

Peran Aktivitas Kimia Permukaan dalam Pembentukan dan Perilaku Sistem Koloid: Tinjauan Literatur

Amita M Siregar¹ Dermawati Napitupulu² Meyla Isnaini Sitorus³ Ridha Salsabilah⁴
Riyanda Syahfitri⁵

Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Medan, Indonesia^{1,2,3,4,5}

Email: mitaasiregar34@gmail.com¹ dermawatinapitupulu3@gmail.com²
meylastr2@gmail.com³ ridhasalsabilah08@gmail.com⁴ nanda2021445@gmail.com⁵

Abstrak

Kimia permukaan memainkan peran penting dalam pembentukan dan stabilitas sistem koloid melalui mekanisme adsorpsi, energi permukaan, dan interaksi elektrostatik yang memengaruhi kestabilan partikel pada skala nano hingga mikro. Sistem koloid, terdiri atas partikel berukuran 1-1000 nm, sangat dipengaruhi oleh gaya van der Waals, tolakan elektrostatik, dan sterik yang menentukan dispersi dan koagulasi partikel. Tinjauan literatur ini menganalisis temuan penelitian nasional terkait peran kimia permukaan dalam pembentukan koloid, pengaruh pH dan kekuatan ionik terhadap stabilitas, serta mekanisme adsorpsi surfaktan dan polimer sebagai agen stabilisasi. Metode yang digunakan adalah studi kualitatif terhadap jurnal nasional yang membahas fisika dan kimia permukaan serta aplikasinya pada industri pangan, farmasi, dan nanoteknologi. Hasil menunjukkan bahwa pengendalian aktivitas kimia permukaan dapat meningkatkan stabilitas koloid melalui pengaturan potensial zeta, modifikasi lapisan ganda listrik, dan pembentukan lapisan adsorpsi yang efektif. Pemahaman komprehensif tentang aktivitas kimia permukaan sangat penting untuk mengoptimalkan kestabilan sistem koloid dan pengembangan produk teknologi modern.

Kata Kunci: Kimia Permukaan, Sistem Koloid, Potensial Zeta, Adsorpsi Surfaktan, Stabilitas Koloid



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Kimia permukaan merupakan cabang ilmu kimia yang mempelajari fenomena pada batas antarmuka, seperti antara padatan dan cairan, cairan dan gas, atau dua fase yang berbeda. Dalam sistem berskala nano hingga mikro, sifat permukaan memiliki peran yang jauh lebih dominan dibandingkan sifat bulk, karena luas permukaan relatif partikel meningkat seiring mengecilnya ukuran. Hal ini menjadikan kimia permukaan sebagai faktor penting dalam banyak fenomena ilmiah, termasuk interaksi adsorpsi, energi antarmuka, dan gaya elektrostatik yang menentukan kestabilan berbagai material kimia. Pemahaman mengenai aspek ini menjadi dasar untuk menjelaskan bagaimana suatu fase terdispersi dapat terbentuk, mempertahankan kestabilannya, dan berinteraksi dengan medium pendispersinya. Kajian mengenai fenomena ini telah dibahas dalam berbagai literatur kimia fisik dan terapan di Indonesia, yang menegaskan bahwa proses pada permukaan memberikan kontribusi besar terhadap sifat-sifat material berukuran kecil. (Cahyana, 2018)

Sistem koloid merupakan salah satu bentuk materi yang sangat bergantung pada aktivitas kimia permukaan. Koloid tersusun atas partikel berukuran 1–1000 nm yang terdispersi dalam medium tertentu, di mana perilakunya dipengaruhi oleh interaksi antarmuka yang terjadi. Pembentukan koloid tidak hanya bergantung pada jenis fase yang terlibat, tetapi juga pada gaya-gaya yang bekerja pada permukaan partikel, seperti gaya van der Waals, gaya tolak elektrostatik, dan gaya sterik. Kombinasi dari gaya-gaya tersebut menentukan apakah partikel akan tetap terdispersi atau justru mengalami penggumpalan. Berbagai penelitian nasional

menunjukkan bahwa karakteristik permukaan, seperti muatan partikel dan kemampuan adsorpsi, sangat menentukan apakah sistem koloid akan stabil atau mudah mengalami koagulasi. (Wibowo & Sari, 2020).

Perilaku koloid dalam berbagai aplikasi, seperti industri pangan, kosmetik, obat-obatan, cat, dan material nanoteknologi, juga sangat dipengaruhi oleh aktivitas kimia permukaan. Misalnya, dalam formulasi kosmetik, stabilitas emulsi ditentukan oleh kemampuan surfaktan untuk menurunkan tegangan permukaan dan membentuk lapisan pelindung pada droplet. Pada industri pangan, kimia permukaan menentukan stabilitas susu, mayones, dan minuman berprotein. Koloid dalam obat-obatan seperti nanopartikel penghantar obat juga memerlukan kontrol permukaan agar tidak mudah menggumpal dalam plasma darah. Dengan demikian, kemampuan mengendalikan interaksi permukaan memungkinkan pengembangan produk-produk yang lebih stabil, efisien, dan aman digunakan. (Rahmawati, 2019). Walaupun konsep dasar kimia permukaan telah lama dibahas, penelitian-penelitian terbaru dalam jurnal nasional masih menunjukkan adanya keragaman hasil terkait bagaimana mekanisme permukaan mempengaruhi stabilitas koloid. Perbedaan metode sintesis, variasi jenis surfaktan, perubahan pH, serta perbedaan kekuatan ionik larutan menghasilkan parameter karakteristik permukaan yang bervariasi, sehingga interpretasi mengenai perilaku koloid sering tidak konsisten antara satu studi dengan lainnya. Ketidakkonsistenan ini memperlihatkan perlunya tinjauan literatur yang menganalisis kembali keterkaitan antara teori kimia permukaan dan hasil penelitian aplikasi koloid. (Hidayat & Puspitasari, 2021).

Tinjauan literatur ini bertujuan untuk menguraikan peran aktivitas kimia permukaan dalam pembentukan dan perilaku sistem koloid secara komprehensif berdasarkan temuan-temuan penelitian nasional. Selain itu, tinjauan ini berupaya menghubungkan konsep teoretis seperti tegangan permukaan, adsorpsi, muatan permukaan, lapisan ganda listrik, dan potensial zeta dengan berbagai fenomena koloid yang ditemukan dalam penelitian terapan. Pengkajian ulang literatur ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai bagaimana faktor permukaan mengontrol kestabilan, mekanisme koagulasi dan flokulasi, serta pengaruh parameter lingkungan dalam sistem koloid. (Nurhadi, 2020).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Pembentukan Koloid Berbasis Aktivitas Kimia Permukaan

Pada sistem koloid yang melibatkan reduksi senyawa logam oleh komponen organik, pembentukan partikel berlangsung melalui interaksi permukaan antara ion logam yang direduksi dan molekul pelindung (stabilisator). Pada tahap awal, permukaan inti logam yang baru terbentuk masih sangat reaktif sehingga mudah mengalami penggabungan antar partikel kecil. Aktivitas kimia permukaan berperan sebagai pengatur utama—molekul penstabil menempel di permukaan inti dan menurunkan kecenderungan partikel untuk saling berikatan. Proses adsorpsi ini membuat inti yang semula tidak stabil menjadi lebih tahan terhadap aglomerasi (Prasetyaningtyas dkk., 2020). Pembentukan koloid pada sistem yang direduksi secara cepat sangat dipengaruhi oleh reaktivitas permukaan partikel yang muncul segera setelah proses reduksi berlangsung. Ketika inti terbentuk serentak dalam jumlah besar, permukaannya memiliki energi tinggi dan cenderung mengalami penggabungan. Peran bahan penstabil sangat penting karena ia berinteraksi dengan permukaan inti dan mengatur jarak antarmolekul pada skala nano. Lapisan pelindung yang terbentuk mencegah kontak langsung antar partikel, sehingga inti dapat tumbuh tanpa menyatu menjadi partikel besar. Aktivitas kimia permukaan inilah yang menentukan apakah koloid akan stabil atau justru mengalami agregasi. Jika permukaan tertutupi secara merata, partikel tetap terdispersi dan pembentukan koloid berlangsung efektif (Az Zahr dkk., 2024).

Dalam pembentukan koloid yang dipengaruhi oleh reaksi kimia pada permukaan partikel, kestabilan sistem bergantung pada kemampuan komponen dalam larutan untuk berinteraksi dengan inti yang muncul. Senyawa yang memiliki kemampuan mereduksi sekaligus menstabilkan dapat langsung menempel pada permukaan partikel sehingga penurunan energi permukaan terjadi sejak awal pembentukan inti. Aktivitas kimia permukaan ini tidak hanya membantu inti tetap bertahan, tetapi juga menghambat pertumbuhan tak terkontrol. Ketika permukaan inti tertutupi oleh molekul yang mampu berikatan atau berkoordinasi dengan logam, partikel cenderung mempertahankan ukuran kecil dan tidak mudah berkumpul (Susilowati dkk., 2023). Pada pembentukan koloid melalui proses reduksi kimia, permukaan partikel awal yang muncul memiliki sifat sangat aktif dan sensitif terhadap lingkungan. Ion logam yang berubah menjadi inti partikulat akan berhadapan dengan tantangan stabilisasi karena luas permukaan yang besar membuatnya mudah mengalami penggabungan. Aktivitas kimia permukaan berfungsi mengatur proses ini—molekul tertentu dapat sekaligus memberikan elektron untuk reduksi dan menutupi permukaan partikel sehingga mencegah pertumbuhan berlebih. Adsorpsi senyawa berfungsi sebagai penghalang fisik maupun kimia yang mengurangi kemungkinan partikel saling menempel. Dengan stabilisasi permukaan yang efektif, koloid dapat dipertahankan bentuknya dan partikel tidak tumbuh liar ataupun mengendap (Ridwan dkk., 2018).

Peran Energi Permukaan dalam Nukleasi dan Pertumbuhan Partikel

Energi permukaan memegang peran sentral dalam keseluruhan proses pembentukan partikel, mulai dari munculnya inti awal hingga berkembangnya kristal. Pada tahap nukleasi, inti yang terbentuk masih sangat kecil sehingga luas permukaannya besar dan energi bebas permukaannya tinggi, kondisi yang membuat inti tersebut mudah mengalami ketidakstabilan. Agar dapat bertahan, sistem akan berupaya menurunkan energi permukaannya baik melalui pembesaran ukuran inti, penataan ulang struktur kristal yang lebih stabil, maupun melalui keterikatan ion atau molekul yang mampu memberikan efek stabilisasi. Ketika inti mulai tumbuh, partikel kemudian berkembang mengikuti arah yang secara energetik paling menguntungkan, yaitu arah dengan energi permukaan rendah. Hal ini menyebabkan berbagai bentuk dan orientasi kristal muncul sebagai hasil dari pencarian kondisi yang paling stabil. Selain itu, kecenderungan partikel kecil untuk menyatu menjadi partikel berukuran lebih besar juga merupakan bagian dari upaya sistem menurunkan energi permukaan total (Rengkung dkk., 2024).

Energi permukaan menjadi faktor penentu dalam seluruh rangkaian pembentukan partikel, mulai dari terciptanya inti awal hingga proses pembesaran kristal. Inti yang baru muncul biasanya berukuran sangat kecil sehingga memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang besar, membuat energi bebas permukaannya tinggi dan kondisi ini tidak stabil. Agar inti tersebut dapat bertahan, sistem akan berusaha menurunkan energi permukaannya melalui berbagai cara misalnya dengan memperbesar inti, menata ulang struktur atomiknya, atau mengikat ion maupun molekul tertentu yang bertindak sebagai penstabil. Ketika inti mulai tumbuh, partikel akan berkembang menuju bentuk yang memberikan energi permukaan paling rendah, sehingga struktur akhirnya lebih stabil secara termodinamik. Kecenderungan partikel kecil untuk saling menempel atau beraglomerasi juga berasal dari dorongan untuk menurunkan energi permukaan total, sebab menggabungkan beberapa partikel kecil menjadi satu partikel lebih besar akan mengurangi luas permukaan keseluruhan (Maulidiantiyas dkk., 2021).

Energi permukaan menjadi faktor penentu sejak awal terbentuknya partikel, mulai dari munculnya inti hingga proses pertumbuhan kristal. Inti yang baru lahir berukuran sangat kecil dan memiliki luas permukaan besar sehingga energi bebas yang dimilikinya juga tinggi,

membuatnya mudah hilang. Agar dapat bertahan, sistem akan cenderung menurunkan energi permukaan tersebut, baik dengan memperbesar ukuran inti, menata kembali struktur yang terbentuk, maupun melalui keterikatan molekul atau ion yang mampu memberikan stabilisasi. Selama inti berkembang, partikel akan tumbuh ke arah yang paling memungkinkan tercapainya energi permukaan terendah sehingga menghasilkan bentuk yang stabil secara termodinamik. Proses ini juga berhubungan dengan kemungkinan partikel bergabung membentuk aglomerat, karena penyatuan partikel-partikel kecil menjadi satu entitas berukuran lebih besar akan mengurangi energi permukaan total (Khotimah & Supardi 2025).

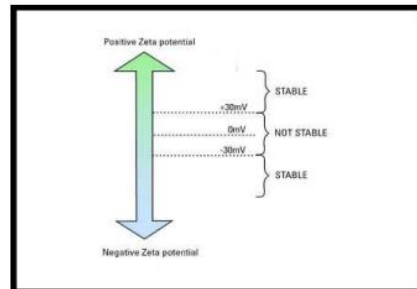
Adsorpsi Molekul pada Permukaan Partikel dan Pengaruhnya terhadap Stabilitas Koloid

Dalam sistem koloid, polimer yang teradsorpsi pada permukaan partikel berfungsi membentuk lapisan pelindung yang membatasi kedekatan antarpartikel. Rantai polimer yang menempel menciptakan penghalang sterik yang mencegah partikel saling mendekat terlalu dekat, sehingga gaya tarik antarpartikel dapat ditekan. Adsorpsi ini juga mengubah struktur lapisan permukaan dan mengurangi peluang terjadinya agregasi karena partikel akan mengalami tolakan entropi ketika lapisan polimer saling bersinggungan. Dengan demikian, keberadaan polimer yang terikat pada permukaan partikel bukan hanya mengontrol kestabilan koloid melalui hambatan fisik, tetapi juga memengaruhi bagaimana partikel berinteraksi satu sama lain dalam medium disperse (Mahmudi et al., 2025). Adsorpsi surfaktan pada permukaan partikel merupakan mekanisme penting dalam mempertahankan stabilitas koloid. Bagian hidrofilik dan hidrofobik surfaktan memungkinkan molekul ini menata diri di sekitar partikel sehingga muatan permukaan berubah dan gaya elektrostatik antarpartikel dapat dikendalikan. Struktur lapisan surfaktan yang terbentuk menghasilkan gaya tolak yang cukup kuat untuk menekan gaya tarik van der Waals, sehingga partikel tetap terdispersi. Selain itu, interaksi surfaktan dengan medium juga menentukan ketebalan lapisan permukaan yang memengaruhi kekuatan tolakan antarpartikel. Karena itu, adsorpsi surfaktan memegang peranan utama dalam menstabilkan sistem koloid melalui modifikasi muatan, perbaikan penyebaran, dan pengurangan kecenderungan penggumpalan (Jaya dkk., 2020). Adsorpsi ion atau molekul bermuatan pada permukaan partikel sangat menentukan sifat elektrokimia yang mengatur stabilitas koloid. Ketika ion atau surfaktan bermuatan terikat pada permukaan, partikel memperoleh muatan baru yang menyebabkan terciptanya gaya tolak elektrostatik. Tolakan ini melawan gaya tarik yang dapat menyebabkan penggumpalan, sehingga partikel tetap terpisah satu sama lain di dalam medium. Perubahan muatan akibat adsorpsi juga membentuk lapisan ganda listrik yang memperkuat kestabilan suspensi. Struktur lapisan permukaan yang terbentuk dari ion atau surfaktan membuat partikel lebih sulit saling mendekat, sehingga sistem koloid menjadi lebih stabil dan memiliki ketahanan tinggi terhadap sedimentasi (Sandjaja & Lestari, (2017).

Potensial Zeta dan Lapisan Ganda Listrik sebagai Penentu Stabilitas Koloid

Potensial zeta adalah ukuran besarnya gaya tolak atau tarik antar partikel. Pengukurannya memberikan wawasan mendetail tentang mekanisme dispersi dan merupakan kunci pengendalian dispersi elektrostatik. Pengukuran potensi zeta merupakan parameter yang sangat penting di berbagai industri, termasuk pembuatan bir, keramik, farmasi, obat-obatan, pengolahan mineral, dan pengolahan air. Potensial zeta (ζ -potential) merupakan parameter penting dalam sistem koloid, karena menggambarkan potensi listrik pada bidang tergelincir (slipping plane) di sekitar partikel terdispersi. Secara operasional, ζ -potential mencerminkan muatan efektif pada partikel akibat distribusi ion di sekitar permukaannya. Potensial zeta adalah muatan keseluruhan yang diperoleh partikel dalam media tertentu.

- Besarnya potensial zeta memberikan indikasi stabilitas potensial sistem koloid
- Jika semua partikel memiliki potensial zeta negatif atau positif yang besar, mereka akan saling tolak dan terjadi stabilitas dispersi
- Jika partikel memiliki nilai potensial zeta yang rendah, maka tidak ada gaya yang mencegah partikel bersatu dan terjadi ketidakstabilan dispersi
- Garis pemisah antara dispersi air yang stabil dan tidak stabil umumnya diambil pada +30 atau -30 mV
- Partikel dengan potensial zeta lebih positif dari +30 mV biasanya dianggap stabil
- Partikel dengan potensial zeta lebih negatif dari -30 mV biasanya dianggap stabil



Potensial Zeta dan pH

Faktor terpenting yang memengaruhi potensi zeta adalah pH, nilai potensi zeta yang dikutip tanpa definisi lingkungannya (pH, kekuatan ionic, konsentrasi zat aditif apa pun) adalah angka yang tidak berarti. Bayangkan sebuah partikel dalam suspensi dengan potensi zeta negative, Jika lebih banyak alkali ditambahkan ke suspensi ini, maka partikel cenderung memperoleh muatan yang lebih negative. Jika asam ditambahkan ke suspensi ini, maka akan tercapai titik di mana muatan akan dinetralkan, Penambahan asam lebih lanjut akan menyebabkan penumpukan muatan positif. Secara umum, kurva potensi zeta versus pH akan positif pada pH rendah dan lebih rendah atau negatif pada pH tinggi mungkin ada titik di mana kurva melewati potensi zeta nol, Titik ini disebut titik isoelektrik dan sangat penting dari segi praktis biasanya, ini adalah titik di mana sistem koloid paling tidak stabil (Khoshnevisan and Barkhi, 2015). Lapisan ganda listrik (electric double layer, EDL) terbentuk ketika ion-ion dalam medium larutan memosisikan diri di sekitar partikel bermuatan bagian dari ion teradsorpsi langsung ke permukaan (lapisan Stern / Helmholtz), dan lapisan diffuse di sekitarnya. Ketika dua partikel koloid mendekat, lapisan ganda masing-masing partikel mulai saling berinteraksi. Jika ζ -potential cukup tinggi (positif atau negatif), muatan sejenis pada permukaan menyebabkan gaya tolak-menolak elektrostatis yang kuat, sehingga partikel cenderung tetap terdispersi artinya sistem koloid stabil dan kecil peluang terjadi agregasi atau flokulasi. Sebaliknya, jika ζ -potential rendah misalnya mendekati nol gaya elektrostatis tidak cukup untuk menahan gaya tarik menarik (seperti van der Waals), sehingga partikel bisa mendekat dan bergabung. Karena itu, pengukuran ζ -potential sering digunakan sebagai indikator kestabilan sistem koloid. Banyak penelitian menunjukkan bahwa nilai absolut (positif maupun negatif) di atas ± 30 mV umumnya dianggap menunjukkan stabilitas elektrostatis yang baik (Agmo Hernández, 2023).

Interaksi Antarpartikel: Kajian Teori DLVO dan Non-DLVO

Teori klasik DLVO theory menjelaskan stabilitas koloid berdasarkan resultan dari dua gaya utama: gaya tarik (atraktif) akibat interaksi van der Waals force dan gaya tolak (repulsif) yang berasal dari tumpang-tindih lapisan ganda listrik (EDL) ketika partikel mendekat. Menurut DLVO, jika gaya tolak cukup besar (misalnya karena nilai ζ -potential besar dan double

layer tebal), partikel tetap tersebar; jika tidak, gaya tarik bisa mendominasi dan menyebabkan agregasi atau flokulasi. Tapi banyak sistem koloid nyata menunjukkan bahwa DLVO saja tidak cukup menjelaskan semua fenomena terutama bila ada molekul teradsorpsi seperti polimer atau surfaktan, adanya ion multivalen, perubahan medium, atau struktur permukaan partikel yang kompleks. Efek-efek ini disebut interaksi “non-DLVO”, seperti gaya sterik, efek hidrofobik/hidrasional, bridging polimer, distribusi muatan tidak uniform, dan banyak variabel lain. Misalnya, pada penelitian pada material zeolit atau karbon aktif, penambahan polimer organik menyebabkan perubahan struktur EDL penurunan densitas muatan permukaan, pergeseran titik muatan nol, hingga perubahan ζ -potential yang mempengaruhi adsorpsi dan kestabilan. Karena itu, untuk analisis kestabilan sistem koloid modern (khususnya sistem kompleks), penting mempertimbangkan baik faktor DLVO maupun non-DLVO dan tidak semata mengandalkan perhitungan gaya klasik (Agmo Hernández, 2023).

Pengaruh pH, Kekuatan Ionik, dan Lingkungan Kimia terhadap Perilaku Koloid

Lingkungan kimia larutan terutama nilai pH dan kekuatan ionik (ionic strength) memiliki peran krusial dalam menentukan muatan permukaan partikel, struktur lapisan ganda listrik (EDL), serta pada akhirnya stabilitas/dispersibilitas sistem koloid. Pertama, pH medium berpengaruh terhadap protonasi atau deprotonasi gugus permukaan partikel (misalnya $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$, tergantung jenis partikel). Perubahan protonasi ini akan mengubah densitas muatan permukaan, yang tercermin pada nilai zeta potential (ζ -potential). Sebagai contoh, dalam dispersinya serat nanofibril chitin, terlihat bahwa pada $\text{pH} > 7$ dispersi lebih stabil dengan ζ -potential $-22,5$ mV, sedangkan saat kekuatan ionik dinaikkan (NaCl), ζ -potential “termondifikasi” menuju $-14,0$ mV dan ukuran hidrodinamik berubah, menunjukkan bahwa pH dan ionic strength bersama-sama menentukan stabilitas koloid (Rasmito *et al.*, 2025). Perubahan pH juga secara langsung mempengaruhi agregasi atau dispersi partikel dalam studi pada nanopartikel TiO_2 (dengan ekstraseluler polymeric substances/EPS), agregasi dipengaruhi pH dibanding terhadap titik muatan nol (point-of-zero-charge, PZC) partikel; saat pH mendekati PZC, agregasi lebih cepat, sedangkan pada pH jauh dari PZC dan dengan EPS teradsorpsi, stabilitas meningkat karena repulsi elektrostatis dan sterik (Rasmito *et al.*, 2025). Kedua, kekuatan ionik medium berpengaruh lewat kompresi lapisan ganda listrik. Ketika konsentrasi elektrolit (misalnya NaCl) tinggi, ion-ion dalam larutan menyusutkan (screening) muatan permukaan partikel lapisan ganda menjadi tipis, sehingga jarak efektif antara permukaan partikel dan slipping plane mengecil, serta gaya elektrostatis repulsif antar partikel melemah. Kondisi ini memudahkan gaya tarik (misalnya gaya van der Waals) dominan, sehingga partikel dapat mendekat dan mengendap/agregasi. Hal ini diobservasi, misalnya, dalam suspensi nanopartikel selulosa etil (ethyl cellulose, EC), di mana penambahan garam (ion) melemahkan gaya elektrostatis repulsif, menyebabkan destabilisasi suspensi (Medykowska *et al.*, 2023).

Lingkungan kimia media tidak sebatas pH dan ionik keberadaan molekul teradsorpsi seperti polimer, surfaktan, atau biomolekul (misalnya protein, EPS) dapat menambahkan mekanisme stabilisasi atau destabilisasi non-elektrostatis (non-DLVO). Misalnya, dalam studi pada dispersinya antibodi immunoglobulin (IgG), stabilitas koloid sangat bergantung pada pH dan ionic strength: pada ionic strength rendah, repulsi elektrostatis antar molekul protein menjaga kestabilan; tetapi pada ionic strength tinggi, repulsi berkurang dan agregasi/fluktuasi fase bisa terjadi (Thompson *et al.*, 2016). Begitu pula pada nanopartikel logam oksida keberadaan EPS memperpanjang ambang koagulasi (critical coagulation concentration): ketika ionik tinggi, agregasi cepat; tapi dengan EPS teradsorpsi, stabilitas meningkat meskipun ionic strength tinggi. Selain pH dan ionic strength, lingkungan kimia lain seperti keberadaan

surfaktan, polimer, atau molekul biomakro (misalnya protein atau extracellular polymeric substances/EPS) juga berpengaruh besar. Molekul-molekul ini dapat berinteraksi secara spesifik dengan permukaan partikel, membentuk lapisan adsorpsi yang memberikan stabilisasi sterik atau elektrosterik mekanisme yang tidak sepenuhnya dijelaskan oleh teori DLVO klasik. Sebagai contoh, pada nanopartikel oksida logam yang terlapis EPS, gaya tolakan meningkat karena kombinasi muatan negatif dan repulsi sterik sehingga stabilitas koloid tetap terjaga meskipun kekuatan ionik medium tinggi (Pent, Pöldmaa and Bahram, 2017). Secara keseluruhan, kestabilan sistem koloid sangat bergantung pada kombinasi variabel pH, kekuatan ionik, dan komposisi kimia medium. Variasi kecil dalam kondisi tersebut dapat secara drastis mengubah energi interaksi antarpartikel, bahkan pada sistem dengan komposisi partikel yang sama. Oleh karena itu, dalam penelitian koloid, pelaporan rinci mengenai kondisi medium bukan sekadar formalitas, tetapi merupakan bagian fundamental untuk memastikan interpretasi hasil yang akurat dan reproduksibel.

Peran Surfaktan, Emulsifier, dan Polimer dalam Modifikasi Sifat Permukaan Koloid

Surfaktan merupakan molekul aktif permukaan yang bersifat amfifilik, terdiri dari gugus kepala yang suka air (hidrofilik) dan ekor yang suka minyak (hidrofobik). Cara kerjanya berawal dari penempelan molekul surfaktan di bidang batas antara minyak dan air atau udara dan air. Penempelan ini menurunkan tegangan permukaan secara nyata, sehingga membantu proses pendispersian dan pembuatan sistem terdispersi seperti emulsi atau buih. Pada kadar rendah, molekul surfaktan menyebar tidak teratur di antarmuka, namun bila melebihi batas Konsentrasi Misel Kritis (CMC), molekul-molekul tersebut akan membentuk agregat yang dinamis berupa misel. Misel mampu mengurung fase non-polar di bagian dalamnya, sehingga dapat menstabilkan emulsi atau melarutkan bahan berlemak. Kestabilan yang dihasilkan terutama bersifat elektrostatis, karena gugus kepala surfaktan yang bermuatan menimbulkan gaya tolak-menolak antar partikel yang sejenis (Rosen & Kunjappu,). Emulsifier merupakan jenis khusus dari surfaktan yang diformulasikan untuk menjaga kestabilan emulsi, yaitu campuran dua cairan yang tidak saling melarut. Cara kerja emulsifier adalah dengan membuat lapisan yang kuat dan lentur di sekitar tetesan fase terdispersi. Lapisan ini berfungsi sebagai pembatas fisik yang mencegah penyatuan tetesan. Di samping mengurangi tegangan antarmuka, emulsifier juga bisa menaikkan kekentalan lapisan batas atau menghasilkan susunan kristal cair, yang pada akhirnya menghambat penggabungan tetesan. Pemilihan jenis emulsifier sangat ditentukan oleh sifat sistem yang akan distabilkan. Sebagai contoh, emulsifier dengan nilai HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance) yang besar lebih sesuai untuk emulsi minyak dalam air, sedangkan nilai HLB rendah cocok untuk emulsi air dalam minyak (McClements, 2015). Polimer, baik yang bersifat hidrofilik, hidrofobik, atau amfifilik, memodifikasi sifat permukaan koloid melalui mekanisme yang berbeda. Polimer dapat teradsorpsi pada permukaan partikel koloid, membentuk lapisan tebal yang memberikan stabilitas sterik. Lapisan ini mencegah pendekatan partikel secara dekat karena adanya tolakan entropik akibat tumpang tindih lapisan polimer yang terlarut. Selain itu, polimer dapat membentuk jaringan tiga dimensi yang menjebak medium pendispersi, menghasilkan struktur gel dengan sifat semi-padat. Dalam sistem busa, polimer seperti protein dapat meningkatkan viskoelastisitas film cair antar gelembung, memperpanjang umur busa (Tadros, 2013).

Fenomena Destabilisasi: Koagulasi, Flokulasi, dan Pecahnya Sistem Koloid

Destabilisasi sistem koloid terjadi ketika gaya tolakan (elektrostatik/sterik) antar partikel teratasi oleh gaya tarik van der Waals. Koagulasi (atau agregasi) adalah proses penggabungan partikel-partikel kecil menjadi agregat yang lebih besar karena reduksi potensial zeta

(penghalang energi) melalui penambahan elektrolit atau perubahan pH. Proses ini bersifat cepat dan seringkali ireversibel. Flokulasi merujuk pada penggabungan partikel melalui mekanisme "bridging", di mana polimer atau makromolekul yang panjang teradsorpsi pada beberapa partikel sekaligus, menjembatani dan mengikatnya menjadi gumpalan (flok) yang lebih longgar dan reversibel. Destabilisasi emulsi dapat terjadi melalui beberapa tahap: pengapungan/penenggelaman (creaming/sedimentation), penggabungan droplet (flocculation), dan akhirnya koalesensi yang menyebabkan pemisahan fase secara total. Sementara itu, keruntuhan busa disebabkan oleh drainase cairan antar lamela dan pecahnya film akibat fluktuasi mekanis atau ketidakstabilan Marangoni (Hunter, 2001).

Implikasi Aktivitas Kimia Permukaan dalam Aplikasi Industri dan Teknologi

Pengetahuan yang komprehensif mengenai sifat permukaan sistem koloid berperan sebagai fondasi bagi beragam kemajuan teknologi di sektor industri. Pada bidang pangan, bahan aktif permukaan seperti lesitin dan ester gliserol digunakan untuk mempertahankan kestabilan produk seperti mayones, es krim, dan margarin, sekaligus menciptakan karakteristik tekstur yang spesifik. Dalam farmasi dan kosmetik, pemanfaatan struktur misel, liposom, serta nanoemulsi berfungsi sebagai sistem pembawa zat aktif obat yang dapat meningkatkan kelarutan dan penyerapannya oleh tubuh, selain itu juga diaplikasikan dalam pembuatan sediaan krim dan losion. Dari sisi nanoteknologi, kemampuan mengendalikan antar muka koloid secara tepat memungkinkan produksi nanopartikel dengan ukuran dan bentuk yang seragam untuk kepentingan katalisis, sensor, maupun perangkat elektronik. Sementara dalam pengelolaan lingkungan, mekanisme penggumpalan dan pembentukan flok diterapkan dalam proses penjernihan air limbah di instalasi pengolahan. Contoh penerapan lain adalah pada upaya peningkatan perolehan minyak melalui penyuntikan campuran surfaktan dan polimer yang bertujuan mengurangi tegangan pada batas minyak-batuan serta menaikkan efisiensi produksi (Jumardi & Santoso, 2022).

KESIMPULAN

Aktivitas kimia permukaan berperan sentral dalam pembentukan dan kestabilan sistem koloid melalui mekanisme nukleasi partikel, adsorpsi surfaktan-polimer, pengaturan energi permukaan, potensial zeta ($>\pm 30$ mV), lapisan ganda listrik, serta interaksi DLVO dan non-DLVO yang mengontrol gaya van der Waals, elektrostatik, dan sterik terhadap koagulasi-flokulasi. Pengaruh pH, kekuatan ionik, serta emulsifier memungkinkan modifikasi muatan permukaan untuk mencegah destabilisasi, sebagaimana terungkap dari tinjauan literatur nasional. Pemahaman komprehensif ini esensial untuk optimalisasi aplikasi industri pangan, farmasi, kosmetik, nanoteknologi, dan pengolahan limbah melalui pengendalian permukaan yang efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, J., Hafizah, M. A. E., Manaf, A., & Andreas. (2020). *The influence of surfactant and protective colloid on polyvinyl acetate emulsion synthesized by emulsion polymerization technique*. SPEKTRA: Jurnal Fisika dan Aplikasinya, 5(3), 169–176.
- Agmo Hernández, V. (2023). An overview of surface forces and the DLVO theory. ChemTexts, 9(4), 1–16.
- Cahyana, A. (2018). Kajian Fenomena Permukaan pada Material Berukuran Nano. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 21(3), 112–120.
- Hidayat, R., & Puspitasari, E. (2021). Analisis Variasi Parameter Permukaan pada Sistem Koloid Berbasis Air. *Jurnal Teknologi Kimia dan Material*, 5(4), 233–241.
- Hunter, R. J. (2001). *Foundations of Colloid Science* (2nd ed.). Oxford University Press.

- Jumardi, J., & Santoso, A. (2022). Aplikasi Teknologi Nanoemulsi dalam Sistem Penghantaran Obat Antikanker: Tinjauan Pustaka. *Jurnal Farmasi Sains dan Praktis*, 8(1), 1-15.
- Khoshnevisan, K., & Barkhi, M. (2015). Information about Zeta Potential. *Encyclopedia of Membranes*, (May), 2063-2064.
- Khotimah, S., & Supardi. (2025). *Pengaruh kecepatan pengadukan terhadap sifat fisikokimia hidroksiapatit cangkang kerang hijau (Perna viridis) sebagai bahan dasar biomaterial*. *Jurnal Ilmu Fisika dan Terapannya*, 12(2), 44-54.
- Kusuma, F., & Widodo, A. (2021). Peran Surfaktan Nonionik dalam Pembentukan Emulsi Stabil untuk Aplikasi Industri Pangan. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 32(1), 45-52.
- Lestari, M., & Pratama, J. (2022). Pengaruh Lingkungan dan pH terhadap Perilaku Koloid Nanopartikel. *Jurnal Sains Material Indonesia*, 17(2), 102-110.
- Mahmudi, R. A., Yusuf, A., & Sutjahja, I. M. (2025). *Effects of surfactants on the stability of nickel ferrite/water nanofluid*. *Jurnal Ilmu Fisika*, 17(1), 31-40.
- Mardiani, N., & Lestari, R. (2018). Kajian Interaksi Antarmuka pada Sistem Koloid Nano-Emulsi untuk Produk Farmasi. *Jurnal Farmasi Indonesia*, 12(3), 150-158.
- Maulidiantingtyas, H., Prasetyo, A. D., Haikal, F., Cahyo, I. N., Istighfarini, V. N., & Prasetyo, A. (2021). *Pengaruh penggantian kation-A/Sr oleh Ba pada morfologi partikel BaSr(1-x)TiO₃ hasil sintesis dengan metode lelehan garam*. *ALCHEMY: Jurnal Penelitian Kimia*, 17(2), 211-218.
- McClements, D. J. (2015). *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques* (3rd ed.). CRC Press.
- Medykowska, M., Peplińska, B., Zioła-Frankowska, A., & Frankowski, M. (2023). Study on electrical double layer nanostructure on zeolitic materials' surface in the presence of impurities of different nature. *Applied Nanoscience*, 13(10), 6737-6748.
- Nurhadi, A. (2020). Potensial Zeta dan Dampaknya terhadap Stabilitas Koloid dalam Berbagai Medium. *Jurnal Rekayasa Material*, 8(1), 14-22.
- Paradisaea, R. S., Putri, S. E., & Hasri. (2024). *Sintesis nanopartikel TiO₂ dan penentuan energi pembentukan secara komputasi*. *Jurnal Chemica*, 25(2), 21-29.
- Pent, M., Pöldmaa, K., & Bahram, M. (2017). Bacterial communities in boreal forest mushrooms are shaped both by soil parameters and host identity. *Frontiers in Microbiology*, 8(May), 1-13.
- Prasetyaningtyas, T., Prasetya, A. T., & Widiarti, N. (2020). *Sintesis nanopartikel perak termodifikasi kitosan dengan bioreduktor ekstrak daun kemangi (Ocimum basilicum L.) dan uji aktivitasnya sebagai antibakteri*. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(1), 1-8.
- Putri, A., & Hartono, Y. (2019). Studi Adsorpsi Ion pada Permukaan Partikel Koloid Berbasis Silika. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 17(2), 89-97.
- Rahmawati, L. (2019). Pengaruh Surfaktan terhadap Stabilitas Emulsi pada Industri Kosmetik. *Indonesian Journal of Applied Chemistry*, 14(1), 55-63.
- Rasmito, A., et al. (2025). Turbidity, total suspended solid, chemical oxygen demand dipengaruhi oleh. *Jurnal Teknologi*, 12(2), 2025-125.
- Ridwan, R. N., Gusrizal, G., Nurlina, N., & Santosa, S. J. (2018). *Sintesis dan studi stabilitas nanopartikel perak tertudung asam salisilat*. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 1(3), 83-90.
- Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Sandjaja, M., & Lestari, M. L. A. D. (2017). *Investigation of effect of adding hydrophobically modified water soluble polymers on the structure and viscosity of anionic vesicle dispersion*. *Indonesian Journal of Chemistry*, 17(1), 86-94.

- Setyawan, T., & Malik, F. (2022). Evaluasi Gaya Elektrostatis dan Sterik pada Stabilitas Koloid Polimer. *Jurnal Material dan Sains Terapan*, 10(2), 74–82.
- Suryani, D., & Arifin, Z. (2020). Pengaruh pH terhadap Potensial Zeta dan Stabilitas Koloid dalam Medium Aqueous. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 8(1), 23–31.
- Susilowati, E., Mahardiani, L., Ariani, S. R. D., & Sulaeman, I. M. (2023). *Synthesis, optimization and antibacterial performance of colloidal silver nanoparticles in chitosan*. Indonesian Journal of Chemistry, 23(6), 1652–1663.
- Tadros, T. F. (2013). *Applied Surfactants: Principles and Applications*. Wiley-VCH.
- Thompson, R. W., et al. (2016). Evaluation of effects of pH and ionic strength on colloidal stability of IgG solutions by PEG-induced liquid-liquid phase separation. *Journal of Chemical Physics*, 145(18).
- Wibowo, T., & Sari, D. (2020). Peran Gaya Antarmuka dalam Stabilitas Sistem Koloid. *Jurnal Kimia Indonesia*, 9(2), 87–95.
- Zahra, U. F. A., Hindryawati, N., & Panggabean, A. S. (2024). *Sintesis dan karakterisasi nanopartikel perak termodifikasi kitosan menggunakan reduktor NaBH₄*. Jurnal Atomik, 9(2), 120–127.