

Optimisasi Bubuk Slag Nikel dengan Sistem Ternary C-A-S

Hanafi Ashad

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia, Makasar
Kampus II Universitas Muslim Indonesia, Jl. Urip Sumoharjo Km 04, Makasar
E-mail: aji_hnf@yahoo.com

Amrinsyah Nasution

Kelompok Keahlian/Kepakaran Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
E-mail: amrinsyah@si.itb.ac.id

Iswandi Imran

Kelompok Keahlian/Kepakaran Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
E-mail: iswandi@si.itb.ac.id

Saptahari Soegiri

Kelompok Keahlian/Kepakaran Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
E-mail: saptahari@si.itb.ac.id

Abstrak

Makalah ini mengkaji tentang optimisasi bubuk slag nikel sebagai bahan substitusi parsial semen dengan sistem ternary C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$). Optimisasi dilakukan untuk menentukan kadar bubuk slag nikel di dalam mengkonsumsi senyawa kalsium hidroksida produk sampingan reaksi hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) semen dengan air sehingga membentuk senyawa lain berupa kalsium silikat hidrat (CSH) sekunder. Dalam diagram fase sistem ternary C-A-S, prosentase optimum bubuk slag nikel ditentukan melalui titik perpotongan antara garis keseimbangan reaksi pozzolanik dengan garis pencampuran bahan semen dan bubuk slag nikel. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan pendekatan diagram fase sistem ternary C-A-S tersebut, prosentase optimum bubuk slag nikel adalah 14,59%.

Kata-kata Kunci: Bubuk slag nikel, kalsium hidroksida, kalsium silikat hidrat, optimisasi, pozzolanik.

Abstract

This papers study concerning optimization of nickel slag powder as substitution material to partial cement by C-A-S ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) ternary system. Optimization conducted to determine percentage of nickel slag powder in the consuming calcium hydroxide compound as hydration product of tricalcium silicate (C_3S) and dicalcium silicate (C_2S) cement with water so that form secondary of calcium silicate hydrate (CSH) compound. By the phase diagram C-A-S ternary system, percentage of optimum nickel slag powder determined by intersection point between of balance line pozzolanic reaction and mixing line of material cement and nickel slag powder. Analysis result indicate that by approach of C-A-S ternary system, percentage optimum of nickel slag powder is 14,59%.

Keywords: Calcium hydroxide, calcium silicate hydrate, nickel slag powder, optimization, pozzolanic.

1. Pendahuluan

Otimisasi bubuk slag nikel dengan pendekatan diagram fase sistem ternary C-A-S (CaO-Al₂O₃-SiO₂) adalah merupakan konsep meminimalisasikan senyawa kimia kalsium hidroksida di dalam material beton. Hal ini dilakukan melalui penerapan sistem persamaan keseimbangan reaksi kimiawi dengan tiga fase utama, yaitu :

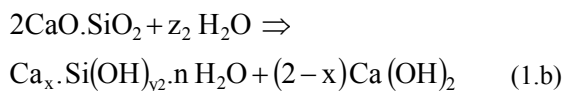
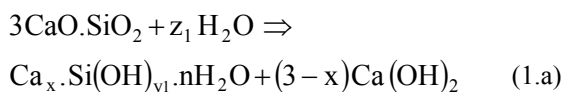
1. Fase pembentukan senyawa kalsium silika hidrat (CSH) hasil reaksi antara trikalsium silikat (C₃S) dan dikalsium silikat (C₂S) semen dengan air (H₂O).
2. Fase pembentukan senyawa kalsium silika hidrat (CSH) sekunder hasil reaksi senyawa kimia silika oksida (SiO₂) bubuk slag nikel dengan kalsium hidroksida (CH) hasil sampingan reaksi kimia phase pertama dengan air.
3. Fase hidrogarnet atau fase pembentukan ettringite sebagai produk reaksi antara senyawa kimia silika oksida (SiO₂) dan aluminium oksida (Al₂O₃) bubuk slag nikel dengan kalsium hidroksida (CH) hasil sampingan reaksi kimia phase pertama.

Ketiga phase tersebut di atas merepresentasikan reaksi hidrasi cementitious dengan tiga komponen produk reaksi yaitu kalsium silikat hidrat (CSH), kalsium hidroksida (CH), dan kalsium sulfoaluminat hidrat (CASH).

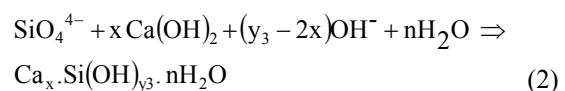
2. Reaksi Hidrasi Cementitious

Ketiga phase tersebut di atas dapat dituliskan dalam persamaan reaksi kimiawi sebagai berikut :

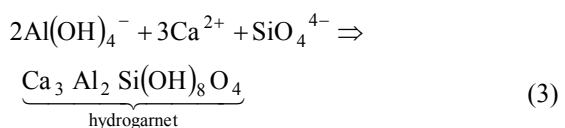
1. Fase pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat primer:



2. Fase pembentukan senyawa kalsium silikat sekunder:



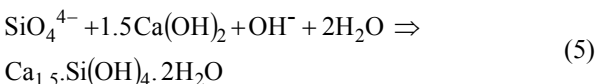
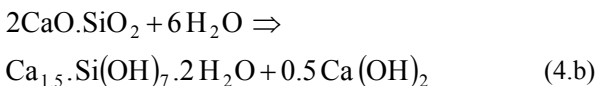
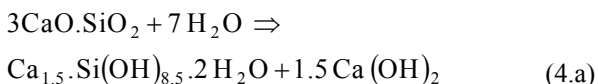
3. Fase hidrogarnet:



Harga x pada persamaan tersebut di atas adalah rasio C/S, dimana nilainya berbeda-beda antara satu referensi dengan referensi lainnya. Taylor (1997) menetapkan harga C/S = 1,65. Siddique (2000) menetapkan harga C/S = 1,60, sedangkan Mindess dan Young (1981) adalah 1,5 – 2,0. Harga x tersebut dapat pula ditentukan dengan metode X-Ray Diffraction (XRD).

3. Persamaan keseimbangan senyawa kimia CaO-Al₂O₃-SiO₂

Menggunakan data hasil X-Ray Diffraction (XRD), produk reaksi senyawa kimia kalsium silikat hidrat (CSH) pada **Persamaan 1.a, 1.b, dan 2**, memiliki rasio C/S sebesar 1,50. Dengan demikian **Persamaan 1 dan 2** dapat dituliskan secara lengkap sebagai berikut :



Komponen CSH pada fase (1) dan (2), memiliki rasio C/S = 1.5, sedangkan pada fase (3) rasio C/S = 3 dan A/S = 1.0. Terlihat pula pada komponen CH, rasio C/S dan A/S adalah nol.

Dengan rasio-rasio tersebut di atas, jumlah senyawa-senyawa kimia CaO (C), Al₂O₃ (A), dan SiO₂ (S) yang terdapat pada komponen kalsium silikat hidrat (CSH), kalsium sulfoaluminat hidrat (CASH), dan kalsium hidroksida (CH) dapat ditentukan sebagai berikut :

$$C = 1.5S_{\text{CSH}} + 3.0S_{\text{CASH}} + 0S_{\text{CH}} \quad (6)$$

$$A = 0S_{\text{CSH}} + 1.0S_{\text{CASH}} + 0S_{\text{CH}} \quad (7)$$

$$S = 1.0S_{\text{CSH}} + 1.0S_{\text{CASH}} + 0S_{\text{CH}} \quad (8)$$

Dalam diagram phase sistem ternary C-A-S, keseimbangan senyawa kimia CaO-Al₂O₃-SiO₂ adalah merupakan jumlah senyawa-senyawa kimia C, A, dan S pada **Persamaan 6, 7, dan 8** yaitu :

$$C + S + A = 1 \quad (9)$$

Memasukkan **Persamaan 6, 7, dan 8** ke dalam **Persamaan 9**, maka diperoleh persamaan keseimbangan gabungan mineral sebagai berikut :

$$A = \frac{(1 - 2,5S)}{2,5} \quad (10)$$

Selanjutnya persamaan keseimbangan gabungan mineral tersebut di atas (**Persamaan 8**), diplot ke dalam diagram fase sistem ternary C-A-S (CaO-Al₂O₃-SiO₂), seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 1**.

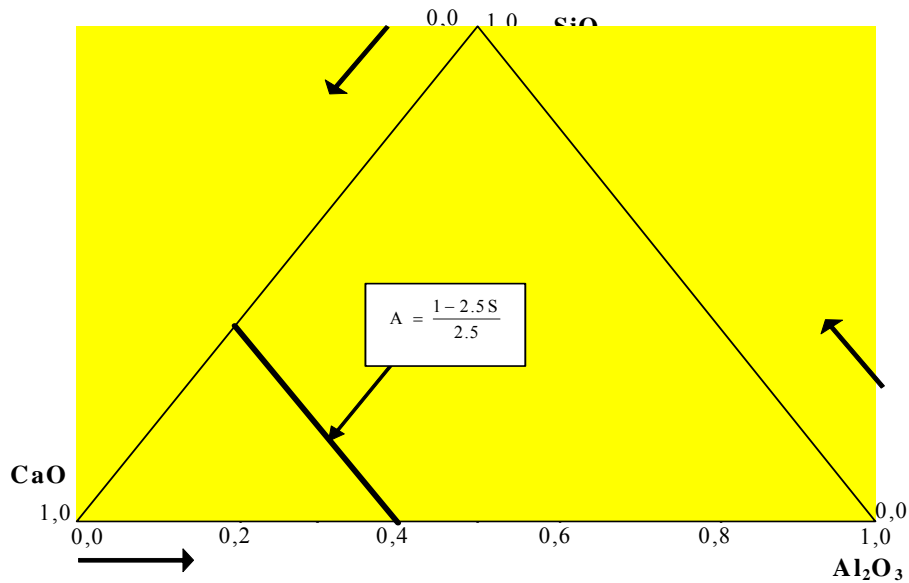
4. Pembentukan garis pencampuran material semen dan bubuk slag nikel

Garis pencampuran antara material semen dan bubuk slag nikel ditentukan berdasarkan senyawa-senyawa kimia; CaO, Al₂O₃, dan SiO₂ pada berbagai data komposisi campuran kedua bahan tersebut. Prosentase senyawa-senyawa kimia tersebut pada berbagai data komposisi campuran, diperlihatkan seperti pada **Tabel 1**.

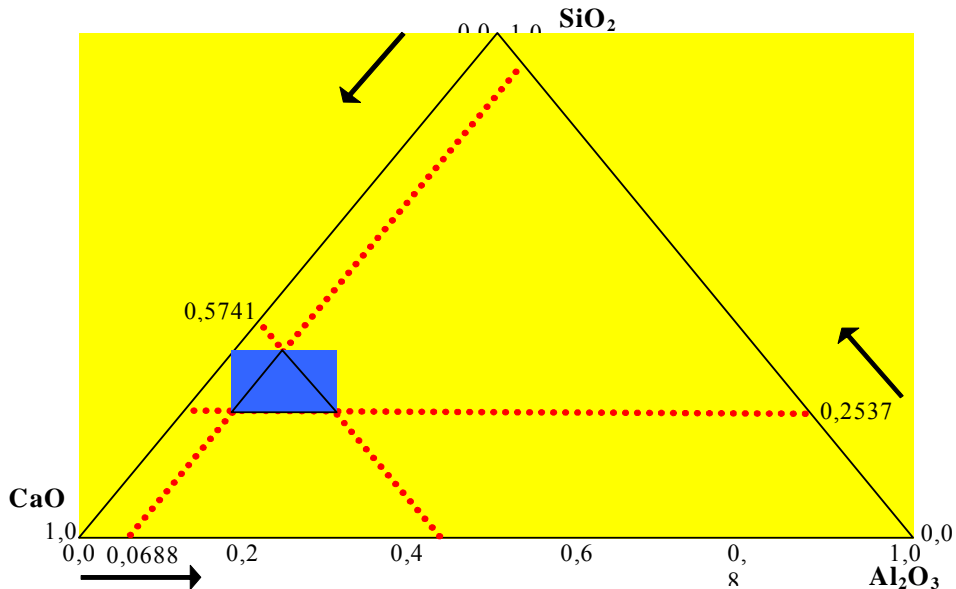
Prosentase senyawa kimia CaO, Al₂O₃, SiO₂ di dalam **Tabel 1**, diplot ke dalam diagram fase sistem ternary C-A-S seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2** hingga **Gambar 9**.

Tabel 1. Prosentase senyawa kimia C-A-S pada berbagai komposisi campuran

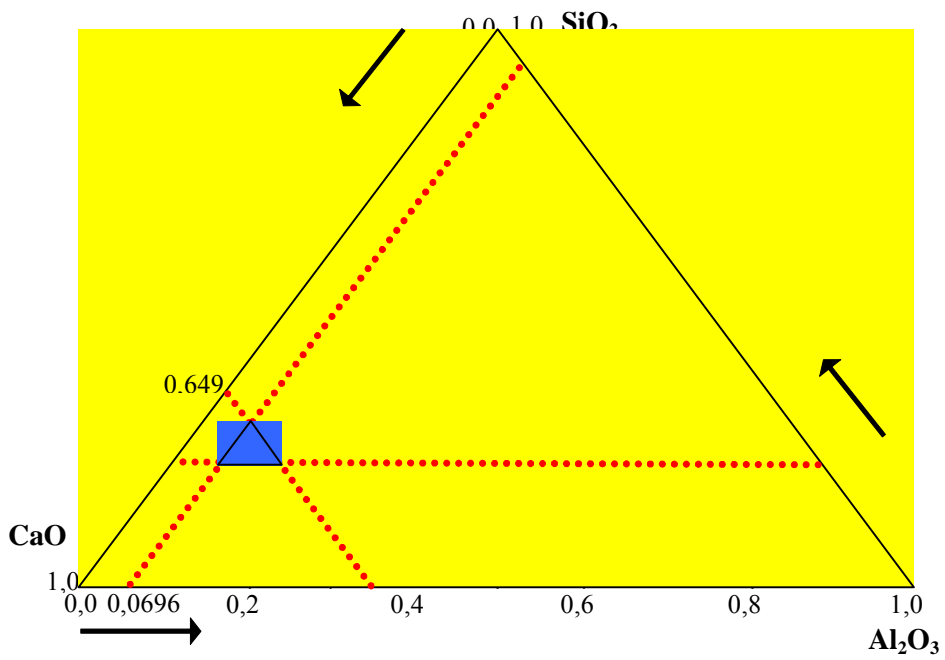
Kode	Prosentase C-A-S (%)		
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
C100-0	64,90	6,96	21,20
C90-10	57,41	6,86	25,37
C85-15	51,10	6,39	27,94
C80-20	46,58	6,06	29,12
C70-30	40,06	5,79	31,34
C60-40	32,12	5,42	34,78
C50-50	25,23	5,03	37,26
C0-100	6,86	3,67	42,57



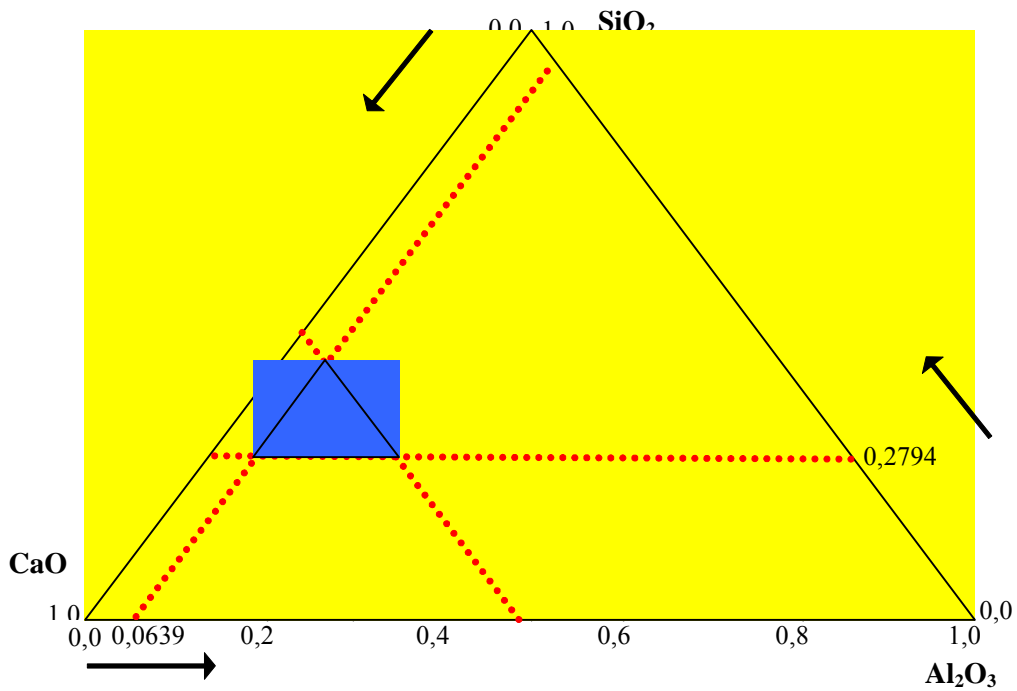
Gambar 1. Posisi garis keseimbangan CaO-Al₂O₃-SiO₂



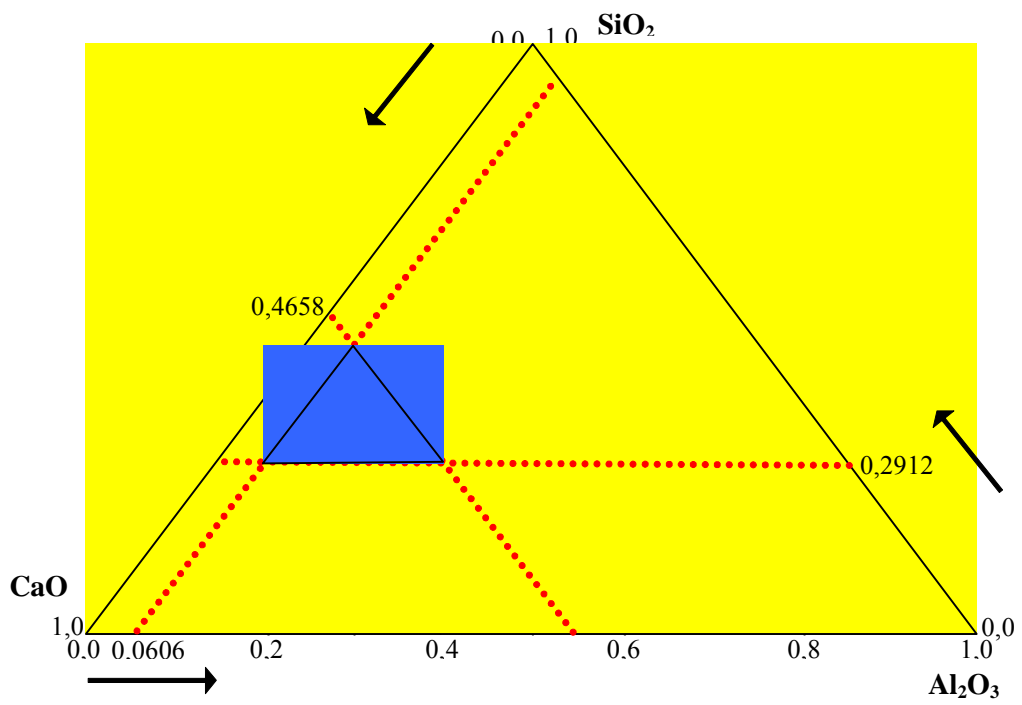
Gambar 2. Posisi C100-0 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



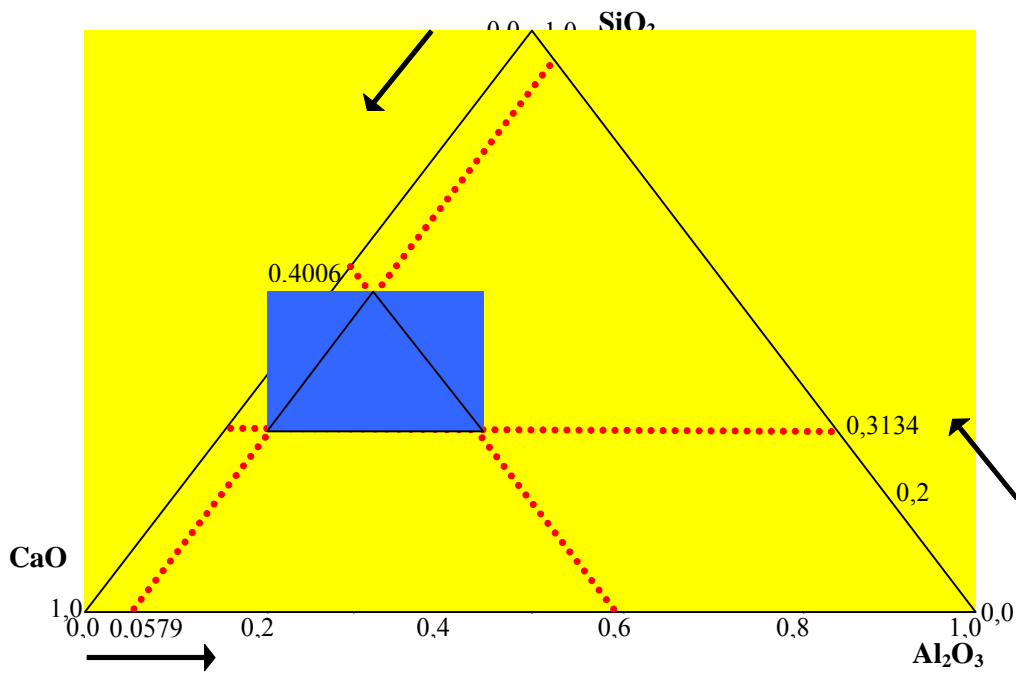
Gambar 3. Posisi C90-10 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



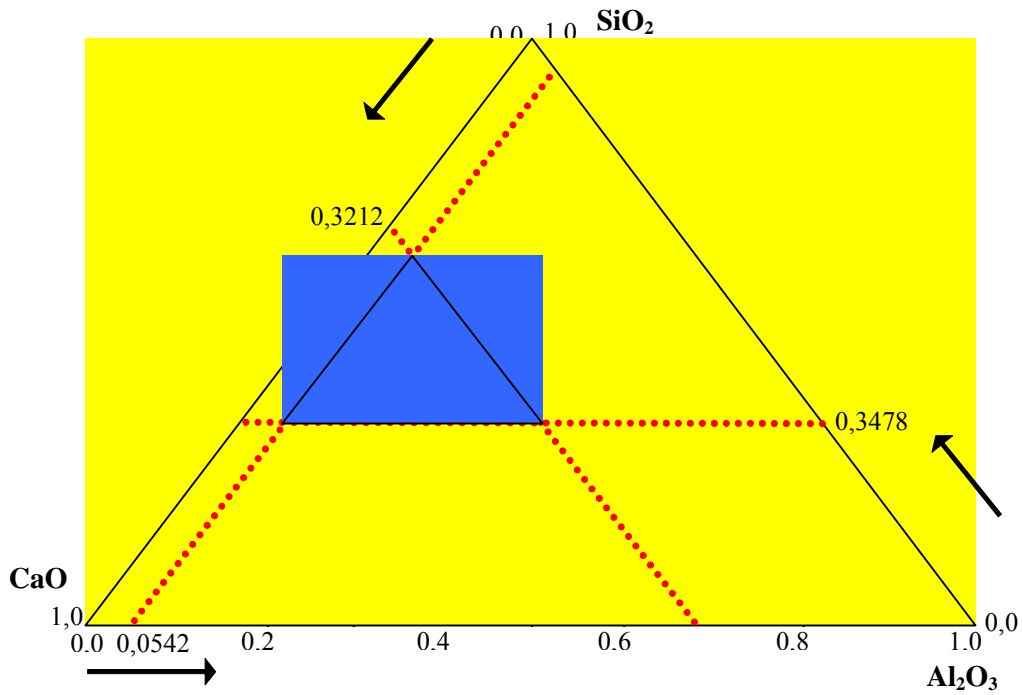
Gambar 4. Posisi C85-15 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



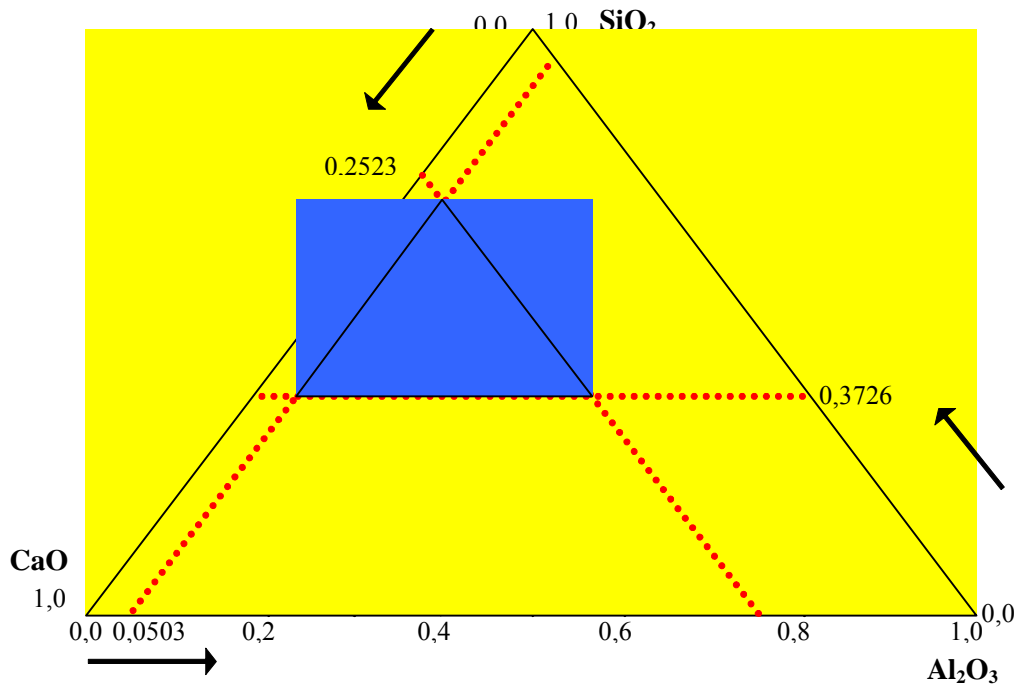
Gambar 5. Posisi C80-20 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



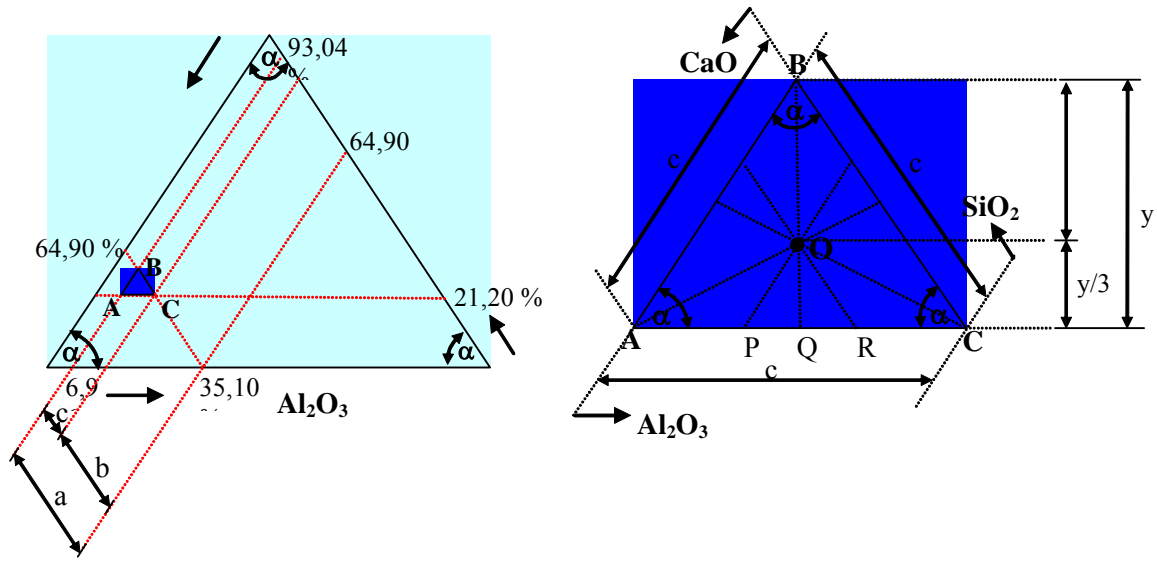
Gambar 6. Posisi C70-30 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



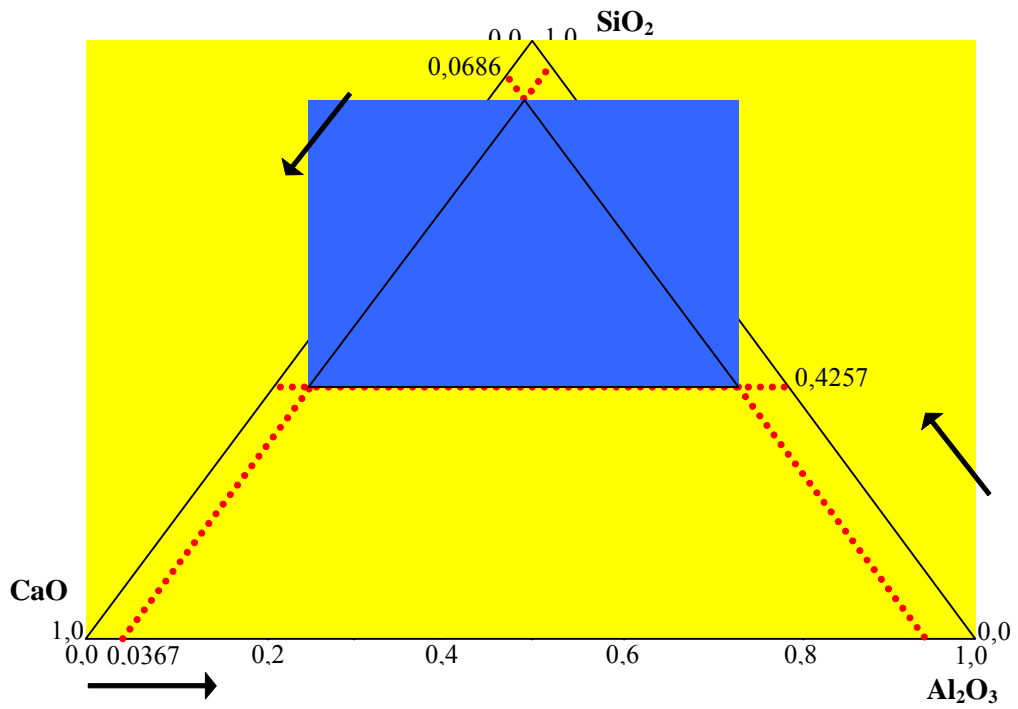
Gambar 7. Posisi C60-40 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



Gambar 8. Posisi C50-50 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S



Gambar 10. Detail koordinat CaO, Al₂O₃, SiO₂ bahan C100-0



Gambar 9. Posisi C0-100 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S

Titik pusat area bahan yang diperlihatkan pada **Gambar 2** hingga **9** tersebut di atas dapat ditentukan secara geometri, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 10**. Panjang sisi segitiga bahan dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$a = 100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (11)$$

$$b = \text{SiO}_2 \quad (12)$$

$$c = a - b = 100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2) \quad (13)$$

Karena sisi-sisi segitiga diagram fase ternary C-A-S sama besar, sehingga panjang sisi (c) area segitiga bahan tersebut juga sama besar dengan sudut α sebesar 60° .

$$y = c \sin \alpha$$

atau :

$$y = \{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\} \sin \alpha \quad (14)$$

Memperhatikan segitiga OPQ dan OQR, maka :

$$PQ = \frac{y/3}{\tan \alpha} = \frac{\{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\} \cos \alpha}{3} \quad (15)$$

$$QR = PQ \quad (16)$$

$$OP = OR = \frac{y/3}{\sin \alpha} = \frac{\{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\}}{3} \quad (17)$$

Dengan sudut $\alpha = 60^\circ$, maka :

$$AP = \frac{c}{2} - PQ = \frac{\{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\}}{3} \quad (18)$$

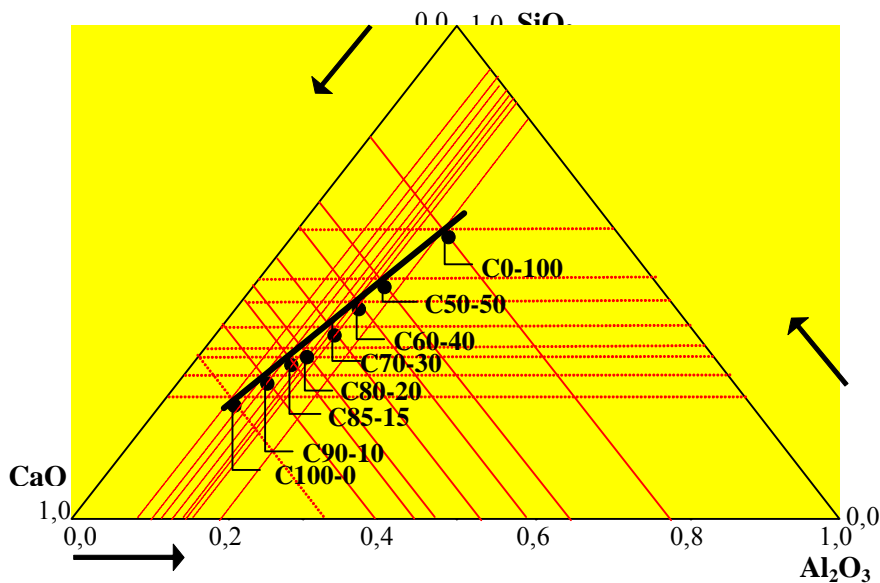
$$CR = \frac{c}{2} - QR = AP = \frac{\{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\}}{3} \quad (19)$$

Dengan demikian koordinat bahan C100-0 dalam diagram fase sistem ternary C-A-S (CaO, Al_2O_3 , SiO_2) adalah sebagai berikut :

$$C = \text{CaO}_{\text{bahan}} + CR = \text{CaO}_{\text{bahan}} + \frac{\{100(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\}}{3} \quad (20)$$

$$A = \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{bahan}} + AP = \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{bahan}} + \frac{\{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\}}{3} \quad (21)$$

$$S = \text{SiO}_2_{\text{bahan}} + OR = \text{SiO}_2_{\text{bahan}} + \frac{\{100 - (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)\}}{3} \quad (22)$$



Gambar 11. Garis pencampuran bahan semen dan bubuk slag nikel

Dengan memasukkan data prosentase senyawa kimia yang terdapat pada **Tabel 1** ke dalam **Persamaan 20, 21, dan 22**, koordinat setiap campuran bahan dapat ditentukan seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Koordinat campuran bahan dalam diagram fase sistem ternary C-A-S

Kode	Koordinat C-A-S (%)			
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Jumlah
C100-0	67,21	9,27	23,51	100
C90-10	60,86	10,31	28,82	100
C85-15	55,96	11,25	32,80	100
C80-20	52,66	12,14	35,20	100
C70-30	47,66	13,39	38,94	100
C60-40	41,35	14,65	44,01	100
C50-50	36,06	15,86	48,09	100
C0-100	22,49	19,30	58,20	100

Titik-titik koordinat dalam **Tabel 2** tersebut di atas digambarkan dalam diagram fase sistem ternary C-A-S, sehingga terbentuk garis lurus sebagai garis pencampuran bahan dengan titik awal C100-0 (100% semen) dan titik akhir C0-100 (100% bubuk slag nikel), seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 11**.

Dengan regresi linier, garis pencampuran pada **Gambar 11** dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$A = 0,2926 S + 0,0195 \quad (23)$$

dimana :

- A = senyawa kimia Al₂O₃ (%)
- S = senyawa kimia SiO₂ (%)

5. Proporsi Optimum Campuran Semen dan Bubuk Slag Nikel

Proporsi optimum ditentukan dari titik perpotongan antara garis keseimbangan mineral (**Persamaan 10**) dengan garis pencampuran (**Persamaan 23**). Titik perpotongan tersebut terletak pada posisi dengan senyawa kimiawi S (SiO₂) sebesar 0,3234 atau 32,34%.

Selanjutnya dibuat hubungan antara kandungan senyawa SiO₂ dengan persentase bubuk slag nikel berdasarkan data hasil pemeriksaan sesuai **Tabel 2**. Hubungan ini ditunjukkan pada **Gambar 13** dengan persamaan sebagai berikut :

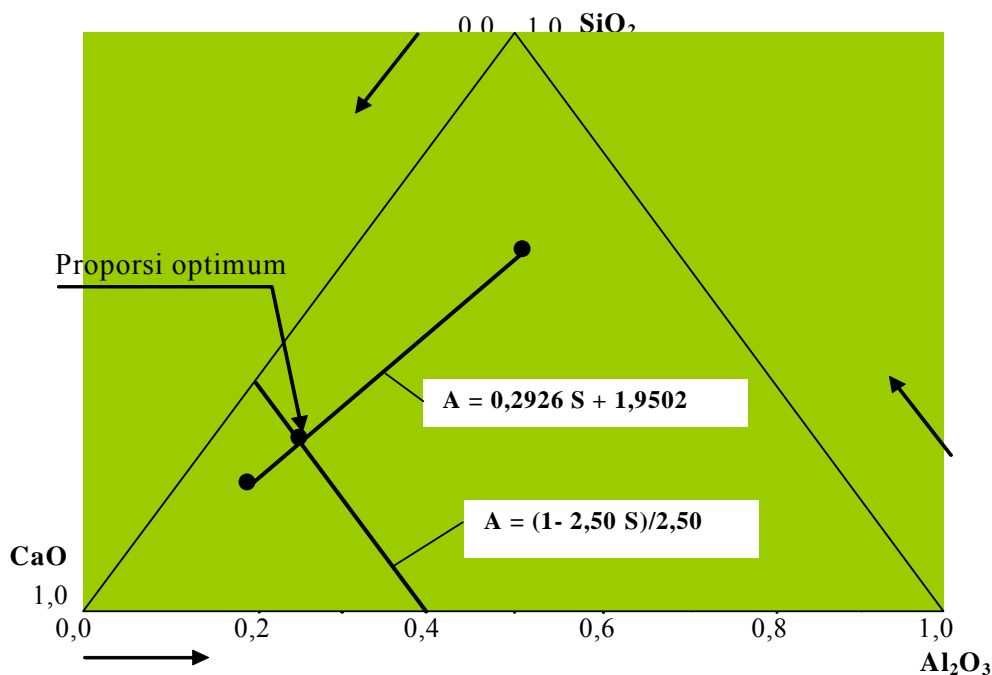
$$y = 0,343 x + 27,335 \quad (24)$$

hal mana y adalah kandungan senyawa SiO₂ dan x adalah persentase bubuk slag nikel.

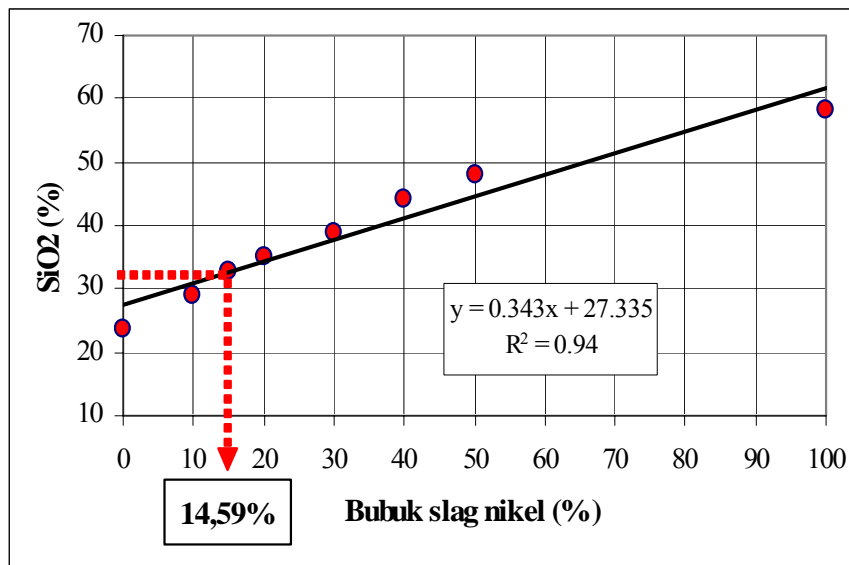
Memasukkan harga y atau SiO₂ ke dalam **Persamaan (24)**, maka didapatkan persentase bubuk slag nikel sebagai berikut :

$$x = \frac{32,34 - 27,335}{0,343} \quad (25)$$

$$= 14,59\%$$



Gambar 12. Titik perpotongan antara garis keseimbangan mineral dengan garis pencampuran material semen dan bubuk slag nikel



Gambar 13. Grafik hubungan antara senyawa silika oksida (SiO_2) versus prosentase bubuk slag nikel

6. Kesimpulan

Berdasarkan uraian-uraian tersebut di atas, dapat dikemukakan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Optimisasi dengan sistem ternary C-A-S merupakan metode pendekatan yang dapat digunakan untuk menentukan proporsi optimum campuran antara semen dengan bahan pozzolanik.
2. Proporsi campuran optimum tersebut memberikan indikasi pencapaian sifat-sifat fisik dan mekanik beton secara optimal karena konsep yang digunakan adalah mengeliminasi senyawa kalsium hidroksida melalui reaksi pozzolanik.
3. Optimisasi sistem ternary C-A-S juga dapat dikembangkan di dalam pencampuran lebih dari dua jenis bahan.

Daftar Pustaka

- Ashad, H., 2008, *Ketahanan Material Beton dengan Bahan Substitusi Limbah Nikel terhadap Intrusi Mikroorganisme*, Disertasi Doktor, Sekolah Pascasarjana ITB.
- Mindess, S., and Young, J. F., 1981, *Concrete*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632,
- Siddique, R., 2000, *Special Structural Concretes* New Delhi: Galgotia Publications Pvt. Ltd.
- Taylor, H.F.W. 1997, *Cement Chemistry*, London: 2nd Edition, Thomas Telford.