

ALTERNATIF PENGGUNAAN LIMBAH PABRIK KERTAS SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN (CEMENTITIOUS) DALAM PEMBUATAN BETON

The Usage Alternative Of Waste Paper Mill As Substitute For Cement (Cementitious) In Concrete Production

Norman Ray, Juis W U, Eko R

Dosen Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
Jl. Arief Rachman Hakim 100 Surabaya 60117; email: gasman_f14@yahoo.com

ABSTRACT

The demand of cement in construction industry is increasing. The cement price is also increasing and getting more expensive because the raw material to produce cement is not renewable material. Therefore, alternative material is required to substitute cement. The paper industry waste contains Aluminium Oxide (Al₂O₃), Calcium Oxide (CaO), Magnesium Oxide (MgO), Sulphur Trioxide (SO₃), and Silicon Dioxide (SiO₂). These compounds could be used to substitute raw material in producing cement, and hopefully could answer this problem. This research objective is to find the influence of the use of aluminium waste in concrete, particularly the behaviour of the physical characteristics of cement paste (setting time) and mechanic characteristics of concrete (compressive strength, modulus of elasticity, bond strength of reinforcement, and modulus of rupture) with waste content 5% until 15% from the composition of cement for concrete $f_c' = 25$ MPa. Results of research indicated that the waste was retarder and the waste content less than 10% were met the condition of SNI 15-2094-1994. The use of 5% paper mill waste in a concrete mixture still was permitted because modulus of elasticity increased by 8% compared to the concrete without waste. Furthermore, compressive strength waste concrete 5% is 26,7 MPa, where the value is above $f_c' = 25$ MPa. Bond slip that was reached during maximum P pulled still on the minimal value permitted by ASTM C 234, and the modulus rupture (14.7%) was smaller compared to the waste concrete 10%.

Keywords: setting time, the waste of the paper industry, compressive strength, modulus of elasticity, bond slip reinforcement, modulus of rupture

PENDAHULUAN

Pabrik pulp dan kertas memberikan kontribusi besar dalam ekspor non migas Propinsi Jawa Timur, dimana pada semester pertama tahun 2003 dari 2.597 juta US \$ nilai ekspor non migas, sumbangan terbesar diberikan oleh sektor industri pulp dan kertas sebesar 348 juta US \$. Peningkatan nilai ekspor membawa konsekuensi terhadap kapasitas produksi yang juga ikut meningkat sehingga muncul permasalahan yaitu terbentuknya hasil sampingan berupa limbah yang berpengaruh bagi lingkungan (LKEKLB, 2004), dengan adanya limbah ini dikawatirkan berdampak turunnya kualitas air tanah apabila limbah tersebut dibuang ke sungai (Yulfiah & Dinna, 2006). Industri penghasil kertas banyak menggunakan bahan baku dari kayu, pulp dan kertas bekas. Hasil sampingan dari proses pengolahan limbah yang ada berupa limbah padat. Limbah padat akan terus meningkat dengan bertambahnya kebutuhan produksi sehingga diperlukan pemecahan dalam hal pembuangannya karena peningkatan kapasitas produksi perusahaan tidak sebanding

dengan peningkatan kemampuan pengelolaan limbahnya (Jupernalis Samosir, 2007).

Setelah dilakukan analisa kimia terhadap hasil limbah padat tersebut ternyata memiliki unsur-unsur yang mirip dengan komposisi semen seperti adanya kandungan Aluminium Oksida (Al₂O₃), Kalsium Oksida (CaO), Magnesium Oksida (MgO), Sulfur Trioksida (SO₃), Silikon dioksida (SiO₂) (LPKI, 2005) yang merupakan senyawa yang dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuat semen, dimana diketahui bahwa bahan dasar semen saat ini tidak dapat diperbaharui sehingga diperlukan bahan dasar pengganti yang dapat dijamin ketersediaannya. Disamping itu karena terjadinya krisis moneter yang melanda Indonesia pada tahun 1998 mendorong meningkatnya harga semen di pasaran. Kenaikan harga semen justru sangat mempengaruhi harga sebuah beton karena biaya kebutuhan semen mencapai 60-70 % dari total harga beton yang ada.

Penelitian ini dicoba untuk memanfaatkan limbah sebagai bahan pengganti penggunaan (*replacement*) sebagian semen (*cementitious*) dalam pembuatan beton sehingga mengurangi biaya pembuatan beton yang semakin mahal (Sunnyoto,

2006) serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan apabila limbah tersebut dibuang ke alam, untuk itu diperlukan diketahui seberapa besar kadar limbah yang dapat digunakan dalam pembuatan beton namun masih memberi kondisi yang diijinkan terhadap perilaku sifat fisik pasta semen (*setting time*), sifat mekanik beton (kuat tekan, *modulus elastisitas*, dan *modulus rupture*), serta kuat lekat tulangan ulir terhadap beton dengan menambahkan kandungan limbah kedalam beton sebesar 5% hingga 15 % dari total kebutuhan semen pada perencanaan campuran.

Komposisi Kimia Limbah

Abu limbah industri kertas berasal dari sisa produksi pabrik kertas PT.Adiprima Suraprinta yang bahan baku utamanya berasal dari kertas bekas/*waste paper*. Proses pengolahan kertas bekas menjadi kertas koran/*deinking* yang bertujuan untuk menghilangkan tinta yang terdapat dalam kertas bekas sehingga diperoleh pulp yang putih. Proses pengolahan bahan baku tersebut sebagian besar menggunakan komponen air sehingga limbah yang dihasilkan berupa buburan (*pulp*) yang masih banyak mengandung air (Gambar 1). Namun setelah melalui proses pengeringan dengan dipanaskan pada suhu 200⁰ menghasilkan partikel berwarna abu-abu dengan kehalusan lebih kecil dari pasir.



Gambar 1. Limbah Pabrik Kertas Dalam Kondisi Basah

Pengujian komposisi kimia yang dilakukan oleh LPKI (2005) terhadap limbah kertas dan hasilnya dibandingkan dengan komposisi semen Portland type 1 dan persyaratan standar yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 1. Limbah memiliki beberapa senyawa oksida seperti silikon dioksida (SiO₂), aluminium oksida (Al₂O₃), magnesium oksida (MgO), kalsium oksida (CaO), ferri oksida (Fe₂O₃), dimana oksida tersebut merupakan bahan dasar untuk membuat produk klinker semen seperti Tricalcium Silicate/C₃S (3CaO.SiO₂), Dicalcium Silicate/C₂S (2CaO.SiO₂), Tricalcium Aluminate/C₃A (3CaO.AL₂O₃) dan Tetracalcium Aluminate Ferrit /C₄AF

(4CaO.AL₂O₃.Fe₂O₃). Senyawa yang paling dominan di dalam limbah adalah Kalsium Oksida (CaO) sebesar 56,38%, air (H₂O) 16,11%, Sulfur Trioksida (SO₃) 11,26% serta beberapa unsur lain. Pemanfaatan senyawa pada limbah sebagai pengganti bahan baku semen berupa batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan pasir besi serta *gypsum* yang biasa digunakan diharapkan dapat menjamin ketersediaan bahan baku semen serta mengurangi dampak lingkungan apabila limbah dibuang ke alam.

Tabel 1. Komposisi senyawa kimia limbah kertas

Komposisi Kimia	Limbah pabrik kertas ¹⁾	Semen Gresik PC Jenis I ²⁾	SNI	ASTM
			15-2049 PC Jenis I ³⁾	PC Jenis I ⁴⁾
Silikon dioksida (SiO ₂), %	2,35	20,92	-	-
Aluminium Oksida (Al ₂ O ₃), %	7,70	5,49	-	-
Ferri Oksida (Fe ₂ O ₃), %	1,68	3,78	-	-
Kalsium Oksida (CaO), %	56,38	65,21	-	-
Magnesium Oksida (MgO), %	3,62	0,97	6,00	6,00
Sulfur Trioksida (SO ₃), %	11,26	2,22	3,50	3,50
(TiO ₂)	0,14			
Carbon Dioksida (CO ₂)	0,75			
Air (H ₂ O)	16,11			
Hilang Pijar (LO _i), %		1,35	5,00	3,00
Kapur Bebas , %		0,59	-	-
Bagian Tidak Larut, %		0,43	3,00	0,75
Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), %		0,19	0,60	0,60
Tricalcium Silicate (C ₃ S), %		57,82	-	-
Dicalcium Silicate (C ₂ S), %		16,36	-	-
Tricalcium Aluminate (C ₃ A), %		8,16	-	-
Tetra Calsium Aluminate Ferrit-C ₄ AF,%		11,50	-	-

¹⁾Laboratorium Penelitian dan Konsultasi Industri (BPKI) Surabaya,2005

²⁾ PT Semen Gresik (Persero) Tbk, 2002

³⁾ STANDART SKSNI 15-2049-1994, Puslitbang Teknologi Pemukiman Departemen Pekerjaan Umum,1994

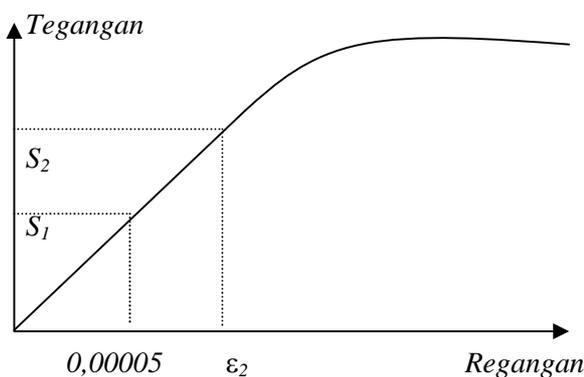
⁴⁾ ASTM C 150, 1994

METODE PENELITIAN

Benda uji direncanakan dengan mutu f'c = 25 Mpa dan dibagi menjadi 3 kelompok dimana pembagian kelompok berdasarkan jumlah kadar limbah yang ditambahkan (*replacement*) pada campuran pasta semen maupun beton sebesar 0 %, 5%, dan 10% dari kebutuhan semen. Pengujian meliputi vicat (ASTM C150,1994), untuk mencari waktu pengikatan (*setting time*) dan waktu pengerasan (*hardening time*) dari pasta semen, uji kuat tekan beton, uji *modulus elastisitas*, pengujian komposisi senyawa kimia, uji kuat lekat tulangan

dalam beton (*pull out*), serta uji modulus ruptur. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur benda uji 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Adapun jenis material yang dipakai adalah pasir dan kerikil dari Mojokerto Jawa Timur dan semen tipe I merk Semen Gresik produksi PT Semen Gresik (Persero) Tbk dan limbah diambil dari PT ADIPRIMA SURAPRINTA. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Beton ITATS, Laboratorium Beton ITS dan Balai Penelitian dan Konsultasi Industri Surabaya.

Penentuan modulus elastisitas beton secara ekperimental digunakan metode “Chord Modulus” sesuai yang diusulkan oleh ASTM C 469 dengan kecepatan pembebanan $\pm (341 \pm 34)$ KPa/s. Chord modulus adalah sudut tangent dari garis yang ditarik diantara dua titik tertentu pada kurva tegangan – regangan yakni titik dimana regangan bernilai 0,00005, sedangkan titik atas adalah titik dimana titik sama dengan 40% dari tegangan ultimate (Gambar 2).



Gambar 2. Penentuan Modulus Elastisitas

Chord modulus dihitung berdasar hubungan ;

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (1)$$

Dimana,

E_c = Chord modulus = Modulus elastisitas

S_2 = Tegangan yang berkorespondensi 40% dari tegangan batas (tegangan peralihan dari kondisi elastis ke plastis)

S_1 = Tegangan yang berkorespondensi dengan regangan 0,00005

ϵ_2 = Regangan longitudinal yang berkorespondensi dengan S_2 .

Prosedur kekuatan lekatan tulangan (*pull-out*) pada slip 0,25 mm didasarkan pada ASTM C 234-91a (1991), kemudian dalam menganalisa kuat lekat /

tegangan lekat (*bond stress*) 0,25 mm menggunakan rumus SNI 03-4809-1998, (1998) yaitu menentukan besarnya tegangan lekatan diperoleh dengan membandingkan besarnya gaya tarik maksimum (tulangan terlepas dari beton) dengan luas permukaan tulangan yang tertanam dalam beton (keliling tulangan dikalikan panjang penyaluran) atau dengan menggunakan formula sebagai berikut;

$$f_b = \frac{P}{\pi D_b L_d} \quad (2)$$

Dimana,

f_b = Tegangan lekat (kg/cm^2)

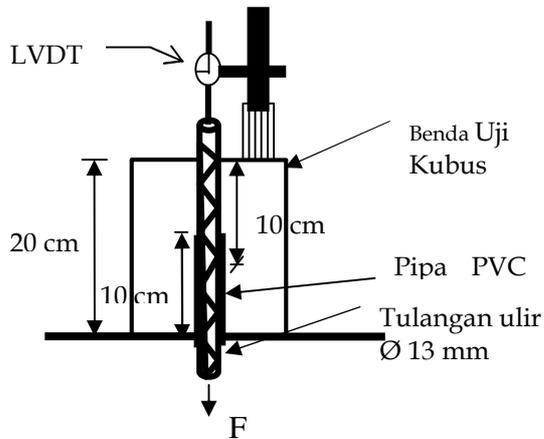
P = Gaya tarik maksimum sampai batang tercabut (Kg).

D_b = Diameter nominal = 13 cm

L_d = Panjang penyaluran = 10 cm

Beban tarik uji dilakukan dengan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*). Dari alat ini dapat diperoleh data pembebanan dan perpindahan (*displacement*) yang saling berkorelasi. Beban tarik dikenakan pada benda uji secara bertahap dengan metoda “*displacement control*”. Yaitu penambahan pembebanan diatur berdasarkan pada laju penambahan displacementsnya. Besarnya kecepatan penarikan diambil 1.27 mm/menit, sesuai standart pada ASTM C 234-91a (1991).

Slip yang terjadi pada Tulangan pada saat beban tarik bekerja diukur dengan menggunakan LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) W 10. Indikator pengamatan adalah besarnya total slip yang terjadi antar tulangan dengan beton. LVDT dipasang pada penjepit yang ditempatkan pada ujung atas tulangan yang akan diukur slipnya, sedangkan plat penahan jarum LVDT ditempatkan pada kubus beton sehingga data yang didapat dari LVDT merupakan total slip yang terjadi antara tulangan dengan beton. Pangkal penjepit yang menghubungkan LVDT dengan tulangan dipasang sedekat mungkin terhadap permukaan benda uji, sehingga perpanjangan baja yang terjadi diantara permukaan benda uji dengan penjepit sangat kecil dan dapat diabaikan. Selama pengujian, data yang didapat dibaca secara manual setiap interval 100 kg. Data yang diperoleh dari alat ini adalah beban tarik (kg), sedangkan total slip (mm) dicatat oleh LVDT (Gambar 3).



Gambar 3. Benda uji Pull Out dan LVDT

Pengujian *Modulus of Rupture* (uji tarik lentur) untuk menghitung kekuatan tegangan tarik lentur beton pada sisi yang paling jauh, di hitung berdasarkan rumus lenturan kenyal untuk momen lentur ultimit yang ditentukan secara eksperimental pada sebuah bahan. *Modulus of Rupture* di hitung dengan rumus (ASTM C 78) dan untuk mendapatkan nilai momen yang konstan di 1/3 bentang tengah balok maka digunakan metode *Third Point Loading* seperti pada Gambar 4.

$$f_r = \frac{Pl}{bd^2} \quad (3)$$

dimana f_r = *Modulus of Rupture* (Kg/cm²)

P = Beban Terpusat Maksimum Pada Suatu Penampang (Kg)

l = Panjang Bentang Balok (cm)

b = Lebar Balok (cm)

d = Tinggi Efektif Balok (cm).



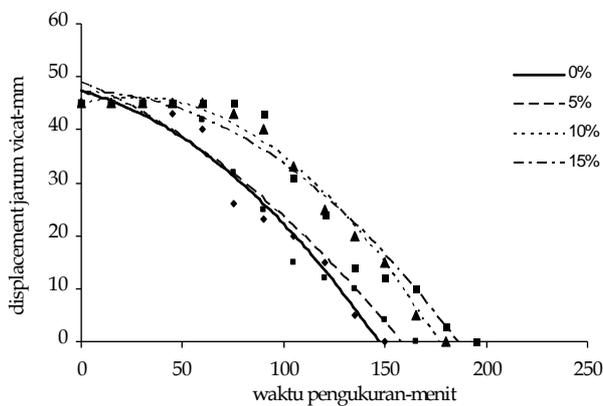
Gambar 4. Peralatan pada pengujian modulus rupture dengan metode *Third-Point Loading Method*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Waktu Pengikatan dan Pengerasan Pasta Semen

Semen *portland* dalam keadaan kering memiliki energi laten yang cukup besar, energi ini mulai aktif setelah semen dibubuhi air. Massa semen air (pasta) kemudian menjadi plastis sehingga dapat dikerjakan dengan mudah. Semen *portland* merupakan bahan pengikat hidrolis yang sangat tergantung dari reaksi kimia antara semen dan air. Reaksi kimia ini terjadi dalam dua periode yang berlainan, yaitu periode pengikatan (proses peralihan dari keadaan plastis ke keadaan keras) dan pengerasan (proses penambahan kekuatan setelah terjadi pengikatan) (Aman Subakti, 1991). Proses pengikatan adalah keadaan saat mulainya semen menjadi kaku terhitung setelah semen itu diaduk dengan air, hal ini ditandai dengan besarnya penurunan jarum vikat sebesar 25 mm. Spesifikasi untuk semen mensyaratkan pengikatan semen tidak boleh kurang dari 45 menit (ASTM C150,1994). Proses berikutnya adalah pengerasan (pengikatan akhir), yaitu kondisi pasta semen menjadi keras walaupun belum cukup kuat. Keadaan ini ditandai besarnya penurunan jarum vikat sebesar 0 mm.

Hasil pengamatan terhadap pasta semen yang mengandung limbah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 mengindikasikan bahwa peningkatan kadar limbah dalam pasta semen memperlambat waktu pengikatan (*initial setting time*) dari 80 menit (limbah 0%) menjadi 115 menit (limbah 15%) juga memperlambat waktu pengerasan (*final setting time*) dari 140 menit (limbah 0%) menjadi 185 menit (limbah 15%). Namun kandungan limbah dibawah 15% memberikan waktu *setting time* yang masih diijinkan oleh standar SNI 15-2049-1994 (45 hingga 375 menit). Semakin lambatnya waktu pengikatan dan pengerasan disebabkan oleh jumlah kandungan kapur (Kalsium Oksida/CaO) yang cukup besar (56,38%) dalam limbah sehingga saat terjadi reaksi hidrasi (semen+air+limbah) selain itu terbentuk ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) sebagai hasil reaksi antara gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) dengan $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ sehingga proses hidrasi terhambat dengan makin banyaknya senyawa ini. Dengan semakin lambatnya *setting time* dari pasta semen yang mengandung limbah maka limbah mempunyai sifat *retarder* (bahan yang memperlambat waktu pengikatan beton) Y.S Wahyuni (2007).



Gambar 5. Hasil Uji Vicat Pasta Semen Dengan Berbagai Prosentase Kandungan Limbah

Kuat Tekan Beton Limbah

Hasil uji kuat tekan diperlihatkan pada Gambar 6, pada gambar tersebut nampak bahwa beton limbah memiliki kecenderungan nilai kuat tekannya masih dibawah nilai kuat tekan beton tanpa limbah. semakin besar kadar limbah dalam beton mengakibatkan semakin besar penurunan kuat tekan yang terjadi. . Beton tanpa limbah relatif mempunyai tegangan yang lebih besar dibanding beton dengan limbah. Dengan bertambahnya kadar limbah dalam beton pada umur 28 hari mengakibatkan turunnya tegangan tekan dari 318,47 kg/cm² (kadar limbah 0%) menjadi 178,34 kg/cm² (kadar limbah 15%). Penambahan limbah di atas 5% kedalam campuran beton memberikan dampak kurang menguntungkan terhadap kuat tekan (gambar 7) karena silinder beton mempunyai kecenderungan turun kuat tekannya pada semua umur namun demikian tegangan tekan beton dengan kadar limbah kurang dari 5 % memiliki potensi memiliki tegangan di atas minimal yang masih diijinkan ($f_c' = 25 \text{Mpa} = 250 \text{ kg/cm}^2$) yaitu sebesar 267,52 kg/cm². Penyebab rendahnya kuat tekan beton karena limbah kurang memiliki kandungan silika yang cukup ($1,6 < SR < 3,5$) dimana nilai silika rasio (SR)nya adalah 0,25, yaitu berdasarkan analisis

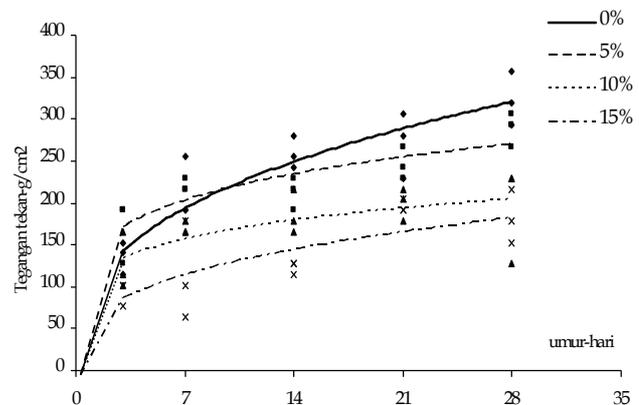
$$(SR) = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{2,35}{7,7 + 1,68} = 0,25$$

Sedangkan kandungan CaO di dalam limbah yang cukup besar (56,38%) dibanding unsur yang lain menyebabkan rasio kejenuhan kapur (*Lime Saturation Factor* (LSF) adalah 4,81 , yaitu berdasarkan analisis

$$(LSF) = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{56,38}{2,35 + 7,7 + 1,68} = 4,81 > 1,02$$

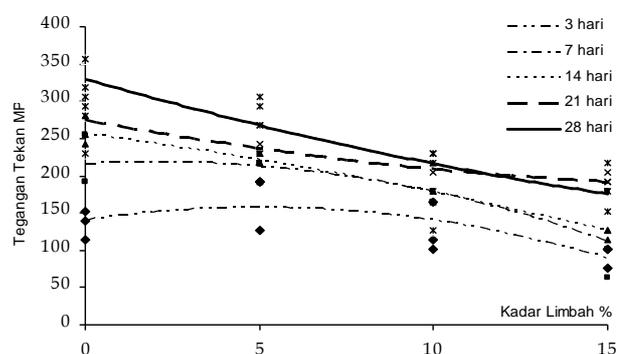
dimana LSF meningkat sehingga semen banyak terbentuk kapur bebas yang akan menyebabkan

volume semen tidak stabil sehingga menurunkan kualitas semen dalam beton. (Aman Subakti,1991).



Gambar 6. Hasil Kuat Tekan Beton Yang Mengandung Limbah 0% Hingga 15%

Penyebab lain turunnya kuat tekan disebabkan dengan bertambahnya jumlah limbah dalam beton menyebabkan kandungan senyawa klinker yang ada pada semen portland berkurang hingga 15%. Pada sisi lain peningkatan limbah tidak memberikan pengaruh kuat terhadap kuat tekan dikarenakan *silikon dioksida* (SiO_2) dalam limbah yang kurang dominan (2,35%) sehingga mengakibatkan $3CaO.SiO_2$ (*Tricalcium silicate*) yang merupakan kandungan utama dalam portland cement kurang bisa memberikan pengaruh terhadap meningkatnya *Calcium Silicate Hydrate* ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) yang merupakan senyawa penentu terhadap perkembangan kekuatan awal kuat tekan beton, hal ini mengakibatkan beton kekurangan jumlah senyawa silika dan kandungan tricalcium silicate/ C_3S ($3CaO.SiO_2$) (PT Semen Padang (Persero) Tbk, 1995).

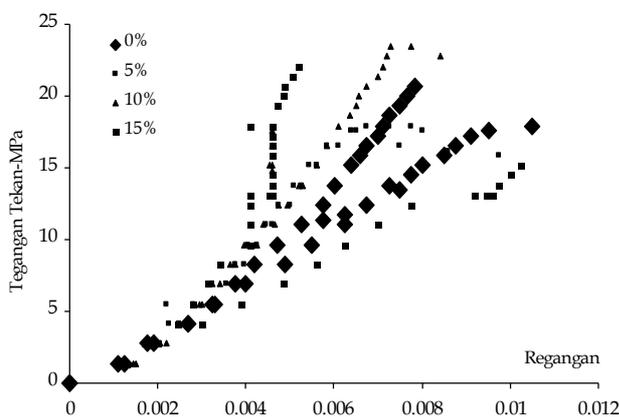


Gambar 7. Hubungan Kadar Limbah Dengan Tegangan Tekan Beton Pada Berbagai Umur Pengujian

Modulus Elastisitas Beton Limbah

Kurva hubungan tegangan – regangan pada gambar 8 memperlihatkan riwayat pembebanan hingga benda uji silinder mengalami kehancuran.

Data hasil pengujian berupa beban (gaya) dan *displacement* (perpindahan) yang telah dikonversikan dalam bentuk hubungan tegangan – regangan. Hubungan tegangan – regangan beton pada awalnya cenderung linier, namun kurva saat mendekati tegangan maksimum hubungan tersebut menjadi non linier. Ini disebabkan mulai terjadinya retak – retak di daerah *interface* pada saat dimana tegangan pada kondisi plastis. Perhitungan modulus elastisitas menggunakan metode *Chord Modulus* seperti yang diusulkan ASTM C 469 dapat dilihat pada tabel 2 dimana tegangan ultimate ditentukan berdasarkan pada kondisi dimana beton telah hancur dan tidak terjadi peningkatan beban selanjutnya pada mesin tekan sedangkan untuk menentukan posisi tegangan S_1 dimana nilai regangannya adalah 0,0005 dengan memakai metode interpolasi diantara 2 titik regangan yang berdekatan.



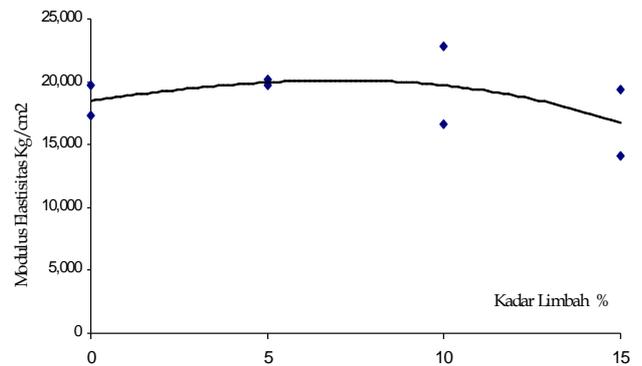
Gambar 8. Hubungan Tegangan Tekan Silinder Beton dengan Regangan Pada Beberapa Prosentase Limbah

Tabel 2. Hasil Uji Modulus Elastisitas (E_c) Silinder Beton

Kadar Limbah	u Kg/cm ²	S_2 Kg/cm ²	S_1 pada $=0,00005$	2	E_c Kg/cm ²
0 %	175,8	70,3	0,55	0,00409	17264,8
0 %	206,8	82,7	0,63	0,00420	19775,9
5%	175,8	70,3	0,55	0,00359	19703,4
5%	179,3	71,7	0,63	0,00357	20190,3
10%	110,3	44,1	0,47	0,00267	16652,7
10%	234,4	93,8	0,46	0,00415	22765,8
15%	124,1	49,6	0,55	0,00353	14094,8
15%	131	52,4	0,53	0,00273	19354,5

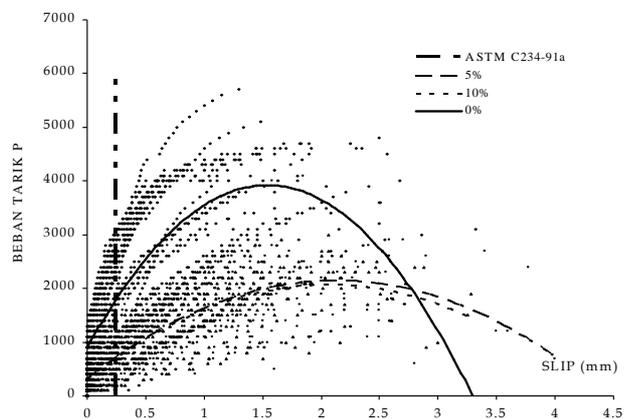
Nilai modulus elastisitas dapat dilihat pada gambar 9 setelah dilakukan analisa regresi menunjukkan bahwa dengan peningkatan kandungan limbah hingga 5% di dalam beton, nilai modulus elastisitasnya cenderung naik dari 18.520 kg/cm² (limbah 0%) menjadi 19.947 kg/cm² (limbah 5%) , namun setelah penambahan di atas 5%

mengakibatkan menurunnya nilai modulus elastisitas beton sehingga beton dengan penambahan limbah tidak lebih dari 5% masih memungkinkan digunakan



Gambar 9. Nilai Modulus Elastisitas (E) beton

Kuat Lekat Tulangan Dalam Beton Limbah



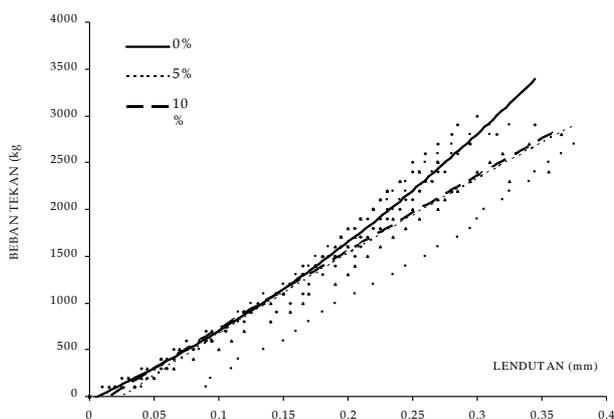
Gambar 10. Hubungan Beban Tarik Dengan Slip Tulangan Baja Ulir Antara Beton Kubus dengan kadar limbah 0 % hingga 10%

Pada pengujian kuat lekat tulangan di dalam beton digunakan standar ASTM C234 yang merekomendasikan bahwa kuat lekat diukur pada saat nilai slip tulangan 0,25 mm. Gambar 10 adalah hasil regresi dari semua bend uji, untuk interval pembacaan slip 0,25 mm (sebelah kiri garis putus-putus ASTM C234) menunjukkan beton tanpa limbah mempunyai nilai kuat lekat yang masih lebih tinggi (1800 kg) dibanding beton limbah. Beton dengan kadar limbah 5-10% memiliki kemampuan lekat yang hampir sama (800 kg). Perilaku lekatan tulangan ditentukan berdasarkan besarnya beban tarik yang mampu dipikul oleh tulangan hingga tulangan tercabut dari dalam beton (SNI 03-4809-1998). Tabel 3 menyajikan nilai beban tarik (P) dan slip yang terjadi saat tulangan tercabut dari dalam beton pada tiap kelompok benda uji, terlihat bahwa semua benda uji beton limbah masih memenuhi persyaratan (slip yang terjadi minimal 0,25 mm). Pada beton dengan kadar limbah 5% masih memberikan perlawanan terhadap gaya tarik

tulangan yang lebih besar dibanding limbah 10% karena nilai slip min yang dicapai antara 0,45 mm hingga 4 mm, yang nilai tersebut di atas limbah 10% (0,25 hingga 3,28 mm). Pada gambar 6 diketahui bahwa kuat lekat dari tulangan ulir pada beton tanpa limbah dapat mencapai beban tarik (kuat lekat) maksimum sebesar 4000 kg dengan slip tulangan=1.63 mm, peningkatan kadar limbah di dalam beton cenderung menurunkan kemampuan kuat lekat tulangan (*reinforcement resistance bond*) hingga menjadi 2148,9 kg (limbah 5% pada slip 2,127 mm) dan 2072,7 kg (limbah 10% pada slip 2,063 mm). Namun demikian kadar limbah 5% masih memungkinkan digunakan karena nilai P min dan P maks masih lebih besar dibanding beton limbah 10%.

Tabel 3. Data hasil laboratorium nilai beban tarik (P) & tegangan lekat (*fb*) yang terjadi saat *lost reinforcement resistance bond* dari 30 benda uji dengan kadar limbah 0 %, 5%, 10% serta data hasil analisa regresi sebagai pembandingan.

Kadar Limbah	Slip min (mm)	Slip maks (mm)	P min kg <i>fb</i> min kg/cm ²	P max (kg) <i>fb</i> max (kg/cm ²)	P Regresi (kg) <i>fb</i> regresi (kg/cm ²)
0 %	0,98	3,32	1400 34,3	5700 139,6	3900 95,5
5%	0,45	4	700 17,15	4100 100,4	2148,9 52,6
10%	0,25	3,28	900 22,05	3000 73,5	2072,7 50,7



Gambar 11. Hubungan antara beban dengan lendutan pada pengujian Modulus Rupture

Turunnya kuat tekan beton limbah mengakibatkan turunnya kuat lekat tulangan di dalam beton karena menurut penelitian sebelumnya Lehman (2000) menunjukkan hubungan kuat lekat tulangan dengan kuat tekan beton adalah berbanding lurus ($f_b = f_c'$ (Mpa)). Namun demikian beton yang

mengandung limbah 5% memiliki elastisitas lekatan yang lebih baik serta mempunyai kecenderungan lebih lama memikul beban tarik dibanding beton normal atau beton limbah 10%. Mekanisme kerusakan yang terjadi pada beton dan batang tulangan disebabkan pembelahan lekatan beton yang ada diantara rib tulangan ketika batang tulangan ulir menerima beban tarik tidak mengalami keruntuhan total, akan tetapi ada keretakan bertahap yang dipengaruhi oleh perilaku elastisitas beton yang berada disekitar bagian depan tonjolan rib tulangan hingga terjadi keruntuhan total yang akhirnya batang tulangan ulir terlepas dari beton kubus.

Modulus Rupture Beton Limbah

Tabel 4. Nilai *Modulus Rupture* beton limbah

Kadar Limbah	Lendutan Max (-mm)	P (kg) Regresi Penurunan	Panjang Balok (L-cm)	Lebar Balok b-cm	Tinggi Efektif Balok (d-cm)	Modulus Rupture (kg/cm ²)
0 %	0.345	3400 0%	60	15	15	60.4
5%	0.375	2900 -14.7 %	60	15	15	51.56
10%	0.365	2850 -16.17 %	60	15	15	50.67

Hasil pengujian *modulus rupture* untuk mendapatkan nilai kekuatan tegangan tarik lentur pada saat hancur (*failure*) seperti disajikan pada gambar 11. Balok beton dengan limbah 5% mengalami lendutan paling besar yaitu 0.375 mm dengan pembebanan mencapai 2900 kg dan ketika dilakukan penambahan beban, balok beton mengalami retak yang terjadi diantara dua titik pembebanan. Lendutan paling kecil terjadi pada balok beton tanpa limbah yaitu, 0.345 mm dengan beban 3400 kg. Pada tabel 4 menunjukkan bahwa penambahan limbah 5 hingga 10 % pada kebutuhan semen dalam campuran beton menurunkan nilai kekuatan tarik lentur (*flexural Tensile Strength*) balok beton, sebesar 14.7 % hingga 16.17%. *Integrated Publishing Engineering* (2008) berpendapat bahwa *Modulus Rupture* berbanding lurus dengan kuat tekan beton seperti pada perumusan $R^2 = 100.f_c'$ sehingga turunnya kuat tekan beton berakibat turunnya modulus ruptur

KESIMPULAN

Secara umum pemakaian limbah pabrik kertas yang ditambahkan hingga 10% pada suatu campuran beton berakibat turunnya kemampuan sifat mekanik (kuat tekan, modulus elastisitas, kekuatan lekat tulangan, *modulus ruptures*) dari beton, akan tetapi perilaku beton yang terjadi masih memenuhi standar

yang disyaratkan ASTM C234-91a dan SNI 03-4809-1998 (PD M-15-1996-03). Pemakaian limbah ini sangat tepat bagi penyesuaian pelaksanaan konstruksi yang memerlukan setting time lebih lama. Pemakaian limbah dengan kadar di bawah 5% dari kebutuhan semen pada suatu volume adukan beton, memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. Nilai Kuat tekan beton (26,752 Mpa) masih di atas nilai karakteristik minimal kuat tekan yang disyaratkan ($f_c' = 25$ Mpa).
2. Nilai modulus elastisitas cenderung meningkat ($19703,4 \text{ kg/cm}^2$) dibanding beton tanpa limbah (17264 kg/cm^2).
3. Nilai slip yang dicapai sesaat sebelum tulangan tercabut dari dalam beton (4mm) lebih besar dibanding beton tanpa limbah (3,3mm) atau beton memiliki kecenderungan menahan beban tarik lebih lama.
4. Penurunan angka *modulus ruptures* relatif lebih rendah dibanding beton dengan limbah 10% dan beton tanpa limbah.

DAFTAR PUSTAKA

- Aman Subakti, 1991, *Teknologi Beton Dalam Praktek*, Laboratorium Beton Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS.
- Annual Book of American Society for Testing Materials Standard, Volume 04.02, ASTM-C 150, 1994, *Standard Specification for Portland cement*.
- Annual Book of American Society for Testing Materials Standard, Volume 04.02, ASTM-C 39, 1993, *Standard Test Method For Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- Annual Book of American Society for Testing Materials Standard, Volume 04.02, ASTM-C 78, 1994, *Standard Test Method For Flexural Strength for Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)*.
- Annual Book of American Society for Testing Materials Standard, Volume 04.02, ASTM-C 234-91a, 1991, *Standard Test Method For Comparing Concrete On Basis Of Bond Developed With Reinforcing Steel*.
- Annual Book of American Society for Testing Materials Standard, Volume 04.02, ASTM-C C 469, 1994, *Standard Test Method For Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compressive*.
- Balai Penelitian dan Konsultasi Industri (BPKI) Surabaya, 2005, *Laporan Hasil Uji Kimia Limbah Pabrik Kertas PT Adiprima Suraprinta Surabaya*.
- Integrated Publishing Engineering (IPE), 2008, Flexural Strength Test (ASTM C 78) (online), Diambil dari <http://www.tpub.com>. Diakses 27 Maret 2008
- Jupernalis Samosir. Limbah Riau Andalan Jadi Wabah Penyakit. Senin, 16 April 2007. Diambil dari <http://www.tempointeraktif.com>. Diakses 8 Nopember 2007
- Laboratorium Penelitian dan Konsultasi Industri (LPKI), 2005, *Hasil Tes Laboratorium Terhadap Sampel Limbah Kertas*, Balai Penelitian dan Konsultasi Industri (BPKI) Surabaya
- Lehman DE, and Moehle JP, 2000, *Seismic Performance of Well Confined Concrete Bridge Columns*, PEER-1998/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University California, Barkeley, 316 pages
- Lembaga Kajian Ekologi dan Konservasi Lahan Basah (LKEKLB), *Ancaman Pencemaran Pabrik Kertas Di Jawa Timur (online) 17 October 2004 14:16:31*, Diambil dari http://www.ecoton.or.id/tulisan_lengkap, Diakses 8 Nopember 2007).
- PT Semen Gresik (Persero) Tbk, 2002, *Petunjuk Praktis Penggunaan Portland Cement Jenis I dan Portland Pozzolan Cement (PPC)*, PT Semen Gresik (Persero) Tbk
- PT Semen Padang (Persero) Tbk, 1995, *Teknologi dan Pembuatan Semen*, PT Semen Padang (Persero) Tbk.
- STANDART SNI 03-4849-1998-03 Departemen Pekerjaan Umum. *Metode Pengujian Untuk Membandingkan Berbagai Beton Berdasarkan Kuat Lekat Yang Timbul Terhadap Tulangan*, Yayasan LPMB, Bandung.
- STANDART SKSNI 15-2049-1994 Puslitbang Teknologi Pemukiman Departemen Pekerjaan Umum. *Semen Portland Tipe I*, Yayasan LPMB, Bandung.
- Sunyoto, 2006, Akankah Krisis Semen Berulang di Indonesia, *Warta Semen dan Beton Indonesia Vol 4 No1-2006*, Asosiasi Semen Indonesia dan Institut Semen dan Beton Indonesia
- Yulfiah, Dinna Indriani, 2006, Keterkaitan Kualitas Air Tanah dengan Pencemaran Sungai oleh Limbah Pabrik Kertas di Kabupaten Nganjuk, *Jurnal IPTEK Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya* Vol 9 No 2 Mei 2006
- Y.S Wahyuni, 2007, Materi Teknologi Bahan Konstruksi. Bahan Bangunan Hidrolis. Y.S Wahyuni (online) 7 October 2007, Diambil dari <http://www.proyeksi.com>. Diakses 5 Oktober 2007).