Analisa Mikrostruktur Beton Menggunakan Air Bekas Wudu

Hapsa Nurika Sukardi[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Parepare, Indonesia

***email**: hapsanurika06@gmail.com

Diterima: Disetujui:

Abstract

This study aims to evaluate the effect of using ablution wastewater as a substitute for clean water on the compressive strength and microstructure of concrete. The analysis methods used include compressive strength testing, X-ray Diffraction (XRD), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The use of ablution water is considered an effort to conserve clean water resources while utilizing light wastewater from religious activities. Three concrete variations were tested: normal concrete, concrete mixed with 50% ablution water, and concrete mixed with 100% ablution water. The results showed an increase in compressive strength at 28 days of age, with values of 12.89 MPa, 13.78 MPa, and 14.25 MPa, respectively. XRD analysis indicated a reduction in calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$) compounds and an increase in C–S–H and carbonate (CO_3^{2-}) formations, suggesting a more optimal hydration process. FTIR results supported this, showing a decrease in hydroxyl (OH) groups and an increase in the absorption bands of Si–O and CO_3^{2-} groups. Overall, the use of ablution wastewater improves both the mechanical properties and microstructure of concrete. This innovation not only supports sustainability in civil engineering but also aligns with the spiritual values of Indonesia's Muslim community.

Keywords: *concrete, ablution wastewater, compressive strength, XRD, FTIR, microstructure*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan air bekas wudu sebagai pengganti air bersih terhadap kuat tekan dan mikrostruktur beton. Metode analisis yang digunakan meliputi uji kuat tekan, X-ray Diffraction (XRD), dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Penggunaan air bekas wudhu dipertimbangkan sebagai upaya efisiensi air bersih sekaligus solusi pemanfaatan limbah cair dari aktivitas ibadah. Tiga variasi sampel diuji, yaitu beton normal, beton dengan 50% air wudu, dan beton dengan 100% air wudu. Hasil menunjukkan peningkatan kuat tekan pada umur 28 hari, masing-masing sebesar 12,89 MPa, 13,78 MPa, dan 14,25 MPa. Analisis XRD menunjukkan penurunan senyawa $Ca(OH)_2$ serta peningkatan C–S–H dan karbonat (CO_3^{2-}), yang menandakan reaksi hidrasi yang lebih optimal. Hasil FTIR mendukung temuan ini dengan menurunnya gugus OH dan meningkatnya intensitas pita Si–O dan CO_3^{2-}. Secara keseluruhan, penggunaan air bekas wudu terbukti meningkatkan kualitas mekanik dan mikrostruktur beton. Inovasi ini tidak hanya mendukung prinsip keberlanjutan dalam teknik sipil, tetapi juga mengandung nilai spiritual yang sejalan dengan budaya masyarakat Muslim di Indonesia.

Kata Kunci: *beton, air bekas wudu, kuat tekan, XRD, FTIR, mikrostruktur*

1. Pendahuluan

Beton sendiri merupakan material bangunan yang tersusun dari campuran semen portland, air, agregat kasar seperti kerikil, agregat halus seperti pasir, serta bahan tambahan jika diperlukan. Komposisi dari bahan-bahan ini harus dirancang dengan tepat agar menghasilkan beton segar yang mudah untuk diolah dan diaplikasikan. Penggunaan beton sebagai material bangunan sangat populer di Indonesia karena bahan-bahannya seperti batu pecah, kerikil, pasir, semen, dan air mudah diperoleh serta memiliki harga yang relatif terjangkau. Dalam praktik di lapangan, sering ditemui para pekerja proyek pembangunan rumah tinggal yang menggunakan air limbah, seperti air selokan, dalam proses pencampuran beton. Kondisi ini tentu membutuhkan perhatian dan pemeriksaan lebih lanjut terhadap kualitas beton yang dihasilkan [1]. Peneliti melihat adanya potensi besar dari air bekas wudu yang sangat melimpah, khususnya di Indonesia yang mayoritas penduduknya beragama Islam, yaitu sekitar 231,06 juta jiwa atau sekitar 86,7% dari total populasi, sebagaimana dilaporkan oleh The Royal Islamic Strategic Studies Centre (RISSC). Di berbagai masjid, sering kali terlihat air bekas wudu terbuang tanpa dimanfaatkan, padahal setiap individu rata-rata menggunakan setidaknya 600 mililiter air saat berwudu, sesuai dengan anjuran Rasulullah Saw. Jika dihitung, satu orang dapat menggunakan minimal 3 liter air wudu per hari, 21 liter per minggu, 90 liter per bulan, dan 1.080 liter per tahun. Tanpa adanya pemanfaatan yang tepat, seluruh jumlah air bekas wudu ini akan terbuang sia-sia [2]. Berdasarkan fenomena tersebut, muncul gagasan untuk memanfaatkan air bekas wudu sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton. Namun, hal ini tentunya memerlukan pengujian secara cermat terhadap kualitas beton yang dihasilkan. Oleh sebab itu, penelitian ini dianggap penting untuk dilakukan dengan tujuan mengevaluasi mutu beton yang dicampur menggunakan air bekas wudu.

Air dapat digunakan sebagai bahan campuran dalam beton apabila kandungan senyawa organiknya telah dinetralisir hingga mencapai kadar maksimal 20 ppm. Peran air dalam campuran beton sangat penting, yaitu sebagai bahan penghidrasi semen agar dapat berfungsi sebagai perekat, serta sebagai pelumas untuk mempermudah proses pencampuran antara semen dan agregat, sekaligus mendukung kemudahan dalam pelaksanaan pengecoran beton (workability) [3]. Sementara itu, kuat tekan merupakan ukuran kemampuan beton dalam menahan beban tekan per satuan luas. Kuat tekan beton diperoleh dari pengujian menggunakan alat tekan khusus yang memberikan gaya tekan hingga beton mengalami kerusakan. Nilai kuat tekan ini menjadi indikator utama untuk menentukan mutu dan kualitas beton, yang dipengaruhi oleh komposisi agregat, semen, dan air dalam campuran. Suatu campuran beton dinyatakan berhasil apabila mampu mencapai nilai kuat tekan yang telah dirancang dalam perencanaan campuran (mix design) [3].

2. Metodologi Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yaitu jenis penelitian yang menitikberatkan pada pengolahan dan analisis data numerik. Seluruh tahapan mulai dari proses pengumpulan data, interpretasi hasil, hingga penyajian data dilakukan dalam bentuk angka dan divisualisasikan melalui tabel, grafik, atau gambar untuk mendukung pemahaman hasil secara objektif. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis berdasarkan prosedur yang berlaku dalam pengujian laboratorium. Adapun metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental, yaitu pendekatan yang bertujuan untuk mengamati pengaruh variabel tertentu terhadap objek yang diuji. Dalam konteks penelitian ini, dilakukan pembandingan terhadap tiga variasi campuran beton guna mengevaluasi perbedaan karakteristik kuat tekan, serta mikrostruktur dari beton yang telah dibuat.

Total 27 sampel dibuat berbentuk silinder berukuran 15 x 30 cm dengan tiga varasi, yakni beton normal, beton 50% campuran air bekas wudu dan beton 100% campuran air bekas wudu . Proses pencampuran dilakukan pada laboratorium Struktur dan Bahan Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Parepare, sementara pengujian analisa mikrostrukturnya akan dilaksanakan pada laboratorium Fisika Material dan Energi Universitas Hasanuddin, Makassar.

3. Hasil dan Pembahasan

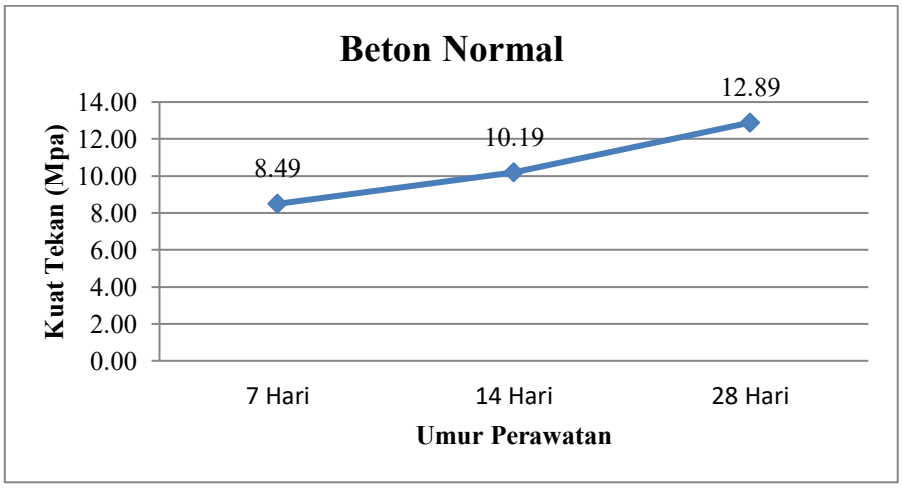
a. Hasil uji kuat tekan beton

Standar pengujian kuat tekan benda uji menggunakan SNI 1974:2011. Berdasarkan grafik yang ditampilkan, terlihat bahwa beton normal mengalami peningkatan kuat tekan secara bertahap seiring bertambahnya umur beton. Pada pengujian umur 7 hari hingga 14 hari, terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 1,70 Mpa, yang mencerminkan berlangsungnya proses hidrasi secara aktif pada tahap awal

pengerasan beton. Selanjutnya, dari umur 14 hari ke 28 hari, peningkatan kuat tekan mencapai 2,70 Mpa, menunjukkan bahwa reaksi hidrasi berlanjut secara progresif hingga beton mencapai kematangan struktural pada umur standar 28 hari.

Tabel 1. Rekap hasil kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No.	Umur	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan f'c (MPa)
1	7 Hari	11.737	150	8.49
2	14 Hari	11.860	180	10.19
3	28 Hari	11.764	227.7	12.89

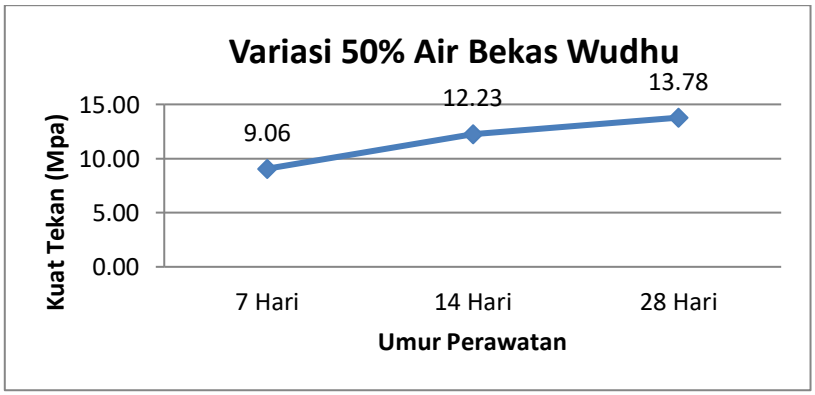


Gambar 1. Grafik pengujian kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Pada beton dengan campuran 50% air bekas wudu dari grafik yang disajikan, dapat diamati bahwa beton dengan campuran 50% air bekas wudu menunjukkan tren peningkatan kuat tekan secara konsisten seiring bertambahnya umur beton. Pada periode 7 hingga 14 hari, terjadi peningkatan sebesar 3,17 MPa, yang mengindikasikan aktivitas hidrasi masih berlangsung secara intens pada fase awal pengerasan. Selanjutnya, antara umur 14 hingga 28 hari, kuat tekan meningkat sebesar 1,55 MPa, yang menunjukkan bahwa proses hidrasi tetap berlanjut secara berkelanjutan hingga beton mencapai kekuatan optimal pada umur 28 hari.

Tabel 2. Rekap hasil kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No.	Umur	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan f'c (MPa)
1	7 Hari	12.015	160.00	9.06
2	14 Hari	11.931	216.00	12.23
3	28 Hari	11.993	243.33	13.78

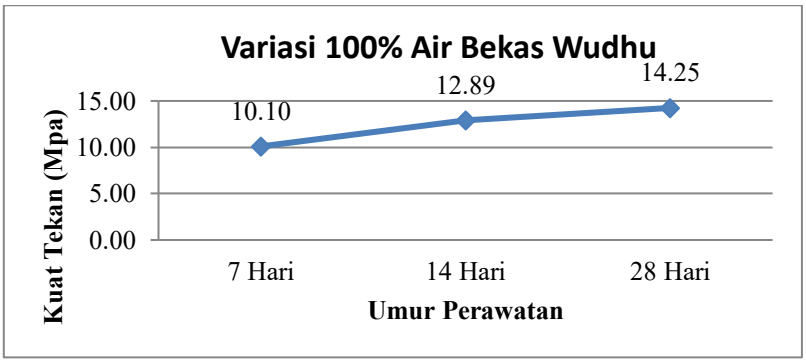


Gambar 2. Grafik pengujian kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Dan pada beton dengan campuran 100% air bekas wudu , merujuk pada grafik yang tersaji, dapat diamati bahwa beton normal menunjukkan peningkatan kuat tekan secara konsisten seiring dengan bertambahnya umur beton. Pada periode pengujian antara hari ke-7 hingga hari ke-14, tercatat adanya kenaikan kuat tekan sebesar 2,79 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa proses hidrasi berlangsung intensif selama tahap awal pengerasan. Selanjutnya, antara hari ke-14 hingga ke-28, kuat tekan meningkat sebesar 1,36 MPa, yang menunjukkan bahwa reaksi hidrasi terus berlanjut secara bertahap hingga beton mencapai kekuatan optimal pada usia 28 hari.

Tabel 3. Rekap hasil kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No.	Umur	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan f'c(MPa)
1	7 Hari	11.971	178.33	10.10
2	14 Hari	11.873	227.67	12.89
3	28 Hari	11.976	251.67	14.25



Gambar 3. Grafik pengujian kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

b. Hasil analisis mikrostrutur

Hasil karakterisasi X-ray Diffraction (XRD) pada tiga variasi sampel beton (0%, 50%, dan 100% substitusi air wudu) menunjukkan adanya perbedaan pola difraksi yang mencerminkan perubahan dalam struktur kristal akibat substitusi air wudu . Pola XRD yang dihasilkan menunjukkan puncak-puncak karakteristik dari senyawa hasil hidrasi semen, seperti kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$), kalsium silikat hidrat (C-S-H), kalsium aluminat silikat hidrat (C-A-S-H), dikalsium silikat (C_2S), dan keberadaan silika (SiO_2) [4]. Pada sampel **0%** (menggunakan air biasa), pola difraksi menunjukkan intensitas puncak yang kuat pada 2θ sekitar 21°, dan 55°, yang mengindikasikan adanya fase kristalin dari $Ca(OH)_2$ sebagai hasil hidrasi semen. Puncak dominan lainnya berada pada sekitar 27° dan 40°, yang dikaitkan dengan fase C-S-H dan C_2S. Senyawa C-S-H merupakan produk utama dalam proses hidrasi semen yang berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik beton [5]. Keberadaan C-A-S-H pada sudut sekitar 29° menunjukkan bahwa reaksi antara aluminat dan silikat juga terjadi, yang dapat meningkatkan durabilitas beton. Keberadaan SiO_2 dalam jumlah kecil juga terdeteksi, yang kemungkinan berasal dari agregat halus (pasir) atau dari hidrasi yang tidak sempurna.

Pada sampel **50%** (substitusi 50% air wudu), pola XRD menunjukkan perubahan intensitas pada beberapa puncak utama, terutama pada $Ca(OH)_2$, C-S-H, dan C-A-S-H. Penurunan intensitas puncak $Ca(OH)_2$ pada sekitar 18° dan 21° menunjukkan bahwa reaksi hidrasi semen dengan air wudu menghasilkan lebih sedikit portlandit dibandingkan dengan beton konvensional [6]. Hal ini dapat disebabkan oleh kandungan ion-ion mineral dalam air wudu, seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+}, yang dapat berinteraksi dengan komponen semen, membentuk senyawa tambahan atau mempercepat konversi $Ca(OH)_2$ menjadi C-S-H. Selain itu, peningkatan intensitas C-S-H pada 28° menunjukkan bahwa substitusi air wudu dapat mempercepat proses hidrasi dan meningkatkan fase gel hidrat yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan awal beton.

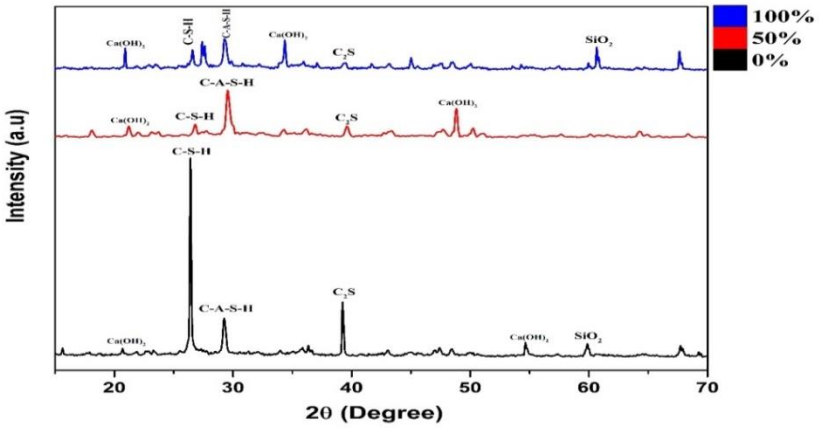
Pada sampel **100%** (substitusi penuh air wudu), pola difraksi menunjukkan penurunan yang lebih signifikan pada puncak $Ca(OH)_2$, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar kalsium hidroksida telah bereaksi membentuk senyawa hidrat lainnya. Hal ini mengarah pada dominasi fase amorf, yang dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif karena berkurangnya ketersediaan $Ca(OH)_2$

yang rentan terhadap reaksi sulfat atau karbonasi [7]. Selain itu, intensitas puncak C-S-H tetap tinggi, menunjukkan bahwa substitusi penuh air wudu tetap mendukung pembentukan fase hidrat utama dalam beton. Namun, peningkatan jumlah ion dalam air wudu mungkin juga memengaruhi struktur mikro beton, yang perlu dievaluasi lebih lanjut dalam aspek mekanis dan durabilitasnya.

Secara keseluruhan, hasil analisis XRD menunjukkan bahwa substitusi air wudu dalam campuran beton berpengaruh terhadap reaksi hidrasi semen, dengan indikasi penurunan jumlah $Ca(OH)_2$ dan peningkatan pembentukan C-S-H. Substitusi sebagian (50%) menunjukkan keseimbangan antara fase kristalin dan amorf, yang dapat meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton. Sementara itu, substitusi penuh (100%) menghasilkan dominasi fase amorf yang dapat meningkatkan ketahanan lingkungan, meskipun efeknya terhadap sifat mekanik perlu dikaji lebih lanjut. Temuan ini menjadi dasar penting dalam mengevaluasi potensi penggunaan air wudu sebagai bahan substitusi dalam campuran beton serta dampaknya terhadap performa beton jangka panjang.

Tabel 1. Reaksi kimia dan senyawa hasil dari analisis XRD (sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

No	Senyawa yang Terindentifikasi	Reaksi atau Asal Terbentuknya	Peran dalam Beton
1	$Ca(OH)_2$ (Portlandit)	$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$	Produk hidrasi awal, rentan terhadap karbonasi dan sulfat
2	C-S-H (Calcium Silicate Hydrate)	$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$	Fase gel utama, memberi kekuatan beton
3	C-A-S-H (Calcium Alumino-Silicate Hydrate)	Reaksi aluminat dan silikat dengan Ca^{2+} dan air	Meningkatkan durabilitas dan mikrostruktur
4	C_2S (Dicalcium Silicate)	Komponen semen yang mengalami hidrasi lambat	Memberi kekuatan jangka panjang
5	SiO_2 (Silika amorf)	Dari agregat atau hidrasi tidak sempurna	Dapat bereaksi membentuk C-S-H sekunder



Gambar 3. G Grafik analisis XRD (sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

Penggunaan air dalam konstruksi memiliki peran penting dalam menentukan kualitas dan ketahanan beton. Dalam penelitian ini, dilakukan karakterisasi menggunakan Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) untuk menganalisis pengaruh penggunaan air wudu terhadap struktur kimia beton dibandingkan dengan air biasa. Sebagaimana dalam Islam, air wudu memiliki nilai kesucian, sebagaimana disebutkan dalam Al-Qur'an: "Dan Allah menurunkan kepadamu air dari langit untuk menyucikan kamu dengan dia..." (QS. Al-Anfal: 11).

Berdasarkan hasil spektrum FTIR, beberapa gugus fungsional yang teridentifikasi meliputi gugus hidroksil (OH) sekitar 3400 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan air dalam beton, gugus sulfat (S-O) sekitar 1400 cm^{-1} yang berasal dari semen Portland, serta karbonat (CO_3^{2-}) di sekitar 1400 cm^{-1} dan 870 cm^{-1} yang menandakan keberadaan kalsium karbonat dalam semen. Selain itu, gugus silika (Si-O) sekitar

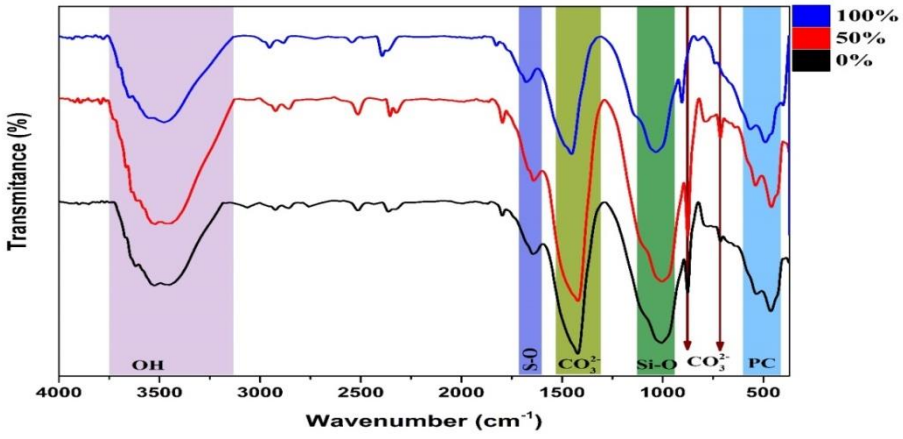
1000 cm^{-1} mengindikasikan pembentukan C-S-H (Calcium-Silicate-Hydrate), serta fasa hidratasi semen pada daerah sekitar 500 cm^{-1} [8].

Pada sampel dengan 0% air wudu, intensitas puncak OH lebih tinggi yang menunjukkan kadar air lebih besar. Sedangkan pada sampel dengan 50% air wudu, terjadi penurunan puncak OH dan peningkatan karbonasi, yang menandakan interaksi ion dalam air wudu terhadap reaksi hidrasi semen. Sementara itu, sampel dengan 100% air wudu menunjukkan puncak OH yang lebih kecil, peningkatan signifikan pada CO_3^{2-}, serta intensitas Si-O yang lebih tajam, yang mengindikasikan struktur C-S-H yang lebih berkembang dan durabilitas yang lebih baik [9].

Dalam Islam, kebersihan dan kesucian memiliki nilai utama, sebagaimana sabda Rasulullah SAW: "Kebersihan adalah sebagian dari iman." (HR. Muslim). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa air wudu, yang telah digunakan untuk tujuan ibadah dan suci secara syariat, dapat memberikan manfaat tambahan dalam proses hidrasi beton. Penggunaan air wudu dalam pembuatan beton berpotensi meningkatkan kualitas beton melalui pengurangan porositas dan peningkatan karbonasi yang berdampak pada ketahanan terhadap lingkungan agresif. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan nilai-nilai Islam dalam teknik sipil tidak hanya relevan secara spiritual tetapi juga dapat memberikan manfaat nyata dalam bidang rekayasa material.

Tabel 2. Reaksi kimia dan senyawa hasil dari analisis FTIR (sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

No	Gugus Fungsional/ Senyawa	Rentang Serapan (cm^{-1})	Reaksi atau Asal Terbentuknya	Interpretasi dalam Beton
1	OH^- (Hidroksil)	~3400	Hidrasi semen, air bebas/terikat	Menunjukkan kadar air, indikasi hidrasi aktif
2	CO_3^{2-} (Karbonat)	~1400 dan ~870	$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$	Indikasi karbonasi, mengurangi $Ca(OH)_2$ bebas
3	SO_4^{2-} (Sulfat)	~1100 – 1400	Dari semen Portland (gypsum)	Dapat mempengaruhi durabilitas
4	Si-O (Silikat)	~1000	Dari C-S-H atau pasir	Indikasi terbentuknya fase gel C-S-H
5	$CaCO_3$ (Kalsium Karbonat)	~870 dan 1400	Karbonasi dari $Ca(OH)_2$	Membentuk struktur lebih rapat, mengurangi porositas



Gambar 2. Grafik analisis FTIR (sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

4. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton terhadap tiga variasi campuran, yakni beton normal, beton dengan campuran 50% air bekas wudu, dan beton dengan 100% air bekas wudu, diperoleh rata-rata kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 12,89 MPa untuk beton normal, 13,78 MPa untuk beton dengan 50% air bekas wudu, dan 14,25 MPa untuk beton dengan 100% air bekas wudu. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan air bekas wudu sebagai substitusi air pencampur mampu meningkatkan kuat tekan beton. Ketiga variasi tersebut telah memenuhi standar kekuatan

tekan beton, sehingga layak digunakan sebagai material konstruksi.

2. Substitusi air wudu memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik mikrostruktur beton, sebagaimana dibuktikan oleh hasil XRD dan FTIR. Beton dengan 50% air wudu menunjukkan peningkatan formasi senyawa C–S–H serta penurunan $Ca(OH)_2$, mengindikasikan proses hidrasi yang lebih optimal. Sementara itu, penggunaan 100% air wudu menunjukkan dominasi fase amorf dan peningkatan karbonasi, yang dapat memperbaiki ketahanan beton terhadap lingkungan agresif. Meski demikian, potensi dampak terhadap performa jangka panjang perlu diteliti lebih lanjut. Secara keseluruhan, pemanfaatan air wudu tidak hanya menjanjikan secara teknis, tetapi juga mencerminkan pendekatan berbasis nilai spiritual, yang relevan dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan di lingkungan masyarakat Muslim.

5. Saran

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji sifat mekanik beton (seperti kuat tekan dan tarik) dari beton dengan substitusi air wudu secara menyeluruh.
2. Diperlukan pengujian jangka panjang untuk melihat ketahanan beton terhadap karbonasi, sulfat, dan lingkungan agresif lainnya.
3. Perlu dilakukan analisis terhadap struktur mikro menggunakan teknik lain untuk memperkuat hasil dari XRD dan FTIR.

6. Referensi

[1] Hepiyanto. R(1*), Kartikasari D. (2018). "Pengaruh Campuran Air Limbah (Air Selokan) Terhadap Kuat Tekan Beton f'c 14.5 Mpa (K-175)", U kaRsT Vol.2, No.2, *hlm.232-239. ISSN:2581-0855.* http://dx.doi.org/10.30737/ukarst.v2i2

[2] Ansori.MA, Ridwan. A. (2019), "Penelitian Uji Kuat Tekan Beton Dengan Memanfaatkan Air Limbah Tetes Tebu Dan Zat Additive Concrete,"Jurnal Manajemen Teknologi Dan Teknik Sipil, Vol.2, No.1, hlm.16-28. ISSN:2621-7686. http://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v2i1.388

[3] Badan Standar Nasional. (2000), "Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. SNI 03-2834-2000," Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum

[4] SNELLINGS, R., 2018. Thermogravimetric analysis, in: SNELLINGS, R. (Ed.), A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press, pp. 196–231. https://doi.org/10.1201/b19074-5

[5] Hoshino, S., Yamada, K., Hirao, H., 2006. XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement, Journal of Advanced Concrete Technology.

[6] Mesecke, K., Warr, L.N., Malorny, W., 2022. Structure modeling and quantitative X-ray diffraction of C-(A)-S-H. J Appl Crystallogr 55, 133–143. https://doi.org/10.1107/S1600576721012668

[7] Suda, Y., Saeki, T., Saito, T., 2015. Relation between Chemical Composition and Physical Properties of C-S-H Generated from Cementitious Materials. Journal of Advanced Concrete Technology 13, 275–290. https://doi.org/10.3151/jact.13.275

[8] de Oliveira, A.M., Oliveira, A.P., Vieira, J.D., Junior, A.N., Cascudo, O., 2023. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. Journal of Building Engineering 64, 105616. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105616

[9] Fraga, Y.S.B., Martins, G.L.O., Rêgo, J.H. da S., Terrades, A.M., Rojas, M.F., 2025. Investigation of the microstructure of Portland cement pastes with functionalized nanosilica

with different contents of shrinkage-reducing additive. Constr Build Mater 462, 139991. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139991

[10] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1974:2011 – Metode Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*, Jakarta: BSN, 2011.