

Analisis Perbandingan Kurva Tegangan–Regangan Beton *Confined* dan *Unconfined* terhadap Variasi Jarak Senggang Spiral Berdasarkan Model Mander dan Kent and Park

Intan Monica.MG^{1,2*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Kampus Bina Widya KM. 12,5, Pekanbaru, Indonesia

²Pusat Unggulan Iptek Gambut dan Kebencanaan (PUI-GK), LPPM, Universitas Riau

*intan.monica^{mg}@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Peningkatan kapasitas deformasi dan kekuatan tekan beton melalui konfinemen lateral menjadi aspek krusial dalam desain struktur tahan gempa. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jarak senggang spiral terhadap karakteristik tegangan–regangan beton *confined*, menggunakan dua model analitik yang umum digunakan, yakni model Kent and Park dan model Mander. Tiga konfigurasi jarak senggang yang dianalisis meliputi 50 mm (rapat), 60 mm (sesuai SNI 2847:2019), dan 150 mm (renggang), serta kondisi *unconfined* sebagai pembanding. Parameter seperti kuat tekan puncak, regangan maksimum, dan daktilitas dihitung secara numerik untuk masing-masing model dan variasi. Hasil menunjukkan bahwa model Mander mampu merepresentasikan peningkatan kekuatan tekan yang signifikan akibat konfinemen, dengan nilai kuat tekan puncak mencapai 61,12 MPa (jarak 50 mm), 56,86 MPa (60 mm), dan 43,29 MPa (150 mm). Nilai daktilitas yang diperoleh pada ketiga variasi berturut-turut sebesar 8,17, 7,53, dan 4,90, meningkat dari nilai *unconfined* sebesar 1,98. Sementara itu, model Kent and Park menghasilkan prediksi kekuatan yang konservatif (tetap 35 MPa) namun menunjukkan peningkatan regangan ultimit yang signifikan, dengan daktilitas masing-masing sebesar 25,82 (50 mm), 20,11 (60 mm), dan 6,57 (150 mm). Hasil studi ini menunjukkan bahwa efektivitas konfinemen sangat dipengaruhi oleh konfigurasi jarak senggang serta pendekatan model yang digunakan. Model Mander lebih akurat dalam merepresentasikan peningkatan kekuatan beton akibat konfinemen, sedangkan Kent and Park cenderung menghasilkan estimasi daktilitas yang lebih tinggi melalui pendekatan idealisasi pasca-puncak.

Kata kunci: Beton confined, Model Kent and Park, Model Mander, senggang spiral, tegangan–regangan beton.

1. Pendahuluan

Beton merupakan material struktur yang banyak digunakan karena kekuatan tekan dan ketersediaannya yang melimpah [1]. Namun, beton memiliki sifat getas dan kemampuan deformasi terbatas saat menerima beban berlebih [2], [3], [4]. Dalam aplikasi struktur tahan gempa, diperlukan material yang mampu menyerap energi dan mengalami deformasi plastis secara signifikan [5]. Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan daktilitas dan kekuatan tekan beton adalah dengan memberikan konfinemen lateral melalui pemasangan tulangan spiral di sekitar inti beton [6].

Beton *confined*, yaitu beton yang diberi konfinemen oleh tulangan spiral, menunjukkan perilaku tegangan–regangan yang lebih baik dibanding beton *unconfined* [7]. Hal ini mencakup peningkatan tegangan puncak, regangan maksimum, serta karakteristik pasca-puncak yang lebih daktil. Efektivitas konfinemen ini sangat dipengaruhi oleh geometri dan jarak antar Sengkang spiral [8], [9]. SNI 2847:2019 menetapkan batas maksimum jarak sengkang spiral untuk menjamin efektivitas konfinemen. Namun, di lapangan, variasi di luar batas standar kerap terjadi akibat keterbatasan teknis atau pertimbangan ekonomis. Oleh karena itu, kajian terhadap respons beton *confined* akibat variasi jarak sengkang spiral menjadi penting untuk dilakukan.

Beberapa model analitik telah dikembangkan untuk memprediksi perilaku beton *confined*, di antaranya model Mander dan Kent and Park [10]. Model Mander paling baik mewakili kinerja sebelum kekuatan *ultimate*, sementara model Kent and Park mewakili perilaku pasca-puncak [11]. Salah satu parameter penting yang sangat memengaruhi efektivitas konfinemen adalah jarak sengkang spiral, yang menentukan intensitas tekanan lateral terhadap inti beton [12]. Perbandingan sistematis antara kedua model dalam merespons variasi geometri spiral, khususnya jarak sengkang, masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kurva tegangan–regangan beton *confined* dan *unconfined* menggunakan model Mander dan Kent and Park, dengan mempertimbangkan tiga variasi jarak sengkang spiral yaitu 50 mm, jarak ideal menurut SNI 2847:2019, dan 150 mm. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap sensitivitas kedua model terhadap variasi konfinemen spiral, serta memberikan rekomendasi pemilihan model analitik yang sesuai dalam kajian numerik perilaku material beton bertulang.

2. Model Konstitutif Tegangan–Regangan

Representasi perilaku tegangan–regangan beton pada kondisi *unconfined* dan *confined* dalam studi ini mengacu pada dua pendekatan model konstitutif yang telah banyak digunakan, yaitu Kent and Park dan Mander. Perbedaan formulasi dan sensitivitas terhadap parameter konfinemen menjadikan kedua model ini relevan untuk dianalisis secara komparatif terhadap variasi geometri spiral. Formulasi matematis masing-masing model dijadikan dasar dalam pemodelan numerik untuk mengevaluasi karakteristik kurva tegangan–regangan yang dihasilkan.

2.1 Metode Kent and Park

Model Kent and Park merupakan pendekatan semi-empiris yang mengembangkan kurva tegangan–regangan beton dengan memisahkan respons antara beton yang tidak dikonfinemen (*unconfined*) dan yang dikonfinemen (*confined*) [13]. Model ini dikenal luas karena kesederhanaannya dalam merepresentasikan perilaku pasca-puncak beton.

2.1.1 Beton *Unconfined*

Pada beton *unconfined*, kurva tegangan–regangan dibagi menjadi dua segmen:

- Segmen AB menggambarkan peningkatan tegangan secara non-linier dari titik nol hingga mencapai kekuatan maksimum f'_c pada regangan ε_0 . Kurva ini berbentuk parabola dan mewakili kenaikan tegangan akibat penambahan regangan secara progresif:

$$f_c = f'_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Keterangan:

f_c = Tegangan beton saat regangan ϵ (MPa)

f'_c = Kuat tekan maksimum beton (MPa)

ϵ = Regangan beton saat pengujian

ϵ_0 = Regangan beton saat mencapai kuat tekan maksimum

- b. Segmen BC menunjukkan penurunan tegangan secara linier dari titik maksimum hingga nol pada regangan ultimate ϵ_u .

$$f_c = f'_c [1 - Z(\epsilon_u - \epsilon_0)] \quad (2)$$

Keterangan:

f_c = Tegangan beton saat regangan ϵ (MPa)

f'_c = Kuat tekan maksimum beton (MPa)

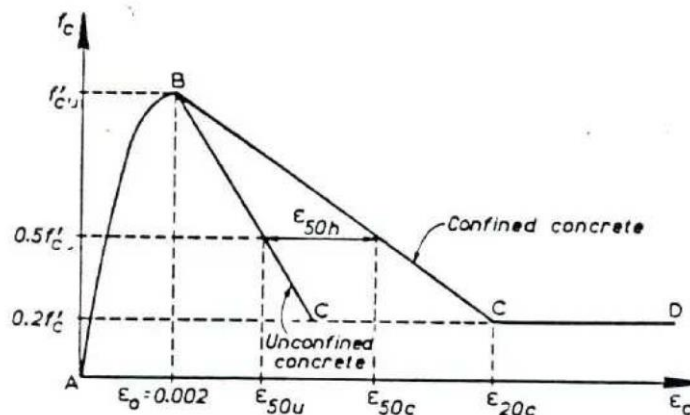
Z = Parameter penurunan tegangan setelah puncak

ϵ_u = Regangan ultimate beton *confined*

ϵ_0 = Regangan saat tegangan puncak

2.1.2 Beton *Confined*

Dalam konteks beton *confined*, model Kent and Park memodifikasi bagian pasca-puncak agar penurunan tegangan berlangsung lebih gradual. Tegangan maksimum tetap f'_c , namun regangan ultimate diperpanjang akibat adanya kekangan pada beton. Pendekatan ini mencerminkan pengaruh spiral yang meningkatkan daktilitas beton. Kurva lengkap beton *confined* dan *unconfined* dalam model Kent and Park ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan Tegangan-Regangan Beton *Unconfined* dan *Confined* Metode Kent and Park [14]

2.2 Model Mander

Model Mander menyajikan pendekatan analitik yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan tekanan lateral akibat tulangan spiral [15]. Model ini memformulasikan kurva tegangan-regangan beton *confined* melalui persamaan matematis sebagai berikut:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (3)$$

Keterangan:

f_c = Tegangan beton saat regangan ϵ (MPa)

f'_{cc} = Kuat tekan maksimum beton *confined* (MPa)

x = Rasio regangan
r = Parameter bentuk kurva

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

Keterangan:

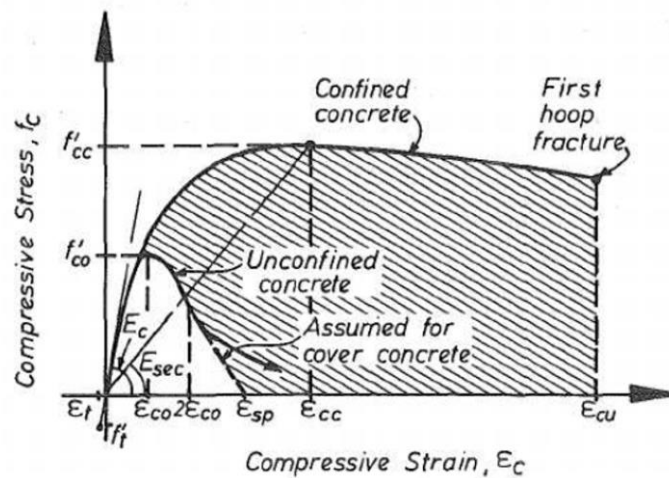
ε_{cc} = Regangan maksimum beton *confined*
 ε_{co} = Regangan pada kuat tekan beton *unconfined*
 f'_c = Kuat tekan beton *unconfined* (MPa)
 f'_{cc} = Kuat tekan maksimum beton *confined* (MPa)

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (5)$$

Keterangan:

f'_c = Kuat tekan beton *unconfined* (MPa)
 f'_{cc} = Kuat tekan maksimum beton *confined* (MPa)
 f_l = Tegangan beton saat regangan ε (MPa)

Dengan demikian, bentuk kurva sangat tergantung pada dimensi dan konfigurasi spiral yang digunakan. Model Mander dinilai lebih representatif untuk memodelkan beton *confined* dengan variasi parameter konfinemen. Kurva perilaku beton *confined* menurut Mander ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Tegangan-Regangan Beton *Unconfined* dan *Confined* Metode Mander[16]

3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan pendekatan analitis berbasis model konstitutif untuk beton *confined* dan *unconfined*. Dua model utama yang digunakan adalah model Mander dan model Kent and Park, dengan pembebanan satu arah tekan aksial untuk menghasilkan kurva tegangan-regangan.

3.1 Data Input Parameter Awal

Data yang digunakan dalam perhitungan adalah sebagai berikut:

- Diameter penampang beton (D) = 550 mm
- Diameter inti beton (D_c) = 490 mm
- Diameter inti efektif (d') = 480 mm
- Selimut beton bersih (C_c) = 30 mm
- Mutu beton (f'_c) = 35 MPa
- Diameter tulangan spiral = 10 mm
- Luas penampang spiral (A_{sp}) = 78.54 mm²
- Luas tulangan longitudinal = 4844.73 mm²
- Kuat leleh tulangan spiral (f_{yh}) = 420 MPa

Pemodelan dilakukan untuk tiga variasi jarak sengkang spiral, yaitu: 50 mm, jarak sesuai SNI 2847:2019 dan 150 mm. Nilai-nilai ini digunakan untuk menghitung rasio volumetrik tulangan spiral (ρ_s), tekanan lateral efektif (f_l), serta parameter konstitutif lainnya.

3.2 Tahapan Analisis

Analisis ini menggunakan tiga nilai variasi jarak Sengkang yang digunakan untuk menghitung rasio volumetrik tulangan spiral (ρ_s), tekanan lateral efektif (f_l), serta parameter konstitutif lainnya. Variasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Variasi A menggunakan jarak sengkang spiral sebesar 50 mm, yang merepresentasikan kondisi konfinemen spiral yang sangat rapat.
- Variasi B mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019, di mana jarak sengkang spiral ditentukan berdasarkan batas maksimum yang diizinkan. Berdasarkan [17] Pasal 25.7.3.1, spasi spiral harus seragam, dengan jarak bersih tidak kurang dari 25 mm dan tidak melebihi 75 mm. Selain itu, Pasal 25.7.3.3 mensyaratkan bahwa rasio volumetrik tulangan spiral ρ_s harus memenuhi persamaan berikut:

$$\rho_s \geq 0.45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (6)$$

Keterangan:

- ρ_s = Rasio volumetrik minimum tulangan spiral
 A_g = Luas penampang bruto kolom beton (mm²)
 A_{ch} = Luas inti beton terkonfinemen (mm²)
 f'_c = Kuat tekan beton *unconfined* (MPa)
 f_{yt} = Tegangan leleh baja tulangan spiral (MPa)

Dari aturan tersebut didapat nilai jarak Sengkang maksimal sebesar 65.8 mm. Pada penelitian ini, nilai jarak sengkang spiral untuk Variasi B ditetapkan sebesar 60 mm, yang merupakan nilai yang ideal dan diizinkan dalam peraturan.

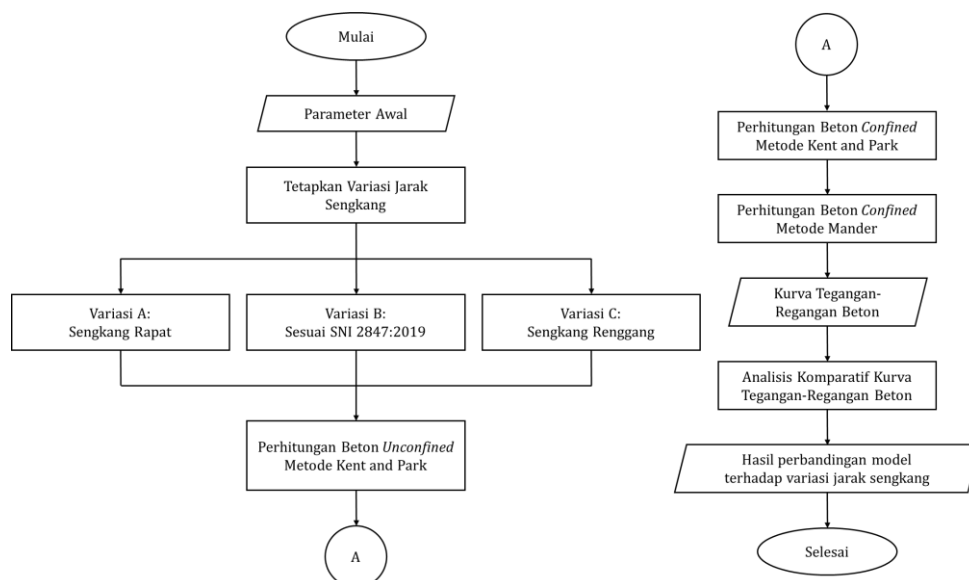
- Variasi C menggunakan jarak sengkang spiral sebesar 150 mm, yang melampaui ketentuan standar SNI dan bertujuan untuk mengevaluasi penurunan efektivitas konfinemen pada kondisi sengkang renggang.

Setelah penetapan variasi sengkang, analisis dilanjutkan dengan pemodelan beton *unconfined* sebagai acuan awal menggunakan model Kent and Park. Model ini dipilih karena pendekatan semi-empirisnya yang sederhana dan banyak digunakan untuk merepresentasikan perilaku beton tanpa konfinemen. Kurva tegangan-regangan beton *unconfined* diperoleh berdasarkan parameter geometri dan material yang telah ditentukan. Selanjutnya, model Kent and Park dimodifikasi untuk memodelkan kondisi beton *confined*, dengan memperpanjang regangan ultimate guna merepresentasikan kontribusi konfinemen spiral terhadap daktilitas beton.

Setelah itu, pemodelan beton *confined* dilakukan dengan pendekatan model Mander. Dalam tahap ini, tekanan lateral efektif dihitung berdasarkan konfigurasi spiral dan parameter geometri yang telah ditentukan, dan digunakan untuk menghasilkan kurva tegangan-regangan sesuai formulasi model Mander.

Seluruh hasil pemodelan dihitung secara numerik dalam interval regangan bertahap sebesar 0.0001 untuk membentuk kurva tegangan–regangan lengkap. Increment sebesar 0.0001 dipilih karena cukup kecil untuk menangkap perubahan perilaku material, terutama di sekitar titik puncak dan pasca-puncak, di mana perubahan tegangan terhadap regangan cenderung nonlinier dan sensitif. Penggunaan increment yang terlalu besar berisiko melewati detail penting dari kurva, seperti transisi dari elastis ke plastis atau degradasi tegangan pasca-puncak, yang dapat mengakibatkan representasi hasil yang kurang akurat. Sebaliknya, increment yang terlalu kecil dapat menyebabkan pemborosan sumber daya komputasi tanpa peningkatan signifikan pada kualitas hasil. Oleh karena itu, increment 0.0001 dianggap optimal dalam studi ini untuk memperoleh kurva tegangan–regangan yang halus dan representatif, sekaligus menjaga efisiensi perhitungan numerik.

Hasil perhitungan kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk setiap metode dan dibandingkan dengan setiap variasi jarak Sengkang. Tahap akhir adalah analisis komparatif terhadap bentuk kurva, tegangan maksimum, regangan puncak, serta bentuk segmen pasca-puncak, guna mengevaluasi sensitivitas masing-masing model terhadap variasi konfinemen spiral. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas, alur penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir yang tergepat pada Gambar 3.

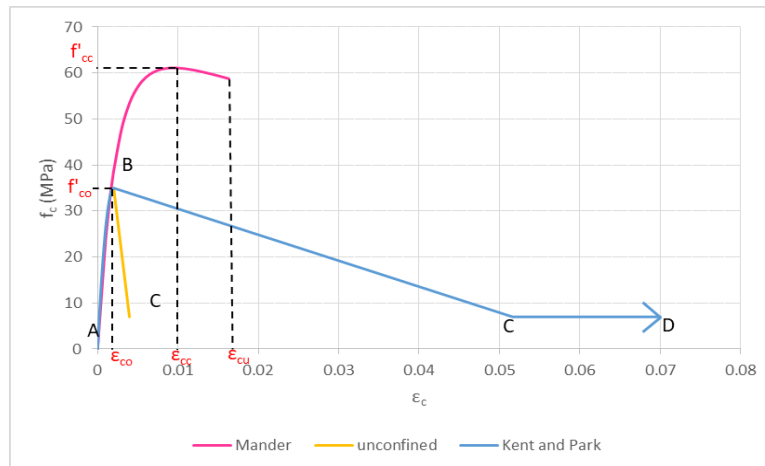


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Variasi A

Variasi A menggunakan jarak sengkang spiral sebesar 50 mm, yang merepresentasikan kondisi konfinemen paling rapat dalam penelitian ini. Konfigurasi ini dipilih untuk melihat sejauh mana peningkatan densitas spiral mampu memengaruhi perilaku mekanik beton. Pemodelan dilakukan terhadap tiga kondisi material, yaitu beton *unconfined*, beton *confined* berdasarkan pendekatan Kent and Park yang bersifat semi-empiris, serta beton *confined* berdasarkan model Mander yang memperhitungkan tekanan lateral spiral secara eksplisit. Kurva tegangan–regangan yang dihasilkan dari variasi A terdapat pada Gambar 4.

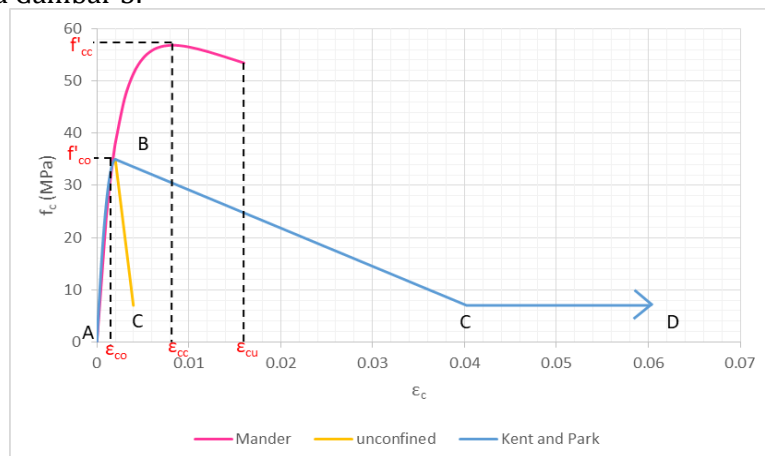


Gambar 4. Kurva Tegangan-Regangan Beton *Unconfined*, *Confined* Metode Kent and Park, dan *Confined* Metode Mander Variasi A

Gambar 4 menunjukkan bahwa beton *confined* yang dimodelkan menggunakan pendekatan Mander menghasilkan tegangan puncak dan regangan ultimate tertinggi dibandingkan model lainnya. Kurva Mander juga menunjukkan penurunan tegangan secara bertahap setelah mencapai puncak, menandakan peningkatan daktilitas akibat tekanan lateral spiral yang kuat. Sebaliknya, model Kent and Park menghasilkan kurva dengan penurunan tegangan linier yang lebih tajam, mencerminkan pendekatan konservatif dalam memodelkan perilaku beton *confined*. Beton *unconfined* menunjukkan karakteristik getas dengan tegangan puncak rendah dan regangan yang terbatas. Hasil ini menegaskan bahwa konfinemen spiral rapat pada Variasi A secara signifikan meningkatkan performa mekanik beton, dan model Mander lebih mampu menangkap kontribusi tersebut dibandingkan Kent and Park.

4.2 Variasi B

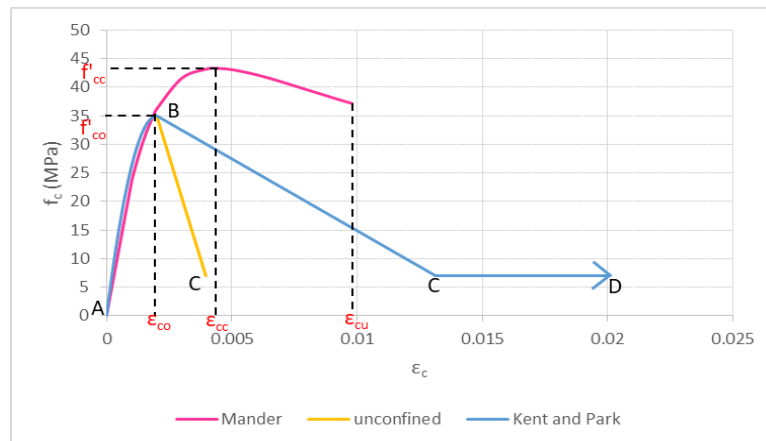
Variasi B menggunakan jarak sengkang spiral sebesar 60 mm, yang ditetapkan berdasarkan ketentuan maksimum yang diizinkan oleh SNI 2847:2019. Meskipun tidak serapat konfigurasi pada Variasi A, jarak ini masih berada dalam batas konfinemen efektif sesuai peraturan, sehingga tetap mampu meningkatkan kekuatan tekan dan daktilitas beton. Kurva tegangan-regangan yang dihasilkan dari pemodelan menunjukkan pola yang serupa dengan Variasi A, di mana beton *confined* mengalami peningkatan tegangan puncak dan regangan *ultimate* dibandingkan beton *unconfined*. Hal ini menunjukkan bahwa konfinemen spiral dengan jarak sesuai standar tetap memberikan kontribusi signifikan terhadap perilaku tegangan dan regangan beton *confined*. Kurva tegangan-regangan yang dihasilkan dari variasi B terdapat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva Tegangan-Regangan Beton *Unconfined*, *Confined* Metode Kent and Park, dan *Confined* Metode Mander Variasi B

4.3 Variasi C

Variasi C menerapkan jarak sengkang spiral sebesar 150 mm, yang melebihi batas maksimum yang diperkenankan dalam SNI 2847:2019. Konfigurasi ini dimaksudkan untuk mengevaluasi penurunan efektivitas konfinemen ketika jarak spiral terlalu renggang. Kurva tegangan-regangan yang dihasilkan menunjukkan bahwa kontribusi konfinemen terhadap peningkatan kekuatan tekan dan daktilitas menjadi sangat terbatas. Tegangan puncak beton *confined* mengalami kenaikan yang minimal dibandingkan beton *unconfined*, dan penambahan regangan ultimate juga tidak signifikan. Perbedaan respons antara model Mander dan Kent and Park pada variasi ini menjadi lebih kecil dibandingkan pada variasi sebelumnya, yang mengindikasikan bahwa pengaruh tekanan lateral spiral tidak lagi dominan dalam kondisi konfinemen lemah. Hasil ini menegaskan pentingnya menjaga jarak sengkang spiral dalam rentang efektif agar konfinemen tetap mampu berfungsi secara optimal. Kurva tegangan-regangan yang dihasilkan dari variasi C terdapat pada Gambar 6.

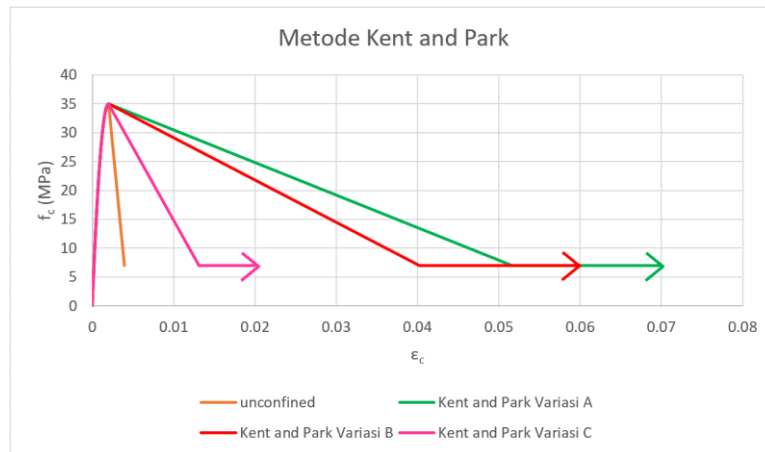


Gambar 6. Kurva Tegangan-Regangan Beton *Unconfined*, *Confined* Metode Kent and Park, dan *Confined* Metode Mander Variasi C

Kurva tegangan-regangan pada Variasi C menunjukkan bahwa konfinemen spiral dengan jarak 150 mm tidak mampu memberikan peningkatan signifikan terhadap kekuatan maupun daktilitas beton. Tegangan puncak yang dicapai oleh beton *confined* hampir mendekati nilai beton *unconfined*, sementara regangan maksimum hanya sedikit lebih besar. Model Mander masih menunjukkan regangan ultimate yang sedikit lebih panjang dibandingkan Kent and Park, namun perbedaannya tidak sejelas pada Variasi A dan B. Bentuk kurva pasca-puncak pada kedua model juga menurun dengan lebih tajam, mencerminkan terbatasnya kontribusi *lateral confinement* akibat renggangnya spiral. Hasil ini menunjukkan bahwa konfinemen tidak efektif apabila jarak sengkang melampaui batas maksimum yang diatur dalam standar, karena tidak mampu menghasilkan tekanan lateral yang cukup untuk menahan ekspansi lateral beton.

4.4 Analisis Komparatif

Setelah dilakukan pemodelan beton *confined* untuk masing-masing variasi jarak sengkang spiral menggunakan metode Kent and Park, langkah selanjutnya adalah membandingkan ketiganya secara menyeluruh. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh tingkat konfinemen terhadap karakteristik kurva tegangan-regangan, serta untuk menilai sensitivitas model terhadap perubahan jarak spiral. Gambar 7 menyajikan seluruh kurva hasil pemodelan metode Kent and Park untuk beton *unconfined*, dan beton *confined* dengan Variasi A (sengkang rapat), Variasi B (sesuai SNI), dan Variasi C (sengkang renggang).

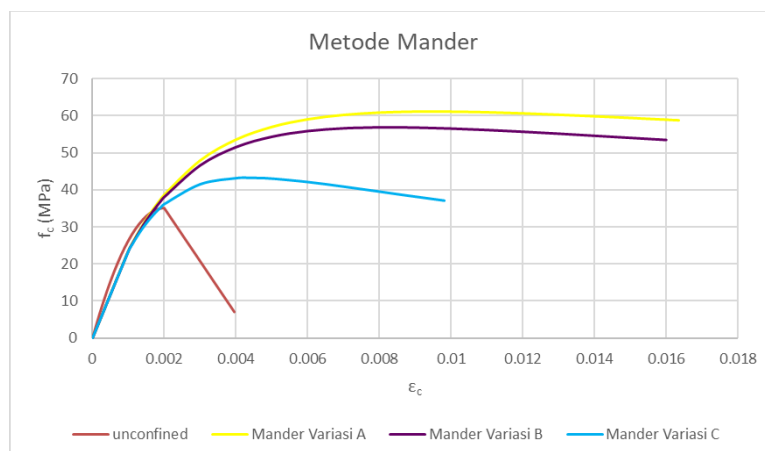


Gambar 7. Komparasi Kurva Tegangan-Regangan Metode Kent and Park

Pada metode Kent and Park, tidak memperhitungkan penambahan kekuatan beton akibat tulangan pengekang. Sehingga kekuatan beton terkekang sama dengan beton yang tidak terkekang. Metode ini hanya memperhitungkan penambahan daktilitas pada beton terkekang. pada metode ini, beton yang terkekang memiliki daktilitas yang lebih besar daripada beton yang tidak terkekang.

Akibat adanya perbedaan jarak sengkang antara variasi A,B dan C, terdapat perbedaan perilaku terkait daktilitas pada kurva tegangan-regangannya. Variasi B merupakan kondisi ideal karena menggunakan jarak optimum sesuai dengan SNI 2874-2019 Pasal 25.7.3 Tulangan spiral. Apabila jarak sengkang diperkecil seperti pada variasi A, daktilitas beton menjadi bertambah. Apabila jarak sengkang diperbesar seperti pada kasus variasi C, maka yang terjadi adalah penurunan daktilitas beton terkekang. Hal ini terjadi karena pada suatu segmen yang ditinjau, beton dengan jarak sengkang yang rapat mengandung lebih banyak tulangan dibandingkan dengan beton yang memiliki jarak sengkang yang besar.

Setelah pemodelan menggunakan pendekatan Kent and Park, perbandingan kurva tegangan-regangan untuk ketiga variasi jarak sengkang spiral juga dilakukan menggunakan metode Mander. Model ini secara eksplisit mempertimbangkan tekanan lateral akibat konfinemen spiral dalam perhitungan tegangan beton, sehingga diharapkan mampu memberikan representasi yang lebih akurat terhadap pengaruh variasi konfinemen. Gambar 8 berikut menyajikan kurva hasil pemodelan metode Mander untuk beton *unconfined*, serta beton *confined* dengan Variasi A (sengkang rapat), Variasi B (sesuai SNI), dan Variasi C (sengkang renggang). Kurva ini digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas model Mander terhadap perubahan tingkat konfinemen spiral.

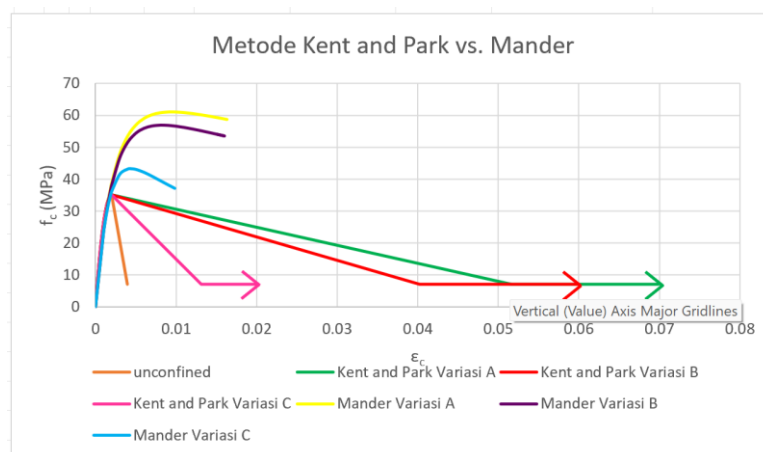


Gambar 8. Komparasi Kurva Tegangan-Regangan Metode Mander

Pada metode Mander, penambahan kekuatan beton terkekang diperhitungkan. Beton yang terkekang memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada beton yang tidak terkekang. Dari parameter daktilitas, beton yang terkekang memiliki daktilitas yang lebih besar dibandingkan dengan beton yang tidak terkekang.

Akibat adanya perbedaan jarak sengkang antara variasi A, B dan C, terdapat perbedaan perilaku terkait daktilitas pada kurva tegangan-regangannya. Variasi B merupakan kondisi ideal karena menggunakan jarak optimum sesuai dengan SNI 2874-2019 Pasal 25.7.3 Tulangan spiral. Apabila jarak sengkang diperkecil seperti pada variasi A, maka daktilitas dan kekuatan beton menjadi bertambah. Apabila jarak sengkang diperbesar seperti pada variasi C, maka yang terjadi adalah penurunan daktilitas dan kekuatan beton terkekang. Hal ini terjadi karena pada suatu segmen yang ditinjau, beton dengan jarak sengkang yang rapat mengandung lebih banyak tulangan dibandingkan dengan beton yang memiliki jarak sengkang yang besar.

Gambar 9 menyajikan perbandingan lengkap kurva tegangan-regangan beton *confined* berdasarkan kedua metode pemodelan, yaitu Kent and Park dan Mander, untuk seluruh variasi jarak sengkang spiral. Tujuan dari penyajian ini adalah untuk mengevaluasi perbedaan respons masing-masing model terhadap perubahan tingkat konfinemen spiral, serta menilai seberapa besar pengaruh pemilihan model terhadap prediksi kekuatan dan daktilitas beton. Beton *unconfined* ditampilkan sebagai acuan dasar tanpa konfinemen, sementara Variasi A, B, dan C mewakili kondisi konfinemen spiral rapat, sesuai standar, dan renggang. Perbandingan ini diharapkan memberikan gambaran menyeluruh mengenai sensitivitas masing-masing pendekatan terhadap parameter geometri spiral dan efektivitas konfinemen.



Gambar 9. Komparasi Kurva Tegangan-Regangan Metode Kent and Park dan Mander untuk setiap Variasi

Gambar 9 menunjukkan perbandingan kurva tegangan-regangan beton untuk seluruh variasi jarak sengkang spiral dengan metode Kent and Park dan Mander. Model Mander secara konsisten menghasilkan tegangan puncak dan regangan ultimate yang lebih tinggi, terutama pada Variasi A (sengkang rapat), yang menunjukkan daktilitas maksimum. Pada Variasi B (sesuai SNI), performa masih cukup baik meskipun mulai menurun, sementara pada Variasi C (sengkang renggang), peningkatan akibat konfinemen menjadi sangat terbatas. Model Kent and Park menunjukkan tren serupa namun dengan hasil yang lebih konservatif dan penurunan tegangan pasca-puncak yang lebih tajam. Secara umum, model Mander lebih sensitif dan mampu merepresentasikan efek konfinemen spiral secara lebih akurat dibanding Kent and Park.

Metode Kent and Park tidak memperhitungkan penambahan tegangan beton sehingga beton dengan tulangan pengekat akan memiliki tegangan maksimum yang sama dengan beton tidak terkekang. Tetapi tulangan pengekat menyebabkan bertambahnya regangan maksimum beton yang berarti menambah daktilitas beton. Berbeda dengan metode Kent and Park, metode Mander memperhitungkan penambahan tegangan beton akibat tulangan pengekat. Kurva yang dihasilkan

oleh metode kent and park terlihat lebih daktail karena pada metode tersebut tidak memperhitungkan titik *first hoop fracture* seperti pada metode Mander sehingga kurva bersifat menerus. Hal ini juga disebabkan dengan pengambilan nilai ε_{sm} yang bersifat asumsi pada metode Mander.

Tabel 1 berisi rangkuman hasil perhitungan numerik berupa kuat tekan puncak, regangan maksimum, dan nilai daktilitas untuk masing-masing variasi jarak sengkang spiral dan model yang digunakan. Penyajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran kuantitatif yang mendukung hasil interpretasi kurva, sekaligus mempertegas pengaruh variasi konfinemen dan perbedaan karakteristik antar model terhadap performa beton *confined*.

Tabel 1. Pengaruh Variasi Jarak Sengkang Spiral terhadap Karakteristik Tegangan–Regangan Beton berdasarkan Model Mander dan Kent and Park

Jarak Spiral	Model	Kuat Tekan Leleh (f_{co}) (MPa)	Regangan Leleh (ε_0)	Kuat Tekan Puncak (f_{cc}) (MPa)	Regangan Puncak (ε_{cc})	Regangan Ultimit (ε_u)	Daktilitas ($\varepsilon_u/\varepsilon_0$)
Unconfined	Kent and Park	35.00	0.00200	35.00	0.00200	0.00396	1.98
Variasi A (50 mm)	Mander	35.00	0.00200	61.12	0.00946	0.01634	8.17
	Kent and Park	35.00	0.00200	35.00	0.00200	0.05164	25.82
Variasi B (60 mm)	Mander	35.00	0.00200	56.86	0.00825	0.01505	7.53
	Kent and Park	35.00	0.00200	35.00	0.00200	0.04023	20.11
Variasi C (150 mm)	Mander	35.00	0.00200	43.29	0.00437	0.00981	4.90
	Kent and Park	35.00	0.00200	35.00	0.00200	0.01314	6.57

Berdasarkan data dalam Tabel 1, terlihat bahwa penggunaan sengkang spiral yang lebih rapat pada Variasi A menghasilkan peningkatan signifikan pada kekuatan tekan dan regangan maksimum, baik pada model Mander maupun Kent and Park. Model Mander memperlihatkan lonjakan tegangan puncak hingga 74,6% dibanding beton *unconfined*, dengan nilai daktilitas sebesar 1,73. Sementara itu, model Kent and Park pada variasi yang sama mencatat daktilitas tertinggi, yaitu 25,82, meskipun tanpa peningkatan kekuatan tekan. Variasi B tetap menunjukkan kinerja konfinemen yang cukup baik, dengan daktilitas di atas 20 untuk model Kent and Park dan kekuatan puncak yang masih tinggi pada model Mander. Sebaliknya, Variasi C yang melebihi batas SNI menghasilkan efektivitas konfinemen yang rendah, mendekati perilaku beton *unconfined*.

Hasil ini mengindikasikan bahwa jarak sengkang spiral berperan kritis terhadap kontribusi konfinemen, dan bahwa model Mander lebih peka terhadap perubahan geometri konfinemen dibandingkan Kent and Park. Dengan demikian, pemilihan model harus mempertimbangkan konteks aplikasi, apakah menekankan pada kekuatan awal beton atau pada kapasitas deformasi pasca-puncak.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kurva tegangan–regangan beton *confined* dan *unconfined* terhadap variasi jarak sengkang spiral menggunakan model Kent and Park serta Mander, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Pemberian konfinemen spiral terbukti meningkatkan kekuatan tekan dan daktilitas beton secara signifikan. Jarak sengkang yang lebih rapat, seperti pada variasi 50 mm, menghasilkan peningkatan performa yang paling optimal dengan kuat tekan puncak mencapai 61,12 MPa dan daktilitas 8,17 pada model Mander.

2. Model Mander menunjukkan respons yang lebih sensitif terhadap pengaruh konfinemen dibandingkan model Kent and Park. Hal ini tercermin dari peningkatan tegangan puncak dan bentuk kurva pasca-puncak yang lebih realistis secara mekanis.
3. Sementara itu, model Kent and Park memberikan estimasi kekuatan tekan yang tetap, namun menghasilkan nilai regangan ultimate dan daktilitas yang tinggi secara idealisasi, seperti pada variasi 50 mm yang mencapai daktilitas 25,82.
4. Variasi C dengan jarak sengkang 150 mm menunjukkan efektivitas konfinemen yang paling rendah, dengan karakteristik tegangan-regangan yang mendekati kondisi beton unconfined, terutama pada model Kent and Park.
5. Variasi B (jarak sengkang 60 mm), yang mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019, tetap memberikan peningkatan performa yang layak, menjadikannya alternatif optimal dalam konteks desain struktural praktis.

Secara keseluruhan, model Mander lebih direkomendasikan untuk pemodelan beton *confined* karena mempertimbangkan peningkatan kekuatan inti beton akibat konfinemen spiral, serta memberikan representasi yang lebih akurat terhadap perilaku penurunan kekuatan setelah mencapai tegangan puncak. Sebaliknya, model Kent and Park menunjukkan pendekatan yang lebih konservatif, dengan tidak mempertimbangkan peningkatan tegangan akibat konfinemen, sehingga kurang menggambarkan pengaruh aktual konfinemen terhadap kekuatan tekan.

Referensi

- [1] H. Yang, M. Li, J. Jiang, Y. Zhang, J. Mei, dan Z. Deng, "Mechanical properties of steel reinforced coral aggregate concrete column under uniaxial compression," *Constr Build Mater*, vol. 369, hlm. 130508, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130508>.
- [2] D. Seong, T. Kim, M. Oh, dan H. Shin, "Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake Loads," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 9, no. 2, hlm. 205–220, 2011, doi: 10.3151/jact.9.205.
- [3] R. Zhou, H. Cheng, M. Li, L. Zhang, dan R. Hong, "Energy evolution analysis and brittleness evaluation of high-strength concrete considering the whole failure process," *Crystals (Basel)*, vol. 10, no. 12, hlm. 1–16, Des 2020, doi: 10.3390/cryst10121099.
- [4] S. Zhang, B. Han, H. Xie, M. An, dan S. Lyu, "Brittleness of concrete under different curing conditions," *Materials*, vol. 14, no. 24, Des 2021, doi: 10.3390/ma14247865.
- [5] M. A. Hosen, M. I. Shammass, S. K. Shill, S. Al-Deen, M. Z. Jumaat, dan H. Hashim, "Ductility Enhancement of Sustainable Fibrous-Reinforced High-Strength Lightweight Concrete," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 4, hlm. 727, Feb 2022, doi: 10.3390/polym14040727.
- [6] Z. Liang, S. Zheng, Z. Shang, X. Liu, Y. Li, dan Y. Du, "Examination of the stress-strain model for confined concrete considering the impact of corroded spiral bars," *Journal of Building Engineering*, vol. 95, hlm. 109969, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109969>.
- [7] M. J. Munir, S. M. S. Kazmi, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Y. Zhou, dan F. Xing, "Stress strain performance of steel spiral confined recycled aggregate concrete," *Cem Concr Compos*, vol. 108, hlm. 103535, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103535>.
- [8] H. Zhao, W. Liu, P. Yang, dan C. Song, "Study on the Axial Compressive Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Confined with High-Strength Rectangular Spiral Stirrup," *Materials*, vol. 18, no. 3, hlm. 669, Feb 2025, doi: 10.3390/ma18030669.
- [9] Q. Qiao, W. Zhang, B. Mou, dan W. Cao, "Effect of spiral spacing on axial compressive behavior of square reinforced concrete filled steel tube (RCFST) columns," *Steel and Composite Structures*, vol. 31, no. 6, hlm. 559–573, Jun 2019, [Daring]. Tersedia pada: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210515546>
- [10] M. Ali, S. Abbas, A. R. G. de Azevedo, M. T. Marvila, M. I. Khan, dan W. Rafiq, "Experimental and analytical investigation on the confinement behavior of low strength concrete under axial compression," *Structures*, vol. 36, hlm. 303–313, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.038>.
- [11] M. Ali dkk., "Article investigating optimal confinement behaviour of low-strength concrete through quantitative and analytical approaches," *Materials*, vol. 14, no. 16, Agu 2021, doi: 10.3390/ma14164675.

- [12] T. Belete, N. Chaffo, H. Melese, dan B. Lupango, "Investigation of Reinforced Concrete Columns Confined by Rectangular Spiral Reinforcement using Finite Element Analysis," *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, vol. 8, no. 2, hlm. 2021, 2020, doi: 10.20372/ejssdastu:v8.i2.2021.291.
- [13] H. Ullah *dkk.*, "Experimental Investigation of the Stress–Strain Behavior and Strength Characterization of Rubberized Reinforced Concrete," *Materials*, vol. 15, no. 3, hlm. 730, Jan 2022, doi: 10.3390/ma15030730.
- [14] K. D. Charles dan P. Robert, "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of the Structural Division*, vol. 97, no. 7, hlm. 1969–1990, Jul 1971, doi: 10.1061/JSDEAG.0002957.
- [15] A. M. A. E. F. and H. A. Rasheed, "Numerical Procedure to Generate Interaction Diagrams for Circular Concrete Columns Wrapped with RFP," *ACI Symposium Publication*, vol. 301, doi: 10.14359/51688007.
- [16] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, dan R. Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, hlm. 1804–1826, Agu 1988, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019. Diakses: 21 Juli 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bsn.go.id>