

**STUDI PENGARUH PENGGUNAAN NANO KALSIMUM
KARBONAT SEBAGAI ADITIF TERHADAP SIFAT
FISIK SEMEN PEMBORAN KELAS G**

TUGAS AKHIR

Diajukan guna melengkapi syarat dalam mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh
M SAHIDDIN
NPM 153210108



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN
UNIVERSITAS ISLAM RIAU
PEKANBARU**

2021

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini disusun oleh

Nama : M. Sahiddin
NPM : 153210108
Program Studi : Teknik Perminyakan
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Penggunaan Nano Kalsium Karbonat Terhadap Sifat Fisik Semen Pemboran Kelas G

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Mursyidah, M.Sc.

()

Penguji I : M. Khairul Afdhol, S.T., M.T.

()

Penguji II : Novia Rita, S.T., M.T.

()

Ditetapkan di : Pekanbaru

Tanggal : 7 Mei 2021

Disahkan oleh:

**KETUA PROGRAM STUDI
TEKNIK PERMINYAKAN**



Novia Rita, S.T., M.T

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir ini merupakan karya saya sendiri dan semua sumber yang tercantum didalamnya baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar sesuai ketentuan. Jika terdapat unsur penipuan atau pemalsuan data maka saya bersedia dicabut gelar yang telah saya peroleh.

Pekanbaru, 29 April 2021

M. SAHIDDIN
NPM 153210108



KATA PENGANTAR

Rasa syukur disampaikan kepada Allah Subhana Wa Ta'ala karena atas Rahmat dan limpahan ilmu dari-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik Program Studi Teknik Perminyakan Universitas Islam Riau.

Saya menyadari bahwa banyak pihak yang telah membantu dan mendorong saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini serta memperoleh ilmu pengetahuan selama perkuliahan. Tanpa bantuan dari mereka tentu akan sulit rasanya untuk mendapatkan gelar sarjana Teknik ini. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Mursyidah, M.Sc, selaku dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan masukan dan arahan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Ibu Novia Rita, S.T., M.T dan Bapak Tomi Erfando, S.T., M.T selaku ketua dan sekretaris Prodi Teknik Perminyakan serta dosen-dosen yang sangat banyak membantu terkait perkuliahan, ilmu pengetahuan, hingga hal lain yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
3. Kedua orang tua saya dan saudara saya yang selalu memberikan semangat dan doa, bantuan moril dan materil sehingga terselesaikannya tugas akhir ini.
4. Idham Khalid, ST., MT selaku Kepala Laboratorium Pemboran Teknik Perminyakan Universitas Islam Riau yang telah memberi izin penggunaan fasilitas labor sehingga pengujian ini dapat terselesaikan.
5. Teman-teman End Class dan Teknik Perminyakan UIR angkatan 2015 yang telah memberikan semangat kepada saya.

Teriring doa saya semoga Allah memberikan balasan atas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GRAFIK	ix
DAFTAR SINGKATAN.....	x
DAFTAR SIMBOL	xi
ABSTRAK	xii
ABSTRACT	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 <i>State Of The Art</i>	4
2.2 <i>Filtration loss</i>	6
2.3 <i>Free water</i>	6
2.4 <i>Compressive Strength dan Shear Strength</i>	6
2.5 Nano CaCO ₃ (<i>Calcium Carbonate</i>)	7
BAB III METODELOGI PENELITIAN.....	8
3.1 Diagram Alir Penelitian	8
3.2 Bahan dan Peralatan.....	9
3.3.1 Bahan	9
3.3.2 Peralatan	10
3.4 Prodesur Pengujian Suspensi Semen	11
3.4.1 Prosedur Pengujian <i>Filtration Loss</i>	11
3.4.2 Prosedur Pengujian <i>Free Water</i>	12

3.4.3 Prosedur Pengujian CS dan SBS	13
3.5 Tempat Penelitian.....	13
3.6 Jadwal Penelitian.....	14
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	15
4.1 Karakterisasi Nano CaCO_3 Menggunakan <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) Dan <i>Energy Dispersive X-Ray/Spectroscopy</i> (EDS).....	15
4.2 Pengaruh Variasi Konsentrasi Nano CaCO_3 Terhadap <i>Filtration Loss</i>	19
4.3 Pengaruh Variasi Konsentrasi Nano CaCO_3 Terhadap <i>Free Water</i>	22
4.4 Pengaruh Variasi Konsentrasi Nano CaCO_3 Terhadap <i>Compressive Strength</i> dan <i>Shear Bond Strength</i>	25
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	29
5.1 Kesimpulan	29
5.2 Saran.....	29
DAFTAR PUSTAKA	30
LAMPIRAN.....	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	8
Gambar 3.2 KCl (<i>Potassium Chloride</i>)	9
Gambar 3.3 Nanopowder CaCO ₃	10
Gambar 3.4 <i>Constant Speed Mixer</i>	10
Gambar 3.5 <i>Water Bath</i>	10
Gambar 3.6 LPLT <i>Filter Press</i>	11
Gambar 3.7 <i>Hydraulic Press</i>	11
Gambar 3.8 Cetakan Sampel	11
Gambar 3.9 <i>Stopwatch</i>	11
Gambar 3.10 Gelas Ukur 10 ml	11
Gambar 4.1 Gambar SEM nano CaCO ₃ dengan pembesaran 10,000 kali	15
Gambar 4.2 Hasil pengolahan gambar SEM menggunakan Image-J melalui proses <i>Thresholding</i>	16
Gambar 4.3 Hasil analisa luas area partikel menggunakan fitur <i>Analyze</i> <i>Particles</i>	17
Gambar 4.4 Hasil <i>Summary</i> dari <i>Analyze Particles</i>	17

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Sifat Fisik Nanopowder CaCO_3	10
Tabel 3.2 Jadwal Kegiatan.....	14
Tabel 4.1 Karakterisasi elemen nano CaCO_3 hasil pengujian EDS	18
Tabel 4.2 Hasil perhitungan <i>filtration loss</i> pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	19
Tabel 4.3 Hasil perhitungan untuk menentukan F30 (volume filtrat pada waktu 30 menit) pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	21
Tabel 4.4 Hasil pengujian <i>free water</i> pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	22
Tabel 4.5 Hasil pengujian <i>free water</i> pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	23
Tabel 4.6 Hasil pengujian <i>compressive strength</i> dan <i>shear bond strength</i> pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	25
Tabel 4.7 Hasil pengujian <i>compressive strength</i> dan <i>shear bond strength</i> pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	27

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Hasil analisa EDS	18
Grafik 4.2 Hasil perhitungan dari pengaruh penambahan variasi nano CaCO_3 pada semen kelas G sebagai semen dasar terhadap <i>filtration loss</i>	19
Grafik 4.3 Hasil perhitungan F30 (volume filtrat pada waktu 30 menit) pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	21
Grafik 4.4 Hasil pengujian <i>free water</i> pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	22
Grafik 4.5 Hasil pengujian <i>free water</i> pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	24
Grafik 4.6 Hasil pengujian (a) <i>compressive strength</i> dan (b) <i>shear bond strength</i> pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	25
Grafik 4.7 Hasil pengujian (a) <i>compressive strength</i> dan (b) <i>shear bond strength</i> pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3	27

DAFTAR SINGKATAN

API	<i>American Petroleum Institute</i>
BWOW	<i>By Weight of Water</i>
BWOC	<i>By Weight of Cement</i>
CS	<i>Compressive Strength</i>
CSH	<i>Calcium Silicate Hydrate</i>
C3S	<i>Tricalcium Silicate</i>
C3A	<i>Tricalcium Aluminate</i>
EDX/S	<i>Energy Dispersive X-Ray/Spectroscopy</i>
gr	<i>Gram</i>
HSR	<i>High Sulfate-Resistant</i>
LPLT	<i>Low Pressure Low Temperature</i>
ml	<i>Mililiter</i>
psi	<i>Pound Square Inch</i>
SBS	<i>Shear Bond Strength</i>
SD	<i>Semen Dasar</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
WCR	<i>Water Cement Ratio</i>

DAFTAR SIMBOL

F30	Filtrat pada 30 menit, ml
Ft	Filtrat pada t menit, ml
T	Waktu pengukuran, menit
%	Persen
°C	Derajat Celcius



**STUDI PENGARUH PENGGUNAAN NANO KALSIUM KARBONAT
SEBAGAI ADITIF TERHADAP SIFAT FISIK SEMEN PEMBORAN
KELAS G**

M. SAHIDDIN

NPM 153210108

ABSTRAK

Penggunaan aditif makro dan mikro pada semen masih banyak menimbulkan masalah seperti terdapatnya mikropori homogen. Peristiwa tersebut dapat menurunkan kualitas semen, menyebabkan terjadinya *fluid loss*, terbentuknya *free water* dan semen menjadi lebih rapuh. Untuk mengisi celah mikropori sekaligus meningkatkan kekuatan semen dibutuhkan aditif yang berskala nano. Nano CaCO_3 digunakan karena memiliki kemampuan bekerja untuk mempercepat pembentukan produk hidrasi yang dapat memperkecil diameter pori dan juga akan membuat semen memiliki struktur yang lebih padat.

Penelitian ini melakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh penambahan nano CaCO_3 dengan variasi konsentrasi 0.1%, 0.3% dan 0.5% bwoc terhadap *filtration loss*, *free water*, *compressive strength* dan *shear strength*. Pengujian dilakukan sesuai dengan prosedur yang mereferensi standar API 10A. Nano CaCO_3 dikarakterisasi menggunakan SEM-EDS untuk melihat morfologi dan kandungan elemennya.

Hasil karakterisasi SEM nano CaCO_3 menunjukkan bahwa partikel nano CaCO_3 memiliki bentuk yang hampir serupa yaitu *spherical*. Hasil EDS menunjukkan bahwa nano CaCO_3 memiliki elemen yang dominan yaitu Karbon (C) 41,05% Mass, Oksigen (O) 45,56% Mass, Kalsium (Ca) 12,42% Mass. Aditif nano CaCO_3 dengan variasi konsentrasi penambahan berpengaruh terhadap nilai *filtration loss*, *free water* CS dan SBS semen pemboran kelas G. Semakin besar penambahan konsentrasi nano CaCO_3 menghasilkan nilai CS dan SBS semakin tinggi, Sementara itu nilai *free water* dan *filtration loss* yang didapatkan akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi aditif nano CaCO_3 . Nilai optimum kuat tekan semen yang diperoleh dari variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 adalah 5168,38 psi untuk *compressive strength* dan 917,129 psi untuk *shear bond strength* dengan konsentrasi yang sama yaitu 0,5% nano CaCO_3 bwoc + 5% KCl bwow. Nilai optimum *filtration loss* yang diperoleh dari variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 adalah 188,08 ml/30 menit dengan konsentrasi nano CaCO_3 sebesar 0,5% bwoc. Nilai optimum *free water* yang diperoleh dari variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 adalah 0,1 ml dengan konsentrasi nano CaCO_3 sebesar 0,5% bwoc.

Kata Kunci : CaCO_3 , Semen, Nanopartikel, *Filtration Loss*, *Free Water*, *Compressive Strength*, *Shear Strength*.

**STUDY OF THE EFFECT OF THE USE OF NANO CALCIUM
CARBONATE AS ADDITIVE TO THE PHYSICAL PROPERTIES
OF CLASS G DRILLING CEMENT**

M. SAHIDDIN

NPM 153210108

ABSTRACT

The use of macro and micro additives in cement still causes many problems, such as the presence of homogeneous micropores. These events can reduce the quality of cement, causing fluid loss, the formation of free water and cement becomes more brittle. To fill in the micropore gaps while increasing the strength of the cement, nanoscale additives are needed. Nano CaCO_3 is used because it has the ability to accelerate reactions to form hydration products that can reduce pore diameter and will also make cement have a denser structure.

This study conducted a test to determine the effect of adding nano CaCO_3 with various concentrations of 0.1%, 0.3% and 0.5% bwoc on filtration loss, free water, compressive strength and shear strength. Tests are carried out in accordance with procedures that reference to API 10A standards. Nano CaCO_3 was characterized using SEM-EDS to see its morphology and elemental content.

The results of SEM nano characterization of CaCO_3 show that CaCO_3 nanoparticles have almost the same shape, namely spherical. EDS results show that nano CaCO_3 has a dominant element, like Carbon (C) 41.05% Mass, Oxygen (O) 45.56% Mass, and Calcium (Ca) 12.42% Mass. Nano CaCO_3 additives with various concentration of addition have an effect on the value of filtration loss, free water CS and SBS for G class drilling cement along with the increase in the concentration of nano CaCO_3 additives. The optimum value of cement compressive strength obtained from various concentration of adding nano CaCO_3 is 5168.38 psi for compressive strength and 917.129 psi for shear bond strength with the same concentration, namely 0.5% nano CaCO_3 bwoc + 5% KCl bwow. The optimum value of filtration loss obtained from the various concentration of the addition of nano CaCO_3 is 188.08 ml/30 minutes with 0.5% of nano CaCO_3 bwoc. The optimum value of free water obtained from the variation in the concentration of the addition of nano CaCO_3 is 0.1 ml with 0.5% of nano CaCO_3 bwoc.

Keywords : CaCO_3 , Semen, Nanopartikel, Filtration Loss, Free Water, Compressive Strength, Shear Strength.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tujuan penting dari proses penyemenan adalah untuk mengisolasi zona formasi agar tidak terjadi komunikasi antar fluida dari zona yang berbeda (Thakkar, Raval, Chandra, Shah, & Sircar, 2019). Adanya mikropori pada semen akan berpotensi merusak ikatan semen dan formasi (Adi Novriansyah, Mursyidah, Ningsih, & Prasetya Utama, 2016). Hal tersebut dapat menyebabkan hilangnya fasa fluida pada semen, isolasi zona yang tidak efektif dan penurunan kualitas semen. Kualitas semen yang buruk akan mempengaruhi ketahanan dan kekuatan semen terhadap tekanan tinggi dan serangan fluida yang bersifat korosif (Atashnezhad, Coryell, & Hareland, 2017; Dawood Salman et al., 2020).

Berbagai jenis aditif telah banyak digunakan untuk meningkatkan performa semen pemboran. Sifat semen yang spesifik seperti *compressive strength*, *thickening time/consistency*, *fluid loss* dan *rheology* terus ditingkatkan selama bertahun-tahun dengan penggunaan aditif pada semen (Ahmed, Ezeakacha, & Salehi, 2018). Saat ini telah dikembangkan material yang berukuran nano untuk diaplikasikan kedalam kegiatan penyemenan sumur bor. Nanoteknologi adalah manipulasi materi dalam sebuah skala atomik, molekuler dan supramolekul (Ganji & Kachapi, 2015). Penelitian terbaru telah menunjukkan bahwa nanomaterial dapat mempercepat hidrasi semen, meningkatkan produk C-S-H (*calcium silicate hydrate*), memperhalus mikropori, sehingga secara signifikan mengurangi permeabilitas semen dan meningkatkan daya tahan semen (X. Wang, 2017). Berdasarkan penelitian (Maagi, Lupyana, & Gu, 2019; Yazdi, Arefi, Mollaahmadi, & Nejand, 2011) kombinasi antara semen portland dan nanopartikel dapat meningkatkan *compressive strength*, ketahanan terhadap korosi dan mengurangi laju *fluid loss*. Nanopartikel saat dicampurkan pada semen bekerja sebagai *filler* dengan menyumbat rongga antar butiran partikel semen dan memperkecil porositas dan permeabilitas suspensi semen. Hal tersebut mencegah terpisahnya fasa cair dari bubur semen yang berpengaruh terhadap pengurangan *fluid loss*. Dikarenakan struktur morfologinya yang berukuran nano, nanopartikel dapat meningkatkan zona kontak antar butiran partikel dan mortar, menghasilkan struktur ikatan yang lebih

padat dan dapat meningkatkan kekuatan semen (Li, Xiao, Yuan, & Ou, 2004; Sabdonoa, Sustiwana, & Fadlillaha, 2014). Kalsium karbonat telah banyak digunakan di berbagai macam industri, termasuk industri semen (Cao, Ming, He, Li, & Shen, 2019). Kalsium karbonat dapat ditemukan pada *limestone*, *marble*, *chalk* atau diproduksi menggunakan teknologi dengan mengkombinasikan kalsium dan CO₂ (Camiletti, Soliman, & Nehdi, 2013). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa nano CaCO₃ memiliki banyak manfaat seperti peningkatan kekuatan semen, efek akselerasi dan ekonomis dibandingkan aditif semen yang lainnya. Kehadiran nano CaCO₃ pada semen akan meningkatkan laju hidrasi dari *tricalcium silicate* (C3A) dan *tricalcium silicate* (C3S) (Supit & Shaikh, 2014).

Penelitian ini akan menggunakan nano CaCO₃ sebagai aditif untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat fisik semen pemboran kelas G. Proses penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Pemboran Teknik Perminyakan Universitas Islam Riau. Parameter yang akan diujikan yaitu variasi konsentrasi nano CaCO₃ terhadap *compressive strength*, *shear bond strength*, *free water* dan *filtration loss* semen pemboran kelas G.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakterisasi partikel nano CaCO₃ menggunakan SEM/EDS
2. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi aditif nanopartikel CaCO₃ (kalsium karbonat) terhadap sifat fisik (*filtration loss*, *free water*, *compressive strength* dan *shear strength*) semen pemboran Kelas G.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai inovasi baru di industri pemboran sumur migas dengan memanfaatkan penggunaan nanopartikel CaCO₃ (kalsium karbonat) sebagai aditif untuk meningkatkan kekuatan semen juga meminimalisir *filtration loss* dan *free water* semen pemboran.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian Tugas Akhir ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian yang tertera, maka penelitian ini hanya melihat pengaruh penambahan nanopartikel CaCO₃ pada semen pemboran kelas G dan tidak

membandingkan dengan aditif lain. Sifat semen yang diuji yaitu *filtration loss*, *free water*, *compressive strength* dan *shear strength* dengan variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 sebesar 0,1%, 0,3% dan 0,5% BWOC.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

”Kamu tidak berada dalam suatu keadaan dan tidak membaca suatu ayat dari Al Quran dan kamu tidak mengerjakan suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu di waktu kamu melakukannya. Tidak luput dari pengetahuan Tuhanmu biarpun sebesar zarrah (atom) di bumi ataupun di langit. Tidak ada yang lebih kecil dan tidak (pula) yang lebih besar dari itu, melainkan (semua tercatat) dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuzh)”. (Q.S. Yunus :61)

2.1 *State Of The Art*

Nano partikel merupakan langkah terbaru yang dapat menghasilkan berbagai peningkatan sifat semen saat ditambahkan ke dalam bubur semen. Seperti meningkatkan kekuatan semen, memperkecil porositas dan permeabilitas semen, mengurangi *fluid loss*, serta meningkatkan ketahanan semen terhadap temperatur tinggi dan dari fluida yang bersifat korosif (Thakkar et al., 2019). Secara umum, yang dapat dikatakan sebagai nanomaterial adalah jika satu buah partikelnya memiliki dimensi lebih kecil dari 100 nm (NSAI Standard, 2017). Dikarenakan besarnya luas permukaan, nanomaterial menampilkan sifat kimia dan fisika yang berbeda dibandingkan dengan material yang berukuran makro atau mikro (Patil & Deshpande, 2012). Penggunaan konsentrasi yang sedikit dan luas permukaan yang besar pada nanomaterial dapat meningkatkan potensi interaksi dan mempercepat reaksi antar partikel dibandingkan dengan makro dan mikromaterial (Amanullah & Al-Tahini, 2009).

Nano partikel CaCO_3 efektif untuk memperkecil diameter pori pada semen *concrete*. Ukuran diameter pori rata-rata berkurang seiring penambahan aditif nano CaCO_3 pada semen. Dalam penelitiannya (Ge, Wang, Sun, Huang, & Hu, 2014) menemukan bahwa penambahan aditif nano CaCO_3 pada semen portland dengan konsentrasi 0.5% dan 1% bwoc menghasilkan kekuatan semen maksimum sebesar 855 psi dan 1015 psi, dengan ukuran diameter pori rata-rata sebesar 12.59 nm dan 12.35 nm. Peningkatan kekuatan semen terjadi karena dua mekanisme, yaitu luas permukaan nano CaCO_3 yang besar sebagai tempat reaksi untuk nukleasi dan

pertumbuhan produk hidrasi. Kedua, nano CaCO_3 menyediakan sumber ion Ca tambahan untuk mengakselerasi proses hidrasi semen.

Nano CaCO_3 melepaskan ion Ca^{2+} dalam jumlah besar untuk bereaksi dengan mineral C3S (*tricalcium silicate*) pada semen. Hal tersebut dapat mempersingkat periode induksi dan mempercepat nukleasi dari (*calcium silicate hydrate*) C-S-H. C-S-H (*calcium silicate hydrate*) gel terbentuk dari proses hidrasi senyawa (*tricalcium silicate*) C3S. yang terdapat pada semen saat kontak dengan air. C-S-H gel dari partikel semen akan mengalami ekspansi dalam volume yang lebih besar menggantikan tempat mineral C3S yang bereaksi secara berkelanjutan, *cement paste* akan mengalami *first set* dan mengeras. Karena volume *cement paste* tidak berubah secara signifikan, meningkatnya volume dari fase solid menyebabkan volume pori kapiler berkurang. Hal tersebut berdampak pada pengurangan permeabilitas yang menyulitkan fasa liquid dan ion terarut pada *cement paste* bergerak melalui sistem pori (Sato & Diallo, 2010).

Pada penelitian (Fu, Xie, Liu, Wei, & Wu, 2020) CaCO_3 nanopartikel yang ditambahkan pada semen portland dengan konsentrasi 0.5% menghasilkan nilai *compressive strength* tertinggi yaitu 23 MPa dibandingkan dengan nano SiO_2 dan CNT (*carbon-nanotube*) dengan kuat tekan berturut-turut sebesar 20 MPa dan 17 MPa. Nilai tersebut lebih tinggi 15% dari nilai yang didapatkan dari penambahan nano SiO_2 dan 35.29% lebih tinggi dibanding CNT pada konsentrasi yang sama. Percepatan hidrasi semen tersebut mengindikasikan bahwa banyaknya CSH gel yang terbentuk karena pengaruh nano CaCO_3 (Liu, Chen, Liu, & Wang, 2011).

Bubur semen dengan kandungan nano- CaCO_3 dapat membantu memodifikasi kekuatan dan mikro struktur pada semen *concrete* dikarenakan kemampuannya mengakselerasi hidrasi semen pada *early ages* (Meng, Yu, & Wang, 2017). Kalsium karbonat nanopartikel saat dikombinasikan dengan semen dapat meningkatkan ketahanan semen tersebut dari *acid attack* dengan penambahan konsentrasi sebesar 3% bwoc. Hal tersebut dikarenakan penambahan CaCO_3 pada semen dapat bertindak sebagai *filler* yang membuat matrik semen menjadi lebih padat. Hasil analisis *micro-morphology* menggunakan SEM (*scanning electron microscope*) menunjukkan bahwa sampel dengan kandungan nano CaCO_3 ditemukan lebih

banyak kandungan C-S-H gel dibandingkan dengan sampel semen yang tanpa nano (Meng, Qiang, Hu, Xu, & Lin, 2017).

2.2 *Filtration loss*

Filtration loss adalah hilangnya fasa cair dari bubur semen ke dalam formasi yang permeable (Fink, 2012). Fasa cair yang masuk ke dalam formasi akan menyisakan fasa padat pada bubur semen dan dapat membentuk *external filtercake*. Sebagian kecil dari fasa padat juga dapat masuk ke dalam pori-pori formasi yang besar, dan membentuk *internal filtercake* (Nelson & Guillot, 2006). Laju *filtration loss* biasanya diukur menggunakan standar API. Jumlah volume filtrat saat pengujian *filtration loss* yang diizinkan dibawah 250 ml/30 menit untuk *primary cementing* dan 55-65 ml/30 menit untuk *squeeze cementing* (Rubiandini, 2001).

2.3 *Free water*

Free water adalah air bebas yang terpisah dari suspensi semen. Air bebas tersebut terbentuk karena pencampuran volume air dan semen mencapai kadar air maksimum (Novrianti & Mursyidah, 2017). Kadar air maksimum adalah jumlah air bebas yang dibolehkan dari suspensi semen sebanyak 250 ml yang didiamkan selama 2 jam pada gelas ukur. Air bebas tersebut tidak boleh lebih dari 3,5 ml, karena bila lebih akan menyebabkan pori-pori suspensi semen membesar dan akan memperbesar permeabilitas semen. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya kontak antara fluida formasi dengan *casing* yang disemen. Apabila fluida formasi berupa air asin akan menyebabkan terjadinya korosi. Dalam hal penyemenan, permeabilitas yang terbentuk diusahakan sekecil mungkin. Karena jika permeabilitas semen besar akan menyebabkan terjadinya kontak fluida antara formasi dengan *annulus*. Bertambahnya permeabilitas semen dapat disebabkan karena air pencampur terlalu banyak, karena kelebihan aditif atau temperatur formasi yang terlalu tinggi (Rubiandini, 2001).

2.4 *Compressive Strength dan Shear Strength*

Compressive Strength (CS) dan *Shear Bond Strength* (SBS) merupakan parameter yang mengindikasikan kekuatan semen untuk menahan tekanan dari reservoir atau beban mekanis karena pekerjaan produksi di sumur (A. Novriansyah, Mursyidah, Novrianti, Putri, & Riswati, 2018). *Compressive strength* adalah

kekuatan semen untuk menahan tekanan dari arah horizontal sedangkan *Shear strength* menahan tekanan dari arah vertikal (Samura, Ainurridha, & Zabidi, 2017). Nilai minimum yang direkomendasikan API untuk CS dan SBS adalah 500 psi dan 100 psi (Novrianti, 2016).

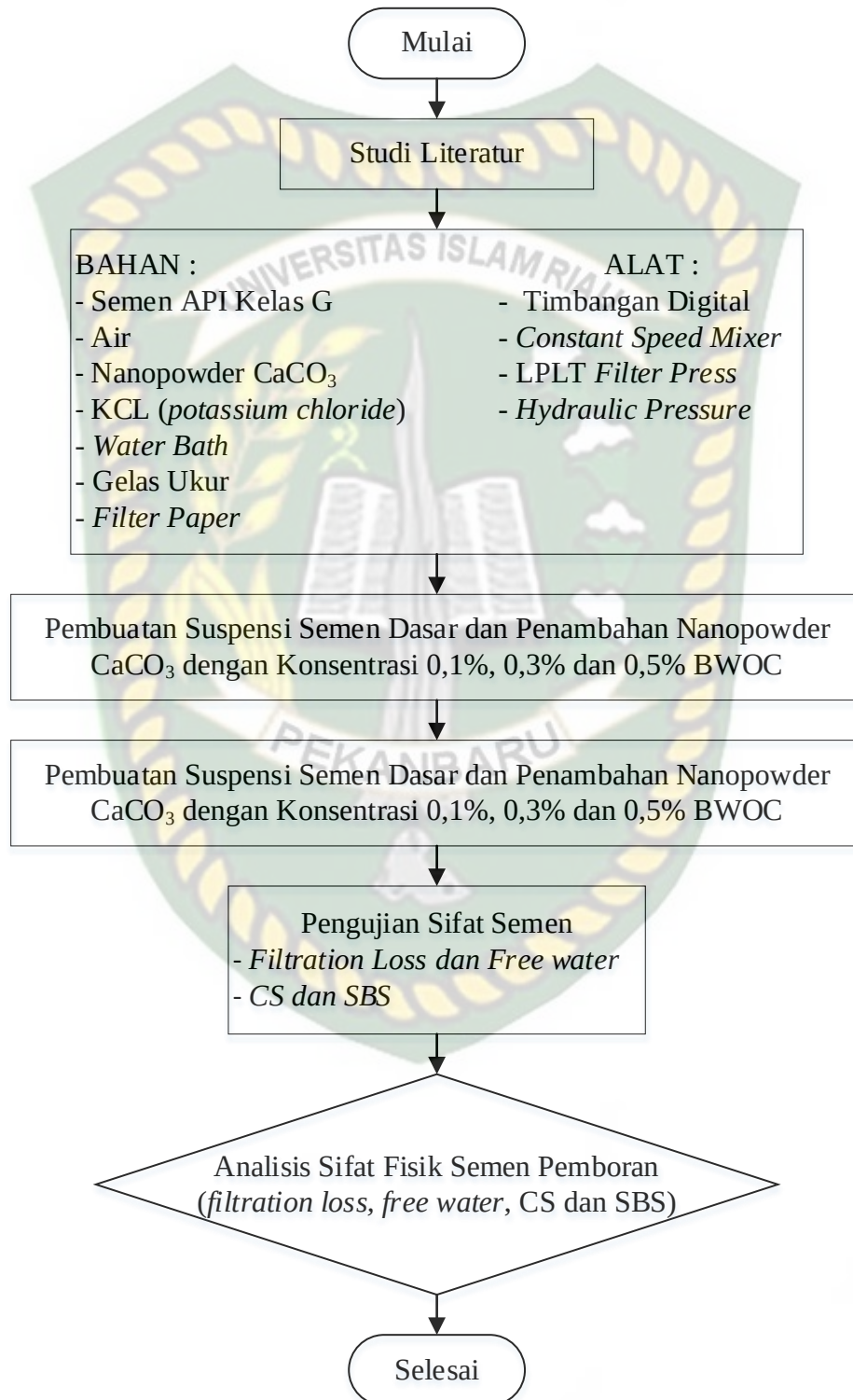
2.5 Nano CaCO_3 (Calcium Carbonate)

CaCO_3 merupakan penyusun batuan *limestone* dalam bentuk mineral kalsit (Budiman & Sukirman, 2018). CaCO_3 telah banyak digunakan sebagai komposit semen dengan berbagai skala ukuran dan dapat mempengaruhi sifat dari komposit semen secara fisika (seperti *filler effect*, *durability*, dan *workability*) dan secara kimia (Shaikh & Supit, 2014). Efek dari ukuran makro (>1 mm), mikro ($1\ \mu\text{m} - 1$ mm) dan nano ($< 1\ \mu\text{m}$) CaCO_3 terhadap proses hidrasi, *workability*, *mechanical properties* dan *durability* telah banyak diteliti. Makro-kalsium karbonat utamanya beraksi sebagai *inert filler* untuk menambah kekuatan semen. Mikro-kalsium karbonat tidak hanya mengisi rongga antara butiran semen, tetapi juga mengakselerasi proses hidrasi, mempengaruhi *workability*, *mechanical properties* dan *durability* melalui *nucleation effect* dan kimiawi. Nano-kalsium karbonat juga memiliki pengaruh secara fisika dan kimia terhadap semen dan efek tersebut bahkan lebih efektif dari mikro-kalsium karbonat karena ukuran partikel yang berskala nano dan luas permukaan yang besar membuat partikel nano lebih mudah bereaksi dengan semen (Cao et al., 2019).

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan

3.3.1 Bahan

1. Semen API Kelas G Produksi PT. Indocement Tunggal Prakarsa Tbk
Semen kelas G ini merupakan semen pemboran yang sesuai dengan Standar API Spec. 10A dengan jenis HSR (*High Sulfate-Resistant*). Semen kelas G ini digunakan dari kedalaman 0 ft (permukaan) sampai 8.000 ft (2.440 m) dengan temperatur 95 °C, merupakan semen dasar. Bila ditambahkan retarder, semen ini bisa dipakai untuk sumur yang dalam dengan range temperatur cukup besar (Nelson & Guillot, 2006).

2. Air

3. KCl (*potassium chloride*)

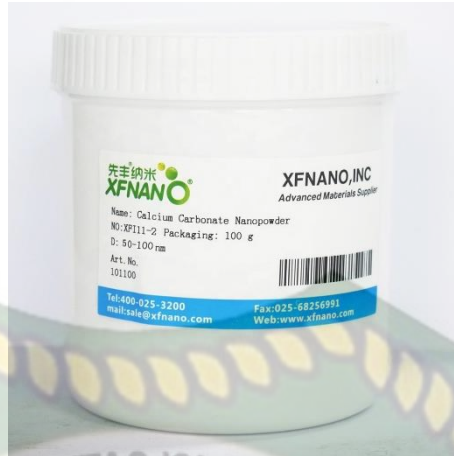
KCL (*potassium chloride*) ditambahkan kedalam suspensi semen pemboran berfungsi sebagai *accelerator*. Konsentrasi penambahan KCl pada umumnya adalah 2%-5% (C. A. A. Rocha, Cordeiro, & Filho, 2012).



Gambar 3. 2 KCL (*potassium chloride*)

4. Nanopowder CaCO_3

Nanopowder CaCO_3 didapatkan dari Jiangsu XFNANO Materials Tech Co., LTD yang berada di Kota Nanjing, Provinsi Jiangsu, China.



Gambar 3.3 Nanopowder CaCO_3

Berikut data yang didapatkan dari supplier terkait sifat fisik nanopowder CaCO_3 .

Tabel 3.1 Sifat Fisik Nanopowder CaCO_3

Nanopowder CaCO_3		
Penampilan	Bentuk	Bubuk
	Warna	Putih
Ukuran Partikel		40-80 nm
<i>Melting Point</i>		850 °C
<i>Purity</i>		95%
<i>Moisture</i>		0.15-0.35%
<i>Spesific Gravity</i>		0.4 g/ml

3.3.2 Peralatan

Berikut ini adalah alat beserta gambar yang dipakai pada penelitian ini.



Gambar 3.4 Constant Speed Mixer



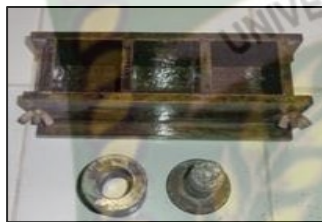
Gambar 3.5 Water Bath



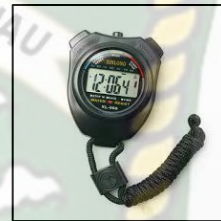
Gambar 3.6 LPLT Filter Press



Gambar 3.7 Hydraulic Press



Gambar 3.8 Cetakan Sampel



Gambar 3.9 Stopwatch



Gambar 3.10 Gelas Ukur 10 ml

3.4 Prodesur Pengujian Suspensi Semen

Prosedur pengujian *filtration loss*, *free water*, *compressive strength* dan *shear bond strength* dilakukan sesuai dengan pedoman dari API RP 10 A dan API RP 10 B-2 (Nelson & Guillot, 2006).

3.4.1 Prosedur Pengujian *Filtration Loss*

Pengujian *filtration loss* sebagai berikut:

1. Membuat suspensi semen dari semen kelas G dengan air dan nano CaCO_3 dengan menggunakan mixer.
2. Mempersiapkan alat *filter press* dan segera pasang *filter paper* serapat mungkin dan letakkan gelas ukur dibawah silinder untuk menampung fluida filtrat.
3. Menuangkan campuran semen dan nano CaCO_3 kedalam silinder dan segera tutup rapat.
4. Kemudian alirkan udara N_2 dengan tekanan 1000 psi.
5. Mencatat volume filtrat sebagai fungsi dari waktu dengan stop watch. Dengan catatan waktu akhir saat filtrat tidak menetes lagi kedalam gelas ukur.

Jika semua filtrat pada setiap sampel telah melewati screen sebelum 30 menit, maka digunakan perhitungan untuk mencari F_{30} (volume filtrat pada waktu 30 menit) menggunakan rumus :

$$F_{30} = F_t \times \frac{5.477}{\sqrt{t}}$$

dimana F_t adalah volume filtrat (ml) pada waktu t (menit).

6. Menghentikan penekanan udara atau gas N_2 , buang tekanan udara dalam silinder (*bleed off*) dan sisa suspensi semen dalam silinder dituangkan kembali kedalam *breaker*.

3.4.2 Prosedur Pengujian *Free Water*

Pengujian *free water* dilakukan dilaboraturium dalam penelitian ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Membuat suspensi semen dari semen kelas G dengan air dan nano CaCO_3 dengan menggunakan mixer.
2. Menggunakan tabung ukur, kemudian mengisi tabung tersebut dengan suspensi semen yang akan diukur kadar airnya.
3. Mendinginkan selama 2 jam sehingga terjadi air bebas pada bagian atas tabung, catat harga *free water* yang terbentuk.
4. *Free water* yang terjadi tidak boleh lebih dari 3,5 ml.

$$\% \text{ Free Water} = \frac{\text{Vol. Free Water}}{\text{Vol. Suspensi Semen}} \times 100 \%$$

3.4.3 Prosedur Pengujian CS dan SBS

Pengujian CS dan SBS dilakukan dalam penelitian ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pengujian *compressive strength* dan *shear bond strength* menggunakan alat *hydraulic press*.
2. Mengoleskan *grease* pada cetakan kubik untuk *compressive strength*, sedangkan pada cetakan silinder untuk *shear bond strength* tidak perlu diolesi dengan *grease*.
3. Menuangkan suspensi semen yang telah dibuat kedalam cetakan kubik dan cetakan silinder yang kemudian akan digunakan untuk pengujian *shear bond strength* dan *compressive strength*.
4. Menutup cetakan sampel dengan aluminium foil dan kemudian dengan plastik transparan hingga rapat lalu merendamnya kedalam *waterbath* yang sebelumnya telah dipanaskan sesuai dengan suhu yang diinginkan.
5. Diamkan cetakan sampel selama 8 jam, setelah 8 jam sampel diangkat dari *waterbath* kemudian buka sampel dari cetakan kubik.
6. Ukur kekuatan sampel kubik untuk *compressive strength* dan sampel silinder untuk *shear bond strength* dengan alat *hydraulic press*.
7. Catat hasil pengujian untuk dan *shear bond strength* dan *compressive strength*.

3.5 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Pemboran Fakultas Teknik Universitas Islam Riau selama 6 Bulan.

3.6 Jadwal Penelitian

Tabel 3.2 Jadwal Kegiatan

Kegiatan	2020				2021			
	Juli	Agust	Sept	Des	Jan	Feb	Maret	April
Studi Literatur								
Penyusunan Proposa;								
Seminar Proposal								
Pembuatan Suspensi Semen								
Pengujian Sifat Fisik Semen								
Analisis Data								
Penyusunan Laporan Hasil								
Sidang Tugas Akhir								

Catatan : Lamanya penyelesaian Tugas Akhir ini disebabkan oleh tertundanya penelitian karena pandemi covid-19 yang mengakibatkan ditiadakannya aktivitas kampus selama beberapa waktu.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Nano CaCO_3 Menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) Dan *Energy Dispersive X-Ray/Spectroscopy* (EDS)

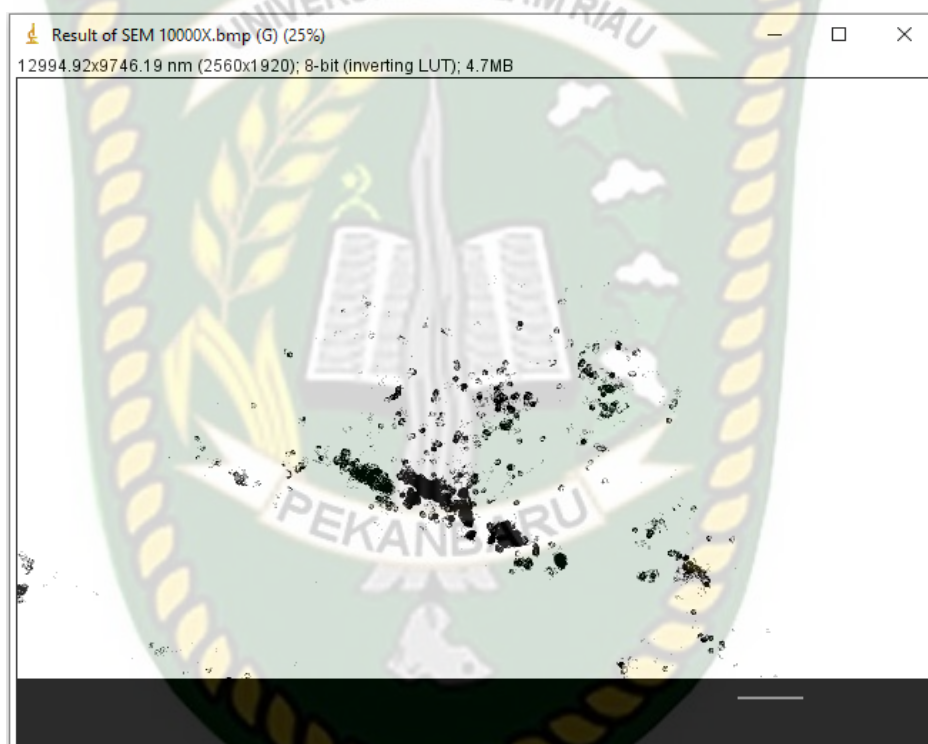
Scanning Electron Microscope (SEM) adalah metode karakterisasi yang digunakan untuk melihat morfologi dari sebuah material menggunakan pantulan gelombang elektron dengan ketelitian mencapai 1 nm (Mursal, 2018). Pada dasarnya metode yang digunakan dalam proses *scanning* SEM terdapat 2 model yaitu SEI dan BSE. SEI (*Secondary Electron Imaging*) menggunakan pancaran gelombang elektron untuk melihat morfologi dan topografi permukaan sampel. Sedangkan BSE (*Backscattered Electron*) digunakan untuk melihat perbedaan material penyusun sampel berdasarkan perbedaan kontras fasa. Kontras tersebut terbentuk dari perbedaan nomor atom yang mengalami tumbukan dengan gelombang elektron yang dipancarkan (Sujatno, Salam, Bandriyana, & Dimiyati, 2017).



Gambar 4.1 Gambar SEM nano CaCO_3 dengan pembesaran 10,000 kali

Struktur morfologi sampel nano CaCO_3 dapat dilihat pada gambar 4.1. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa partikel-partikel nano CaCO_3 memiliki bentuk yang hampir serupa yaitu *spherical*.

Untuk menentukan ukuran atau distribusi partikel dapat dilakukan dengan bantuan Image-J seperti pada penelitian yang dilakukan oleh (Mazzoli & Favoni, 2012). Image-J adalah software gratis (*free-Software*) untuk pengolahan gambar digital berbasis Java yang dibuat oleh Wayne Rasband dari Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA. Penggunaan ImageJ dalam analisis gambar digital telah digunakan secara luas dalam penelitian di bidang kesehatan dan biologi (Kurniawan, Budi Waluyo, & Sebayang, 2011).

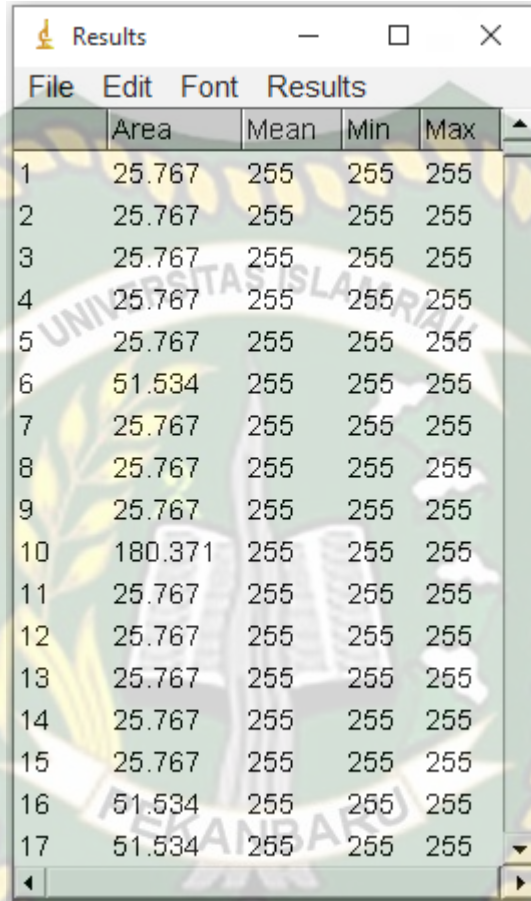


Gambar 4.2 Hasil pengolahan gambar SEM menggunakan Image-J melalui proses *Thresholding*

Dalam gambar 4.3 ditunjukkan hasil pengolahan gambar dengan menggunakan *Threshold* hasil analisis Image-J. Fitur *Thresholding* digunakan untuk memilah ukuran partikel yang tersebar agar mudah dianalisis. Setelah itu, gambar diolah dengan menghitung luas area partikel rata-rata menggunakan fitur *Analyze Particles* pada Image-J, sehingga dapat dicari diameter rata-ratanya dengan menggunakan rumus (Kurniawan et al., 2011) :

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

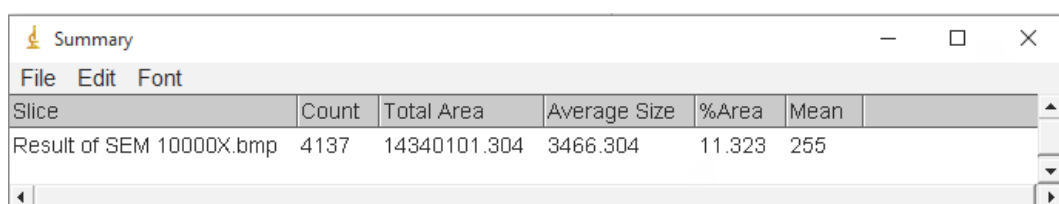
Dimana d merupakan diameter rata-rata dan A adalah luas area rata-rata.



	Area	Mean	Min	Max
1	25.767	255	255	255
2	25.767	255	255	255
3	25.767	255	255	255
4	25.767	255	255	255
5	25.767	255	255	255
6	51.534	255	255	255
7	25.767	255	255	255
8	25.767	255	255	255
9	25.767	255	255	255
10	180.371	255	255	255
11	25.767	255	255	255
12	25.767	255	255	255
13	25.767	255	255	255
14	25.767	255	255	255
15	25.767	255	255	255
16	51.534	255	255	255
17	51.534	255	255	255

Gambar 4.3 Hasil analisa luas area partikel menggunakan fitur *Analyze Particles*

Gambar 4.3 menunjukkan hasil pembacaan software Image J terhadap luas area partikel yang dapat terbaca pada gambar SEM yang telah di *Thresholding*. Hasil pembacaan menunjukkan distribusi ukuran yang tidak merata. Hal tersebut dapat terjadi karena pada gambar hasil SEM butiran partikel nano banyak yang terlihat menyatu.

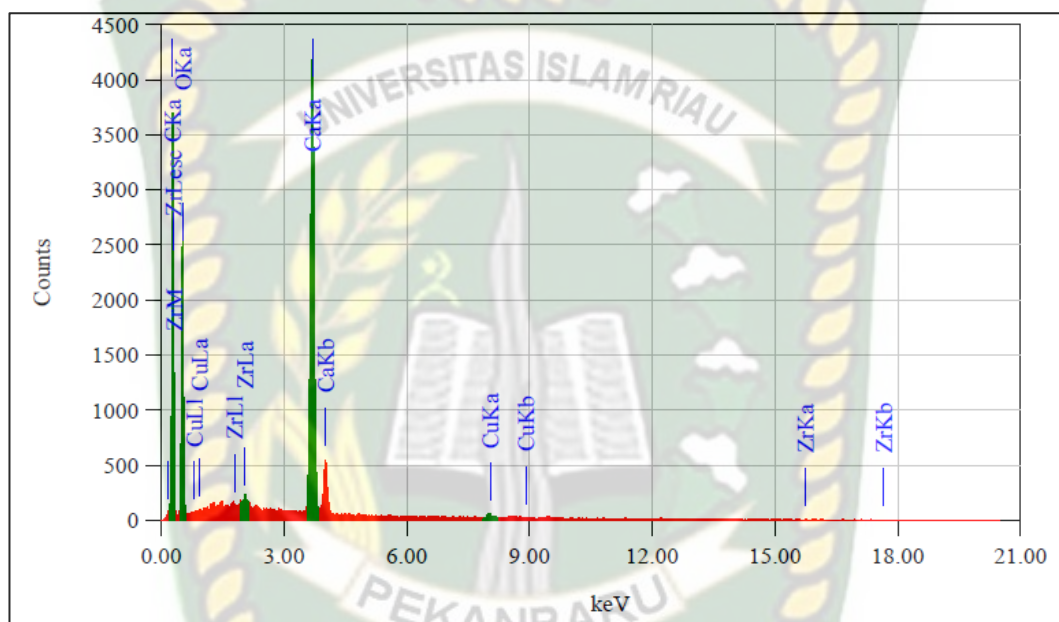


Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
Result of SEM 10000X.bmp	4137	14340101.304	3466.304	11.323	255

Gambar 4.4 Hasil *Summary* dari *Analyze Particles*

Dari table *Summary* dapat diketahui bahwa luas area rata-rata partikel yang dapat dianalisa pada gambar adalah $3466,304 \text{ nm}^2$. Maka diameter rata-rata partikel yaitu :

$$d = 2 \sqrt{\frac{3466,304}{\pi}} = 66,45 \text{ nm}$$



Grafik 4.1 Hasil analisa EDS

Element	Mass%	Atom%
C	41.05	51.88
O	45.56	43.22
Ca	12.42	4.7
Cu	0.49	0.12
Zr	0.47	0.08
Total	100	100

Tabel 4.1 Karakterisasi elemen nano CaCO_3 hasil pengujian EDS

Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) adalah metode yang digunakan untuk memperoleh informasi kandungan unsur yang terdapat pada suatu material (Widianto, Kardiman, & Fauji, 2018). EDS dihasilkan dari Sinar X karakteristik yang ditembakkan pada posisi sampel yang ingin diketahui komposisinya. Hasil pembacaan akan memunculkan puncak – puncak tertentu yang mewakili suatu

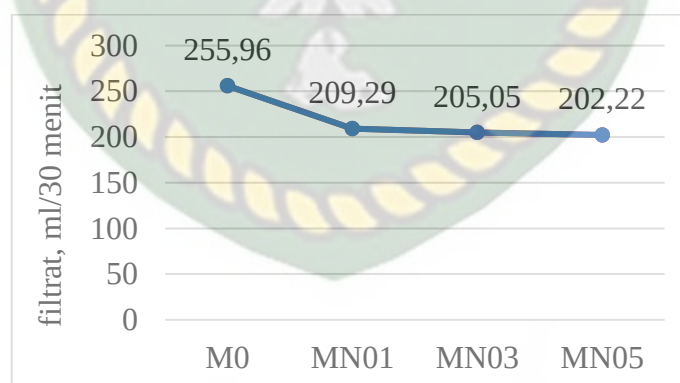
unsur yang terkandung. EDS bisa digunakan untuk menganalisa secara kuantitatif dari persentase masing – masing elemen. Analisis unsur CaCO_3 telah dilakukan menggunakan SEM-EDS dengan *ZAF Method Standardless Quantitative Analysis* bahwa CaCO_3 , memiliki elemen : Karbon (C) 41.05% Mass, Oksigen (O) 45.56% Mass, Kalsium (Ca) 12.42% Mass, Tembaga (Cu) 0.49% Mass, dan Zirkonium (Zr) 0.47% Mass.

4.2 Pengaruh Variasi Konsentrasi Nano CaCO_3 Terhadap *Filtration Loss*

Pengujian *filtration loss* dilakukan pada *slurry* semen dasar kelas G yang ditambahkan nano CaCO_3 dengan variasi konsentrasi 0,1%, 0,3%, 0,5% BWOC dan semen kelas G + KCl 5% BWOW sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano 0,1%, 0,3%, 0,5% BWOC CaCO_3 .

Tabel 4.2 Hasil perhitungan *filtration loss* pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Kode Sampel	Sampel	F 30 (ml)
M0	Semen Dasar	255,96
MN01	SD + NC 01%	209,29
MN03	SD + NC 03%	205,05
MN05	SD + NC 05%	202,22



Grafik 4.2 Hasil perhitungan dari pengaruh penambahan variasi nano CaCO_3 pada semen kelas G sebagai semen dasar terhadap *filtration loss*

Pada tabel 4.2 dan grafik 4.2 menunjukkan bahwa komposisi semen dasar tanpa campuran nano CaCO_3 memperoleh nilai F30 sebesar 255,96 ml, kemudian pada penambahan konsentrasi 0,1% nano CaCO_3 diperoleh nilai F30 sebesar 209,29

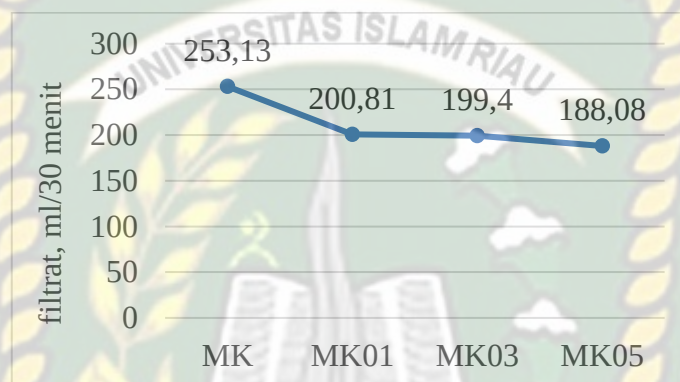
ml, penambahan konsentrasi 0,3% nano CaCO_3 menghasilkan nilai F30 sebesar 205,05 ml, dan penambahan konsentrasi 0,5% nano CaCO_3 menghasilkan nilai F30 sebesar 202,22 ml. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penurunan nilai *filtration loss* terjadi seiring dengan penambahan konsentrasi nano.

Berdasarkan penelitian (Camiletti et al., 2013), penurunan filtrat tersebut dikarenakan nano CaCO_3 memiliki ukuran partikel yang kecil yang dapat bekerja sebagai *filler* untuk mengisi ruang yang kosong antar pori bubuk semen. Fungsi nano tersebut berpengaruh terhadap pengurangan permeabilitas bubuk semen yang menyulitkan fasa liquid dan ion terarut pada bubuk semen bergerak melalui sistem pori (Sato & Diallo, 2010), sehingga filtrat yang terbentuk menjadi berkurang. Selain itu, pengurangan pori juga terjadi karena meningkatnya produk C-S-H dan *carbon-aluminate complex* yang diakselerasi oleh nano CaCO_3 saat bereaksi dengan senyawa C3S dan C3A yang terdapat pada semen (Thomas, Jennings, & Chen, 2009). Dengan bertambahnya konsentrasi nano pada bubuk semen, maka semakin besar pula potensi nukleasi untuk pembentukan produk hidrasi. Setelah proses pembentukan inti, produk hidrasi akan mengalami ekspansi dalam volume yang lebih besar (Kong, Huang, Corr, Yang, & Shah, 2018). Karena volume suspensi semen tidak berubah secara signifikan, meningkatnya volume produk hidrasi dari dalam suspensi akan menyebabkan volume pori jadi semakin mengecil dan berkurang. Sehingga semakin sedikit filtrat yang hilang.

Pada *primary cementing*, *filtration loss* yang diizinkan tidak boleh lebih dari 250 ml yang diukur selama 30 menit dengan menggunakan alat LPLT, saringan berukuran 325 mesh dan pada tekanan 100 psi (Rubiandini, 2001). Sesuai dengan pernyataan tersebut, sampel dengan variasi nano CaCO_3 0,1%, 0,3% dan 0,5% diijinkan dalam kriteria *filtration loss* karena menghasilkan filtrat dibawah 250 ml. Sampel semen dasar yang ditambah konsentrasi nano CaCO_3 sebesar 0.5% menghasilkan filtrat paling sedikit yaitu 202,22 ml/30 menit.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan untuk menentukan F30 (volume filtrat pada waktu 30 menit) pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Kode Sampel	Sampel	F 30 (ml)
MK	SD + KCl	253,13
MK01	SD + KCl + NC 0,1%	200,81
MK03	SD + KCl + NC 0,3%	199,4
MK05	SD + KCl + NC 0,5%	188,08



Grafik 4.3 Hasil perhitungan F30 (volume filtrat pada waktu 30 menit) pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Pada tabel 4.3 dan grafik 4.3 menunjukkan hasil perhitungan dari pengaruh penambahan variasi nano CaCO_3 pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar terhadap *filtration loss*. Penambahan *accelerator* KCl 5% bertujuan untuk mempercepat proses pengerasan dari bubur semen sehingga filtrat yang keluar dapat diminimalisir. Dapat dilihat pada pada tabel 4.7 dan gambar 4.7 sampel semen kelas G + KCl 5% tanpa campuran nano CaCO_3 memiliki nilai F30 sebesar 253,13 ml. Nilai tersebut lebih kecil daripada nilai filtrat semen dasar tanpa menggunakan KCl. Kemudian dilakukan penambahan variasi konsentrasi nano CaCO_3 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai *filtration loss*. Pada penambahan konsentrasi 0,1% nano CaCO_3 diperoleh nilai F30 sebesar 200,81 ml, penambahan konsentrasi 0,3% nano CaCO_3 menghasilkan nilai F30 sebesar 199,4 ml, dan penambahan konsentrasi 0,5% nano CaCO_3 menghasilkan nilai F30 sebesar 188,08 ml. Hasil perhitungan yang didapatkan untuk mendapatkan nilai volume

filtrat pada 30 menit menunjukkan penurunan nilai *filtration loss* seiring dengan penambahan konsentrasi nano.

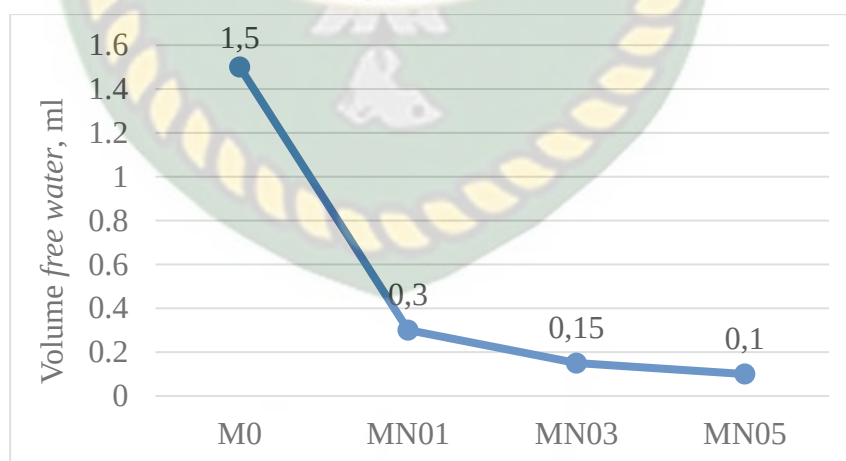
Dari hasil perhitungan, sampel dengan variasi nano CaCO_3 0,1%, 0,3% dan 0,5% diijinkan dalam kriteria *filtration loss* karena menghasilkan filtrat dibawah 250 ml. Sampel semen dasar yang ditambah konsentrasi nano CaCO_3 sebesar 0.5% merupakan yang optimum karena menghasilkan filtrat paling sedikit yaitu 188,08 ml/30 menit.

4.3 Pengaruh Variasi Konsentrasi Nano CaCO_3 Terhadap *Free Water*

Pengujian *free water* dilakukan pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3 . Berikut tabel dan grafik dari hasil pengujian *free water*.

Tabel 4.4 Hasil pengujian *free water* pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Kode Sampel	Sampel	Vol. Free Water (ml)
M0	Semen Dasar	1,5
MN01	SD + NC 0,1%	0,3
MN03	SD + NC 0,3%	0,15
MN05	SD + NC 0,5%	0,1



Grafik 4.4 Hasil pengujian *free water* pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

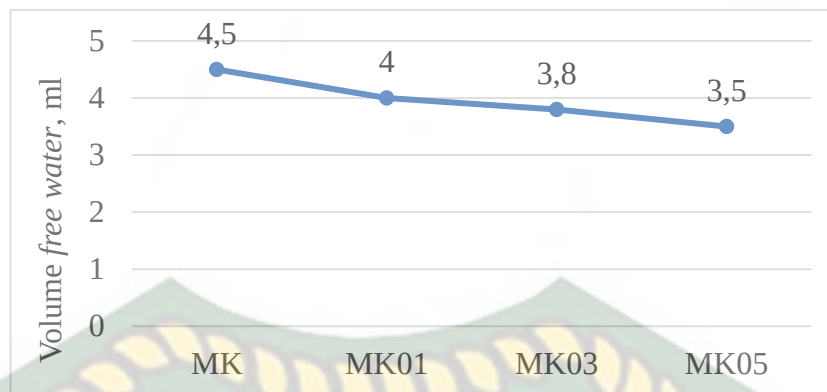
Berdasarkan tabel 4.4 dan grafik 4.4 dapat diketahui bahwa aditif nano CaCO_3 berpengaruh terhadap nilai *free water* pada semen kelas G sebagai semen

dasar. Untuk semen dasar nilai volume *free water* adalah 1,5 ml, untuk sampel MN01 volume *free water* adalah 0,3 ml, untuk sampel MN03 volume *free water* adalah 0,15 ml dan untuk sampel MN05 volume *free water* adalah 0,1 ml. Untuk semen kelas G air bebas yang terjadi tidak boleh lebih dari 3,5 ml. Bila air bebas yang terjadi melebihi 3,5 ml maka akan menyebabkan permeabilitas semen membesar (Rubiandini, 1999). Berdasarkan hasil pengujian, sampel semen dasar, MN01, MN03 dan MN05 diijinkan dalam pengujian *free water* karena memenuhi kriteria yaitu menghasilkan *free water* dibawah 3,5 ml. Sampel semen dasar dengan konsentrasi nano 0.5% merupakan yang paling sedikit menghasilkan dengan *free water* sebesar 0,1 ml. Dari hasil pengujian *free water* pada semen kelas G sebagai semen dasar diketahui bahwa volume *free water* berkurang seiring dengan penambahan konsentrasi aditif nano CaCO_3 . Berdasarkan penelitian (Camiletti et al., 2013; Cao et al., 2019), hal tersebut dikarenakan fungsi nano CaCO_3 yang mempercepat pertumbuhan produk hidrasi yang dapat meminimalisir pori. Sehingga *free water* yang terbentuk menjadi berkurang.

Hasil dari pengujian *free water* pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3 dapat dilihat pada tabel dan grafik berikut.

Tabel 4.5 Hasil pengujian *free water* pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Kode Sampel	Sampel	Vol. Free Water (ml)
MK	SD + KCl	4,5
MK01	SD + KCl + NC 0,1%	4
MK03	SD + KCl + NC 0,3%	3,8
MK05	SD + KCl + NC 0,5%	3,5



Grafik 4.5 Hasil pengujian *free water* pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Berdasarkan tabel 4.5 dan grafik 4.5 dapat diketahui bahwa aditif nano CaCO_3 berpengaruh terhadap nilai *free water* pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar. Untuk sampel semen dasar MK nilai volume *free water* adalah 4,5 ml, untuk sampel MK01 volume *free water* yaitu 4 ml. Untuk sampel MK03 volume *free water* yaitu 3,8 ml dan untuk sampel MK05 volume *free water* sebesar 3,5 ml.

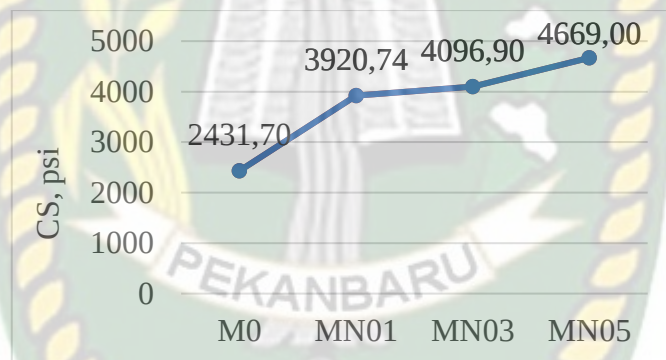
Dilihat dari hasil pengujian *free water* diketahui bahwa volume *free water* semakin berkurang seiring dengan penambahan konsentrasi aditif nano CaCO_3 . Namun volume *free water* yang didapatkan lebih besar dari pada sampel semen dasar tanpa menggunakan KCl. Menurut (Ye, Jin, & Jin, 2017) alasan utamanya disebabkan oleh peristiwa kimia dan fisika ikatan ion Cl^- kedalam produk hidrasi semen. Ion klorida memiliki koefisien difusi lebih tinggi daripada ion lainnya yang ikut terlarut. Hal tersebut menyebabkan ion Cl^- lebih cepat terdifusi kedalam permukaan lapisan C-S-H yang menyebabkan tertundanya ikatan dengan air (Nelson & Guillot, 2006). Selama periode tersebut, air yang tidak ikut bereaksi akan terdorong ke permukaan bubur semen dan membentuk *free water*. Volume *free water* tersebut dapat diminimalisir seiring dengan penambahan nano CaCO_3 . Hal tersebut dikarenakan nano memiliki kecenderungan tinggi bereaksi dengan air dan partikel semen untuk membentuk produk hidrasi (Ge et al., 2014). Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa hanya sampel MK05 yang sesuai dengan kriteria yang ditetapkan API, yaitu tidak boleh lebih dari 3,5 ml.

4.4 Pengaruh Variasi Konsentrasi Nano CaCO_3 Terhadap *Compressive Strength* dan *Shear Bond Strength*

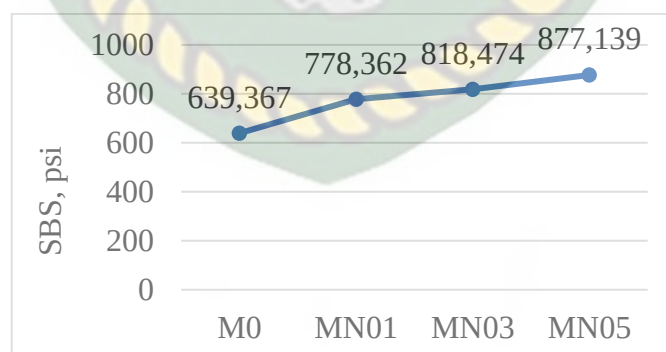
Pengujian *compressive strength* dan *shear bond strength* dilakukan pada semen kelas G semen dasar dan semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar yang ditambahkan nano CaCO_3 dengan variasi konsentrasi 0,1%, 0,3%, 0,5% BWOC.

Tabel 4.6 Hasil pengujian *compressive strength* dan *shear bond strength* pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Kode Sampel	Sampel	CS (psi)	SBS (psi)
M0	SD	2431,70	639,367
MN01	SD + NC 0,1%	3920,74	778,362
MN03	SD + NC 0,3%	4096,90	818,474
MN05	SD + NC 0,5%	4669,00	877,139



(a)



(b)

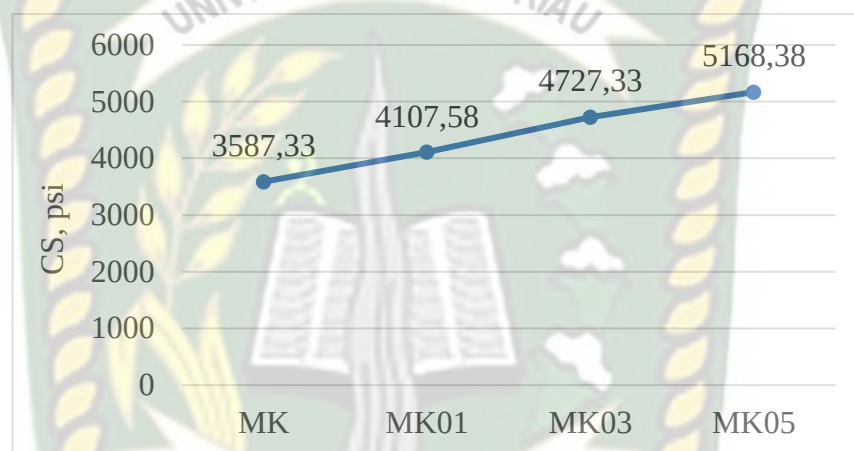
Grafik 4.6 Hasil pengujian (a) *compressive strength* dan (b) *shear bond strength* pada semen kelas G sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Berdasarkan tabel 4.6 dan grafik 4.6 dapat diketahui bahwa aditif nano CaCO_3 berpengaruh terhadap nilai *compressive strength* dan *shear bond strength* sampel semen pemboran. Untuk semen dasar nilai *compressive strength* adalah 2432,99 psi dan SBS sebesar 639,367 psi. Kemudian nilai CS dan SBS semakin meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi nano. Untuk sampel MN01 nilai *compressive strength* adalah 3920,74 psi dan SBS 778,362 psi. Untuk sampel MN03 memiliki nilai *compressive strength* sebesar 4096,89 psi dan SBS sebesar 818,47 psi, dan untuk sampel MN05 memiliki nilai CS sebesar 4668,89 psi dan SBS sebesar 877,139 psi.

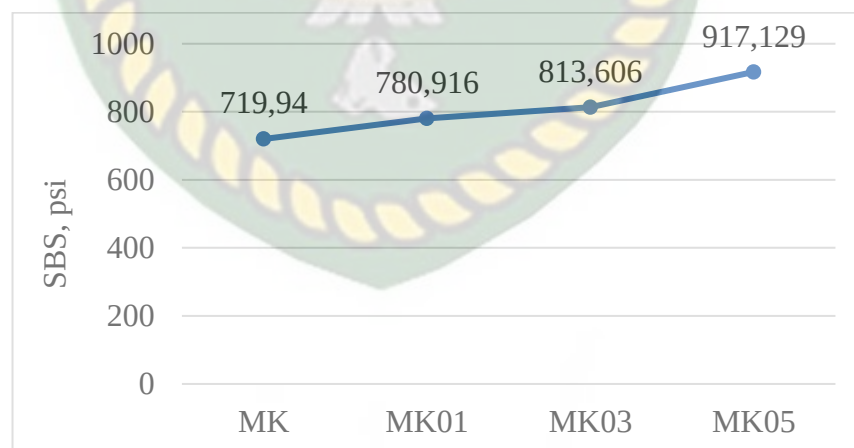
Nilai *compressive* dan *shear bond strength* meningkat seiring dengan meningkatnya penambahan konsentrasi nano CaCO_3 . Berdasarkan penelitian (Ge et al., 2014), terdapat dua mekanisme dari nano CaCO_3 yang dapat meningkatkan kekuatan pada semen. Pertama, nano CaCO_3 memiliki luas permukaan yang besar untuk proses nukleasi dan pertumbuhan produk hidrasi semen. Kedua, nano CaCO_3 menyediakan sumber ion kalsium tambahan untuk mempercepat proses hidrasi semen. Secara kimiawi, kehadiran nano CaCO_3 nanopartikel meningkatkan laju reaksi dari *tricalcium aluminate* (C3A) untuk membentuk *carboaluminate complex* yang meningkatkan jumlah produk hidrasi dan secara bersamaan meningkatkan kekuatan semen (Shaikh & Supit, 2014). Nano CaCO_3 juga bereaksi dengan *tricalcium silicate* (C3S) dan mengakselerasi peningkatan kekuatan semen. Dalam penelitian (Camiletti et al., 2013; Liu et al., 2011) menemukan bahwa kombinasi nano CaCO_3 dan semen diketahui dapat mempercepat proses nukleasi dan pertumbuhan produk hidrasi C-S-H pada semen. Akselerasi C-S-H ini dapat membantu meningkatkan kekuatan dari semen. Semakin banyak jumlah nano CaCO_3 yang ditambahkan, maka semakin besar pula proses akselerasi yang terjadi (Ge et al., 2014). Penambahan konsentrasi nano CaCO_3 yang lebih besar dari 0,5% memiliki kemungkinan menghasilkan semen dengan kekuatan yang lebih tinggi. Namun hal tersebut dibatasi karena harga nano yang masih terbilang cukup mahal tidak memungkinkan penggunaannya dalam jumlah besar.

Tabel 4.7 Hasil pengujian *compressive strength* dan *shear bond strength* pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3

Kode Sampel	Sampel	CS (psi)	SBS (psi)
MK	SD + KCl	3587,33	719,94
MK01	SD + KCl + NC 0,1%	4107,58	780,916
MK03	SD + KCl + NC 0,3%	4727,33	813,606
MK05	SD + KCl + NC 0,5%	5168,38	917,129



(a)



(b)

Grafik 4.7 Hasil pengujian (a) *compressive strength* dan (b) *shear bond strength* pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar dengan variasi penambahan nano CaCO_3 .

Nilai *compressive* dan *shear bond strength* meningkat pada semen kelas G + KCl 5% sebagai semen dasar seiring dengan meningkatnya penambahan konsentrasi nano CaCO_3 . Untuk sampel MK nilai *compressive strength* adalah 3587,33 psi dan SBS sebesar 719,94 psi. Kemudian nilai CS dan SBS semakin meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi nano. Untuk sampel MK01 nilai *compressive strength* adalah 4107,58 psi dan SBS 780,916 psi. Untuk sampel MK03 memiliki nilai *compressive strength* sebesar 4727,33 psi dan SBS sebesar 813,606 psi, dan untuk sampel MK05 memiliki nilai CS sebesar 5168,38 psi dan SBS sebesar 917,129 psi.

Selain karena fungsi dari nano CaCO_3 , KCl sebagai *accelerator* juga berperan mempercepat pengerasan semen dengan mempercepat pertumbuhan produk hidrasi semen, sehingga peningkatan kekuatan semen menjadi lebih cepat (C. Wang, Chen, & Wang, 2017). Berdasarkan penelitian (C. Rocha, Cordeiro, & Toledo Filho, 2015) akselerasi hidrasi yang terjadi pada semen oleh KCl dikarenakan KCl melepaskan ion K^+ dan Cl^- yang bereaksi dengan senyawa yang terdapat semen. Ion K^+ bereaksi dengan fasa aluminat pada semen membentuk KAlSiO_3 yang membantu mempercepat hidrasi semen. Sedangkan ion Cl^- membantu hidrasi dari senyawa C3S pada semen untuk membentuk C-S-H yang berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan semen.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Hasil karakterisasi SEM-EDS nano CaCO_3 menghasilkan gambar morfologi dan kandungan elemen yang terdapat pada nano CaCO_3 . Partikel nano CaCO_3 memiliki bentuk yang hampir serupa yaitu *spherical* dengan diameter rata-rata 66,45 nm yang didapat dari hasil perhitungan menggunakan software Image J. Hasil EDS menunjukkan bahwa nano CaCO_3 memiliki elemen yang dominan yaitu sebagai berikut : Karbon (C) 41.05% Mass, Oksigen (O) 45.56% Mass, Kalsium (Ca) 12.42% Mass.
2. Aditif nano CaCO_3 dengan variasi konsentrasi penambahan berpengaruh terhadap nilai *filtration loss*, *free water* CS dan SBS semen pemboran kelas G. Semakin besar penambahan konsentrasi nano CaCO_3 menghasilkan nilai CS dan SBS semakin tinggi, Sementara itu nilai *free water* dan *filtration loss* yang didapatkan akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi aditif nano CaCO_3 dalam suspensi semen. Nilai optimum kuat tekan semen yang diperoleh dari variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 adalah 5168,38 psi untuk *compressive strength* dan 917,129 psi untuk *shear bond strength* dengan konsentrasi yang sama yaitu 0,5% nano CaCO_3 bwoc + 5% KCl bwow. Nilai optimum *filtration loss* yang diperoleh dari variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 adalah 188,08 ml/30 menit dengan konsentrasi nano CaCO_3 sebesar 0,5% bwoc. Nilai optimum *free water* yang diperoleh dari variasi konsentrasi penambahan nano CaCO_3 adalah 0,1 ml dengan konsentrasi nano CaCO_3 sebesar 0,5% bwoc.

5.2 Saran

1. Melakukan pengujian pengaruh aditif nano CaCO_3 terhadap sifat fisik semen pemboran pada kondisi HPHT.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Ezeakacha, C. P., & Salehi, S. (2018). Improvement in cement sealing properties and integrity using conductive carbon nano materials: From strength to thickening time. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1–11. <https://doi.org/10.2118/191709-ms>
- Amanullah, M., & Al-Tahini, A. M. (2009). Nano-Technology - Its Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application. *2009 SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*, 1–12. <https://doi.org/10.2118/126102-MS>
- Atashnezhad, A., Coryell, T., & Hareland, G. (2017). Barite Nanoparticles Reduce the Cement Fluid Loss. *SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium*, (March), 27–31.
- Budiman, L., & Sukirman, S. (2018). *Studi Penggunaan Batu Kapur Kalipucang sebagai Substitusi Sebagian Agregat Halus Beton Aspal Jenis AC-BC*. 4(1), 45–55.
- Camiletti, J., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2013). Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultrahigh-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(5), 297–307. <https://doi.org/10.1680/mac.12.00015>
- Cao, M., Ming, X., He, K., Li, L., & Shen, S. (2019). Effect of macro-, micro- and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites-A review. *Materials*, 12(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma12050781>
- Dawood Salman, A., Tatjana, J., Al-Mayyahi, M. A., Ibrahim, R. I., Adnan Abdullah, T., & Khader, E. H. (2020). Improvement of mechanical properties of Oil well cement by incorporate Nano-CaCO₃ prepared from eggshell waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 765(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/765/1/012006>
- Fink, J. K. (2012). Petroleum Engineer's Guide to Oil Filed Chemicals and Fluids. In *Petroleum Engineer's Guide to Oil Filed Chemicals and Fluids* (1st ed., p. 338). Oxford: Gulf Professional Publishing.
- Fu, C., Xie, C., Liu, J., Wei, X., & Wu, D. (2020). A Comparative Study on the Effects of Three Nano-Materials on the Properties of Cement-Based

Composites. *Materials*, 13(857), 1–15.

- Ganji, D. D., & Kachapi, S. H. H. (2015). Application of Nonlinear Systems in Nanomechanics and Nanofluids: Analytical Methods and Applications. In *Application of Nonlinear Systems in Nanomechanics and Nanofluids: Analytical Methods and Applications*. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00893-3>
- Ge, Z., Wang, K., Sun, R., Huang, D., & Hu, Y. (2014). Properties of self-consolidating concrete containing nano-CaCO₃. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 3(3–4), 191–200. <https://doi.org/10.1080/21650373.2014.903213>
- Kong, D., Huang, S., Corr, D., Yang, Y., & Shah, S. P. (2018). Whether do nano-particles act as nucleation sites for C-S-H gel growth during cement hydration? *Cement and Concrete Composites*, 87, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.007>
- Kurniawan, C., Budi Waluyo, T., & Sebayang, P. (2011). Analisis Ukuran Partikel Menggunakan Free Software Image-J. *Seminar Nasional Fisika*, (01).
- Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185–189. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0)
- Liu, X., Chen, L., Liu, A., & Wang, X. (2011). Effect of nano-CaCO₃ on properties of cement paste. *Energy Procedia*, 16(PART B), 991–996. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.158>
- Maagi, M. T., Lupyana, S. D., & Gu, J. (2019). Effect of Nano-SiO₂, Nano-TiO₂ and Nano-Al₂O₃ Addition on Fluid Loss in Oil-Well Cement Slurry. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(62), 186–190. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0371-y>
- Mazzoli, A., & Favoni, O. (2012). Particle size, size distribution and morphological evaluation of airborne dust particles of diverse woods by Scanning Electron Microscopy and image processing program. *Powder Technology*, 225, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.033>
- Meng, T., Qiang, Y., Hu, A., Xu, C., & Lin, L. (2017). Effect of compound nano-CaCO₃ addition on strength development and microstructure of cement-

- stabilized soil in the marine environment. *Construction and Building Materials*, 151, 775–781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.016>
- Meng, T., Yu, Y., & Wang, Z. (2017). Effect of nano-CaCO₃ slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash. *Composites Part B: Engineering*, 117, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.030>
- Mursal, I. L. P. (2018). Karakterisasi Xrd Dan Sem Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System. *Pharma Xplore : Jurnal Ilmiah Farmasi*, 3(2), 214–221. <https://doi.org/10.36805/farmasi.v3i2.491>
- Nelson, E. B., & Guillot, D. (2006). Well Cementing. In J. Smith (Ed.), *Well Cementing* (2nd ed., pp. 22–23, 57–58, 45–48). Sugar Land, Texas: Schlumberger.
- Novriansyah, A., Mursyidah, U., Novrianti, Putri, S. S., & Riswati, S. S. (2018). Effect of silica-palm shell carbon composite additive in enhancing the strength of the concrete in the oil-well cementing job. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 348(1), 1–5. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/348/1/012012>
- Novriansyah, Adi, Mursyidah, M., Ningsih, D. wulan, & Prasetya Utama, T. (2016). Potential Utilization of Carbon-Coconut-Shell Waste and Silica-Nanoparticle to Enhance Cement strength: Oil-Well Cementing Case. *International Conference on Technology, Innovation, (ICTIS) 2016*, 128–133. <https://doi.org/10.21063/ictis.2016.1022>
- Novrianti. (2016). Studi Laboratorium Pengaruh Nanocomposite Nanosilika dan Arang Cangkang Kelapa Sawit Dengan Variasi Temperatur Pemanasan Terhadap Free Water dan Kekuatan Semen Pemboran. *Journal of Earth Energy Engineering*, 5(1), 21–27. <https://doi.org/10.22549/jeee.v5i1.465>
- Novrianti, N., & Mursyidah, U. (2017). Studi Laboratorium Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Arang Batok Kelapa Terhadap Thickening Time dan Free Water Semen Pemboran. *Journal of Earth Energy Engineering*, 6(1), 38–43. <https://doi.org/10.22549/jeee.v6i1.632>
- NSAI Standard. (2017). *Nanotechnologies - Vocabulary - Part 2 : Nano-objects*

- (pp. i–vii). pp. i–vii. Irlandia: ISO/TS 80004-2:2015.
- Patil, R., & Deshpande, A. (2012). Use of Nanomaterials in Cementing Applications. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Nanotechnology Conference 2012*, (June), 120–123. <https://doi.org/10.2118/155607-ms>
- Rocha, C. A. A., Cordeiro, G. C., & Filho, R. D. T. (2012). Influence of sodium and potassium chlorides on the hydration kinetics and its impact on the strength of oil well cement pastes. *ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1115/OMAE2012-84209>
- Rocha, C., Cordeiro, G. C., & Toledo Filho, R. D. (2015). Use of thermal analysis to determine the hydration products of oil well cement pastes containing NaCl and KCl. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122(3), 1279–1288. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4949-6>
- Rubiandini, R. (1999). *Teori Umum Semen dan Penyemenan*. PT. Loka Datamas Indah.
- Rubiandini, R. (2001). *Teknik Pemboran dan Praktikum* (1st ed.). Bandung: ITB.
- Sabdonoa, P., Sustiawana, F., & Fadlillaha, D. A. (2014). The effect of nano-cement content to the compressive strength of mortar. *Procedia Engineering*, 95, 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.197>
- Samura, L., Ainurridha, K. A., & Zabidi, L. (2017). Pengujian Compressive Strength Dan Thickening Time Pada Semen Pemboran Kelas G Dengan Penambahan Additif Retader. *Jurnal Petro* 2017, 6(2), 49–54. <https://doi.org/10.25105/petro.v6i2.3103>
- Sato, T., & Diallo, F. (2010). Seeding effect of nano-CaCO₃ on the hydration of tricalcium silicate. *Transportation Research Record*, (2141), 61–67. <https://doi.org/10.3141/2141-11>
- Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M. (2014). Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 70, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.099>
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, B., & Dimyati, A. (2017). Studi Scanning

- Electron Microscopy (SEM) Untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, 9(1), 44. <https://doi.org/10.17146/jfn.2015.9.1.3563>
- Supit, S. W. M., & Shaikh, F. U. A. (2014). Effect of Nano-CaCO on compressive strength development of high volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(6), 178–186. <https://doi.org/10.3151/jact.12.178>
- Thakkar, A., Raval, A., Chandra, S., Shah, M., & Sircar, A. (2019). A comprehensive review of the application of nano-silica in oil well cementing. *Petroleum*, 6(2), 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2019.06.005>
- Thomas, J. J., Jennings, H. M., & Chen, J. J. (2009). Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement. *Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4327–4334. <https://doi.org/10.1021/jp809811w>
- Wang, C., Chen, X., & Wang, R. (2017). Do chlorides qualify as accelerators for the cement of deepwater oil wells at low temperature? *Construction and Building Materials*, 133, 482–494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.089>
- Wang, X. (2017). Effects of nanoparticles on the properties of cement-based materials.
- Widianto, E., Kardiman, K., & Fauji, N. (2018). Karakterisasi Pasir Besi Alam Pantai Samudera Baru dan Pemanfaatannya sebagai Filler pada Sistem Penyaring Elektromagnetik. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 2(1), 15. <https://doi.org/10.30595/jrst.v2i1.2325>
- Yazdi, N. A., Arefi, M. R., Mollaahmadi, E., & Nejand, B. A. (2011). To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 8(4), 550–554. <https://doi.org/10.1246/cl.2008.1152>
- Ye, H., Jin, N., & Jin, X. (2017). An experimental study on relationship among water sorptivity, pore characteristics, and salt concentration in concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(3), 530–540. <https://doi.org/10.3311/PPci.9621>