

Investigating the factors affecting the stability of emulsions stabilized by nanoparticles and their application in food industries

Fatemeh Heidari Dalfard¹, Sedighe Tavasoli², Seid Mahdi Jafari^{3,4*}

¹Department of Food Science and Technology, University of Jiroft, Kerman, Iran

²Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³Department of Food Materials & Process Design Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: smjafari@gau.ac.ir

⁴Halal Research Center of IRI, Iran Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2024-5-21
Revised: 2024-8-23
Accepted: 2024-9-15

Keywords:
Pickering emulsion
Nanoparticle
Stability mechanism
Food application

In recent years, researchers have focused on Pickering emulsions, which are stabilized by both hydrophilic and hydrophobic solid nanoparticles. These emulsions offer greater stability and environmental compatibility compared to traditional emulsions. This increased compatibility is largely due to the potential use of stabilizing nanoparticles derived from biological sources, such as protein nanoparticles. Additionally, the irreversible adsorption of colloidal particles at the water-oil interface creates a physical barrier that prevents the collision and interaction of dispersed phase droplets, greatly enhancing the physicochemical stability of Pickering emulsions. The effectiveness of these solid particles in stabilizing emulsions depends on their wettability and shape. Additionally, factors like the type of oil, particle concentration, proportion of each phase, and the sequence in which ingredients are added during emulsion preparation all play a role in determining the stability of the resulting Pickering emulsions. Colloidal particles utilized in stabilizing Pickering emulsions can be derived from different inorganic and organic sources. These particles come in various shapes and sizes based on their origin and how they are produced. Recently, there has been a growing concern about the health impacts of non-edible particles and a rising public interest in natural products. To address this, there has been a significant effort towards developing Pickering emulsions that are stabilized with edible particles. Organic nanoparticles can be prepared using a wide range of natural polymers like polysaccharids and proteins, which have garnered special attention for their biodegradable and biocompatible properties. This has led researchers to focus more on using these particles to stabilize Pickering emulsions in the food industry. In food industry applications, Pickering emulsions can be utilized to create oleogels from the emulsion systems. This allows the transformation of liquid oils with low viscosity into a gel or structured emulsion with a high internal phase, serving as a solid fat substitute. Additionally, they can be used for developing active packaging by incorporating bioactive compounds like antioxidants or antimicrobials into packaging films

for a controlled release during the food storage period. Moreover, these emulsion systems show great promise for developing functional products. This is because, along with water and oil components of the emulsion, the stabilizing particles can also serve as carriers for hydrophilic or hydrophobic bioactive compounds. Such emulsions, characterized by high physicochemical stability, can function effectively as an encapsulation system for bioactive compounds, enhancing both their stability and bioavailability. This review aims to investigate the stabilization mechanism, factors influencing the stability of Pickering emulsions, and the nanoparticles utilized as stabilizers. It also explores the applications of Pickering emulsions in the food industry.

Cite this article: Heidari Dalfard, F., Tavasoli, S., Jafari, S. M. 2024. Investigating the factors affecting the stability of emulsions stabilized by nanoparticles and their application in food industries. *Food Processing and Preservation Journal*, 16(3), 19-54.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/fppj.2024.22467.1814

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



بررسی عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پایدار شده با نانو ذرات و کاربرد آن‌ها در صنایع غذایی

فاطمه حیدری دلفارد^۱، صدیقه توسلی^۲، سیدمهدی جعفری^۳ و^۴

^۱ استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران

^۲ دانش‌آموخته دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران .

^۳ استاده، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: smjafari@gau.ac.ir

^۴ مرکز تحقیقات حلال جمهوری اسلامی ایران، سازمان غذا و داروی ایران، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵</p> <p>واژه‌های کلیدی: امولسیون پیکرینگ نانوذره مکانیسم پایداری کاربرد غذایی</p>	<p>امولسیون‌های پایدار شده با نانوذرات جامد آب دوست و آب گریز که به آن‌ها امولسیون‌های پیکرینگ نیز گفته می‌شود، در سال‌های اخیر، به علت پایداری و سازگاری بیشتر آن‌ها با محیط‌زیست در مقایسه با امولسیون‌های معمولی، مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. سازگاری بیشتر این نوع سامانه‌های امولسیونی با محیط‌زیست، به امکان بالاتر بکارگیری نانو ذرات پایدارکننده با منشأ زیستی مانند نانو ذرات پروتئینی مربوط می‌شود. همچنین جذب برگشت‌ناپذیر ذرات کلئیدی در سطح مشترک آب و روغن، با ایجاد ممانعت کننده فیزیکی مانع از برخورد و تماس گویچه‌های فاز پراکنده و در نتیجه افزایش قابل توجه پایداری فیزیکوشیمیایی امولسیون‌های پیکرینگ می‌گردد. کارایی پایدارکنندگی ذرات جامد عمدتاً به قابلیت ترشوندگی و مورفولوژی آن‌ها بستگی دارد. عوامل مهم دیگری مانند ماهیت روغن، غلظت ذرات، کسر حجمی فازهای تشکیل دهنده و ترتیب افزودن مواد اولیه طی آماده‌سازی امولسیون بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ حاصل مؤثر می‌باشند. ذرات کلئیدی مورد استفاده در تولید و پایداری‌سازی امولسیون‌های پیکرینگ از منابع مختلف غیر آلی و آلی به دست می‌آیند. این ذرات بسته به ماهیت و روش تولید طیف وسیعی از شکل و اندازه را شامل می‌شوند. به دلیل نگرانی در مورد اثرات نامطلوب ذرات غیرخوراکی بر سلامت و افزایش آگاهی و علاقه عمومی به محصولات با منشأ طبیعی، در سال‌های اخیر، توسعه امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با ذرات خوراکی اهمیت قابل توجهی یافته است. طیف وسیعی از پلیمرهای طبیعی می‌توانند به‌منظور تهیه نانوذرات آلی مورد استفاده قرار گیرند. در این رابطه، پلیمرهای طبیعی به دلیل ویژگی‌هایی همچون زیست تخریب‌پذیری و زیست سازگاری به‌طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این‌رو در سال‌های اخیر تلاش محققان به‌سوی استفاده از این ذرات جهت پایداری امولسیون‌های پیکرینگ مورد استفاده در صنعت غذا رونق بیشتری یافته است. از جمله کاربردهای امولسیون‌های پیکرینگ در صنعت غذا می‌توان به استفاده از امولسیون‌های پیکرینگ برای توسعه فناوری تولید اولئوزل بر پایه امولسیون و متعاقباً تبدیل روغن مایع با ویسکوزیته پایین به ژلی نرم یا امولسیون با فاز داخلی بالا و بکارگیری آن به‌عنوان جایگزین</p>

چربی و همچنین توسعه بسته‌بندی‌های فعال با وارد ساختن ترکیبات زیست‌فعال مانند ترکیبات ضد اکسایشی یا ضد میکروب در فرمولاسیون فیلم‌های بسته‌بندی و رهایش کنترل شده آن‌ها طی دوره نگهداری محصولات غذایی اشاره کرد. همچنین این سامانه‌های امولسیون‌ی یک استراتژی امیدوارکننده برای توسعه محصولات عملگرا می‌باشند؛ زیرا علاوه بر فازهای آب و روغن امولسیون، ذرات پایدارکننده نیز می‌توانند به‌عنوان حامل ترکیبات زیست‌فعال عمل کنند. این نوع امولسیون‌ها با پایداری فیزیکی‌شیمیایی بالا، می‌توانند به‌عنوان یک سامانه ریزپوشانی برای ترکیبات زیست‌فعال به‌کاررفته و همچنین پایداری و قابلیت زیست‌دسترس‌پذیری آن‌ها را بهبود بخشند. این مقاله مروری به معرفی، تشریح مکانیسم پایداری، عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ و نانوذرات مورد استفاده به‌عنوان پایدارکننده امولسیون‌های پیکرینگ و کاربرد امولسیون‌های پیکرینگ در صنعت غذا می‌پردازد.

استناد: حیدری دلفار، فاطمه؛ توسلی، صدیقه؛ جعفری، سیدمهدی. (۱۴۰۳). بررسی عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پایدار شده با نانو ذرات و کاربرد آن‌ها در صنایع غذایی. *فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۶ (۳)، ۱۹-۵۴



© نویسندگان.

DOI: 10.22069/fppj.2024.22467.1814

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

امولسیون به مخلوط پایدار دو یا چند مایع غیرقابل امتزاج در یکدیگر گفته می‌شود که به کمک عوامل امولسیون‌کننده، یکی از مایعات به صورت گویچه‌های کوچک در مایع دیگر پخش شده باشد. سیستم‌های امولسیونی کاربرد گسترده‌ای در صنعت غذا دارند. به عنوان مثال، محصولاتمانند کره، بستنی، سس‌ها و فرآورده‌های گوشتی را نمی‌توان بدون سیستم‌های امولسیونی تولید کرد (۱). از انواع سیستم‌های امولسیونی می‌توان به امولسیون‌های ساده آب در روغن یا روغن در آب، امولسیون‌های دو یا چندگانه آب در روغن در آب یا روغن در آب در روغن و همچنین نانو و میکرو امولسیون‌ها و در نهایت امولسیون‌های پیکرینگ اشاره نمود.

تشکیل امولسیون یک فرایند دینامیک و غیرخود به خودی می‌باشد که برای پراکنده ساختن یکی از مایعات به صورت گویچه‌های کوچک در فاز پیوسته نیاز به مقدار قابل توجهی انرژی مکانیکی دارد. از جمله روش‌های تولید امولسیون می‌توان به تکان دادن ساده، مخلوط کردن با سیستم‌های روتور-استاتور، تزریق مایع از طریق غشاهای متخلخل، هموژنایزرهای فشار بالا و ژنراتورهای فراصوت اشاره نمود. برای شکستن یک گویچه به اندازه‌های کوچک‌تر، شکل قطره باید تغییر یابد و این تغییر در طول اعمال نیروی برشی یا هم زدن رخ می‌دهد. قابل ذکر است، ویژگی‌های امولسیون بسته به فاکتورهای مختلف مانند دما، سرعت هم زدن، زمان و فشار قابل تغییر است. به‌طور کلی برای تشکیل امولسیون اختلاط ناپذیری فازهای امولسیون، هم زدن به‌منظور پراکنده ساختن یک مایع در مایع دیگر و وجود امولسیفایرها ضروری می‌باشند (۲).

فرایندهای مختلفی می‌توانند موجب ناپایداری فیزیکوشیمیایی امولسیون‌ها طی دوره نگهداری و در نهایت شکسته شدن آن‌ها گردند. از جمله فرایندهای ناپایدارکننده می‌توان به تفکیک گرانشی^۱ اشاره نمود. در این نوع ناپایداری گویچه‌های فاز پراکنده تحت نیروی گرانش یا نیروی گریز از مرکز تجمع یافته و به تدریج لایه‌ای غلیظ را در بالای نمونه امولسیون تشکیل می‌دهند. بر اساس قانون استوکس سه روش برای جلوگیری از این پدیده وجود دارد که عبارتند از: کاهش میانگین اندازه گویچه‌های فاز پراکنده، کاهش اختلاف دانسیته فازهای امولسیون و افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته. لازم به ذکر است پدیده خامه‌ای شدن در امولسیون‌های روغن در آب رایج‌تر است، در حالی که امولسیون‌های آب در روغن تمایل بیشتری به ته‌نشینی دارند.

انبوهش^۲، نوع دیگری از ناپایداری است که در سیستم‌های امولسیونی مشاهده می‌شود. این ناپایداری زمانی رخ می‌دهد که دافعه کافی برای دور نگه داشتن گویچه‌های فاز پراکنده از هم وجود نداشته باشد تا بر جاذبه ولندروالس غلبه کند. در نتیجه گویچه‌ها بدون تغییر ماهیت به یکدیگر متصل می‌شوند. در این نوع ناپایداری عموماً ادغام گویچه‌ها جهت تشکیل گویچه بزرگ‌تر رخ نداده؛ در نتیجه کاهش سطحی وجود ندارد. در صورتی که نزدیک شدن دو یا چند گویچه فاز پراکنده منجر به تشکیل گویچه بزرگ‌تر گردد، این پدیده برگشت‌ناپذیر در هم آمیختن^۳ نامیده می‌شود. این ناپایداری به صورت جزئی یا کامل رخ می‌دهد. در حالت جزئی اتصال گویچه‌ها منجر به تشکیل قطره بزرگ‌تر نمی‌گردد؛ در حالی که حالت کامل ممکن است حتی به معکوس شدن فاز بیانجامد. مهم‌ترین ویژگی

³ Coalescence

¹ Creaming or Sedimentation

² Flocculation

این نوع ناپایداری، افزایش اندازه گویچه‌های فاز پراکنده و کاهش سطح است.

نوع دیگر ناپایداری امولسیون رسیدگی استوالد^۱ است. این ناپایداری بیشتر در امولسیون‌های با توزیع اندازه گسترده گویچه‌های فاز پراکنده رخ می‌دهد. برخورد بین گویچه‌ها به ایجاد یک گویچه کوچک‌تر و بزرگ‌تر منجر می‌شود. گویچه‌های کوچک‌تر تشکیل شده یا در فاز پیوسته حل شده و یا در سطح فاز پیوسته قرار می‌گیرند. برگشت فاز نیز فرایندی است که طی آن امولسیون روغن در آب به امولسیون آب در روغن و یا بالعکس تبدیل می‌شود. این ناپایداری به دلایل مختلفی از جمله متبلور شدن چربی در امولسیون، تغییر شکل هندسی مولکول فعال‌کننده سطحی در سیستم‌های امولسیون رخ می‌دهد (۳، ۴). به‌طور کلی هریک از فرایندهای نام‌برده می‌تواند منجر به جدایی فازهای امولسیون و یا تخریب ساختار آن گردد؛ لذا توسعه سیستم‌های امولسیون پایدار در برابر هریک از این ناپایداری‌ها نیازی ضروری جهت افزایش کاربرد آن‌ها در محصولات مختلف، به‌ویژه محصولات غذایی می‌باشد.

امولسیون‌های معمول پایدار شده با سورفکتانت‌ها یا ماکرو مولکول‌های آمفی‌فیل با حلالیت خوب (پروتئین‌ها یا پلی‌ساکاریدها) معمولاً از نظر ترمودینامیکی پایداری بالایی نداشته و تمایل به دو فاز شدن طی دوره نگهداری دارند (۵، ۶). در سال‌های اخیر، کاربرد امولسیون‌های پیکرینگ توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. برخلاف امولسیون‌های معمول پایدار شده با امولسیفایرهای مولکولی، پیکرینگ امولسیون‌های پایدار شده با ذرات کلوئیدی آلی یا غیرآلی، پایداری بالاتری را در برابر پدیده‌های انعقاد و رسیدگی استوالد، نشان می‌دهند (شکل ۱) (۷، ۸). دلیل اصلی این تفاوت با توجه به

مکانیسم متمایز پایدارشوندگی آن‌ها توضیح داده می‌شود. پایدارسازی امولسیون‌های معمول عمدتاً با ترکیبی از تثبیت الکتروستاتیک، کاهش کشش بین سطحی و تثبیت فضایی با کمک سورفکتانت‌ها یا ماکرومولکول‌های محلول انجام می‌شود. جذب سطحی امولسیفایرها در سطح مشترک آب و روغن در این سیستم‌های امولسیونی معمولاً برگشت‌پذیر است. در امولسیون‌های پیکرینگ ذرات جذب شده در سطح مشترک آب و روغن مانع فیزیکی را ایجاد کرده که می‌تواند مانع از برخورد و تماس گویچه‌های فاز پراکنده شود. قابل‌ذکر است، جذب این ذرات کلوئیدی در سطح مشترک برگشت‌ناپذیر می‌باشد. به دلیل جذب ذرات، امولسیون‌های پیکرینگ بار سطحی بیشتر و سطوح مشترک از ضخامت بالاتری نسبت به امولسیون‌های معمولی برخوردار می‌باشند (۹).

ذرات کلوئیدی با قابلیت بالای پایدارکنندگی برای امولسیون‌های پیکرینگ باید دارای ویژگی‌های مشخصی باشند: (۱) آن‌ها باید به‌طور نسبی توسط هر دو فاز آب و روغن قابلیت ترشوندگی داشته باشند. (۲) بار سطحی آن‌ها نباید خیلی بالا باشد، در غیر این صورت به دلیل اثرات دافعه الکتروستاتیک قادر نیستند به‌طور قوی در سطح مشترک جذب شوند. (۳) نانوذرات باید از اندازه‌ای کوچک‌تر از اندازه گویچه‌های روغن برخوردار باشند (۱۰، ۱۱).

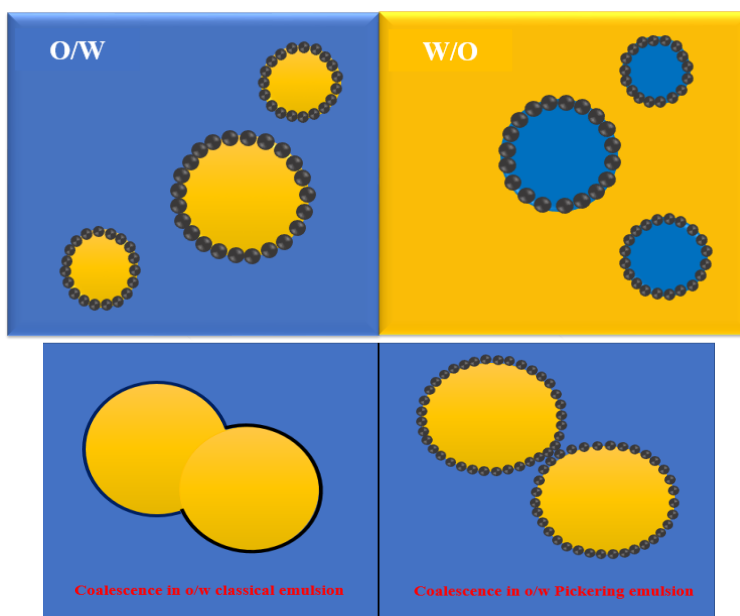
قابلیت ترشوندگی و اندازه ذرات دو عامل اصلی مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ می‌باشند. با توجه به آب‌گریزی ذرات، امولسیون‌های پیکرینگ ساده را می‌توان به دو نوع اصلی روغن در آب (O/W) و آب در روغن (W/O) تقسیم کرد (۱۲). قابلیت تر شدن مناسب و اندازه ذرات باعث می‌شود ذرات به‌طور برگشت‌ناپذیر به سطح مشترک آب و روغن جذب شده و با ایجاد یک ممانعت فضایی از تجمع

¹ Ostwald ripening

کاربردهای اصلی امولسیون‌های پیکرینگ، تحویل مواد زیست‌فعال است. بسیاری از مطالعات تأیید کرده‌اند که می‌توان از امولسیون‌های پیکرینگ برای تحویل ترکیبات مغذی مانند کورکومین و هیسپریدین استفاده کرد. علاوه بر این، برخی از مواد زیست‌فعال مانند کریستال‌های کورکومین را می‌توان به‌طور مستقیم به‌عنوان پایدارکننده امولسیون‌های پیکرینگ مورد استفاده قرارداد (۱۴). با توسعه امولسیون‌های پیکرینگ در سال‌های اخیر، کاربردهای بیشتری از این سیستم‌های امولسیونی مانند جایگزین‌های چربی، پوشش‌های خوراکی و غیره ارائه شده است که در ادامه بحث خواهند شد. در این بررسی، اصول اولیه مربوط به امولسیون‌های پیکرینگ مانند مکانیسم پایداری‌شوندگی و عوامل مؤثر بر آن مورد بحث واقع شد. علاوه بر این به نانوذرات مورد استفاده جهت پایداری‌سازی امولسیون‌های پیکرینگ و همچنین کاربرد امولسیون‌های پیکرینگ اشاره می‌شود.

گوچه‌های فاز پراکنده جلوگیری کنند. بعلاوه، امولسیون‌های پیکرینگ به دلیل عدم بکارگیری سورفکتانت‌ها به‌عنوان دوستدار محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شوند؛ که در کاربردهای غذایی، این مزیت حائز اهمیت بوده و موجب افزایش ایمنی و در نتیجه مقبولیت محصول از دید مصرف‌کننده می‌گردد. در این راستا، تنها امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با ذرات با درجه خوراکی، قابل‌استفاده در فرمولاسیون محصولات غذایی می‌باشند (۱۳). ذرات با درجه خوراکی عمدتاً شامل ذرات پلی‌ساکاریدی، پروتئینی، فلاونوئیدی و کریستال‌های چربی می‌شوند. لازم به ذکر است، برخی از این ذرات دارای ویژگی‌های مطلوب جهت تولید و پایداری‌سازی امولسیون‌های پیکرینگ نبوده و نیاز به برخی اصلاحات برای رسیدن به عملکرد مطلوب دارند.

امولسیون‌های پیکرینگ با پایداری عالی و قابلیت خوراکی محدوده کاربرد وسیعی دارند. یکی از



شکل ۱- بالا: امولسیون‌های پیکرینگ آب در روغن و روغن در آب؛ شکل پایین: تفاوت پایداری امولسیون پیکرینگ با امولسیون متداول در مقابل ناپایداری کوآلوسنس.

Figure 1. Top schematic: Pickering water-in-oil (W/O) and oil-in-water (O/W) emulsions; Bottom schematic: Comparison of stability between Pickering emulsions and classical emulsions regarding coalescence.

مکانیسم پایدارشوندگی امولسیون‌های پیکرینگ: خواص امولسیون می‌تواند بدون تغییر باقی بماند که این ویژگی به‌عنوان "پایداری امولسیون" شناخته می‌شود. با این حال، از آنجایی که امولسیون‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند، خواص آن‌ها در طول زمان تغییر خواهد کرد. بی‌ثباتی سیستم‌های امولسیونی می‌تواند تحت تأثیر مکانیسم‌های مختلفی رخ دهد. قطرات با چگالی بیشتر از فاز پیوسته تمایل به ته‌نشین شدن^۱ و تشکیل یک لایه در کف امولسیون دارند. در مقابل قطرات با چگالی کمتر نسبت به فاز پیوسته، تمایل به بالا رفتن و تشکیل لایه‌ای از قطرات در بالای امولسیون دارند که در این حالت خامه‌ای شدن^۲ رخ می‌دهد (۱۳، ۱۴).

در مقایسه با امولسیفایرهای رایج و امولسیون‌های پایدار شده توسط آن‌ها، امولسیون‌های پیکرینگ از پایداری فیزیکی شیمیایی بالاتری برخوردار می‌باشند (شکل ۱، تصویر شماتیک پایین). این پایداری بالا به واسطه جذب برگشت‌ناپذیر ذرات جامد با قابلیت مرطوب‌شوندگی مناسب، تشکیل لایه محافظ سخت و ایجاد سطوح مشترک (روغن/آب) قابل کنترل بوده که امکان ریزپوشانی، انتقال و رهایش کنترل شده ترکیبات زیست‌فعال را نیز فراهم می‌سازند. پایداری بالاتر امولسیون‌های پیکرینگ در برابر ناپایداری‌هایی مانند رسیدگی استوالد و ادغام مزیت فوق‌العاده آن‌ها نسبت به امولسیون‌های معمولی بوده که به‌کارگیری آن‌ها را در تولید محصولات متنوع با شرایط مختلف امکان‌پذیر می‌سازد (۱۵، ۱۶).

به‌طور کلی چندین عامل را می‌توان در ایجاد پایداری فوق‌العاده سیستم‌های امولسیونی پیکرینگ مؤثر دانست؛ عواملی مانند انرژی نسبتاً بالای اتصال ذرات جامد به سطوح مشترک که موجب جذب تقریباً

دائمی آن‌ها در سطح گویچه‌های فاز پراکنده می‌گردد؛ ایجاد ممانعت فضایی محدودکننده حرکت ذرات در لایه؛ وجود فشار موئینه در فیلم مایع مانع تخریب فیلم نازک و اثر رئولوژیکی فیلم که بر نشت آن تأثیرگذار است (۱۷). در عمل، علاوه بر موارد اشاره شده، تشکیل شبکه ذرات در فضای بین گویچه‌های فاز غیرپیوسته نیز می‌تواند عامل مؤثر دیگری بر پایداری‌سازی بالای امولسیون‌های پیکرینگ باشد.

عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ: کارایی پایدارکنندگی ذرات جامد عمدتاً به ترشوندگی و مورفولوژی آن‌ها بستگی دارد. پارامترهای مهم دیگر شامل ماهیت روغن، غلظت ذرات، کسر حجمی فازهای تشکیل‌دهنده و ترتیب افزودن مواد اولیه طی آماده‌سازی امولسیون می‌باشند.

خاصیت ترشوندگی: جذب یک ذره در فصل مشترک آب و روغن به‌شدت تحت تأثیر قابلیت ترشوندگی آن است که به زاویه تماس (θ) آن در فصل مشترک بستگی دارد؛ لذا ترشوندگی ذرات در فصل مشترک آب و روغن نوع امولسیون پیکرینگ (W/O یا O/W) را نیز تعیین خواهد کرد (۱۸). طبق قانون بانکروفت^۳ ذرات با ماهیت آب دوست (دارای زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه) و آب‌گریز (دارای زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه) به ترتیب برای پایداری‌سازی امولسیون‌های روغن در آب و آب در روغن مناسب می‌باشند. ذراتی که به‌طور کامل در فازهای آب یا روغن تر شوند، در این فازها پراکنده مانده و قادر به تشکیل سیستم امولسیونی پایدار نمی‌باشند (شکل ۲) (۱۸، ۱۹). انرژی مورد نیاز برای حذف یک ذره از سطح مشترک آب و روغن توسط معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta E = \pi r^2 \sigma (1 - \cos \theta)^2$$

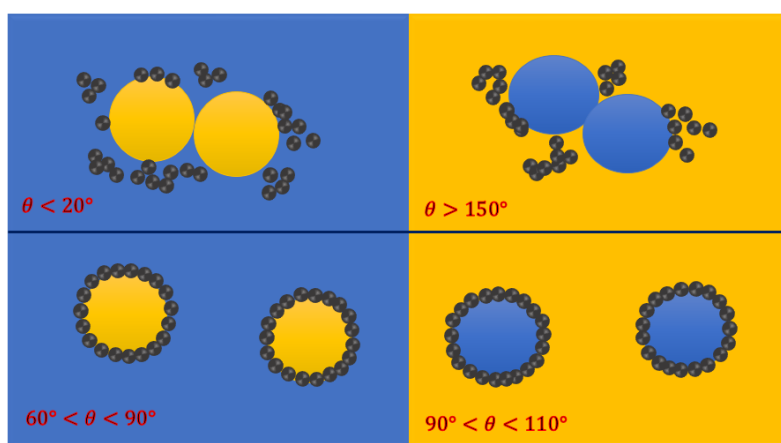
³ Bancroft rule

¹ Sedimentation

² Creaming

ترشوندگی متوسطی از خود نشان دهند. در این شرایط انرژی لازم برای جدا شدن یک ذره از فصل مشترک در بالاترین حد خود قرار خواهد داشت. به‌طور کلی اتصال برگشت ناپذیر ذرات در فصل مشترک زمانی اتفاق می‌افتد که زاویه تماس بین ۳۰ تا ۱۵۰ درجه باشد؛ که در آن انرژی مورد نیاز برای ذرات جهت جداسازی بسیار بیشتر از انرژی براونی است (۲۱).

۲ شعاع ذرات، σ کشش سطحی در حد واسط آب و روغن است. برای ذرات با زاویه تماس متوسط انرژی جداسازی بسیار بیشتر از انرژی حرارتی است و جذب ذرات در سطح مشترک آب و روغن برگشت‌ناپذیر است (۲۰).
مطالعات نشان داده‌اند که امولسیون‌های پیکرینگ زمانی به پایداری بهینه دست می‌یابند که ذرات



شکل ۲- تاثیر قابلیت ترشوندگی بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ

Figure 1. The effect of wettability on the stability of Pickering emulsions.

امولسیون‌های پیکرینگ ایفا می‌کنند. قابل ذکر است که شکل ذرات می‌تواند با تغییر ترشوندگی ذرات و تأثیر بر برهم‌کنش بین ذرات هم‌جوار، تأثیر عمیقی بر پایداری‌سازی این سیستم‌های امولسیون‌ی داشته باشد (۲۳).

ذرات کروی گسترده‌ترین ذرات کلئیدی مورد مطالعه بوده و عمدتاً شامل سه نوع می‌باشند: (۱) ذرات کروی معدنی مانند نانوذرات سیلیکا، تیتانیوم دی‌اکسید، نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن و کلسیم کربنات (۲) ذرات کروی آلی مانند پلی استایرن و کیتوزان (۳) ذرات بیوژنیک مانند گرانول نشاسته، پروتئین زئین، آب‌پنیر و لاکتوفرین. پیشرفت‌های صورت گرفته در تحقیقات علمی، تنوع سورفکتانت‌های کلئیدی مانند ذرات بیضوی^۱

به‌طور کلی کارایی نانوذرات به‌عنوان پایدارکننده به میزان زیادی به خاصیت ترشوندگی آن‌ها بستگی دارد و این ویژگی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر آب‌گریزی ذرات قرار دارد (۹). خاصیت ترشوندگی نانوذرات را می‌توان با اصلاح سطح نانوذرات تنظیم کرد.

شکل نانوذرات: ذرات جامد را می‌توان بر اساس شکل آن‌ها به دو نوع اصلی طبقه‌بندی کرد: کروی منظم و غیرکروی با مورفولوژی ناهمسان (میله‌ای، دیسکی، مکعبی و لوله‌ای) (۲۲). شکل ذرات کلئیدی پایدارکننده تحت تأثیر عواملی مانند منشأ، خواص، ساختارها و روش‌های آماده‌سازی آن‌ها تعیین می‌گردد. شکل‌های مختلف نانوذرات منجر به تفاوت در چگالی، انرژی جذب ذرات و نیروهای مویرگی می‌شود که همگی نقش مهمی در پایداری‌سازی

¹ Ellipsoidal Particles

دایمر^۱، میله‌ای^۲ و ذرات ورقه‌ای^۳ شکل را گسترش داده است.

نوع و مورفولوژی ذرات جامد می‌تواند ویژگی‌های امولسیون پیکرینگ را تعدیل کند. به‌طور خاص شکل ذرات بر رفتار آن‌ها در سطح مشترک و در نتیجه توانایی آن‌ها در پایداری امولسیون مؤثر است. انرژی دفع ذرات با شکل‌های مختلف به پارامترهای مختلفی بستگی دارد؛ برای مثال برای ذرات کروی به کشش سطحی، شعاع نانوذرات و زاویه تماس بستگی دارد؛ درحالی‌که برای ذرات میله‌ای به طول، قطر و ماهیت آب‌دوست یا آب‌گریزی^۴ آن‌ها بستگی دارد (۷، ۲۳). ذرات میله‌ای مانند نانولوله‌های کربن و نانوکریستال‌های سلولز، به‌طور موفقیت‌آمیزی به‌عنوان سورفکتانت‌های کلوئیدی برای پایداری امولسیون‌های پیکرینگ تهیه و به کار گرفته شدند (۲۲، ۲۴).

ذرات دایمر از دو حباب مجزا تشکیل شده‌اند و بسته به اندازه دو حباب ممکن است شکلی شبیه به دمبل یا شبیه به قارچ نشان دهند. برای مثال، ذرات دایمر آمفی‌فیل با یک حباب آب‌گریز پلی استایرن و حباب آب‌دوست سیلیکا می‌تولند به‌طور موفقیت‌آمیزی امولسیون‌های آب در روغن را پایدار سازند. ذرات ورقه‌ای اساساً دوبعدی بوده و سورفکتانت‌های مناسبی برای امولسیون‌های پیکرینگ می‌باشند. از ذرات ورقه‌ای می‌توان به اکسیدهای گرافن، خاک رس لاپونیت و هیدروکسیدهای دولایه اشاره نمود. از آنجایی‌که ذرات ورقه‌ای عمدتاً دارای بار سطحی می‌باشند، عملکرد آن‌ها در تشکیل امولسیون و پایداری به شدت تحت تأثیر الکترولیت‌ها و pH قرار می‌گیرد. اضافه کردن الکترولیت‌ها یا تغییر مقدار pH می‌تواند پتانسیل زتا ذرات ورقه‌ای را کاهش داده

که جذب آن‌ها را بر سطح مشترک و در نتیجه تشکیل و پایداری امولسیون را تسهیل می‌کند.

اندازه نانوذرات: اندازه نانوذرات، دو ویژگی کلیدی پایداری و اندازه گویچه‌های فاز پراکنده امولسیون پیکرینگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ذرات کوچک‌تر تمایل به جذب سریع‌تر در فصل مشترک آب و روغن دارند و هنگام الحاق قطرات پراکنده مانند یک مانع قوی عمل می‌کنند. این رفتار نانوذرات به جلوگیری از الحاق قطرات و پایداری امولسیون کمک می‌کند (۲۵).
 با این حال، مطالعات نشان می‌دهد که حفظ اندازه ذرات در محدوده خاصی برای دستیابی به بهترین پایداری ضروری است. به‌عبارت‌دیگر، ذرات جامد با اندازه خیلی بزرگ یا خیلی کوچک ممکن است اثر منفی بر پایداری امولسیون داشته‌باشند. برای مثال، امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با نانوذرات نشاسته سیب‌زمینی و ذرت با قطر ۱۰۰ تا ۲۲۰ نانومتر در مقایسه با نمونه‌های با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر یا بیشتر از ۲۲۰ نانومتر، پایداری بهتری از خود نشان دادند (۲۶).

غلظت نانوذرات: غلظت ذرات کلوئیدی در فاز پیوسته نیز یک فاکتور مهم است که می‌تواند بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ تأثیر بگذارد. در امولسیون‌های متداول برای رسیدن به یک عملکرد خوب در پایداری امولسیون، غلظت سورفکتانت‌های مولکولی در فاز پیوسته باید بالاتر از غلظت بحرانی میسل باشد. در مقادیر بالاتر از سطح بحرانی، سورفکتانت‌های مولکولی میسل تشکیل داده و جذب سطحی آن‌ها بر سطح قطره به حداکثر مقدار خود می‌رسد. ذرات جامد که به‌عنوان سورفکتانت‌های کلوئیدی عمل می‌کنند، متفاوت از سورفکتانت‌های مولکولی می‌باشند. این ذرات ابتدا بر سطح گویچه‌های

³ Flaky particles

⁴ Amphiphilicity

¹ Dimer particles

² Rod-like particles

بر پایداری امولسیون اثر بگذارد. از سوی دیگر، نوع فاز پیوسته و پراکنده بر قدرت جذب ذرات در فصل مشترک آب و روغن مؤثر است. به طوری که افزایش قطبیت فاز پراکنده استفاده شده در امولسیون می‌تواند کشش بین سطحی فصل مشترک آب و روغن را کاهش داده؛ در نتیجه انرژی جداسازی ذرات از فصل مشترک آب و روغن کاهش می‌یابد. فاز آبی نیز بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ، عمدتاً با تغییر خواص ذرات، تأثیر می‌گذارد. pH های مختلف فاز آبی و قدرت‌های یونی، بار روی سطح ذرات را تغییر داده و متعاقباً بر تعامل بین ذرات جامد تأثیر می‌گذارند (۲۴).

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{po} - \gamma_{pw}}{\gamma_{ow}} \quad (1)$$

معادله یانگ: γ_{po} ، γ_{pw} و γ_{ow} به ترتیب کشش بین سطحی ذره-روغن، ذره-آب و روغن-آب می‌باشند. جزء حجمی فازهای تشکیل‌دهنده امولسیون نیز با تأثیر بر اندازه گویچه‌های فاز پراکنده و نوع امولسیون اثر قابل توجهی بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ دارند. طبق نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، با افزایش جزء حجمی روغن، اندازه گویچه‌های فاز پراکنده نیز افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش جزء حجمی روغن و متعاقباً کاهش جزء حجمی فاز پیوسته آبی، غلظت نانوذرات کلئیدی جهت پوشش سطح گویچه‌های فاز پراکنده و پایدارسازی لایه بین سطحی شکل گرفته در طول تشکیل امولسیون کاهش یافته، در نتیجه با تضعیف سد ممانعت کننده نانوذرات در سطح مشترک، امکان افزایش اندازه گویچه‌ها به دنبال کوالسنس ناشی از انبوهش و رسیدگی استوالد فراهم می‌گردد. از سوی دیگر، تراکم بالای گویچه‌های روغن احاطه شده توسط نانوذرات در پیکرینگ امولسیون‌های با درصد بالای روغن و ایجاد شبکه نانوذرات بین گویچه‌های مجاور موجب کاهش توانایی حرکت آن‌ها و ارتباط بین گویچه‌ها شده و بدین ترتیب، ضمن

فاز پراکنده، به‌طور برگشت‌ناپذیری جذب شده و سطح آن‌ها را می‌پوشانند. هنگامی که غلظت ذرات پایدارکننده افزایش می‌یابد، ذرات اضافی ساختار شبکه‌ای را در اطراف هر گویچه تشکیل داده که ضمن جداسازی آن‌ها، با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، پایداری امولسیون را بهبود می‌بخشند. در غلظت پایین ذرات، امولسیون‌ها از پایداری مناسبی برخوردار نمی‌باشند؛ زیرا گویچه‌های فاز پراکنده تا حدی توسط نانوذرات پوشیده شده و به‌ندرت نانوذرات اضافی در فاز پیوسته وجود دارند (۶، ۲۷).

تأثیر غلظت ذرات بر امولسیون پیکرینگ نیز عمدتاً شامل سه فاکتور است: چگالی ذرات بر سطح گویچه‌های فاز پراکنده، اندازه گویچه‌ها و ویسکوزیته سیستم امولسیون. به‌طور کلی، چگالی ذره بر سطح گویچه تا زمانی که گویچه‌ها به‌طور کامل توسط ذرات، با افزایش غلظت ذره، پوشش داده شوند، افزایش خواهد یافت. درحالی که اندازه گویچه‌ها، همزمان با افزایش غلظت ذرات تا زمانی که به حداقل مقدار برسد، کاهش می‌یابد. برای یک سیستم با نسبت ثابت آب به روغن سطح کل قطرات با کاهش اندازه گویچه افزایش می‌یابد؛ بنابراین با افزایش غلظت ذرات، سطح کل که می‌تواند به‌طور کامل توسط ذرات پوشش داده شود، افزایش یافته و اندازه گویچه می‌تواند کاهش یابد. افزایش بیشتر در غلظت ذرات به ذرات اضافی در فاز پیوسته منجر خواهد شد که ممکن است ضمن جذب چندلایه بر روی سطح گویچه‌ها، ساختار شبکه‌ای سیمانی را تشکیل دهد که منجر به ظهور ژل‌های امولسیونی می‌گردد (۲۷).

نوع و کسر حجمی فازهای مختلف: با توجه به معادله یانگ (۱) اندازه زاویه تماس به میزان قابل توجهی به فاز روغنی بستگی دارد. بنابراین انتخاب نوع روغن بسیار حائز اهمیت است. تغییر قطبیت فاز روغن با تأثیر بر اندازه زاویه تماس می‌تواند

یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که دافعه الکتروستاتیک محدود باعث می‌شود که ذرات متصل نشده به هم نزدیک شده و شبکه‌هایی بین گویچه‌ها تشکیل دهند. تصور بر این است که این شبکه‌ها دارای توانایی کافی برای جلوگیری از نزدیک شدن و ادغام گویچه‌ها بوده و به‌طور بالقوه تأثیر قابل توجهی بر افزایش ویسکوزیته و پایداری امولسیون دارند (۳۶).

انواع نانوذرات: ذرات کلئیدی مورد استفاده در تولید و پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ از منابع مختلف غیرآلی (سیلیکا، هیدروکسی آپاتیت، اکسید آهن، رس و موارد دیگر) و آلی (مانند پلیمرهای آلی و بیوپلیمرهای طبیعی) به دست می‌آیند. این ذرات بسته به ماهیت و روش تولید طیف وسیعی از شکل و اندازه را شامل می‌شوند (۳۷).

نانوذرات غیر آلی: تحقیقات بسیاری بر امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده توسط نانوذرات غیرآلی انجام شده است. این گروه از نانوذرات، به دلیل در دسترس پذیری تجاری، اندازه ذرات مختلف و کاملاً مشخص، مساحت سطح و آب‌گریزی قابل تنظیم مورد توجه می‌باشند. در مطالعات بسیاری این ذرات به‌عنوان ذرات با درجه غذایی نامبرده شده و با اطلاعات سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA¹) و سازمان امنیت غذایی اروپا (EFSA²) مطابقت دارند. برای مثال به گفته FDA، سیلیکا و همچنین اشکال نامحلول سیلیکات‌ها به‌طور کلی برای استفاده مستقیم در مواد غذایی بی‌خطر شناخته می‌شوند. EFSA همچنین گزارش داده است که سیلیکات‌ها (برای مثال دی‌اکسید سیلیکون و آمورف) افزودنی‌های غذایی تأیید شده در اتحادیه اروپا بوده؛ در نتیجه دی‌اکسید سیلیکون می‌تواند به‌طور ایمن در مواد غذایی به مقدار بیش از ۱۵۰۰ میلی‌گرم در روز استفاده گردد (۳۸).

ایجاد ساختار شبه ژل و افزایش ویسکوزیته، از فرایند ادغام گویچه‌های روغن و یا خامه‌ای شدن جلوگیری می‌کند (۲۸-۳۳). اگر چه برخی از محققین نیز به معکوس شدن فاز در نمونه‌های پیکرینگ امولسیون با افزایش جزء حجمی روغن اشاره کردند (۳۴، ۳۵).

pH و قدرت یونی: نانوذرات با ترشوندگی سطحی قابل تغییر گزینه مناسبی برای تولید امولسیون‌های روغن در آب یا آب در روغن می‌باشند. تغییرات pH، آب‌گریزی و متعاقباً ترشوندگی سطحی نانوذرات را تغییر می‌دهد؛ بنابراین از تغییر pH محلول می‌توان برای تنظیم ذرات در فصل مشترک آب و روغن استفاده و بر نوع امولسیون تأثیر گذاشت. این تغییرات تأثیر قابل توجهی را بر فعل و انفعالات الکتروستاتیک بین ذرات و رفتار جذب بین سطحی آن‌ها نشان داده است. این امر به‌نوبه خود می‌تواند منجر به پراکندگی یا انبوهش گویچه‌های فاز پراکنده گردد. وقتی مقدار pH به نقطه ایزو الکتریک می‌رسد، دافعه الکتروستاتیک بین ذرات ضعیف است و ترشوندگی در دو فاز کمتر می‌شود؛ در نتیجه، اندازه ذرات امولسیون افزایش یافته که منجر به ناپایداری آن می‌شود. برای مثال در یک مطالعه، نانوذرات نشاسته بسته به سطح pH درجات مختلفی از آب‌گریزی را نشان دادند. امولسیون‌های پیکرینگ تولید شده توسط نانوذرات مذکور، ویسکوزیته بالایی را از خود نشان داده و در سطوح pH برابر با ۱۰ و ۶ پایدار ماندند (۲۳، ۲۵).

قدرت یونی نیز یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پیکرینگ است و تغییرات آن تحت تأثیر تغییرات نوع و مقدار الکترولیت در فاز پیوسته امولسیون می‌باشد. تغییر قدرت یونی با تأثیر بر بارهای سطحی و آب‌گریزی نانوذرات قادر به تغییر رفتار جذبی آن‌ها در سطح مشترک، ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون و متعاقباً پایداری آن است.

² European Food Safety Authority

¹ Food and Drug Administration

به‌طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این رو در سال‌های اخیر تلاش محققان به‌سوی استفاده از این ذرات جهت پایداری امولسیون‌های پیکرینگ افزایش یافته است (۲۶). چندین نکته برای انتخاب و یا طراحی بیوذرات مناسب جهت آماده‌سازی امولسیون‌های پیکرینگ پایدار باید در نظر گرفته شود: (۱) ذرات باید تولنایی پایدارسازی امولسیون برای مدت‌زمان مشخصی را دارا باشند؛ (۲) باید به‌طور کامل از ترکیبات طبیعی و با استفاده از روش‌های مناسب تولید شوند؛ (۳) قادر به حفظ پایداری امولسیون طی فرآوری، نگهداری و کاربردهای بعدی باشند؛ (۴) فاقد اثرات منفی بر کیفیت محصول نهایی باشند (۳۷).

انواع مختلفی از پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، لیپیدها و بیوپلیمرهای هیبریدی (ترکیبی از دو یا چند بیوپلیمر) در مطالعات مختلف استفاده و مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱) (۳۸). بین ذرات خوراکی مطالعه شده، ذرات بر پایه پروتئین یا پلی‌ساکارید به دلیل اثرات بیولوژیک قابل‌توجه، قیمت پایین و دسترس‌پذیری بالاتر در طبیعت، توجه بیشتری را به خود معطوف ساخته‌اند؛ لذا در سال‌های اخیر توجه به استفاده از نانوذرات زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پروتئین / پلی‌ساکارید در صنعت دارو و غذا با اهداف مختلف از ریزپوشانی ترکیبات زیست‌فعال تا تولید امولسیون‌های ساختار یافته افزایش یافته است.

در مطالعات صورت گرفته، سه روش اصلی برای تولید طیف وسیعی از ذرات بیوپلیمری بکار گرفته شده است: (۱) جداسازی از منابع طبیعی با روش‌هایی مانند انحلال، سانتریفیوژ، فیلتراسیون؛ (۲) شکستن ساختارهای بیولوژیکی ماکرو با روش‌های top-down شامل هموژنیزاسیون، هیدرولیز و آسیاب و (۳) شکل‌گیری ساختارهای کلوئیدی جدید از واحدهای سازنده کوچک‌تر با روش‌های bottom-up مانند تجمع، اتصال عرضی، کریستالیزاسیون و رسوب.

نانوذرات سیلیکا دارای خواص منحصر به فردی مانند پایداری شیمیایی بالا، زیست‌سازگاری و رهایش هدفمند و کنترل شده می‌باشند. باند Si-O مسئول پایداری بالاتر این نانوذرات است. نانوذرات سیلیکا به دلیل کنترل دقیق اندازه و توزیع ذرات، سهولت سنتز و اصلاح سطح قابل تنظیم، انتخاب‌های خوبی برای استفاده به‌عنوان حامل‌های ترکیبات زیست‌فعال می‌باشند. سیلیکای متخلخل شامل تعداد زیادی از منافذ خالی است؛ بنابراین می‌توان ترکیبات زیست‌فعال را در آن ریزپوشانی کرد. سه نوع اصلی از نانوذرات سیلیکا وجود دارد، جامد، مزومتخلخل و غیرمتخلخل. نانوذره سیلیکا به دلیل مقرون‌به‌صرفه و زیست‌سازگار بودن یکی از گسترده‌ترین ذرات جامد مورد مطالعه به‌عنوان امولسیفایر امولسیون‌های پیکرینگ است. قابل ذکر است، نانوذرات سیلیکای خالص دارای گروه‌های هیدروکسیل فراوان بر سطح خود بوده؛ از این رو بیش‌ازحد آب‌دوست می‌باشند؛ بنابراین نمی‌توان از آن‌ها بدون اعمال اصلاح سطح فیزیکی یا شیمیایی، به‌طور مستقیم برای پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ استفاده کرد. از جمله سایر ذرات غیرآلی دیگر که ممکن است در مواد غذایی استفاده شوند و خواص پایدارکنندگی داشته‌باشند، می‌توان به ذرات کلسیم کربنات و دی‌اکسید تیتانیوم اشاره کرد.

نانوذرات لئلی: به دلیل نگرانی در مورد اثرات نامطلوب ذرات غیرخوراکی بر سلامت و افزایش آگاهی و علاقه عمومی به محصولات با منشأ طبیعی، در سال‌های اخیر، توسعه امولسیون‌های پیکرینگ پایدارشده با ذرات خوراکی اهمیت قابل‌توجهی یافته است (۳۹). طیف وسیعی از پلیمرهای طبیعی می‌توانند به‌منظور تهیه نانوذرات آلی مورد استفاده قرار گیرند. در این رابطه، پلیمرهای طبیعی به دلیل ویژگی‌هایی همچون زیست‌تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری

ذرات کلوئیدی بر پایه پروتئین: پروتئین‌ها، بیوپلیمرهای آمفوفیلی هستند که به‌طور گسترده در فرمولاسیون‌های غذایی استفاده می‌شوند. ذرات بر پایه پروتئین، به‌عنوان امولسیفایرهای پیکرینگ، عمدتاً به فرم‌های ذرات، فیبریل‌ها، میکرو و نانوذله‌ها می‌باشند (۲۴). ذرات پروتئینی معمولاً به روش رسوب ضد حلال یا تیمار حرارتی آماده می‌شوند (۳۹). فیبریل‌های پروتئینی به واسطه خودآرایی پروتئین‌ها یا پپتیدها تشکیل می‌شوند (۴۰، ۴۱). تشکیل میکروژل‌های پروتئینی نتیجه مجموعه‌ای از برهمکنش‌های پیچیده حذف الکتروستاتیک، دنا تورا سیون حرارتی پروتئین، تجمع و تشکیل پیوندهای دی‌سولفیدی بین و درون پروتئینی می‌باشد. نانوذله‌های پروتئینی نیز توسط یک روش خودآرایی مبتنی بر دنا تورا سیون حرارتی ساده یا اتصال عرضی کووالانسی آماده می‌گردند (۲۴، ۲۵، ۴۳). شرایط محلول و پارامترهای مرتبط با فرآوری تأثیر قابل توجهی بر مورفولوژی و ریزساختار نانوذرات حاصل دارد (۱۷). طیفی از ذرات کلوئیدی بر پایه پروتئین (مانند کازئین، پروتئین‌های آب‌پنیر، ژلاتین، پروتئین سویا، زئین، گلیادین، کافیرین و...) برای تشکیل و پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ استفاده شده است که به برخی از آن‌ها در ادامه اشاره می‌شود.

ذرات کلوئیدی بر پایه پروتئین حیوانی: یکی از پروتئین‌های مطرح جهت استفاده به‌عنوان پایدارکننده‌های پیکرینگ، پروتئین‌های آب‌پنیر است. پروتئین‌های آب‌پنیر محصول جانبی صنعت لبنی بوده و شامل بتا-لاکتوگلوبولین، آلفا-لاکتالبومین، آلبومین سرمی، ایمونوگلوبولین‌ها و پروتئین‌های جزئی دیگر می‌باشند. این پروتئین‌ها به دلیل داشتن فعالیت سطحی بالا و توانایی تشکیل سطوح مشترک ویسکوالاستیک مقاوم به کوالانسیس گویچه‌های امولسیون، به‌عنوان امولسیفایرهای طبیعی مهم محسوب می‌شوند (۴۴).

پروتئین‌های آب‌پنیر می‌توانند، از طریق برخی از فرایندها مانند حرارت دهی، تیمار با ماکروویو، خشک‌کردن پاششی و تیمار با فشار هیدروستاتیک بالا، به انواع ژل‌ها یا نانوفیبریل استفاده شوند. این ذرات انتخاب بسیار مناسبی برای پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ حاوی ترکیبات زیست‌فعال می‌باشند (۴۵، ۴۶). به‌عنوان مثال، بررسی ویژگی‌های بین سطحی میکروژل‌های بتا-لاکتوگلوبولین نشان داد، میکروژل‌های دارای بار کمتر (در pH ۵/۶) در مقایسه با میکروژل‌های دارای بار بیشتر (در pH ۷/۴ و ۳/۲) توانایی تشکیل تک‌لایه قوی‌تری را در سطح مشترک دارند؛ بنابراین افزودن نمک می‌تواند منجر به قرارگیری متراکم‌تر نانوذرات در سطح مشترک گردد (۴۷). همچنین میکروژل‌های پروتئین آب‌پنیر، فرموله شده توسط حرارت دادن محلول مولکول‌های پروتئین آب‌پنیر (۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه) تحت شرایط کنترل شده pH و قدرت یونی و سپس فیلتر کردن و خشک‌کردن انجمادی، توانایی بالایی را برای تشکیل امولسیون‌های پیکرینگ پایدار در برابر انبوهش و ادغام گویچه‌های فاز پراکنده نشان دادند (۴۸). در مطالعه‌ای دیگر، ذرات ژلی پروتئین آب‌پنیر سنتز شده با استفاده از تیمارهای فراصوت و فشار بالای هیدروستاتیک به‌عنوان یک پایدارکننده پیکرینگ مؤثر استفاده شدند. حضور میکروژل آب‌پنیر در سطح گویچه‌های روغن در امولسیون‌های پیکرینگ موجب تأخیر در هضم لیپید گردید. این تأثیر به توانایی لایه میکروژل در جلوگیری از رسیدن لیپاز به لیپید نسبت داده شد (۴۹).

ذرات میکروژل توده‌ای شدن خودبه‌خودی را نزدیک به pH ایزوالکتریک پروتئین از خود نشان داده و در این شرایط، شبکه ساختار یافته‌ای از ذرات تجمع یافته در فاز آبی، بدون ادغام گویچه‌های فاز پراکنده

می‌تواند به‌عنوان یک پایدارکننده مؤثر برای امولسیون پیکرینگ تغلیظ شده، بدون هرگونه افزودنی، استفاده شود. زمانی که پتانسیل سطحی این نانوذله‌ها در pH و قدرت یونی معین نزدیک به خنثی باشد، به‌طور موثری جذب سطح مشترک آب و روغن شده و قادر به تشکیل امولسیون پیکرینگ تغلیظ شده حتی در غلظت کم (۰/۵٪) می‌باشد (۵۳). در مطالعه‌ای در رابطه با ذرات ژلاتین، تان و همکاران (۲۰۱۷) به تأثیر قابل توجه غلظت ذرات ژلاتین بر تشکیل، ریزساختار و توزیع اندازه گویچه‌های فاز پراکنده امولسیون‌های پیکرینگ اشاره کردند (۵۵). طبق بررسی‌های انجام شده بر نانوذرات ژلاتین اتصال عرضی یافته، ساختار مولکولی ژلاتین نیز می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر اندازه گویچه‌های فاز پراکنده و پایداری امولسیون در برابر خامه‌ای شدن داشته باشد (۵۶، ۵۷). فنگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیان کردند، نانوذرات ژلاتین با درجه خوراکی، توزیع اندازه ذرات محدود و قابلیت پراکنش خوب تنها در pH برابر ۱۲ قابل دستیابی است. امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با این نانو ذرات، یکنواختی و پایداری خوبی را بدون جدا شدن فاز حتی پس از ۳۰ روز نگهداری نشان دادند (۵۸).

ذرات پلیمری بر پایه پروتئین گیاهی: پروتئین‌های گیاهی به دلیل در دسترس بودن پایدار و قیمت پایین نقش مهمی را در توسعه امولسیون‌های پیکرینگ ایفا می‌کنند. بخش قابل توجه‌ای از پژوهش‌ها در این زمینه بر پروتئین‌های سویا، زئین، گلیادین متمرکز شده است. ایزوله پروتئینی سویا فراوان‌ترین پروتئین در بین محصولات پروتئینی سویا بوده که دارای ۹۰٪ پروتئین می‌باشد. این محصول به دلیل داشتن ارزش تغذیه‌ای بالا، ویژگی‌های عملکردی، قیمت پایین و مزایای سلامتی بخش، یکی از معدود پروتئین‌های گیاهی است که می‌تواند جایگزین پروتئین حیوانی

تشکیل می‌شود. ترکیب تشکیل لایه ذرات در سطح مشترک و شبکه ساختاریافته از ذرات تجمع یافته در فاز پیوسته، پایداری موثری را فراهم می‌سازد. لازم به ذکر است، سطح معینی از دانسیته بار به‌منظور تشکیل میکروژل و جلوگیری از توده‌ای شدن بیش‌ازحد پروتئین و تشکیل خوشه‌های بزرگ یا ژل مورد نیاز می‌باشد (۱۷). همچنین وجود اتصالات عرضی دی سولفیدی بین مولکولی انسجام ساختاری داخلی آن‌ها را در محدوده وسیعی از pH تضمین می‌کند. فیبرهای پروتئینی نیز نقش مهمی در پایداری امولسیون‌های پیکرینگ ایفا می‌کنند. گائو و همکاران (۲۰۱۷) توانایی فیبریل‌های بتا-لاکتوگلوبولین را در پایداری امولسیون‌های پیکرینگ با قطر گویچه بین ۱۱ تا ۱۹ میکرومتر نشان داده و مقاومت عالی این امولسیون‌ها را در pH دور از نقطه ایزوالکتریک و در غلظت‌های مناسب فیبریل گزارش کردند (۲۶). نانوفیبریل‌های ایزوله پروتئینی آب پنیر سنتز شده از طریق گرم آبی، در غلظت ۵٪ منجر به تشکیل امولسیون‌های پیکرینگ با حجم بالای فاز درونی (۹۰٪) بسیار پایدار با ساختار شبه جامد گردید. تصاویر میکروسکوپی از امولسیون نشان‌دهنده پوشش‌دهی کامل گویچه‌های روغن توسط نانوفیبریل‌ها و تشکیل یک لایه سطح مشترک چگال و ویسکوالاستیک بوده است. این مشاهده به انعطاف‌پذیری نانوفیبریل‌ها به دلیل نسبت ابعاد و قدرت مکانیکی بزرگ نسبت داده شد که قرار گرفتن بر سطح گویچه و ایجاد یک محافظت بهتر را موجب گردید (۵۰).

بسیاری از مطالعات دیگر نیز توانایی کازئین، فراوان‌ترین پروتئین شیر، را در تشکیل امولسیون پیکرینگ پایدار گزارش کردند (۵۴-۵۱). چن و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که نانوذله‌های کازئین تهیه شده به وسیله اتصال عرضی با گلوآرالدهید

¹ Hydrothermal

گردد. وجود گروه‌های آب‌دوست و آب‌گریز در ساختار ایزوله‌های پروتئینی سویا قادر به کاهش کشش سطحی در سطح مشترک آب و روغن بوده و نیاز به اصلاح شیمیایی به منظور بهبود ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی ندارد (۵۹). متداول‌ترین روش برای تولید ذرات پایدارکننده پروتئین سویا، توده‌ای ساختن آن‌ها به صورت ذرات توسط فرایند حرارت دهی می‌باشد. این فرایند الگوی برهمکنش درون ذرات را به میزان قابل توجهی تغییر می‌دهد. نانوذرات پروتئینی تیمار شده با حرارت ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی و پایداری نگهداری و همچنین پایداری در برابر انجماد و رفع انجماد بهتری را نشان می‌دهند (۴۴).

پروتئین‌های پرولامین آمفوفیل موجود در برخی از گیاهان، در آب و روغن نامحلول و در محلول‌های الکلی آبی محلول می‌باشند. این پروتئین‌ها آب‌گریزی سطحی بالایی داشته که نیروی محرکه تمایل آن‌ها به خودآرایی و تشکیل ذرات کروی در حضور آب است (۶۰). نانوذرات پروتئین‌های پرولامین، مانند زئین، گلیادین و کافیرین، پایدارکننده‌های پیکرینگ خوبی محسوب می‌شوند. این نانوذرات نه محلول در آب بوده و نه محلول در روغن؛ در نتیجه در طول نگهداری سامانه امولسیون بدون تغییر باقی می‌مانند. تشکیل نانوذرات از پروتئین‌های پرولامین با روش‌هایی مانند رسوب ضد حلال، تبخیر حلال و یا روش مبتنی بر pH صورت می‌گیرد (۶۱).

نانوذرات زئین به‌طور گسترده‌ای برای تشکیل پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات عمدتاً با روش رسوب ضد حلال^۱ سنتز می‌شوند. این روش شامل حل کردن ماده آلی در یک حلال مناسب، عمدتاً یک محلول الکلی یا استیک اسید خالص سپس پراکنده ساختن فاز آلی در فاز آبی و در نهایت حذف حلال می‌شود. زئین حاصل

می‌تواند به صورت خود به خودی به نانوذرات تبدیل شود (۶۲). در یک مقایسه بین نانوذرات زئین و ایزوله پروتئینی آب پنیر، امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با نانوذرات زئین پایداری حرارتی بالاتری را به جدا شدن فازها و کاهش مدول‌های نگهداری نشان دادند (۶۳). نانوذرات کافیرین نسبتاً آب‌دوست آماده شده به روش رسوب ضد حلال با قطر میانگین حدود ۲۰۷ نانومتر و زاویه تماس ۱۲۵ درجه نیز قادر به تشکیل امولسیون‌های پیکرینگ با پایداری نگهداری نسبتاً خوب بودند (۶۴). تعداد زیادی از پروتئین‌های گیاهی دیگر مانند پروتئین نخود و پروتئین سبوس برنج وجود دارند که برای تولید امولسیون‌های پیکرینگ زیست‌تخریب‌پذیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، نانوذرات ایزوله پروتئینی نخود با قطر هیدرودینامیک ۱۶۵-۱۳۴ نانومتر (در pH ۳) قادر به پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ روغن در آب می‌باشند (۶۵).

ناپایداری ساختاری ذرات بر پایه پروتئین در پاسخ به شرایط محیطی مختلف و ترشوندگی نامناسب برخی از آن‌ها، کاربرد نانوذرات پروتئینی را به عنوان پایدارکننده‌های پیکرینگ محدود می‌سازد؛ لذا اعمال اصلاحات فیزیکی و شیمیایی بر آن‌ها به منظور افزایش کارایی پایدارسازی امولسیون ضروری به نظر می‌رسد (۳۸). به عنوان مثال از ترکیب پروتئین‌های نامحلول در آب (زئین و گلیادین) با یک ترکیب پلی‌ساکاریدی محلول در آب (۶۶، ۶۷)، اسید آلی (۳۷) و یا پروتئین دیگر (۶۸) به منظور افزایش حلالیت نانوذرات مذکور در آب و جذب مؤثر آن‌ها در سطوح مشترک استفاده می‌شود. از مطالعات مشابه دیگر می‌توان به اصلاح سطح ذرات پروتئینی با سورفاکتانت‌ها یا ترکیبات فنولیک اشاره نمود که موجب افزایش کارایی پایدارکنندگی آن‌ها گردید (۶۹).

¹ Anti-solvent precipitation

پلی‌ساکاریدهای غیر نشاسته‌ای مانند سلولز و کیتین، به دلیل مقاومت در برابر فرایند هضم سیستم گوارشی توجه ویژه‌ای را در فرمولاسیون سامانه‌های امولسیون طراحی شده برای کنترل اشتها و جلوگیری از چاقی به خود اختصاص داده‌اند. سلولز فراوان‌ترین بیوپلیمر زیستی بوده که به‌صورت الیاف و توده‌های میکرو فیبریل در دیواره سلولی گیاهان یافت می‌شود. الیاف بلند، انعطاف‌پذیر و درهم‌تینده سلولز دارای نواحی آمورف و کریستالی می‌باشند. ذرات میله‌ای شکل میکرو کریستال سلولز با هیدرولیز نواحی آمورف توسط اسیدسولفوریک قابل دستیابی می‌باشد. ادامه هیدرولیز منجر به تولید نانو کریستال‌های سلولز می‌گردد. نانو کریستال‌های سلولز عمدتاً میله‌ای یا سوزنی شکل بوده و ماهیت کریستالی و نسبت ابعاد بالایی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است، ویژگی‌های نانو کریستال سلولز به منبع و روش‌های استخراج آن بستگی دارد که تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی آن به‌عنوان پایدارکننده ذره‌ای به‌ویژه بر بار سطحی، قابلیت ترشوندگی و اندازه دارد. هر دو محصول هیدرولیز سلولز به‌طور مؤثری قادر به پایدارسازی امولسیون‌ها می‌باشند. اصلاح میکرو کریستال‌های سلولز نیز از طریق جذب پلیمر (مانند جذب کربوکسی متیل سلولز بر میکرو کریستال سلولز) بدون استفاده از حلال‌های آلی و مضر روشی سبز برای استفاده از سلولز در تولید امولسیون‌های پیکرینگ سازگار با محیط‌زیست می‌باشد (۳۸، ۷۶).

بارهای سطحی ذرات نانوسلولز با تنظیم قابلیت مرطوب‌شوندگی نقش مهمی را در پایدارسازی امولسیون‌ها ایفا می‌کنند. آمورف‌های کریستالی متفاوت موجب اختلاف در ویژگی‌های نانوکریستال‌های سلولز مانند مورفولوژی، ساختار کریستالی، میزان پیوند هیدروژنی، پتانسیل سطحی و پایداری حرارتی و

ذرات پلیمری بر پایه پلی‌ساکارید: مطالعات گسترده‌ای بر عملکرد ذرات بر پایه پلی‌ساکارید به‌عنوان پیکرینگ پایدارکننده در سامانه‌های امولسیون خوراکی صورت گرفته است (۳۸). نشاسته، متداول‌ترین کربوهیدرات در رژیم غذایی انسان، در غلات و غده‌ها به‌صورت گرانول‌های نیمه کریستالی آب‌دوست در طیف وسیعی از اندازه (۱۰۰-۰/۵ میکرومتر) و شکل (کروی، بیضوی و چند وجهی) وجود دارد. از جمله روش‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده به‌منظور تولید نانو ذرات نشاسته می‌توان به فرایندهای حرارتی و ژلاتیناسیون نسبی نشاسته، هموژنیزاسیون با فشار بالا، فراصوت، اکستروژن، پرتو دهی گاما، الکتروریسی، الکترواسپری، هیدرولیز اسیدی، نانوترسیب، هیدرولیز آنزیمی و کریستالیزاسیون مجدد و تشکیل کمپلکس پلی‌الکترولیت اشاره نمود (۷۰، ۷۱).

قابلیت پایدارسازی نشاسته طبیعی به دلیل آب‌دوستی بالا محدود بوده؛ لذا با توجه به قابلیت بالای اصلاح فیزیکی و شیمیایی، عمدتاً از گرانول‌های نشاسته تغییر یافته به‌منظور پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ استفاده می‌شود. استریفیکاسیون نشاسته با اکتینیل سوکسینیک بی‌آب (OSA1) متداول‌ترین روش تولید نشاسته اصلاح شده بوده که با جایگزینی نسبی گروه‌های هیدروکسیل با جانشین‌های آب‌گریز، ماهیت آب‌دوست نشاسته را به آمفوفیل تبدیل می‌کند (۷۲). لازم به ذکر است، شرایط فرآوری حین اصلاح یا تیمارهای قبل و بعد از آن، میزان مشتق‌سازی و نحوه توزیع گروه‌های آب‌گریز بر گرانول‌های نشاسته تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های اصلاح شده و توانایی امولسیون‌کنندگی آن‌ها دارد (۷۳-۷۵).

¹ Octenyl succinic anhydride

قابلیت پراکندگی آن‌ها می‌گردد (۷۷). به‌عنوان مثال، مطالعات انجام شده نشان داده است، نسبت ابعاد ذرات سلولز تأثیر قابل توجهی بر قابلیت آن‌ها در پوشاندن سطح گویچه‌های فاز پراکنده دارد. این قابلیت از بیش از ۸۰٪ پوشش دهی متراکم سطح گویچه‌ها توسط کوتاه‌ترین ذرات تا ۴۰٪ با بلندترین ذرات می‌تواند متغیر باشد. ناهمسان بودن شکل نانوذرات سلولز نیز می‌تواند تشکیل شبکه‌ای درهم‌تنیده در سطح مشترک روغن-آب را توسعه دهد. انعطاف‌پذیری و قابلیت تغییر شکل نانو کریستال‌های سلولزی بلند قادر به توسعه پل‌های میان گویچه‌های مجاور می‌باشد (۷۸). قرارگیری ذرات سلولز در سطح مشترک روغن-آب از طریق مکانیزم پیکرینگ، ممانعت فضایی (مکانیکی) را در برابر ادغام گویچه‌های فاز پراکنده ایجاد می‌کند. بعلاوه شبکه بین گویچه‌ای حاصل از ذرات پلیمری ناهمسان می‌تواند مشارکت قابل توجهی در این پایدارسازی داشته باشد (۷۹). وینوپراسیس و همکاران (۲۰۱۸) و میتیبومرانگ و همکاران (۲۰۱۹)، سامانه امولسیون را برای ریزپوشانی ویتامین D با استفاده از نانوالیاف سلولز طراحی و توانایی بالای نانوالیاف سلولز را به‌عنوان پیکرینگ امولسیفایر، ضمن حفظ ویتامین D در برابر تنش‌های محیطی نشان دادند. این توانایی به تشکیل پوشش بین‌سطحی ضخیم اطراف گویچه‌های روغن و متعاقباً ایجاد دافعه الکتروستاتیک و فضایی بین آن‌ها نسبت داده شد. ضمن این که نانوالیاف سلولز جذب نشده با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و تشکیل شبکه بین گویچه‌های روغن، پایداری امولسیون را بهبود بخشیدند (۳۷، ۸۰).

استفاده از سلولز باکتریایی به‌عنوان پایدارکننده پیکرینگ نیز توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. ساختار فوق مولکولی نانوالیاف سلولز با فرایندهای مکانیکی قابل تغییر می‌باشد. به‌عنوان مثال،

لی و همکاران (۲۰۱۹)، از هموژنیزاسیون با فشار بالا برای تنظیم مورفولوژی و اندازه سلولز باکتریایی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند، مقدار و اندازه نانوالیاف سلولز می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر سطح مشترک روغن و آب و تقویت اتصال عرضی بین مولکولی و افزایش ممانعت فضایی داشته باشد. فرایندهای مکانیکی روشی سبز و آسان برای تولید پایدارکننده‌های بر پایه نانوالیاف سلولز با درجه خوراکی و سازگار با محیط زیست بوده که قادر به تولید امولسیون‌های پیکرینگ با پایداری مناسب می‌باشند (۶۶). در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد بهتر نانوسلولزهای سوزنی‌شکل در مقایسه با نانوکریستال‌های بیضی شکل آن در پایدارسازی امولسیون نشان داده شد. امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با نانوذرات سوزنی شکل دارای گویچه‌های پراکنده با اندازه دو برابر کوچک‌تر و پایداری بالاتر در برابر سانتیفریژ بودند. اثرات مشاهده شده در این مطالعه، به تفاوت میزان آب‌دوستی و مورفولوژی نانوذرات سلولز نسبت داده شد (۸۱).

کیتین دومین پلی‌ساکارید فراوان در طبیعت و نانوکریستال‌های کیتین حاصل از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی، یکی دیگر از پایدارکننده‌های ذره‌ای مناسب برای تشکیل و پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ می‌باشد. هیدرولیز اسیدی ماده اولیه نیمه کریستالی کیتین موجب تشکیل نانوکریستال‌های میله‌ای شکل باقابلیت محافظت از گویچه‌ها در برابر ادغام از طریق ترکیب پایدارسازی پیکرینگ بین سطحی و تشکیل شبکه شبه ژل در فاز پیوسته می‌شود (۱۷). داستیله کردن نسبی ذرات کیتین می‌تواند روشی جهت بهبود ویژگی‌های بین سطحی کیتین و افزایش قابلیت انحلال آن باشد. در مطالعه بای و همکاران (۲۰۱۹)، نانوذرات کیتین دارای دانسیته بار بالا و نسبت ابعاد متفاوت (۵، ۲۵ و بیشتر ۶۰ نانومتر) کارایی متفاوتی را در

ذرات هیبریدی بر پلیه بیوپلیمرها: معمولاً به کارگیری نانوذرات آلی خوراکی به تنهایی به دلیل قابلیت ترشوندگی نامناسب (آب‌دوستی یا آب‌گریزی بسیار بالا)، اندازه بزرگ، انعطاف‌پذیری پایین و در نتیجه ایجاد سطوح مشترک ضعیف بر گویچه‌های فاز پراکنده همراه با محدودیت‌هایی جهت حفظ گویچه‌های فاز پراکنده در مقابل ناپایداری‌هایی مانند درهم آمیختن یا ادغام و رسیدگی استوالد طی دوره نگهداری و متعاقباً کاهش پایداری امولسیون‌های پیکرینگ حاصل می‌باشد. بسیاری از پلی ساکاریدها از ظرفیت امولسیون‌کنندگی مناسبی برخوردار نبوده و ترکیبات پروتئینی نیز علیرغم نشان دادن فعالیت سطحی بالا، پایداری کمی در برابر تنش‌های محیطی مانند تغییرات دما، pH و قدرت یونی نشان داده که در نتیجه موجب افزایش ناپایداری امولسیون می‌گردد (۸۷-۸۶).

اصلاح فیزیکی یا شیمیایی بیوذرات کلونیدی روشی مؤثر برای توسعه امولسیون‌های پیکرینگ با پایداری بالا می‌باشد. از جمله روش‌های مطرح در این زمینه می‌توان به تشکیل نانوذرات هیبریدی اشاره نمود. این ذرات پایدارکننده می‌توانند از ترکیبی از بیوپلیمرها یا ترکیب بیوپلیمرها با برخی مولکول‌های فعال سطحی دیگر مانند ترکیبات فنولیک سنتز شوند که این فرایند موجب بهبود ساختار، پایداری در برابر تنش‌های محیطی و افزایش قابل‌توجه کارایی پایدارکنندگی آن‌ها می‌گردد (۳۹، ۸۷-۹۱). برای مثال، نانوذرات هیبریدی متشکل از بیوپلیمرهای گلیادین و کیتوزان کارایی بالایی را به‌عنوان یک پیکرینگ پایدارکننده برای آماده‌سازی امولسیون‌های تغلیظ شده (با ۷۰٪ روغن) با پایداری بالا در برابر تنش اکسایش و ناپایداری‌های فیزیکی در سیستم هضم نشان داده‌اند (۹۲، ۹۳).

پایدارسازی سامانه‌های پیکرینگ نشان دادند. توانایی این نانوذرات در کاهش کشش سطحی و پایدارسازی سطح مشترک روغن/آب از طریق تشکیل شبکه در فاز پیوسته به‌اندازه، ترکیب و فرمولاسیون بستگی داشت. قابل ذکر است، فرایند داستیله شدن کیتین قبل از تبدیل شدن به نانوذرات، با افزایش قابلیت ترشوندگی موجب افزایش پایدارسازی الکترو-فضایی می‌گردد؛ بنابراین پوشش سطحی نانوذرات بر گویچه‌های روغن و متعاقباً پایداری آن‌ها در برابر ادغام به‌راحتی قابل کنترل است (۸۲).

برخلاف کیتین نامحلول، کیتوزان کاتیونی دارای حلالیت وابسته به pH بوده و در pH بالا به دلیل کاهش بار مولکولی ایجاد شده در اثر دپروتونه شدن گروه‌های آمونیم تجمع می‌یابد؛ بنابراین امولسیون‌های پایدار شده توسط ذرات کیتوزان تشکیل شده در pH بالا، با کاهش pH ناپایدار می‌شوند (۸۳). ریبریو و همکاران (۲۰۲۰) ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی نانوذرات کیتوزان تولید شده به روش‌های دپروتونه شدن و اتصال عرضی یونی را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها، نشان‌دهنده پایداری بالاتر گویچه‌ها در مقادیر کمتر روغن، با استفاده از روش دپروتونه شدن بوده است. بعلاوه، نانوذرات کیتوزان دپروتونه شده برخلاف نانوذرات کیتوزان اتصال عرضی یافته، قادر به تشکیل شبکه سه‌بعدی در فاز پیوسته و حبس گویچه‌های روغن می‌باشند (۳۸). قابلیت مهم دیگر کیتوزان توانایی تشکیل کمپلکس الکتروستاتیک با پلی‌آنیون یا هیدروکلوئید با بار منفی می‌باشد (۱۷)، که این قابلیت در تشکیل نانوذرات هیبریدی بررسی می‌شود. لازم به ذکر است، علاوه بر موارد مذکور، ذرات میکروژل برپایه هیدروکلوئید مانند آلژینات یا پکتین به دلیل قابلیت افزایش ویسکوزیته یا تشکیل ژل در فاز پیوسته قادر به افزایش پایداری سامانه‌های امولسیونی می‌باشند.

پایداری امولسیون پیکرینگ و تبدیل آن به امولسیون ژل با پایداری فیزیکی بالا، به ویژه در امولسیون‌های تغلیظ شده گردید (۶۷). نتایج مشابهی از پایداری بالای امولسیون‌های پیکرینگ غلیظ (درصد روغن < ۷۰٪) تهیه شده با نانوذرات هیبریدی متشکل از بیوپلیمرهای اووترانسفرین و صمغ عربی در غلظت کم نیز گزارش شده و این پایداری فوق‌العاده به جذب بالای نانوذرات در سطح مشترک و تشکیل شبکه شبه ژل نسبت داده شد (۹۷). پژوهش‌های دیگری در رابطه با قابلیت پایدار کنندگی بالای ترکیبات کمپلکس یا کنژوگه ذرات هیبریدی بر بهبود پایداری امولسیون‌های پیکرینگ انجام شده است که از بین آن‌ها می‌توان به نانوذرات هوردئین / کیتوزان (۲۳)، ایزوله پروتئینی سویا / نانوالیاف سلولز (۸۷)، ایزوله پروتئینی آب‌پنیر / صمغ بادام (۹۸)، پروتئین سویا / پکتین (۸۵)، بتا-لاکتوگلوبولین / صمغ عربی (۸۴، ۹۹) و اووترانسفرین / کربوکسی متیل کیتوزان (۲۸) اشاره کرد.

لازم به ذکر است، بسته به ماهیت مکانیزم دخیل در تشکیل ذرات هیبریدی، روش‌های مورد استفاده برای آماده‌سازی آن‌ها، به دو گروه کلی تجمعی و تفکیک‌شونده^۱ تقسیم می‌گردند. در فرایندهای تجمعی، نیروی محرکه برای جداسازی فاز برهمکنش جاذبه نسبتاً قوی بین انواع مختلف بیوپلیمر می‌باشد که از آن جمله می‌توان به برهمکنش الکتروستاتیک بین بیوپلیمرهای با بار مخالف اشاره نمود. در فرایندهای تفکیک‌شونده، عامل جداسازی فاز، نیروی دافعه قوی بین انواع مختلف بیوپلیمرها در محلول مانند دافعه فضایی می‌باشد (۱۰۰).

افزایش پایداری امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با نانوذرات هیبریدی متشکل از بیوپلیمرها با شاخه‌های جانبی را می‌توان به تشکیل غشای ضخیم‌تر در سطح مشترک روغن-آب نسبت داد که موجب افزایش ویسکوالاستیسته و پایداری فضایی آن و در نتیجه بهبود ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی مانند قابلیت جذب در سطح مشترک و افزایش پایداری فیزیکوشیمیایی در برابر تنش‌های محیطی در مقایسه با هر یک از بیوپلیمرها (به‌طور جداگانه) می‌گردد (۹۴، ۹۵). در یک مطالعه جالب، پایداری بسیار بالای امولسیون‌های پیکرینگ آماده شده توسط نانوذرات گلیادین/زانتان در شرایط محیطی مختلف (pH ۸-۴ و مقدار نمک ۱۰۰۰-۰ mM) به افزایش قابل‌توجه پتانسیل زتا نانوذرات هیبریدی نسبت داده شد. افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و تشکیل ساختار سه بعدی از گویچه‌های فاز پراکنده نیز با ایجاد ساختار شبه ژل و محدود ساختن حرکت گویچه‌ها عامل مؤثری در کاهش سرعت خامه‌ای شدن بوده و افزایش دافعه الکتروستاتیک و فضایی بین سطوح مشترک حاصل از نانوذرات گلیادین/زانتان با دانسیته بار بالا موجب افزایش پایداری گویچه‌های فاز پراکنده در برابر ادغام گردید (۹۶). در مطالعه‌ای مشابه، ما و همکاران (۲۰۲۰)، پوشش آنیونی نانوذرات گلیادین را عامل بهبود رفتار رئولوژیکی و افزایش پایداری امولسیون پیکرینگ حاصل در برابر ناپایداری‌های فیزیکی معرفی کردند (۳۱).

کاهش زاویه تماس نانوذرات زئین پس از ترکیب شدن آن با صمغ عربی موجب افزایش جذب آن بر سطوح مشترک و تشکیل لایه‌ای قوی با دانسیته بالا بر سطح گویچه‌های فاز پراکنده و در نتیجه افزایش

¹ Segregative

بررسی عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پایدار... / سیدمهدی جعفری و همکاران

جدول ۱- برخی از مطالعات انجام شده بر قابلیت بکارگیری نانوذرات آلی در تشکیل امولسیون‌های پیکرینگ

Table 1. Some studies conducted on using organic particles to creat Pickering emulsions.

ماهیت ذره	ذرات پایدارکننده	ویژگی‌های ذره	نتایج	رفرنس
Particle nature	Stabilizer particles	Particle properties	Results	Reference
	پروتئین آب‌پنیر	فیبریل	توانایی بالاتر امولسیون‌کنندگی به دلیل فعالیت سطحی بالاتر و کاهش مؤثرتر کشش سطحی؛ تشکیل امولسیون پیکرینگ تغلیظ شده توسط نانوفیبریل‌ها در غلظت ۵٪، بهبود پایداری اکسایشی روغن	(۵۰)
	بتا-لاکتوگلوبولین	فیبریل طول: ۴۰۰-۱۰۰ نانومتر	تشکیل امولسیون پیکرینگ پایدار بدون ادغام گویچه‌های روغن طی ۵۶ روز نگهداری	(۲۶)
	کازئین	نانوژل، کروی قطر: ۱۷۹ نانومتر پتانسیل زتا: ۱۶/۴- میلی-ولت	تشکیل امولسیون پیکرینگ تغلیظ شده بدون نیاز به هر نوع افزودنی در شرایط مشخصی از pH و قدرت یونی حتی در غلظت بسیار پایین (۰/۵٪)	(۴۳)
	اووترانسفرین	فیبریل طول: ۳۳۷ نانومتر	پایداری سازی امولسیون در برابر تغییرات دمایی تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد، قدرت یونی و pH حتی در غلظت ۰/۵٪ نانوذره؛ افزایش قدرت ژلی امولسیون با افزایش قدرت یونی یا pH آن	(۴۰)
پروتئین Protein	ژلاتین	قطر: ۲۷۹/۲ - ۲۳۵/۹ نانومتر بسته به مدت زمان قرار گرفتن در معرض اتصال-دهنده عرضی	تشکیل امولسیون پیکرینگ پایدار طی سه ماه نگهداری	(۵۵)
	کلاژن	فیبریل طول: ۶۰۰-۹۰۰ نانومتر، قطر: ۲۰ نانومتر و ارتفاع: ۱/۸ نانومتر پتانسیل زتا وابسته به pH از ۲۴/۵۲ میلی‌ولت تا ۱۲/۴۷- میلی‌ولت متغیر	تشکیل امولسیون پیکرینگ پایدار برای بیش از دو هفته نگهداری	(۱۰۱)
	زئین	قطر: ۴۷/۸ تا ۹۲/۲ نانومتر بسته به pH آماده‌سازی؛ کاهش اندازه و افزایش آب‌دوستی با افزایش pH	دآمیداسیون مولکول‌های زئین تحت شرایط قلیایی و در نتیجه افزایش حلالیت و ویژگی‌های بین‌سطحی آن؛ تشکیل امولسیون پیکرینگ پایدار به مدت ۲۸ روز توسط نانوذرات زئین تیمار شده در شرایط قلیایی	(۱۰۲)
	گلیادین	قطر: ۱۲۰/۱ تا ۴۲۵۶/۵ نانومتر و پتانسیل زتا: ۲۱/۶ تا ۴/۷- میلی‌ولت متغیر بسته به pH	تشکیل امولسیون پیکرینگ ساده و تغلیظ شده پایدار در pH ۴ و بالاتر و ناپایدار در برابر کوآلوسنس در pH ۳	(۱۰۳)

ماهیت ذره Particle nature	ذرات پایدار کننده Stabilizer particles	ویژگی های ذره Particle properties	نتایج Results	رفرنس Reference
	پروتئین گندم سیاه	قطر: ۲/۲ میکرومتر زاویه تماس: ۸۵/۱ درجه پس از اعمال تیمار حرارتی	پوشش دهی کامل سطح گویچه های روغن و تشکیل لایه های بین سطحی مستحکم؛ کاهش اندازه گویچه های فاز پراکنده و بهبود ویسکوالاستیسیته و پایداری نگهداری امولسیون با افزایش غلظت نانوذرات	(۱۰۴)
پروتئین سویا		قطر: ۹۲ نانومتر افزایش قطر و آب گریزی نانوذرات حاصل از محلول پروتئینی حرارت داده شده در مقایسه با محلول پروتئینی بدون اعمال حرارت	تشکیل امولسیون های پایدار در برابر سه سیکل انجماد و انجماد زدایی توسط نانوذرات حاصل از محلول پروتئینی حرارت داده شده	(۵۹)
پروتئین سویای اصلاح شده		قطر: ۴۲۶ نانومتر پس از تیمار حرارتی؛ افزایش آب گریزی پس از تیمار حرارتی و افزایش بیشتر با اتصال عرضی	بهبود پایداری امولسیون های پیکرینگ در برابر انجماد و رفع انجماد	(۱۰۵)
پروتئین بادام زمینی		قطر: ۲۶۰-۱۷۸ نانومتر، پتانسیل زتا: ۳۶/۲- تا ۸/۴- میلی ولت و زاویه تماس: ۴۵/۸ تا ۶۶/۳ درجه بسته به قدرت یونی	زاویه تماس نانوذرات حاصل عامل تشکیل امولسیون پیکرینگ پایدار در برابر خامه ای شدن و ادغام گویچه های فاز پراکنده	(۱۰۶)
پروتئین های گیاهی مختلف (ایزوله پروتئینی سویا، نخود، نخود فرنگی، ماش و بذر چیا)		میکروژل	تشکیل پایدارترین امولسیون پیکرینگ توسط میکروژل ایزوله پروتئینی ماش و تشکیل ناپایدارترین امولسیون های پیکرینگ توسط میکروژل ایزوله پروتئینی بذر چیا و نخود	(۱۰۷)
پلی ساکارید Polysaccharide		قطر: ۱/۳۷ تا ۱/۴۴ میکرومتر و زاویه تماس: ۳۶/۲ تا ۶۸/۷ درجه بسته درجه جایگزینی با اکتینیل سوکسینیک انهدرید چندوجهی	جذب مؤثر نشاسته اصلاح شده بر سطح مشترک و تشکیل امولسیون پیکرینگ شبه ژل پایدار روغن در آب	(۱۰۸)
نانو کریستال نشاسته		۷۹-۹۴/۶ نانومتر چندوجهی	بهبود قابلیت امولسیون کنندگی نانو کریستال نشاسته و کنترل ویسکوالاستیسیته امولسیون های پایدار شده توسط آن ها با کنترل سطح استیل نمودن سطحی	(۱۰۹)

بررسی عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون‌های پایدار... / سیدمهدی جعفری و همکاران

ماهیت ذره Particle nature	ذرات پایدارکننده Stabilizer particles	ویژگی‌های ذره Particle properties	نتایج Results	رفرنس Reference
			تشکیل پیکرینگ امولسیون پایدار حاوی ویتامین D و حفظ آن از تنش‌های محیطی	(۳۷، ۸۰)
	نانوفیبریل سلولز	عرض: ۹۷ نانومتر	تاثیر قابل توجه مقدار و اندازه نانوفیبریل بر سطح مشترک و تقویت اتصال عرضی بین مولکولی و افزایش ممانعت فضایی	(۱۱۰)
	کیتین	-	کارایی متفاوت نانوذرات کیتین با دانسیته بار و نسبت ابعاد متفاوت در پایداری سازی سامانه‌های پیکرینگ؛ افزایش پایداری سازی الکترو-فضایی با داستیله شدن کیتین	(۸۲)
		قطر: ۵۰۰-۱۰۰ نانومتر	کاهش اندازه و افزایش آب‌گریزی ذرات کیتوزان با افزایش شدت فرایند، ارائه فعالیت سطحی در pH خنثی، ایجاد شبکه ژلی با برهمکنش ذرات قرار گرفته بر سطح گویچه‌ها و جلوگیری از ناپایداری	(۱۱۱)
	کیتوزان	قطر: نانوذرات کیتوزان ۵۳۸/۵ تا ۹۳۸/۵ نانومتر، زاویه تماس: ۹۴/۱۹ درجه قطر: نانوذرات اتصال عرضی یافته ۳۳۱/۳ تا ۴۱۳/۲ نانومتر، زاویه تماس: ۶۴/۸۹ درجه	قابلیت نانوذرات کیتوزان دپروتونه شده برای تشکیل شبکه سه‌بعدی و حبس گویچه‌های فاز پراکنده در مقایسه با نانوذرات کیتوزان اتصال عرضی یافته	(۳۸)
	ایزوله پروتئینی آب‌بنیر / صمغ بادام	قطر نانوکمپلکس: ۳۱۳ نانومتر	افزایش توانایی ایزوله پروتئینی آب‌بنیر در پایداری سازی پیکرینگ تیمول	(۹۸)
	بتا لاکتوگلوبولین / صمغ عربی	قطر: ۲۴۴ نانومتر زاویه تماس: حدود ۹۰ درجه	تشکیل امولسیون‌زل‌های پیکرینگ با پایداری بالا	(۹۹)
	آلبومین سرم گاوی/نانو کریستال سلولز	قطر: ۵۰۰ در ۳۰ نانومتر (میله‌ای کوتاه)، ۲۰۰ در ۱۰ نانومتر (سوزنی شکل کوتاه)	تشکیل امولسیون پیکرینگ تغلیظ شده شبه زل بسیار پایدار	(۱۱۲)
نانوذرات هیبریدی Hybrid particles	لیزوزیم/زانتان	قطر: ۷۶-۵۰ نانومتر	توسعه امولسیون پیکرینگ بسیار پایدار با فراهم کردن فعالیت سطحی بالا و افزایش ویسکوزیته	(۱۱۳)
	اووترانسفرین / صمغ عربی	-	تشکیل امولسیون پیکرینگ تغلیظ شده با فراهم کردن لایه‌های بین سطحی متراکم و شبکه شبه زل	(۱۱۴)
	پروتئین سفیده تخم مرغ / آلژینات	۴۶۰-۳۵۰ نانومتر زاویه تماس: حدود ۹۰ درجه	تشکیل موفق امولسیون پیکرینگ دارای حجم بالای فاز درونی (۷۰٪) با پایداری بالا در برابر حرارت، انجماد و رفع انجماد	(۱۱۴)

ماهیت ذره Particle nature	ذرات پایدارکننده Stabilizer particles	ویژگی های ذره Particle properties	نتایج Results	رفرنس Reference
	کمپلکس ایزوله پروتئینی سویا/ صمغ زانتان	زاویه تماس: حدود ۹۰ درجه	تشکیل شبکه ژلی و کمک به بهبود پایداری امولسیون پیکرینگ	(۱۱۵)
	کیتوزان/ کربوکی متیل سلولز	قطر: ۲۳۲۰-۹۸۰ نانومتر زاویه تماس: ۵۹-۳۶ درجه	افزایش پایداری امولسیون در برابر تنش- های محیطی مختلف	(۱۱۶)
	کربوکی متیل نشاسته/ صمغ زانتان	قطر: ۶۸۵ نانومتر	افزایش پایداری امولسیون پیکرینگ پاسخ دهنده به تغییرات pH با تشکیل شبکه ژلی قوی	(۱۱۷)
	کازئینات سدیم/ پلی- ساکارید محلول سویا	قطر: ۷۵ نانومتر زاویه تماس: ۶۳/۷ درجه	بهبود زاویه تماس کازئینات سدیم با افزایش پلی ساکارید محلول سویا و اعمال تیمار فراصوت و در نتیجه بهبود قابلیت جذب آن بر سطح مشترک و افزایش قابل توجه پایداری امولسیون پیکرینگ	(۱۱۸)

می باشند که معمولاً برای غنی سازی محصولات غذایی استفاده می گردند. این ترکیبات در هاتریکس غذایی به منظور فراهم کردن فواید ضد اکسایشی، فیزیولوژیکی، جلوگیری از برخی بیماری ها مانند بیماری های قلبی و فشارخون بالا گنجانده می شوند (۱۱۹).

اخیراً تهیه امولسیون های پیکرینگ حاوی ترکیبات زیست فعال ریزپوشانی شده با پایداری بالا مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. این امولسیون ها می توانند ترکیبات زیست فعال را در برابر شرایط نامساعد بدون هیچ گونه عوارض جانبی نگهداری و در زمان و مکان مناسب آزاد کنند (۱۲۰). چندین پژوهش در رابطه با بکارگیری امولسیون های پایدار شده توسط نانوذرات برای ریزپوشانی و رهایش کنترل شده ترکیبات زیست فعال گزارش شده است (۶، ۷، ۹۷). بوستانی و همکاران (۲۰۲۲) امولسیون های پیکرینگ آب در روغن در آب حاوی ویتامین های ریزپوشانی شده در فاز آبی داخلی و تثبیت شده توسط نانوذرات هوردئین را سنتز کردند (۱۲۱). آل حسینی و همکاران (۲۰۲۱) و وانگ و همکاران (۲۰۲۳) د لیمون را به ترتیب در امولسیون پیکرینگ پایدار شده

کاربردهای امولسیون های پیکرینگ: امولسیون های پیکرینگ در تلاش برای توسعه جایگزین های جدید برای امولسیون های متداول و پاسخ به مسائل یا نگرانی های مصرف کنندگان به مشکلات سلامتی مرتبط با امولسیفایرهای معمولی مورد توجه قرار گرفته اند. در ادامه به طور مختصر به کاربردهای جدید امولسیون های پیکرینگ در صنعت غذا اشاره شده است.

ریزپوشانی و رهایش کنترل شده: فواید سلامتی بخش ترکیبات عملگر که از فرد در برابر اختلالات مرتبط با سبک زندگی محافظت می کند، به سرعت مورد توجه جامعه علمی، صنایع و مصرف کنندگان قرار گرفته است. مهم ترین چالش مطرح در این رابطه، تحت تأثیر قرار گرفتن فعالیت زیستی و زیست دسترس پذیری مواد مغذی در مکان های مورد هدف در دستگاه گوارش، به دلیل تنش های محیطی می باشد.

محصولات غذایی عملگر به محصولات حاوی یک ترکیب زیست فعال یا عملگر گفته می شود که این ترکیبات به طور طبیعی در محصول اولیه وجود ندارند. ویتامین ها، اسیدهای چرب، فیبر رژیمی، پروتئین ها و ترکیبات فنولیک نمونه هایی از ترکیبات زیست فعال

شامل پلی ساکاریدها، پروتئین‌ها، فلاونوئیدها و موم‌های مشتق شده از گیاهان هستند (۱۲۷).
بکارگیری امولسیون‌های پیکرینگ حاوی ترکیبات زیست‌فعال مانند ترکیبات ضد اکسایشی یا ضد میکروب در فرمولاسیون فیلم‌های بسته‌بندی منجر به توسعه بسته‌بندی‌های فعال گردیده است. هدف از توسعه این نوع بسته‌بندی‌ها، بهبود ماندگاری مواد غذایی از طریق رهایش کنترل شده ترکیب زیست‌فعال ریز پوشانی شده در طول نگهداری می‌باشد. نتایج چندین پژوهش در این رابطه نشان داده است که امولسیون‌های پیکرینگ سیستم‌های مناسبی برای بهبود خواص فیلم‌ها و همچنین برای انتقال اجزای آب‌گریز می‌باشند. پایداری بالا، ویسکوزیته پایین، شفافیت و عدم استفاده از سورفکتانت، مزایای استفاده از امولسیون‌های پیکرینگ برای فیلم‌های بسته‌بندی و پوشش‌ها می‌باشند (۵۷). در مطالعه‌ای، والنسیا و همکاران (۲۰۱۹) فیلم بسته‌بندی بر پایه امولسیون پیکرینگ روغن در آب حاوی کورکومین را تولید و تأثیر غلظت روغن بر فعالیت ضد میکروبی و ضد اکسایشی فیلم را بررسی کردند. نتایج به دست آمده از مطالعه آن‌ها، نشان‌دهنده تأثیر غلظت روغن بر خواص فیلم‌ها بوده است. همچنین در غلظت پایین روغن، فعالیت ضد میکروبی افزایش یافته، در حالی که در غلظت بالای روغن پایداری حرارتی و فعالیت ضد میکروبی به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کردند (۱۲۸). سان و همکاران (۲۰۲۰) نیز با تولید و بررسی فیلم‌های فعال حاوی امولسیون پیکرینگ بارگذاری شده با اسانس دارچین و پایدار شده توسط نانوذرات نشاسته، بهبود ویژگی‌های ضد اکسایشی را گزارش کردند (۸۹). کید و همکاران (۲۰۲۳) فیلم کیتوزان حاوی امولسیون پیکرینگ پایدار شده توسط نانوذرات سلولز حاوی اسانس ریز پوشانی شده را سنتز و تأثیر آن را بر پایداری گوجه‌فرنگی در طول نگهداری

توسط نانوذرات کیتوزان و ایزوله پروتئین نخود ریز پوشانی کردند (۱۲۲ و ۱۲۳). بر اساس نتایج به دست آمده، امولسیون‌های پیکرینگ با پایداری فیزیکوشیمیایی بالا، می‌توانند به‌عنوان یک ساهاانه ریز پوشانی برای ترکیبات زیست‌فعال به‌کاررفته و همچنین پایداری و قابلیت زیست دسترس‌پذیری آن‌ها را بهبود بخشند (۱۲۰). علاوه بر این، ترکیبات زیست‌فعال را می‌توان در نانوذرات تثبیت‌کننده امولسیون‌های پیکرینگ ریز پوشانی کرد. لو و همکاران (۲۰۱۹) کورکومین را در نانوذرات سلولز ریز پوشانی کردند و به‌عنوان تثبیت‌کننده امولسیون پیکرینگ روغن در آب استفاده کردند (۱۲۴).

بسته‌بندی: ایمنی و کیفیت مواد غذایی منجر به نوآوری‌هایی در توسعه بسته‌بندی مواد غذایی از جمله بسته‌بندی هوشمند و فعال شده است. آنتی‌اکسیدان‌ها و ضد میکروب‌ها به‌عنوان مواد فعال در بسته‌بندی مواد استفاده می‌شوند که پایداری مواد غذایی را از نظر شیمیایی و میکروبی بهبود می‌بخشند (۱۲۵). پیشرفت در علم مواد و فناوری‌های ریز پوشانی راه‌حل‌های بسته‌بندی نوآورانه متعددی را برای افزایش عمر مفید و بهبود کیفیت و ایمنی محصولات غذایی فراهم می‌کند. در میان روش‌های متداول ریز پوشانی، امولسیون پیکرینگ عملکرد بسیار خوبی در فرمولاسیون بسته‌بندی مواد غذایی از خود نشان داده است. در حال حاضر، سیستم امولسیون پیکرینگ در بسته‌بندی مواد غذایی تقاضای بالایی دارد که برای کاربردهای عملی در محصولات غذایی بسیار مهم است (۱۲۶). با این وجود، امولسیون‌های پیکرینگ تثبیت شده با ذرات غیرآلی غیرخوراکی را نمی‌توان در صنایع غذایی استفاده کرد. برای استفاده از امولسیون‌های پیکرینگ در بسته‌بندی مواد غذایی نانوذرات با درجه غذایی مورد نیاز است. این ذرات

بررسی کردند. نتایج نشان داد گوجه فرنگی‌های پوشش داده شده دارای پایداری میکروبی و فیزیکی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون پوشش بودند (۱۲۹).

جایگزین چربی: صنعت غذا در حال توسعه محصولات جدیدی است که بر سلامت و رژیم غذایی سالم متمرکز است. چاقی و بیماری‌های قلبی - عروقی مشکلات سلامتی رایج در سراسر جهان بوده که در اغلب موارد به مصرف بیش از حد اسیدهای چرب اشباع که معمولاً در غذاهای فرآوری شده دیده می‌شوند، ارتباط داده می‌شوند (۱۳۰). با توجه به اهمیت تأمین اسیدهای چرب ضروری و ویتامین‌های محلول در چربی از طریق رژیم غذایی و عدم امکان حذف کامل چربی از برنامه غذایی، توجه پژوهشگران و تولیدکنندگان به جایگزینی اسیدهای چرب اشباع با پروفایل مناسبی از اسیدهای چرب غیر اشباع جلب شده است.

یک روش امیدوارکننده، استفاده از امولسیون‌های پیکرینگ برای توسعه فناوری تولید اولئوژل بر پایه امولسیون و متعاقباً تبدیل روغن مایع با ویسکوزیته پایین به ژلی نرم یا امولسیون با فاز داخلی بالا می‌باشد (۱۳۱). به‌عنوان مثال، گائو و همکاران (۲۰۱۹) امولسیون پیکرینگ روغن در آب پایدار شده توسط نانوذرات زئین - سدیم استئارات را برای تولید ژل‌های روغن پیشنهاد کردند. براساس نتایج به دست آمده، امولسیون پیکرینگ با فاز داخلی بالا بافت مناسبی را فراهم کرده و می‌تواند برای کاهش مقدار چربی ترانس یا اشباع در محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرد (۲۶). وانگ و همکاران (۲۰۱۸) محتوای چربی سوسیس را با استفاده از امولسیون پیکرینگ پایدار شده با نانوذرات سلولز کاهش دادند. در تحقیق دیگری از امولسیون پیکرینگ پایدار شده توسط نانوذرات سلولز برای کاهش محتوای چربی

بیسکویت استفاده شد (۱۳۲). فنگ و همکاران (۲۰۲۰) امولسیون پیکرینگ اسانس دارچین در آب پایدار شده توسط نانوذرات زئین را سنتز و جایگزین کره کردند. جایگزینی جزئی کره با اسانس دارچین منجر به افزایش ارزش غذایی و تسهیل کنترل رشد کپک شد (۱۳۳).

در امولسیون پیکرینگ با فاز داخلی بالا ذرات می‌توانند یک شبکه ذره - ذره را در فضای بین قطرات تشکیل داده و نقش یک عامل ساختاردهنده را ایفا کنند. ذرات پایدارکننده می‌توانند به‌طور برگشتناپذیر در فصل مشترک آب و روغن جذب شده و با ایجاد مانع فضایی از تجمع قطرات جلوگیری کنند. این سیستم‌ها می‌توانند به‌عنوان یک جایگزین مستقیم برای روغن به‌منظور کاهش چربی عمل کنند؛ که تقاضای مصرف‌کننده برای محصولات سالم‌تر را برآورده می‌سازد. مزیت دیگر بکارگیری امولسیون‌های پیکرینگ برای جایگزینی چربی‌های غیر اشباع به پایداری فیزیکوشیمیایی بالای آن نسبت داده می‌شود که موجب افزایش پایداری اکسایشی اسیدهای چرب غیر اشباع می‌گردد (۱۳۴).

سایر کاربردها: پایداری محصولات لبنی از جمله محصولات مایع (شیر پاستوریزه، شیر استریلیزه و ماست) و محصولات جامد و نیمه جامد (پنیر، خامه تازه، بستنی) به میزان قابل توجهی تحت تأثیر شرایط محیطی طی فرایند تولید و یا دوره نگهداری قرار گرفته و ممکن است منجر به تغییر طعم و کیفیت آن‌ها شود؛ لذا افزودن ترکیبات پایدارکننده یا امولسیفایر برای پایدار کردن این محصولات بر پایه امولسیون ضروری می‌باشد. کازئین موجود در شیر در برابر حرارت مقاوم است و می‌تواند با کلسیم و فسفر ترکیب شده و ذرات کازئین را تشکیل دهد. ذرات کازئین در سوسپانسیون کلوئیدی شیر معلق بوده و به‌عنوان سورفکتانت عمل می‌کنند اما در شرایط اسیدی رسوب خواهند کرد.

فیزیکی، شیمیایی و دوستاندار محیط‌زیست بودن آن در مقایسه با امولسیون‌های متداول در زمینه‌های علمی مختلف از جمله علوم مواد غذایی، بیوشیمی، آرایشی و بهداشتی در حال رشد می‌باشد. اگرچه چشم‌انداز برنامه بسیار گسترده است اما هنوز چالش‌های زیادی در رابطه با تولید نانوذرات خوراکی با پایداری و ظرفیت امولسیون‌کنندگی بالا وجود دارد. تحقیقات آینده باید بیشتر بر بهبود پایداری امولسیون‌های پیکرینگ در فرایند تولید محصولات غذایی به‌ویژه محصولات عملگرا و توسعه ارزش اقتصادی امولسیون‌های پیکرینگ از طریق طراحی ذرات کلوئیدی مهندسی شده در این راستا متمرکز گردد. در اکثر مطالعات انجام شده، امولسیون‌های پیکرینگ توسط یک نوع نانوذره تثبیت شده‌اند. از این رو مطالعه بنیادی رفتار چند نانوذره در فصل مشترک امولسیون به‌عنوان تثبیت کننده و کاربردهای خاص آن نیز می‌تواند به‌عنوان یک چشم‌انداز امیدوارکننده برای تحقیقات آینده در نظر گرفته شود. علاوه بر این، با توجه به این که تا به امروز اکثر امولسیون‌های پیکرینگ تولید شده امولسیون‌های ساده آب در روغن یا روغن در آب بوده است، تحقیقات آینده می‌تواند بر روی تولید ذرات با خاصیت آب‌دوستی مناسب برای تثبیت امولسیون‌های چندگانه آب در روغن در آب یا روغن در آب در روغن متمرکز شود.

پروتئین‌های آب‌پنیر به گرما حساس بوده و تحت تأثیر گرما رسوب می‌کنند. از این رو می‌توان از امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده توسط ذرات کلوئیدی مقاوم به حرارت و شرایط اسیدی، جهت غنی‌سازی این محصولات استفاده کرد (۱۳۱، ۱۳۵). امولسیون‌های پیکرینگ همچنین می‌توانند در سوپ‌ها، سس‌ها، نان برنجی بدون گلوتن و سایر محصولات به‌عنوان جایگزین برخی از مواد تشکیل‌دهنده استفاده شوند تا کیفیت آن‌ها را بهبود بخشیده و موجب افزایش ماندگاری گردد. علاوه بر این امولسیون‌های پیکرینگ می‌توانند عوامل آب‌گریز (مانند ویتامین‌ها، اسیدهای چرب ضروری و مواد معدنی) را با پایداری خوب در نوشیدنی‌های شفاف حفظ کنند (۱۳۶).

نتیجه‌گیری

امولسیون‌های پیکرینگ به‌عنوان یک زمینه تحقیقاتی مهم در علم امولسیون و کلوئید ظاهر شده‌اند و اخیراً این علم الهام‌بخش دانشمندان صنعت غذا و دارو در توسعه محصولات جدید و عملگرا بوده است. در واقع، استفاده از ذرات کلوئیدی پایدارکننده می‌تواند یک استراتژی جدید و امیدوارکننده برای ارتباطات کاربردی مهندسی در امولسیون‌های غذایی باشد. مطالعات انجام شده در زمینه امولسیون‌های پیکرینگ در سال‌های اخیر به دلیل افزایش پایداری

References

1. McClements, D.J. Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015; ISBN 1498726690.
2. Nour, A. H. (2018). Emulsion types, stability mechanisms and rheology: A review. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies (IJIRSS)*, 1(1).
3. Ravera, F., Dziza, K., Santini, E., Cristofolini, L., & Liggieri, L. (2021). Emulsification and emulsion stability: The role of the interfacial properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 288, 102344.
4. Sarathchandraprakash, N. K., Mahendra, C., Prashanth, S. J., Manral, K., Babu, U. V., & Gowda, D. V. S. (2013). Emulsions and emulsifiers. *The Asian Journal of Experimental Chemistry*, 8, 30-45.

5. McClements, D. J. (2012). Advances in fabrication of emulsions with enhanced functionality using structural design principles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 17(5), 235-245.
6. Heidari Dalfard, F., Ziaifar, A. M., Jafari, S. M., & Anton, N. (2022). Investigating the effect of nanoparticle concentration and oil content on the physical stability of Pickering emulsion stabilized by chitosan nanoparticles. *Innovative Food Technologies*, 9(2), 167-179.
7. Heidari, F., Jafari, S. M., Ziaifar, A. M., & Anton, N. (2023). Surface modification of silica nanoparticles by chitosan for stabilization of water-in-oil Pickering emulsions. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6, 100381.
8. Matos, M., Laca, A., Rea, F., Iglesias, O., Rayner, M., & Gutiérrez, G. (2018). O/W emulsions stabilized by OSA-modified starch granules versus non-ionic surfactant: Stability, rheological behaviour and resveratrol encapsulation. *Journal of Food Engineering*, 222, 207-217.
9. Jafari, S. M., Doost, A. S., Nasrabadi, M. N., Boostani, S., & Van der Meeren, P. (2020). Phytoparticles for the stabilization of Pickering emulsions in the formulation of novel food colloidal dispersions. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 117-128.
10. Low, L. E., Siva, S. P., Ho, Y. K., Chan, E. S., & Tey, B. T. (2020). Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion. *Advances in Colloid and Interface Science*, 277, 102117.
11. Tan, C., & McClements, D. J. (2021). Application of advanced emulsion technology in the food industry: A review and critical evaluation. *Foods*, 10(4), 812.
12. Ortiz, D. G., Pochat-Bohatier, C., Cambedouzou, J., Bechelany, M., & Miele, P. (2020). Current trends in Pickering emulsions: Particle morphology and applications. *Engineering*, 6(4), 468-482.
13. Linke, C., & Drusch, S. (2018). Pickering emulsions in foods-opportunities and limitations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(12), 1971-1985.
14. Wei, Z., & Huang, Q. (2019). Developing organogel-based Pickering emulsions with improved freeze-thaw stability and hesperidin bioaccessibility. *Food Hydrocolloids*, 93, 68-77.
15. Chen, X., McClements, D. J., Wang, J., Zou, L., Deng, S., Liu, W., Yan, C., Zhu, Y., Cheng, C., & Liu, C. (2018). Coencapsulation of (-)-Epigallocatechin-3-gallate and Quercetin in Particle-Stabilized W/O/W Emulsion Gels: Controlled Release and Bioaccessibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(14), 3691-3699.
16. Baraki, S. Y., Jiang, Y., Li, X., Debeli, D. K., Wang, B., Feng, X., Mao, Z., & Sui, X. (2021). Stable sunflower oil oleogel from oil/water pickering emulsion with regenerated chitin. *LWT*, 146, 111483.
17. Dickinson, E. (2017). Biopolymer-based particles as stabilizing agents for emulsions and foams. *Food Hydrocolloids*, 68, 219-231.
18. Han, Y., Zhu, L., Karrar, E., Qi, X., Zhang, H., & Wu, G. (2023). Pickering foams stabilized by protein-based particles: A review of characterization, stabilization, and application. *Trends in Food Science and Technology*, 133, 148-159.
19. Heidari, F., Jafari, S. M., Ziaifar, A. M., & Anton, N. (2022). Preparation of Pickering emulsions stabilized by modified silica nanoparticles via the Taguchi approach. *Pharmaceutics*, 14(8), 1561.
20. Binks, B. P., & Clint, J. H. (2002). Solid wettability from surface energy components: relevance to Pickering emulsions. *Langmuir*, 18(4), 1270-1273.
21. Gavrielatos, I., Dabirian, R., Mohan, R. S., & Shoham, O. (2019). Oil/water emulsions stabilized by nanoparticles of different wettabilities. *Journal of Fluids Engineering*, 141(2), 021301.
22. Zhang, Y., Bao, Y., Zhang, W., & Xiang, R. (2023). Factors that affect Pickering emulsions stabilized by mesoporous hollow silica microspheres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 633, 1012-1021.

23. Li, F., Li, X., Huang, K., Luo, Y., & Mei, X. (2021). Preparation and characterization of pickering emulsion stabilized by hordein-chitosan complex particles. *Journal of Food Engineering*, 292, 110275.
24. Xia, T., Xue, C., & Wei, Z. (2021). Physicochemical characteristics, applications and research trends of edible Pickering emulsions. *Trends in Food Science and Technology*, 107, 1-15.
25. Li, S., Jiao, B., Meng, S., Fu, W., Faisal, S., Li, X., ... & Wang, Q. (2022). Edible mayonnaise-like Pickering emulsion stabilized by pea protein isolate microgels: Effect of food ingredients in commercial mayonnaise recipe. *Food Chemistry*, 376, 131866.
26. Gao, Z., Zhao, J., Huang, Y., Yao, X., Zhang, K., Fang, Y., ... & Yang, H. (2017). Edible Pickering emulsion stabilized by protein fibrils. Part 1: Effects of pH and fibrils concentration. *LWT-Food Science and Technology*, 76, 1-8.
27. Ortiz, D. G., Pochat-Bohatier, C., Cambedouzou, J., Bechelany, M., & Miele, P. (2020). Current trends in Pickering emulsions: Particle morphology and applications. *Engineering*, 6(4), 468-482.
28. Dong, Y., Wei, Z., Wang, Y., Tang, Q., Xue, C., & Huang, Q. (2022). Oleogel-based Pickering emulsions stabilized by ovotransferrin-carboxymethyl chitosan nanoparticles for delivery of curcumin. *LWT*, 157, 113121.
29. Dammak, I., & do Amaral Sobral, P. J. (2018). Formulation optimization of lecithin-enhanced pickering emulsions stabilized by chitosan nanoparticles for hesperidin encapsulation. *Journal of Food Engineering*, 229, 2-11.
30. Dai, L., Zhan, X., Wei, Y., Sun, C., Mao, L., McClements, D. J., & Gao, Y. (2018). Composite zein-propylene glycol alginate particles prepared using solvent evaporation: Characterization and application as Pickering emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 85, 281-290.
31. Ma, L., Zou, L., McClements, D. J., & Liu, W. (2020). One-step preparation of high internal phase emulsions using natural edible Pickering stabilizers: Gliadin nanoparticles/gum Arabic. *Food Hydrocolloids*, 100, 105381.
32. Xu, T., Yang, J., Hua, S., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., & Li, C. (2020). Characteristics of starch-based Pickering emulsions from the interface perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 334-346.
33. Shao, P., Zhang, H., Niu, B., & Jin, W. (2018). Physical stabilities of taro starch nanoparticles stabilized Pickering emulsions and the potential application of encapsulated tea polyphenols. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 2032-2039.
34. Eslami, P., Davarpanah, L., & Vahabzadeh, F. (2017). Encapsulating role of β -cyclodextrin in formation of pickering water-in-oil-in-water (W1/O/W2) double emulsions containing *Lactobacillus dellbrueckii*. *Food Hydrocolloids*, 64, 133-148.
35. Meng, Z., Qi, K., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2018). Macro-micro structure characterization and molecular properties of emulsion-templated polysaccharide oleogels. *Food Hydrocolloids*, 77, 17-29.
36. Zhao, H., Yang, Y., Chen, Y., Li, J., Wang, L., & Li, C. (2022). A review of multiple Pickering emulsions: Solid stabilization, preparation, particle effect, and application. *Chemical Engineering Science*, 248, 117085.
37. Zou, Y., van Baalen, C., Yang, X., & Scholten, E. (2018). Tuning hydrophobicity of zein nanoparticles to control rheological behavior of Pickering emulsions. *Food Hydrocolloids*, 80, 130-140.
38. Ribeiro, E. F., de Barros-Alexandrino, T. T., Assis, O. B. G., Junior, A. C., Quiles, A., Hernando, I., & Nicoletti, V. R. (2020). Chitosan and crosslinked chitosan nanoparticles: Synthesis, characterization and their role as Pickering emulsifiers. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116878.
39. Wei, Z., Cheng, Y., Zhu, J., & Huang, Q. (2019). Genipin-crosslinked ovotransferrin particle-stabilized Pickering emulsions as delivery vehicles for hesperidin. *Food Hydrocolloids*, 94, 561-573.

40. (37) Winuprasith, T., Khomein, P., Mitbumrung, W., Supphantharika, M., Nitithamyong, A., & McClements, D. J. (2018). Encapsulation of vitamin D3 in pickering emulsions stabilized by nanofibrillated mangosteen cellulose: Impact on in vitro digestion and bioaccessibility. *Food Hydrocolloids*, 83, 153-164.
41. (38) Zamani, S., Malchione, N., Selig, M. J., & Abbaspourrad, A. (2018). Formation of shelf stable Pickering high internal phase emulsions (HIPE) through the inclusion of whey protein microgels. *Food and Function*, 9(2), 982-990.
42. Feng, X., Dai, H., Ma, L., Yu, Y., Tang, M., Li, Y., et al. (2019). Food-grade gelatin nanoparticles: Preparation, characterization, and preliminary application for stabilizing pickering emulsions. *Foods*, 8, 479.
43. Wei, Z., Cheng, J., & Huang, Q. (2019). Food-grade Pickering emulsions stabilized by ovotransferrin fibrils. *Food Hydrocolloids*, 94, 592–602.
44. Wei, Z., Cheng, Y., & Huang, Q. (2019b). Heteroprotein complex formation of ovotransferrin and lysozyme: Fabrication of food-grade particles to stabilize Pickering emulsions. *Food Hydrocolloids*, 96, 190–200.
45. Wang, Z., Zhang, N., Chen, C., He, R., & Ju, X. (2020). Rapeseed protein nanogels as novel Pickering stabilizers for oil-in-water emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68, 3607–3614.
46. Chen, S., & Zhang, L. (2019). Casein nanogels as effective stabilizers for Pickering high internal phase emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 579, 113662.
47. Wen, J., Jiang, L., & Sui, X. (2023). Plant protein and animal protein-based Pickering emulsion: A review of preparation and modification methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*.
48. Araiza-Calahorra, A., & Sarkar, A. (2019). Pickering emulsion stabilized by protein nanogel particles for delivery of curcumin: effects of pH and ionic strength on curcumin retention. *Food Structure*, 21, 100113.
49. Lv, P., Wang, D., Dai, L., Wu, X., Gao, Y., & Yuan, F. (2020). Pickering emulsion gels stabilized by high hydrostatic pressure-induced whey protein isolate gel particles: characterization and encapsulation of curcumin. *Food Research International*, 132, 109032.
50. Zhang, J., Mei, L., Chen, N., Yuan, Y., Zeng, Q. Z., & Wang, Q. (2020). Study on β -lactoglobulin microgels adsorption onto a hydrophobic solid surface by QCM-D. *Food Hydrocolloids*, 98, 105320.
51. Destribats, M., Rouvet, M., Gehin-Delval, C., Schmitt, C., & Binks B. P. (2014). Emulsions stabilised by whey protein microgel particles: towards food-grade Pickering emulsions. *Soft Matter*, 10(36): 6941–6954.
52. Sarkar, A., Murray, B., Holmes, M., Ettelaie, R., Abdalla, A., & Yang, X. (2016). In vitro digestion of Pickering emulsions stabilized by soft whey protein microgel particles: Influence of thermal treatment. *Soft Matter*, 12, 3558–3569.
53. Yang, Y., Jiao, Q., Wang, L., Zhang, Y., Jiang, B., Li, D., ... & Liu, C. (2022). Preparation and evaluation of a novel high internal phase Pickering emulsion based on whey protein isolate nanofibrils derived by hydrothermal method. *Food Hydrocolloids*, 123, 107180.
54. Muhoza, B., Zhang, Y., Xia, S., Cai, J., Zhang, X., & Su, J. (2018). Improved stability and controlled release of lutein-loaded micelles based on glycosylated casein via Maillard reaction. *Journal of Functional Foods*, 45, 1–9.
55. Spyropoulos, F., Kurukji, D., Taylor, P., & Norton, I. T. (2018). Fabrication and utilization of bifunctional protein/polysaccharide coprecipitates for the independent codelivery of two model actives from simple oil-in-water emulsions. *Langmuir*, 34(13), 3934–3948.
56. Chen, S., & Zhang, L. M. (2019). Casein nanogels as effective stabilizers for Pickering high internal phase emulsions. *Colloids and Surfaces A*, 579, 123662.
57. Bi, A. Q., Xu, X. B., Guo, Y., du, M., Yu, C. P., & Wu, C. (2020). Ultrasound pre-fractured casein and in-situ formation of high internal phase emulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 104916.

58. Tan, H., Zhao, L., Tian, S., Wen, H., Gou, X., & Ngai, T. (2017). Gelatin particle-stabilized high-internal phase emulsions for use in oral delivery systems: Protection effect and in vitro digestion study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 900–907.
59. Ding, M., Zhang, T., Zhang, H., Tao, N., Wang, X., & Zhong, J. (2019). Effect of preparation factors and storage temperature on fish oil-loaded crosslinked gelatin nanoparticle pickering emulsions in liquid forms. *Food Hydrocolloids*, 95, 326–335.
60. Ding, M., Zhang, T., Zhang, H., Tao, N., Wang, X., & Zhong, J. (2020). Gelatin molecular structures affect behaviors of fish oil-loaded traditional and Pickering emulsions. *Food Chemistry*, 309, 125642.
61. Feng, X., Dai, H., Ma, L., Yu, Y., Tang, M., Li, Y., et al. (2019). Food-grade gelatin nanoparticles: Preparation, characterization, and preliminary application for stabilizing pickering emulsions. *Foods*, 8(10), 479.
62. Zhu, X. F., Zhang, N., Lin, W. F., & Tang, C. H. (2017). Freeze-thaw stability of Pickering emulsions stabilized by soy and whey protein particles. *Food Hydrocolloids*, 69, 173–84.
63. Dai, L., Sun, C., Wei, Y., Zhan, X., Mao, L., & Gao, Y. (2018). Formation and characterization of zein-propylene glycol alginate-surfactant ternary complexes: Effect of surfactant type. *Food Chemistry*, 258, 321–330.
64. Yan, X., Ma, C., Cui, F., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2020). Protein-stabilized Pickering emulsions: Formation, stability, properties, and applications in foods. *Trends in Food Science and Technology*, 103, 293–303.
65. Lorenzo, G., Sosa, M., & Califano, A. (2018). Alternative proteins and pseudocereals in the development of gluten-free pasta. *Alternative and replacement foods*. London: Academic Press; p. 433–58.
66. Lu, Y., Zhang, R., Jia, Y., Gao, Y., & Mao, L. (2023). Effects of nanoparticle types and internal phase content on the properties of W/O emulsions based on dual stabilization mechanism. *Food Hydrocolloids*, 139, 108563.
67. Xiao, J., Wang, X., Gonzalez, A. J. P., & Huang, Q. (2016). Kafirin nanoparticles stabilized Pickering emulsions: Microstructure and rheological behavior. *Food Hydrocolloids*, 54, 30–39.
68. Burger, T. G., & Zhang, Y. (2019). Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications. *Trends in Food Science and Technology*, 86, 25–33.
69. Li, M. F., He, Z. Y., Li, G. Y., Zeng, Q. Z., Su, D. X., Zhang, J. L., et al. (2019). The formation and characterization of antioxidant pickering emulsions: Effect of the interactions between gliadin and chitosan. *Food Hydrocolloids*, 90, 482–489.
70. Dai, L., Sun, C., Wei, Y., Mao, L., & Gao, Y. (2018). Characterization of Pickering emulsion gels stabilized by zein/gum Arabic complex colloidal nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 74, 239–248.
71. Zhu, Y., Chen, X., McClements, D. J., Zou, L., & Liu, W. (2018). pH-, ion- and temperature-dependent emulsion gels: Fabricated by addition of whey protein to gliadin-nanoparticle coated lipid droplets. *Food Hydrocolloids*, 77, 870–878.
72. Rutkevičius, M., Allred, S., Velev, O. D., & Velikov, K. P. (2018). Stabilization of oil continuous emulsions with colloidal particles from water-insoluble plant proteins. *Food Hydrocolloids*, 82, 89–95.
73. Zhu, F. (2019). Starch based Pickering emulsions: Fabrication, properties, and applications. *Trends in Food Science and Technology*, 85, 129–137.
74. Sun, Q. (2018). Starch nanoparticles. In M. Sjöström, & L. Nilsson (Eds.), *Starch in food: Structure, function and applications* (pp. 691–745). Woodhead Publishing. Elsevier Ltd.
75. Altuna, L., Herrera, M. L., & Foresti, M. L. (2018). Synthesis and characterization of octenyl succinic anhydride modified starches for food applications. A review of recent literature. *Food Hydrocolloids*, 80, 97–110.
76. Song, X., Zheng, F., Ma, F., Kang, H., & Ren, H. (2020). The physical and oxidative stabilities of Pickering emulsion stabilized by starch particle and small molecular surfactant. *Food Chemistry*, 303, 125391.

77. S' anchez de la Concha, B. B., Agama-Acevedo, E., Aguirre-Cruz, A., Bello-P'erez, L. A., & Alvarez-Ramírez, J. (2020). OSA esterification of amaranth and maize starch nanocrystals and their use in "pickering" emulsions. *Starch Staerke*, 72(7–8), 1900271.
78. Wang, P. P., Luo, Z. G., Chun-Chen, Xiong-Fu, & Tamer, T. M. (2020). Effects of octenyl succinic anhydride groups distribution on the storage and shear stability of Pickering emulsions formulated by modified rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 228, 115389.
79. Ahsan, H. M., Zhang, X., Li, Y., Li, B., & Liu, S. (2019). Surface modification of microcrystalline cellulose: Physicochemical characterization and applications in the Stabilization of Pickering emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1176–1184.
80. Gong, J., Li, J., Xu, J., Xiang, Z., & Mo, L. (2017). Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs. *RSC Advances*, 7(53), 33486–33493.
81. Kalashnikova, I., Bizot, H., Bertocini, P., Cathala, B., & Capron, I. (2013). Cellulosic nanorods of various aspect ratios for oil in water Pickering emulsions. *Soft Matter*, 9 (3), 952–959.
82. Dai, H., Wu, J., Zhang, H., Chen, Y., Ma, L., Huang, H., et al. (2020). Recent advances on cellulose nanocrystals for Pickering emulsions: Development and challenge. *Trends in Food Science and Technology*, 102(2), 16–29.
83. Mitbumrung, W., Suphantharika, M., McClements, D. J., & Winuprasith, T. (2019). Encapsulation of vitamin D3 in pickering emulsion stabilized by nanofibrillated mangosteen cellulose: Effect of environmental stresses. *Journal of Food Science*, 84 (11), 3213–3221.
84. Li, X., Li, J., Gong, J., Kuang, Y., Mo, L., & Song, T. (2018). Cellulose nanocrystals (CNCs) with different crystalline allomorph for oil in water Pickering emulsions. *Carbohydrate Polymers*, 183, 303–310.
85. Bai, L., Huan, S., Xiang, W., Liu, L., Yang, Y., Nugroho, R. W. N., et al. (2019). Selfassembled networks of short and long chitin nanoparticles for oil/water interfacial superstabilization. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(7), 6497–6511.
86. Mwangi, W. W., Ho, K. W., Tey, B. T., & Chan, E. S. (2016). Effects of environmental factors on the physical stability of pickering-emulsions stabilized by chitosan particles. *Food Hydrocolloids*, 60, 543-550.
87. Uvanesh, K., Nayak, S. K., Sagiri, S. S., Banerjee, I., Ray, S. S., & Pal, K. (2018). Effect of Non-Ionic Hydrophilic and Hydrophobic Surfactants on the Properties on the Stearate Oleogels: A Comparative Study. In *Nutraceuticals and Innovative Food Products for Healthy Living and Preventive Care* (pp. 260-279): IGI Global.
88. Jin, B., Zhou, X., Guan, J., Yan, S., Xu, J., & Chen, J. (2019). Elucidation of stabilizing pickering emulsion with jackfruit filum pectin-soy protein nanoparticles obtained by photocatalysis. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(6), 909-917.
89. Chen, X., Chen, Y., Huang, Y., Zou, L., Liu, C., McClements, D. J., & Liu, W. (2019). Hybrid Bionanoparticle-Stabilized Pickering Emulsions for Quercetin Delivery: Effect of Interfacial Composition on Release, Lipolysis, and Bioaccessibility. *ACS Applied Nano Materials*, 2(10), 6462-6472.
90. Liu, X., Ding, S., Wu, J., Liu, G., Wei, J., Yang, F., & Liu, X. (2021). Molecular structures of octenyl succinic anhydride modified starches in relation to their ability to stabilize high internal phase emulsions and oleogels. *Food Hydrocolloids*, 120, 106953.
91. Fasolin, L. H., Cerqueira, M., Pastrana, L., Vicente, A., & Cunha, R. (2018). Thermodynamic, rheological and structural properties of edible oils structured with LMOGs: Influence of gelator and oil phase. *Food Structure*, 16, 50-58.
92. Sun, G., Zhao, Q., Liu, S., Li, B., & Li, Y. (2019). Complex of raw chitin nanofibers and zein colloid particles as stabilizer for producing stable pickering emulsions. *Food Hydrocolloids*, 97, 105178.

93. Xu, W., Jin, W., Huang, K., Huang, L., Lou, Y., Li, J., Liu, X., & Li, B. (2018). Interfacial and emulsion stabilized behavior of lysozyme/xanthan gum nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 280-286.
94. Yi, J., Gao, L., Zhong, G., & Fan, Y. (2020). Fabrication of high internal phase Pickering emulsions with calcium-crosslinked whey protein nanoparticles for β -carotene stabilization and delivery. *Food and Function*, 11(1), 768-778.
95. Zeng, T., Wu, Z. L., Zhu, J. Y., Yin, S. W., Tang, C. H., Wu, L. Y., & Yang, X. Q. (2017). Development of antioxidant Pickering high internal phase emulsions (HIPEs) stabilized by protein/polysaccharide hybrid particles as potential alternative for PHOs. *Food Chemistry*, 231, 122-130.
96. Zhou, F. Z., Yan, L., Yin, S. W., Tang, C. H., & Yang, X. Q. (2018). Development of Pickering Emulsions Stabilized by Gliadin/Proanthocyanidins Hybrid Particles (GPHPs) and the Fate of Lipid Oxidation and Digestion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(6), 1461-1471.
97. Wijaya, W., Sun, Q. Q., Van der Meeren, P., & Patel, A. R. (2017). Oleogels from high internal phase emulsion templates stabilized by sodium caseinate-alginate complexes. In *São Paulo School of Advanced Sciences on Reverse Engineering of Processed Foods*.
98. Zhang, Y., Zhou, F., Zhao, M., Lin, L., Ning, Z., & Sun, B. (2018). Soy peptide nanoparticles by ultrasound-induced self-assembly of large peptide aggregates and their role on emulsion stability. *Food Hydrocolloids*, 74, 62-71.
99. Fu, D., Deng, S., McClements, D. J., Zhou, L., Zou, L., Yi, J., Liu, C., & Liu, W. (2019). Encapsulation of β -carotene in wheat gluten nanoparticle-xanthan gum-stabilized Pickering emulsions: Enhancement of carotenoid stability and bioaccessibility. *Food Hydrocolloids*, 89, 80-89.
100. Wei, Z., & Huang, Q. (2020). Development of high internal phase Pickering emulsions stabilised by ovotransferrin-gum arabic particles as curcumin delivery vehicles. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1891-1899.
101. Doost, A. S., Nasrabadi, M. N., Kassozi, V., Dewettinck, K., Stevens, C. V., & Van der Meeren, P. (2019). Pickering stabilization of thymol through green emulsification using soluble fraction of almond gum-Whey protein isolate nano-complexes. *Food Hydrocolloids*, 88, 218-227.
102. Su, J., Guo, Q., Chen, Y., Dong, W., Mao, L., Gao, Y., & Yuan, F. (2020). Characterization and formation mechanism of lutein pickering emulsion gels stabilized by β -lactoglobulin-gum arabic composite colloidal nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 98, 105276.
103. Arroyo-Maya, I. J., & McClements, D. J. (2015). Biopolymer nanoparticles as potential delivery systems for anthocyanins: Fabrication and properties. *Food Research International*, 69, 1-8.
104. Zhu, Q., Li, Y., Li, S., & Wang, W. (2020). Fabrication and characterization of acid soluble collagen stabilized Pickering emulsions. *Food Hydrocolloids*, 106, 105875.
105. Wang, D., Tao, S., Yin, S.-W., Sun, Y., & Li, Y. (2020). Facile preparation of zein nanoparticles with tunable surface hydrophobicity and excellent colloidal stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 591.
106. Hu, Y. Q., Yin, S. W., Zhu, J. H., Qi, J. R., Guo, J., Wu, L. Y., ... & Yang, X. Q. (2016). Fabrication and characterization of novel Pickering emulsions and Pickering high internal emulsions stabilized by gliadin colloidal particles. *Food Hydrocolloids*, 61, 300-310.
107. Song, S., Li, Y., Zhu, Q., Zhang, X., Wang, Y., Tao, L., & Yu, L. (2023). Structure and properties of Pickering emulsions stabilized solely with novel buckwheat protein colloidal particles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 226, 61-71.
108. Hei, X., Liu, Z., Li, S., Wu, C., Jiao, B., Hu, H., ... & Shi, A. (2024). Freeze-thaw stability of Pickering emulsion stabilized by modified soy protein particles and its application in plant-based ice cream. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, 128183.

109. Ning, F., Ge, Z., Qiu, L., Wang, X., Luo, L., Xiong, H., et al. (2020). Double-induced seenriched peanut protein nanoparticles preparation, characterization and stabilized food-grade Pickering emulsions. *Food Hydrocolloids*, 99, 105308.
110. Hei, X., Li, S., Liu, Z., Wu, C., Ma, X., Jiao, B., ... & Shi, A. (2024). Characteristics of Pickering emulsions stabilized by microgel particles of five different plant proteins and their application. *Food Chemistry*, 449, 139187.
111. Li, S., Zhang, B., Tan, C. P., Li, C., Fu, X., & Huang, Q. (2019). Octenylsuccinate quinoa starch granule-stabilized Pickering emulsion gels: Preparation, microstructure and gelling mechanism. *Food Hydrocolloids*, 91, 40–47.
112. Qian, X., Lu, Y., Xie, W., & Wu, D. (2020). Viscoelasticity of olive oil/water Pickering emulsions stabilized with starch nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115575.
113. Li, Q., Wang, Y., Wu, Y., He, K., Li, Y., Luo, X., et al. (2019). Flexible cellulose nanofibrils as novel pickering stabilizers: The emulsifying property and packing behavior. *Food Hydrocolloids*, 88, 180–189.
114. Costa, A. L. R., Gomes, A., & Cunha, R. L. (2018). One-step ultrasound producing O/W emulsions stabilized by chitosan particles. *Food Research International*, 107, 717–725.
115. Liu, F., Zheng, J., Huang, C. H., Tang, C. H., & Ou, S. Y. (2018). Pickering high internal phase emulsions stabilized by protein-covered cellulose nanocrystals. *Food Hydrocolloids*, 82, 96–105.
116. Li, Z., Zheng, S., Zhao, C., Liu, M., Zhang, Z., Xu, W., et al. (2020). Stability, microstructural and rheological properties of Pickering emulsion stabilized by xanthan gum/lysozyme nanoparticles coupled with xanthan gum. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 2387–2394.
117. Zhan, Y., Qin, S., Zeng, Y., Xu, Q., McClements, D. J., & Hu, K. (2024). Pickering emulsions stabilized by egg white protein-alginate nanoparticles: Freeze-thaw stability after heating. *Food Hydrocolloids*, 150, 109675.
118. Li, L., Wang, W., Ji, S., & Xia, Q. (2024). Soy protein isolate-xanthan gum complexes to stabilize Pickering emulsions for quercetin delivery. *Food Chemistry*, 140794.
119. Zhu, X., Chen, J., Hu, Y., Zhang, N., Fu, Y., & Chen, X. (2021). Tuning complexation of carboxymethyl cellulose/cationic chitosan to stabilize Pickering emulsion for curcumin encapsulation. *Food Hydrocolloids*, 110, 106135.
120. Cai, X., Wang, Y., Du, X., Xing, X., & Zhu, G. (2020). Stability of pH-responsive Pickering emulsion stabilized by carboxymethyl starch/xanthan gum combinations. *Food Hydrocolloids*, 109, 106093.
121. Tavasoli, S., Maghsoudlou, Y., Tabarestani, H. S., & Jafari, S. M. (2023). Changes in emulsifying properties of caseinate–Soy soluble polysaccharides conjugates by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 101, 106703.
122. Carocho, M., Morales, P., & Ferreira, I. C. (2018). Antioxidants: Reviewing the chemistry, food applications, legislation and role as preservatives. *Trends in Food Science and Technology*, 71, 107-120.
123. Tavernier, I., Wijaya, W., Van der Meer, P., Dewettinck, K., & Patel, A. R. (2016). Food-grade particles for emulsion stabilization. *Trends in Food Science and Technology*, 50, 159-174.
124. Boostani, S., Riazi, M., Marefati, A., Rayner, M., & Hosseini, S. M. H. (2022). Development and characterization of medium and high internal phase novel multiple Pickering emulsions stabilized by hordein nanoparticles. *Food Chemistry*, 372, 131354.
125. Alehosseini, E., Jafari, S. M., & Tabarestani, H. S. (2021). Production of d-limonene-loaded Pickering emulsions stabilized by chitosan nanoparticles. *Food Chemistry*, 354, 129591.
126. Wang, X., Sun, J., Zhao, S., Zhang, F., Meng, X., & Liu, B. (2023). Highly stable nanostructured lipid carriers containing candelilla wax for d-limonene encapsulation: Preparation, characterization and antifungal activity. *Food Hydrocolloids*, 145, 109101.
127. Low, L. E., Tan, L. T. H., Goh, B. H., Tey, B. T., Ong, B. H., & Tang, S. Y. (2019). Magnetic cellulose nanocrystal stabilized Pickering emulsions for enhanced bioactive release and

- human colon cancer therapy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 127, 76-84.
128. Souza, A. G., Ferreira, R. R., Paula, L. C., Mitra, S. K., & Rosa, D. S. (2021). Starch-based films enriched with nanocellulose-stabilized Pickering emulsions containing different essential oils for possible applications in food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 27, 100615.
129. Tavassoli, M., Khezerlou, A., Bangar, S. P., Bakhshizadeh, M., Haghi, P. B., Moghaddam, T. N., & Ehsani, A. (2023). Functionality developments of Pickering emulsion in food packaging: Principles, applications, and future perspectives. *Trends in Food Science and Technology*, 132, 171-187.
130. Klojđová, I., & Stathopoulos, C. (2022). The potential application of Pickering multiple emulsions in food. *Foods*, 11(11), 1558.
131. Valencia, L., Nomena, E. M., Mathew, A. P., & Velikov, K. P. (2019). Biobased cellulose nanofibril–oil composite films for active edible barriers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(17), 16040-16047.
132. Nkede, F. N., Wardana, A. A., Phuong, N. T. H., Takahashi, M., Koga, A., Wardak, M. H., ... & Tanaka, F. (2023). Preparation and characterization of chitosan/lemongrass oil/cellulose nanofiber Pickering emulsions active packaging and its application on tomato preservation. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(11), 4930-4945.
133. Briggs, M. A., Petersen, K. S., & Kris-Etherton, P. M. (2017, June). Saturated fatty acids and cardiovascular disease: replacements for saturated fat to reduce cardiovascular risk. In *Healthcare* (Vol. 5, No. 2, p. 29). MDPI.
134. Li, W., Jiao, B., Li, S., Faisal, S., Shi, A., Fu, W., ... & Wang, Q. (2022). Recent advances on Pickering emulsions stabilized by diverse edible particles: Stability mechanism and applications. *Frontiers in Nutrition*, 9, 864943.
135. Wang, Y., Wang, W., Jia, H., Gao, G., Wang, X., Zhang, X., & Wang, Y. (2018). Using cellulose nanofibers and its palm oil pickering emulsion as fat substitutes in emulsified sausage. *Journal of Food Science*, 83(6), 1740-1747.
136. Feng, X., Sun, Y., Yang, Y., Zhou, X., Cen, K., Yu, C., ... & Tang, X. (2020). Zein nanoparticle stabilized Pickering emulsion enriched with cinnamon oil and its effects on pound cakes. *Lwt*, 122, 109025.
137. Okuro, P. K., Gomes, A., Costa, A. L. R., Adame, M. A., & Cunha, R. L. (2019). Formation and stability of W/O-high internal phase emulsions (HIPEs) and derived O/W emulsions stabilized by PGPR and lecithin. *Food Research International*, 122, 252-262.
138. Liu, G., Wang, Q., Hu, Z., Cai, J., & Qin, X. (2019). Maillard-reacted whey protein isolates and epigallocatechin gallate complex enhance the thermal stability of the pickering emulsion delivery of curcumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(18), 5212-5220.
139. Chen, L., Ao, F., Ge, X., & Shen, W. (2020). Food-grade Pickering emulsions: Preparation, stabilization and applications. *Molecules*, 25(14), 3202.

