

Analisis Mikrostruktur Beton Menggunakan Berbagai Bahan Solutan (Air Pencampur)

**Munandar Ibnu Nur¹, Raden Nayu Annisa R. Tjie²,
Hanafi Ashad³, Toni Utina⁴, Mukti Maruddin⁵**

^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia
Jl. Urip Sumoharjo Km 05 Panaikang, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90231
¹⁾ibnunuri@gmail.com; ²⁾nayuannisa@gmail.com; ³⁾hanafiashad@umi.ac.id;
⁴⁾toniutina@umi.ac.id; ⁵⁾muktimaruddin@umi.ac.id;

ABSTRAK

Perkembangan teknologi pada bidang Teknik sipil menciptakan berbagai penemuan-penemuan baru perihal struktur beton konstruksi suatu bangunan yang kuat awet serta ekonomis. Sehubungan dengan hal tersebut maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui perbandingan mikrostruktur pada beton menggunakan bahan solutan terhadap sifat mekanik beton. Pada penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian mikrostruktur beton menggunakan berbagai bahan solutan berupa air pencampur yang didapatkan dari PDAM, air rawa serta air sumur pada lokasi yang berbeda-beda, dengan menggunakan Scanning Dispersive Spectroscopy (EDS) dan alat Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengetahui bentuk dan ukuran partikel dari beton serta kandungan senyawa yang terdapat didalamnya. Hasil pada penelitian ini dapat disimpulkan pada bahan solutan (air campuran) terdapat kandungan Cl yang terkandung dimana dapat menimbulkan pori pada beton dengan ukuran sebesar 1,44 μm . SiO₂ dan CaO yang mempengaruhi kuat desak pada beton serta SO₄ yang mempengaruhi kekasaran dari permukaan beton dimana kandungan SO₄ < mg/l memiliki bentuk permukaan halus, sedangkan beton dengan bahan uji air yang memiliki massa SO₄ > 4 mg/l memiliki bentuk permukaan kasar.

Kata Kunci: Beton, bahan solutan, senyawa, air

ABSTRACT

The development of technology in the field of civil engineering creates various new discoveries regarding the concrete structure of the construction of a building that is durable and economical. In this regard, a study was conducted that aimed to determine the comparison of microstructures in concrete using solutan materials to the mechanical properties of concrete. In this study, a cylindrical test object with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm was used. Testing concrete microstructures using various insulated materials in the form of mixing water obtained from PDAM, swamp water and well water at different locations, using Scanning Dispersive Spectroscopy (EDS) and Scanning Electron Microscope (SEM) tools to determine the shape and particle size of concrete and the content of compounds contained in it. The results of this study can be concluded that in the solutan material (mixed water) there is a Cl content contained which can cause pores in concrete with a size of 1.44 μm . SiO₂ and CaO which affect the urgency strength of concrete and SO₄ which affects the roughness of the concrete surface where the SO₄ content < mg / l has a smooth surface shape, while concrete with water test material that has a mass of SO₄ > 4 mg / l has a rough surface shape.

Keywords: concrete, solutan material, compound, water

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan campuran yang terdiri atas semen air dan agregat kasar dan halus. Yang mengeras sehingga tercipta suatu bentuk fisik yang kokoh dan kuat seperti batuan. Beton dibuat dengan mencampur semen dan air serta agregat kasar dan halus, terkadang campuran beton diberikan bahan tambah (*addictive*) dengan kadar tertentu. Campuran tersebut akan mengeras seperti batuan disebabkan peristiwa reaksi kimia antara semen dengan air (Kamil et al., 2022).

Air merupakan komponen yang sangat penting dalam campuran beton sebagai pereaksi terhadap semen yang menentukan sifat workability dalam adukan beton serta sebagai factor penentu besar kecilnya nilai susut pada beton (Kim et al., 2021).

Berdasarkan regulasi yang ada dalam perencanaan pembuatan beton, syarat air dalam campuran beton merupakan air bersih, tanpa kandungan yang sifatnya dapat merusak. Namun sering dijumpai pada suatu kegiatan konstruksi para pekerja menggunakan air yang tersedia disekitar area konstruksi. Seperti tampungan air hujan, air rawa dan air sumur yang tentunya dalam keadaan yang tidak steril. Hal ini disebabkan kurangnya kesediaan air bersih disekitar sehingga permasalahan di atas menjadi solusi alternatif. Walaupun air yang digunakan tersebut belum layak sesuai yang diisyaratkan. Ini jelas dapat berpengaruh terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur pada beton tersebut. Maka dari itu kami sebagai penulis melakukan penelitian untuk menganalisa mikrostruktur beton menggunakan solutan (air pencampur) berbagai sumber sehingga mengetahui pengaruh dari setiap sumber solutan terhadap sifat mekanik pada beton (Yu et al., 2022)

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, adapun yang menjadi

rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana analisis mikrostruktur pada beton menggunakan berbagai solutan dengan alat uji *SEM-EDS*?
2. Bagaimana perbandingan mikrostruktur pada beton menggunakan bahan solutan terhadap sifat mekanik beton?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang diangkat di atas, maka penelitian ini bertujuan:

1. Untuk Menganalisis mikrostruktur beton pada berbagai bahan solutan menggunakan alat uji *SEM-EDS*.
2. Untuk mengetahui dan membandingkan mikrostruktur beton pada berbagai bahan solutan terhadap sifat mekanik beton

1.4 Batasan Masalah

Menyadari akan permasalahan tersebut, maka peneliti perlu membatasi masalah yang akan dibahas, yaitu:

1. Pada penelitian ini tidak dilakukan perlakuan secara khusus terhadap macam-macam solutan (air pencampur) yang akan digunakan
2. Semen yang digunakan ialah semen type PCC (*Portland Composite Cement*)
3. Sifat mekanik beton yang diuji hanya meliputi pengujian kuat tekan

2. Metode Penelitian

Jenis Peneliti yang digunakan adalah penelitian deskriptif, dimana suatu jenis penelitian yang bertujuan untuk membuat deskripsi, gambaran atau lukisan secara sistematis. Factual dan akurat mengenai fakta-fakta, sifat-sifat serta hubungan antar fenomena yang diselidiki. Metode deskriptif adalah pencarian fakta dengan interpretasi yang tepat. Di dalam penelitian ini membandingkan fenomena-fenomena tertentu sehingga merupakan suatu studi komparatif. Adakalanya peneliti mengadakan klasifikasi, serta penelitian

terhadap fenomena-fenomena dengan menetapkan suatu standar atau suatu norma tertentu sehingga banyak ahli menamakan metode deskriptif ini dengan nama survei normatif (Hariyanto et al., 2021). Metode yang digunakan didalam penelitian deskriptif ini adalah survei lapangan dan survei kepustakaan.

2.1 Variabel yang diteliti

Adapun variabel yang diteliti sebagai suatu parameter yang nantinya akan ditinjau ialah:

1. Karakteristik bahan solutan
2. Pemeriksaan semen
3. Pemeriksaan Agregat Kasar
4. Pemeriksaan Agregat Halus

2.2 Analisa Data

Setelah dilakukan pengumpulan data, dilakukan pengolahan data berikut:

1. Perancangan Campuran Beton (Mix Design)

Mix Design berdasarkan (Istimawan, 2022) mengatur bahwasannya suatu campuran persyaratan beton didesign dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan- bahan material di lapangan, *workability*, serta keawetan dan kekuatan dari beton tersebut. Adapun dalam membuat suatu campuran beton tetap dengan memperhatikan regulasi serta persyaratan yang berlaku

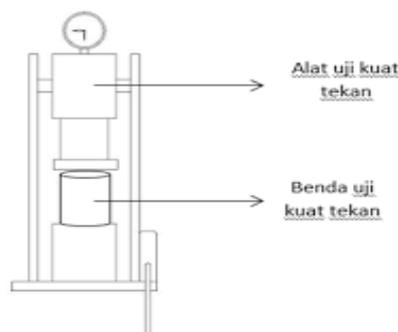
2. Pembuatan dan perawatan beton

Pembuatan material campuran beton dilakukan setelah selesai menghitung perencanaan campuran beton (*mix design*) dan agregat yang digunakan

dalam keadaan *saturated surface dry (SSD)* dengan menggunakan molen sebagai media dalam membuat beton yang dilanjutkan dengan melakukan pracetak terhadap wadah yang digunakan berupa silinder dengan dimensi tertentu dan dengan tahap terakhir ialah berupa perawatan beton guna untuk menjaga permukaan beton segar selalu lembab sejak adukan beton dipadatkan untuk menjamin agar proses hidrasi dapat berlangsung dengan baik dan proses pengerasan terjadi dengan sempurna tanpa ada cacat fisik dengan batas waktu umur pengujian. Terdapat pengujian yang sangat penting ialah *slump test* yang ditujukan untuk mengetahui tingkat kekentalan dari cetakan beton yang telah dibuat. Pengujian slump yang direncanakan berada pada interval nilai 60 – 100 mm. dengan menggunakan panduan SK SNI-1972-2008. Bacaan slump test yang semakin rendah menandakan tingkat kekentalan dari campuran beton tersebut semakin rendah dan begitupun sebaliknya. Hal yang mempengaruhi tingkat kekentalan slump ialah banyaknya penggunaan factor air koreksi sehingga menyebabkan penggunaan air berlebih dan merusak ikatan pada beton yang menyebabkan banyaknya udara yang menghinggap sehingga menimbulkan banyaknya porositas yang terjadi pada beton

3. Pengujian Sifat Mekanik Beton

Pengujian sifat mekanik beton merupakan suatu pengujian untuk mengetahui kemampuan beton untuk menerima tegangan/ pembebanan per satuan luasnya.



Gambar 1 Pengujian Kuat Desak Beton

Analisis Mikrostruktur Beton Menggunakan Berbagai Bahan Solutan (Air Pencampur)

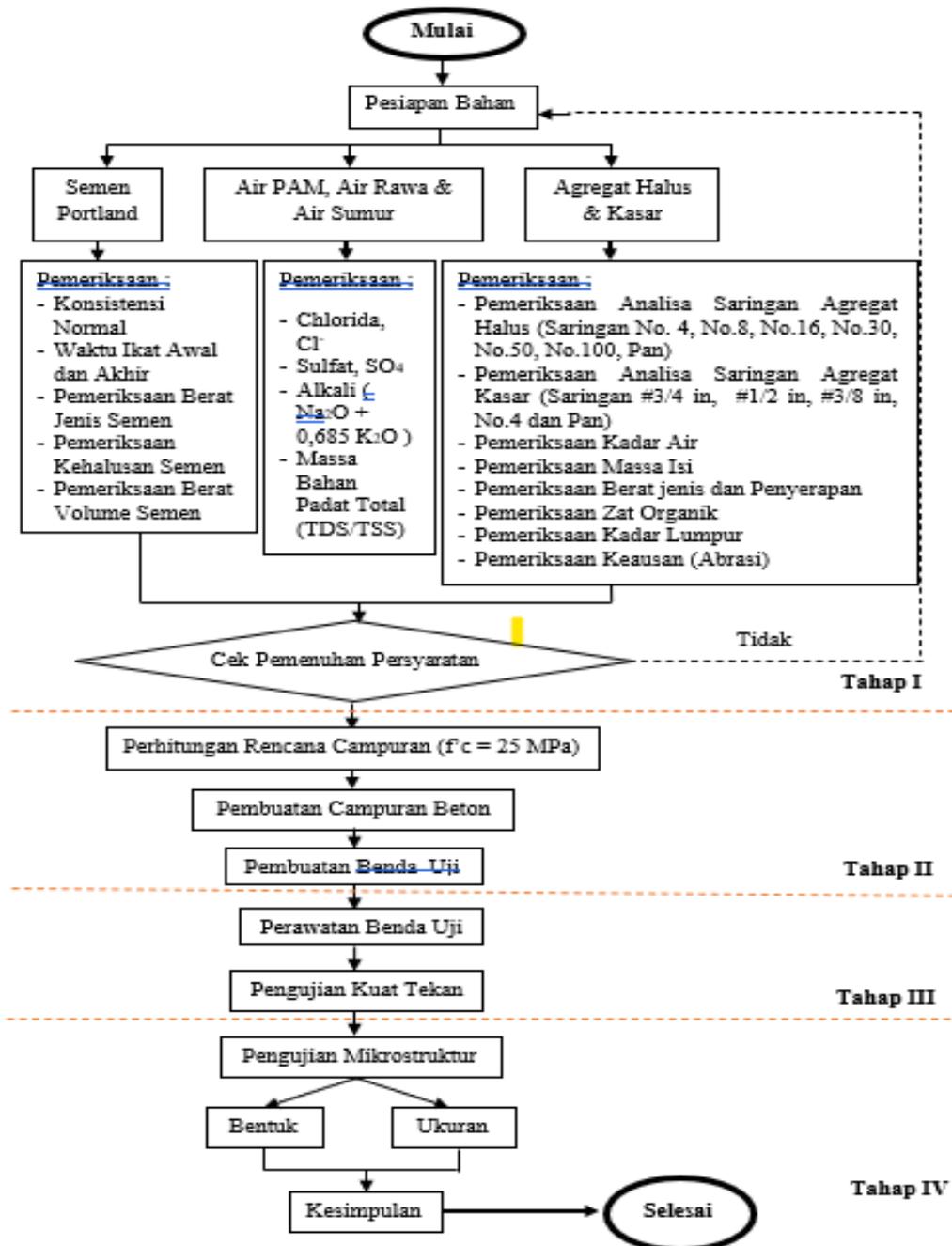
Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur beton. Semakin tinggi kekuatan struktur rencana maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan.

4. Pengujian Mikrostruktur
 Pengujian mikrostruktur ditujukan untuk mengidentifikasi bentuk dan ukuran partikel dari beton berdasarkan data hasil bacaan secara visual oleh alat *Scanning*

Electron Microscope (SEM) yang dipadukan dengan *Electron Dispersive Spectroscopy* (EDS) (Ashad et al., 2006).

2.3 Bagan Alir Penelitian

Direncanakan tahapan- tahapan yang akan menjadi pedoman dan arahan bagi penelitian ini, dapat dilihat pada bagan alir berikut.



Gambar 2 Bagan alir penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemeriksaan Agregat Kasar

Berdasarkan hasil pemeriksaan sifat-sifat fisik untuk agregat kasar beton menggunakan berbagai bahan solutan, pada penelitian ini didapatkan hasil.

Tabel 1 Rekapitulasi pemeriksaan agregat kasar

No.	Karakteristik Pemeriksaan Agregat Kasar	Hasil	Spesifikasi
1.	Modulus Kehalusan	6,81	6,10 – 7,1
2.	Kadar Air	1,71 %	≤ 2%
3.	Berat Volume		
	Gembur	1654,8751 Kg/ m ³	1280 – 1920
	Padat	1731,422 Kg/ m ³	Kg/m ³
4.	Spesific Gravity		
	BJ. Curah	2,701	2,3 – 2,9
	BJ. Kering Permukaan	2,734	2,3 – 2,9
	BJ. Semu	2,814	2,3 – 2,9
5.	Absorbsi	2,232 %	≤ 8 %
6.	Kadar Lumpur	1,275 %	≤ 1 %
7.	Keausan	25,32 %	≤ 40 %

3.2 Pemeriksaan Agregat Halus

Berdasarkan hasil pemeriksaan sifat-sifat fisik untuk agregat halus beton

menggunakan berbagai bahan solutan, pada penelitian ini didapatkan hasil .

Tabel 2 Rekapitulasi Pemeriksaan Agregat Halus

No.	Karakteristik Pemeriksaan Agregat Halus	Hasil	Spesifikasi
1.	Modulus Kehalusan	2,75	2,3 – 3,1
2.	Kadar Air	4,10 %	≤ 5 %
3.	Absorbsi	5,162 %	≤ 8 %
4.	Berat Volume		
	Gembur	1329,437 Kg/ m ³	1280 – 1920 Kg/m ³
	Padat	1542,846 Kg/ m ³	
5.	Spesific Gravity		
	BJ. Curah	2,783	2.3 - 2.9
	BJ. Kering Permukaan	2,458	2.3 - 2.9
	BJ. Semu	2,814	2.3 - 2.9
6.	Kadar Lumpur	4,47 %	≤ 5 %
7.	Kadar Organik	Lebih muda dari warna standar No.2	Standar Warna

3.3 Pemeriksaan Semen

Berdasarkan hasil pemeriksaan sifat-sifat fisik untuk semen PCC beton

menggunakan berbagai bahan solutan, pada penelitian ini didapatkan hasil.

Tabel 3 Rekapitulasi Pemeriksaan Semen

No.	Karakteristik Semen	Hasil	Spesifikasi
1.	Berat Jenis	3,146	3,05 – 3,25
2.	Kehalusan # No.100	100 %	90 – 100 %
3.	Kehalusan # No.200	90 %	90 – 100 %
4.	Berat Volume		
	Gembur	1,195 Kg/ltr	1,1 – 1,4 Kg/ltr
	Padat	1,209 Kg/ltr	
5.	Konsistensi Normal	22 %	22% - 30%
6.	Waktu Ikat Awal	45 menit	Min 45 menit
7.	Waktu Ikat Akhir	120 menit	Maks 360 menit

3.4 Air PAM, Sumur, dan Air Rawa

Berdasarkan hasil pemeriksaan karakteristik kandungan kimia air

pencampur beton berbagai bahan solutan, pada penelitian ini didapatkan hasil.

Bahan Kimia Senyawa (mg/l)	SNI 7974 : 2013 (Batas Maksimum Konsentrasi, ppm)	Air PAM (AP)	Air Sumur (AS)	Air Rawa (AR)
Chlorida (Cl)	500	4,83	66,52	1703
Sulfat (SO ₄)	3000	< 4	< 4	149,5
Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	600	13,55	69,63	716,86
Massa bahan padat total	50 000	118	669	6372

Tabel 4 Rekapitulasi pemeriksaan bahan soluta (air pencampur)

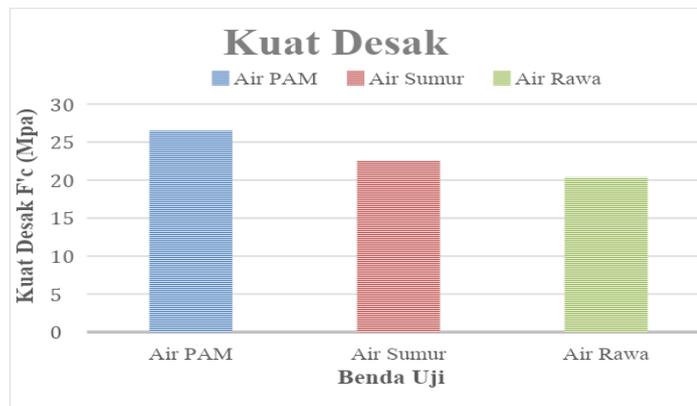
3.5 Sifat Mekanik Beton

Berdasarkan hasil pengujian kuat desak untuk beton berbagai bahan solutan pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa nilai kuat desak yang dihasilkan oleh beton pada umur 28 dengan air yang

berbeda diperoleh hasil untuk air PAM sebesar 26,496 Mpa, air sumur sebesar 22,598 Mpa dan air rawa 20,889 Mpa. Kekuatan beton mengalami peningkatan pada air PAM sebesar 5,984%,

sedangkan kekuatan beton mengalami penurunan pada air sumur sebesar 9,608% dan air rawa sebesar 18,504%

dari mutu beton yang direncanakan. Berikut grafik kuat desaknya



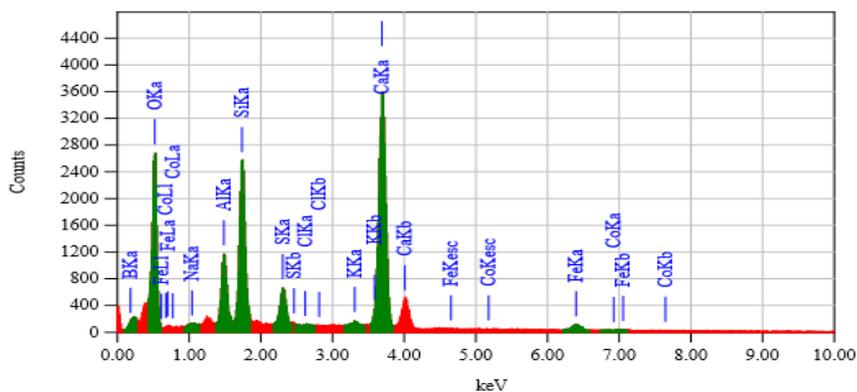
Gambar 3 Perbandingan Kuat tekan pada variasi bahan solutan

3.6 Pengujian Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur pada variasi bahan solutan dilakukan dengan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) yang bertujuan untuk mengetahui tiap perbedaan dari masing-masing permukaan beton dengan bahan solutan (air pencampur yang berbeda). Pembesaran secara berkala dilakukan pada pengamatan yang dilakukan yang berturut 1000x dan 8000x untuk

mengetahui detailing pada permukaan beton (Rosian, 2013)

Selain daripada SEM dalam pengujian mikro struktur kita melakukan pengamatan dengan menggunakan Dispersive X- Ray (EDX). Pengamatan ini dilakukan sebagai hasil screening terhadap keseluruhan senyawa yang terkandung pada setiap bahan solutan yang digunakan dalam campuran beton

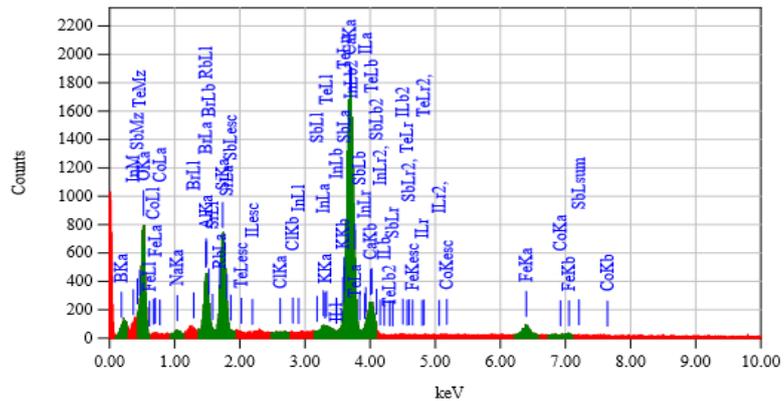


Gambar 4 Hasil pengujian Mikrostruktur EDX terhadap Air PAM

Analisis Mikrostruktur Beton Menggunakan Berbagai Bahan Solutan (Air Pencampur)

Hasil pengujian EDX (Energy Disperative Xray) terdapat fasa yang mengeluarkan hasil berupa unsur dimana Kalsium (Ca) dengan massa 51,46%, Silikon (Si) dengan massa 22,46%, dan Oksigen (O) dengan massa 13,88%.

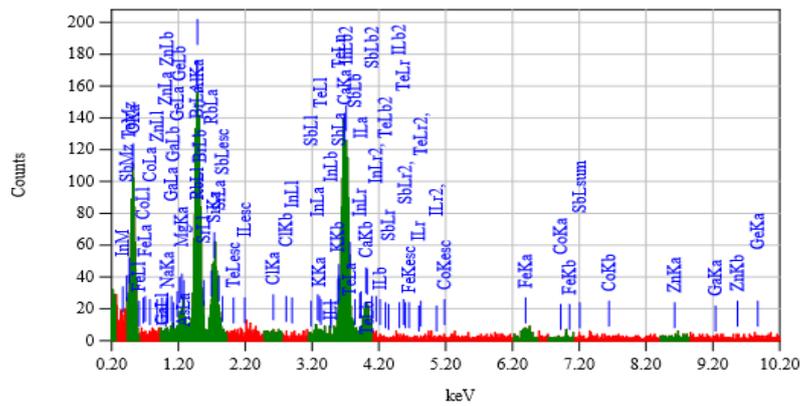
Kemudian pengujian juga terdapat fasa yang mengeluarkan hasil berupa senyawa dimana Kalsium Oksida (CaO) dengan massa 49,09% dan Silica (SiO₂) dengan massa 22,46%.



Gambar 5 Hasil pengujian Mikrostruktur EDX terhadap Air Sumur

Hasil pengujian EDX (Energy Disperative Xray) terdapat fasa yang mengeluarkan hasil berupa unsur dimana Kalsium (Ca) dengan massa 48,55%, Silikon (Si) dengan massa 8,01%, dan Oksigen (O) dengan massa 7,55%.

Kemudian pengujian juga terdapat fasa yang mengeluarkan hasil berupa senyawa dimana Kalsium Oksida (CaO) dengan massa 46,45% dan Silica (SiO₂) dengan massa 11,97%.



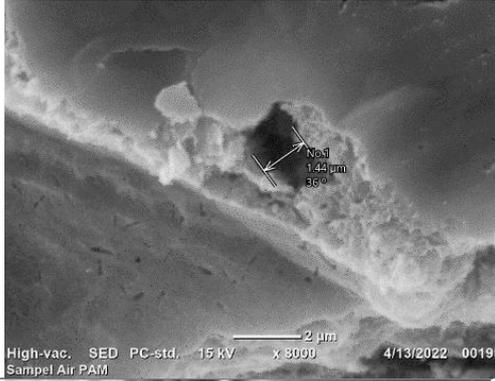
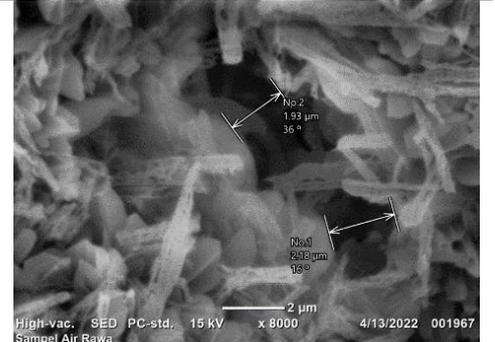
Gambar 6 Hasil pengujian Mikrostruktur EDX terhadap Air Rawa

Hasil pengujian EDX (Energy Disperative Xray) terdapat fasa yang mengeluarkan hasil berupa unsur dimana Kalsium (Ca) dengan massa 3,77%, Silikon (Si) dengan massa 8,01%, dan

Oksigen (O) dengan massa 7,06%. Kemudian pengujian juga terdapat fasa yang mengeluarkan hasil berupa senyawa dimana Kalsium Oksida (CaO)

dengan massa 25,35% dan Silica (SiO₂)
dengan massa 5,49%.

Tabel 5 Korelasi Nilai Kandung Senyawa terhadap Kuat tekan serta bentuk permukaan beton dengan menggunakan SEM

No	Benda Uji	SO ₄ (mg/l)	Kuat Desak Rata-Rata Beton (MPa)	Bentuk Permukaan Beton
1	Air PDAM	<4	26,496	
2	Air Sumur	<4	22,598	
3	Air Rawa	149,5	20,374	

Dari hasil tabel 5 tersebut terlihat bahwa beton dengan menggunakan bahan uji air PDAM memiliki massa SO₄ sebesar <4 mg/l, nilai kuat tekan sebesar 26,496 MPa, dan bentuk permukaannya halus serta padat. Lalu beton dengan bahan uji air sumur memiliki massa SO₄ sebesar <4 mg/l, nilai kuat tekan sebesar 22,598 MPa, dan bentuk permukaannya kasar

dibeberapa bagian serta padat. Dan beton dengan bahan uji air rawa massa SO₄ sebesar 149,5 mg/l, nilai kuat tekan sebesar 20,374 MPa, dan bentuk permukaannya kasar sepenuhnya serta padatan cenderung berbentuk bulir beras. Nilai sulfat pada beton berbanding terbalik dengan nilai kuat desak beton, semakin tinggi kandungan sulfat maka

akan semakin rendah nilai kuat desaknya. Karena SO₄ merupakan senyawa kimia korosif.

Tabel 6 Korelasi Nilai Silika (SiO₂) dan Kalsium oksida (CaO) dengan nilai kuat desak rata-rata beton

No	Benda Uji	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Nilai Kuat Desak Rata-Rata Beton (MPa)
1	Air PDAM	22,46	49,09	26,496
2	Air Sumur	11,97	46,45	22,598
3	Air Rawa	5,49	25,35	20,374

Reaksi antar unsur Si (Silikon), Ca (Kalsium), dan O₂ (Oksigen) menghasilkan senyawa SiO₂ (silikat) dan CaO (kapur bebas). Dimana ketika SiO₂ dan CaO bertemu, maka akan terjadi reaksi pengikatan antar senyawa yang akan membantu lekatan pada beton.

4. Penutup

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil Penelitian mengenai "Analisis Mikrostruktur Beton Menggunakan Berbagai Bahan Solutan (Air Pencampur) diambil kesimpulan sebagai berikut

1. a. Kandungan Cl yang terdapat di dalam air pencampur merupakan unsur yang dapat menimbulkan pori pada beton. Ukuran pori pada beton mempengaruhi bentuk fisik pada beton. Beton akan rentan terhadap penyerapan air yang dapat menimbulkan korosi terhadap struktur beton bertulang.
- b. Nilai SiO₂ dan CaO berbanding lurus dengan nilai kuat desak, dimana semakin tinggi nilai SiO₂ dan CaO maka semakin tinggi pula nilai kuat desaknya.
- c. Beton dengan menggunakan bahan uji air yang memiliki massa SO₄ <4 mg/l memiliki bentuk permukaan

halus sedangkan, beton dengan bahan uji air yang memiliki massa SO₄ >4 mg/l memiliki bentuk permukaan kasar.

2. a. Beton dengan menggunakan bahan uji air PDAM memiliki massa Cl sebesar 4,83 mg/l dengan ukuran pori 1,44 μm, lalu beton dengan bahan uji air sumur memiliki massa Cl sebesar 66,52 mg/l serta memiliki ukuran pori 2,31 μm, dan beton dengan bahan uji air rawa memiliki massa Cl sebesar 1703 mg/l serta memiliki jumlah ukuran pori 4,11 μm.
- b. Beton dengan menggunakan bahan uji air PDAM memiliki massa SiO₂ sebesar 22,46%, massa CaO sebesar 49,09% dan nilai kuat desak 26.496MPa. Beton dengan menggunakan bahan uji air sumur memiliki massa SiO₂ sebesar 11,97%, massa CaO sebesar 46,45% dan nilai kuat desak sebesar 22,598 MPa. Dan beton dengan menggunakan bahan uji air sumur memiliki massa SiO₂ sebesar 5.49%, massa CaO sebesar 25.35% dan nilai kuat desak sebesar 20.374MPa.

- c. Beton dengan menggunakan bahan uji air PDAM memiliki massa SO₄ sebesar <4 mg/l serta nilai kuat desaknya sebesar 26,496 MPa. Lalu beton dengan bahan uji air sumur memiliki massa SO₄ sebesar <4 mg/l serta nilai kuat desaknya sebesar 22,598 MPa. Dan beton dengan bahan uji air rawa massa SO₄ sebesar 149,5 mg/l serta nilai kuat desaknya sebesar 20,374 MPa.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian diusulkan beberapa saran sebagai berikut

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai sifat fisik beton terhadap penggunaan sumber solutan dari penelitian ini menggunakan alat analisis mikrostuktur lainnya.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan air sumur dan air rawa dari beberapa sumber berbeda dalam campuran beton, dengan umur pengujian kuat desak beton yang berbeda.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan air dari beberapa sumber berbeda dalam campuran beton.
4. Pengujian selanjutnya diberikan perlakuan terlebih dahulu kepada air antara lain melakukan proses filtrasi agar dapat menghasilkan air yang lebih bersih dari sebelumnya.

Daftar Pustaka

Ashad, N., Imran, A., & Soegiri, S. (2006). Degradasi Kekuatan Beton Akibat Intrusi Mikroorganisme.

Jurnal Teknik Sipil ITB, 13(3), 151–158.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>

Hariyanto, G., Ashad, H., & Alifuddin, A. (2021). Pengaruh Modulus Kehalusan Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 6(3), 193–202.

Istimawan, D. (2022). "Struktur Beton Bertulang." 9, 18–22.

Kamil, F., Hadi, A. M., Ashad, H., Fadhil Arsyad, & Syarif, M. B. (2022). Pengaruh Penggunaan Solutan (Air Pencampur) Berbagai Sumber Terhadap Sifat-Sifat Mekanik Beton. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Sipil*, 4(1), 14–16.

Kim, H. T., Razakamandimby R., D. F. T., Szilágyi, V., Kis, Z., Szentmiklósi, L., Glinicki, M. A., & Park, K. (2021). Reconstruction of concrete microstructure using complementarity of X-ray and neutron tomography. *Cement and Concrete Research*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106540>

Rosian, M. S. (2013). Komparasi Penggunaan Limbah Kaca pada Campuran HRS dan SMA terhadap Karakteristik Marshall dan Workabilitas. *Teknik Sipil*, 2(5), 1–8.

Yu, H., Meng, T., Zhao, Y., Liao, J., & Ying, K. (2022). Effects of basalt fiber powder on mechanical properties and microstructure of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17(5), 17–19.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01286>