



PENGARUH STRUKTUR MAKROMONOMER *SUPERPLASTICIZER* BERBASIS POLIKARBOKSILAT TERHADAP VISKOSITAS DAN WORKABILITY BETON

Yudha Rachman Winarto¹, Budianto², Azhar Dhika Winarto³

^{1,2} Sekolah Tinggi Teknik Multimedia Internasional Malang / Program Studi S1 Teknik Sipil

Alamat korespondensi :

email: yrachmanwinarto@gmail.com¹, lppm@stt.ac.id²

³ Sekolah Tinggi Teknik Multimedia Internasional Malang / Program Studi S1 Arsitektur

Alamat korespondensi :

email: azhar.dhika18@gmail.com³

Abstract

Polycarboxylate Ether (PCE)-based superplasticizers are widely used chemical admixtures in modern concrete technology due to their ability to improve the dispersion of cement particles, thereby reducing water demand without compromising the workability of concrete. The performance of PCE is strongly influenced by its macromonomer structure, particularly the side-chain length, grafting density, and molecular weight distribution, which determine the rheological characteristics of the concrete mixture. Therefore, understanding the influence of macromonomer structure on concrete properties is essential for the development of high-performance concrete. This study aims to analyze the effect of variations in the PCE macromonomer structure on the plastic viscosity and workability of concrete mixtures. An experimental method was employed using three PCE formulations with different polyethylene glycol (PEG) side-chain lengths at a constant water-to-cement ratio of 0.35 and a superplasticizer dosage of 0.8% by weight of cement. Workability was evaluated using the *slump flow* test, while plastic viscosity was analyzed based on the rheological parameters of the concrete mixture. The results indicate that increasing the side-chain length improves cement particle dispersion, increases the *slump flow* value, and reduces plastic viscosity. However, excessively long side chains may reduce mixture stability, whereas shorter side chains result in higher plastic viscosity and lower workability. This study recommends optimizing the PCE macromonomer structure to achieve an appropriate balance between workability, mixture stability, and high-performance concrete properties.

Keywords: *polycarboxylate ether; superplasticizer; macromonomer; viscosity; workability*

Abstrak

Superplasticizer berbasis *Polycarboxylate Ether (PCE)* merupakan bahan tambah kimia yang banyak digunakan dalam teknologi beton modern karena mampu meningkatkan dispersi partikel semen sehingga kebutuhan air dapat dikurangi tanpa menurunkan kemudahan pengerjaan beton. Kinerja PCE dipengaruhi oleh struktur makromonomernya, terutama panjang rantai samping, kerapatan grafting, dan distribusi berat molekul yang menentukan karakteristik reologi campuran. Oleh karena itu, kajian mengenai pengaruh struktur makromonomer terhadap sifat beton menjadi penting untuk mendukung pengembangan beton berkinerja tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi struktur *makromonomer* PCE terhadap *viskositas plastis* dan *workability* campuran beton. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan tiga variasi struktur makromonomer PCE dengan panjang rantai *polietilen glikol* yang berbeda pada faktor air-semen sebesar 0,35 dan dosis *superplasticizer* 0,8% terhadap berat semen. Pengujian *workability* dilakukan menggunakan *slump flow* test, sedangkan *viskositas plastis* dianalisis berdasarkan parameter reologi campuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan panjang rantai samping meningkatkan *dispersi* partikel semen, meningkatkan nilai *slump flow*, serta menurunkan *viskositas plastis*. Namun, panjang rantai samping yang berlebihan berpotensi menurunkan stabilitas campuran, sedangkan rantai yang lebih pendek menghasilkan *viskositas* lebih tinggi dan *workability* yang lebih rendah. Penelitian ini merekomendasikan optimasi struktur makromonomer PCE untuk memperoleh keseimbangan antara kemudahan pengerjaan, stabilitas campuran, dan kinerja beton berkualitas tinggi.

Kata kunci: *polycarboxylate ether, superplasticizer, makromonomer, viskositas, workability*, beton berkinerja tinggi.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi pada era modern menuntut penggunaan material bangunan yang tidak hanya memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, tetapi juga mampu memberikan kinerja jangka panjang yang baik serta kemudahan dalam proses pelaksanaan di lapangan. (Sánchez-Garrido et al., 2023). Beton sebagai material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia terus mengalami pengembangan untuk memenuhi tuntutan tersebut. (Vagtholm et al., 2023) Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan terhadap beton berkinerja tinggi (*High Performance Concrete/HPC*) dan beton memadat sendiri (*Self Compacting Concrete/SCC*) meningkat secara signifikan seiring berkembangnya teknologi bangunan bertingkat, jembatan bentang panjang, struktur bawah tanah, serta infrastruktur yang membutuhkan tingkat durabilitas tinggi. Beton jenis ini umumnya dirancang dengan rasio air-semen yang rendah untuk memperoleh kekuatan dan ketahanan yang lebih baik. (Rudi et al., 2025) Namun, penurunan rasio air-semen sering kali menyebabkan berkurangnya kemudahan pengerjaan (*workability*) sehingga diperlukan bahan tambah kimia yang mampu mempertahankan fluiditas campuran tanpa menambah jumlah air pencampur.

Salah satu bahan tambah kimia yang saat ini banyak digunakan dalam teknologi beton modern adalah *superplasticizer* berbasis *Polycarboxylate Ether* (PCE). *Superplasticizer* generasi terbaru ini telah menggantikan sebagian besar penggunaan *superplasticizer* konvensional seperti lignosulfonat dan naftalena sulfonat karena memiliki kemampuan reduksi air yang jauh lebih tinggi. Penggunaan PCE memungkinkan pengurangan kebutuhan air hingga lebih dari 30% dibandingkan campuran beton konvensional, sehingga beton dapat mencapai kekuatan tekan yang tinggi tanpa kehilangan kemudahan pengerjaan. Selain itu, PCE juga mampu mempertahankan slump dalam waktu yang lebih lama sehingga sangat sesuai digunakan pada proyek konstruksi skala besar yang memerlukan proses transportasi dan pengecoran dengan durasi panjang. (Ige & Kabeya, 2025)

Meningkatnya penggunaan PCE tidak hanya didorong oleh aspek teknis, tetapi juga oleh tuntutan pembangunan berkelanjutan. Industri semen merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar dalam sektor konstruksi. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi penggunaan semen tanpa menurunkan kualitas beton menjadi perhatian utama para peneliti dan praktisi. Dengan kemampuan *dispersinya* yang sangat baik, PCE memungkinkan penggunaan rasio air-semen yang rendah serta pemanfaatan material tambahan semen (*supplementary cementitious materials*) seperti *fly ash*, *slag*, dan *silica fume* secara lebih efektif. Kondisi ini berkontribusi terhadap pengurangan konsumsi semen dan penurunan emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksi beton.

Keunggulan utama PCE dibandingkan *superplasticizer* generasi sebelumnya terletak pada struktur molekulnya yang dapat direkayasa sesuai kebutuhan aplikasi. Secara umum, molekul PCE tersusun atas rantai utama (*backbone*) yang mengandung gugus karboksilat dan rantai samping (*side chain*) yang biasanya berupa polietilen glikol (*Polyethylene Glycol/PEG*). Gugus karboksilat berfungsi sebagai titik adsorpsi yang menempel pada permukaan partikel semen, sedangkan rantai samping menghasilkan mekanisme hambatan sterik (*steric hindrance*) yang mencegah partikel-partikel semen saling menggumpal (*flocculation*). Kombinasi antara gaya tolak-menolak elektrostatik dan efek sterik tersebut menyebabkan partikel semen terdispersi secara lebih merata sehingga kebutuhan air untuk mencapai tingkat fluiditas tertentu menjadi lebih rendah. (Volaity et al., 2025)

Mekanisme *dispersi* yang dihasilkan oleh PCE memiliki peranan yang sangat penting dalam menentukan sifat reologi beton segar. Reologi beton merupakan ilmu yang mempelajari perilaku aliran dan deformasi campuran beton sebelum mengalami pengerasan. Parameter utama yang sering digunakan untuk menggambarkan sifat reologi beton adalah *viskositas plastis* (*plastic viscosity*) dan tegangan luluh (*yield stress*). *Viskositas plastis* menunjukkan besarnya hambatan internal terhadap aliran beton, sedangkan tegangan luluh menggambarkan gaya minimum yang diperlukan agar beton mulai mengalir. Kedua parameter tersebut sangat memengaruhi *workability*, kemampuan pemadatan,

risiko segregasi, serta kualitas beton yang dihasilkan setelah pengerasan.(Narayana Rao et al., 2024). Kinerja PCE dalam memodifikasi sifat reologi beton sangat dipengaruhi oleh karakteristik struktur molekulnya. Beberapa parameter yang diketahui berpengaruh antara lain panjang rantai samping, *densitas grafting*, distribusi berat molekul, rasio antara rantai utama dan rantai samping, serta konfigurasi kimia makromonomer yang digunakan dalam proses sintesis.(Rehman & Kim, 2021) Perubahan pada salah satu parameter tersebut dapat mengubah kemampuan adsorpsi molekul PCE pada permukaan partikel semen dan memengaruhi ketebalan lapisan sterik yang terbentuk. Akibatnya, efektivitas *dispersi* partikel semen juga mengalami perubahan yang berdampak langsung terhadap *workability* dan viskositas campuran beton. (Inayath Basha et al., 2023)

Di antara berbagai parameter tersebut, panjang rantai samping makromonomer merupakan salah satu faktor yang paling banyak diteliti karena memiliki pengaruh signifikan terhadap *performa dispersi*. Rantai samping yang lebih panjang umumnya menghasilkan lapisan sterik yang lebih tebal sehingga mampu meningkatkan jarak antarpartikel semen dan mengurangi kecenderungan terjadinya flokulasi. Kondisi ini menyebabkan beton menjadi lebih mudah mengalir dan menunjukkan nilai slump flow yang lebih tinggi. Namun, peningkatan panjang rantai samping tidak selalu menghasilkan kinerja yang lebih baik. Pada kondisi tertentu, rantai samping yang terlalu panjang dapat menyebabkan penurunan kohesi campuran sehingga meningkatkan risiko segregasi dan *bleeding*. Sebaliknya, rantai samping yang terlalu pendek sering kali tidak mampu menghasilkan efek *sterik* yang memadai sehingga *dispersi* partikel semen menjadi kurang optimal.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji hubungan antara struktur molekul PCE dan sifat reologi material berbasis semen. (Ceretti et al., 2023) Penelitian melaporkan bahwa peningkatan panjang rantai samping mampu meningkatkan kemampuan *dispersi* partikel semen sehingga menghasilkan nilai fluiditas yang lebih tinggi. Penelitian lain yang dilakukan oleh Plank dan Hirsch menunjukkan bahwa konfigurasi molekul PCE berpengaruh langsung terhadap perilaku adsorpsi pada permukaan semen dan stabilitas suspensi partikel.(Plank & Hirsch, 2007) Selain itu, berbagai studi juga menemukan bahwa perubahan struktur makromonomer dapat memengaruhi kebutuhan dosis *superplasticizer*, waktu retensi slump, serta interaksi kimia dengan fase hidrasi semen. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa struktur molekul PCE merupakan faktor kunci yang menentukan efektivitas *superplasticizer* dalam campuran beton.(Xia et al., 2024)

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang telah dilakukan masih berfokus pada pengaruh struktur PCE terhadap fluiditas pasta semen atau mortar. Kajian yang secara khusus mengevaluasi hubungan antara struktur *makromonomer*, *viskositas plastis*, dan *workability* pada campuran beton masih relatif terbatas. Padahal, perilaku beton segar jauh lebih kompleks dibandingkan pasta semen karena melibatkan interaksi antara semen, air, agregat halus, agregat kasar, dan bahan tambah kimia. Oleh karena itu, hasil penelitian pada skala pasta semen tidak selalu dapat diterapkan secara langsung pada campuran beton. Selain itu, hingga saat ini belum terdapat konsensus yang jelas mengenai konfigurasi panjang rantai samping yang paling efektif untuk menghasilkan keseimbangan antara fluiditas tinggi dan stabilitas campuran yang baik. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) yang perlu dikaji lebih lanjut.

Pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara struktur *makromonomer* PCE dan sifat reologi beton sangat penting bagi pengembangan teknologi beton masa depan. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam perancangan *superplasticizer* generasi baru yang memiliki performa lebih baik, khususnya untuk aplikasi beton berkinerja tinggi, beton memadat sendiri, dan beton ramah lingkungan. Selain itu, optimasi struktur molekul PCE juga dapat membantu industri konstruksi dalam menghasilkan beton dengan kualitas yang lebih konsisten, efisiensi penggunaan material yang lebih tinggi, serta biaya produksi yang lebih ekonomis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh struktur makromonomer *superplasticizer* berbasis polikarboksilat terhadap viskositas dan *workability* beton. (Schiefer & Plank, 2023). Analisis dilakukan melalui pengujian *slump flow* serta evaluasi parameter viskositas pada campuran beton yang menggunakan variasi panjang rantai samping makromonomer PCE. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara struktur molekul PCE dan performa beton segar, sekaligus menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan teknologi bahan tambah kimia yang lebih efektif dalam mendukung kebutuhan konstruksi modern.(Marandi & Shirzad, 2025)

Penelitian lain terkait Pengaruh Rasio Air-semen Terhadap Kuat Tekan Beton Agregat Daur Ulang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa besarnya pengaruh terhadap kekuatan beton agregat daur ulang adalah dengan urutan tinggi ke rendah: rasio air-semen, laju substitusi pasir sungai alam, kebersihan agregat, kadar agregat kasar daur ulang, dan kadar batu bata pecah. (DANANG HADI NUGROHO et al., 2024)

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh struktur makromonomer *superplasticizer* berbasis polikarboksilat (*Polycarboxylate Ether/PCE*) terhadap viskositas dan *workability* beton. (Sugiyono, 2017) Penelitian dilakukan dengan memvariasikan panjang rantai samping makromonomer PCE sebagai variabel bebas, yang terdiri atas tiga kategori, yaitu rantai pendek (PCE-A), rantai sedang (PCE-B), dan rantai panjang (PCE-C). Variabel terikat yang diamati meliputi nilai *slump flow* sebagai indikator *workability* serta viskositas plastis beton segar yang menggambarkan karakteristik reologi campuran. Variasi struktur makromonomer PCE dibedakan berdasarkan panjang rantai samping polietilen glikol (PEG), yaitu PCE-A menggunakan PEG dengan berat molekul sekitar 1.200 g/mol (± 27 unit EO), PCE-B menggunakan PEG 2.400 g/mol (± 54 unit EO), dan PCE-C menggunakan PEG 3.400 g/mol (± 77 unit EO). Material yang digunakan dalam penelitian meliputi semen Portland Tipe I sebagai bahan pengikat, agregat halus berupa pasir sungai yang memenuhi persyaratan gradasi ASTM C33, agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran maksimum 20 mm, air bersih yang memenuhi standar mutu untuk campuran beton, serta *superplasticizer* berbasis polikarboksilat dengan variasi struktur makromonomer. Penelitian sebelumnya untuk menjaga konsistensi hasil pengujian, seluruh campuran beton dirancang menggunakan faktor air-semen (*water-cement ratio*) sebesar 0,35 dan dosis *superplasticizer* yang sama pada setiap variasi campuran. Untuk menjaga konsistensi hasil pengujian, seluruh campuran beton dirancang menggunakan faktor air-semen (*water-cement ratio*) sebesar **0,35** dan dosis *superplasticizer* sebesar **8 mL/kg semen ($\approx 0,8\%$ berat semen)** pada setiap variasi campuran. (Yudha Rachman Winarto, 2026)

Proses pembuatan benda uji diawali dengan pencampuran agregat halus, agregat kasar, dan semen dalam kondisi kering. Untuk menjaga konsistensi hasil pengujian, seluruh campuran beton dirancang menggunakan faktor air-semen (*water-cement ratio*) sebesar **0,35** dan dosis *superplasticizer* sebesar **0,8% terhadap berat semen** pada setiap variasi campuran. Proses pembuatan benda uji diawali dengan pencampuran agregat halus, agregat kasar, dan semen dalam kondisi kering menggunakan *concrete mixer* selama 2 menit. Selanjutnya, air pencampur yang telah dicampur dengan *superplasticizer* ditambahkan ke dalam campuran, kemudian diaduk selama 3–5 menit hingga diperoleh campuran yang homogen. Setiap variasi campuran (PCE-A, PCE-B, dan PCE-C) dibuat sebanyak **tiga ulangan (n = 3)** sehingga total terdapat **sembilan benda uji**. Setelah proses pencampuran selesai, dilakukan pengujian *slump flow* untuk mengevaluasi tingkat *workability* beton segar, sedangkan pengujian viskositas dilakukan menggunakan *concrete rheometer* untuk memperoleh nilai viskositas plastis dan *yield stress*. Pengujian viskositas dilakukan menggunakan *concrete rheometer* untuk memperoleh parameter viskositas plastis dan *yield stress*. (Mulyono, 2021)

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif untuk menentukan nilai rata-rata, standar deviasi, dan kecenderungan perubahan setiap parameter. (Sugiyono, 2023) Selain itu, analisis regresi digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara variasi struktur makromonomer PCE dengan perubahan nilai *slump flow* dan viskositas plastis beton. Parameter regresi yang dianalisis meliputi persamaan regresi linear dan koefisien determinasi (R^2) sebagai indikator keeratan hubungan antarvariabel. Mengingat penelitian ini hanya menggunakan tiga variasi struktur makromonomer (PCE-A, PCE-B, dan PCE-C), hasil analisis regresi digunakan untuk menggambarkan kecenderungan hubungan (*trend analysis*) dan bukan sebagai dasar pengujian signifikansi statistik inferensial. Oleh karena itu, hasil regresi diinterpretasikan secara deskriptif dengan didukung teori mengenai mekanisme dispersi partikel semen oleh *superplasticizer* berbasis PCE.

Hipotesis Penelitian

Penelitian ini didasarkan pada teori bahwa struktur molekul *superplasticizer* berbasis polikarboksilat (*Polycarboxylate Ether/PCE*) memiliki pengaruh langsung terhadap perilaku reologi beton segar. Panjang rantai samping makromonomer berperan dalam menghasilkan efek *steric hindrance* yang mampu meningkatkan *dispersi* partikel semen dan mengurangi kecenderungan terjadinya flokulasi. Semakin efektif proses *dispersi* tersebut, semakin rendah hambatan internal campuran beton sehingga kemampuan alir (*flowability*) meningkat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Struktur Makromonomer terhadap Workability Beton

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan panjang rantai samping *makromonomer* memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai *slump flow* beton.

Tabel 1. Hasil Pengujian Workability Beton

Variasi PCE Panjang Rantai Samping Slump Flow (mm)		
PCE-A	Pendek	560
PCE-B	Sedang	650
PCE-C	Panjang	730

Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan panjang rantai samping menghasilkan peningkatan nilai *slump flow*. Fenomena ini terjadi karena rantai samping yang lebih panjang mampu menciptakan efek *steric hindrance* yang lebih kuat sehingga partikel semen *terdispersi* secara lebih efektif. *Dispersi* yang baik mengurangi gaya tarik antarpartikel sehingga campuran menjadi lebih mudah mengalir.

Pengaruh Struktur Makromonomer terhadap Viskositas

Hasil pengujian viskositas plastis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Viskositas Beton

Variasi PCE Viskositas Plastis (Pa.s)	
PCE-A	48,2
PCE-B	39,5
PCE-C	31,8

Terlihat bahwa *viskositas plastis* menurun seiring bertambahnya panjang rantai samping *makromonomer*. Penurunan viskositas ini menunjukkan berkurangnya hambatan internal dalam campuran beton akibat peningkatan efisiensi *dispersi* partikel semen. Nilai *slump flow* yang semakin tinggi juga menunjukkan peningkatan *workability* beton. Berdasarkan klasifikasi *slump flow* menurut EFNARC, nilai *slump flow* sebesar 560 mm termasuk kategori SF1, 650 mm termasuk SF2, dan 730 mm termasuk SF3. Campuran dengan kategori SF3 memiliki kemampuan alir yang sangat tinggi sehingga secara teoritis lebih berpotensi mengalami segregasi apabila stabilitas campuran tidak memadai. Namun, penelitian ini tidak melakukan pengujian segregasi menggunakan metode terstandar seperti Visual Stability Index (VSI) sesuai ASTM C1611, maupun J-Ring atau V-Funnel sesuai rekomendasi EFNARC. Oleh karena itu, indikasi potensi segregasi pada campuran PCE-C hanya didasarkan pada karakteristik *flowability* yang tinggi dan tidak dapat dijadikan sebagai bukti kuantitatif terjadinya segregasi. Salah satu keterbatasan penelitian ini adalah belum dilakukannya pengujian stabilitas campuran secara kuantitatif menggunakan metode standar, seperti Visual Stability Index (VSI) berdasarkan ASTM C1611, maupun J-Ring, L-Box, atau V-Funnel sesuai

pedoman EFNARC. Oleh karena itu, evaluasi mengenai potensi segregasi pada campuran dengan *workability* tinggi masih bersifat indikatif. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melengkapi pengujian tersebut sehingga hubungan antara struktur makromonomer PCE, *workability*, viskositas, dan stabilitas campuran dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

Tabel 3. Data Hubungan Struktur Makromonomer PCE terhadap *Slump Flow* dan Viskositas Plastis Beton

Variasi PCE	Kode (x)	<i>Slump Flow</i> (mm)	Viskositas Plastis (Pa·s)
PCE-A	1	560	48,2
PCE-B	2	650	39,5
PCE-C	3	730	31,8

Analisis Regresi Hubungan Struktur Makromonomer terhadap *Slump Flow*

Persamaan regresi

$$y = 85x + 476,67$$

dengan:

$$R^2 = 0,999$$

Koefisien korelasi (R) = 0,999

Hasil analisis regresi menunjukkan hubungan linear positif yang sangat kuat antara peningkatan panjang rantai samping makromonomer PCE dan nilai *slump flow*. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y = 85x + 476,67$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,999$, yang menunjukkan bahwa sekitar 99,9% variasi nilai *slump flow* dapat dijelaskan oleh variasi struktur makromonomer PCE. Semakin panjang rantai samping makromonomer, semakin tinggi nilai *slump flow* yang dihasilkan. Namun demikian, karena analisis ini hanya didasarkan pada tiga variasi data, hasil regresi digunakan untuk menunjukkan kecenderungan hubungan (*trend analysis*) dan bukan sebagai dasar penarikan kesimpulan statistik inferensial.

Analisis Regresi Hubungan Struktur Makromonomer PCE terhadap Viskositas Plastis Beton

Persamaan regresi linear sederhana yang diperoleh adalah:

$$y = -8,20x + 56,23$$

dengan koefisien determinasi:

$$R^2 = 0,999$$

Hasil analisis regresi menunjukkan Nilai $R^2 = 0,999$ menunjukkan bahwa sekitar 99,9% variasi viskositas plastis dapat dijelaskan oleh perubahan struktur makromonomer PCE. Semakin panjang rantai samping makromonomer, viskositas plastis cenderung menurun akibat meningkatnya efektivitas dispersi partikel semen yang dihasilkan oleh mekanisme *steric hindrance*.

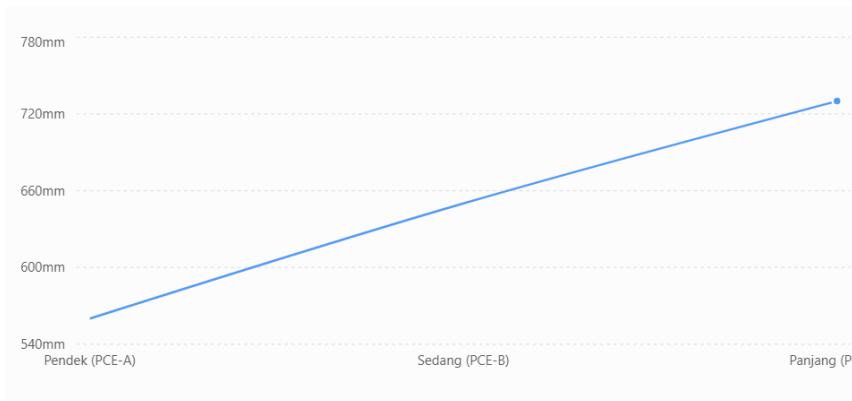
Selanjutnya, apabila dibandingkan dengan hasil pengujian *slump flow*, terlihat bahwa penurunan viskositas plastis diikuti oleh peningkatan *workability* beton. Hubungan berbanding terbalik (*inverse relationship*) ini menunjukkan bahwa struktur makromonomer berperan penting dalam mengendalikan keseimbangan antara kemudahan pengerjaan dan stabilitas campuran. Gugus karboksilat pada rantai utama berfungsi sebagai titik adsorpsi pada permukaan partikel semen, sedangkan rantai samping polietilen glikol (PEG) membentuk hambatan sterik yang mencegah flokulasi partikel sehingga dispersi semen menjadi lebih efektif.

Namun demikian, hasil regresi ini diinterpretasikan sebagai analisis kecenderungan (*trend analysis*) karena hanya menggunakan tiga variasi struktur makromonomer (PCE-A, PCE-B, dan PCE-C). Oleh sebab itu, uji signifikansi statistik, seperti uji-*t*, uji-*F*, atau *p-value*, tidak dilakukan karena jumlah

titik data belum memadai untuk menghasilkan kesimpulan inferensial yang kuat. Hasil penelitian ini tetap mendukung teori bahwa optimasi struktur molekul PCE merupakan faktor penting dalam meningkatkan *workability* dan mengendalikan sifat reologi beton berkinerja tinggi.

Hubungan Struktur Makromonomer PCE terhadap Workability Beton

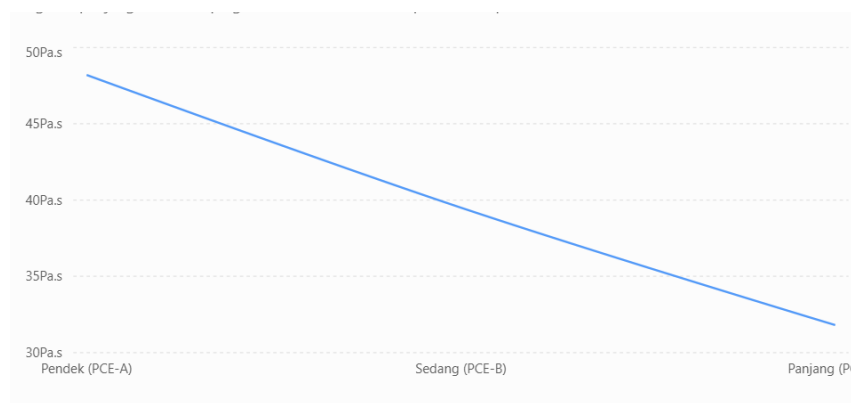
Pengaruh panjang rantai samping makromonomer terhadap nilai slump flow beton.



Gambar 1: Hubungan Panjang Rantai Samping Makromonomer terhadap Nilai Slump Flow Beton.

Gambar 1 menunjukkan bahwa peningkatan panjang rantai samping *makromonomer* menyebabkan peningkatan *workability* beton. Nilai slump flow meningkat dari 560 mm pada struktur rantai pendek menjadi 730 mm pada struktur rantai panjang akibat meningkatnya *efek steric hindrance* yang memperbaiki *dispersi* partikel semen.

Hubungan Panjang Rantai Samping Makromonomer PCE terhadap Viskositas Plastis Beton



Gambar 2. Hubungan Panjang Rantai Samping Makromonomer PCE terhadap Viskositas Plastis Beton

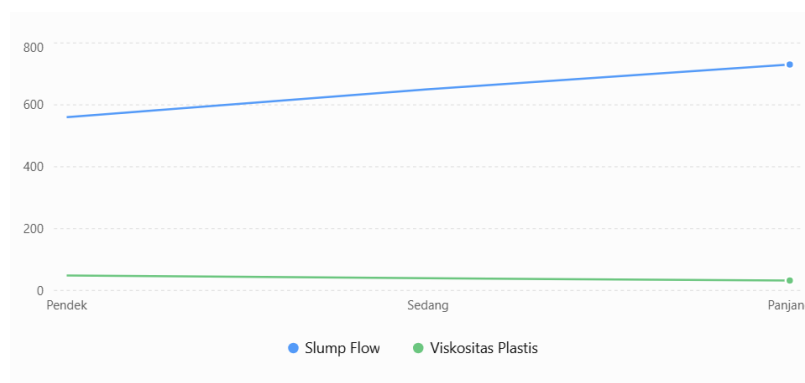
Berdasarkan gambar 2 Viskositas plastis menurun dari 48,2 Pa.s menjadi 31,8 Pa.s akibat meningkatnya kemampuan *dispersi* partikel semen oleh *superplasticizer* berbasis *polikarboksilat*.

Interpretasi Grafik

Gambar 1 menunjukkan bahwa *workability* beton meningkat seiring bertambahnya panjang rantai samping makromonomer Polycarboxylate Ether (PCE). Peningkatan tersebut ditunjukkan oleh bertambahnya nilai *slump flow* pada setiap variasi PCE, sebagaimana telah disajikan pada Tabel 1. Kondisi ini mengindikasikan bahwa semakin panjang rantai samping makromonomer, semakin efektif mekanisme *steric hindrance* yang dihasilkan sehingga dispersi partikel semen menjadi lebih baik

dan campuran beton memiliki kemampuan mengalir yang lebih tinggi. Sebaliknya, Gambar 2 memperlihatkan bahwa viskositas plastis beton mengalami penurunan seiring bertambahnya panjang rantai samping makromonomer PCE. Nilai viskositas plastis pada masing-masing variasi campuran telah disajikan pada Tabel 2. Penurunan viskositas menunjukkan berkurangnya hambatan internal dalam campuran beton akibat meningkatnya efisiensi dispersi partikel semen oleh superplasticizer berbasis PCE. Secara keseluruhan, kedua grafik menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik (*inverse relationship*) antara *workability* dan viskositas plastis beton. Semakin panjang rantai samping makromonomer PCE, semakin efektif dispersi partikel semen yang terjadi sehingga viskositas plastis menurun dan nilai *slump flow* meningkat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur makromonomer PCE berperan penting dalam meningkatkan kemudahan pengerjaan (*workability*) beton melalui penurunan hambatan aliran campuran, meskipun optimasi panjang rantai samping tetap diperlukan untuk menjaga stabilitas campuran beton.

Jika digabungkan hubungan tersebut maka:



Gambar 3. Hubungan Struktur Makromonomer PCE terhadap *Slump Flow* dan *Viskositas Plastis* Beton

Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan panjang rantai samping makromonomer PCE menyebabkan nilai *slump flow* meningkat dari 560 mm menjadi 730 mm, sementara *viskositas plastis* menurun dari 48,2 Pa.s menjadi 31,8 Pa.s. Fenomena ini mengindikasikan adanya hubungan berbanding terbalik antara *workability* dan viskositas beton. Semakin efektif *dispersi* partikel semen akibat efek *steric hindrance* dari rantai samping PCE, semakin rendah hambatan aliran campuran sehingga *workability* meningkat.

Pembuktian Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *slump flow* meningkat secara bertahap dari 560 mm pada PCE-A (rantai pendek), menjadi 650 mm pada PCE-B (rantai sedang), dan mencapai 730 mm pada PCE-C (rantai panjang). Pada saat yang sama, viskositas plastis mengalami penurunan dari 48,2 Pa.s menjadi 39,5 Pa.s dan selanjutnya 31,8 Pa.s. Tren perubahan tersebut menunjukkan adanya pengaruh yang konsisten dari variasi panjang rantai samping makromonomer terhadap sifat reologi beton segar. Secara kuantitatif, peningkatan panjang rantai samping dari PCE-A ke PCE-C menghasilkan peningkatan *slump flow* sebesar:

$$\frac{730 - 560}{560} \times 100\% = 30,36\%$$

Sedangkan viskositas plastis mengalami penurunan sebesar:

$$\frac{48,2 - 31,8}{48,2} \times 100\% = 34,02\%$$

Hasil tersebut membuktikan bahwa semakin panjang rantai samping makromonomer, semakin besar kemampuan molekul PCE dalam menghasilkan efek *steric hindrance* yang mampu mencegah penggumpalan partikel semen. Akibatnya, distribusi partikel semen menjadi lebih homogen, gaya gesek internal berkurang, viskositas plastis menurun, dan campuran beton menjadi lebih mudah mengalir (*workable*). Berdasarkan hasil pengujian eksperimental, variasi struktur makromonomer menunjukkan kecenderungan memengaruhi viskositas plastis dan *workability* beton.

Interpretasi

Gambar 1 menunjukkan hubungan positif antara panjang rantai samping makromonomer dan nilai *slump flow*, sedangkan Gambar 2 menunjukkan hubungan negatif antara panjang rantai samping dan viskositas plastis. Ketika kedua parameter dianalisis secara bersamaan pada Gambar 3, terlihat adanya hubungan berbanding terbalik (*inverse relationship*) antara viskositas dan *workability*. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme adsorpsi molekul PCE pada permukaan partikel semen. Gugus karboksilat pada rantai utama berfungsi sebagai titik adsorpsi, sedangkan rantai samping polietilen glikol (PEG) membentuk lapisan sterik yang menjaga jarak antarpartikel semen. Semakin panjang rantai samping, semakin besar efek *steric hindrance* yang terbentuk sehingga flokulasi partikel semen berkurang dan kemampuan alir beton meningkat. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis deskriptif, variasi struktur makromonomer PCE menunjukkan kecenderungan memengaruhi viskositas plastis dan *workability* beton. Namun demikian, hubungan tersebut diinterpretasikan sebagai kecenderungan (*trend*) karena penelitian ini hanya menggunakan tiga variasi struktur makromonomer sehingga belum dilakukan pengujian signifikansi statistik inferensial, seperti uji ANOVA atau uji signifikansi regresi. Selain itu, hasil pengamatan menunjukkan bahwa campuran dengan PCE-C memiliki *flowability* yang paling tinggi sehingga secara teoritis berpotensi mengalami penurunan stabilitas campuran. Oleh karena itu, struktur makromonomer dengan panjang rantai samping kategori sedang (PCE-B) memberikan keseimbangan yang lebih baik antara *workability* dan stabilitas beton segar.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa struktur makromonomer *superplasticizer* berbasis polikarboksilat menunjukkan kecenderungan memengaruhi terhadap viskositas dan *workability* beton. Peningkatan panjang rantai samping menghasilkan peningkatan nilai *slump flow* serta penurunan viskositas plastis akibat meningkatnya efektivitas dispersi partikel semen. Namun, rantai samping yang terlalu panjang dapat menyebabkan penurunan stabilitas campuran dan meningkatkan risiko segregasi. Berdasarkan hasil penelitian Struktur makromonomer dengan panjang rantai sedang memberikan keseimbangan terbaik antara *workability* dan stabilitas campuran beton. Dengan demikian, optimasi desain molekul *superplasticizer* berbasis polikarboksilat merupakan salah satu faktor penting dalam pengembangan beton berkinerja tinggi. menggunakan jumlah replikasi benda uji yang lebih banyak agar hasil pengujian dapat dianalisis menggunakan uji statistik inferensial sehingga validitas dan reliabilitas hasil penelitian meningkat. Selain itu, evaluasi stabilitas campuran perlu dilengkapi dengan pengujian segregasi secara kuantitatif menggunakan metode terstandar, seperti *Visual Stability Index* (VSI), *J-Ring*, atau *V-Funnel*, sehingga hubungan antara *workability* dan stabilitas campuran dapat dinilai secara lebih objektif. Penelitian berikutnya juga perlu mengkaji pengaruh variasi faktor air-semen (*water-cement ratio*) terhadap kinerja berbagai struktur makromonomer PCE untuk mengetahui interaksi kedua parameter tersebut. Di samping itu, penelitian dapat dikembangkan dengan mengevaluasi pengaruh densitas *grafting*, distribusi berat

molekul, serta kombinasi berbagai jenis makromonomer terhadap sifat reologi, stabilitas, dan performa mekanik beton pada umur jangka pendek maupun jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ceretti, D. V. A., Edeleva, M., Cardon, L., & D'hooge, D. R. (2023). Molecular Pathways for Polymer Degradation during Conventional Processing, Additive Manufacturing, and Mechanical Recycling. *Molecules*, 28(5), 2344. <https://doi.org/10.3390/molecules28052344>
- DANANG HADI NUGROHO, HADI SURYA WIBAWANTO SUNARWADI, & HERU PRASETYO NUGROHO. (2024). SEBUAH ULASAN SINGKAT TENTANG BETON AGREGAT DAUR ULANG. *JURNAL DAKTILITAS*, 4(01), 01–10. <https://doi.org/10.36563/daktilitas.v4i01.1155>
- Ige, O. E., & Kabeya, M. (2025). Decarbonizing the Cement Industry: Technological, Economic, and Policy Barriers to CO2 Mitigation Adoption. *Clean Technologies*, 7(4), 85. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7040085>
- Inayath Basha, S., Ur Rehman, A., Aziz, M. A., & Kim, J. (2023). Cement Composites with Carbon-Based Nanomaterials for 3D Concrete Printing Applications – A Review. *The Chemical Record*, 23(4). <https://doi.org/10.1002/tcr.202200293>
- Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(9), 408. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02213-5>
- Mulyono, T. (2021). *Perancangan Campuran Beton, Pengolahan dan Pengujian Beton Segar, Seri 3: Uji Laboratorium Bahan Beton dan Beton*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25151474>
- Narayana Rao, U. V., Kumar, N. V. S., Kavitha, C., Madhavi, Y., & Chowdary, P. S. (2024). Polycarboxylate Superplasticizers Used in Concrete: A review. *International Journal of Experimental Research and Review*, 38, 69–88. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2024.v38.007>
- Plank, J., & Hirsch, C. (2007). Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 537–542. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.007>
- Rehman, A. U., & Kim, J.-H. (2021). 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials*, 14(14), 3800. <https://doi.org/10.3390/ma14143800>
- Rudi, R., Amran, Y., & Oktavia, C. (2025). PENGEMBANGAN KONSEP BETON RAMAH LINGKUNGAN PADA SELF COMPACTING CONCRETE (SCC) MENGGUNAKAN BOTTOM ASH DAN SIKACIM CONCRETE. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi) : Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 15(1), 14–24. <https://doi.org/10.24127/tp.v15i1.4762>
- Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., García, J., & Yepes, V. (2023). A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, 73, 106725. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106725>
- Schiefer, C., & Plank, J. (2023). CO2 emission of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) used in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 427, 138785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138785>
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Experimen*.

- Sugiyono. (2023). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Vagtholm, R., Matteo, A., Vand, B., & Tupenaite, L. (2023). Evolution and Current State of Building Materials, Construction Methods, and Building Regulations in the U.K.: Implications for Sustainable Building Practices. *Buildings*, 13(6), 1480. <https://doi.org/10.3390/buildings13061480>
- Volaity, S. S., Aylas-Paredes, B. K., Han, T., Huang, J., Sridhar, S., Sant, G., Kumar, A., & Neithalath, N. (2025). Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production. *Npj Materials Sustainability*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00068-6>
- Xia, Y., Shi, W., Xiang, S., Yang, X., Yuan, M., Zhou, H., Yu, H., Zheng, T., Zhang, J., Jiang, Z., & Huang, L. (2024). Synthesis and Modification of Polycarboxylate Superplasticizers—A Review. *Materials*, 17(5), 1092. <https://doi.org/10.3390/ma17051092>
- Yudha Rachman Winarto, H. P. (2026). Pengaruh Penambahan NaCl, Superplasticizer, dan Faktor Air-Semen terhadap Slump Adukan Beton. *Widya Teknik*, 25(1), 32–39.