

PENGARUH KOMPOSISI NANO SEMEN PADA PERILAKU BETON

Elfiranahla Chandra Dewi, Kartika Trisna Apasri
Purwanto, Han Ay Lie

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang, Semarang 50239,
Telp.: (024) 7474770, Fax.: (024) 7460060

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh komposisi nano semen terhadap kuat tekan dan kuat tarik lentur murni pada beton. Sebagai langkah awal dalam pembuatan beton dengan material nano, diperlukan konsep pemilihan material penyusun beton yang tepat. Semen dengan butiran halus memiliki luas permukaan yang lebih besar dibanding dengan semen berbutir kasar, sehingga makin luas permukaan butir-butir semen makin cepat proses hidrasinya sehingga semakin banyak jumlah semen yang mampu bereaksi dengan air yang akan meningkatkan kuat tekan. Peningkatan nilai kuat tekan beton maka akan disertai dengan kenaikan kuat tarik lentur murni.

Untuk mengetahui pengaruhnya digunakan variasi komposisi nano semen yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Benda uji untuk pengujian kuat tekan adalah berbentuk silinder diameter 10 cm dan tinggi 20 cm sedang pengujian kuat tarik lentur murni berbentuk balok berukuran 15 x 15 x 60 cm. Alat yang digunakan dalam pengujian adalah load cell, LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), dan data logger. Melalui penelitian ini diharapkan, selain mengetahui pengaruhnya terhadap kuat tekan beton dan kuat tarik lentur murni, dapat juga mengetahui hubungannya antar keduanya.

Kata Kunci : Nano Semen, Kuat Tekan Beton, Kuat Tarik Lentur Murni Beton.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the influence of the composition nano-cement to compressive strength and flexural strength on concrete. First step in the produced of concrete with nano materials, necessary constituent concepts concrete material selection right. Cement with fine grains have a larger surface area than the coarse grained cement, thus increasing the surface area of a grain of cement hydration process faster so that more amount of cement that can react with water to increase so the compressive strength will be increase too. Increased in the compressive strength of concrete will be accompanied by a increased in flexural strength.

To determine the effect of the composition nano-cement was used variation of composition nano-cement 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. Specimens for compression test is a cylindrical 10 cm diameter and 20 cm high, and Specimens for flexural test is 15 x 15 x 60 cm. The tools used in the testing is a load cell, LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), and data loggers. Through this research is expected, in addition to knowing its effects on concrete compressive strength and flexural strength, can also determine relationship between compressive strength and flexural strength.

Keywords: Nano Cement, Compressive Strength Concrete, Flexural Strength Concrete.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pemakaian beton sebagai bahan utama konstruksi bangunan sudah tidak diragukan lagi keunggulannya. Berbagai penelitian telah dilakukan dalam upaya perbaikan kekuatan beton itu sendiri. Salah satu upaya untuk meningkatkan kuat tarik beton yaitu dengan teknologi material nano atau dikenal dengan istilah beton nano. Syarat material dapat dikatakan material nano adalah jika material tersebut sudah memiliki ukuran 0 – 100 nm.

Semen merupakan salah satu material utama penyusun beton. Semen yang bercampur dengan air akan bereaksi membentuk gel. Semen dengan butir kasar yang diselimuti oleh gel tebal menyebabkan proses difusi terhenti hanya sampai dengan permukaan semen saja, sehingga senyawa semen tidak bereaksi secara sempurna. Peristiwa ini tentu tidak terjadi bila butiran semen lebih halus. Oleh sebab itu, penulis mengambil kesimpulan untuk menggunakan material semen sebagai material yang akan dibuat dalam ukuran nano meter atau dikenal dengan nano material.

Pada dasarnya, penelitian beton nano ini dikembangkan untuk menciptakan beton dengan mutu yang sangat tinggi, baik dalam hal kuat tekannya maupun keawetannya terhadap lingkungan di sekitarnya. Peningkatan nilai kuat tekan beton maka akan disertai dengan kenaikan kuat tariknya. Dengan adanya penelitian beton nano ini, maka diharapkan akan adanya kemungkinan untuk mendesain suatu elemen struktur dengan nilai kuat tekan dan kuat tarik yang lebih tinggi.

Maksud dan Tujuan

1. Membandingkan kekuatan tekan beton semen konvensional dengan beton semen nano.
2. Membandingkan kekuatan tarik lentur beton semen konvensional dengan beton semen nano.
3. Mengkaji prosentase komposisi semen nano optimal untuk mutu beton f'_c 35 MPa.

Batasan Penelitian

1. Material penyusun yang digunakan dalam penelitian ini berupa :
 - Agregat halus berupa pasir Muntilan
 - Agregat kasar berupa batu pecah (*split*) ½ Puduk Payung dengan ukuran gradasi maksimum 20 mm
 - *Portland cement* yang digunakan adalah semen Gresik tipe *PPC* yang akan dikonversi menjadi ukuran nano dengan menggunakan alat PBM (*planetary ball mill*)
 - Air yang digunakan merupakan air kerja PDAM yang berada di laboratorium
2. Mutu beton yang direncanakan dalam penelitian ini f'_c 35 MPa.
3. Metode *mix design* yang dipakai adalah DOE (*Department of Environment*) *Modified*.
4. Benda uji yang digunakan balok beton ukuran 15x15x60 cm untuk uji kuat tarik lentur dan beton silinder ukuran 10x20 untuk uji kuat tekan beton.
5. Pengujian tekan dan pengujian kuat lentur dilakukan pada usia beton 28 hari, dimana pada setiap sampel akan diberikan nilai komposisi semen nano yang berbeda, yaitu 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% dari jumlah semen yang digunakan untuk beton mutu f'_c 35 MPa.

METODOLOGI PENELITIAN

Adapun metodologi dalam penelitian ini, antara lain:

1. Tahap persiapan penelitian
Dimulai dengan mengkaji permasalahan yang ada kemudian melakukan studi literatur tentang penelitian.
2. Tahap persiapan bahan/material
Bahan atau material yang digunakan untuk membuat benda uji :
 - a. Pasir menggunakan pasir muntilan. Pasir yang digunakan harus sesuai dengan standar *fine aggregate*. Pasir dicuci agar diperoleh kadar lumpur dalam pasir sesuai standar yaitu kurang dari 5 % kemudian dikeringkan dengan cara dioven agar didapat kadar air 0 %. Selanjutnya dilakukan analisa saringan agar diperoleh gradasi sesuai ASTM C 33-03.
 - b. *Portland cement* menggunakan semen Gresik tipe *Pozzoland Portland Cement (PPC)*.
 - c. Agregat menggunakan batu hasil pemotongan batu dengan quarry Puduk Payung (1/2).
 - d. Air menggunakan air PDAM.
3. Pengkonversian material semen ke ukuran nano
Penelitian ini menggunakan alat *Planetary Ball Mill (PBM)* untuk mengkonversi ukuran semen. Prinsip kerja alat ini yaitu memanfaatkan energy tumbukan dari bola-bola baja. Bola-bola baja dan material yang akan dilakukan perubahan ukuran, dimasukkan ke dalam satu wadah, yang nantinya wadah tersebut akan bergerak dengan kecepatan tinggi, sehingga bola-bola baja yang telah dimasukkan kedalam wadah akan membentur material yang terdapat dalam wadah, sehingga tercipta mekanisme penggerusan oleh bola baja. Proses penggerusan akan berlangsung terus menerus hingga ukuran material yang berada dalam wadah akan pecah menjadi ukuran yang lebih kecil dengan lama waktu penggunaan alat yaitu 1 jam. Alat PBM dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1 Alat *Planetary Ball Mill (PBM)*

4. Analisa ukuran partikel dengan alat *X-Ray Diffractometer (XRD)*
Tahap ini bertujuan untuk mengetahui apakah material semen yang telah *dimilling*, sudah dapat dikategorikan material nano. Syarat dari material nano adalah 0 - 100 nm. Hasil dari pengujian alat XRD akan berupa grafik, dimana grafik tersebut akan memiliki beberapa puncak. Puncak-puncak grafik tersebut, dianalisa dengan menggunakan persamaan *Scherer*, sehingga didapat ukuran dari bulir kristal semen.
5. Tahap pembuatan cetakan
Sebagian cetakan menggunakan cetakan baja milik Laboratorium Bahan dan Konstruksi

Teknik Sipil Universitas Diponegoro berbentuk balok ukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm dan sisanya menggunakan cetakan yang terbuat dari *multipleks* dengan tebal 12 mm.

6. Tahap pembuatan benda uji.

Benda uji berupa 10 buah balok beton (15x15x60cm) dan 10 buah silinder (10x20cm) dengan perincian 2 buah sampel untuk masing-masing komposisi semen nano yang berbeda yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1 Benda Uji Penelitian

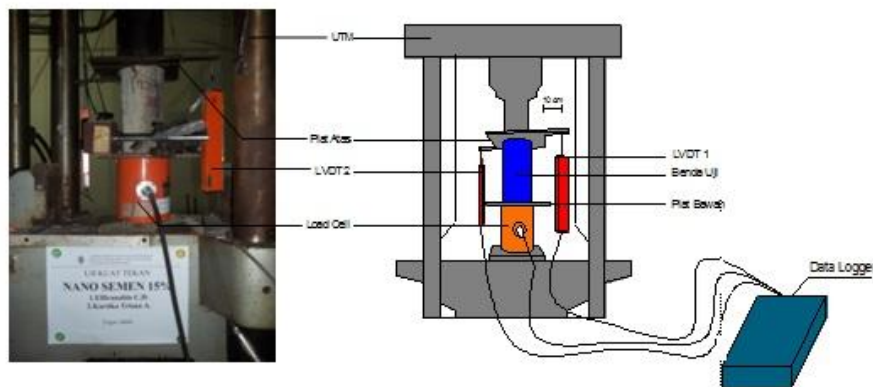
Uji Tekan (Umur 28hr)		Uji Tarik (Umur 28hr)	
Kode Benda Uji	Jumlah Silinder (10x20 cm)	Kode Benda Uji	Jumlah Balok (15x15x60 cm)
S-NC ₀	2 buah	B-NC ₀	2 buah
S-NC ₅	2 buah	B-NC ₅	2 buah
S-NC ₁₀	2 buah	B-NC ₁₀	2 buah
S-NC ₁₅	2 buah	B-NC ₁₅	2 buah
S-NC ₂₀	2 buah	B-NC ₂₀	2 buah
Total	10 buah	Total	10 buah

Pembuatan benda uji dengan tahap pekerjaan sebagai berikut:

- a. Menimbang berat tiap bahan yang diperlukan sesuai dengan rancangan campuran/*Mix Design*, antara lain air, semen, agregat halus.
 - b. Melindungi/menutup bahan-bahan yang telah ditimbang dengan karung. Tujuannya agar tidak terpengaruh kondisi sekitar tempat pengujian, misalnya penguapan.
 - c. Memastikan semua peralatan, baik untuk pengadukan maupun cetakan, telah bersih dari kotoran dan debu.
 - d. Mengolesi permukaan cetakan bagian dalam dengan minyak pelumas agar beton tidak menempel di cetakan sehingga mudah dibuka saat akan mengeluarkan benda uji.
 - e. Membasahi peralatan yang digunakan untuk mengaduk campuran beton, di antaranya molen, loyang, besi pengaduk, pisau pengaduk, kerucut *Abrams* dan alas papan. Tujuannya agar air dalam campuran beton tidak berkurang akibat terserap oleh peralatan yang kering.
 - f. Memasukkan bahan-bahan yang telah disiapkan ke dalam *mixer* (agregat halus dan semen), kecuali air.
 - g. Mencampur bahan-bahan kering yang telah dimasukkan hingga merata.
 - h. Memasukkan air sedikit demi sedikit ke dalam *mixer*.
 - i. Mengaduk bahan-bahan kering dengan air hingga campuran menjadi homogen.
 - j. Menuangkan campuran ke dalam cetakan.
 - k. Menyimpan benda uji dalam ruang lembab selama 24 jam.
 - l. Membuka cetakan
7. Tahap Perawatan, Setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan harus dilakukan perawatan sampai pengujian dilakukan yaitu 28 hari. Perawatan dilakukan dengan cara merendamnya dalam air.

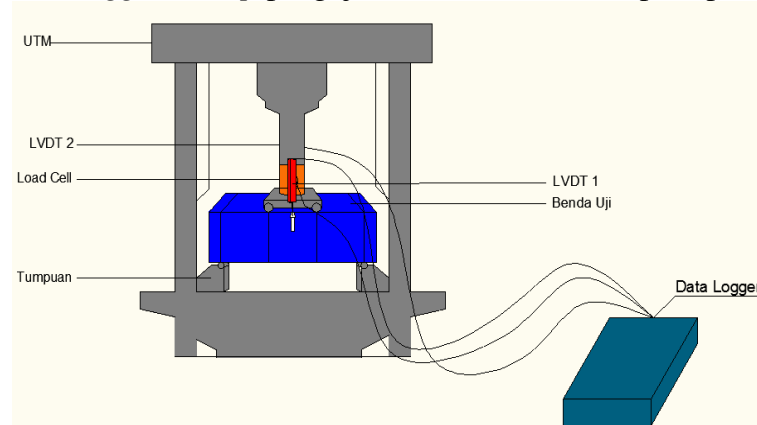
8. Tahap Pengujian

Pengujian tekan benda uji menggunakan *Compression Testing Machine* dengan *set-up* pengujian yaitu, memasang *load cell* pada alat, meletakkan pelat pada bagian atas *load cell*, meletakkan *teflon* diatas pelat, meletakkan benda uji diatas *teflon*, meletakkan *teflon* kembali diatas benda uji, meletakkan plat diatas *teflon* yang bertujuan untuk meratakan beban yang diberikan *Compression Testing Machine* serta agar diperoleh keakurasian angka hasil kuat tekan yang didapat tanpa pengaruh ikatan maupun kekuatan kaping seperti penggunaan belerang dan topi baja. Kemudian memasang LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) dan *data logger*. Pembebanan diberikan dengan cara menekan benda uji secara bertahap hingga mencapai beban maksimum yang dapat ditahan benda uji. Pembacaan beban dan deformasi pada benda uji dilakukan dengan menggunakan *data logger*. *Set up* pengujian kuat tekan dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 *Set Up* Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tarik lentur menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan *set-up* pengujian yaitu, meletakkan benda uji diatas alat, memposisikan pembebanan di 1/3 tengah bentang, memasang *load cell* pada alat, meletakkan pelat pada bagian atas *load cell*, kemudian memasang LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) disisi depan dan belakang benda uji dan *data logger*. Pembebanan diberikan dengan cara menekan benda uji secara bertahap hingga mencapai beban maksimum yang dapat ditahan benda uji. Pembacaan beban dan deformasi pada benda uji dilakukan dengan menggunakan *data logger*. *Set up* pengujian kuat tarik lentur seperti pada gambar 3.



Gambar 3 *Set Up* Pengujian Kuat Tarik Lentur

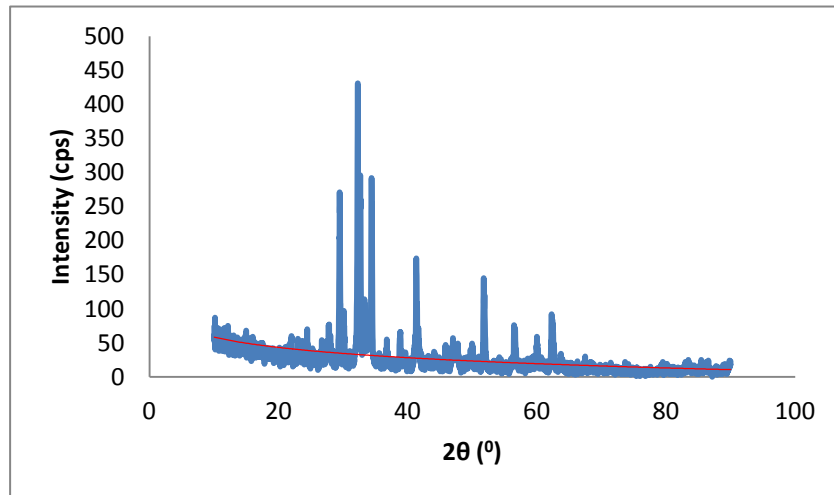
9. Scanning Electron Microscopy (SEM) Test

Pengujian ini menggunakan sampel berupa bagian beton B-NC₀ dan B-NC₂₀ dengan perbesaran 2.500 kali dan 7.500 kali.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Bulir Kristal Semen dengan alat XRD

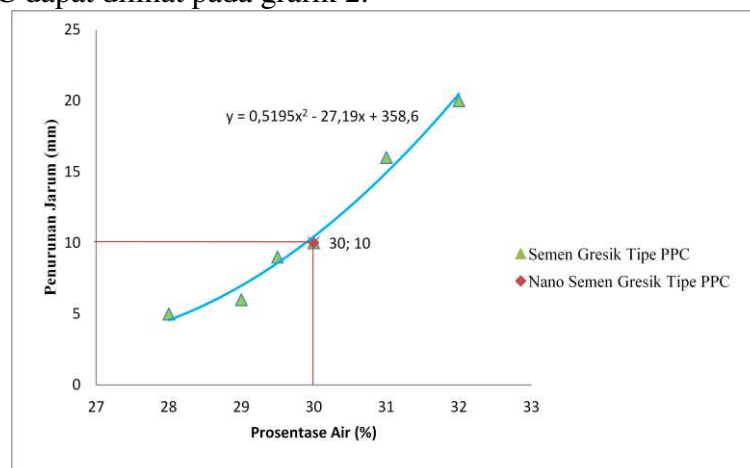
Grafik dari hasil analisa XRD dapat dilihat pada grafik 1. Dari data puncak-puncak polikristal pada grafik tersebut dapat digunakan untuk menentukan ukuran bulir kristal dari semen dengan menggunakan persamaan Scherrer, sehingga didapat rerata ukuran bulir kristal adalah 48,3838 nm (nanometer). Syarat dari suatu material dapat dikatakan material ukuran nano adalah 0 – 100 nm, sehingga material semen yang digunakan pada penelitian ini sudah dapat dikategorikan sebagai material nano.



Grafik 1 Hasil Analisa Nano Semen dengan Uji XRD

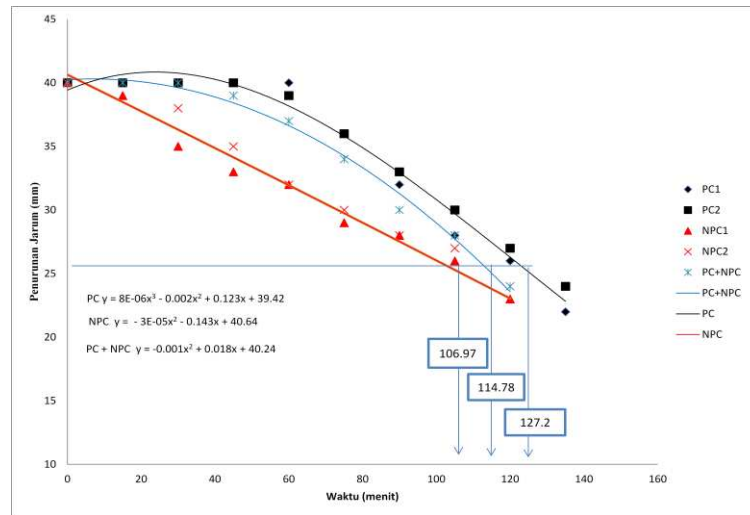
Analisa Konsistensi Normal dan Waktu Ikat Awal Semen

Portland Cement dan *Nano Portland Cement* memiliki nilai konsistensi air yang sama sehingga jumlah air yang dibutuhkan keduanya sama untuk melakukan proses hidrasi. Ini disebabkan karena di satu sisi *NC* mengisi celah pori disekitar struktur partikel semen, sehingga air bebas yang mengisi celah pori tersebut terdesak keluar oleh *NC*. Disisi lain, area permukaan *NC* yang lebih luas membutuhkan lebih banyak air, sehingga air bebas tersebut dapat diserap kembali. Akibatnya, *NC* tidak berpengaruh terhadap konsistensi normal semen. Hasil analisa konsistensi normal Semen Gresik Tipe PPC dan Nano Semen Gresik Tipe PPC dapat dilihat pada grafik 2.



Grafik2 Analisa Konsistensi Normal Semen

Nano Semen Gresik Tipe PPC memiliki waktu ikat awal yang lebih cepat dari Semen Gresik Tipe PPC dikarenakan ukuran butir yang dimiliki Nano Semen Gresik Tipe PPC lebih halus yaitu rata-rata ukuran butirnya adalah 48,38 nm. Semakin halus butir semen, proses hidrasinya semakin cepat. Hal ini disebabkan karena partikel dengan ukuran yang semakin halus memiliki total luas permukaan yang semakin besar. Bertambah luas permukaan menyebabkan terjadinya kontak antara air dengan permukaan butiran menjadi lebih besar. Akibatnya terjadi reaksi antara air dengan butiran juga menjadi lebih besar atau dengan kata lain kecepatan reaksi bertambah. Hasil analisa waktu ikat semen dapat dilihat pada grafik 3.



Grafik 3 Analisa Waktu Ikat Awal Semen

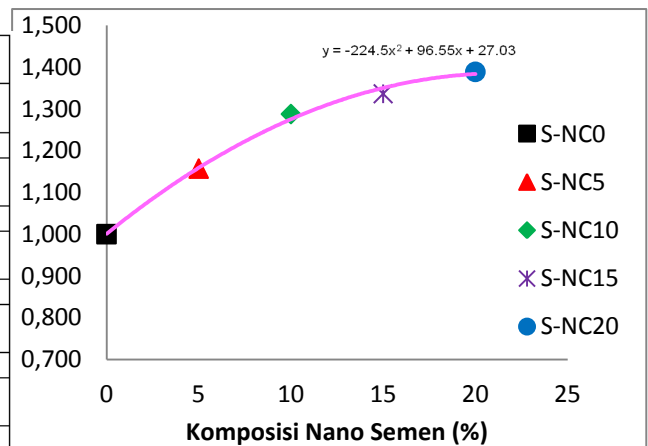
Kuat Tekan Beton

- Analisis Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian didapatkan besar beban tekan yang dapat ditahan oleh masing-masing benda uji, selanjutnya dari beban maksimal yang terjadi dapat dihitung besar kuat tekan masing-masing benda uji yaitu dengan membagi beban maksimal dengan besar luas permukaan benda uji yang tertekan (7850 mm^2). Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 2 dan grafik 4.

Tabel 2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Kadar NC	No Sampel	Luas (mm ²)	Berat (gram)	Beban	Kuat Tekan
				(N)	(Mpa)
0%	1	7850	3750	204800	26,09
	2	7850	3780	219200	27,92
	Rata - rata	7850	3765	212000	27,01
5%	1	7850	3800	247680	31,55
	2	7850	3850	242880	30,94
	Rata - rata	7850	3825	245280	31,25
10%	1	7850	3870	268480	34,20
	2	7850	3850	277450	35,34
	Rata - rata	7850	3860	272965	34,77
15%	1	7850	3810	285040	36,31
	2	7850	3820	281440	35,85
	Rata - rata	7850	3815	283240	36,08
20%	1	7850	3810	291160	37,09
	2	7850	3790	297600	37,91
	Rata - rata	7850	3800	294380	37,50

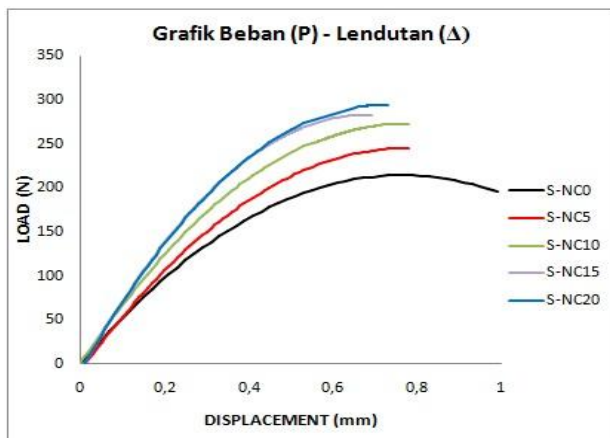


Grafik 4 Hasil Pengujian Kuat Tekan

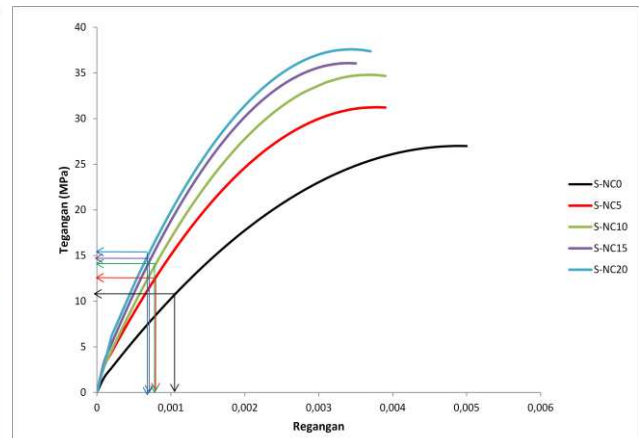
Grafik hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa penambahan komposisi nano semen pada beton akan meningkatkan kuat tekan. Semakin tinggi komposisi nano semen yang ditambahkan pada campuran beton menghasilkan kuat tekan yang semakin tinggi pula. Dengan penambahan komposisi nano semen hingga 20% ternyata belum mencapai titik optimum, sehingga belum didapatkan komposisi penambahan nano semen yang tepat agar kuat tekannya maksimum.

- **Tegangan Regangan**

Setelah data berupa *load* dan *displacement* yang didapat dari pegujian diolah, maka didapatkan grafik tegangan regangan untuk masing-masing benda uji. Grafik tersebut menggambarkan regangan yang terjadi pada saat beban maksimum (*P ultimate*).



Grafik 5 Hubungan Beban (P) dan Lendutan (Δ) Silinder NC



Grafik 6 Hubungan Tegangan (σ) dan Regangan (ϵ) Silinder NC (garis lurus menunjukkan batas elastis)

Tabel 3 Batas Elastisitas Benda Uji Silinder

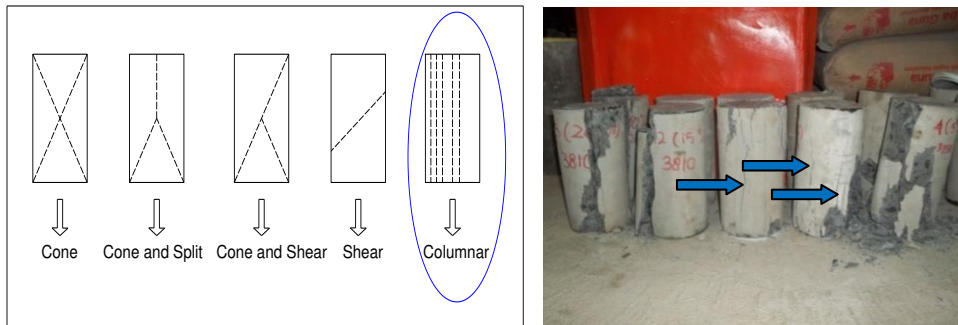
Parameter	S-NC0	S-NC5	S-NC10	S-NC15	S-NC20
f_c maks (MPa)	27,01	31,25	34,77	36,08	37,50
ϵ maks	0,00490	0,00378	0,00378	0,00340	0,00360
f_c 40% (MPa)	10,80255	12,49834	13,90904	14,43261	15,00025
ϵ 40%	0,00105	0,00079	0,00081	0,00072	0,00070
E (Mpa)	10282,755	15890,583	17175,689	20098,051	21487,258

Dari Grafik 5 dan Grafik 6, dapat dilihat bahwa komposisi nano semen yang memberikan kontribusi kuat tekan paling besar terhadap beton konvensional (S-NC₀) adalah penambahan komposisi nano semen dengan proporsi 20%. Jika diurutkan berdasarkan kuat tekan terendah sampai tertinggi yaitu S-NC₀ < S-NC₅ < S-NC₁₀ < S-NC₁₅ < S-NC₂₀.

Pendekatan *Initial Tangent* digunakan untuk menentukan batas elastisitas, maka didapat batas elastis berada pada posisi 40% dari tegangan puncak (σ 40%) dari setiap komposisi. Posisi regangan (ϵ 40%) dan tegangan (σ 40%) yang menunjukkan batas elastis ditunjukkan pada grafik 6 dan tabel 3. Terjadi peningkatan nilai modulus elastisitas seiring dengan penambahan komposisi nano semen. Jika diurutkan berdasarkan nilai modulus elastisitas terendah sampai tertinggi yaitu S-NC₀ < S-NC₅ < S-NC₁₀ < S-NC₁₅ < S-NC₂₀.

- **Pola Retak**

Pada saat pengujian dapat diamati pola retak yang terjadi pada masing-masing benda uji. Pola retak yang terjadi pada benda uji yaitu jenis pola retak *columnar*. Pola retak beton dan benda uji pasca pengujian dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4 Pola Retak Beton dan Kondisi Silinder Pasca Pengujian

Lentur Murni (*Flexural Test*)

- **Analisis Hasil Pengujian**

Dari hasil *flexural test* diperoleh hampir semua balok beton mengalami patah tepat atau mendekati bagian tengah, seperti yang terlihat pada gambar 5.



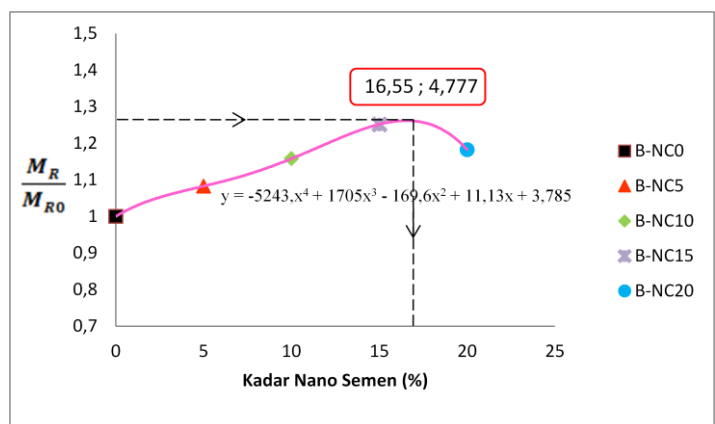
Karena retakan yang terjadi di permukaan balok bagian tarik atau bawah tepat berada pada daerah tengah bentang, maka *modulus of rupture* dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$M_R = \frac{P \times L}{b \times d^2} \quad \dots (1)$$

Gambar 5 Kondisi Balok Beton Pasca *Flexural Tes*

Tabel 4 Hasil Pengujian *Flexural Test* Balok Nano Semen (NC)

Kadar NC	No Sampel	Max Force (N)	M _R (Mpa)
0%	1	28171,8	3,756
	2	28604,7	3,814
	Rata - rata	28388,25	3,785
5%	1	30902,4	4,120
	2	30569,4	4,076
	Rata - rata	30735,9	4,098
10%	1	31335,3	4,178
	2	34398,9	4,587
	Rata - rata	32867,1	4,3825
15%	1	35298	4,706
	2	35764,2	4,769
	Rata - rata	35531,1	4,7375
20%	1	33899,4	4,520
	2	33233,4	4,431
	Rata - rata	33566,4	4,4755

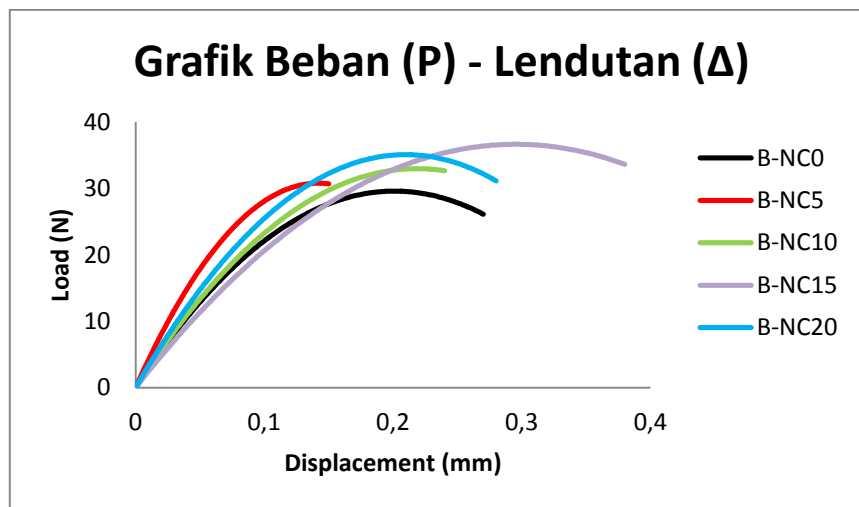


Grafik 7 Hasil Pengujian *Flexural Test*

Dari grafik terlihat bahwa dengan penambahan nano semen maka terjadi peningkatan kuat tarik pada beton. Jika dilihat lebih detail, campuran beton dengan kadar *NC* 15% menghasilkan kuat tarik yang paling tinggi dibandingkan dengan kadar *NC* yang lain. Dari grafik ditunjukkan pula bahwa penambahan kadar *NC* akan meningkatkan kuat tarik hingga mencapai kadar yang optimum, dan setelah itu mengalami penurunan nilai kuat tarik. Nilai M_R optimum yaitu 4,777 Mpa yang diperoleh pada penambahan kadar *NC* 16.55%.

- **Beban (P) – Lendutan (Δ)**

Dari *load cell* dan LVDT, data yang terekam oleh *data logger* berupa beban P dan lendutan.



Grafik 8 Hubungan Beban (P) – Lendutan (Δ) Balok *NC*

Dari Grafik 8, dapat dilihat bahwa komposisi nano semen yang memberikan kontribusi kuat tarik lentur paling besar terhadap beton konvensional ($B-NC_0$) adalah penambahan komposisi nano semen dengan proporsi 15%. Beban (P) dan *modulus of rupture* (M_R) maksimum yang diberikan oleh penambahan nano semen 15% adalah 35,5311 kN dan 4,7375 MPa. Jika diurutkan berdasarkan kuat tarik lentur terendah sampai tertinggi yaitu $S-NC_0 < S-NC_5 < S-NC_{10} < S-NC_{20} < S-NC_{15}$.

Korelasi *Modulus of Rupture*

Nilai korelasi *modulus of rupture* terhadap kuat tekan beton dapat dilihat pada tabel 5 dan tabel 6 yang dihitung dengan rumus :

$$f_r \text{ (N/mm}^2\text{)} = K \times \sqrt{f'_c \text{ (N/mm}^2\text{)}} \quad \dots(2)$$

Tabel 5 Tabel Nilai K pada Beton Murni

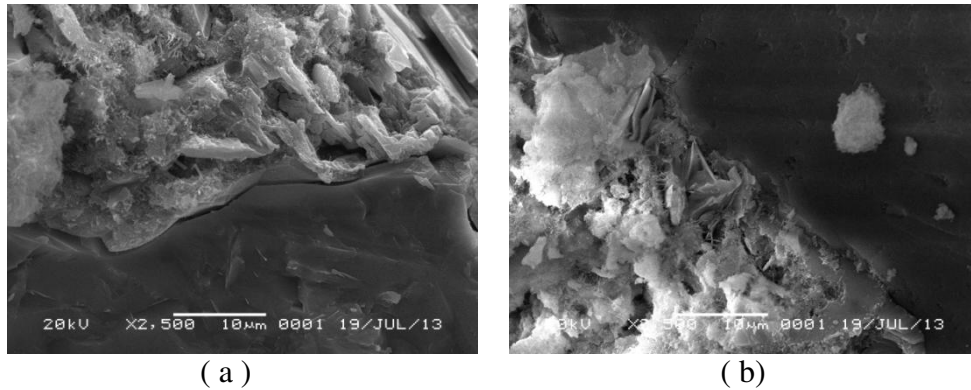
Sumber	Nilai K Beton Murni
ACI - 89	0,623
Aryanto (2009)	0,707
Pedoman XX-2002-Bina Marga	0,75
Hasil Pengujian	0,73

Tabel 6 Tabel Korelasi *Modulus of Rupture* Beton

	NC_0	NC_5	NC_{10}	NC_{15}	NC_{20}
Beban P (KN)	28388,25	30735,9	32867,1	35531,1	33566,4
M_R (Mpa)	3,785	4,098	4,3825	4,7375	4,755
f'_c (Mpa)	27,01	31,25	34,77	36,08	37,5
K	0,73	0,73	0,74	0,79	0,78

Dari tabel 5 diperoleh nilai K yang berbeda-beda pada beberapa sumber, namun tidak berbeda jauh antara satu dengan yang lain. Dari tabel 4.8 dapat kita lihat bahwa perbandingan *modulus of rupture* dan kuat tekan dari hasil penelitian berkisar antara 12 – 14 %. Penambahan komposisi nano semen pada beton tidak berpengaruh terhadap nilai korelasi antara kuat tarik lentur dengan kuat tekannya. Nilai korelasi kuat tarik lentur dan kuat tekan beton untuk beton nano semen menunjukkan nilai yang hampir sama dengan beton murni.

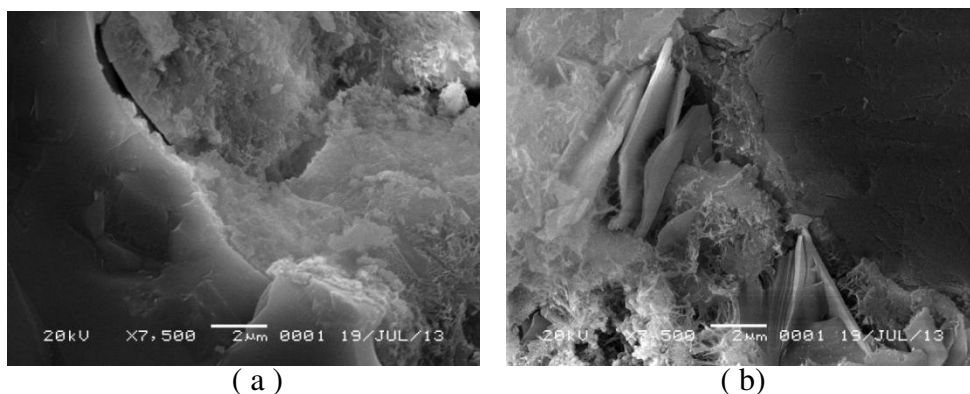
Scanning Electron Microscope (SEM)



(a)
 (b)
 Gambar 6 Hasil Uji SEM (a) Beton NC_0 (b) Beton NC_{20}
 (Perbesaran 2500 kali)

Dari gambar hasil pengujian SEM dapat dilihat bahwa ikatan antar agregat dengan pasta semen untuk beton NC menunjukkan ikatan yang lebih baik dibandingkan dengan beton tanpa penambahan NC, bisa dilihat dengan tidak adanya celah ataupun rongga pada beton NC_{20} dalam gambar 6.

Penurunan nilai kuat tarik lentur yang lebih awal dibandingkan dengan kuat tekan dapat disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya karena lemahnya agregat dan karena adanya interfasia yang mempunyai struktur kristal serta porositas yang berbeda dengan mortar yang terletak lebih jauh dari agregat Posisi kristal yang sejajar arah pembebanan menyebabkan lebih mudah terlepas ikatan agregat dengan pasta semen sehingga sangat mendukung terjadinya kehancuran akibat tarik. Daerah interfasia pada beton NC_0 ini sangat tipis, dengan ketebalan hanya sekitar 20 μm . Pengamatan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) menunjukkan keadaan fisik daerah interfasia berikut kristal – kristal hidrasi semen yang terbentuk seperti pada gambar 7 berikut.



(a)
 (b)
 Gambar 7 Hasil Uji SEM (a) Beton NC_0 (b) Beton NC_{20}
 (Perbesaran 7500 kali)

KESIMPULAN

1. Nano semen tidak berpengaruh terhadap konsistensi normal semen, tetapi dapat mempercepat waktu ikat awal semen.
2. Dengan penggunaan material nano semen pada beton dapat memberikan penambahan nilai kuat tekan beton.
3. Dengan penambahan komposisi nano semen hingga 20% ternyata belum mencapai titik optimum, sehingga belum didapatkan komposisi penambahan nano semen yang tepat agar kuat tekannya maksimum. Penambahan komposisi nano semen 20% menghasilkan intensitas peningkatan kuat tekan sebesar 39% dibandingkan dengan beton normal. Sedangkan untuk kadar nilai nano semen yang dapat memberikan kuat tarik lentur paling optimum didapat pada angka 16,55% dengan nilai intensitas peningkatan kuat tarik lentur sebesar 26% dibandingkan dengan beton normal.
4. Nilai *modulus of rupture* yang dihitung berdasarkan kuat tekannya dimana nilai *modulus of rupture* adalah hasil kali suatu konstanta dengan akar kuat tekannya, ternyata sudah tidak relevan lagi untuk digunakan.
5. Dari grafik tegangan-regangan, beton dengan penambahan material nano semen dihasilkan nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton normal.
6. Pola retak untuk semua benda uji adalah sama yaitu *columnar*, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan material nano semen terhadap beton tidak memberikan pengaruh terhadap pola retak.

SARAN

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pola kenaikan kuat tekan beton nano semen.
2. Nilai kuat tarik dalam penelitian ini dilakukan dengan metode *flexural test*. Disarankan untuk menggunakan metode *splitting test* dalam menentukan nilai kuat tarik beton nano.
3. Penurunan kuat tarik lentur pada beton dengan penambahan komposisi nano semen 20% dimungkinkan karena *ettringite* pada nano semen ditransformasikan menjadi *monosulfate* yang menyebabkan *internal stress* pada pasta semen, sehingga menyebabkan kehilangan kekuatan bila komposisi *NC* terlalu banyak. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian untuk menyelidiki kebenarannya.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan rumus korelasi nilai modulus elastisitas (E) dan nilai *modulus of rupture* (M_R) sebagai fungsi kuat tekan (f'_c).
5. Pengujian SEM dilakukan pada benda uji sebelum pengujian kuat tekan dan kuat tarik dengan perbesaran yang sama.
6. Perlu dikaji dari segi ekonomis antara beton dengan penggunaan nano semen dengan beton normal, berkaitan dengan pembuatan material nano semen.
7. Penelitian yang terkait dengan material nano semen sebaiknya digunakan semen tipe OPC dengan benda uji berupa mortar.
8. Perlu dilakukan pengukuran suhu panas hidrasi terhadap material *Portland Cement* dan *Nano Portland Cement*.
9. Mengoptimalkan penggunaan alat PBM dengan cara memperlama waktu gerusnya sehingga didapat material nano semen yang memiliki ukuran yang lebih kecil dan seragam untuk menambah kuat tekan dan kuat tarik beton yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Arteaga, J.C., Chimal, O.A., Yee, H.T., and Torre, S.D., 2013, *The Usage Of Ultra-Fine Cement As An Admixture To Increase The Compressive Strength Of Portland Cement Mortars*, ACI Materials Journal, 42: 152-160.
- ASTM-C-78 *Test Method for Flexural Strength*
ASTM-C-39 *Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*
ASTM-C-33-03, 2002, *Standart Spesifikasi for Concrete Agregates*, Annual Books of ASTM Standards, USA
- Aryanto, Daniel, 2009, *Pengaruh Additive Terhadap Korelasi Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton*, M.T. Tesis, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Goldstein, J.I., 1992, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, a Textbook for Biologist, Material Scientist, and Geologist, Plenum Press, New York.
- Han Ay Lie, 2013, *Permodelan Propererti Kekakuan Interfasia antara Agregat Kasar dan Mortar pada Beton*, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Harianto, 2009, *Mungkinkah Beton Sekuat Baja?*, Universitas Pelita Harapan, Kalimantan Selatan.
- Kardiyono Tjokrodimulyo, 1996, *Teknologi Beton*, PT. Nafiri, Yogyakarta.
- Kett, Irving, 2000, *Engineering Concrete : Mix Design and Test Methods*. CRC Press, Washington, D.C.
- Mahardika, Aridite S., 2007, *Pengaruh Kehalusan Butiran terhadap Kuat Tekan Semen Gresik*. Universitas Negeri Malang, Malang.
- Liu, X., Chen, L., Liu, A., and Wang, X., 2012, *Effect of Nano-CaCO₃ on Properties of Cement Paste*, ACI Materials Journal, 16: 991-996.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., and Ou, J., 2004, *Microstructure of cement mortar with nanoparticles*, ACI Materials Journal, 35: 185-189.
- Mindess, Sidney at all. 2002. *Concrete : Second Edition*, Pearson Education Limited Harlow, England.
- Neville, A.M., 2002, *Propertis of Concrete_: Fourth Edition*, Pearson Education Limited Harlow, Edinburg, England.
- Rompas, G.P., Pangouw, J.D., Pandaleke, R., and Mangare, J.B., 2013 , *Pengaruh Pemanfaatan Abu Ampas Tebu sebagai Subsitusi Semen dalam Campuran Beton Ditinjau terhadap Kuat Tarik Lentur dan Modulus Elastisitas*, Jurnal Sipil Statik, Vol. 1, no 2, pp. 82-89
- Sanchez, F. and Sobolev, K., 2010, *Nanotechnology in Concrete – A Review*, In : Department of Civil and Environmental Engineering, Vanderbilt University, USA.
- Shekari, A. H. and Razzaghi M. S., 2011, *Influence of Nano Particles on Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete*, In : Islamic Azad University, Qazvin Branch (QIAU), CCRC Research Center.
- SK SNI S – 04 -1989 F. *Spesifikasi Agregat sebagai Bahan Bangunan*.
- SK SNI T– 15 -1990. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*.
- Susanto, Heri, 2010, *Teknologi Lapis Tipis (PAF 393)*, Lembaga Pengembangan dan Penjaminan Mutu Pendidikan Universitas Diponegoro, Semarang.
- Thadani, B.N., 1987, *Reinforced Concrete Design with Canadian Code* : Faculty of Engineering , Universit y of Manitoba. Cantext Publications. Winnipeg, Canada.
-, 2002, *Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*, Pedoman XX-2002 Bina Marga, Jakarta.
-, 1971, *Pedoman Beton Indonesia NI-2*, Badan penelitian dan pengembangan PU, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.