

Korelasi Uji Nondestruktif UPV terhadap Kekuatan Mekanis Beton Beragregat Plastik Polypropylene

Muhammad Sofyan^{1*)}; Ade Okvianti Irlan²; Samsurizal³

1. Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11750, Indonesia
2. Program Studi Teknik Sipil, Universitas Trisakti, Jl. Kyai Tapa No. 1 Grogol, Jakarta Barat, 11440, Indonesia
3. Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11750, Indonesia

**)Email: m.sofyan@itpln.ac.id*

Received: 7 September 2023 | Accepted: 17 Oktober 2023 | Published: 15 Desember 2023

ABSTRACT

Concrete is the most popular conventional building material. Destructive testing is a classic way to determine the quality of concrete. Non-destructive testing (NDT) methods are starting to be developed because they are more practical and do not damage concrete. On the other hand, the accumulation of plastic waste has become a global problem. This research aims to analyze the mechanical and physical characteristics of concrete that uses plastic aggregate partially using the non-destructive testing method (UPV test). The percentage of PP granules ranges between 0%, 10%, 20%, 30% where the FAS used is 0.45. Each concrete sample will be cast in a cylindrical mold measuring 10x20cm, block mold 10x10x40cm. The results obtained show that an increase in the percentage of 10% PP in the sample causes a decrease in the slump value. The percentage reduction for each 10% increase in plastic granules ranges from 0.8% to 12.2%. Then the use of PP plastic as fine aggregate can reduce the strength of concrete by up to 29%. The higher the UPV value, the compressive strength of the concrete increases. So prediction of compressive strength values based on UPV numbers can be done with the equation $Y=0.0812x-302.99$

Keywords: Concrete, Non-destructive Test (NDT), Polypropylene Plastic (PP), UPV test, Mechanical Characteristics

ABSTRAK

Beton merupakan material konvensional bangunan yang paling populer. Pengujian destruktif adalah cara klasik untuk mengetahui mutu dari beton. Metode pengujian Non destruktif (NDT) mulai dikembangkan karena lebih praktis dan tidak merusak beton. Di sisi yang lain, penumpukan sampah plastik telah menjadi masalah global. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik mekanis dan fisis beton yang menggunakan agregat plastik secara parsial dengan menggunakan metode pengujian Non destruktif (UPV test). Persentase butiran PP berkisar antara 0,10%, 20%, 30% dimana FAS yang digunakan adalah 0,45. Masing-masing sampel beton akan dicetak dalam cetakan silinder ukuran 10x20cm, cetakan balok 10x10x40cm. Hasil yang diperoleh menunjukkan kenaikan persentase 10% PP dalam sampel menyebabkan penurunan nilai slump. Persentase Penurunan setiap kenaikan butiran plastik 10% berkisar antara 0.8 % hingga 12.2%. Kemudian Penggunaan plastik PP sebagai agregat halus dapat menurunkan kekuatan beton hingga 29%. Semakin tinggi nilai UPV kekuatan tekan beton semakin meningkat. Sehingga Prediksi nilai kuat tekan berdasarkan angka UPV dapat dilakukan dengan persamaan $Y=0.0812x-302.99$.

Kata kunci: Beton, Uji Non destruktif (NDT), Plastik Polypropylene (PP), UPV test, Karakteristik Mekanis

1. PENDAHULUAN

Beton adalah bahan konstruksi yang umum dalam bangunan. Namun memiliki beberapa kendala pada keawetannya seperti retak, susut, terkelupas, bahkan kerusakan permanen. Dengan berbagai factor tingginya tingkat kegagalan struktural di dunia menjadi perhatian hampir seluruh stakeholder, kebutuhan akan analisis struktur menjadi prioritas. Penilaian kinerja struktural bangunan melibatkan identifikasi potensi kegagalan pada struktur dan penggunaan berbagai teknik dan metode untuk menilai keandalan struktur. Proses ini penting untuk memastikan bahwa bangunan dapat memenuhi aspek keselamatan operasional selama umur desainnya [1]. Pada saat yang sama, pengujian non-destruktif digunakan untuk memeriksa, menguji atau mengevaluasi bahan, peralatan, rakitan tanpa merusak komponen atau sistem bangunan [2].

Utilitas plastik telah meningkat secara global di seluruh dunia yang menyebabkan peningkatan besar dalam limbah plastik. Sampah plastik merupakan ancaman lingkungan yang serius [3]. Plastik mencemari tanah, udara, dan air karena kandungan kimianya yang berbahaya; Bahaya yang berasal dari plastik sangat besar. Sampah plastik dapat menyebabkan saluran air tersumbat dan banjir, serta merupakan tempat berkembang biak yang ideal bagi penyakit yang dibawa oleh nyamuk. Ini juga berdampak negatif terhadap kesuburan tanah dengan mengurangi jumlah air hujan yang meresap ke dalam tanah dan diserap. Karena laju dekomposisi yang lambat, sampah plastik tidak dapat dibuang ke tempat pembuangan sampah. Pembakaran dimungkinkan karena nilai kalor sampah plastik cukup tinggi. Namun, proses ini cenderung melepaskan gas beracun yang pada akhirnya membahayakan kesehatan manusia [4].

Dari sudut pandang proteksi lingkungan dan pembangunan berkelanjutan, daur ulang plastik merupakan alternatif yang masuk akal untuk mengolah sampah plastik [5]. Selama 1 dekade terakhir, penggunaan limbah plastik dalam industri konstruksi telah banyak dipelajari [6,7]. Dalam kebanyakan kasus, limbah plastik digunakan sebagai agregat halus atau kasar pada beton atau mortar [8,9]. Berbagai bahan limbah plastik telah dipelajari, misalnya polietilen tereftalat (PET), polietilen densitas tinggi (HDPE), polivinil klorida (PVC), polietilen densitas rendah (LDPE), polipropilen (PP), polikarbonat, plastik limbah logam. (MPW) dan juga polistiren (PS). Sifatnya yang sangat baik dalam aspek daya tahan, densitas, kekuatan, dan insulasi termal yang tinggi membuat limbah plastik cocok untuk digunakan dan didaur ulang dalam industri konstruksi. Karena itu. Daur ulang limbah plastik dalam proses produksi bahan bangunan sebagai material penyusun beton merupakan upaya penting untuk mengurangi dampak buruk plastik pada lingkungan.

Sifat mekanis beton dapat diketahui dengan melakukan pengujian non-destruktif. Beberapa studi dilakukan bagaimana efektifitas hasil pengujian NDT terhadap performa mekanis beton. Studi dilakukan dengan pembekuan jangka pendek dan jangka panjang dari spesimen beton pada fase aktif hidrasi. Lalu memanfaatkan test UPV untuk memahami perilaku mekanis. Hasil yang diperoleh menunjukkan pengaruh embun beku pada UPV dalam fase aktif proses hidrasi pasta semen terhidrasi secara praktis identik untuk semua metode bunyi. Ditentukan bahwa perubahan hasil UPV menurun dengan bertambahnya umur beton pada lingkungan standar [10]. Azad et al [11] Menentukan rebound number (RN) menggunakan Schmidt hammer dan UPV beton yang mengalami pembebanan jangka pendek dan terus menerus. Pengurangan RN dan UPV untuk beton yang dikenai beban tekan 80% ditemukan masing-masing 8,1% dan 10%. Tarek et al [12] mempelajari Jenis agregat seperti batu bata pecah, batu pecah, batu bentuk bulat dan batu hitam. Rasio pasir terhadap agregat s/a adalah 0,36, 0,40, dan 0,44 dan rasio W/C adalah 0,45, 0,50, dan 0,55. Hasil yang diperoleh mengungkapkan UPV pada beton sangat dipengaruhi oleh jenis agregat dan rasio s/a selain kuat tekan beton. UPV dalam beton berkurang dengan meningkatnya rasio s/a.

Berdasarkan studi terdahulu yang telah dilaksanakan. Studi ini akan mengembangkan dan menganalisis hubungan/korelasi antara pengujian destruktif beton beragregat plastik PP terhadap pengujian Non Destruktif UPV. Selain Workability, kuat tekan, kuat lentur akan menjadi variable-variabel yang akan diuji sebagai pengujian dasar dari karakteristik beton.

2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

2.1. Deskripsi Sampel dan Material

Dalam penelitian ini Beton akan dimodelkan menggunakan butiran plastik PP diameter < 3mm (gambar 1) dengan persentasi butiran PP mulai dari 0, 10%, 20%, 30% dimana FAS yang digunakan adalah 0,45. Tiap spesimen Beton akan dicetak kedalam cetakan silinder 10x20 cm, cetakan balok 10x10x40 cm untuk dilakukan pengujian yang terdiri dari pengujian slump, uji kuat tekan, uji kuat lentur, uji Tarik belah, dan UPV test. Sedangkan pada Beton segar akan dilakukan uji slump. Material penyusun yang digunakan dalam penelitian ini mencakup semen portland, pasir sebagai agregat halus, kerikil agregat kasar dan butiran plastik PP sebagai substitusi agregat kasar. Secara rinci proporsi campuran benda uji dapat dilihat pada tabel 2.



Gambar 1. Butiran Plastik Polypropylene

Butiran Plastik PP (gambar 1) tergolong kuat, ringan dan tahan panas. Plastik PP mempunyai kemampuan melindungi material bagian dalam dari kelembapan, minyak dan senyawa kimia lainnya. Plastik PP sering digunakan sebagai kemasan produk biji-bijian agar tetap kering dan segar. PP juga digunakan untuk membuat ember, wadah margarin dan yogurt, sedotan, tali, insulasi dan pot cat plastik. Plastik PP dianggap aman jika digunakan kembali dan didaur ulang.

Agregat kasar dan Halus yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari distributor material lokal di wilayah makassar. Propertis Agregat kasar dan halus disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Propertis Agregat Kasar dan Halus

Uraian pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	
		Pasir	Kerikil
Modulus kehalusan	%	2,45	5,95
Berat jenis semu	-	2,43	2,72
Berat jenis kering	-	2,26	2,53
Berat jenis SSD	-	2,33	2,62
Penyerapan Air	%	3,11	2,47
Kadar Air	%	3,41	1,77
Kadar Lumpur	%	1,57	5,35
Keausan Agregat	%	-	26,74
Berat Volume Padat	kg/ltr	1,33	1,24

Tabel 2. Proporsi Campuran

Mix ID	Semen (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Kerikil (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	Plastici zer (kg/m ³)	Pellet Plastik PP (kg/m ³)	Persentase Volume plastik PP (%)	FAS
PP0-0.45 (Kontrol)	455.56	854.96	874.86	208.52	6.83	0	0	0.45
PP10-0.45	455.56	803.44	874.86	208.52	6.83	51.5	10	0.45
PP20-0.45	455.56	751.91	874.86	208.52	6.83	103.05	20	0.45
PP30-0.45	455.56	700.38	874.86	208.52	6.83	154.58	30	0.45

2.2. Pengujian Sampel

2.2.1. Kuat Tekan

Kuat Tekan merupakan suatu ukuran yang menggambarkan besarnya gaya aksial persatuan luas yang menyebabkan benda uji mencapai runtuh dengan level tertentu. Perhitungan kuat tekan Dapat ditulis dengan persamaan 1 [13]

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana :

$f'c$ = Kuat Tekan Beton (N/mm²)

P = Beban Maksimum (N)

A = Luas Penampang yang Menerima Beban (mm²)

Kuat tekan menjadi parameter untuk menentukan mutu dan kualitas beton yang ditentukan oleh agregat, perbandingan semen, dan perbandingan jumlah air.

2.2.2. Kuat Lentur

Pada setiap penampang, gaya-gaya dalam dapat bekerja yang diuraikan menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang tersebut. Gaya yang tegak lurus terhadap penampang tersebut menghasilkan tegangan lentur (tegangan tarik pada salah satu sisi serat di daerah sumbu netral dan tekan pada sisi penampang lainnya). Komponen ini dapat berperan dalam memikul momen lentur pada sebuah penampang. Kuat lentur beton atau biasa disebut sebagai modulus of rupture dapat dihitung dengan persamaan 2 jika kegagalan terjadi di bagian tengah bentang. (ASTM-C 78-02)[14].

$$fr = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

Persamaan 3 digunakan jika keruntuhan terjadi pada bagian tarik diluar tengah bentang.

$$fr = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3)$$

Dimana :

f_r = Tegangan Lentur Beton (N/mm^2)

P = Gaya Ultimit (N)

L = Panjang Bentang Balok (mm)

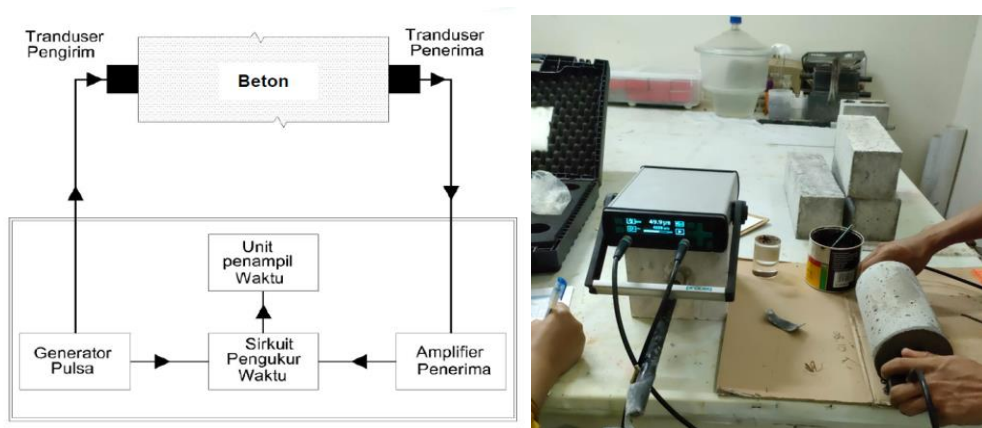
b = Lebar Penampang balok (mm)

d = Tinggi Penampang Balok (mm)

a = Jarak Rata-Rata dari Garis Keruntuhan dan Titik Perletakan terdekat diukur pada Bagian Tarik Spesimen (mm)

2.2.3. UPV Test (Uji Non Destruktif)

Gelombang yang merambat secara longitudinal dipancarkan oleh transduser elektroakustik yang bersentuhan langsung dengan salah satu permukaan sampel beton. Setelah melewati beton, rambatan gelombang diterima dan dikonversi menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang ditempatkan pada jarak L dari transduser. Elektronifikasi dilakukan secara otomatis untuk mengukur Waktu tempuh T. Kecepatan rambat gelombang V kemudian dihitung dengan membagi L dengan T. Cara pengujian ini dapat digunakan untuk mengevaluasi atau menentukan keseragaman dan mutu relatif beton, mendeteksi rongga dan retakan serta mengevaluasi efektivitas perbaikan retakan. Pengujian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui perubahan sifat beton saat pemeriksaan struktur dilakukan terutama dalam memperkirakan level kerusakan atau retak pada beton. Jika digunakan untuk mengamati perubahan kondisi selama periode waktu tertentu, lokasi pengujian harus ditandai pada struktur untuk memastikan pengujian dapat diulangi di lokasi yang sama. Perangkat uji, ditunjukkan secara skematis pada Gambar 4, terdiri dari generator kecepatan, sepasang konverter (pemancar dan penerima), amplifier, rangkaian pengaturan waktu, tampilan Waktu dan kabel koneksi. Alat NDT yang digunakan adalah UPV Proceq Pundit Lab.

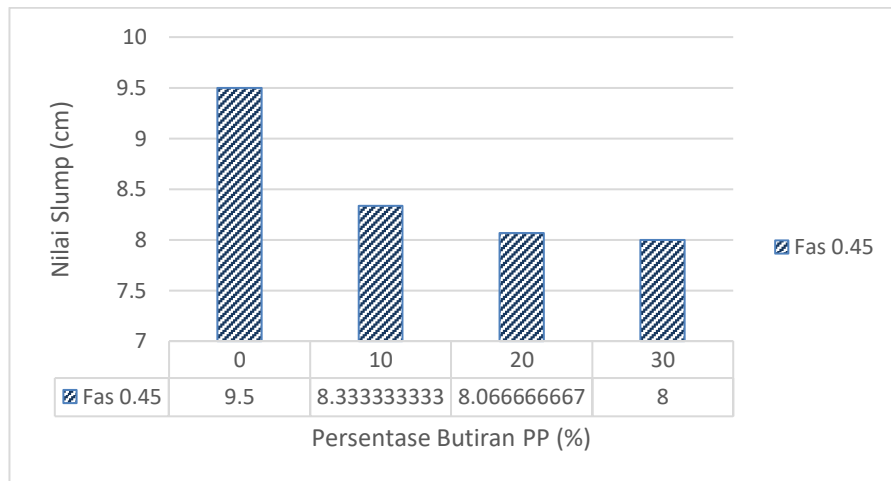


Gambar 2. Skema dan set up pengujian UPV [15]

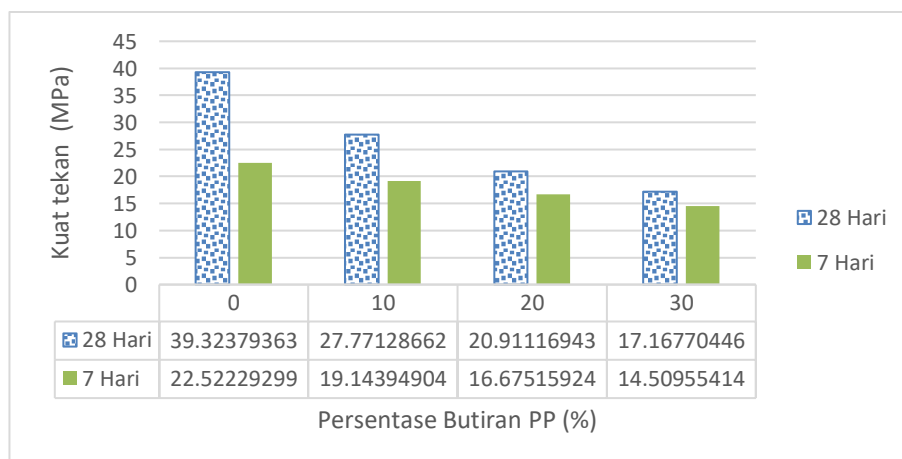
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Slump Value

Nilai Slump pada beton segar mengacu pada tingkat kemampuan beton untuk mengalir dan diaduk sebelum mengeras. Hasil pengujian slump dapat dilihat pada gambar 3. Penambahan butiran plastik PP dalam sampel beton dapat mempengaruhi slump beton. Pada umumnya, penambahan plastik PP bertujuan untuk mengurangi ketergantungan bahan baku beton konvensional serta memberikan dampak lingkungan yang positif dengan mendaur ulang limbah plastik. Namun, substitusi plastik PP setiap kenaikan persentase 10% dalam sampel menyebabkan penurunan nilai slump. Persentase Penurunan setiap kenaikan butiran plastik 10% berkisar antara 0.8 % hingga 12.2%. Beberapa faktor menjadi penyebab. Pertama, Plastik PP memiliki sifat yang lebih ringan dibandingkan dengan agregat kasar dan halus yang biasa digunakan dalam campuran beton. sehingga, penambahan plastik PP dapat mengurangi kepadatan campuran beton, selanjutnya berdampak pada kemampuan beton untuk mengalir. Selain itu, plastik PP dalam sampel beton juga membuat interaksi antara partikel semen dan air dalam campuran beton tidak optimal. sehingga kemampuan beton untuk membentuk ikatan yang kuat tidak tercapai.

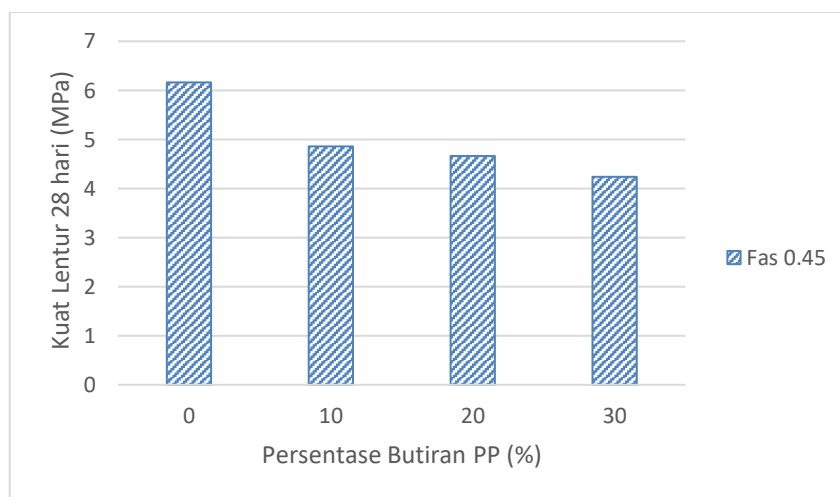


Gambar 3. Slump Value



Gambar 4. Kuat Tekan sampel 7 dan 28 hari

Gambar 4 membahas bagaimana kontribusi plastik PP sebagai agregat terhadap kekuatan tekan beton pada umur 7 dan 28 hari. Kuat tekan beton adalah parameter penting untuk mengevaluasi kualitas beton. Penggunaan plastik sebagai agregat dalam campuran beton mengindikasikan dampak negatif terhadap kekuatan tekan beton baik pada umur 7 dan 28 hari. Beberapa faktor menjadi penyebabnya. Dengan densitas yang rendah penggunaan plastik PP sebagai agregat halus dapat menurunkan kekuatan beton hingga 29%. Persentase penurunan rata-rata pada umur 28 hari adalah 23.9 %. Disamping itu, interaksi antara butiran plastik PP dan matriks semen dalam campuran beton juga dapat mempengaruhi kekuatan tekan beton. Plastik PP memiliki permukaan yang licin dan lebih permeabel dibandingkan dengan agregat kasar konvensional. Hal ini dapat mengurangi ikatan antara butiran plastik PP dan matriks binder yang pada akhirnya mengurangi kekuatan beton. Namun, perlu diketahui bahwa pengaruh penggunaan plastik PP sebagai agregat halus secara parsial terhadap kekuatan tekan beton dapat bervariasi tergantung pada jenis plastik yang digunakan, persentase konten plastik PP. Selain itu, teknik pengecoran dan perlakuan khusus pada kondisi segar juga dapat mempengaruhi hasil akhir kekuatan tekan beton.



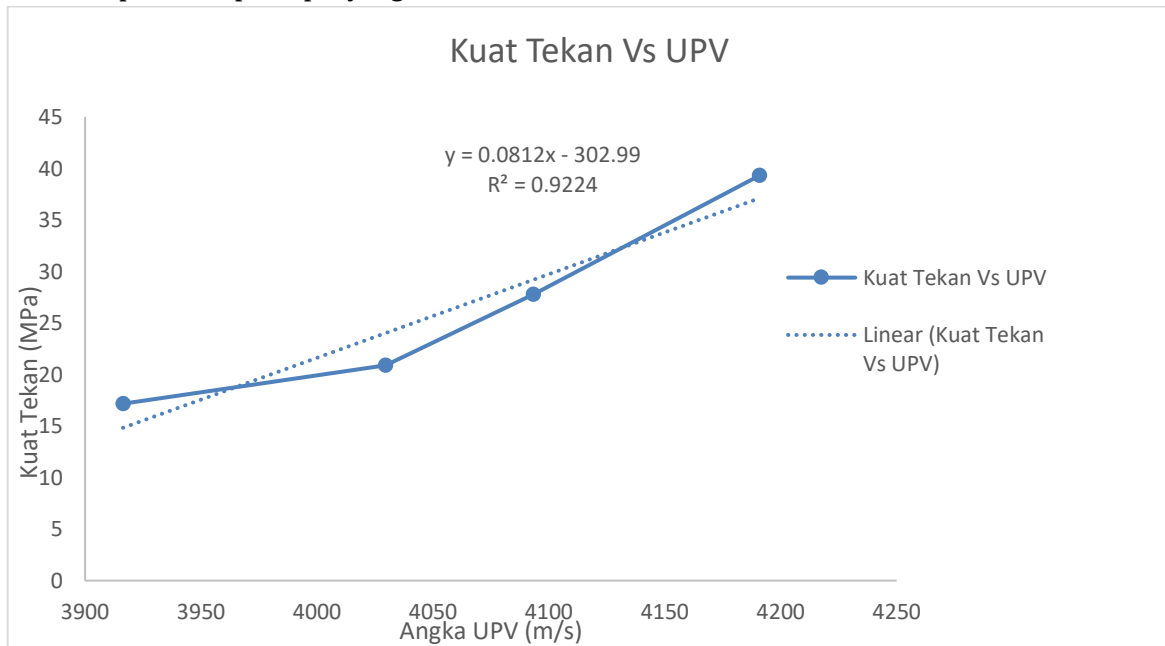
Gambar 5. Kuat lentur beton umru 28 hari

Pada gambar 5. kekuatan lentur beton yang menggunakan plastik PP sebagai agregat halus. Kekuatan lentur beton menggambarkan kemampuan beton dalam memikul beban lentur sebelum mengalami retak atau runtuh total. Penggunaan plastik PP pada sampel menunjukkan bahwa kekuatan lentur menurun setiap penambahan konten plastik 10%. Faktor yang mempengaruhi yaitu sifat plastik PP yang lebih agregat kasar yang biasa digunakan dalam beton. Selain itu, permukaan plastik PP yang licin tidak memungkinkan sifat adesif terhadap agregat lainnya. Penurunan kekuatan lentur berkisar antara 9.14% hingga 21.21 %.

Tabel 3. Hasil uji kuat tekan 28 hari dan Uji UPV

ID Sampel	Kuat tekan 28 Hari	UPV (m/s)
PP0-0.45	39.32379363	4191
PP10-0.45	27.77128662	4093.333333
PP20-0.45	20.91116943	4029.666667
PP30-0.45	17.16770446	3916.333333

Uji non destruktif dengan tes UPV memungkinkan investigasi terhadap keseragaman dan prediksi terhadap kekuatan tekan beton dapat dilakukan. Tabel 3 menyajikan hasil pengujian tekan dan UPV pada setiap sampel yang berumur 28 hari.



Gambar 6. Korelasi nilai UPV dan Kuat tekan

Gambar 6 mengindikasikan korelasi antar uji UPV terhadap kekuatan beton. Prediksi kekuatan dilakukan dengan menentukan persamaan regresi linier. Dalam kasus ini, nilai R-square sebesar 0.92 menunjukkan bahwa 92% variasi dalam uji kuat tekan dapat direpresentasikan oleh model regresi linier berdasarkan uji UPV. Sehingga dapat diungkapkan bahwa terjadi korelasi yang kuat antara kedua variabel. Dengan kata lain, semakin tinggi nilai UPV kekuatan tekan beton semakin meningkat. Namun perlu dipahami bahwa korelasi tidak mengimplikasikan hubungan sebab-akibat antara kedua variabel. Korelasi hanya mengindikasikan hubungan statistik antara keduanya. Oleh karena itu, meskipun terdapat korelasi yang kuat antara uji UPV dan kuat tekan, tidak dapat diklaim bahwa UPV non destruktif secara langsung menyebabkan perubahan dalam kuat tekan beton.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil dan pembahasan diperoleh kesimpulan bahwa Substitusi plastik PP setiap kenaikan persentase 10% dalam sampel menyebabkan penurunan nilai slump. Dimana Persentase Penurunan setiap kenaikan butiran plastik 10% berkisar antara 0.8 % hingga 12.2%. Dengan densitas yang rendah penggunaan plastik PP sebagai agregat halus dapat menurunkan kekuatan beton hingga 29%. Persentase penurunan rata-rata pada umur 28 hari adalah 23.9 %. Disamping itu, interaksi antara butiran plastik PP dan matriks semen dalam campuran beton juga dapat mempengaruhi kekuatan tekan beton. Semakin tinggi nilai UPV kekuatan tekan beton semakin meningkat. Namun perlu dipahami bahwa korelasi tidak mengimplikasikan hubungan sebab-akibat antara kedua variabel. Prediksi nilai kuat tekan berdasarkan data UPV dapat ditentukan dengan persamaan Regresi linier $Y = 0.0812x - 302.99$.

Saran-saran untuk penelitian berikutnya sebaiknya mencoba menginvestigasi durabilitas beton beragregat plastik PP terhadap konduktivitas listrik, thermal dan ketahanan terhadap serangan klorida.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih sebesar besarnya kami ucapkan kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Indonesia yang telah membiayai penelitian ini secara penuh dalam skema hibah penelitian dosen pemula (PDP) mulai dari tahap awal hingga publikasi. Tak lupa kami ucapkan juga terima kasih kepada Institut Teknologi PLN dan Departemen Teknik Sipi Universitas Hasanuddin yang turut memfasilitasi penelitian ini dalam hal penyediaan laboratorium dan peralatannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Thomas, A. Ede. (2019). Use of non-destructive tests for reinforced concrete damage assessment, in: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 640, 012037.
- [2] M. Abdul Rahim, S. Shahidan, L.C. Onn, N.A.A. Saiful Bahari, N. Abd Rahman, A. Ayob.(2020). The behavior of non-destructive test for different grade of concrete. *Int. J. Integr. Eng.*, 12 (9), pp. 1-8
- [3] N. Saikia, J. De Brito. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review, *Constr. Build. Mater.* 34 385–401, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066 .
- [4] N. Saikia , J. De Brito.(2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate, *Constr. Build. Mater.* 52. 236–244 .
- [5] M.A. Kamaruddin, M.M.A. Abdullah, M.H. Zawawi, M.R.R.A. Zainol,(2017). Potential use of plastic waste as construction materials: Recent progress and future prospect, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 267. 012011, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/267/1/012011>.
- [6] L. Gu, T. Ozbakkaloglu, (2016). Use of recycled plastics in concrete: a critical review, *Waste Manag.* 51. 19–42, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
- [7] I. Almeshal, B.A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, A. Alaskar. (2020). Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review, *Constr. Build. Mater.* 253. 119146, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146>.
- [8] A.J. Babafemi, B. Šavija, S.C. Paul, V. Anggraini. (2018). Engineering properties of concrete with waste recycled plastic : A review. <https://doi.org/10.3390/su10113875>.
- [9] I. Mercante, C. Alejandrino, J.P. Ojeda, J. Chini, C. Maroto, N. Fajardo, Mortar and concrete composites with recycled plastic: a review, *Sci. Technol. Mater.* 30 (2018) 69–79, <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.003>
- [10] Lencis, U., Udris, A., & Korjaks, A. (2021). Case Studies in Construction Materials Frost influence on the ultrasonic pulse velocity in concrete at early phases of hydration process. *Case Studies in Construction Materials*, 15 (March), e00614. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00614>.
- [11] Mohammed, A. A., Rafiq, S. K., & Hamid, N. A. (2021). Case Studies in Construction Materials The assessment of concrete subjected to preloading using non destructive testing methods. *Case Studies in Construction Materials*, 15(September), e00705. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00705>

- [12] Mohammed, T. U., & Rahman, N. (2016). Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>
- [13] Badan Standarisasi Nasional, (2011). SNI 1974-2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder yang Dicitak, Jakarta, Indonesia.
- [14] ASTM C78-02, (2017). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM Standards.
- [15] ASTM C597-02, (2012). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM Standards.