

## **ANALISIS PERILAKU LENTUR RADIAL CANGKANG PIPA BETON BUSA POLIMER BERPENGUAT TALI DENGAN DUA SKEMA PEMBEBANAN**

**Rizqi Danu Kurniawan<sup>1</sup>, Taufiq Rochman<sup>2</sup>**

Mahasiswa Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang<sup>1</sup>, Dosen Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang<sup>2</sup>

Email: [1danuawan321@gmail.com](mailto:1danuawan321@gmail.com) , [2taufiq.rochman@polinema.ac.id](mailto:2taufiq.rochman@polinema.ac.id)

### **ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa lentur radial cangkang pipa dari beton busa polimer yang diperkuat dengan tali polietilen, melalui dua skema pembebahan yang berbeda. Sepuluh spesimen diuji dengan metode Skema 1 (U terbalik tanpa tumpuan tambahan) dan Skema 2 (posisi U dengan dua tumpuan dan pendulum beban) menggunakan Universal Testing Machine (UTM). Parameter yang diamati meliputi tegangan lentur, regangan, dan modulus lentur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Skema 1 menghasilkan nilai tegangan, regangan, dan modulus lentur rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan Skema 2. Nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 59,73 MPa dan regangan maksimum sebesar 10,33% diperoleh pada spesimen Skema 1. Sementara itu, Skema 2 menunjukkan adanya retakan pada bagian atas spesimen setelah pengujian, sedangkan Skema 1 menunjukkan elastisitas tinggi tanpa retakan. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa konfigurasi pembebahan dan posisi tali penguat berpengaruh signifikan terhadap perilaku lentur cangkang pipa. Beton busa polimer dengan penguat tali polietilen menunjukkan potensi sebagai material alternatif pipa lentur elastis untuk aplikasi struktural ringan.

**Kata kunci:** lentur radial, pipa, tali polietilen, modulus lentur, tegangan lentur.

### **ABSTRACT**

*This study aims to evaluate the radial flexural performance of pipe shell structures made from foamed polymer concrete reinforced with polyethylene ropes, using two different loading schemes. A total of ten specimens were tested using Scheme 1 (inverted U position without additional supports) and Scheme 2 (U position with two supports and a pendulum load) with the aid of a Universal Testing Machine (UTM). The observed parameters included flexural stress, strain, and flexural modulus. The test results showed that Scheme 1 produced higher average values of flexural stress, strain, and modulus compared to Scheme 2. The highest flexural stress recorded was 59.73 MPa, and the maximum strain reached 10.33%, both obtained from the Scheme 1 specimens. In contrast, Scheme 2 resulted in cracking on the upper section of the specimens after testing, whereas Scheme 1 demonstrated high elasticity without cracks. These findings indicate that the loading configuration and the position of the polyethylene reinforcement ropes significantly influence the flexural behavior of the pipe shells. Foamed polymer concrete reinforced with polyethylene ropes shows potential as an alternative material for flexible pipe structures in lightweight structural applications.*

**Keywords:** radial bending; pipe; polyethylene rope; flexural modulus; flexural stress

## 1. PENDAHULUAN

Pipa merupakan salah satu elemen struktur yang umum digunakan dalam berbagai infrastruktur, terutama dalam sistem saluran air, drainase, irigasi, dan sistem sanitasi. Umumnya, pipa dibuat dari material beton konvensional yang memiliki keunggulan dari segi kekuatan tekan dan umur layanan yang panjang. Namun demikian, beton konvensional memiliki kelemahan berupa sifat getas dan rendahnya ketahanan terhadap deformasi lentur, terutama pada kondisi beban yang tidak merata atau dinamis.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, berbagai inovasi material telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan beton busa polimer. Material ini menggabungkan karakteristik mekanik dari beton ringan dan elastisitas dari senyawa poliuretan yang mampu memberikan kemampuan deformasi lebih tinggi dibandingkan beton biasa. Penambahan material daur ulang seperti fly ash dan limbah plastik ke dalam campuran juga mendukung pendekatan berkelanjutan dalam pengembangan material bangunan.

Selain inovasi pada matriks beton, penambahan tali polietilen (polyethylene rope) sebagai penguat juga menjadi solusi potensial untuk meningkatkan kinerja lentur pipa. Tali polietilen dikenal memiliki kekuatan tarik yang baik, ringan, dan tahan terhadap lingkungan korosif, sehingga cocok digunakan sebagai tulangan alternatif terutama pada struktur komposit fleksibel. Penggunaan tali ini tidak hanya memengaruhi kapasitas menahan beban lentur, namun juga berdampak pada perilaku retak dan elastisitas struktur.

Penelitian terdahulu telah banyak mengkaji sifat mekanik beton ringan dan serat polimer sebagai penguat. Namun, kajian mengenai pengaruh geometri pengujian lentur radial pada elemen melengkung seperti cangkang pipa masih terbatas, padahal pada kenyataannya banyak pipa mengalami gaya tekan dan lentur dari berbagai arah. Oleh karena itu, pendekatan pengujian lentur radial dengan berbagai skema pembebanan menjadi penting untuk memberikan gambaran perilaku struktural yang lebih realistik.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengujian lentur radial pada spesimen cangkang pipa dari beton busa polimer yang diperkuat dengan tali polietilen menggunakan dua skema pengujian, yaitu Skema 1 (U terbalik tanpa tumpuan tambahan) dan Skema 2 (U dengan tumpuan dan pendulum beban). Parameter yang dikaji meliputi tegangan lentur, regangan, dan modulus lentur untuk menilai pengaruh konfigurasi pembebanan terhadap perilaku elastis dan pola kerusakan pada struktur cangkang. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material pipa fleksibel yang ringan, kuat, dan tahan deformasi untuk aplikasi teknik sipil modern.

## 2. METODE

Penelitian ini merupakan studi eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur radial dari cangkang pipa berbahan beton busa polimer dengan tambahan penguat tali polietilen. Pengujian dilakukan di

Laboratorium Bahan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM) dengan dua variasi skema pembebanan.

### 1. Pembuatan dan Persiapan Spesimen

Pembuatan spesimen pipa dalam penelitian ini diawali dengan persiapan material penyusun beton busa polimer. Komponen utama yang digunakan terdiri dari unsaturated polyester resin (UP), metilena difenil diisosianat (MDI) sebagai isosianat, styrene monomer sebagai pelarut, serta bahan pengisi berupa fly ash dan limbah plastik daur ulang. Katalis yang digunakan adalah metil etil keton peroksida (MEKP), sedangkan cobalt naphthenate (CO) digunakan sebagai akselerator reaksi polimerisasi. Selain itu, sebagai bahan penguat ditambahkan tali polietilen (PE) berdiameter 4 mm, yang difungsikan sebagai elemen tulangan fleksibel di dalam struktur pipa.

Proses pencampuran dimulai dengan mencampurkan *unsaturated polyester* dan *styrene monomer* hingga homogen. Setelah itu, MDI ditambahkan secara perlahan sambil terus diaduk agar terjadi reaksi kimia antara gugus isosianat dan hidroksil. Setelah campuran utama homogen, bahan pengisi berupa fly ash dan limbah plastik dimasukkan secara bertahap untuk memperkuat sifat mekanik dan mengurangi densitas. Selanjutnya, ditambahkan MEKP sebagai inisiator dan cobalt sebagai akselerator untuk mempercepat proses pengerasan.

Cetakan pipa yang digunakan berbentuk silinder horizontal dengan dimensi diameter luar sekitar 410 mm dan panjang  $\pm 1200$  mm. Sebelum pengecoran, tali polietilen dipasang sesuai panjang cetakan dan diposisikan melingkar pada bagian dalam cetakan sebagai penguat longitudinal. Campuran beton poliuretan kemudian dituangkan ke dalam cetakan hingga merata. Proses curing dilakukan secara alami pada suhu ruang selama  $\pm 1$  jam hingga material mencapai kekerasan awal, kemudian dilanjutkan dengan perawatan kering selama 21 hari.

Setelah pipa mengeras sempurna, spesimen uji dipotong dari badan pipa menggunakan gergaji presisi menjadi bentuk cangkang setengah lingkaran (half-pipe shell) dengan panjang antara 160–184 mm. Pemotongan dilakukan pada area yang tidak mengalami cacat atau ketidakteraturan, guna memastikan keseragaman ketebalan dan integritas struktur. Total spesimen yang dihasilkan sebanyak 10 buah, kemudian dikelompokkan ke dalam dua skema pengujian (Skema 1 dan Skema 2) masing-masing lima.

Sebelum dilakukan pengujian lentur radial, setiap spesimen diukur menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,05 mm untuk mendapatkan data tinggi, lebar, panjang, dan luas penampang tekan aktual. Data ini menjadi dasar untuk perhitungan parameter mekanik seperti tegangan lentur, regangan, dan modulus lentur pada tahapan analisis hasil.

### 2. Skema Pengujian

Pengujian dilakukan dengan dua metode konfigurasi sebagai berikut:

Skema 1: Spesimen diletakkan dalam posisi U terbalik langsung pada mesin UTM tanpa tumpuan tambahan. Beban

ditekan vertikal ke atas permukaan lengkung bagian atas spesimen.

Skema 2: Spesimen diletakkan dalam posisi seperti huruf U dengan dua tumpuan di bagian bawah dan beban diberikan melalui pendulum beban di bagian atas, menyerupai pengujian lentur tiga titik (three point bending).

### 3. Prosedur Pengujian

Sebelum pengujian, UTM dikalibrasi dan disetel untuk merekam data pembebahan serta lendutan secara otomatis. Spesimen diletakkan sesuai skema, kemudian beban diberikan secara bertahap hingga terjadi lendutan maksimum atau kerusakan.

Data yang diperoleh dari UTM berupa nilai beban (N) dan lendutan (mm). Nilai tersebut digunakan untuk menghitung parameter:

Tegangan lentur ( $\sigma$ ): menggunakan rumus berdasarkan geometri lentur cangkang

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan Lentur (Mpa)

P = Beban maksimum (N)

L = Panjang bentang tumpuan (mm)

b = Lebar penampang tekan (mm)

h = Tinggi penampang tekan (mm)

Regangan ( $\epsilon$ ): dihitung dari perubahan deformasi terhadap panjang awal

$$\epsilon = \frac{6 \cdot \delta \cdot h}{L^2}$$

Keterangan:

$\epsilon$  = Regangan lentur maksimum (%) atau unitless

$\delta$  = Lendutan maksimum pada tengah bentang (mm)

h = Tinggi penampang tekan (mm)

L = Panjang bentang tumpuan (mm)

Modulus lentur (E): diturunkan dari kemiringan kurva tegangan-regangan

$$E = \frac{L^3 \cdot P}{4 \cdot \delta \cdot b \cdot h^3}$$

Keterangan:

E = Modulus elastisitas lentur (MPa)

### 4. Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif untuk mendapatkan nilai rata-rata tegangan, regangan, dan modulus lentur dari masing-masing skema. Selain itu, dilakukan juga evaluasi kualitatif terhadap pola kerusakan dan kondisi fisik pasca-uji untuk menilai elastisitas dan potensi retak pada setiap konfigurasi.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran dimensi dari spesimen yang ada dibuat

dengan teliti dan presisi. Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh data real pengujian. Berikut ini adalah hasil pengukuran dimensi spesimen:

**Tabel 3. 1** Hasil pengukuran dimensi spesimen

Kode	Tinggi (mm)	Lebar (mm)	Panjang (mm)	Support Span (mm)	Luas Area Tekan (mm <sup>2</sup> )
P4CA 1	15	23	181	161	4163
P4 CA 2	16	23	180	180	4140
P4 CA 3	18	24	179	179	4296
P4 CA 4	15	22	182	182	4004
P4 CA 5	16	24	184	184	4416
P4 CB 1	17	25	165	125	4125
P4 CB 2	18	26	163	123	4238
P4 CB 3	17	24	162	122	3888
P4 CB 4	16	20	164	124	3280
P4 CB 5	17	23	162	122	3726

Setelah dilakukan pengukuran dimensi, bisa dilakukan pengujian. Pada Skema 1 benda uji diletakkan pada mesin dengan tanpa memakai tambahan pendulum beban dan juga support tambahan hanya saja perlu diperhatikan untuk meletakkan benda uji tepat di tengah pembebahan untuk mendapatkan hasil yang akurat.

Sementara pada Skema 2, perlu dilakukan pemasangan tumpuan sesuai dengan panjang support span dan juga pemasangan pendulum beban sesuai dengan skema pengujian lentur 3 point bending. Berikut ini adalah hasil pengujian lentur radial cangkang pipa dengan 2 skema. Dari tabel penyajian data hasil, dapat dilihat hasil pembacaan dari mesin UTM berupa pembebahan dan lendutan yang terjadi.

Dari bacaan beban diolah untuk dapat memperoleh parameter tegangan lentur, regangan, dan juga modulus lentur.

**Tabel 3. 2** Bacaan beban

Kode	Bacaan Beban		
	kg	kN	N
P4 CA 1	93,800	0,920	920,178
P4 CA 2	78,600	0,771	771,066
P4 CA 3	132,600	1,301	1300,806
P4 CA 4	110,400	1,083	1083,024
P4 CA 5	73,600	0,722	722,016

P4 CB 1	41,400	0,406	406,134
P4 CB 2	33,400	0,328	327,654
P4 CB 3	44,200	0,434	433,602
P4 CB 4	40,800	0,400	400,248
P4 CB 5	35,600	0,349	349,236

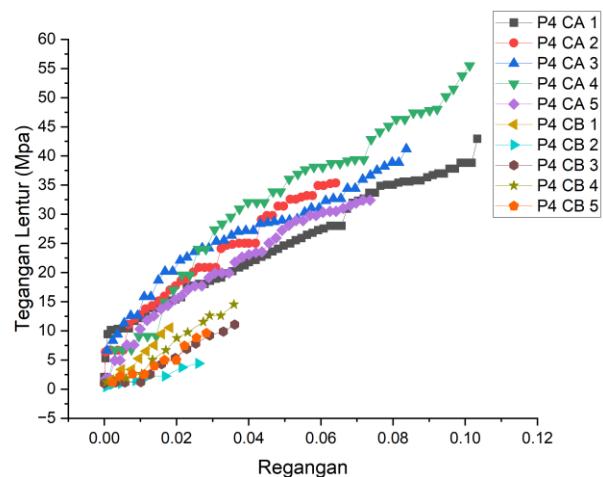
Dari situ dapat dilakukan perhitungan untuk mencari nilai parameter tegangan, regangan, hingga modulus lentur untuk tiap spesimen.

**Tabel 3. 3** Analisa hasil pengujian lentur

Kode	Tegangan Lentur (Mpa)	Lendutan max (mm)	Regangan (%)	Modulus Lentur (Mpa)
P4 CA 1	42,942	29,760	0.10333	415,580
P4 CA 2	35,358	28,250	0.08370	422,418
P4 CA 3	44,916	30,030	0.10122	443,739
P4 CA 4	59,730	31,100	0.08450	706,863
P4 CA 5	32,434	30,390	0.08617	376,390
P4 CB 1	10,540	4,000	0.02611	403,639
P4 CB 2	7,176	5,060	0.03612	198,669
P4 CB 3	11,440	5,770	0.03954	289,319
P4 CB 4	14,540	6,040	0.03771	385,574
P4 CB 5	9,615	4,170	0.02858	336,456

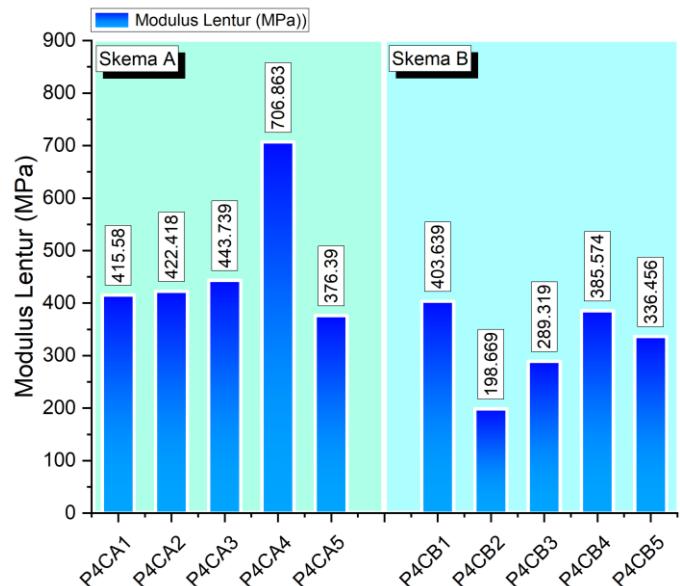
Dengan langkah pengolahan data yang sama dengan saat mengolah data pengujian lentur sumbu kuat dan lemah didapatkan hasil nilai tegangan, regangan dan modulus lentur seperti pada tabel diatas. Untuk nilai tegangan lentur yang didapatkan dari pengujian Skema 1 dan 2 didapatkan nilai terbesar pada spesimen P4CA 4 dengan nilai 59,73 Mpa dan juga P4CB 4 dengan nilai 6,04 Mpa.

Sedangkan untuk nilai regangan yang terjadi Skema 1 cenderung memiliki regangan yang lebih besar daripada Skema 2. Dengan nilai terbesar ada pada spesimen P4CA1 dengan regangan 10,33 %. Dan untuk parameter modulus lentur, dari keseluruhan spesimen dengan 2 skema pengujian memiliki nilai modulus yang berkisar antara 198,669 Mpa sampai 706,863 Mpa.



**Gambar 3. 1** Grafik tegangan dan regangan spesimen P4CA

Berdasarkan hasil grafik hubungan tegangan dan regangan diatas dapat dilihat bahwa nilai regangan tertinggi yaitu ada pada benda uji A (Parabola) sedangkan pada benda uji B (Bentuk U) mendapatkan nilai regangan yang kecil. Dikarenakan tali PE pada benda uji A terdapat di bagian bawah atau pada bagian yang tertarik.



**Gambar 3. 2** Perbandingan nilai modulus lentur Skema 1 dan 2

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Skema 1 menghasilkan nilai modulus lentur yang lebih tinggi dan konsisten dibanding Skema 2. Nilai tertinggi dicapai oleh spesimen P4CA4 sebesar 706,863 MPa, disusul P4CA3, P4CA2, dan P4CA1 yang seluruhnya berada di atas 400 MPa. Spesimen P4CA5 mencatat nilai terendah di Skema 1 yaitu 376,390 MPa, namun tetap lebih tinggi dari sebagian besar spesimen di Skema 2.

Sebaliknya, Skema 2 menunjukkan performa yang lebih rendah dan tidak stabil. Nilai tertinggi diperoleh oleh P4CB1 (403,639 MPa), namun P4CB2 menunjukkan nilai terendah dari seluruh spesimen yaitu 198,669 MPa. Variasi ini menunjukkan bahwa posisi beban dan tumpuan pada Skema 2 membuat tali penguat kurang efektif dalam menahan gaya lentur.

Secara keseluruhan, konfigurasi pembebanan pada Skema 1 lebih mampu memaksimalkan peran penguat tali polietilen, sehingga menghasilkan modulus lentur yang lebih tinggi dan struktur yang lebih kaku terhadap deformasi.

**Tabel 3. 4** Analisa rata-rata hasil pengujian lentur

Kode	Tegangan Lentur (Mpa)		Regangan ( c )	Modulus Lentur (Mpa)	
P4 CA	42,942		0.10333	415,580	
	35,358		0.08370	422,418	
	44,916	43,076	0.10122	0.09179	443,739 472,998
	59,730		0.08450		706,863
	32,434		0.08617		376,390
P4 CB	10,540		0.02611		403,639
	7,176		0.03612		198,669
	11,440	10,662	0.03954	0.03361	289,319 322,731
	14,540		0.03771		385,574
	9,615		0.02858		336,456

Dari tabel hasil akhir parameter tegangan, regangan dan modulus lentur pengujian lentur rambatan cangkang pipa dengan Skema 1, diperoleh nilai rata-rata tegangan lentur sebesar 43,076 Mpa, regangan sebesar 9,179 %, serta modulus lentur 472,998 Mpa. Keseluruhan parameter tadi memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai hasil dari pengujian dengan Skema 2 dengan nilai rata-rata tegangan 10,662 Mpa, regangan 3,361 %, dan juga modulus lentur 322,731 Mpa.

Langkah terakhir yang dilakukan ialah penilaian kondisi fisik dan pola keruntuhan spesimen. Setelah dilakukan pengujian lentur radial, terjadi perubahan fisik dari benda uji juga dianalisis dengan melihat secara visual. Ditemukan bahwa perubahan fisik yang terjadi pada benda uji pada spesimen A setelah dilakukan pengujian, terjadi regangan sehingga menyebabkan perbedaan jarak tumpuan pada benda uji, tetapi benda uji tersebut akan kembali seperti semula setelah beberapa waktu. Sedangkan pada benda uji spesimen B, setelah dilakukan pengujian, terjadi retakan. Berdasarkan penampakan fisik diatas dapat disimpulkan jika benda uji tersebut elastis terhadap tekanan dari luar tetapi akan terjadi retakan atau crack jika terkena tekanan dari dalam.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian lentur radial pada cangkang pipa dari beton busa polimer yang diperkuat dengan tali polietilen menggunakan dua skema pembebanan (Skema 1

dan Skema 2), maka dapat disimpulkan beberapa poin penting sebagai berikut:

1. Konfigurasi pembebanan berpengaruh signifikan terhadap performa lentur cangkang pipa. Skema 1 yang memposisikan spesimen seperti huruf U terbalik tanpa tumpuan tambahan menunjukkan performa lentur yang lebih baik dibandingkan Skema 2. Hal ini ditunjukkan oleh nilai rata-rata tegangan lentur, regangan, dan modulus lentur yang lebih tinggi pada Skema 1.
2. Nilai maksimum tegangan lentur tertinggi dicapai oleh spesimen P4CA4 dengan 59,73 MPa, sedangkan pada Skema 2 nilai tertinggi hanya mencapai 14,54 MPa. Ini menunjukkan bahwa posisi pembebanan sangat menentukan efektivitas distribusi gaya dalam struktur cangkang.
3. Regangan maksimum tercatat pada spesimen P4CA1 sebesar 10,33%, mengindikasikan bahwa sistem penguat tali polietilen yang ditempatkan di bagian bawah cangkang mampu menahan deformasi tarik secara signifikan, terutama pada pengujian Skema 1. Sebaliknya, Skema 2 cenderung mengalami deformasi yang lebih rendah namun disertai munculnya retakan pada bagian atas pipa.
4. Modulus lentur rata-rata tertinggi dicapai pada Skema 1 sebesar 472,998 MPa, menunjukkan tingkat kekakuan yang lebih baik dibandingkan Skema 2 yang hanya mencapai 322,731 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa tata letak tali penguat dalam arah gaya tarik sangat mempengaruhi kekakuan struktur.
5. Kondisi fisik pasca-ujji menunjukkan bahwa spesimen pada Skema 1 bersifat elastis, yakni kembali ke bentuk semula tanpa retak, sedangkan pada Skema 2 ditemukan retakan di area tekan atas. Ini membuktikan bahwa konfigurasi pembebanan dan posisi tali penguat menentukan tidak hanya kekuatan tetapi juga karakter elastis material.
6. Material beton busa polimer dengan penguat tali polietilen menunjukkan potensi besar sebagai alternatif material struktur pipa ringan yang elastis dan mampu menahan deformasi lentur. Kombinasi antara matriks komposit ringan dan tulangan fleksibel menghasilkan performa struktural yang adaptif terhadap beban dinamis.
7. Dari sudut pandang teknik sipil, pendekatan ini layak diterapkan pada struktur pipa fleksibel di medan rawan deformasi seperti daerah tanah lunak, kawasan tambang, atau pipa distribusi air non-tekanan tinggi. Selain itu, pemanfaatan limbah plastik dan fly ash juga mendukung aspek keberlanjutan dalam konstruksi.

8. Diperlukan studi lebih lanjut untuk memahami efek jangka panjang, kelelahan material, dan perilaku struktur di bawah beban siklik. Selain itu, pengujian pada spesimen skala penuh dan variasi jumlah serta posisi tali penguat akan memperkaya rekomendasi teknis dari penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Li, J. Zhang, Y. Wang, and G. Yang, “Flexural behavior of lightweight polyurethane-based concrete with various reinforcement configurations,” *Construction and Building Materials*, vol. 254, p. 119296, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- [2] M. M. Reda Taha, M. ElGawady, and A. Marefat, “Mechanical properties of polymer concrete with recycled plastic and fly ash,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 5, pp. 04018073, 2018. [Online]. Available: [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002265](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002265)
- [3] H. R. Tavakoli, M. Heidari, and A. B. Ramli, “Mechanical properties and durability of concrete containing polymer and recycled plastic waste,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 6645–6649, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.417>
- [4] J. Chen, Y. Liu, H. Sun, and W. Song, “Experimental study on the flexural performance of concrete pipes with polymer additives,” *Engineering Structures*, vol. 241, p. 112421, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112421>
- [5] H. Liu, B. Wang, and Y. Fang, “Reinforcement effect of polyethylene fibers on flexural strength and toughness of polymer mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 451–458, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.174>.