTM

Umur dasar, (hari)	Benda Uji	Kuat tekan di umur dasar (S_m), (Mpa)	Kuat tekan di umur target prediksi (S_M), (Mpa)		
			7 hari	14 hari	28 hari
1	1	16.75	28.57	33.70	39.01
	2	17.95	29.77	34.90	40.21
2	1	21.07	29.34	34.47	39.79
	2	22.23	30.50	35.63	40.95

C. Perhitungan Akurasi Hasil Prediksi

1. Nilai Error Kuat Tekan Hasil Prediksi dengan Aktual

Dengan membandingkan kuat tekan hasil prediksi dengan kuat tekan aktual maka kita dapatkan nilai *error* seperti pada Tabel 6. Hasil prediksi menggunakan persamaan ASTM menghasilkan nilai *error* antara kuat tekan prediksi dengan kuat tekan aktual kurang dari 5% untuk umur 7 dan 28 hari untuk semua benda uji, sedangkan untuk umur 14 hari untuk benda uji 2 memberikan *error* di atas 5%, namun kurang dari 10%. Prediksi dengan umur dasar 1 hari memberikan nilai *error* lebih rendah dibanding dengan umur dasar 2 hari.

Tabel 6.
Perhitungan Nilai Error Hasil Prediksi

Umur dasar, (hari)	Kuat tekan di umur dasar (S _m), (Mpa)	Kuat tekan di umur target prediksi (S _M), (Mpa)						Error, (%)		
		7 hari		14 hari		28 hari		7 hari	14 hari	28 hari
1	16.8	28.8	33.7	39.0	2.2	2.5	1.3			
	18.0	29.8	34.9	40.2	1.9	6.1	1.8			
2	21.1	29.3	34.5	39.8	0.4	4.8	0.7			
	22.2	30.5	35.6	41.0	4.4	8.3	3.6			

2. Pengujian Hasil Prediksi secara Statistik

Jumlah sampel pada tiap pengetesan adalah 2 buah benda uji. Secara statistik data ini tergolong dalam data kecil (< 30 data). Pengujian hipotesis yang dipakai untuk data kurang dari 30 buah adalah menggunakan uji t [6].

Berikut ini adalah perhitungan uji t hasil prediksi kuat tekan umur target 7 hari dari data kuat tekan umur 1 hari.

Diketahui:

- Standar deviasi : s = 0.85
- Jumlah data : n = 2
- Kuat tekan aktual umur 7 hari : μ₀ = 29.21 MPa

Penyelesaian :

- a. H₀ : nilai kuat tekan prediksi sama dengan kuat tekan aktual umur 7 hari (μ=μ₀).
Ha : nilai kuat tekan prediksi tidak sama dengan kuat tekan aktual umur 7 hari (μ≠μ₀)
- b. Statistik uji : menggunakan uji t (n < 30)
- c. Arah pengujian : dua arah
- d. Taraf pengujian : α = 0.05
tingkat kepercayaan = 95 %
- e. Nilai titik kritis atau daerah penerimaan H₀:

H₀ diterima jika:

$$-t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \leq t_{hitung} \leq t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \tag{5}$$

$$-t_{\frac{0.05}{2}, 2-1} \leq t_{hitung} \leq t_{\frac{0.05}{2}, 2-1}$$

$$-t_{0.025; 1} \leq t_{hitung} \leq t_{0.025; 1}$$

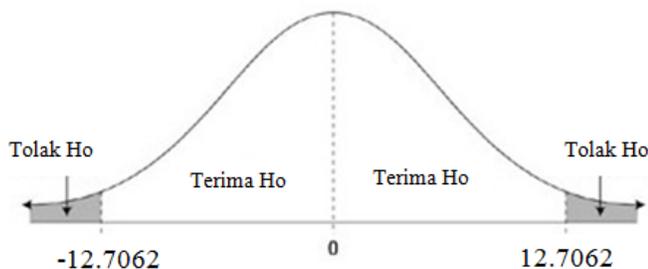
$$-12.7062 \leq t_{hitung} \leq 12.7062$$

Nilai t = 12.7062 di atas dapat diambil dari tabel t.

- f. Statistik hitung:

$$t_{hitung} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} = \frac{29.17 - 29.21}{0.85/\sqrt{2}} = -0.068$$

- g. Kesimpulan:



Gambar 8. Daerah penerimaan uji hipotesis

t_{hitung} = -0.068 ada di daerah penerimaan, sehingga H₀ diterima. Jadi kuat tekan prediksi sama dengan kuat tekan aktual umur 7 hari.

Dengan cara perhitungan seperti yang telah dijelaskan di atas rekapan hasil uji t untuk hasil kuat tekan prediksi di umur target 7, 14 dan 28 hari berdasarkan data kuat tekan dari umur dasar 1 dan 2 hari dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7.
Hasil uji t Kuat Tekan Prediksi

Umur target (hari)	Kuat tekan prediksi, Mpa			Kuat tekan aktual di umur target (μ ₀), MPa	Nilai t _{hitung}	Pengujian Hipotesis α = 0.05 -12.7 < t _{hitung} < 12.7
	Benda uji 1	Benda uji 2	Rata-rata (μ)			
7	28.57	29.77	29.17	29.21	-0.07	terima H ₀
	29.34	29.44	29.39			
14	33.7	34.9	34.3	32.89	2.35	terima H ₀
	34.47	35.63	35.05			
28	39.01	40.21	39.61	39.52	0.15	terima H ₀
	39.79	40.95	40.37			

Berdasarkan hasil pengujian hipotesis nilai t_{hitung} pada semua umur prediksi berada di daerah penerimaan. Sehingga untuk umur 7, 14 dan 28 hari kuat tekan hasil prediksi = kuat tekan aktual.

IV. KESIMPULAN

Tingkat keakuratan kuat tekan beton dengan campuran fly ash dan perawatan uap menggunakan metode kematangan (maturity method) adalah sebagai berikut:

- Nilai error antara kuat tekan prediksi dengan kuat tekan aktual kurang dari 5% untuk umur 7 dan 28 hari untuk semua benda uji, sedangkan untuk umur 14 hari untuk benda uji 2 memberikan error di atas 5%, namun kurang dari 10%. Prediksi dengan umur dasar 1 hari memberikan nilai error lebih kecil dibanding dengan umur dasar 2 hari.
- Dari hasil uji statistik kuat tekan prediksi umur target 7, 14 dan 28 hari dengan umur dasar 1 dan 2 hari dapat dikatakan kuat tekan hasil prediksi sama dengan kuat tekan aktualnya. Hal ini dibuktikan dengan nilai t_{hitung} berada di daerah penerimaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Triwulan, Raka IGP, dan Sadj, "Perubahan Kuat Tekan Pasta dan Beton dengan Fly Ash oleh pengaruh moist dan steam curing," *Media Teknik*, Vol. 4 (1998, Nop.) 66-71.
- [2] K. W. Day, *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification 3rd Edition*, London and New York: Taylor & Francis (2006).
- [3] Marwan Triwulan, "Reaktifitas fly ash (abu terbang ex batu bara) serta pengaruhnya pada perekat beton," *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil (TORSI)* (1995, Nop.) 29-35.
- [4] *Peraturan Beton Bertulang Indonesia*. Bandung : Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan (1971).
- [5] ASTM C 918-02, *Standar Metode Tes untuk Menentukan Kuat Tekan Beton Umur Muda dan Memperkirakan Kekuatan di Umur Selanjutnya*, Annual Book of ASTM Standards (2002).
- [6] P. A. Surjadi, *Pendahuluan Teori Kemungkinan dan Statistika*. Bandung: Penerbit ITB (1989).