

Paparan Mikroplastik dan Kualitas Sperma Pria: *Scoping Review* Perspektif Kesehatan Lingkungan Indonesia

Dwi Regita Cahyani^{a*}, Triana Srisantyorini^a, Suherman Jaksa^a

^a Program Magister Kesehatan Masyarakat, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jakarta, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Received : 25-05-2026

Revised : 15-06-2026

Accepted : 21-06-2026

Keywords: *Environmental Health Risk, Indonesia, Male Fertility, Microplastics, Oxidative Stress, Sperm Quality*

Kata Kunci: *Fertilitas Pria, Indonesia, Kualitas Sperma, Mikroplastik, Risiko Kesehatan Lingkungan, Stres Oksidatif*

Corresponding Author:
dwiregitt@gmail.com*

DOI: <https://doi.org/10.62335>

ABSTRACT

Background: The escalating contamination of environmental microplastics (MP) has raised increasing concern about its role in declining male reproductive health. MPs have been physically detected in human testicular tissue and semen, underscoring the importance of a systematic evidence synthesis. Objective: This scoping review consolidates evidence published between 2015 and 2025 regarding the effects of MP exposure on male fertility parameters, characterizes the underlying biological mechanisms involved, and identifies research gaps pertinent to Indonesia. Methods: Adhering to PRISMA-ScR guidelines and the PCC framework, systematic searches were conducted across five databases (PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Google Scholar, and Portal Garuda). Of 150 retrieved records, 37 studies fulfilled the inclusion criteria (Cohen's $\kappa = 0.82$). Results: Polystyrene (PS) was the predominant polymer identified in testicular tissue (mean 11.60 ± 15.52 particles/g) and semen (0.23 ± 0.45 particles/mL). MP exposure was associated with reductions in sperm motility, vitality, and concentration alongside elevated DNA fragmentation, mediated through four pathways: oxidative stress, blood-testis barrier (BTB) disruption, endocrine interference, and spermatogenic apoptosis. Downregulation of sperm-oocyte fusion genes (DCST1, IZUMO1, SPACA6) constituted an additional reproductive risk dimension. Conclusion: Converging evidence indicates that MPs can impair male fertility through multiple toxicological mechanisms, though definitive causal evidence in humans remains lacking. As one of the world's top contributors of plastic waste to the ocean, Indonesia bears a disproportionately high exposure burden relative to its available reproductive health data. Prospective epidemiological research and the application of the precautionary principle in national plastic policy are urgently warranted.

ABSTRAK

Latar Belakang: Meningkatnya pencemaran mikroplastik (MP) di lingkungan hidup telah menimbulkan kekhawatiran yang semakin besar terkait dampaknya terhadap kesehatan reproduksi pria. Partikel MP telah terbukti secara fisik dapat ditemukan dalam jaringan testis dan semen manusia, sehingga mendorong kebutuhan atas sintesis bukti ilmiah yang sistematis. Tujuan: Scoping review ini merangkum bukti yang ada dalam rentang tahun 2015 hingga 2025 mengenai pengaruh paparan MP terhadap parameter fertilitas pria, menelaah mekanisme biologis yang mendasarinya, serta mengidentifikasi celah penelitian yang relevan bagi konteks Indonesia. Metode: Berpedoman pada panduan PRISMA-ScR dan kerangka PCC, penelusuran sistematis dilakukan pada lima basis data: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan Portal Garuda. Dari 150 artikel yang teridentifikasi, sebanyak 37 studi memenuhi kriteria inklusi yang ditetapkan (Cohen's $\kappa = 0,82$). Hasil: Polystyrene (PS) merupakan polimer yang paling banyak dijumpai, baik pada jaringan testis (rerata $11,60 \pm 15,52$ partikel/gram) maupun semen ($0,23 \pm 0,45$ partikel/mL). Paparan MP berkaitan dengan penurunan motilitas, vitalitas, dan konsentrasi sperma disertai peningkatan fragmentasi DNA, yang dimediasi melalui empat jalur utama: stres oksidatif, gangguan integritas blood-testis barrier (BTB), disfungsi endokrin, dan aktivasi apoptosis spermatogenik. Penurunan ekspresi gen fusi sperma-oosit (DCST1, IZUMO1, SPACA6) turut memberikan dimensi risiko tambahan di luar parameter sperma konvensional. Simpulan: Akumulasi bukti menunjukkan bahwa MP berpotensi mengganggu fertilitas pria melalui berbagai mekanisme toksikologis, meskipun hubungan kausal yang definitif pada manusia belum dapat dipastikan. Indonesia, sebagai salah satu penyumbang sampah plastik terbesar ke lautan, menghadapi beban paparan yang tidak sepadan dengan ketersediaan data kesehatan reproduksi lokal. Penelitian epidemiologis prospektif serta penerapan prinsip kehati-hatian dalam kebijakan plastik nasional sangat diperlukan.

PENDAHULUAN

Indonesia secara konsisten menempati posisi sebagai salah satu negara dengan kontribusi polusi plastik laut tertinggi; data awal memperkirakan posisinya sebagai penyumbang terbesar kedua dengan 0,48–1,29 juta metrik ton per tahun berdasarkan data 2010 (Jambeck et al., 2015), sementara data yang lebih baru mengindikasikan sekitar 620.000 ton plastik masih mencemari perairan setiap tahunnya meski berbagai kebijakan intervensi telah diterapkan (Apriadi et al., 2024). Beban polusi plastik ini memiliki

implikasi kesehatan reproduksi yang belum banyak dikaji secara lokal: sekitar 20–30% kasus infertilitas pasangan di Indonesia diperkirakan melibatkan faktor pria (Kemenkes RI, 2022), namun hingga saat ini belum ada kajian epidemiologis yang secara khusus menilai keterkaitan antara paparan MP dan parameter andrologi pada populasi tersebut. Hal ini menegaskan bahwa riset mengenai dampak pencemaran plastik terhadap kesehatan reproduksi masyarakat Indonesia masih sangat terbatas.

Pola konsumsi ikan dan hasil laut yang tinggi menempatkan masyarakat Indonesia pada jalur paparan MP melalui rantai pangan yang lebih besar dibandingkan banyak negara lain, sementara data pemantauan kesehatan reproduksi yang relevan masih sangat terbatas (Aulia et al., 2023). MP telah teridentifikasi di hampir seluruh media lingkungan, meliputi lautan, sungai, tanah, udara, dan bahan pangan (Li et al., 2024). Dari sudut pandang kesehatan, hal yang menjadi kekhawatiran utama adalah kemampuan partikel ini menembus berbagai pertahanan biologis tubuh. MP telah terdeteksi dalam darah (Leslie et al., 2022), plasenta (Ragusa et al., 2021), jaringan paru-paru (Amato-Lourenco et al., 2021), serta yang paling relevan bagi kajian ini, pada testis dan semen manusia (Hu et al., 2024; Li et al., 2024; Montano et al., 2023; Zhao et al., 2023).

Seiring meningkatnya paparan MP, penurunan kualitas sperma manusia secara global telah terdokumentasi secara sistematis. (Levine et al., 2017) mendokumentasikan penurunan konsentrasi sperma sebesar 52,4% dan total jumlah sperma sebesar 59,3% pada pria di negara-negara Barat selama 1973–2011, yang kemudian dikonfirmasi secara global pada analisis selanjutnya (Levine et al., 2023). Berbagai faktor diduga berkontribusi terhadap tren ini, termasuk paparan polutan lingkungan dan bahan kimia pengganggu endokrin (endocrine disrupting chemicals/EDC) (Diamanti-Kandarakis et al., 2009; Swan & Colino, 2021). MP berpotensi berfungsi sebagai EDC melalui dua jalur: secara langsung melalui komponen polimer penyusunnya (terutama PS, PE, dan PVC), dan secara tidak langsung sebagai pembawa kontaminan organik persisten serta logam berat yang teradsorpsi pada permukaan hidrofobiknya (Prata et al., 2020). Dualitas jalur toksik ini menjadikan MP sebagai agen berbahaya yang pengaruhnya terhadap sistem endokrin reproduksi perlu dikaji lebih mendalam (Campanale et al., 2020). Kajian yang secara spesifik memetakan dampak paparan MP sebagai risiko kesehatan lingkungan terhadap fertilitas pria dalam konteks Asia Tenggara dan Indonesia masih sangat jarang. *Scoping review* ini bertujuan memetakan bukti ilmiah yang ada (2015–2025), mengidentifikasi mekanisme biologis yang terlibat, serta mengenali kesenjangan penelitian dari perspektif kesehatan lingkungan dan kesehatan masyarakat Indonesia.

METODE

Desain Studi: Penelitian ini menggunakan rancangan *scoping review* yang mengacu pada panduan PRISMA-ScR (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and*

Meta-Analyses extension for Scoping Reviews) sebagaimana dikembangkan oleh (Tricco et al., 2018). Rancangan scoping review dipilih mengingat topik penelitian masih berada pada tahap pemetaan, di mana heterogenitas metodologi dan luasnya cakupan bukti lebih tepat ditangani melalui pendekatan ini dibandingkan dengan systematic review bermeta-analisis. Kerangka PCC (*Population, Concept, Context*) digunakan sebagai panduan: (1) *Population*: laki-laki dewasa dan model hewan mamalia sebagai proksi mekanistik; (2) *Concept*: paparan berbagai jenis polimer MP (PS, PE, PVC, PP, PET) sebagai *hazard* lingkungan dan dampaknya terhadap parameter fertilitas; (3) *Context*: studi laboratorium (*in vitro* dan *in vivo*) maupun observasional pada manusia, dengan penekanan pada implikasi bagi populasi Asia Tenggara dan Indonesia. Penelusuran sistematis dilaksanakan pada lima basis data: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan Portal Garuda. Strategi pencarian utama menggunakan terminologi MeSH dengan operator Boolean: ("microplastics" OR "nanoplastics" OR "plastic particles") AND ("sperm quality" OR "sperm motility" OR "male fertility" OR "spermatogenesis" OR "testicular toxicity" OR "reproductive toxicity"). Untuk Portal Garuda digunakan padanan Bahasa Indonesia: ("mikroplastik" OR "nanoplastik") AND ("kualitas sperma" OR "fertilitas pria" OR "kesehatan reproduksi"). Seluruh pencarian dilaksanakan pada rentang waktu Januari hingga Maret 2025. Kriteria inklusi: (1) artikel berbahasa Indonesia atau Inggris; (2) desain studi mencakup penelitian eksperimental (*in vivo/in vitro*), studi observasional, review sistematis, *scoping review*, maupun review naratif berbasis data empiris; (3) topik utama berfokus pada dampak paparan MP terhadap parameter sperma atau fungsi reproduksi pria; (4) diterbitkan tahun 2015–2025. Proses seleksi studi dilaksanakan dalam empat tahap. Identifikasi: penelusuran pada lima basis data menghasilkan 150 artikel, dengan 20 duplikat yang kemudian dieliminasi. Skrining: 130 artikel disaring berdasarkan judul dan abstrak; 80 di antaranya dieksklusi. Penilaian kelayakan: 50 artikel teks lengkap dievaluasi; 13 dieksklusi. Inklusi final: 37 studi ditetapkan sebagai sampel kajian. Dua peneliti melakukan penyaringan secara independen; tingkat kesepakatan antarpemilai dihitung menggunakan Cohen's Kappa ($\kappa = 0,82$), yang mengindikasikan kesepakatan sangat baik (Peters et al., 2020). *Disagreements between reviewers were resolved through discussion and consensus*. Meskipun penilaian kualitas metodologis tidak merupakan persyaratan wajib dalam scoping review (Peters et al., 2020), kajian ini secara deskriptif mengevaluasi 14 studi representatif menggunakan tujuh kriteria yang diadaptasi dari panduan Joanna Briggs Institute (JBI). Tujuan penilaian ini adalah memetakan kekuatan dan kelemahan metodologis studi yang ada, khususnya untuk menelaah sejauh mana studi pada manusia telah mengendalikan faktor perancu seperti gaya hidup, paparan bahan kimia lain, dan kondisi kesehatan umum, sekaligus memberikan konteks interpretatif yang lebih kaya terhadap temuan yang dirangkum. Penilaian kualitas ini bukan dimaksudkan untuk menyingkirkan studi berkualitas rendah dari sintesis, melainkan untuk secara terbuka

mengomunikasikan tingkat kepercayaan terhadap kumpulan bukti yang ada.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Sebanyak 37 studi memenuhi kriteria inklusi, terdiri dari 34 publikasi internasional dan 3 publikasi dari kawasan Asia Tenggara. Tren temporal menunjukkan kenaikan jumlah publikasi yang signifikan: 4 studi (2015–2017), 8 studi (2018–2020), 14 studi (2021–2022), dan 11 studi (2023–2025), yang mencerminkan meningkatnya perhatian ilmiah terhadap topik ini. Berdasarkan desain studi: *in vivo* (n=14; 37,8%), cross-sectional pada manusia (n=8; 21,6%), *in vitro* (n=6; 16,2%), review sistematis (n=5; 13,5%), dan review naratif (n=4; 10,8%). Negara dengan kontribusi studi terbanyak adalah Tiongkok (n=18), Italia (n=5), Amerika Serikat (n=4), diikuti Indonesia dan Malaysia (n=3). Kontribusi dari Indonesia hanya sebanyak 3 studi, seluruhnya berfokus pada kontaminasi lingkungan pesisir dan bukan pada dampak terhadap kesehatan reproduksi, yang mencerminkan kesenjangan penelitian di negara dengan beban polusi plastik yang substansial. Karakteristik studi representatif yang diinklusi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik 14 Studi Representatif yang Diinklusi dalam *Scoping Review* (dipilih dari total 37 studi)

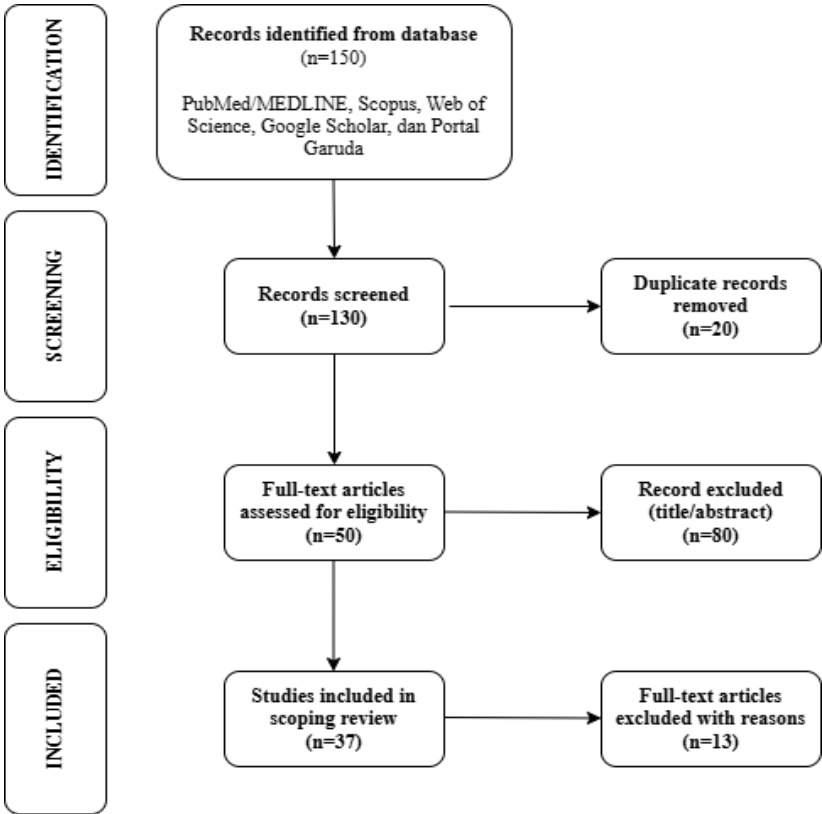
No	Penulis (Tahun)	Desain Studi	Polimer MP	Konsentrasi	Mekanisme Utama	Temuan Utama
1	(Zhao et al., 2023)	Cross- sectional (manusia)	PS (67,7%)	11,60±15,52 partikel/g testis; 0,23±0,45 partikel/mL semen	Stres oksidatif; disfungsi endokrin	MP terdeteksi di testis dan semen; PS polimer dominan; korelasi negatif dengan jumlah sperma
2	(Hu et al., 2024)	Cross- sectional (manusia & anjing)	Campuran	Tidak dilaporkan	Disfungsi endokrin; stres oksidatif	MP terdeteksi di testis; korelasi negatif dengan jumlah sperma dan berat testis
3	(Li et al., 2024)	Cross- sectional (manusia)	Campuran	Tidak dilaporkan	Stres oksidatif; gangguan BTB	MP di semen; berkorelasi dengan penurunan motilitas progresif sperma

No	Penulis (Tahun)	Desain Studi	Polimer MP	Konsentrasi	Mekanisme Utama	Temuan Utama
4	(Montano et al., 2023)	Cross-sectional (manusia)	Campuran	Tidak dilaporkan	Stres oksidatif	MP terdeteksi di semen dengan Raman microspectroscopy; berbagai polimer teridentifikasi
5	(Xie et al., 2020)	In vivo (tikus)	PS-MPs	0,5–20 mg/kg/hari, 28 hari	Stres oksidatif; aktivasi p38 MAPK	Penurunan motilitas sperma dose-dependent; peningkatan ROS; aktivasi jalur p38 MAPK
6	(Jin et al., 2021)	In vivo (mencit)	PS-MPs 2 μ m	1–10 mg/kg/hari, 6 minggu	Disfungsi endokrin; aktivasi ER stress; apoptosis spermatogonik	Penurunan sperma viabel; penurunan FSH, LH, testosteron; aktivasi ER stress
7	(Wei et al., 2022)	In vivo (mencit)	PS-MPs	0,1–1 mg/kg/hari	Stres oksidatif; disfungsi endokrin; apoptosis spermatogonik	Gangguan reproduksi jantan dan betina; penurunan fertilitas; kerusakan gonad
8	(Mottola et al., 2025)	In vitro (sperma manusia)	PS-MPs	1–100 μ g/mL	Stres oksidatif; downregulasi gen fusi sperma-oosit (DCST1, IZUMO1,	Penurunan vitalitas dan motilitas; peningkatan SDF; downregulasi gen DCST1, IZUMO1, SPACA6

No	Penulis (Tahun)	Desain Studi	Polimer MP	Konsentrasi	Mekanisme Utama	Temuan Utama
SPACA6)						
9	(Zhang et al., 2022)	Review sistematis	Campuran	Bervariasi	Stres oksidatif; disfungsi endokrin; apoptosis; gangguan BTB	MP sebagai penyebab signifikan infertilitas pria; rangkum mekanisme toksikologis
10	(Hong et al., 2023)	Review sistematis	Campuran	Bervariasi	Empat jalur: stres oksidatif, gangguan BTB, disfungsi endokrin, apoptosis spermatogenik	Efek negatif MP/NP terhadap sistem reproduksi; empat jalur mekanistik teridentifikasi
11	(Tahmasbpour Marzouni et al., 2023)	Review sistematis	Campuran	Bervariasi	Stres oksidatif; disfungsi endokrin	MP dan NP di semen manusia; toksisitas reproduksi pria; rangkum bukti global
12	(D'Angelo & Meccariello, 2021)	Review naratif	Campuran	Bervariasi	Stres oksidatif; disfungsi endokrin	MP sebagai ancaman fertilitas pria; mekanisme endokrin dan oksidatif dibahas
13	(He & Yin, 2024)	Review naratif	Campuran	Bervariasi	Stres oksidatif; apoptosis; efek	Toksisitas reproduksi dan transgenerasi MP/NP pada

No	Penulis (Tahun)	Desain Studi	Polimer MP	Konsentrasi	Mekanisme Utama	Temuan Utama
					epigenetik transgenerasi	mamalia jantan dan betina
14	(Jeon et al., 2024)	In vivo (mencit)	PS-MPs	0,1–1 mg/kg/hari, 8 minggu	Gangguan BTB; disfungsi sel Sertoli	Gangguan fungsi sel Sertoli dan kualitas sperma; penurunan integritas BTB

Diagram alur seleksi studi berdasarkan PRISMA-ScR (Gambar 1) memvisualisasikan proses dari 150 artikel yang teridentifikasi hingga 37 studi yang akhirnya diinklusi. Penilaian kualitas metodologis deskriptif terhadap 14 studi representatif memperlihatkan adanya variasi: studi in vivo serta review sistematis umumnya dinilai berkualitas tinggi, sedangkan studi cross-sectional dan review naratif dinilai berkualitas sedang, terutama akibat keterbatasan pengendalian perancu.



Gambar 1. Diagram Alur Seleksi Studi Berdasarkan PRISMA-ScR

Evaluasi kualitas metodologis secara deskriptif dilakukan terhadap 14 studi representatif menggunakan tujuh kriteria yang diadaptasi dari panduan JBI. Studi in vivo (Jin et al., 2021; Wei et al., 2022; Xie et al., 2020) dan review sistematis (Hong et al., 2023; Zhang et al., 2022) secara konsisten memperoleh penilaian kualitas tinggi. Studi cross-sectional pada manusia (Li et al., 2024; Zhao et al., 2023) dinilai berkualitas sedang, terutama disebabkan oleh keterbatasan dalam pengendalian faktor perancu. Tidak ditemukan satu pun studi epidemiologis dari Indonesia yang memenuhi kriteria inklusi.

Tabel 2. Penilaian Kualitas Metodologis Studi Representatif (n=37)

Jenis Studi	Jumlah (n)	Kualitas	Keterangan Utama
In vivo (hewan)	14 (37,8%)	Tinggi	Kontrol eksperimental yang baik; menggunakan dosis supra-fisiologis
Cross-sectional (manusia)	8 (21,6%)	Sedang	Keterbatasan kontrol confounding; tidak dapat membuktikan kausalitas
In vitro	6 (16,2%)	Tinggi	Paparan terkontrol dengan baik; relevansi fisiologis terbatas
Review sistematis	5 (13,5%)	Tinggi	Sintesis komprehensif; heterogenitas metodologi antarstudi tinggi
Review naratif	4 (10,8%)	Sedang	Berguna untuk konteks; rentan terhadap bias seleksi penulis

Pembahasan

Terdeteksinya MP di organ reproduksi pria mengindikasikan bahwa paparan lingkungan mampu menembus berbagai mekanisme pertahanan biologis tubuh. (Zhao et al., 2023) mengkaji 6 spesimen testis dan 30 sampel semen manusia menggunakan metode Py-GC/MS, dan mendapatkan konsentrasi rata-rata sebesar $0,23 \pm 0,45$ partikel/mL pada semen serta $11,60 \pm 15,52$ partikel/gram pada testis, dengan polystyrene menjadi polimer yang paling banyak ditemukan (67,7%). (Xie et al., 2020) memaparkan tikus jantan pada PS-MPs dengan dosis 0,5–20 mg/kg/hari selama 28 hari dan mencatat penurunan motilitas sperma yang bergantung pada dosis, disertai peningkatan kadar reactive oxygen species (ROS) dan aktivasi jalur p38 MAPK. (Mottola et al., 2025) melaporkan penurunan vitalitas dan motilitas sperma manusia pascapaparan in vitro, yang disertai peningkatan fragmentasi DNA sperma (SDF) dan penurunan ekspresi gen fusi sperma-oosit, yakni DCST1, IZUMO1, dan SPACA6. Jin et al. (Jin et al., 2021)

melaporkan berkurangnya jumlah sperma epididimis yang viabel pada mencit yang dipaparkan PS-MPs berukuran 2 μm selama enam minggu, disertai penurunan kadar FSH, LH, dan testosteron melalui mekanisme aktivasi ER stress. Empat jalur toksikologis utama berhasil diidentifikasi: (1) Stres oksidatif akumulasi MP pada jaringan testis memicu produksi ROS yang melebihi kapasitas antioksidan endogen; (2) Gangguan Blood-Testis Barrier (BTB) paparan PS-MPs menekan ekspresi protein tight junction yang menyusun BTB; (3) Disfungsi endokrin MP beserta aditif kimianya dapat menghambat sintesis testosteron oleh sel Leydig; (4) Apoptosis spermatogenik paparan MP mengaktifkan jalur apoptosis mitokondrial melalui penurunan rasio Bcl-2/Bax. Indonesia menghadapi profil risiko yang signifikan: sebagai salah satu dari lima negara penyumbang sampah plastik terbesar ke lautan, hingga saat ini belum ditemukan studi epidemiologis yang secara spesifik mengkaji dampak paparan MP terhadap fertilitas pria pada populasi Indonesia, meskipun 20–30% kasus infertilitas pasangan diperkirakan melibatkan faktor pria (Kemenkes RI, 2022).

Bukti yang terangkum dalam kajian ini dapat dikategorikan ke dalam tiga lapisan. Pertama, bukti deteksi: keberadaan MP telah dikonfirmasi secara fisik pada testis (Hu et al., 2024; Zhao et al., 2023) dan semen manusia (Li et al., 2024; Montano et al., 2023). Kedua, bukti asosiasi statistik: Li et al. (Li et al., 2024) mendokumentasikan hubungan antara berbagai jenis polimer MP dengan motilitas progresif sperma. Ketiga, bukti mekanistik: stres oksidatif merupakan mekanisme yang paling konsisten dilaporkan (Chen et al., 2024; Xie et al., 2020), disusul oleh gangguan BTB, disfungsi endokrin, dan apoptosis spermatogenik. Perlu dicatat bahwa sebagian besar studi *in vivo* menggunakan dosis (0,5–20 mg/kg/hari) yang jauh melampaui estimasi paparan harian pada manusia, sehingga ekstrapolasi langsung ke kondisi manusia memerlukan kecermatan tersendiri.

Kajian ini menyajikan sintesis terkini mengenai toksisitas reproduksi mikroplastik sekaligus menyoroti keterbatasan data epidemiologi dari Indonesia, negara yang justru menghadapi tingkat pencemaran plastik yang sangat tinggi.

SIMPULAN, KETERBATASAN DAN SARAN

Kajian ini merangkum bukti ilmiah yang menunjukkan bahwa paparan mikroplastik sebagai bahaya kesehatan lingkungan berpotensi mengganggu fertilitas pria. MP, khususnya polystyrene, telah teridentifikasi secara fisik pada testis dan semen manusia, dengan konsentrasinya berkorelasi negatif dengan sejumlah parameter sperma. Studi eksperimental mengungkap empat jalur biologis yang terlibat: stres oksidatif, gangguan Blood-Testis Barrier, disfungsi endokrin, dan aktivasi apoptosis spermatogenik. Meskipun bukti asosiasi dan mekanistik terus berkembang, hubungan kausal yang definitif pada manusia belum dapat ditetapkan dan masih memerlukan konfirmasi dari studi prospektif. Bagi Indonesia, ketiadaan data epidemiologi lokal mengenai dampak

MP terhadap kesehatan reproduksi pria merupakan celah yang mendesak untuk ditangani, terutama mengingat tingginya paparan melalui rantai pangan laut dan besarnya kontribusi nasional terhadap polusi plastik laut.

Keterbatasan Studi

Sejumlah keterbatasan perlu dipertimbangkan dalam menafsirkan temuan kajian ini. Pertama, sebagian besar data mekanistik bersumber dari studi hewan *in vivo* ($n=14$; 37,8%) dengan dosis paparan yang jauh melampaui estimasi paparan harian pada manusia (misalnya: 0,5–20 mg/kg/hari pada (Xie et al., 2020)), sehingga generalisasi langsung ke kondisi manusia perlu dilakukan dengan hati-hati. Kedua, semua studi observasional pada manusia ($n=8$; 21,6%) menggunakan desain *cross-sectional* yang pada dasarnya tidak mampu menetapkan kausalitas; hanya korelasi statistik yang dapat ditunjukkan. Ketiga, tingginya heterogenitas metodologis antarstudi (mencakup variasi jenis polimer, ukuran partikel, metode deteksi, dan parameter sperma yang diukur) membatasi kemungkinan dilakukannya sintesis kuantitatif. Keempat, tidak ditemukannya studi epidemiologis dari Indonesia yang memenuhi kriteria inklusi merupakan keterbatasan mendasar yang sekaligus merefleksikan kesenjangan penelitian lokal dan memperkuat urgensi rekomendasi kajian ini. Selain itu, perbedaan metode deteksi MP antarstudi dapat memengaruhi sensitivitas identifikasi partikel dan membatasi komparabilitas hasil.

Saran

Berdasarkan temuan kajian ini, rekomendasi disampaikan pada tiga tataran: penelitian, kebijakan, dan praktik kesehatan masyarakat. Pada tataran penelitian, dibutuhkan studi kohort prospektif pada manusia dengan pengukuran biomonitoring MP yang terstandarisasi, menggunakan metode Py-GC/MS atau Raman microspectroscopy yang telah tervalidasi, guna menjawab pertanyaan kausalitas yang belum terjawab. Untuk Indonesia secara khusus, kajian yang mengintegrasikan data paparan lingkungan (konsentrasi MP di perairan pesisir, pola konsumsi ikan dan produk laut) dengan parameter andrologi perlu mendapat prioritas, terutama pada komunitas nelayan dan wilayah pesisir. Pada tataran kebijakan kesehatan masyarakat, kajian ini merekomendasikan: (1) penerapan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) dalam regulasi bahan kimia plastik di Indonesia, khususnya pembatasan polystyrene pada kemasan pangan di bawah kewenangan BPOM dan KLHK; (2) pengembangan sistem biomonitoring reproduksi berbasis populasi sebagai bagian dari Program Kesehatan Lingkungan Nasional; dan (3) integrasi skrining parameter andrologi dasar ke dalam layanan kesehatan reproduksi Puskesmas, terutama di wilayah pesisir dan kawasan industri plastik, sebagai langkah *surveilans* dini. Pada tataran edukasi kesehatan masyarakat, tenaga kesehatan dan kader perlu dibekali pemahaman terkait risiko paparan MP terhadap kesehatan reproduksi pria, serta edukasi publik mengenai pengurangan

penggunaan plastik sekali pakai perlu diintegrasikan ke dalam program promosi kesehatan reproduksi yang telah berjalan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amato-Lourenco, L., Carvalho-Oliveira, R., Junior, G., dos Santos Galvao, L., Ando, R., & Mauad, T. (2021). Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- Apriadi, B. F., Setiawan, R. P., & Firmansyah, I. (2024). Policy scenario of plastic waste mitigation in Indonesia using system dynamics. *Waste Management and Research*, 42(11), 1008–1018. <https://doi.org/10.1177/0734242X241231396>
- Aulia, A., Azizah, R., Sulistyorini, L., & Rizaldi, M. (2023). Dampak Mikroplastik terhadap Lingkungan Pesisir, Biota Laut dan Potensi Risiko Kesehatan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(3), 328–341. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.3.328-341>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Chen, Q., Gao, X., Zhang, H., Li, R., Liu, S., & Song, X. (2024). Multi-endpoint evaluation of the reproductive toxicity of polystyrene nanoplastics in male mice. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133440. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133440>
- D'Angelo, S., & Meccariello, R. (2021). Microplastics: a threat for male fertility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2392. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052392>
- Diamanti-Kandarakis, E., Bourguignon, J., Giudice, L., Hauser, R., Prins, G., & Soto, A. (2009). Endocrine-disrupting chemicals: an Endocrine Society scientific statement. *Endocrine Reviews*, 30(4), 293–342. <https://doi.org/10.1210/er.2009-0002>
- He, Y., & Yin, R. (2024). The reproductive and transgenerational toxicity of microplastics and nanoplastics: a threat to mammalian fertility in both sexes. *Journal of Applied Toxicology*, 44(1), 66–85. <https://doi.org/10.1002/jat.4510>
- Hong, Y., Wu, S., & Wei, G. (2023). Adverse effects of microplastics and nanoplastics on the reproductive system: a comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 903, 166258. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166258>
- Hu, C., Garcia, M., Nihart, A., Liu, R., Yin, L., & Adolphi, N. (2024). Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and

- weights of testis and epididymis. *Toxicological Sciences*, 200(2), 235–244. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae060>
- Jambeck, J., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T., Perryman, M., & Andrady, A. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jeon, B. J., Ko, Y. J., Cha, J. J., Kim, C., Seo, M. Y., Lee, S. H., Park, J. Y., Bae, J. H., & Tae, B. S. (2024). Examining the relationship between polystyrene microplastics and male fertility: insights from an in vivo study and in vitro Sertoli cell culture. *Journal of Korean Medical Science*, 39(38), e259. <https://doi.org/10.3346/jkms.2024.39.e259>
- Jin, H., Ma, T., Sha, X., Liu, Z., Zhou, Y., & Meng, X. (2021). Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123430. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123430>
- Kemkes RI. (2022). *Profil Kesehatan Indonesia 2021*. Kementerian Kesehatan RI. <https://www.kemkes.go.id/>
- Leslie, H., van Velzen, M., Brandsma, S., Vethaak, A., Garcia-Vallejo, J., & Lamoree, M. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Levine, H., Jorgensen, N., Martino-Andrade, A., Mendiola, J., Weksler-Derri, D., Jolles, M., Pinotti, R., & Swan, S. H. (2023). Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update*, 29(2), 157–176. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Levine, H., Jorgensen, N., Martino-Andrade, A., Mendiola, J., Weksler-Derri, D., & Mindlis, I. (2017). Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis. *Human Reproduction Update*, 23(6), 646–659. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmx022>
- Li, N., Yang, H., Dong, Y., Wei, B., Liang, L., & Yun, X. (2024). Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: a Raman spectroscopic study. *Science of the Total Environment*, 937, 173522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Montano, L., Giorgini, E., Notarstefano, V., Notari, T., Ricciardi, M., & Piscopo, M. (2023). Raman microspectroscopy evidence of microplastics in human semen. *Science of the Total Environment*, 901, 165922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165922>

- Mottola, F., Carannante, M., Palmieri, I., Ibello, L., Montano, L., Pezzullo, M., Mosca, N., Potenza, N., & Rocco, L. (2025). Impact of polystyrene microplastics on human sperm functionality: an in vitro study. *Toxics*, 13(7), 605. <https://doi.org/10.3390/toxics13070605>
- Peters, M., Godfrey, C., McInerney, P., Munn, Z., Tricco, A., & Khalil, H. (2020). Chapter 11: Scoping reviews. In E. Aromataris & Z. Munn (Ed.), *JBIManual for Evidence Synthesis*. JBI.
- Prata, J., da Costa, J., Lopes, I., Duarte, A., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: an overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacrose, C., Catalano, P., Notarstefano, V., & Carnevali, O. (2021). Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Swan, S., & Colino, S. (2021). *Count Down*. Scribner.
- Tahmasbpour Marzouni, E., Ilkhani, H., Beigi Harchegani, A., Shahriary, A., Ghaniei, B., & Salehi, Z. (2023). Microplastics and nanoplastics in human semen and male reproductive toxicity: a systematic review. *Toxicology*, 492, 153534. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2023.153534>
- Tricco, A., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K., Colquhoun, H., & Levac, D. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Wei, Z., Wang, Y., Wang, S., Xie, J., Han, Q., & Chen, M. (2022). Comparing the effects of polystyrene microplastics exposure on reproduction and fertility in male and female mice. *Toxicology*, 465, 153059. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.153059>
- Xie, X., Deng, T., Duan, J., Xie, J., Yuan, J., & Chen, M. (2020). Exposure to polystyrene microplastics causes reproductive toxicity through oxidative stress and activation of the p38 MAPK signaling pathway. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110133>
- Zhang, C., Chen, J., Ma, S., Sun, Z., & Wang, Z. (2022). Microplastics may be a significant cause of male infertility. *American Journal of Men's Health*, 16(3), 15579883221096548. <https://doi.org/10.1177/15579883221096549>
- Zhao, Q., Zhu, L., Weng, J., Jin, Z., Cao, Y., & Jiang, H. (2023). Detection and characterization of microplastics in the human testis and semen. *Science of the Total Environment*, 877, 162713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162713>