

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 *Wearable Sensor*

Sensor merupakan perangkat yang dirancang untuk mendeteksi perubahan lingkungan baik secara fisik, kimia, maupun biologis di lingkungan sekitarnya. Hasil deteksi tersebut diubah menjadi sinyal listrik atau data yang dapat dianalisis lebih lanjut (Ensafi, 2019). Cara kerja sensor sendiri yaitu dengan melibatkan sensor yang peka terhadap beberapa parameter contohnya suhu, tekanan, atau konsentrasi zat tertentu, yang kemudian dikonversi menjadi keluaran terukur (Sharma et al., 2021).

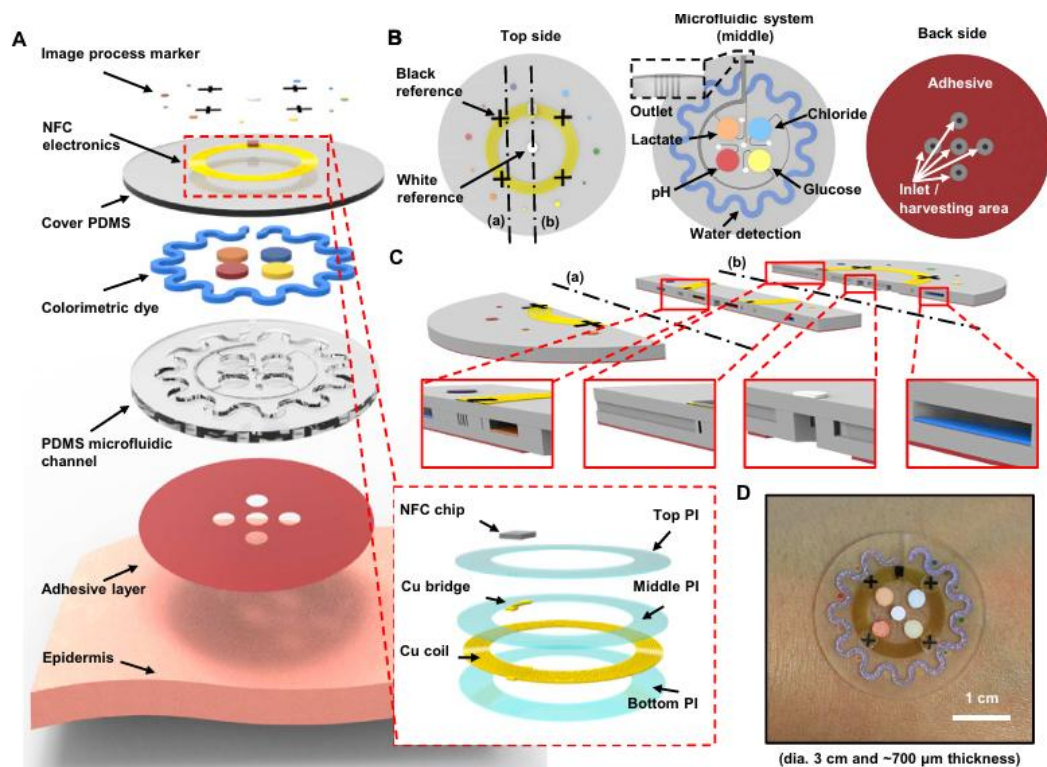
Seiring berkembangnya teknologi miniaturisasi dan komunikasi nirkabel, sensor mengalami kemajuan dalam bentuk yang lebih fleksibel dan mudah dikenakan. Perkembangan ini melahirkan jenis sensor baru yang dikenal sebagai *wearable sensor*, yaitu sensor yang dapat dikenakan langsung di tubuh manusia untuk memantau kondisi fisiologis secara langsung (Pantelopoulos & Bourbakis, 2010). Perangkat ini biasanya dipasang pada kulit atau tubuh dalam bentuk gelang, *patch*, atau bahan tekstil yang terintegrasi dengan sistem elektronik portable (Koh et al., 2016).

Wearable sensor dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori utama berdasarkan pemasangan dan media interaksinya. Beberapa kategori yaitu *skin-based sensor* yang ditempel langsung pada permukaan kulit, *implantable sensor* yang ditanam di dalam tubuh secara permanen atau sementara, dan *fluid-based sensor* yang memanfaatkan cairan tubuh. Di antara ketiga kategori *wearable sensor*, *fluid-based sensor* menjadi pilihan menarik karena memanfaatkan cairan tubuh seperti keringat yang mudah diakses non-invasif, memungkinkan pemantauan indikator fisiologis tubuh secara terus-menerus, salah satunya adalah *sweat-based wearable sensor*, yang mendeteksi kandungan keringat sebagai indikator kondisi fisiologis tubuh. Keringat mengandung berbagai indikator biologis seperti

ion natrium (Na^+), klorida (Cl^-) di mana kandungan ini dapat memberikan informasi penting terkait hidrasi. Karena keringat dapat diakses secara non-invasif dan terus menerus, sensor berbasis keringat berpotensi untuk pengembangan perangkat pemantauan kesehatan yang praktis.

Gambar 2.1 menunjukkan desain perangkat *wearable sensor* dengan sistem NFC terintegrasi. Bagian A menggambarkan lapisan-lapisan perangkat, termasuk lapisan PDMS yang membungkus saluran mikrofluidik, sistem elektronik NFC, dan lapisan perekat yang menempel pada epidermis untuk mengakses keringat. Saluran mikrofluidik tersebut mengandung reagen uji kolorimetri yang digunakan untuk mendeteksi berbagai biomarker dalam keringat seperti laktat, klorida, glukosa, dan pH. Bagian B menggambarkan bagian atas, tengah, dan belakang perangkat, di mana terdapat penanda referensi warna hitam dan putih serta saluran mikrofluidik untuk deteksi biomarker. Bagian belakang perangkat dilengkapi dengan lapisan perekat untuk menempelkan perangkat pada kulit dan area pengumpulan keringat. Bagian C menunjukkan diagram potongan melintang perangkat yang memperlihatkan detail saluran mikrofluidik dan chip NFC, memungkinkan integrasi sistem mikrofluidik dan elektronik untuk pemantauan hidrasi secara real-time. Bagian D menunjukkan gambar optik perangkat yang dipasang di kulit, dengan ukuran diameter 3 cm dan ketebalan sekitar 700 μm .

Sensor *wearable* ini dipasang pada kulit, lalu keringat masuk ke dalam saluran mikrofluidik perangkat. Saluran ini mengandung reagen yang bereaksi dengan biomarker dalam keringat, seperti laktat dan klorida, mengubah warna yang terdeteksi oleh sistem optik. Data hasil deteksi kemudian dikirim melalui sistem NFC (*Near Field Communication*) ke perangkat lain, seperti *smartphone*, untuk analisis lebih lanjut. Dengan cara ini, sensor dapat memantau kondisi hidrasi tubuh secara langsung dan non-invasif.



Gambar 2.1 Contoh produk dan skema perangkat *Wearable Sensor* dengan sistem NFC terintegrasi

Sumber : Koh et al., 2016

Tabel 2.1 Perbandingan Penggunaan *Wearable Sensor* dengan Metode Konvensional

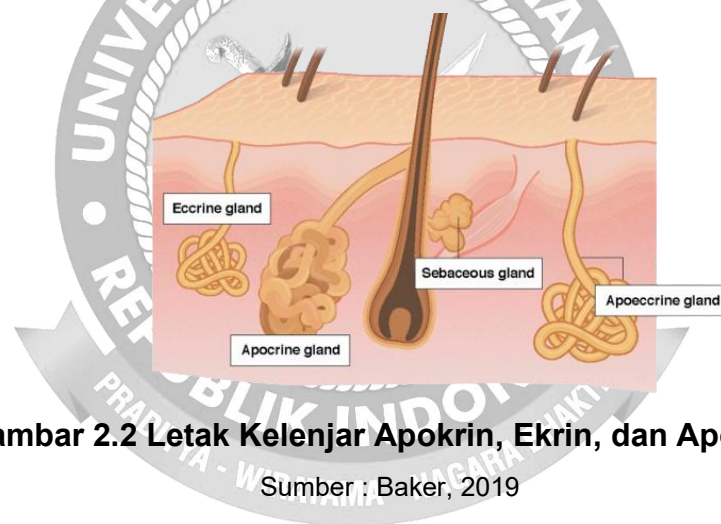
No	<i>Wearable Sensor</i>	Teknologi Konvensional
1	Non-Invasif	Invasif
2	Aksesibilitas Mudah	Aksesibilitas Sulit
3	Mudah Digunakan	Pengoperasian Manual

Sumber : Diolah oleh Penulis

Perbandingan antara penggunaan wearable sensor dan teknologi konvensional, seperti *glucometer* dan suntik, ditunjukkan pada tabel 2.1. *Wearable sensor* memungkinkan pemantauan kondisi kesehatan secara langsung tanpa memerlukan prosedur yang bersifat invasif. Keunggulan ini memberikan kenyamanan lebih bagi pengguna, terutama personel di lapangan, dalam melakukan deteksi dini terhadap gangguan kesehatan.

Selain itu, *wearable sensor* memiliki aksesibilitas yang lebih tinggi karena tidak bergantung pada ketersediaan fasilitas medis. Dibandingkan dengan metode konvensional yang umumnya memerlukan prosedur teknis dan manual, *wearable sensor* cenderung lebih mudah digunakan dan dioperasikan (Heikenfeld et al., 2018). Dengan kemampuan pemantauan kesehatan yang bersifat langsung dan non-invasif, *wearable sensor* berkontribusi dalam menjaga kondisi fisik masyarakat secara berkelanjutan. (Setiadi et al., n.d.).

2.1.2 Keringat sebagai Indikator Biologis



Gambar 2.2 Letak Kelenjar Apokrin, Ekrin, dan Apoekrin

Sumber : Baker, 2019

Keringat adalah cairan tubuh yang diproduksi oleh kelenjar keringat sebagai respons terhadap peningkatan suhu tubuh atau rangsangan fisik tertentu. Cairan ini dikeluarkan ke permukaan kulit untuk membantu proses pendinginan tubuh melalui penguapan, sehingga menjaga suhu tubuh tetap stabil (Sherwood, 2013). Terdapat dua jenis utama kelenjar keringat pada tubuh manusia seperti pada gambar 2.2 yaitu kelenjar ekrin dan apokrin. Kelenjar ekrin tersebar hampir di seluruh permukaan tubuh dan menghasilkan keringat yang sebagian besar terdiri dari air dan garam (NaCl). Sementara itu, kelenjar apokrin biasanya berada di area tertentu seperti ketiak dan menghasilkan keringat yang lebih kental serta kaya akan protein dan lemak (Baker, 2019).

Komposisi utama keringat meliputi air sebagai pelarut utama, serta berbagai elektrolit seperti (Na^+), klorida (Cl^-), kalium (K^+), dan magnesium (Mg^{2+}) (Sherwood, 2013). Selain itu, keringat juga mengandung senyawa organik seperti laktat, urea, dan asam amino yang berasal dari aktivitas tubuh. Di antara komponen tersebut, kandungan NaCl merupakan indikator biologis penting yang dapat mencerminkan status hidrasi seseorang. Kadar NaCl dalam keringat cenderung meningkat ketika tubuh mengalami dehidrasi karena berkurangnya volume air relatif terhadap jumlah elektrolit. Sebaliknya, pada kondisi overhidrasi, konsentrasi NaCl menjadi lebih rendah akibat pengenceran cairan tubuh. Oleh karena itu, pengukuran konsentrasii NaCl dalam keringat dapat digunakan sebagai parameter untuk menilai keseimbangan cairan tubuh.

Kondisi hidrasi tubuh secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu, overhidrasi, hidrasi normal, dan dehidrasi. Tabel 2.2 menyajikan klasifikasi tersebut beserta dampaknya terhadap fungsi fisiologis. Dehidrasi misalnya, dapat menyebabkan penurunan kemampuan kognitif, kelelahan, dan penurunan performa fisik yang sangat merugikan dalam aktivitas dengan intensitas tinggi seperti tugas lapangan (Abigail Pamarta et al., 2022).

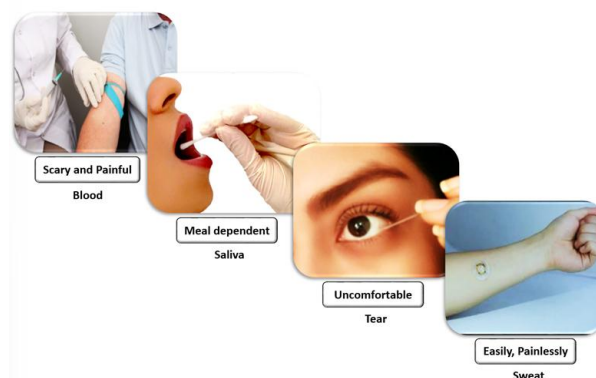
Tabel 2.2 Klasifikasi Tingkat Hidrasi

Kondisi	Pengertian	Dampak
Overhidrasi	Kondisi kelebihan cairan dalam tubuh akibat asupan cairan yang berlebihan atau ketidakmampuan tubuh mengeluarkan cairan dengan baik.	Ketidakseimbangan elektrolit yang dapat mengganggu konsentrasi dan menurunkan produktivitas
Hidrasi Normal	Kondisi tubuh yang memiliki jumlah cairan yang cukup	Membantu menjaga kinerja fisik sehingga tubuh tetap

	untuk menjaga fungsi fisiologis optimal	produktif dalam aktivitas sehari-hari
Dehidrasi	Kekurangan cairan dalam tubuh yang disebabkan oleh jumlah cairan yang dikeluarkan lebih besar dibandingkan dengan jumlah cairan yang masuk	Menyebabkan menurunnya kemampuan kognitif karena sulit konsentrasi sehingga angka produktivitas menurun

Sumber : Diolah oleh Penulis

Keringat memiliki keunggulan dibandingkan indikator biologis lain seperti darah, air liur, atau air mata dalam konteks pemantauan kesehatan berbasis sensor. Perbandingan indikator biologis pada gambar 2.3 menunjukkan keringat dapat diperoleh secara *non-invasif* tanpa perlu jarum atau peralatan laboratorium, serta memungkinkan pemantauan berkelanjutan secara langsung melalui perangkat *wearable* (Padash et al., 2020). Hal ini menjadikan keringat sebagai indikator biologis yang sesuai untuk aplikasi sensor keringat portabel.



Gambar 2.3 Perbandingan Indikator Biologis yang dapat digunakan

Sumber : Padash et al., 2020

2.1.3 *Natrium Chloride* (NaCl)

Natrium klorida (NaCl) merupakan senyawa ionik yang tersusun dari kation natrium (Na^+) dan anion klorida (Cl^-). Dalam kondisi larut, seperti di dalam tubuh manusia, senyawa ini akan terdisosiasi menjadi ion-ion

penyusunnya yang berperan penting dalam berbagai fungsi biologis. NaCl dikenal sebagai elektrolit utama yang mendukung keseimbangan cairan dalam tubuh (Sherwood, 2013). Di dalam tubuh manusia, NaCl tersebar dalam cairan termasuk darah dan keringat. Karena keringat merupakan bagian dari sistem pengaturan suhu tubuh, NaCl menjadi salah satu komponen utama yang hilang selama aktivitas fisik intensif atau paparan panas.

Konsentrasi NaCl dalam keringat dapat berubah tergantung pada status hidrasi seseorang. Saat tubuh mengalami dehidrasi, kandungan air dalam keringat menurun lebih cepat dibanding elektrolitnya, sehingga konsentrasi Na^+ dan Cl^- menjadi lebih tinggi (Baker, 2019). Sebaliknya, saat tubuh dalam kondisi overhidrasi, konsentrasi elektrolit akan lebih rendah karena terjadi pengenceran cairan tubuh. Perubahan konsentrasi NaCl ini tidak hanya mencerminkan status fisiologis seseorang, tetapi juga dapat digunakan sebagai parameter dalam sistem sensor. Dalam konteks sensor berbasis nanopartikel, khususnya nanopartikel emas (AuNPs), ion-ion Na^+ dan Cl^- berperan dalam mempengaruhi stabilitas larutan nanopartikel. Ion-ion tersebut dapat menurunkan gaya tolak-menolak elektrostatis antar partikel, sehingga menyebabkan partikel AuNPs saling mendekat dan membentuk agregat (Daniel & Astruc, 2004). Fenomena gaya tolak-menolak elektrostatis ini dapat dijelaskan dengan hukum Coulomb.

Hukum Coulomb menjelaskan fenomena gaya elektrostatis yang terjadi antara dua muatan listrik, di mana gaya elektrostatis sebanding dengan hasil perkalian besar muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar kedua muatan. Secara matematis, gaya elektrostatis dapat dihitung menggunakan rumus:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

Di mana

F : Gaya Elektrostatis (N)

k : Konstanta Coulomb ($8,99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$)

q : Muatan (c)

r : Jarak kedua muatan (m)

Fenomena gaya elektrostatik ini dapat berupa gaya tarik jika muatan berbeda tanda, atau gaya tolak-menolak jika muatan memiliki tanda yang sama. Dalam konteks AuNPs, gaya elektrostatik ini berperang penting dalam menentukan interaksi antar partikel. Ketika konsentrasi ion Na^+ dan Cl^- dalam larutan NaCl meningkat, gaya tolak-menolak elektrostatik antar nanopartikel emas berkurang, sehingga nanopartikel cenderung semakin mendekat dan membentuk agregat. Agregasi ini mengubah jarak antar nanopartikel dan mempengaruhi sifat optik larutan (LSPR) yang sensitif terhadap perubahan ukuran dan distribusi nanopartikel. Akibatnya, terjadi pergeseran panjang gelombang absorbansi dan perubahan warna larutan yang dapat diamati secara visual maupun melalui spektroskopi (Zhou et al., 2015). Oleh karena itu, NaCl tidak hanya berfungsi sebagai indikator fisiologis, tetapi juga sebagai pemicu sinyal dalam sistem sensor optik berbasis AuNPs.

Perbedaan antara gaya elektrostatik dan gaya listrik terletak pada kondisi uatan yang terlibat. Gaya elektrostatik terjadi antara muatan yang tidak bergerak (statis), seperti yang terjadi antara AuNPs dalam larutan, di mana gaya tolak-menolak antar muatan menyebabkan stabilitas partikel. Sementara itu, gaya listrik berlaku pada muatan yang bergerak atau dalam sistem yang melibatkan medan listrik dan arus listrik. Gaya listrik biasanya diterapkan pada interaksi muatan dalam medan yang lebih kompleks, seperti arus listrik atau muatan yang bergerak dalam medan elektromagnetik. Dalam konteks AuNPs, gaya elektrostatik lebih dominan dalam menjelaskan agregasi nanopartikel dalam larutan karena partikel tersebut tidak bergerak secara besar tetap terpengaruh oleh interaksi elektrostatik antar muatan yang ada dipermukaannya.

2.1.4 AuNPs (*Gold Nanoparticles*)

Nanopartikel emas (AuNPs) adalah partikel logam dengan ukuran sangat kecil, biasanya di bawah 100 nanometer, yang memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda dari bentuk padat kepingan emas. Ukuran yang

sangat kecil ini memungkinkan AuNPs untuk berinteraksi secara unik dengan cahaya, menghasilkan fenomena yang dikenal sebagai *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) (Daniel & Astruc, 2004). Karena sifat optiknya yang sensitif terhadap ukuran, bentuk, dan lingkungan sekitar, AuNPs sering digunakan dalam berbagai aplikasi sensor, termasuk sensor kesehatan berbasis perubahan warna (Heikenfeld et al., 2018).

Fenomena LSPR terjadi ketika cahaya mengenai permukaan nanopartikel emas dan menyebabkan elektron-elektron pada permukaan partikel berosilasi secara kolektif, menghasilkan resonansi pada panjang gelombang tertentu. Pada AuNPs, resonansi terjadi ketika panjang gelombang cahaya yang datang cocok dengan frekuensi alami getaran elektron pada permukaan nanopartikel. Proses ini sangat dipengaruhi oleh ukuran nanopartikel, di mana semakin besar ukuran partikel, semakin panjang gelombang resonansi yang dihasilkan (Jain et al., 2008). Hal tersebut dapat terjadi karena nanopartikel yang lebih besar memiliki lebih banyak elektron yang dapat bergerak bersama, sehingga frekuensi getarannya lebih rendah dan menghasilkan pergeseran ke panjang gelombang yang lebih panjang. Oleh karena itu, perubahan ukuran dan distribusi partikel sangat mempengaruhi respons optik AuNPs, yang membuatnya berguna dalam deteksi perubahan konsentrasi ion atau zat tertentu, seperti NaCl dalam keringat.

Salah satu aplikasi utama AuNPs adalah dalam sensor berbasis warna, di mana perubahan ukuran partikel AuNPs disebabkan oleh interaksi dengan ion dalam larutan, seperti Na^+ dan Cl^- . Ketika konsentrasi NaCl dalam keringat berubah, ion Na^+ dan Cl^- berinteraksi dengan permukaan AuNPs, menyebabkan agregasi partikel sehingga terjadi pergeseran warna larutan (Zhou et al., 2015). Hal ini sangat berguna dalam sistem sensor hidrasi, di mana perubahan warna dapat dengan mudah diamati secara visual atau dianalisis menggunakan alat seperti spektrofotometer UV-Vis. Agregasi nanopartikel emas terjadi ketika ion-ion dalam larutan mengurangi gaya elektrostatis tolak-menolak antara partikel, sehingga partikel-partikel

AuNPs cenderung berkumpul membentuk agregat yang lebih besar. Akibatnya, terjadi perubahan dalam karakteristik optik larutan, seperti penurunan absorbansi pada panjang gelombang tertentu atau pergeseran puncak resonansi LSPR (Daniel & Astruc, 2004). Penggunaan AuNPs dalam sensor berbasis keringat memberikan cara yang efektif dan non-invasif untuk memantau kondisi fisiologis tubuh, terutama untuk mendeteksi status hidrasi secara langsung.

2.1.5 Pengaruh Variasi Konsentrasi NaCl terhadap AuNPs

Penambahan NaCl dalam larutan yang mengandung nanopartikel emas (AuNPs) dapat mempengaruhi stabilitas koloidal dan ukuran partikel nanopartikel tersebut. Ion Na^+ dan Cl^- berperan untuk mengurangi gaya tolak-menolak elektrostatis antara partikel AuNPs, yang memungkinkan partikel-partikel tersebut saling mendekat dan membentuk agregat (Daniel & Astruc, 2004). Ketika konsentrasi NaCl meningkat, ion-ion tersebut mengganggu keseimbangan elektrostatis, yang pada akhirnya menyebabkan agregasi nanopartikel (Zhou et al., 2015).

Proses agregasi ini mengubah ukuran partikel AuNPs dan distribusi ukurannya dalam larutan. Pada konsentrasi NaCl rendah, nanopartikel emas cenderung stabil dalam larutan karena adanya gaya tolak antar partikel yang cukup kuat. Namun, seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaCl, ion Na^+ dan Cl^- mulai mempengaruhi interaksi antar partikel, mengurangi gaya tolak elektrostatis, dan menyebabkan partikel-partikel AuNPs saling berkumpul membentuk agregat yang lebih besar. Agregasi ini, pada gilirannya, berpengaruh pada sifat fisik larutan, seperti ukuran partikel dan distribusinya.

Perubahan ukuran partikel akibat agregasi akan mempengaruhi sifat optik larutan, terutama penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Sebagai contoh, nanopartikel emas memiliki fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) yang sangat sensitif terhadap ukuran dan jarak antar partikel. Ketika ukuran partikel AuNPs bertambah besar karena agregasi, panjang gelombang resonansi plasmon juga bergeser,

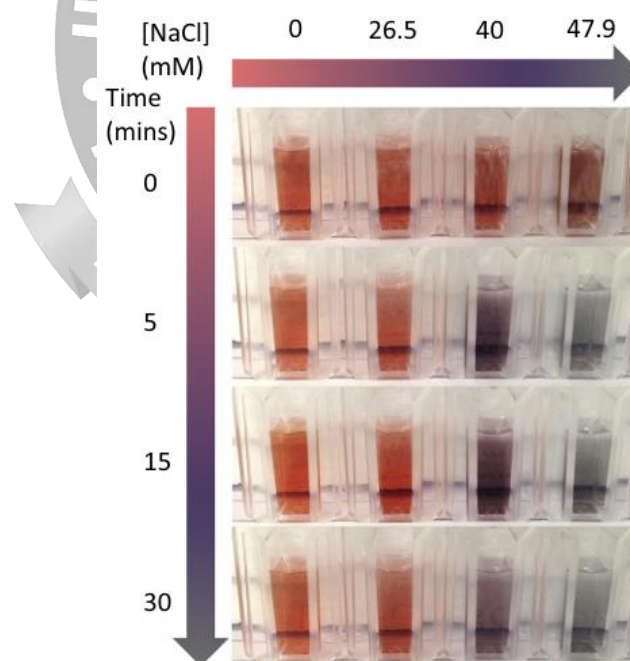
yang menyebabkan perubahan pada spektrum absorbansi larutan dan perubahan warna yang dapat diukur (Zhou et al., 2015).

Perubahan warna ini merupakan indikator penting dalam aplikasi sensor berbasis AuNPs, karena dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan konsentrasi NaCl dalam keringat. Sebagai contoh pada gambar 2.4, pada konsentrasi tertentu, perubahan warna dari merah ke ungu atau abu-abu dapat mengindikasikan tingkat hidrasi yang lebih rendah (Zhou et al., 2015). Dengan demikian, pemantauan perubahan warna yang dihasilkan dari agregasi nanopartikel emas memungkinkan penggunaan sensor warna untuk memantau status hidrasi dengan cara yang cepat, mudah, dan non-invasif.

Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap nanopartikel emas (AuNPs) merupakan aspek penting dalam memahami stabilitas dan agregasi nanopartikel dalam larutan. Penambahan NaCl dalam larutan yang mengandung AuNPs menyebabkan perubahan signifikan pada ukuran dan distribusi partikel, yang berpengaruh pada sifat optik nanopartikel tersebut. Beberapa konsentrasi yang digunakan dalam referensi adalah 0 mM, 26,5 mM, 40 mM, 47,9 mM, karena konsentrasi ini dapat mempengaruhi interaksi antara partikel nanopartikel dan mengindikasikan perubahan pada sifat koloidal partikel. Pada konsentrasi 0 mM, tidak ada Na^+ dan Cl^- dalam larutan sehingga nanopartikel emas terdispersi (tersebar) dengan stabil karena gaya tolak elektrostatik yang kuat antara partikel. Kondisi ini memberikan gambaran awal tentang kondisi ideal nanopartikel yang tidak terpengaruh oleh ion-ion eksternal. Pada konsentrasi 26,5 mM, 40 mM, 47,9 mM, dipilih karena memberikan dampak yang jelas pada agregasi nanopartikel. Ion Na^+ dan Cl^- dalam konsentrasi ini mengurangi gaya elektrostatik antar partikel, yang memicu proses agregasi nanopartikel. Agregasi ini terlihat pada perubahan warna dan absorbansi larutan, yang dapat diamati menggunakan *Uv-Vis Spectrophotometer* (Zhou et al., 2015).

Selain konsentrasi NaCl, waktu tinjau atau durasi pengamatan sangat penting dalam memahami dinamika agregasi nanopartikel. Dalam referensi

terkait, waktu tinjau yang digunakan adalah 0 menit, 5 menit, 15 menit, dan 30 menit untuk mengamati perkembangan agregasi nanopartikel setelah penambahan NaCl. Waktu 0 menit digunakan untuk mengamati kondisi awal nanopartikel segera setelah penambahan NaCl. Data yang diperoleh pada waktu ini memberikan gambaran tentang kondisi stabil nanopartikel sebelum terjadi perubahan besar. Waktu 5 menit, 15 menit, dan 30 menit dilakukan untuk mengamati perkembangan agregasi. Pada menit ke-5, perubahan kecil dalam distribusi ukuran partikel mulai terlihat, sementara pada menit ke-30, perubahan yang lebih besar dan lebih jelas dapat diamati, yang mengindikasikan perubahan lebih lanjut dalam karakteristik optik dan warna larutan (Zhou et al., 2015).



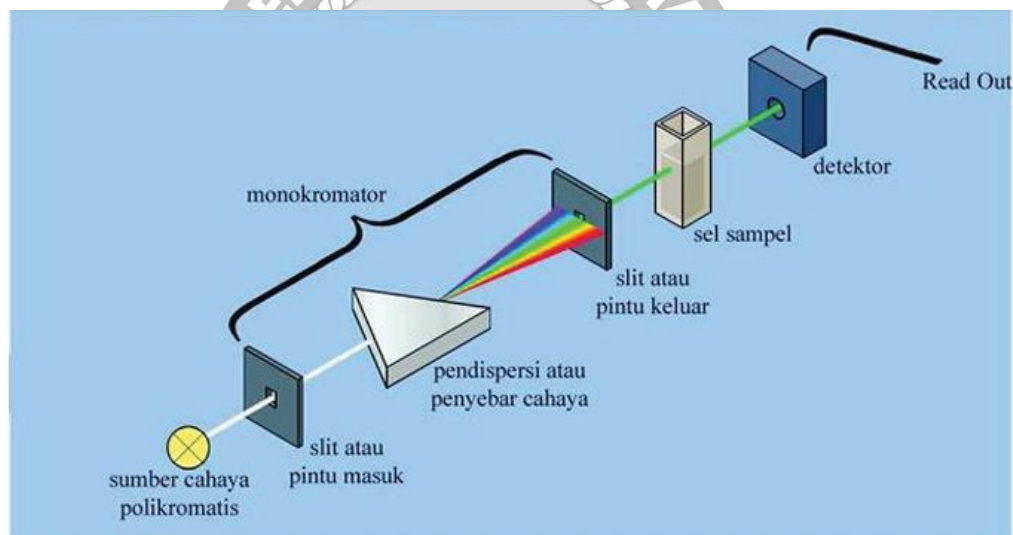
Gambar 2.4 Perubahan Warna sebagai Indikator Visual

Sumber : Zhou et al., 2015

2.1.6 UV-Vis Spectrophotometer

UV-Vis Spectrophotometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur penyerapan cahaya pada rentang panjang gelombang ultraviolet (200-400 nm) hingga cahaya tampak (400-800 nm). Alat ini berguna dalam analisis material, khususnya dalam penelitian nanopartikel, karena dapat

memberikan informasi mengenai sifat optik sampel berdasarkan penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Dalam penelitian nanopartikel emas (AuNPs), alat ini berfungsi dengan mengarahkan cahaya melalui sampel yang mengandung nanopartikel emas, kemudian mengukur seberapa banyak cahaya yang diserap oleh nanopartikel tersebut pada panjang gelombang yang relevan. Dengan mengukur penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu, alat ini memberikan informasi tentang sifat optik nanopartikel, yang sangat dipengaruhi oleh ukuran, distribusi partikel, dan interaksi antar partikel dalam larutan.



Gambar 2.5 Skema Cara Kerja UV-Vis

Sumber : Suhartati, 2017

Pada *UV-Vis Spectrophotometer*, cahaya dipancarkan dari sumber cahaya yang memancarkan cahaya dalam rentang panjang gelombang tertentu. Cahaya ini kemudian disaring menggunakan monokromator, yang menyaring cahaya menjadi panjang gelombang yang sesuai untuk pengukuran sampel. Setelah cahaya dipilih, cahaya tersebut diarahkan melalui larutan sampel yang terletak dalam kuvet. Saat cahaya mengenai sampel, sebagian cahaya diserap oleh nanopartikel dalam larutan, sementara sebagian lainnya diteruskan. Hukum Snellius menjelaskan bagaimana cahaya dibiaskan saat melewati batas antara dua medium dengan indeks refraksi yang berbeda, seperti dari udara ke larutan sampel.

dalam kuvet. Pembiasan ini mempengaruhi arah cahaya yang memasuki larutan, yang pada gilirannya mempengaruhi seberapa banyak cahaya yang diserap atau diteruskan oleh nanopartikel dalam sampel. Ketika cahaya memasuki larutan, perubahan indeks refraksi menyebabkan cahaya berbelok, dan arah baru ini menentukan interaksi cahaya dengan AuNPs. Pembiasan ini mempengaruhi distribusi intensitas cahaya yang diteruskan atau diserap oleh nanopartikel, yang berdampak pada pengukuran absorbansi.

Pada alat *single-beam* Uv-Vis, cahaya yang melewati sampel akan diteruskan menuju detektor, umumnya berupa fotodetektor seperti *photomultiplier tube* (PMT) atau *photodiode* yang mengukur intensitas cahaya yang diteruskan setelah melewati sampel. Perbedaan antara intensitas cahaya yang datang (I_0) dan intensitas cahaya yang diteruskan (I) digunakan untuk menghitung absorbansi (A), yang memberikan informasi mengenai jumlah cahaya yang diserap oleh nanopartikel dalam sampel. Absorbansi dihitung menggunakan rumus Hukum Beer-Lambert, yang menyatakan bahwa absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi material dalam sampel dan panjang lintasan cahaya yang dilalui. Rumus Hukum Beer-Lambert adalah:

$$A = \epsilon cl \quad (2.2)$$

Di mana:

A : Absorbansi

ϵ : Koefisien ekstingsi molar ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

c : Konsentrasi material (mol L^{-1})

l : Panjang lintasan cahaya (cm)

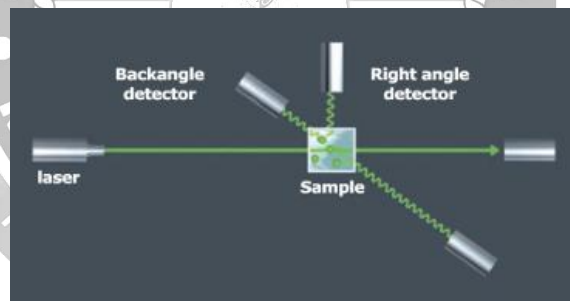
Pada nanopartikel emas (AuNPs), fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) berperan penting dalam mengukur perubahan optik yang terjadi pada nanopartikel tersebut. Plasmon merujuk pada osilasi kolektif elektron bebas di permukaan material konduktif, seperti nanopartikel emas, yang terpicu oleh interaksi dengan cahaya. Ketika cahaya dengan panjang gelombang tertentu mengenai permukaan

nanopartikel emas, elektron-elektron bebas pada permukaan nanopartikel mulai berosilasi bersama-sama dalam fenomena yang dikenal sebagai Surface Plasmon Resonance (SPR). Dalam hal ini, LSPR mengacu pada resonansi yang terjadi secara lokal pada nanopartikel, yang disebabkan oleh interaksi cahaya dengan elektron bebas yang ada di permukaan nanopartikel emas. Fenomena ini mengakibatkan penyerapan cahaya pada panjang gelombang spesifik, yang biasanya teramati pada 520-530 nm untuk nanopartikel emas yang terdispersi dengan baik (Rivera et al., 2024). Namun, ketika nanopartikel mengalami agregasi, ukuran dan distribusi partikel berubah, yang mengakibatkan pergeseran panjang gelombang penyerapan cahaya. Hal ini mempengaruhi spektrum absorbansi yang dicatat oleh alat UV-Vis. Pergeseran panjang gelombang atau perubahan intensitas puncak LSPR dapat digunakan untuk memantau agregasi nanopartikel dan perubahan dalam ukuran partikel.

Agregasi nanopartikel menyebabkan perubahan dalam sifat optik larutan, yang dapat dilihat dari pergeseran puncak absorbansi LSPR atau perubahan dalam warna larutan yang terjadi. Ketika konsentrasi NaCl dalam larutan meningkat, ion Na^+ dan Cl^- dapat mengurangi gaya elektrostatik antar partikel AuNPs, yang menyebabkan nanopartikel berkumpul dan membentuk agregat. Proses ini menyebabkan perubahan ukuran nanopartikel, yang selanjutnya mempengaruhi penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Alat *UV-Vis* dapat mendeteksi perubahan ini melalui pergeseran spektrum LSPR dan perubahan warna larutan, yang disebabkan oleh perubahan ukuran dan agregasi partikel. LSPR pada nanopartikel emas sangat sensitif terhadap ukuran, bentuk, dan lingkungan sekitar nanopartikel. Dalam hal ini, agregasi nanopartikel dapat menyebabkan penurunan kualitas data yang diperoleh, karena pengaruh interaksi antar partikel mungkin saja tidak linier dengan hukum Beer-Lambert.

2.1.7 Particel Size Analyzer (PSA)

Particle Size Analyzer (PSA) adalah alat yang digunakan untuk mengukur distribusi ukuran partikel dalam suatu sampel, termasuk nanopartikel emas (AuNPs), dengan memanfaatkan hamburan cahaya (Hun & Munna, 2024). Ketika cahaya laser diarahkan ke dalam sampel, partikel-partikel dalam larutan akan menyebabkan cahaya tersebut terhambur (*scatter*) dalam berbagai arah. Besarnya hamburan cahaya dan pola hamburan ini dipengaruhi oleh ukuran dan sifat partikel dalam sampel. Dengan mengukur intensitas cahaya yang terhambur pada sudut tertentu, PSA dapat menganalisis kecepatan fluktuasi cahaya yang terhambur dan menghitung ukuran partikel berdasarkan prinsip *Dynamic Light Scattering* (DLS).



Gambar 2.6 Skema Cara Kerja PSA

Sumber : Hun & Munna, 2024

PSA bekerja dengan mengirimkan cahaya laser ke dalam sampel yang mengandung partikel. Ketika cahaya laser mengenai partikel-partikel dalam larutan, cahaya tersebut akan terhambur (*scatter*), dan ukuran partikel mempengaruhi seberapa banyak cahaya yang terhambur serta sudut hamburan yang dihasilkan. PSA mengukur intensitas cahaya yang terhambur pada sudut tertentu, dan dengan menggunakan prinsip *Dynamic Light Scattering* (DLS), ukuran partikel dapat dihitung (Hun & Munna, 2024). DLS mengandalkan pengukuran fluktuasi cahaya terhambur yang terjadi akibat gerak Brownian partikel dalam larutan, yang menghubungkan kecepatan pergerakan partikel dengan ukuran partikel. Semakin kecil partikel, semakin cepat gerakan partikel tersebut, yang menyebabkan

fluktuasi intensitas cahaya lebih cepat, sementara partikel yang lebih besar bergerak lebih lambat dan menghasilkan fluktuasi cahaya lebih lambat (Hun & Munna, 2024). Berdasarkan prinsip ini, PSA dapat mengukur ukuran partikel dengan menganalisis kecepatan fluktuasi cahaya yang terhambur menggunakan persamaan Stokes-Einstein, yaitu:

$$D = \frac{k_b T}{6\pi\eta r} \quad (2.3)$$

Di mana:

D : Koefisien Difusi Partikel

k_b : Konstanta Boltzmann

T : Temperatur

η : Viskositas Pelarut

r : Radius Partikel

PSA menggunakan fenomena hamburan cahaya Rayleigh dan hamburan Mie untuk menganalisis ukuran partikel. Hamburan Rayleigh yang berlaku untuk partikel kecil, lebih kecil dari panjang gelombang cahaya, yang menghasilkan hamburan cahaya yang terdistribusi secara isotropik, yaitu menyebar ke segala arah dengan pola yang relatif sederhana. Hal ini berhubungan erat dengan difraksi cahaya, karena partikel yang lebih kecil dari panjang gelombang cahaya dapat menyebabkan gangguan atau pembelokan gelombang cahaya yang lebih signifikan. Pada PSA, hamburan cahaya ini diukur pada sudut tertentu untuk menentukan intensitasnya, dan dengan menganalisis pola hamburan tersebut, ukuran partikel dapat dihitung. Fenomena hamburan Rayleigh ini memberikan informasi tentang ukuran partikel pada skala nanometer, yang memungkinkan karakterisasi ukuran partikel dalam sampel. Hamburan Mie berlaku untuk partikel yang lebih besar, di mana cahaya terhambur mengikuti pola yang lebih kompleks dan terarah, tergantung pada ukuran dan bentuk partikel (Wahyuni & Sofjan Firdausi, 2016). PSA mengukur intensitas hamburan cahaya pada sudut tertentu dan menganalisisnya untuk menghitung distribusi ukuran partikel dalam sampel.

Dalam PSA, distribusi ukuran partikel dapat diukur berdasarkan jumlah partikel, intensitas hamburan partikel, dan volume partikel. Distribusi berdasarkan jumlah partikel memberikan gambaran mengenai distribusi partikel kecil, sementara distribusi berbasis intensitas lebih sensitif terhadap partikel besar, karena partikel besar menghasilkan hamburan cahaya yang lebih kuat. Distribusi berdasarkan volume memberikan gambaran lebih lengkap mengenai kontribusi relatif partikel besar terhadap distribusi keseluruhan.

PSA dapat memberikan parameter seperti *Z-Average* dan *Polydispersity Index (Pdl)* untuk mengetahui seberapa seragam ukuran partikel dalam larutan. *Z-Average* merupakan ukuran rata-rata partikel, sementara *Pdl* menggambarkan seberapa luas distribusi ukuran partikel dalam sampel. Nilai *Pdl* yang lebih tinggi menunjukkan distribusi ukuran yang lebih lebar, yang mengindikasikan agregasi lebih banyak. Agregasi nanopartikel dapat terjadi ketika ion Na^+ dan Cl^- dalam larutan mengurangi gaya elektrostatis antar partikel, menyebabkan nanopartikel berkumpul membentuk agregat yang lebih besar.

2.1.8 Metode *Inversed Turkevich* untuk Sintesis AuNPs

Nanopartikel emas (AuNPs) memiliki beragam aplikasi dalam teknologi salah satunya sensor berkat sifat optik yang bergantung pada ukuran dan bentuk partikelnya (Afrapoli et al., 2018). Oleh karena itu, kontrol yang presisi terhadap ukuran, bentuk, dan distribusi ukuran nanopartikel sangat penting untuk memaksimalkan aplikasinya. Salah satu metode yang paling umum untuk sintesis AuNPs adalah metode Turkevich, yang pertama kali dikembangkan pada 1951 (Afrapoli et al., 2018). Pada metode ini, HAuCl_4 (*gold(III) chloride*) direduksi menggunakan *sodium citrate*, menghasilkan nanopartikel dengan ukuran rata-rata 15.20 nm. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam menghasilkan nanopartikel yang lebih besar dari 40 nm, karena nanopartikel tersebut cenderung tidak stabil dan mengalami agregasi (Afrapoli et al., 2018).

Metode *Inversed Turkevich* diperkenalkan sebagai modifikasi dari metode Turkevich tradisional. Dalam metode ini, urutan penambahan reagen dibalik, di mana *sodium citrate* ditambahkan terlebih dahulu ke dalam air, kemudian HAuCl_4 ditambahkan ke dalam larutan *sodium citrate* yang dipanaskan. Perubahan urutan penambahan reagen ini menyebabkan terbentuknya *dicarboxy acetone* (DCA), produk oksidasi dari *sodium citrate*, yang berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabil yang lebih efektif. DCA meningkatkan laju nukleasi (pembentukan inti nanopartikel) dan mempercepat proses pembentukan nanopartikel yang lebih kecil dan lebih seragam (*monodisperse*). Hasilnya, nanopartikel emas yang disintesis dengan metode ini memiliki ukuran yang dapat dikendalikan dalam rentang 12-51 nm dan lebih seragam dibandingkan dengan metode Turkevich tradisional (Afrapoli et al., 2018).

Metode *Inversed Turkevich* memiliki keuntungan ekonomi yang sangat signifikan karena menggunakan lebih banyak *sodium citrate* daripada HAuCl_4 yang lebih mahal. Dengan demikian, metode ini memungkinkan lebih banyak percobaan sintesis tanpa membebani biaya reagen emas yang tinggi. Hal ini membuat metode ini lebih fleksibel dan memungkinkan penyesuaian dengan berbagai rasio molar *sodium citrate* terhadap HAuCl_4 serta variasi suhu reaksi, yang semuanya dapat mempengaruhi ukuran dan distribusi ukuran nanopartikel. Keunggulan ini menjadikan metode ini pilihan yang tepat untuk penelitian yang memerlukan eksperimen yang lebih banyak dengan biaya yang lebih rendah, terutama dalam proyek-proyek yang bertujuan menghasilkan nanopartikel emas dengan ukuran yang seragam dan dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi (Afrapoli et al., 2018).

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan penelitian yang dicantumkan sebagai acuan untuk memecahkan masalah penelitian. Adapun dalam bagian ini, peneliti menjelaskan persamaan, perbedaan, dan relevansi antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang dilakukan peneliti sebagai berikut:



Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu

No	Nama (Tahun)	Judul	Tujuan	Hasil	Perbedaan
1.	Anastasova et al., (2017)	<i>A wearable multisensing patch for continuous sweat monitoring</i>	Mengembangkan sebuah perangkat <i>wearable sensor</i> yang dapat secara simultan dan kontinu mengukur indikator biologis penting termasuk keringat, laktat, natrium, dan pH selama aktivitas fisik.	Perangkat <i>wearable sensor</i> mampu merekam perubahan indikator biologis keringat secara <i>real-time</i> dengan sensitivitas dan stabilitas tinggi, serta data dikirim secara <i>wireless</i> , membuktikan efektivitasnya sebagai alat <i>monitoring</i> kesehatan non-invasif selama olahraga.	Referensi berfokus pada mengembangkan dan menguji perangkat sedangkan penelitian ini berfokus pada karakterisasi sifat optik dan fisik AuNPs yang sensitif terhadap variasi konsentrasi NaCl.
2.	Zhou et al., (2015)	<i>Real-time colorimetric</i>	Penelitian ini bertujuan	Sensor AuNPs yang dikembangkan	Referensi berfokus pada penciptaan sensor

		<i>hydration sensor for sport activities</i>	mengembangkan sensor kolorimetrik berbasis nanopartikel emas (AuNPs) yang mampu mendeteksi status hidrasi tubuh secara real-time melalui perubahan warna yang tampak oleh mata. Sensor ini dirancang untuk membedakan kondisi overhidrasi, hidrasi normal, dan dehidrasi	menunjukkan respons cepat dalam lima menit, menghasilkan tiga warna berbeda (merah, ungu, abu-abu) sesuai dengan kadar NaCl 26,5 mM, 40 mM, dan 47,9 mM. Validasi dilakukan menggunakan UV-Vis dan Zeta Sizer, yang menunjukkan bahwa agregasi AuNPs meningkat seiring naiknya konsentrasi garam, menjadikan sensor ini efektif, sederhana, dan akurat untuk pemantauan hidrasi.	praktis dengan deteksi visual warna sedangkan penelitian ini lebih menekankan karakterisasi sifat optik dan fisik AuNPs sebagai respons terhadap variasi konsentrasi NaCl.
--	--	--	---	---	---

			berdasarkan konsentrasi NaCl dalam keringat buatan, dengan fokus utama pada aplikasi praktis dalam aktivitas olahraga ketahanan.		
3.	Afrapoli et al., (2018)	<i>'Inversed Turkevich' method for tuning the size of Gold nanoparticles: evaluation the effect of concentration and temperature</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi metode 'Inversed Turkevich' dalam sintesis nanopartikel emas (GNPs) dengan membalik urutan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode inversed Turkevich mampu menghasilkan GNPs berukuran 12 hingga 51 nm dengan distribusi ukuran yang sempit (monodispers). Ukuran partikel mengecil secara	Referensi menitikberatkan pada optimasi sintesis AuNPs menggunakan metode inversed Turkevich sedangkan penelitian ini berfokus pada pemanfaatan AuNPs untuk mendeteksi hidrasi tubuh.

			penambahan reagen dibanding metode Turkevich klasik. Tujuan utamanya adalah untuk mempelajari pengaruh rasio molar <i>sodium citrate</i> terhadap HAuCl_4 serta variasi temperatur terhadap ukuran dan monodispersitas GNPs. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi peran dicarboxy acetone (DCA),	signifikan seiring meningkatnya rasio molar sodium citrate terhadap HAuCl_4, menunjukkan peran penting DCA dalam mempercepat nukleasi. Pengaruh temperatur terlihat lebih dominan dalam mengatur monodispersitas: pada temperatur tinggi (95°C), GNPs lebih seragam, sedangkan pada temperatur rendah (50°C), terjadi polidispersitas tinggi karena pembentukan DCA yang lambat.	
--	--	--	---	---	--

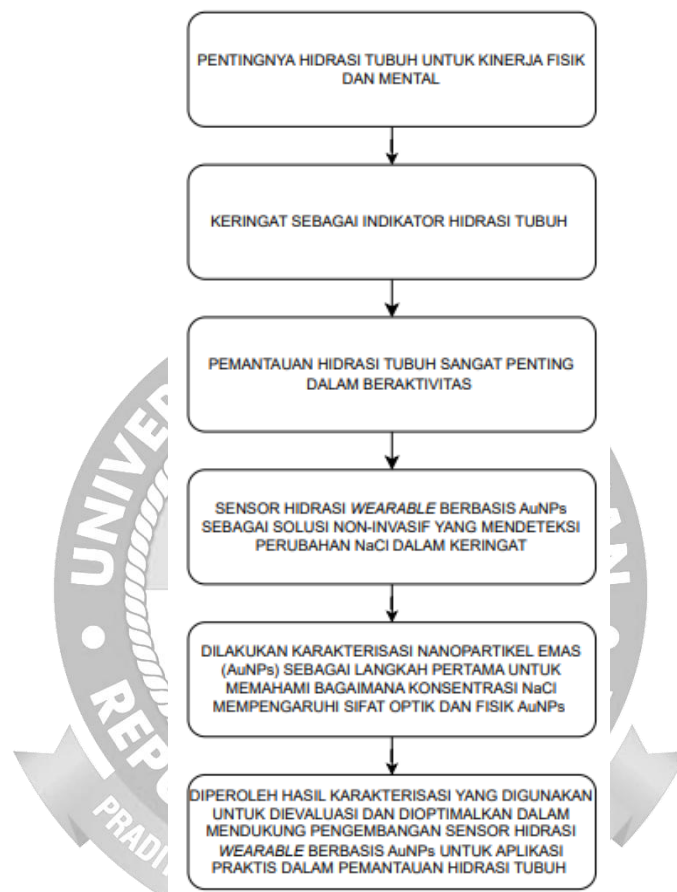
			produk oksidasi dari sodium citrate, sebagai agen reduksi dan stabilisasi dalam pembentukan GNP yang seragam.	Metode ini terbukti sederhana dan efektif untuk menghasilkan GNP berukuran besar namun tetap seragam dalam satu tahap sintesis.	
4.	Dong et al., (2020)	<i>Synthesis of Precision Gold Nanoparticles Using Turkevich Method</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanopartikel emas (AuNPs) dengan ukuran presisi dan distribusi ukuran yang sempit menggunakan metode Turkevich, serta	Hasil menunjukkan bahwa AuNPs berukuran 15–30 nm dengan polidispersitas rendah ($PDI < 0,20$) dapat dihasilkan secara konsisten dengan pengaturan rasio molar yang tepat, sementara penurunan rasio molar menyebabkan ukuran	Referensi berfokus pada pengendalian dan karakterisasi proses sintesis nanopartikel emas yang presisi sedangkan penelitian ini lebih fokus pada pengaruh variasi konsentrasi NaCl terhadap sifat optik dan fisik AuNPs.

			mengevaluasi pengaruh variabel proses sintesis seperti rasio molar trisodium citrate terhadap HAuCl_4 , temperatur, ukuran batch, dan konsentrasi awal HAuCl_4 terhadap ukuran, morfologi, dan distribusi partikel.	partikel bertambah dan distribusi melebar; variabel batch size dan konsentrasi awal memiliki pengaruh minimal, sedangkan temperatur berpengaruh pada ukuran partikel pada rasio molar tertentu.	
--	--	--	---	---	--

Sumber : Diolah oleh Penulis

Dari penelitian terdahulu dalam tabel 2.3, penulis mencari keterbaruan dari masing-masing penelitian terdahulu dengan melakukan karakterisasi AuNPs sebagai langkah pertama yang penting untuk mengembangkan sensor hidrasi *wearable* berbasis AuNPs yang dapat digunakan oleh masyarakat.

2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.7 Kerangka Berpikir Penelitian

Sumber : Diolah oleh Penulis

Hidrasi tubuh adalah faktor penting untuk menjaga kinerja fisik dan mental. Keringat menjadi indikator yang baik untuk memantau hidrasi tubuh, karena mengandung berbagai indikator biologis seperti NaCl yang berhubungan langsung dengan status hidrasi tubuh manusia. Pemantauan hidrasi tubuh sangat penting dalam kegiatan atau aktivitas, sehingga sensor hidrasi *wearable* berbasis AuNPs dapat menjadi solusi non-invasif yang mendeteksi perubahan konsentrasi NaCl dalam keringat. Karakterisasi nanopartikel emas (AuNPs) dilakukan sebagai langkah pertama untuk memahami bagaimana konsentrasi NaCl mempengaruhi sifat optik dan fisik AuNPs. Hasil karakterisasi yang diperoleh digunakan untuk dievaluasi dan dioptimalkan dalam mendukung pengembangan sensor hidrasi *wearable* berbasis AuNPs untuk aplikasi praktis dalam memantau hidrasi tubuh.

2.4 Hipotesis

- a. Variasi konsentrasi NaCl berpengaruh signifikan terhadap sifat optik AuNPs, di mana perubahan konsentrasi NaCl menyebabkan perubahan warna yang teramati melalui pergeseran spektrum UV-Vis, yang dapat digunakan untuk memantau agregasi nanopartikel emas.
- b. Variasi konsentrasi NaCl mempengaruhi sifat fisik AuNPs, terutama ukuran dan distribusi partikel, yang menyebabkan perubahan tingkat agregasi nanopartikel.

