

Peran Mediasi Sindrom Metabolik dalam Hubungan antara Generasi dan Sarkopenia: Studi Multisenter pada Populasi Perkotaan di Jakarta, Indonesia

Bryan Anna Wijaya¹, Fiona Valencia Setiawan¹, Ajeng Tias Endarti², Yohanes Firmansyah³, Ernawati Ernawati⁴

¹ Fakultas Kedokteran Universitas Tarumanagara, Jakarta, Indonesia

² Departemen Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Universitas MH. Thamrin, Jakarta, Indonesia

³ Departemen Fisiologi, Fakultas Kedokteran Universitas Tarumanagara, Jakarta, Indonesia

⁴ Departemen Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kedokteran Universitas Tarumanagara, Jakarta, Indonesia

E-mail corresponding author: yohanes@fk.untar.ac.id

Tanggal Submisi: April 2026; Tanggal Penerimaan: Juni 2026

ABSTRAK

Pendahuluan: Peningkatan populasi usia lanjut disertai dengan meningkatnya beban gangguan muskuloskeletal, termasuk sarkopenia, yang kini dipahami sebagai kondisi multifaktorial dan tidak terbatas pada usia lanjut. Peran sindrom metabolik sebagai mediator dalam hubungan antara generasi dan sarkopenia masih belum banyak dikaji, terutama pada populasi perkotaan. **Metode:** Penelitian ini merupakan studi observasional analitik dengan desain potong lintang multisenter pada populasi perkotaan di Jakarta. Sampel ditentukan dengan metode total sampling ($n=1551$), dan analisis data dilakukan menggunakan korelasi Spearman serta Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). **Hasil:** Ditemukan bahwa generasi berasosiasi positif dengan sindrom metabolik ($\beta=0,276$), dan sindrom metabolik berasosiasi kuat dengan sarkopenia ($\beta=0,590$), sementara hubungan langsung generasi dengan sarkopenia menunjukkan arah negatif ($\beta=-0,375$), yang mengindikasikan adanya mediasi tidak konsisten. Model menjelaskan 36,6% variasi sarkopenia ($R^2=0,366$). **Kesimpulan:** Sindrom metabolik berperan sebagai mediator penting dalam hubungan antara generasi dan sarkopenia, sehingga pengendalian faktor metabolik sejak usia dini menjadi strategi kunci dalam pencegahan sarkopenia.

ABSTRACT

Introduction: The increasing aging population is accompanied by a rising burden of musculoskeletal disorders, including sarcopenia, which is now recognized as a multifactorial condition not limited to older adults. The mediating role of metabolic syndrome in the relationship between generation and sarcopenia remains underexplored, particularly in urban populations. **Method:** This study employed a multicenter cross-sectional analytical design in an urban population in Jakarta. A total of 1,551 participants were included using total sampling, and data were analyzed using Spearman correlation and Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). **Results:** Generation was positively associated with metabolic syndrome ($\beta=0.276$), and metabolic syndrome showed a strong positive association with sarcopenia ($\beta=0.590$), while the direct association between generation and sarcopenia was negative ($\beta=-0.375$), indicating inconsistent mediation. The model explained 36.6% of the variance in sarcopenia ($R^2=0.366$). **Conclusion:** Metabolic syndrome acts as a key mediator in the relationship between generation and sarcopenia, highlighting the importance of early metabolic risk control in preventing sarcopenia.

Keywords : Generation, metabolic syndrome, sarcopenia

PENDAHULUAN

Penuaan merupakan proses biologis kompleks yang ditandai oleh penurunan fungsi fisiologis, akumulasi kerusakan seluler, dan meningkatnya kerentanan terhadap penyakit degeneratif (Zhao et al., 2024). Secara global, terjadi pergeseran demografis menuju populasi yang semakin menua. Pada tahun 2020, jumlah individu berusia ≥ 65 tahun mencapai sekitar 727 juta dan telah melampaui jumlah anak usia di bawah lima tahun. Sekitar 8% populasi dunia saat ini berusia di atas 65 tahun, dan proporsi penduduk ≥ 60 tahun meningkat dari 9% pada tahun 1994 menjadi 12% pada tahun 2014, serta diproyeksikan mencapai 21% pada tahun 2050 (Sabri et al., 2022). Di Indonesia, data Badan Pusat Statistik tahun 2023 menunjukkan lansia telah mencapai 22,8 juta jiwa (8,4% populasi) dengan peningkatan terutama di wilayah perkotaan (Wahyuni & Arifiati, 2025).

Peningkatan populasi usia lanjut ini secara langsung berkontribusi terhadap meningkatnya beban

gangguan muskuloskeletal terkait usia, terutama sarkopenia, yang ditandai oleh penurunan progresif massa otot, kekuatan, dan performa fisik. Kondisi ini kini tidak lagi dipandang semata sebagai bagian dari penuaan fisiologis, melainkan sebagai spektrum gangguan yang dapat terjadi lintas usia dan dipengaruhi oleh faktor gaya hidup, nutrisi, serta metabolik (Huang et al., 2025; Liguori et al., 2018). Secara epidemiologis, sarkopenia dilaporkan memengaruhi sekitar 10–16% populasi lanjut usia secara global, namun juga ditemukan pada lebih dari 10% dewasa muda, sehingga menegaskan bahwa kondisi ini merupakan masalah kesehatan lintas usia yang memerlukan deteksi dan intervensi dini (Jung et al., 2023; Yuan & Larsson, 2023).

Salah satu mekanisme yang semakin mendapat perhatian adalah peran sindrom metabolik sebagai mediator sarkopenia. Sindrom metabolik, yang ditandai oleh kombinasi obesitas sentral, dislipidemia, hipertensi, dan hiperglikemia, mencerminkan kondisi resistensi insulin dan inflamasi kronis derajat rendah (*low-grade chronic inflammation*) yang berkontribusi terhadap disfungsi otot rangka. Interaksi antara jaringan adiposa dan otot melalui jalur adipokin, miokin, serta stres oksidatif memperkuat konsep adanya sumbu “*muscle–metabolic axis*” yang mendasari hubungan antara gangguan metabolik dan penurunan kualitas otot yang juga dipengaruhi oleh paparan lingkungan, pola hidup, dan risiko metabolik yang berbeda antar generasi. (Gonzalez et al., 2021; Park & Choi, 2023; Rubio-Ruiz et al., 2019)

Meskipun hubungan antara sindrom metabolik dan sarkopenia telah banyak dilaporkan, perannya sebagai mediator antara generasi dan sarkopenia masih belum banyak diteliti, terutama pada populasi perkotaan di negara berkembang. Lingkungan urban mendorong pola hidup sedentari dan konsumsi tinggi kalori sehingga meningkatkan risiko gangguan metabolik pada berbagai kelompok usia. Penelitian ini bertujuan menilai peran mediasi sindrom metabolik dalam hubungan antara generasi dan sarkopenia pada populasi perkotaan di Jakarta, Indonesia. Hasilnya diharapkan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai keterkaitan ketiga faktor tersebut.

METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini merupakan studi observasional potong lintang berbasis komunitas dengan pendekatan analitik yang memanfaatkan data sekunder dari basis data PRIMBON *Sub Community Division*, suatu sistem terintegrasi yang menghimpun hasil skrining kesehatan populasi dewasa di wilayah DKI Jakarta. Data yang dianalisis mencakup individu berusia ≥ 18 tahun dengan pemeriksaan kesehatan terstandar yang

terdokumentasi selama periode Januari hingga Desember 2025. Pengumpulan data dilakukan secara multisenter di 15 lokasi yang tersebar di lima wilayah administratif Jakarta, dengan distribusi yang merata untuk memastikan representasi geografis.

Populasi penelitian meliputi seluruh individu dewasa dalam basis data tersebut yang memenuhi kriteria kelengkapan data. Besar sampel dihitung menggunakan rumus estimasi proporsi pada studi potong lintang dengan tingkat kepercayaan 95%, proporsi 0,5, dan presisi 3%, menghasilkan kebutuhan minimal sebesar 1.068 subjek. Setelah penyesuaian terhadap desain multisenter (*design effect* 1,3) dan potensi kehilangan data sebesar 10%, jumlah minimal sampel meningkat menjadi sekitar 1.527 subjek.

Teknik pengambilan sampel menggunakan pendekatan *cluster sampling*, dengan masing-masing lokasi penelitian sebagai unit klaster. Seluruh partisipan yang memenuhi kriteria inklusi dimasukkan secara konsekutif hingga jumlah sampel terpenuhi. Pada analisis akhir, diperoleh 1.551 responden, dengan distribusi yang tetap mencerminkan proporsi antar wilayah administratif, sehingga meningkatkan representativitas populasi perkotaan..

Kriteria Partisipan dan Prosedur Penelitian

Kriteria inklusi:

1. Individu berusia ≥ 18 tahun
2. Berdomisili di wilayah DKI Jakarta
3. Memiliki data pemeriksaan kesehatan lengkap dalam basis data PRIMBON tahun 2025
4. Data mencakup parameter antropometri, *skeletal muscle index* (SMI), dan kekuatan genggam tangan

Kriteria eksklusi:

1. Data tidak lengkap atau variabel utama tidak tersedia
2. Kontraindikasi terhadap pemeriksaan *bioelectrical impedance analysis* (BIA), meliputi:
 - a. Penggunaan alat pacu jantung
 - b. Implan elektronik
 - c. Kehamilan
 - d. Amputasi
 - e. Gangguan keseimbangan berat

3. Kondisi yang memengaruhi validitas pengukuran kekuatan otot, meliputi:

- a. Cedera ekstremitas atas
- b. Gangguan muskuloskeletal berat
- c. Defisit neurologis atau neuropati perifer

Variabel klinis dan metabolik dalam penelitian ini diperoleh melalui ekstraksi data sekunder dari basis data PRIMBON, yang berisi hasil skrining kesehatan terstandar yang dikumpulkan selama kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat sepanjang tahun 2025. Seluruh pengukuran dalam basis data tersebut dilakukan oleh tenaga kesehatan terlatih sesuai dengan prosedur klinis yang baku sebelum didokumentasikan dalam sistem PRIMBON. Tekanan darah diukur menggunakan sphygmomanometer digital otomatis yang telah tervalidasi dengan mengikuti protokol pengukuran standar. Parameter biokimia diperoleh dari pemeriksaan darah puasa setelah periode puasa 8–12 jam, meliputi profil lipid (HDL dan trigliserida), glukosa darah puasa, hemoglobin, serta kadar asam urat, yang dianalisis menggunakan alat biokimia terstandar.

Parameter antropometri mencakup berat badan yang diukur dengan timbangan digital terkalibrasi dan tinggi badan yang diukur menggunakan stadiometer digital. Indeks massa tubuh (IMT) dihitung sebagai berat badan (kg) dibagi tinggi badan kuadrat (m^2). Komposisi tubuh dinilai menggunakan metode *bioelectrical impedance analysis* (BIA), dari mana diperoleh massa otot rangka apendikular yang digunakan untuk menghitung *skeletal muscle index* (SMI), yaitu massa otot rangka apendikular dibagi tinggi badan kuadrat (kg/m^2). Kekuatan otot diukur melalui pemeriksaan kekuatan genggam tangan menggunakan dinamometer digital. Pengukuran dilakukan dua kali pada masing-masing tangan, dan nilai rerata digunakan sebagai representasi kekuatan otot dalam analisis.

Sindrom metabolik dalam penelitian ini didefinisikan mengacu pada kriteria National Cholesterol Education Program Adult Treatment Panel III (NCEP ATP III) yang telah disesuaikan untuk populasi Asia, termasuk Indonesia. Seseorang diklasifikasikan mengalami sindrom metabolik apabila memenuhi sedikitnya tiga dari lima komponen berikut: (1) obesitas sentral yang ditentukan berdasarkan lingkaran pinggang ≥ 90 cm pada laki-laki dan ≥ 80 cm pada perempuan; (2) kadar trigliserida ≥ 150 mg/dL atau sedang dalam terapi penurunan trigliserida; (3) kadar HDL kolesterol rendah, yaitu < 40 mg/dL pada laki-laki dan < 50 mg/dL pada perempuan; (4) tekanan darah $\geq 130/85$ mmHg atau sedang dalam pengobatan antihipertensi; dan (5) kadar glukosa darah puasa ≥ 100 mg/dL atau adanya riwayat diabetes melitus.

Status sarkopenia ditentukan berdasarkan kriteria *Asian Working Group for Sarcopenia* (AWGS) dengan menggunakan kombinasi massa otot dan kekuatan otot. Massa otot rendah didefinisikan sebagai nilai *skeletal muscle index* (SMI) $<7,6 \text{ kg/m}^2$ pada laki-laki usia <65 tahun dan $<7,0 \text{ kg/m}^2$ pada usia ≥ 65 tahun, serta $<5,7 \text{ kg/m}^2$ pada perempuan. Kekuatan otot rendah ditetapkan apabila nilai kekuatan genggam tangan $<34 \text{ kg}$ pada laki-laki usia <65 tahun dan $<28 \text{ kg}$ pada usia ≥ 65 tahun, serta $<20 \text{ kg}$ dan $<18 \text{ kg}$ pada perempuan sesuai kelompok usia. Berdasarkan kombinasi kedua parameter tersebut, partisipan diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Sarkopenia, apabila terdapat massa otot rendah dengan atau tanpa penurunan kekuatan otot
2. Risiko sarkopenia (*possible sarcopenia*), apabila massa otot masih normal namun disertai penurunan kekuatan
3. Status normal, apabila massa otot dan kekuatan otot berada dalam batas normal

Analisis Statistik

Analisis dilakukan dalam dua tahap utama: deskriptif dan inferensial berbasis model struktural.

1. Analisis Deskriptif

Distribusi variabel disajikan dalam bentuk rerata, simpangan baku, median, serta proporsi untuk menggambarkan karakteristik populasi dan pola lintas generasi.

2. Structural Equation Modeling (SEM)

Metode Structural Equation Modeling (SEM) berbasis Partial Least Squares (PLS) digunakan untuk menguji hipotesis mediasi. Analisis dimulai dengan penyusunan model yang menggambarkan hubungan antara generasi, sindrom metabolik, dan sarkopenia. Evaluasi model pengukuran (*measurement model*) dilakukan untuk menilai kualitas konstruk sindrom metabolik berdasarkan indikator-indikator penyusunnya. Evaluasi model struktural (*structural model*) dilakukan untuk menguji hubungan antarvariabel dalam model, termasuk hubungan langsung dan hubungan tidak langsung yang dimediasi oleh sindrom metabolik.

3. Estimasi Efek Mediasi

Efek mediasi diestimasi melalui perhitungan efek langsung generasi terhadap sarkopenia serta efek tidak langsung yang terjadi melalui sindrom metabolik sebagai variabel mediator. Signifikansi efek tidak langsung dinilai menggunakan metode *bootstrapping* dengan 1.000 replikasi dan interval kepercayaan sebesar 95%.

4. *Goodness-of-fit model*

5. Kelayakan model dinilai menggunakan indikator:

- CFI (*Comparative Fit Index*) > 0,90
- TLI (*Tucker-Lewis Index*) > 0,90
- RMSEA < 0,08
- SRMR < 0,08

6. Perangkat Analisis

Analisis dilakukan menggunakan IBM SPSS untuk tahap deskriptif dan SEM PLS *software* untuk pemodelan struktural. Nilai $p < 0,05$ dianggap bermakna secara statistik.

Persetujuan Etik

Penelitian ini telah mendapatkan persetujuan etik dari Komite Etik Penelitian Kesehatan Universitas Tarumanagara dengan nomor persetujuan 010-UTHREC/UNTAR/II/2026. Seluruh tahapan penelitian dilaksanakan dengan mengacu pada prinsip-prinsip etik internasional sebagaimana tercantum dalam Deklarasi Helsinki. Data yang digunakan dalam analisis telah melalui proses anonimisasi untuk menjaga kerahasiaan identitas partisipan, dan seluruh individu yang terlibat sebelumnya telah memberikan persetujuan tertulis (*informed consent*) pada saat pelaksanaan kegiatan skrining kesehatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebanyak 1.551 subjek dengan rerata usia $40,17 \pm 15,42$ tahun (median 37; rentang 18–80) didominasi oleh perempuan (64,6%). Secara antropometrik, rerata berat badan dan tinggi badan masing-masing $66,49 \pm 15,25$ kg dan $159,72 \pm 8,91$ cm, dengan indeks massa tubuh $25,96 \pm 5,05$ kg/m² yang mencerminkan kecenderungan ke arah *overweight*. Parameter hemodinamik menunjukkan rerata tekanan darah sistolik $125,72 \pm 17,6$ mmHg dan diastolik $81,32 \pm 11,47$ mmHg, sementara lingkar perut rata-rata $86,08 \pm 13,23$ cm mengindikasikan proporsi obesitas sentral yang cukup bermakna. Profil metabolik memperlihatkan rerata HDL $51,81 \pm 13,59$ mg/dL, trigliserida $156,06 \pm 72,64$ mg/dL, dan gula darah puasa $97,94 \pm 31,73$ mg/dL, dengan variasi yang cukup lebar terutama pada trigliserida dan glukosa. Dari aspek fungsi muskular, rerata kekuatan genggam tangan $25,22 \pm 8,96$ kg dan skeletal muscle index $6,74 \pm 1,45$ kg/m², dengan distribusi status sarkopenia yang relatif seimbang antara normal (38%), risiko sarkopenia (23,7%), dan sarkopenia (38,3%). Distribusi generasi menunjukkan dominasi kelompok milenial (35,7%)

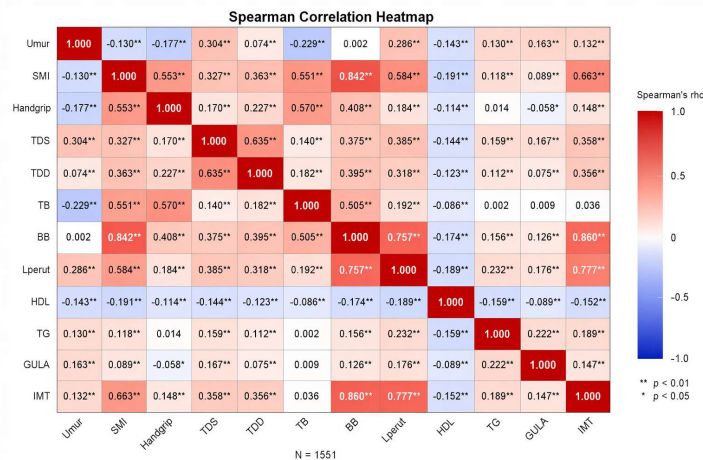
dan generasi Z (31,9%), diikuti generasi X (21%) dan *baby boomers* (11,5%). (Tabel 1)

Tabel 1. Karakteristik Responden

Parameter	N (%)	Mean (SD)	Med (Min-Max)
Usia (tahun)	1551 (100)	40.17 (15.42)	37 (18 – 80)
Jenis Kelamin			
• Laki-laki	551 (35.4)		
• Perempuan	1000 (64.6)		
Berat Badan (Kg)		66.49 (15.25)	64 (24 – 130.4)
Tinggi Badan (m ²)		159.72 (8.91)	159 (127 – 191)
Indeks Massa Tubuh (Kg/m ²)		25.96 (5.05)	25.59 (12.53 – 48.68)
Tekanan Darah Sistolik (mmHg)		125.72 (17.6)	123 (81 – 225)
Tekanan Darah Diastolik (mmHg)		81.32 (11.47)	80 (60 – 134)
Lingkar Perut (cm)		86.08 (13.23)	86 (25 – 124)
HDL (mg/dL)		51.81 (13.59)	52 (18 – 91.5)
Trigliserida (mg/dL)		156.06 (72.64)	145 (32 – 830)
Gula Darah Puasa (mg/dL)		97.94 (31.73)	90 (61 – 319)
Kekuatan Genggaman Tangan (Kg)		25.22 (8.96)	23.3 (7.1 – 67.5)
<i>Skeletal Muscle Index</i> (Kg/m ²)		6.74 (1.45)	6.47 (2.91 – 13.92)
Status Sarkopenia			
• Normal	590 (38)		
• Risiko Sarkopenia	367 (23.7)		
• Sarkopenia	594 (38.3)		
Generasi			
• Generasi Z	494 (31.9)		
• Generasi Milenial	553 (35.7)		
• Generasi X	326 (21)		
• Generasi <i>Baby Boomers</i>	178 (11.5)		
Status Sindrom Metabolik			
• Ya	369 (23.8)		
• Tidak	1182 (76.2)		

Heatmap korelasi Spearman menunjukkan adanya pola hubungan yang konsisten antara parameter antropometri, hemodinamik, dan metabolik dalam populasi studi. Variabel komposisi tubuh memperlihatkan korelasi kuat satu sama lain, terutama antara berat badan, indeks massa tubuh, dan lingkar perut (r hingga 0,86), serta hubungan erat dengan skeletal muscle index (SMI), menegaskan keterkaitan

antara massa tubuh dan kompartemen muskular. SMI juga berkorelasi positif sedang dengan kekuatan genggam tangan ($r=0,55$), mencerminkan hubungan fungsional antara massa dan kekuatan otot. Parameter tekanan darah menunjukkan korelasi moderat dengan indikator adipositas, mengindikasikan kontribusi obesitas terhadap peningkatan tekanan darah. Sebaliknya, HDL secara konsisten berkorelasi negatif dengan hampir seluruh parameter metabolik dan antropometri, sedangkan trigliserida dan glukosa darah menunjukkan korelasi positif meskipun relatif lemah hingga sedang. Usia berhubungan negatif dengan parameter muskular, namun positif dengan tekanan darah dan variabel metabolik, mencerminkan pergeseran fisiologis menuju profil kardiometabolik yang kurang menguntungkan seiring penuaan.

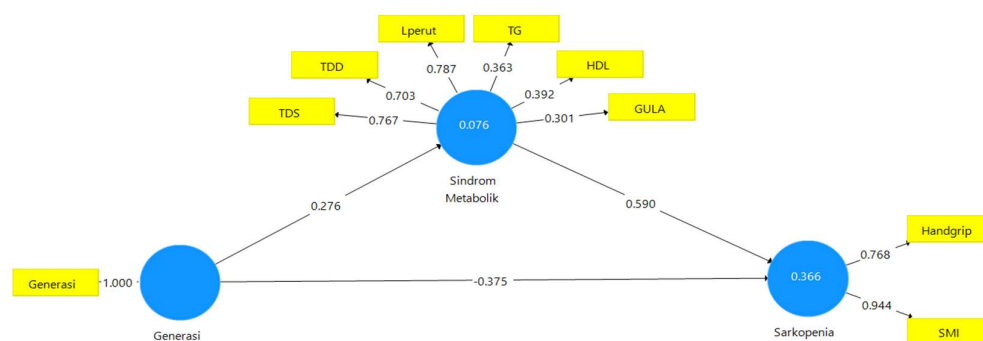


Gambar 1. Heatmap Korelasi Spearman antar Parameter Antropometri dan Metabolik

Model PLS-SEM pada Gambar 1 menunjukkan bahwa sindrom metabolik berfungsi sebagai mediator dalam hubungan antara generasi dan sarkopenia dengan pola hubungan yang tidak searah. Secara struktural, generasi berasosiasi positif dengan sindrom metabolik ($\beta = 0,276$), yang mengindikasikan bahwa peningkatan usia berkorelasi dengan memburuknya profil metabolik. Selain itu, sindrom metabolik memiliki pengaruh positif yang kuat terhadap sarkopenia ($\beta = 0,590$) yang menegaskan peran dominan disfungsi metabolik dalam penurunan massa dan kekuatan otot. Sebaliknya, jalur langsung generasi terhadap sarkopenia menunjukkan koefisien negatif ($\beta = -0,375$), sehingga mengindikasikan adanya pola mediasi tidak konsisten, di mana arah efek langsung dan tidak langsung saling berlawanan. Nilai koefisien determinasi menunjukkan bahwa generasi hanya menjelaskan proporsi kecil variasi sindrom metabolik ($R^2 = 0,076$), sedangkan keseluruhan model menjelaskan 36,6% sarkopenia ($R^2 = 0,366$), yang mencerminkan tingkat moderat.

Pada konstruk sindrom metabolik yang bersifat formatif, kontribusi terbesar berasal dari lingkaran perut (0,787), diikuti oleh tekanan darah sistolik (0,767) dan diastolik (0,703), menunjukkan dominasi komponen obesitas sentral dan tekanan darah dalam membentuk beban metabolik. Sementara itu, trigliserida (0,363), HDL (0,392), dan glukosa darah (0,301) memberikan kontribusi yang relatif lebih rendah, mengindikasikan heterogenitas kontribusi antar indikator dalam konstruk tersebut. Pada konstruk sarkopenia yang bersifat reflektif, indikator massa otot (SMI) menunjukkan loading yang sangat tinggi (0,944), diikuti oleh kekuatan genggam (0,768), yang menegaskan bahwa massa otot merupakan indikator utama dalam merepresentasikan kondisi sarkopenia pada populasi ini.

Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa hubungan antara generasi dan sarkopenia tidak didominasi oleh efek langsung, melainkan lebih banyak dijelaskan melalui jalur tidak langsung yang dimediasi oleh sindrom metabolik. Pola ini mengindikasikan bahwa kontribusi usia terhadap sarkopenia terutama terjadi melalui perubahan status metabolik, bukan semata-mata akibat proses penuaan fisiologis itu sendiri. Dengan demikian, hasil ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan faktor metabolik sebagai mekanisme kunci dalam memahami variasi sarkopenia pada populasi perkotaan.



Gambar 2. Model PLS-SEM Peran Mediasi Sindrom Metabolik dalam Hubungan antara Generasi dan Sarkopenia

sindrom metabolik berperan sebagai mediator utama dalam hubungan antara generasi dan sarkopenia. Dominasi lingkaran perut sebagai indikator sindrom metabolik menegaskan pentingnya obesitas sentral dalam proses tersebut. Penumpukan lemak visceral diketahui meningkatkan produksi mediator inflamasi yang dapat menyebabkan inflamasi kronis derajat rendah dan resistensi insulin. Kondisi ini

mengganggu proses pembentukan protein otot sekaligus meningkatkan pemecahan protein otot, sehingga berkontribusi terhadap penurunan massa dan fungsi otot. Dengan demikian, gangguan metabolik yang menyertai sindrom metabolik dapat menjadi salah satu mekanisme penting yang menghubungkan perbedaan generasi dengan risiko terjadinya sarkopenia. (Dobre et al., 2025; Nishikawa et al., 2021; T. Wang et al., 2024)

Resistensi insulin sebagai komponen sentral sindrom metabolik memiliki implikasi langsung terhadap homeostasis otot rangka. Gangguan sensitivitas insulin menurunkan kemampuan otot dalam mengambil glukosa, sehingga mengurangi ketersediaan energi untuk kontraksi dan pemeliharaan jaringan otot. (Merz & Thurmond, 2020; Yaribeygi et al., 2019) Di sisi lain, peningkatan kadar asam lemak bebas akibat lipolisis yang tidak terkontrol menyebabkan akumulasi lipid intramuskular (*myosteatosis*), yang berhubungan dengan disfungsi mitokondria dan peningkatan stres oksidatif. Kondisi ini memperburuk efisiensi fosforilasi oksidatif dan meningkatkan produksi *reactive oxygen species* (ROS), yang selanjutnya merusak struktur protein dan membran sel otot. Penurunan kadar HDL yang berkorelasi negatif dengan berbagai parameter metabolik dalam penelitian ini juga mencerminkan berkurangnya kapasitas antiinflamasi dan antioksidan, sehingga memperkuat lingkungan metabolik yang bersifat katabolik terhadap jaringan otot. (Choi et al., 2025; Kim et al., 2024; Razi et al., 2025)

Pola mediasi tidak konsisten yang ditunjukkan oleh arah efek langsung dan tidak langsung mengindikasikan bahwa pengaruh generasi terhadap sarkopenia lebih banyak dimediasi oleh kondisi metabolik dibandingkan oleh usia kronologis semata. Hal ini sejalan dengan konsep bahwa penuaan biologis dipengaruhi oleh akumulasi paparan risiko metabolik sepanjang kehidupan. Pada populasi perkotaan, paparan terhadap pola hidup sedentari, konsumsi energi berlebih, dan stres lingkungan berkontribusi terhadap percepatan disfungsi metabolik pada usia yang lebih muda. Dengan demikian, generasi yang lebih muda dapat mengalami perubahan metabolik yang signifikan sebelum munculnya manifestasi klinis sarkopenia. Nilai koefisien determinasi yang moderat pada model sarkopenia menunjukkan bahwa sindrom metabolik merupakan determinan penting, meskipun faktor lain seperti aktivitas fisik, status nutrisi, dan faktor hormonal juga berperan. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan pencegahan sarkopenia perlu menargetkan perbaikan status metabolik secara dini sebagai bagian dari strategi intervensi yang komprehensif. (Jung et al., 2023; Liu et al., 2024; Palmer & Jensen, 2022; C. Wang et al., 2025)

Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa pencegahan sarkopenia perlu dilakukan lebih awal melalui pengendalian faktor-faktor risiko sindrom metabolik. Dari sisi klinis, pemeriksaan sederhana seperti pengukuran lingkaran perut, tekanan darah, kadar glukosa darah, dan profil lipid dapat digunakan untuk mengidentifikasi individu yang berisiko mengalami penurunan massa dan fungsi otot. Dari perspektif kesehatan masyarakat, hasil ini menegaskan pentingnya program promotif dan preventif yang mendorong aktivitas fisik teratur, pola makan sehat, serta pengendalian berat badan untuk menjaga kesehatan metabolik dan otot secara bersamaan. Integrasi edukasi mengenai sindrom metabolik dan sarkopenia dalam program penyakit tidak menular di layanan kesehatan primer juga berpotensi membantu menurunkan risiko disabilitas, mempertahankan kualitas hidup, dan mengurangi beban kesehatan pada populasi yang menua.

Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Desain potong lintang membatasi kemampuan untuk menegaskan hubungan kausal antara generasi, sindrom metabolik, dan sarkopenia, sehingga arah hubungan yang ditemukan bersifat asosiatif. Penggunaan variabel generasi sebagai proksi usia juga berpotensi menimbulkan bias kohort, karena tidak sepenuhnya merepresentasikan paparan lingkungan dan gaya hidup sepanjang kehidupan. Selain itu, kemungkinan adanya faktor perancu yang tidak diukur, seperti aktivitas fisik, asupan nutrisi, status hormonal, dan kondisi komorbid, dapat memengaruhi hubungan yang diamati. Pengukuran parameter metabolik dan komposisi tubuh yang dilakukan pada satu waktu juga tidak menangkap dinamika perubahan longitudinal. Di sisi lain, penggunaan model PLS-SEM memiliki keterbatasan dalam inferensi kausal meskipun kuat untuk analisis hubungan struktural. Oleh karena itu, diperlukan studi longitudinal dengan pengukuran yang lebih komprehensif untuk mengonfirmasi temuan ini dan memperjelas mekanisme yang mendasarinya.

KESIMPULAN

Hubungan antara generasi dan sarkopenia tidak berlangsung secara langsung, melainkan dimediasi secara bermakna oleh sindrom metabolik sebagai determinan kunci dalam jalur tersebut. Generasi yang lebih tua cenderung memiliki profil metabolik yang lebih buruk, dan kondisi ini berkontribusi signifikan terhadap penurunan massa serta kekuatan otot melalui mekanisme resistensi insulin, inflamasi kronis, dan

disfungsi metabolik lainnya. Namun, arah hubungan langsung yang tidak searah mengindikasikan bahwa usia kronologis semata tidak sepenuhnya menjelaskan kejadian sarkopenia tanpa mempertimbangkan status metabolik individu. Dengan demikian, sindrom metabolik berperan sebagai mediator penting yang menjembatani pengaruh generasi terhadap sarkopenia, khususnya pada populasi perkotaan. Temuan ini menegaskan bahwa pencegahan sarkopenia perlu difokuskan tidak hanya pada aspek penuaan, tetapi juga pada pengendalian faktor metabolik sejak usia yang lebih muda sebagai bagian dari strategi intervensi yang komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Choi, W., Woo, G. H., Kwon, T.-H., & Jeon, J.-H. (2025). Obesity-Driven Metabolic Disorders: The Interplay of Inflammation and Mitochondrial Dysfunction. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(19), 9715. <https://doi.org/10.3390/ijms26199715>
- Dobre, M.-Z., Virgolici, B., Dunca-Stefan, D. C. A., Doicin, I.-C., & Stanescu-Spinu, I.-I. (2025). Inflammation—Insulin Resistance Crosstalk and the Central Role of Myokines. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(1), 60. <https://doi.org/10.3390/ijms27010060>
- Gonzalez, A., Simon, F., Achiardi, O., Vilos, C., Cabrera, D., & Cabello-Verrugio, C. (2021). The Critical Role of Oxidative Stress in Sarcopenic Obesity. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/4493817>
- Huang, Y., Wang, C., Cui, H., Sun, G., Qi, X., & Yao, X. (2025). Mitochondrial dysfunction in age-related sarcopenia: mechanistic insights, diagnostic advances, and therapeutic prospects. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fcell.2025.1590524>
- Jung, H. N., Jung, C. H., & Hwang, Y.-C. (2023). Sarcopenia in youth. *Metabolism*, 144, 155557. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2023.155557>
- Kim, H. S., Cho, Y. K., Kim, M. J., Kim, E. H., Lee, M. J., Lee, W. J., Kim, H.-K., & Jung, C. H. (2024). Association between atherogenic dyslipidemia and muscle quality defined by myosteatosis. *Frontiers in Endocrinology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1327522>

- Liguori, I., Russo, G., Aran, L., Bulli, G., Curcio, F., Della-Morte, D., Gargiulo, G., Testa, G., Cacciatore, F., Bonaduce, D., & Abete, P. (2018). Sarcopenia: assessment of disease burden and strategies to improve outcomes. *Clinical Interventions in Aging, Volume 13*, 913–927. <https://doi.org/10.2147/CIA.S149232>
- Liu, M., Yu, D., Pan, Y., Ji, S., Han, N., Yang, C., & Sun, G. (2024). Causal Roles of Lifestyle, Psychosocial Characteristics, and Sleep Status in Sarcopenia: A Mendelian Randomization Study. *The Journals of Gerontology: Series A*, 79(1). <https://doi.org/10.1093/gerona/glad191>
- Merz, K. E., & Thurmond, D. C. (2020). Role of Skeletal Muscle in Insulin Resistance and Glucose Uptake. *Comprehensive Physiology*, 10(3), 785–809. <https://doi.org/10.1002/j.2040-4603.2020.tb00136.x>
- Nishikawa, H., Asai, A., Fukunishi, S., Nishiguchi, S., & Higuchi, K. (2021). Metabolic Syndrome and Sarcopenia. *Nutrients*, 13(10), 3519. <https://doi.org/10.3390/nu13103519>
- Palmer, A. K., & Jensen, M. D. (2022). Metabolic changes in aging humans: current evidence and therapeutic strategies. *Journal of Clinical Investigation*, 132(16). <https://doi.org/10.1172/JCI158451>
- Park, M. J., & Choi, K. M. (2023). Interplay of skeletal muscle and adipose tissue: sarcopenic obesity. *Metabolism*, 144, 155577. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2023.155577>
- Razi, O., de Moraes, C., Zamani, N., Saeidi, A., Hadjicharalambous, M., Hackney, A. C., Del Coso, J., Laher, I., & Zouhal, H. (2025). From Obesity to Muscle Insulin Resistance: The Mediating Roles of Intramyocellular Lipids, Inflammation, and Oxidative Stress. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, 41(7). <https://doi.org/10.1002/dmrr.70094>
- Rubio-Ruiz, M. E., Guarner-Lans, V., Pérez-Torres, I., & Soto, M. E. (2019). Mechanisms Underlying Metabolic Syndrome-Related Sarcopenia and Possible Therapeutic Measures. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(3), 647. <https://doi.org/10.3390/ijms20030647>
- Sabri, S. M., Annuar, N., Rahman, N. L. A., Musairah, S. K., Mutalib, H. A., & Subagja, I. K. (2022). Major Trends in Ageing Population Research: A Bibliometric Analysis from 2001 to 2021. *International Academic Symposium of Social Science 2022*, 19. <https://doi.org/10.3390/proceedings2022082019>
- Wahyuni, E. S., & Arifiati, R. F. (2025). Analisis Faktor Yang Berhubungan Dengan Aktivitas Sosial Lansia Di Masyarakat. *JUKEJ: Jurnal Kesehatan Jompa*, 4(1), 29–37. <https://doi.org/10.57218/jkj.Vol4.Iss1.1426>

- Wang, C., Zheng, R., Song, W., Sun, X., Du, X., & Lu, C. (2025). Sarcopenic obesity, physical activity, and their combined impact on biological aging in US adults. *BMC Public Health*, 25(1), 2226. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-23424-6>
- Wang, T., Zhou, D., & Hong, Z. (2024). Adipose tissue in older individuals: a contributing factor to sarcopenia. *Metabolism*, 160, 155998. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2024.155998>
- Yaribeygi, H., Farrokhi, F. R., Butler, A. E., & Sahebkar, A. (2019). Insulin resistance: Review of the underlying molecular mechanisms. *Journal of Cellular Physiology*, 234(6), 8152–8161. <https://doi.org/10.1002/jcp.27603>
- Yuan, S., & Larsson, S. C. (2023). Epidemiology of sarcopenia: Prevalence, risk factors, and consequences. *Metabolism*, 144, 155533. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2023.155533>
- Zhao, J., Han, Z., Ding, L., Wang, P., He, X., & Lin, L. (2024). The molecular mechanism of aging and the role in neurodegenerative diseases. *Heliyon*, 10(2), e24751. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24751>