



# Perlindungan Endotel pada Bedah Katarak

Panduan Praktis dan Tips Klinis

# **Perlindungan Endotel pada Bedah Katarak**

## **Panduan Praktis dan Tips Klinis**

**Penulis:**

Dr. Budiman, dr., SpM(K), M.Kes.



# Perlindungan Endotel pada Bedah Katarak

## Panduan Praktis dan Tips Klinis

Copyright © PT Penamuda Media, 2026

**Penulis:**

Dr. Budiman, dr., SpM(K), M.Kes.

**ISBN:** 978-634-7431-89-9

**Penyunting dan Penata Letak:**

Tim PT Penamuda Media

**Desain Sampul:**

Tim PT Penamuda Media

**Penerbit:**

PT Penamuda Media

**Redaksi:**

Casa Sidoarum RT03 Ngentak, Sidoarum Godean Sleman Yogyakarta

Web: [www.penamudamedia.com](http://www.penamudamedia.com)

E-mail: [penamudamedia@gmail.com](mailto:penamudamedia@gmail.com)

Instagram: @penamudamedia

WhatsApp: +6285700592256

Cetakan Pertama, Januari 2026

viii + 201 halaman; 15 x 23 cm

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak maupun mengedarkan buku dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit maupun penulis

# Kata Pengantar

**P**erkembangan teknik dan teknologi dalam bedah katarak telah membawa kita pada era di mana ketepatan, keamanan, dan kualitas hasil visual menjadi standar yang tidak dapat ditawar. Namun, di tengah kemajuan tersebut, perlindungan endotel kornea tetap menjadi salah satu tantangan paling krusial. Setiap hilangnya sel endotel adalah kehilangan yang permanen, dan setiap keputusan klinis selama prosedur dapat menentukan kejernihan penglihatan seorang pasien di masa mendatang. Dari kesadaran inilah buku *Perlindungan Endotel pada Bedah Katarak: Panduan Praktis dan Tips Klinis* lahir.

Buku ini tidak hanya menyajikan konsep dan teknik, tetapi juga menyusun pengalaman klinis, refleksi lapangan, serta rekomendasi yang mudah dipraktikkan dalam berbagai kondisi operasi—mulai dari kasus rutin hingga situasi kompleks seperti kornea edema, pseudoexfoliation, atau ruang anterior yang dangkal. Pendekatan yang ditawarkan memadukan dasar ilmiah, pemahaman anatomi mikroskopis, hingga strategi pengambilan keputusan yang bertumpu pada *evidence-based practice* dan prinsip kehati-hatian surgikal.

Dengan gaya penyajian yang ringkas namun berisi, setiap bab dirancang untuk menjadi teman kerja di ruang operasi maupun ruang konsultasi. Pembaca akan



menemukan panduan langkah demi langkah, pertimbangan teknis kritis, pilihan viskoelastik yang tepat, hingga tips kecil namun berdampak besar dalam menjaga integritas endotel. Kami berharap buku ini dapat menjadi referensi yang relevan bagi dokter mata, residen, dan praktisi bedah anterior segment yang ingin meningkatkan kualitas dan keamanan prosedurnya.

Akhir kata, semoga buku ini turut berkontribusi dalam meningkatkan mutu pelayanan bedah katarak di berbagai setting pelayanan kesehatan, serta menjadi bagian dari komitmen kita bersama untuk menghadirkan hasil visual terbaik bagi setiap pasien.

Bandung, Januari 2026

Penulis



# Daftar Isi

Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi.....	vii
BAB 1. FUNGSI DAN PERAN KRUSIAL ENDOTEL KORNEA.....	1
A. Anatomi Mikroskopik dan Peran Fisiologis.....	2
B. Mekanisme Pompa dan Barrier Endotel.....	10
C. Dampak Kerusakan Endotel terhadap Transparansi Kornea .....	14
D. Korelasi Klinis dengan Keberhasilan Bedah Katarak .....	17
BAB 2. DINAMIKA SEL ENDOTEL DAN KERENTANANNYA.....	22
A. Karakteristik Regenerasi dan Adaptasi Sel Endotel .....	23
B. Respon terhadap Stres Mekanik, Termal, dan Oksidatif.....	28
C. Perubahan Morfologi Akibat Faktor Usia dan Penyakit Sistemik.....	31
D. Indikator Klinis Penurunan Fungsi Endotel .....	34
BAB 3. PENILAIAN DAN STRATIFIKASI RISIKO PRAOPERATIF ...	41
A. Pemeriksaan Specular Microscopy dan Pachymetry.....	42
B. Penilaian Ketebalan Kornea dan Densitas Sel Endotel .....	45
C. Identifikasi Risiko Tinggi: Fuchs, Diabetes, dan Pseudoexfoliation .....	49
D. Algoritma Penentuan Strategi Bedah Berdasarkan Risiko Endotel .....	53
BAB 4 STRATEGI PRAOPERATIF UNTUK MELINDUNGI ENDOTEL.....	58
A. Pemilihan Teknik dan Energi Fakoemulsifikasi yang Tepat .....	59
B. Persiapan Ruang Operasi dan Cairan Irigasi Optimal .....	62
C. Penggunaan Agen Farmakologis Pendukung.....	66
D. Checklist Perlindungan Endotel Sebelum Operasi.....	71
BAB 5 TEKNIK INTRAOPERATIF BERBASIS KESELAMATAN ENDOTEL.....	76
A. Soft-Shell Technique dan Variasinya.....	77
B. Modifikasi Fluidik untuk Mengurangi Turbulensi .....	80



C. Penempatan dan Manipulasi IOL yang Aman.....	85
D. Pengendalian Suhu dan Energi Ultrasonik.....	88
E. Tips Klinis dari Pengalaman Operator Senior.....	93
<b>BAB 6. VISKOELASTIK DAN MATERIAL PENUNJANG: FUNGSI, PEMILIHAN, DAN APLIKASI .....</b>	<b>102</b>
A. Jenis-Jenis Viskoelastik dan Karakteristiknya.....	103
B. Kombinasi Viskoelastik untuk Efek Protektif Maksimal...	108
C. Interaksi dengan Alat dan Cairan Bedah .....	112
D. Prinsip Aplikasi Efisien di Ruang Operasi.....	116
<b>BAB 7. PENATALAKSANAAN PASCAOPERASI UNTUK MEMPERTAHAKAN KESEHATAN ENDOTEL.....</b>	<b>123</b>
A. Pemantauan Edema dan Ketebalan Kornea .....	124
B. Penggunaan Agen Antioksidan dan Anti-inflamasi.....	128
C. Rehabilitasi Visual Pasien dengan Kerusakan Endotel Ringan .....	133
D. Strategi Pencegahan Kerusakan Sekunder .....	138
<b>BAB 8. TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM PROTEKSI ENDOTEL.....</b>	<b>145</b>
A. Sistem Fakoemulsifikasi Generasi Baru .....	145
B. Cairan Bedah dengan Formula Sitoprotektif.....	155
C. Teknologi Pendinginan dan Modifikasi Aliran Fluidik.....	159
D. Aplikasi AI dalam Prediksi Risiko Kerusakan Endotel.....	163
<b>BAB 9. STANDAR KESELAMATAN DAN ETIKA OPERATIF.....</b>	<b>170</b>
A. Prinsip Safety Surgery dalam Bedah Katarak .....	171
B. Komunikasi Tim Operasi dan Penanganan Risiko .....	175
C. Dokumentasi Klinis dan Pelaporan Komplikasi Endotel ..	179
D. Integrasi Etika dan Profesionalisme dalam Praktik Bedah .....	184
Referensi .....	196
Tentang Penulis .....	199





# BAB 1.

## FUNGSI DAN PERAN KRUSIAL ENDOTEL KORNEA

Bab ini disusun untuk membantu mahasiswa memahami secara mendalam peran fundamental endotel kornea dalam mempertahankan kejernihan optik mata dan stabilitas fisiologis kornea sebagai medium refraktif utama. Melalui pemahaman anatomi mikroskopik dan karakteristik sel endotel yang unik, mahasiswa diharapkan mampu menjelaskan bagaimana mekanisme pompa dan barrier bekerja secara sinergis dalam mengontrol hidrasi stroma serta menjaga lingkungan mikro yang optimal bagi fungsi visual. Selain itu, mahasiswa akan mempelajari berbagai bentuk kerusakan endotel, baik yang terjadi secara degeneratif maupun akibat trauma bedah, serta dampaknya terhadap transparansi kornea dan kualitas penglihatan. Pemahaman ini juga diarahkan untuk meningkatkan kemampuan mahasiswa dalam mengaitkan kondisi endotel dengan risiko dan keberhasilan prosedur bedah katarak, sehingga mereka mampu mengidentifikasi faktor

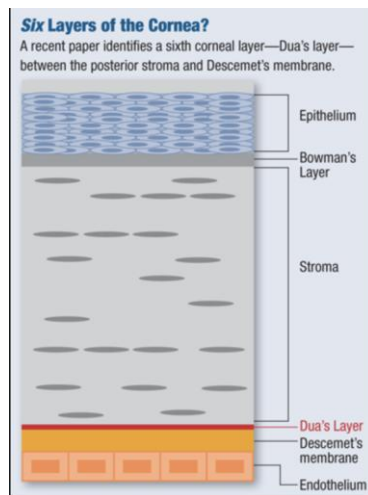




predisposisi, mengenali tanda klinis gangguan endotel, dan merumuskan strategi operatif yang lebih aman serta berbasis bukti.

### A. Anatomi Mikroskopik dan Peran Fisiologis

Anatomi mikroskopik endotel kornea menggambarkan struktur seluler yang sangat khas dan memiliki peran fundamental dalam menjaga transparansi kornea. Lapisan ini hanya terdiri atas satu baris sel yang tidak dapat beregenerasi secara mitotik, sehingga setiap kerusakan bersifat permanen dan berdampak langsung pada fungsi optik mata. Karena itu, pemahaman mendalam mengenai ciri-ciri mikroskopis endotel sangat penting untuk menilai risiko klinis, terutama pada tindakan pembedahan intraokular seperti fakoemulsifikasi.



*Gambar 1. Anatomi Mikroskopik Endotel Kornea*

## 1. Struktur Penampang Lapisan Endotel

Endotel kornea terletak tepat di atas membrana Descemet dan di bawah stroma posterior, membentuk batas anatomi antara jaringan kornea yang padat dan lingkungan cairan aqueous humor. Susunan ini menyediakan kondisi ideal bagi proses difusi dan transport ion yang berlangsung terus-menerus. Membrana Descemet sendiri berfungsi sebagai penopang struktural dan membran basal yang mendukung adhesi sel endotel, sehingga integritasnya penting bagi kestabilan anatomi lapisan ini.

Secara histologis, setiap sel endotel memiliki inti yang relatif besar dengan batas sitoplasma yang tipis. Muatan organel seperti mitokondria yang melimpah menunjukkan aktivitas metabolik tinggi yang diperlukan untuk menjalankan pompa ion. Retikulum endoplasma kasar berperan dalam produksi protein struktural dan enzim pompa yang diperlukan untuk menjaga keseimbangan cairan. Keberadaan tight junction pada sisi apikal membatasi aliran cairan secara berlebihan, sedangkan gap junction memfasilitasi koordinasi antarsel. Fungsinya sebagai penjaga deturgesensi stroma berlangsung tanpa henti, memastikan kornea tetap transparan dan bebas



edema untuk mempertahankan kualitas refraksi optimal.

Selain itu, endotel berperan sebagai "pompa dan penghalang" simultan. Penghalang yang dibentuknya bersifat leaky barrier, artinya memungkinkan masuknya sedikit cairan namun tetap terkontrol. Mekanisme pompa kemudian mengeluarkan cairan tersebut kembali ke aqueous humor. Sistem dinamis ini menjaga ketebalan kornea tetap stabil. Bila fungsi ini terhenti, misalnya akibat trauma atau paparan energi ultrasound yang berlebihan, stroma akan segera menyerap cairan dan membengkak, menyebabkan penurunan penglihatan yang signifikan.

## 2. Pola Seluler dan Variasi Morfologi

Susunan mosaik heksagonal yang terlihat pada permukaan endotel merupakan ciri khas penting dari jaringan ini. Bentuk heksagonal memungkinkan setiap sel bersentuhan dengan enam sel tetangga sekaligus, memungkinkan distribusi beban mekanis dan metabolik yang lebih merata. Susunan teratur ini juga meminimalkan ruang kosong sehingga mempertahankan fungsi sebagai barier yang efektif. Stabilitas pola mosaik menjadi indikator kesehatan yang dapat dinilai menggunakan specular microscopy, alat standar dalam evaluasi biomekanik kornea.



Namun, pola tersebut dapat mengalami perubahan ketika sel kehilangan kemampuan mempertahankan bentuk dan ukurannya. Polymegethism menandakan perubahan ukuran sel akibat kompensasi sel yang tersisa untuk menutupi area kosong setelah sel lain hilang. Sedangkan pleomorphism menggambarkan ketidakseragaman bentuk sel akibat stres atau kerusakan. Kedua kondisi ini sering dianggap sebagai tanda awal disfungsi endotel, bahkan sebelum terjadi penurunan kepadatan sel yang signifikan. Pemeriksaan klinis sering memperhatikan kombinasi perubahan bentuk, ukuran, dan jumlah sel untuk menilai tingkat stres yang dialami lapisan endotel.

Jika kepadatan sel endotel turun di bawah ambang fisiologis tertentu, lapisan ini tidak lagi mampu menjaga keseimbangan cairan pada stroma. Keadaan ini mengarah pada edema kornea, hilangnya kejernihan, dan penurunan fungsi visual. Kondisi seperti Fuchs endothelial dystrophy, trauma bedah, atau penggunaan instrumen yang menghasilkan panas berlebih dapat mempercepat penurunan tersebut. Oleh karena itu, upaya perlindungan endotel selama tindakan medis menjadi salah satu pilar utama dalam praktik oftalmologi modern.



## **Peran Fisiologis Endotel Kornea**

Endotel kornea tidak hanya berfungsi sebagai lapisan pelindung pasif, tetapi juga memainkan peran aktif dalam mempertahankan kejernihan dan fungsi optik kornea. Lapisan ini melakukan regulasi cairan, transport ion, serta pertukaran nutrisi dan metabolit antara stroma dan aqueous humor. Pemahaman terhadap peran fisiologis endotel sangat penting bagi mahasiswa dan praktisi karena kerusakan endotel yang tidak segera terdeteksi dapat menyebabkan edema kornea, gangguan refraksi, dan komplikasi pascaoperasi, terutama pada tindakan bedah katarak (Aldrich, 2019; Banitt, 2016).

Selain fungsi regulatif, endotel kornea juga berperan dalam mempertahankan stabilitas biomekanik dan integritas permukaan posterior kornea. Aktivitas metabolik yang tinggi pada sel endotel mendukung mekanisme pompa ion, serta memungkinkan adaptasi terhadap stres fisiologis seperti fluktuasi tekanan intraokular, perubahan osmolaritas, dan paparan energi bedah. Fungsi ini menjadi dasar pertimbangan klinis dalam pemilihan teknik dan bahan selama operasi, termasuk penggunaan viskoelastik dan pengaturan energi fakoemulsifikasi (Bachmann, 2018; Fang, 2018).



## 1. Regulasi Deturgesensi Stroma

Endotel kornea berperan sebagai pompa aktif yang mengontrol kadar cairan stroma, menjaga stroma tetap relatif kering (deturgesensi) untuk memastikan transparansi optik. Mekanisme ini dilakukan terutama melalui pompa ion  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase, yang memindahkan ion dan air dari stroma menuju bilik anterior. Gangguan fungsi ini, baik karena trauma, energi ultrasonik, atau degenerasi sel, dapat menyebabkan edema kornea dan penurunan ketajaman visual

Selain pemindahan cairan, aktivitas pompa ini bekerja bersama tight junction untuk mengontrol aliran molekul dari aqueous humor ke stroma. Interaksi pompa dan barrier selektif memungkinkan stroma mempertahankan keseimbangan cairan meski terjadi fluktuasi tekanan intraokular, sehingga fungsi refraktif tetap optimal (Chen, 2018)

## 2. Pembentukan Barrier Selektif

Endotel membentuk barrier selektif yang membatasi masuknya molekul berukuran besar atau jumlah berlebihan dari aqueous humor ke stroma. Barrier ini bersifat “leaky”, memungkinkan pertukaran nutrisi namun tetap



mengontrol aliran cairan secara ketat. Fungsi barrier ini menjadi sangat penting selama operasi, ketika paparan cairan irigasi, energi fako, atau turbulensi dapat meningkatkan risiko kerusakan seluler.

Barrier selektif ini bekerja secara sinergis dengan pompa ion untuk menjaga ketebalan kornea dan mencegah pembengkakan. Setiap ketidakseimbangan antara pompa dan barrier akan langsung memengaruhi kejernihan kornea, yang menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan teknik bedah, pemilihan viskoelastik, dan strategi perlindungan endotel

### 3. Pertukaran Nutrisi dan Metabolit

Endotel juga berperan sebagai mediator pertukaran nutrisi dan metabolit antara aqueous humor dan stroma. Sel endotel menyuplai oksigen, glukosa, dan ion penting ke stroma, sekaligus membuang produk metabolik seperti laktat. Proses ini menjaga keseimbangan pH, metabolisme stroma, dan integritas matriks kolagen sehingga kornea tetap stabil dan transparan

Gangguan pada pertukaran ini, misalnya pada pasien dengan diabetes atau pseudoexfoliation



syndrome, dapat menimbulkan stres seluler yang meningkatkan risiko edema pascaoperasi. Pemahaman peran ini membantu operator dalam memilih teknik bedah, viskoelastik, dan strategi monitoring pascaoperasi yang sesuai (Dewi, 2023).

#### 4. Adaptasi terhadap Stres Fisiologis

Endotel memiliki kemampuan adaptasi terhadap stres mekanik, tekanan, dan paparan energi selama prosedur intraokular. Aktivitas metabolik yang tinggi memungkinkan sel menyesuaikan pompa dan barrier untuk menghadapi fluktuasi tekanan intraokular, perubahan osmolaritas, atau turbulensi fluidik akibat fakoemulsifikasi

Kemampuan adaptif ini menjadi dasar penggunaan teknik intraoperatif yang aman, seperti soft-shell technique, pengaturan energi ultrasonik yang tepat, dan fluidik modifikasi. Strategi ini mengurangi risiko kerusakan endotel dan meminimalkan kehilangan sel, sehingga kualitas visual pascaoperasi dapat dipertahankan.





## 5. Koordinasi dan Komunikasi Antar Sel (Gap Junction)

Gap junction pada sel endotel memungkinkan pertukaran ion dan molekul kecil antar sel, sehingga distribusi metabolit dan beban fisiologis menjadi merata di seluruh lapisan. Fungsi ini penting untuk mempertahankan integritas jaringan meski terjadi kehilangan sel lokal atau stres mikro.

Koordinasi antar sel juga membantu endotel menyesuaikan respons terhadap perubahan kondisi lokal, misalnya edema awal atau stres oksidatif ringan. Dengan demikian, komunikasi seluler melalui gap junction merupakan mekanisme kunci dalam mempertahankan fungsi fisiologis jangka panjang dan mendukung strategi perlindungan endotel selama bedah katarak.

### **B. Mekanisme Pompa dan Barrier Endotel**

Endotel kornea berfungsi sebagai lapisan sel tunggal yang sangat vital dalam menjaga transparansi kornea melalui mekanisme ganda: sebagai pompa aktif dan barrier selektif. Fungsi ini memungkinkan stroma mempertahankan deturgesensi, sehingga kornea tetap jernih dan berfungsi optimal secara optik. Pemahaman

mendalam mengenai mekanisme ini menjadi penting bagi mahasiswa dan praktisi, terutama dalam konteks bedah katarak, di mana trauma mekanik, energi ultrasonik, atau turbulensi cairan dapat mengganggu integritas sel endotel dan memicu edema. Dengan menguasai konsep pompa dan barrier, operator dapat menentukan strategi perlindungan endotel yang tepat sebelum, selama, dan pascaoperasi (Banitt, 2016).

#### 1. Mekanisme Pompa Ion Aktif

Sel endotel kornea mengatur kadar cairan stroma melalui pompa ion aktif, terutama  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase, yang memindahkan ion natrium keluar dan kalium masuk sel. Aktivitas pompa ini menyebabkan pergerakan air secara osmotik dari stroma ke bilik anterior, menjaga ketebalan dan kejernihan kornea. Mekanisme ini berlangsung secara konstan dan vital, karena setiap penurunan aktivitas pompa akan langsung menyebabkan akumulasi cairan di stroma, yang memicu edema kornea.

Selain memindahkan ion dan air, pompa endotel juga berperan dalam pengeluaran metabolit dan produk limbah dari stroma. Dengan cara ini, endotel turut menjaga keseimbangan pH dan homeostasis metabolik, sehingga matriks kolagen tetap stabil dan transparan. Fungsi ini penting untuk mencegah



penurunan kualitas optik kornea akibat stres metabolik.

Pompa ion juga memiliki kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi fisiologis. Misalnya, pada fluktuasi tekanan intraokular atau paparan energi ultrasonik saat fakoemulsifikasi, laju pemompaan ion dapat menyesuaikan untuk menjaga deturgesensi stroma. Adaptasi ini membuat endotel mampu melindungi jaringan meski terjadi stres jangka pendek atau trauma ringan.

Kemampuan pompa yang optimal menjadi dasar bagi strategi intraoperatif untuk meminimalkan risiko edema. Pemilihan teknik fakoemulsifikasi yang hemat energi, penggunaan viskoelastik yang melindungi sel, dan pengaturan fluidik semuanya didasarkan pada prinsip menjaga fungsi pompa agar stroma tetap stabil. Dengan demikian, endotel bukan hanya pasif melindungi kornea, tetapi juga aktif mempertahankan keseimbangan fisiologis.

## 2. Barrier Selektif

Endotel membentuk barrier selektif melalui tight junction antar sel, yang mengatur aliran cairan dan molekul dari aqueous humor ke stroma. Barrier ini bersifat semi-permeabel: cukup lebar untuk memungkinkan masuknya nutrisi dan oksigen,

namun cukup ketat untuk mencegah penetrasi cairan berlebih yang dapat memicu edema. Fungsi barrier ini sangat penting selama prosedur bedah katarak, karena fluktuasi tekanan dan turbulensi fluidik dapat menekan sel dan mengganggu keseimbangan cairan.

Selain fungsi regulatif cairan, barrier selektif bekerja bersama pompa ion untuk mempertahankan deturgesensi stroma. Jika barrier terganggu, pompa tidak mampu menyeimbangkan aliran cairan secara efektif, sehingga edema dapat muncul meski pompa masih aktif. Barrier dan pompa bekerja sinergis sebagai mekanisme proteksi ganda untuk menjaga transparansi kornea.

Barrier endotel juga memungkinkan adaptasi terhadap kondisi patologis atau fisiologis. Misalnya, ketika terdapat tekanan intraokular sementara yang tinggi, barrier dapat menahan sebagian aliran cairan, memberikan waktu bagi pompa untuk menyeimbangkan cairan sebelum stroma mengalami pembengkakan. Mekanisme ini menunjukkan kemampuan endotel dalam mempertahankan homeostasis meski berada dalam kondisi stres atau trauma ringan.

Pentingnya barrier selektif juga menjadi dasar pemilihan strategi bedah yang aman. Pengaturan



# Perlindungan Endotel pada Bedah Katarak

## Panduan Praktis dan Tips Klinis

Buku ini disusun untuk membekali mahasiswa kedokteran, residen oftalmologi, dan dokter mata dengan wawasan menyeluruh tentang upaya mempertahankan integritas endotel kornea selama tindakan bedah katarak. Melalui pendekatan berbasis keterampilan mikro dan efisiensi energi, buku ini menguraikan langkah-langkah penting mulai dari perencanaan praoperatif, teknik pembedahan minim trauma, hingga perawatan pascaoperasi yang berorientasi pada keselamatan sel endotel. Setiap bab disertai tips klinis, teknik bedah terkini, serta panduan praktis yang mudah diterapkan di ruang operasi. Dengan gaya penulisan ringkas dan aplikatif, buku ajar ini tidak hanya menjadi referensi akademik, tetapi juga panduan lapangan bagi calon ahli bedah mata dalam menjaga kualitas penglihatan pasien melalui perlindungan endotel yang optimal.



**Penamuda.com**

PT Penamuda Media  
Casa Sidoarum, Ngapak Godean  
penamuda\_media