

Analisis Pengaruh Lingkungan Asam Terhadap Beton Bertulang Ditinjau Dari Corrosion Rate Tulangan

Iqbaal Rizky Ananto¹, Fiona Indah Yurisaputri Martanni²;

Djoko Suwarno³, Widiya Suseno⁴

email: ¹17b10084@student.unika.ac.id, ²17b10085@student.unika.ac.id

^{1,2}Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Dhuwur Semarang 50234

^{3,4}Dosen Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Dhuwur Semarang 50234

Abstrak

Jumlah penduduk di dunia meningkat setiap tahunnya. Pada provinsi Jawa Tengah jumlah penduduk pada tahun 2020 mencapai 36.516.035 juta jiwa. Perkembangan jumlah penduduk menyebabkan kebutuhan manusia meningkat. Guna memenuhi kebutuhan tersebut, maka aktivitas industri dan transportasi dilakukan. Aktivitas tersebut menghasilkan gas emisi yang kemudian menjadi polutan. Zat polutan tersebut akan berkumpul di udara dan menyebabkan terjadinya hujan asam. Hujan asam merupakan proses turunnya air yang bersifat asam dan memiliki pH di bawah 5,6. Kota Semarang dari tahun 2018 hingga tahun 2020 memiliki rata-rata pH air hujan sebesar 5,37. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa hujan yang terjadi di kota Semarang adalah hujan asam. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh hujan asam terhadap sifat mekanis beton melalui uji kuat tekan beton dan durabilitas beton bertulang melalui uji laju korosi.

Hasil uji kuat tekan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM pada umur 28 hari adalah sebesar 30,93 MPa, sedangkan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air pH $5\pm 0,5$ pada umur 28 hari adalah sebesar 23,66 MPa.

Hasil uji laju korosi pada beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM adalah sebesar 0,218 mm/tahun, sedangkan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air pH $5\pm 0,5$ memiliki nilai laju korosi sebesar 0,343 mm/tahun.

Kata Kunci: beton, hujan asam, uji kuat tekan, uji laju korosi.

Abstract

The world's population is increasing every year. In Central Java province, the population in 2020 reached 36,516,035 million people. Population growth causes human needs to increase. In order to meet these needs, industrial and transportation activities are carried out. These activities produce gas emissions which then become pollutants. These pollutants will collect in the air and cause acid rain. Acid rain is the process of falling water that is acidic and has a pH below 5.6. Rainwater in Semarang City from 2018 to 2020 has an average pH of 5.37. Thus it can be said that the rain that occurs in Semarang is acid rain. This research was conducted to determine the effect of acid rain on the mechanical properties of concrete through the compressive strength test of concrete and the durability of reinforced concrete through the corrosion rate test.

The results of the compressive strength test of the concrete that was cured and soaked using tap water at the age of 28 days was 30,93 MPa, while the concrete which was cured and soaked using water pH $5\pm 0,5$ at the age of 28 days was 23,66. MPa.

The results of the corrosion rate test on concrete that was cured and soaked using tap water was 0,218 mm/year, while the concrete that was cured and soaked using pH $5\pm 0,5$ water had a corrosion rate of 0,343 mm/year.

Keywords: concrete, acid rain, compressive strength test, corrosion rate test.

1. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk di dunia semakin meningkat setiap tahunnya. Berdasarkan *Population Reference Bureau* (2021), jumlah penduduk di dunia meningkat sekitar $\pm 1\%$ dari tahun sebelumnya dan pada tahun 2020 mencapai 7.794.798.739 jiwa. Jumlah penduduk di Provinsi Jawa Tengah pada tahun 2020 mencapai 26.516.035 juta jiwa. Kenaikan jumlah penduduk berbanding lurus dengan kenaikan jumlah kebutuhan manusia. Guna memenuhi kebutuhan tersebut, maka dilakukan aktivitas-aktivitas industri serta transportasi yang emisinya menghasilkan zat polutan sebagai pencemar udara.

Pencemaran udara tersebut menyebabkan terjadinya hujan asam. Hujan asam dapat diartikan sebagai proses turunnya air yang bersifat asam dalam bentuk hujan. Menurut Cahyono (2010) penyebab hujan asam adalah polutan yang ada di udara seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2). *Power of Hydrogen* atau pH dari air hujan berhubungan dengan konsentrasi SO_x dan NO_x yang terlarut pada air hujan. Semakin tinggi konsentrasi SO_x dan NO_x pada air hujan maka semakin asam nilai derajat keasaman air hujan (Indrawati dan Tanti, 2017).

Menurut Nasihah (2017) hujan asam merupakan hujan yang memiliki pH di bawah 5,6. Pada tahun 2018 hingga tahun 2020 diketahui Kota Semarang memiliki pH rata-rata air hujan sebesar 5,37 yang dapat disimpulkan bahwa hujan yang terjadi di Kota Semarang merupakan hujan asam. Menurut Yong (2020), struktur beton bertulang yang terkena dampak hujan asam lebih rentan dalam mengalami korosi pada tulangan yang berujung pada kerusakan beton. Hujan asam dapat mempengaruhi sifat

mekanis beton dan durabilitas beton bertulang

Struktur beton bertulang merupakan material konstruksi yang paling sering digunakan di dunia. Beton bertulang merupakan material yang ekonomis dan serba guna karena kekuatan serta memiliki kinerja yang baik selama masa layannya. Namun dalam beberapa kasus, beton bertulang tidak dapat berkinerja baik karena design yang kurang baik, proses konstruksi yang kurang baik, pemilihan material yang tidak sesuai standar, keadaan lingkungan, atau kombinasi dari beberapa faktor tersebut (Broomfield, 2007).

Salah satu penyebab utama kerusakan pada struktur beton bertulang adalah terjadinya sebuah proses korosi pada tulangan baja. Korosi yang terjadi pada struktur beton bertulang menyebabkan timbulnya karat, sehingga daya lekat beton terhadap tulangan berkurang. Volume produk korosi yang dihasilkan menekan permukaan beton mulai dari sekitar tulangan dan menyebabkan keretakan pada selimut beton yang dapat mempengaruhi durabilitas beton. Terjadinya hujan asam merupakan salah satu penyebab utama korosi pada struktur beton bertulang yang selanjutnya dapat menyebabkan keretakan pada beton. Dengan adanya keretakan yang terjadi, kekuatan dan ketahanan suatu struktur beton dapat berkurang. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pengujian laju korosi guna mengetahui durabilitas beton bertulang yang berada pada lingkungan asam.

Sifat mekanis beton adalah sifat beton yang ditinjau dari mutu serta kualitas beton tersebut. Menurut Mujahidin, dkk., (2017), sifat mekanis beton diketahui melalui uji kuat tekan dan uji kuat tarik. Untuk mengetahui sifat mekanis beton pada lingkungan

asam, maka dilakukan pengujian kuat tekan beton.

2. Tinjauan Pustaka

Untuk mencapai tujuan penelitian yang telah ditentukan, diperlukan dasar teori yang digunakan sebagai acuan penelitian sebagai berikut.

2.1. Uraian Umum

Menurut Widiyanti dan Lenggogeni (2013), proyek adalah suatu kegiatan sementara yang memiliki tujuan dan sasaran yang jelas, berlangsung dalam jangka waktu terbatas, dengan alokasi sumber daya tertentu. Setiap proyek konstruksi memiliki tujuan dan tuntutan yang berbeda-beda. Setiap tujuan ini memiliki metode, teknis, dan juga pelaksanaan yang berbeda-beda pula menyesuaikan dengan objektif dari masing-masing proyek konstruksi tersebut. Selain metode dan, teknis, bahan, material, dan alat yang digunakan juga terdapat kemungkinan adanya perbedaan setiap proyek konstruksi.

Pada dunia konstruksi terdapat beberapa material yang sesungguhnya berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan dasar untuk pelaksanaan konstruksi. Beberapa material tersebut diharuskan untuk memiliki syarat daya tahan, kekuatan, dan fisik yang kuat untuk menahan beban dari suatu hasil konstruksi. Material tersebut diantaranya adalah kayu, baja, dan juga beton.

Penggunaan material kayu sebagai bahan dasar untuk menyangga suatu struktur bangunan sudah jarang ditemukan. Contoh penggunaan material kayu sebagai bahan dasar untuk menahan beban pada konstruksi ada pada jembatan. Walaupun material kayu memiliki sifat lebih ringan, tidak berkarat, mudah diperbaiki, mudah pemeliharaannya, dan juga lebih memiliki nilai estetika, material kayu kurang cocok apabila dijadikan struktur

utama untuk menahan beban yang ada pada suatu bangunan. Kayu memiliki sifat mudah terkena jamur, dan juga lebih tidak tahan api sehingga hal tersebut membahayakan suatu bangunan jika dalam masa layannya struktur kayu tersebut mengalami hal tersebut.

Struktur baja di masa kini hampir digunakan pada setiap jenis struktur yang diterapkan pada infrastruktur yang ada. Seperti contohnya gedung bertingkat, jembatan, menara, sistem pendukung peralatan, terminal, bangunan industri berat, dan lain sebagainya. Material baja dapat digunakan sebagai *main structure*, *sub structure* ataupun bagian yang ada pada sebuah bangunan yang terbuat dari baja struktural.

2.2. Pengertian Beton

Dewasa ini beton dijadikan sebagai material utama dalam melaksanakan proyek konstruksi. Struktur beton pada infrastruktur dapat kita jumpai mulai dari rumah, jembatan, dinding penahan bendungan, gudang, hingga gedung tinggi. Beton umum dipilih karena memiliki nilai kekuatan tekan yang cukup tinggi. Namun beton juga memiliki kekurangan yaitu nilai tariknya yang sangat rendah. Oleh karena itu seringkali dijumpai beton yang memiliki tulangan sebagai bagian struktur yang menahan gaya tarik yang ada. Penggunaan beton bertulang pada suatu proyek infrastruktur dapat digunakan sebagai pondasi, kolom, balok, pelat, tangga, maupun dinding geser.

Secara umum, beton merupakan suatu bahan yang terdiri dari campuran agregat kasar, agregat halus, air, semen, dan juga bahan *admixture* apabila dibutuhkan dalam pengerjaannya. Bahan-bahan ini dicampur dan diaduk menjadi satu menjadi suatu bahan yang umum digunakan pada pekerjaan konstruksi di masa kini yaitu beton *ready*

mix. Pada pelaksanaannya campuran tersebut terkadang memerlukan bahan tambah berupa *admixture* untuk memperoleh suatu kondisi untuk menyesuaikan di situasi tertentu sesuai dengan lapangan.

2.2.1. Material penyusun beton

Sesuai dengan SNI 2847:2013, dijelaskan bahwa beton merupakan campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan hidrolis (*portland cement*), agregat kasar, agregat halus, dan juga air, dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Perbandingan campuran antar agregat, cara pencampuran, cara mengangkut, dan sebagainya akan mempengaruhi sifat-sifat beton, baik dari sifat mekanis maupun sifat durabilitas dari beton.

1. Agregat

Menurut Sukirman (2003), agregat adalah butiran batu pecah, kerikil, pasir atau mineral lain, baik yang berasal dari alam maupun buatan yang berbentuk mineral padat berupa ukuran besar maupun kecil atau fragmen-fragmen.

a. Agregat halus

Agregat halus adalah agregat yang digunakan dalam penyusunan beton dan memiliki syarat untuk menembus ayakan 4,80 mm. Agregat halus memiliki peran dalam mengisi rongga-rongga kosong atau pori-pori pada suatu komponen beton yang ditimbulkan dari agregat besar.

b. Agregat kasar

Agregat kasar pada campuran beton dapat berupa kerikil ataupun pecahan batu. SNI 03-2847-2013 menyatakan bahwa agregat kasar merupakan agregat dengan ukuran butir berkisar antara 5,00 mm hingga 40 mm.

2. Semen *Portland*

Semen *portland* adalah bahan yang digunakan untuk mengikat antar agregat yang ada dalam beton. Penggunaan

semen ini dilakukan dengan cara mencampurkan semen dengan air hingga membentuk cairan pasta. Bahan utama dari pembuatan semen *portland* adalah batu kapur dengan komponen utama seperti CaO atau kapur, dan tanah liat komponen utama SiO₂ (*Silica*), Al₂O₃ (alumina), Fe₂O₃ (oksida besi), MgO (magnesium), SO₃ (sulfur) serta Na₂+K₂O (soda/potash). Jenis semen yang digunakan dan juga volumenya akan mempengaruhi nilai kuat tekan beton nantinya.

3. Air

Air pada campuran untuk membuat beton digunakan sebagai bahan yang berfungsi untuk melakukan reaksi dengan semen dan berfungsi sebagai bahan untuk melekatkan agregat yang ada pada beton. Perencanaan penggunaan volume air dalam beton perlu dilakukan dengan teliti, karena air yang berlebihan dapat menimbulkan banyaknya pori dan juga gelembung setelah proses hidrasi selesai, sedangkan jumlah air yang terlalu sedikit dapat menyebabkan proses hidrasi tidak tercapai sepenuhnya sehingga dapat mempengaruhi kuat tekan beton.

2.2.2. Metode *curing* beton

Perawatan beton memiliki tujuan untuk memastikan terjadinya reaksi hidrasi semen dapat berlangsung dengan optimal, sehingga mutu dari beton dapat tetap terjaga. Selain itu kegunaan dari perawatan beton adalah agar beton tidak mengalami nilai susut yang berlebihan yang nantinya dapat menyebabkan beton mengalami keretakan. Metode perawatan beton ini umumnya dilakukan dengan cara menjaga kelembaban beton sejak dipadatkan hingga proses hidrasi cukup sempurna yaitu kurang lebihnya memakan waktu hanya 5 hingga 7 hari.

1. Perawatan dengan uap

Perawatan beton dengan penguapan umumnya dilakukan di wilayah dengan

suhu rendah. Pelaksanaan perawatan ini juga harus diikuti dengan perawatan dengan cara pembasahan setelah 24 jam, minimal selama 7 hari. Hal ini bertujuan agar nilai kuat tekan beton dapat tercapai maksimal setelah 28 hari.

2. Perawatan dengan membran

Perawatan dengan membran pada beton dilakukan dengan cara memberi penghalang secara fisik untuk mencegah terjadinya penguapan air. Lembaran ini harus bersifat kering dan tidak terdapat lubang-lubang yang dapat merusak beton.

3. Perawatan dengan pembasahan

Perawatan beton dengan melakukan pembasahan dilakukan pada ruangan lembab. Selain itu juga dapat dilakukan dengan meletakkan beton pada rendaman air, atau dapat melakukan penyemprotan air secara kontinyu. Pelaksanaan perawatan pembasahan ini dapat dilakukan di laboratorium atau di lapangan.

2.3. Durabilitas Beton

Durabilitas beton didapat dari kata *durability* yang menurut *Cambridge Dictionary* memiliki definisi sebagai suatu kualitas yang dapat bertahan lama tanpa terjadi kerusakan. Hal ini dapat berlaku pada beton, menurut Olivia (2011), durabilitas beton adalah kemampuan beton untuk bertahan terhadap kondisi lingkungan seperti cuaca, serangan kimia, dan abrasi tanpa ada kerusakan yang signifikan selama masa layannya dan mengurangi keamanan bangunan untuk digunakan. Roni, dkk., (2021) menyatakan bahwa serangan sulfat, serangan asam, alkali, dan klorida dalam air laut merupakan contoh serangan kimiawi dari lingkungan agresif yang dapat mengurangi durabilitas beton.

Besarnya kerusakan yang terjadi pada beton sangat bergantung pada kualitas dari beton tersebut. Semakin

baik kualitas yang digunakan, maka semakin baik pula kemampuan beton tersebut untuk menahan serangan dari luar seperti, bahan-bahan kimia, abrasi, ataupun mekanisme-mekanisme lainnya yang dapat menurunkan durabilitas dari beton.

2.4. Proses Terjadinya Karat pada Tulangan

Proses korosi adalah proses terjadinya penurunan kualitas dari suatu material logam, yang disebabkan oleh pengaruh bahan kimia, atau dapat disebabkan oleh udara, air, larutan asam, dan lain sebagainya. Apabila dilihat secara visual, beton merupakan suatu material yang terlihat kuat, kokoh dan akan sangat baik bila digunakan sebagai penopang struktur bangunan, namun jika dilihat secara mikro beton hanyalah material berpori yang memiliki diameter yang cenderung sangat kecil sehingga sangat sulit apabila dilihat dengan mata manusia tanpa bantuan alat. Infiltrasi air ke dalam beton nantinya akan menyentuh bagian tulangan dari suatu struktur beton bertulang dan menyebabkan proses munculnya karat. Proses korosi tersebut akan membutuhkan syarat berupa logam, oksigen (O_2) dan juga air (H_2O). Luasan karat yang semakin membesar sehingga melebihi luasan tulangan dapat menyebabkan *expansive stresses* dan menimbulkan keretakan pada beton, dan nantinya akan mempengaruhi durabilitas beton.

2.5. Metode Penentuan Perbandingan Campuran Beton

Metode *Design of Experiment* (DoE) merupakan metode penentuan campuran beton yang dikembangkan oleh Department of Environment di Inggris. Metode ini juga digunakan untuk menentukan campuran beton di Indonesia dan juga lebih dikenal sebagai

standar perencanaan oleh Departemen Pekerjaan Umum (DPU). Metode Design of Experiment yang digunakan dalam penelitian ini akan berpedoman pada sumber SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Adapun tahapan yang perlu dilakukan dalam pengerjaan metode tersebut adalah sebagai berikut.

1. Menentukan kuat tekan rencana dan nilai standar deviasi
2. Menghitung nilai tambah dan kuat tekan beton rata-rata yang ditargetkan
3. Menentukan faktor air semen (fas)
4. Menentukan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum.
5. Mengetahui nilai kadar air bebas
6. Menentukan kebutuhan semen yang diperlukan
7. Mencari persentase agregat halus dan agregat kasar
8. Menghitung berat jenis relatif agregat gabungan
9. Menentukan berat volume beton
10. Menghitung proporsi campuran beton.

2.6. Pengujian Beton

Beton yang dijadikan sebagai material utama dalam suatu pelaksanaan konstruksi tentunya diharuskan untuk memiliki kualitas dan juga ketahanan sesuai dengan apa yang telah direncanakan. Untuk mengetahui kualitas dari beton yang digunakan diperlukan pengujian-pengujian tertentu untuk mengetahui kualitas dari beton tersebut. Pengujian terkait adalah pengujian mengenai sifat mekanis beton yang dapat ditentukan dengan uji kuat tekan, dan juga pengujian mengenai durabilitas beton yang salah satunya dapat ditentukan dengan mengetahui nilai *corrosion rate* pada suatu beton bertulang.

2.6.1. Uji kuat tekan beton

Tujuan utama dari dilakukannya uji kuat tekan beton adalah untuk mengetahui seberapa besar gaya tekan yang dapat diterima suatu campuran beton yang dibuat. Standar nasional yang digunakan adalah SNI 03-1974-2011. Dimensi dari beton silinder yang digunakan sebagai benda uji adalah beton dengan diameter 15 cm dan memiliki tinggi 30 cm.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan:

f_c' : Kuat tekan beton (MPa)

P : Gaya tekan maksimum (kN)

A : Luas permukaan benda uji (mm²)

2.6.2. Uji *corrosion rate* beton dengan metode galvanostatik

Menurut Wibowo (2016) menyatakan bahwa korosi galvanik adalah korosi yang terjadi apabila dua logam yang tidak sama dihubungkan dan berada di lingkungan elektrolit saat terjadi kontak atau secara listrik kedua logam yang berbeda potensial tersebut akan menimbulkan aliran elektron/listrik diantar kedua logam. Pada uji *corrosion rate* beton, dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa kuat beton untuk menahan penetrasi air yang dapat mengakibatkan terjadinya *initial crack* yang disebabkan oleh munculnya karat yang ada pada tulangan. Laju korosi umumnya dinyatakan dengan pengurangan berat logam per satuan luas, atau laju penipisan. Satuan yang umum digunakan adalah *mils per year*. Untuk perhitungan laju korosi akan menggunakan Persamaan berdasarkan ASTM G1 – 90 seperti pada Persamaan 2.1:

$$Corrosion\ rate\ (mpy) = \frac{K \times W}{(A \times D \times T)} \dots (2.2)$$

Keterangan:

K : Konstanta laju korosi (μA/cm²)

W : Massa tulangan yang hilang (gr)

A : Luas permukaan tulangan (cm²)

D : Berat jenis (gr/cm^3)
T : Waktu terekspos (jam)

2.7. Molaritas dan Derajat Keasaman

Tingkat konsentrasi kimia dari suatu larutan dapat dinyatakan dalam beberapa cara, diantaranya yaitu dalam persen (%), molalitas (m), dan molaritas (M). Dalam suatu penelitian tidak jarang kita memerlukan suatu larutan dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Hal tersebut dapat dipermudah dengan melakukan pengenceran larutan dengan konsentrasi tinggi, sehingga didapatkan dilarutkan sesuai dengan yang dibutuhkan.

Derajat keasaman atau yang juga sering disebut dengan pH. Nilai pH juga sering digunakan sebagai standar untuk menyatakan tingkat kebasaaan atau keasaman suatu senyawa. Suatu senyawa dinyatakan asam apabila memiliki $\text{pH} < 7$, basa bila $\text{pH} > 7$, dan netral bila $\text{pH} = 7$. Menurut Suherti (2016) istilah pH berasal dari singkatan *power of hydrogen* yang pertama kali dikemukakan oleh Soren Peter Lauritz Sorensen, seorang kimiawan Denmark pada tahun 1909 yang memiliki arti pangkat atau eksponen.

2.8. Penelitian Sejenis

Dalam penelitian ini digunakan referensi dari beberapa penelitian sebelumnya yaitu sebagai berikut:

- a. Model Prediksi Retak pada Beton Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam karena Infiltrasi Klorida dengan Mempertimbangkan Siklus Basah dan Kering oleh Wahyuniarsih Sutrisno pada tahun 2017.
- b. Ketahanan Beton Mutu Tinggi di Lingkungan Asam oleh Jaya Alexander Pandiangan, Monita Olivia, Lita Darmayanti pada tahun 2014.

3. Metode Penelitian

Metode penelitian adalah cara-cara berbuat dan berfikir yang disiapkan untuk melakukan penelitian dan mencapai tujuan penelitian. Berikut merupakan metode penelitian yang telah dilakukan.

- a. Tahap I merupakan kegiatan kajian pustaka dan kajian literatur dengan hasil keluaran berupa seminar proposal.
- b. Tahap II merupakan kegiatan yang dilakukan setelah ujian proposal yaitu melakukan *trial mix design*, *mix design*, pembuatan benda uji, dan pengujian benda uji.
- c. Tahap III adalah kegiatan pengolahan dan analisis data hasil dari pengujian. Keluaran pada tahap III adalah seminar *draft*.
- d. Tahap IV adalah kegiatan pemaparan penelitian yang sebelumnya telah diolah dan dianalisis. Pengolahan data menghasilkan nilai *corrosion rate* dan nilai kuat tekan beton. Keluaran pada tahap IV adalah sidang tugas akhir.

4. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan *trial mix design*, dilakukan pembuatan benda uji menggunakan perbandingan material dari *mix design 2*. Adapun hasil dan pembahasan dari pengujian kuat tekan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

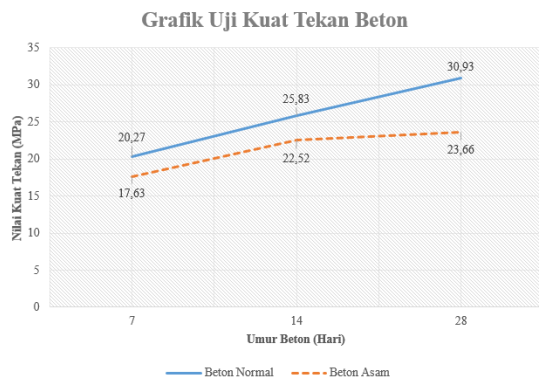
4.1. Hasil dan Pembahasan Pengujian Kuat Tekan Beton

Pada Tabel 1 dapat dilihat untuk beton sampel yang diberi huruf A setelah angka, menandakan bahwa sampel tersebut di-*curing* dan direndam menggunakan air $\text{pH } 5 \pm 0,5$, sedangkan sampel tanpa huruf A dibelakangnya merupakan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM.

Tabel 1. Hasil Uji Kuat Tekan

Nomor Benda Uji	Umur Beton (hari)	Kuat Tekan (MPa)
1	7	20,36
2		19,52
3		20,93
1A		16,41
2A		18,67
3A		17,82
4	14	26,02
5		25,17
6		26,31
4A		21,50
5A		22,30
6A		23,76
7	28	31,40
8		33,10
9		28,30
7A		22,63
8A		23,19
9A		25,17

Pada Gambar 1 dapat dilihat grafik hubungan nilai kuat tekan dengan umur beton.



Gambar 1.
Grafik Hubungan Nilai Kuat Tekan Dengan Umur Beton

Beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5 \pm 0,5$ tidak memenuhi rencana kuat tekan awal yang seharusnya mencapai 30 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa asam sangat mempengaruhi kualitas beton ditinjau dari kuat tekannya. Tidak tercapainya nilai kuat tekan rencana tersebut

diakibatkan karena reaksi kimiawi yang terjadi pada beton dengan asam yang digunakan untuk *curing* dan perendaman. Asam yang digunakan dalam penelitian ini (HNO_3) melemahkan ikatan struktur partikel pada beton mulai dari permukaan beton hingga masuk menuju bagian dalam beton yang kemudian menyebabkan penurunan nilai kuat tekan pada beton sampel. Menurut Pandiangan, dkk., (2014), kerusakan yang terjadi dapat berupa asam yang melemahkan ikatan antar partikel yang ada di dalam beton. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pH air lingkungan berpengaruh terhadap sifat mekanis beton.

4.2. Hasil dan Pembahasan Pengujian Laju Korosi

Uji laju korosi merupakan uji yang dilakukan untuk menentukan kehilangan massa tulangan sebelum dilakukan pengujian dan setelah dilakukan pengujian. Pengujian laju korosi diberhentikan setelah terdapat retak pertama (*initial crack*) pada masing-masing benda uji. Keretakan pada benda uji menandakan bahwa tulangan yang terdapat didalam beton bereaksi dan menghasilkan produk korosi. Gambar 2 di bawah merupakan pengujian laju korosi yang dilakukan.



Gambar 2. Proses Uji Laju Korosi

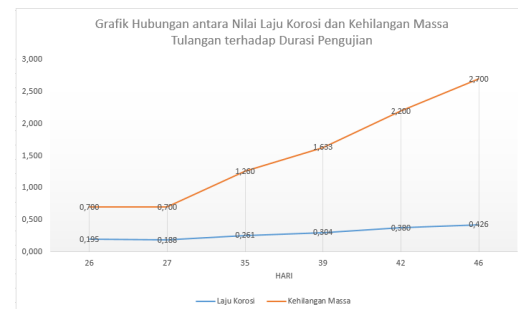
Waktu keretakan pertama (*initial crack*) yang terjadi pada beton bervariasi. Hal ini diakibatkan oleh

kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori kapiler berbeda-beda pada tiap benda uji. Berikut pada Tabel 2 merupakan hasil uji laju korosi. Uji laju korosi yang telah dilakukan menghasilkan berat tulangan akhir yang lebih kecil bila dibandingkan dengan berat tulangan awal. Hal ini dikarenakan terjadinya kehilangan massa selama proses pengujian laju korosi.

Tabel 2. Hasil Uji Laju Korosi

No. Tulangan	pH Curing	Kehilangan Massa (gr)	Lama Perendaman (Hari)	Lama Perendaman (Jam)	Nilai Laju Korosi (mm/tahun)
1.	5 ± 0,5	0,7	26	624	0,195
2.	5 ± 0,5	1,6	35	840	0,332
3.	5 ± 0,5	2,2	35	840	0,456
4.	5 ± 0,5	2,7	46	1104	0,426
5.	7 ± 0,5	0,7	35	840	0,145
6.	7 ± 0,5	0,7	27	648	0,188
7.	7 ± 0,5	1,4	39	936	0,260
8.	5 ± 0,5	1,7	39	936	0,316
9.	7 ± 0,5	0,8	35	1104	0,126
10.	5 ± 0,5	1,8	39	936	0,335
11.	7 ± 0,5	2,2	42	1008	0,380
12.	7 ± 0,5	1	35	840	0,207

Setelah melakukan pengujian laju korosi selama total 46 hari, diketahui bahwa nilai laju korosi yang terjadi pada beton bertulang dipengaruhi oleh durasi dari pengujian yang dilakukan terhadap sampel beton bertulang. Dapat ditarik hasil bahwa semakin bertambahnya waktu atau durasi dari pengujian laju korosi, nilai kehilangan massa dan juga laju korosi dari benda uji juga akan bertambah. Secara singkat, karat yang terakumulasi pada suatu sampel akan bertambah seiring berjalannya waktu pengujian, dan dari karat tersebut akan meningkatkan nilai kehilangan massa akibat pengujian, dan juga akan berpengaruh terhadap nilai laju korosi dari suatu sampel beton bertulang. Grafik hubungan antara durasi pengujian laju korosi terhadap nilai laju korosi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Nilai

Rata-Rata Laju korosi dan Rata-Rata Kehilangan Massa Tulangan Terhadap Durasi Pengujian

Ditunjukkan bahwa semakin lama durasi dari pengujian laju korosi maka semakin tinggi pula nilai kehilangan massa dan nilai laju korosi yang terjadi pada tulangan. Hal ini mendukung penelitian sebelumnya oleh Wahyuniarsih Sutrisno pada tahun 2017 yang juga melakukan penelitian dengan hasil semakin lama waktu dari pengujian yang dilakukan, semakin tinggi juga nilai kehilangan massa dari tulangan. Alasan dari hal ini adalah semakin lama durasi dari pengujian yang dilakukan, karat yang terbentuk pada tulangan juga semakin bertambah. Karat tersebut muncul karena adanya reaksi dari logam, oksigen (O_2) dan juga air (H_2O) yang merembes ke dalam beton sampel. Derajat keasaman dari air yang digunakan untuk media *curing* dan media perendaman memiliki pengaruh terhadap nilai laju korosi pada sampel beton bertulang.

Seperti yang telah diungkapkan oleh Pandiangan, dkk., (2014), bahwa kerusakan yang terjadi pada beton yang berinteraksi pada lingkungan asam adalah ikatan antar partikel yang ada di dalam beton yang kian melemah. Berdasarkan pernyataan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin melemahnya ikatan partikel yang ada pada beton, juga akan berpotensi menimbulkan rongga-rongga yang dapat

menurunkan nilai kuat tekan serta berpotensi untuk air masuk melalui rongga-rongga tersebut, sehingga juga dapat menurunkan durabilitas dari suatu beton bertulang. Seperti yang telah diketahui bersama bahwa air memiliki sifat kapilaritas yang menyebabkan air dapat naik melalui rongga-rongga bagian bawah sampel hingga menyentuh tulangan yang ada pada beton bertulang. Volume karat yang semakin bertambah akan mengurangi diameter dan juga luas permukaan dari suatu tulangan. Dari volume karat yang semakin bertambah ini akan mendesak beton dari dalam sehingga beton dapat terkelupas atau bahkan pecah. Penelitian yang telah dilakukan menghasilkan nilai rata-rata laju korosi beton bertulang yang di-curing dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ sebesar $0,343 \text{ mm}^{\text{mm}}/\text{tahun}$. Sedangkan untuk nilai rata-rata laju korosi beton bertulang yang di-curing dan direndam menggunakan air PDAM sebesar $0,218 \text{ mm}^{\text{mm}}/\text{tahun}$.

5. Penutup

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka berikut kesimpulan dan saran peneliti.

5.1. Kesimpulan

1. Kuat tekan beton yang di-curing dan direndam dengan air PDAM pada umur 28 hari mencapai kuat tekan rencana ($f_c' = 30 \text{ MPa}$), namun untuk kuat tekan beton yang di-curing dan direndam dengan air pH $5\pm 0,5$ pada umur 28 hari tidak mencapai kuat tekan rencana. Hal ini disebabkan terjadi reaksi kimiawi pada beton yang di-curing dan direndam dengan air pH $5\pm 0,5$, sehingga membuat ikatan antar partikel merenggang.
2. Beton bertulang yang di-curing dan direndam dengan air pH $5\pm 0,5$ memiliki laju korosi rata-rata $0,343 \text{ mm}^{\text{mm}}/\text{tahun}$, sedangkan beton

bertulang yang di-curing dan direndam dengan air PDAM memiliki laju korosi rata-rata sebesar $0,218 \text{ mm}^{\text{mm}}/\text{tahun}$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa beton yang terpapar lingkungan asam akan menyebabkan durabilitas beton bertulang berkurang.

5.2. Saran

1. Karena terdapat keterbatasan keadaan dalam penelitian, uji kuat lentur beton tidak dilakukan. Untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan gaya tegak lurus, maka perlu dilakukan pengujian kuat tarik beton untuk penelitian selanjutnya.
2. Pada struktur bangunan beton bertulang digunakan tulangan dengan jumlah lebih dari satu, sedangkan penelitian yang telah peneliti lakukan hanya menggunakan satu tulangan. Tentunya produk karat yang dihasilkan pada tulangan yang berjumlah lebih dari satu akan lebih besar dibandingkan yang hanya berjumlah satu. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan jumlah tulangan yang lebih banyak menyesuaikan keadaan sesungguhnya di lapangan.

Sistem pemantauan terhadap struktur bangunan beton bertulang yang berada pada lingkungan asam perlu dikaji lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Population Reference Bureau (2021): World population data sheet. Diperoleh dari sumber internet: <https://interactives.prb.org/2020-wpds/download/>, Diunduh pada tanggal 15 September 2021, pukul 00.59 WIB.
- American Standard Test Method. (1999): ASTM G1-90 – Standard

- practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimen, Amerika Serikat, 3.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011): *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*, Jakarta, 6.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013): *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*, Jakarta, 24–25, 77.
- Broomfield, J. P., (2007): *Corrosion of steel in concrete*, Amerika Serikat, Taylor & Francis, 1.
- Cahyono, W. E. (2010): Pengaruh hujan asam pada biotik dan abiotik. Diperoleh dari situs internet: http://jurnal.lapan.go.id/index.php/berita_dirgantara/article/viewFile/718/636#:~:text=Hujan%20asam%20akan%20memberikan%20pengaruh,dapat%20pula%20menggangu%20kehatan%20manusia, Diunduh pada tanggal 20 September 2021 pukul 20.30 WIB, 1.
- Indrawati, A., dan Tanti, D. A. (2017): Pengukuran pH dan konduktivitas air hujan untuk pemantauan kualitas udara di daerah Bandung. *Berita Dirgantara*, **18**, 54.
- Mujahidin, Antonius, dan Prabowo, S. (2017): Studi eksperimental sifat-sifat mekanik beton normal dengan menggunakan variasi agregat kasar, *Prosi-ding Seminar Nasional Inovasi Dalam Pengembangan*, **1**, 322-324.
- Nasihah, M. (2017): Efek hujan asam terhadap pertumbuhan tanaman. *Jurnal EnviScience*, ISSN No. 2597 - 9612, **1** (1), 27-30.
- Olivia, M. (2011): *Durability related properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete*. Curtin University, Australia, 1.
- Pandiangan, J. A., Olivia M., dan Darmayanti, L., (2014): Ketahanan beton mutu tinggi di lingkungan asam. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, ISSN 2355-6870, **1** (1), 3374-7385-1.
- Roni, S., Olivia, M., dan Wibisono, G., (2021): Durabilitas beton bertulang di lingkungan tanah gambut di Kabupaten Bengkalis, *Jurnal Teknik*, p-ISSN: 1858-4217, e-ISSN: 2622-710X, **15** (1), 26-34.
- Sukirman S., (2003): *Beton aspal campuran panas*. Grafika Yuana Marga. Bandung, 23-31.
- Sutrisno, W. (2017): *Model prediksi retak pada beton bertulang akibat korosi tidak seragam karena infiltrasi klorida dengan mempertimbangkan siklus basah dan kering*, Disertasi Program Doktor Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 13-14.
- Wibowo, A., (2016): Analisis sifat korosi galvanik berbagai plat logam di laboratorium metalurgi Politeknik Negeri Batam, *Jurnal Integrasi*, p-ISSN: 2085-385, **8** (2), 144-147.
- Widiasanti, I., dan Lenggogeni. (2013): *Manajemen konstruksi*. PT. Remaja Rosdakarya. Bandung, 25.
- Yong, D. (2020): Effect of acid rain pollution on durability of reinforced concrete structures. *2nd International Conference on Air Pollution and Environmental Engineering, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **450**, 012115, 1-5.