فناوری حباب فرازیر (نانوحباب‌ها) در ساخت امولسیون‌ها

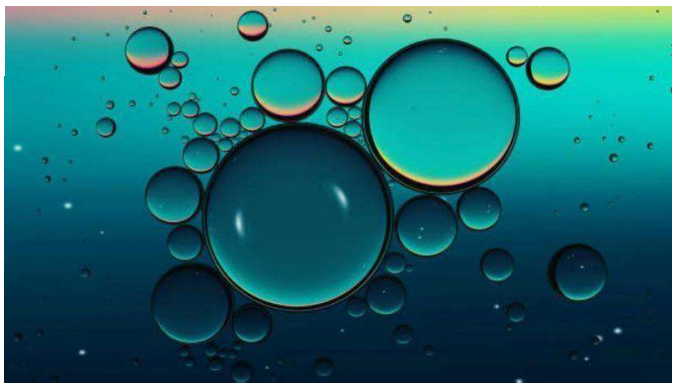
ثمین تکاسی، دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

کیمیا سینناییان، دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

معرفی

«رهنشان» یکی از مسابقات مسئله محور طرح شهید بابایی و زیرمجموعه بنیاد ملی نخبگان است که در ۵ حوزه آب و محیط‌زیست، انرژی، حمل‌ونقل، زیست‌فناوری و هوشمند سازی برگزار می‌گردد. دانشجویان هر مقطعی می‌توانند در این مسابقه ثبت‌نام کرده و از میان پروژه‌های مطرح‌شده یکی را به دلخواه برگزینند. مقاله پیش رو، در سومین دوره مسابقات رهنشان با عنوان پروژه استفاده از فناوری حباب فرازیر در ساخت امولسیون‌ها در حوزه آب و محیط‌زیست، شرکت داده شده است.

یک امولسیون از دو مایع امتزاج‌ناپذیر (معمولاً روغن و آب) تشکیل شده است که یکی از آن‌ها به‌صورت قطرات ریز در دیگری پراکنده است. به‌منظور پراکندگی این ذرات، از جزء سومی به نام امولسیون کننده استفاده می‌شود. امولسیون کننده ماده‌ای است که با افزایش پایداری سینتیکی، موجب پایداری یک امولسیون می‌شود که دارای دو سر آب‌دوست و آب‌گریز می‌باشد. امولسیون‌ها را از روی اندازه قطرات امولسیون، به میکرو (۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر)، مینی یا نانو (۱۰۰تا ۱۰۰۰ نانومتر) و ماکرو (۰٫۵تا ۱۰۰ میکرومتر) تقسیم می‌کنند.



شکل ۱ قطرات امولسیون

امولسیون‌های معمولی، به‌طور ذاتی نسبتاً ناپایدار هستند و با گذشت زمان این امولسیون‌ها به حالت پایدار فازهای تشکیل‌دهنده خود برمی‌گردند؛ حال برای حفظ حالت این امولسیون باید آن را به‌طور مداوم هم زد. البته میکروامولسیون‌ها و نانوامولسیون‌های شفاف، از این قانون تبعیت نمی‌کنند.

نانوامولسیون چیست؟

تلفیق علم نانو و امولسیون چه محصولی می‌تواند باشد؟ امولسیون‌هایی که اندازه قطرات آن‌ها در حدود نانومتری و به‌طورمعمول در محدوده ۲۰ تا ۲۰۰ نانومتر قرار می‌گیرد را نانوامولسیون می‌نامند. نانوامولسیون‌ها، سامانه‌های غیرتعادلی هستند که به‌صورت خودبه‌خودی تشکیل نمی‌شوند و اعمال انرژی برای تولید آن‌ها موردنیاز است. به‌واسطه ویژگی اندازه، نانوامولسیون‌ها با چشم غیرمسلح به‌صورت شفاف یا نیمه‌شفاف قابل مشاهده‌اند و پایداری بالایی دارند. ساختار و ویژگی‌های منحصربه‌فرد نانوامولسیون‌ها در مقایسه با امولسیون‌های معمولی مزیت‌هایی را برای کاربرد گسترده آن‌ها در بسیاری از صنایع، ازجمله صنایع آرایشی و بهداشتی و غذایی، ایجاد کرده است. همچنین، به‌واسطه ریز بودن قطرات، نانوامولسیون‌ها سطح ویژه زیادی دارند و به همین دلیل قابلیت نفوذ خیلی بالایی خواهند داشت که این ویژگی آن‌ها را به سامانه‌های انتقالی مؤثر تبدیل کرده است. [۱]

شکل ۳. مقایسه ظاهری نانوامولسیون (چپ) و ماکروامولسیون (راست) به‌ترتیب با قطراتی به ابعاد ۳۵ نانومتر و ۱ میکرومتر [۴]

شکل ۲ مقایسه ظاهری نانوامولسیون (چپ) و ماکروامولسیون (راست) به ترتیب با قطراتی به ابعاد ۳۵ نانومتر و ۱ میکرومتر[۲]

به‌واسطه اندازه قطرات، نانوامولسیون‌ها پایداری بالایی در برابر پدیده‌های رسوب کردن و خامه‌ای شدن دارند. هرچه مقیاس حباب‌های تولیدی کوچک‌تر باشد، پایداری امولسیون نیز افزایش پیدا خواهد کرد. طولانی بودن دوره پایداری نانوامولسیون‌ها در قیاس با امولسیون‌ها منجر به کاهش مصرف‌گرایی و آسیب به محیط‌زیست می‌شود چراکه به مدت

بیشتری نانوامولسیون‌ها می‌توانند مورد مصرف قرار گیرند. [۱]

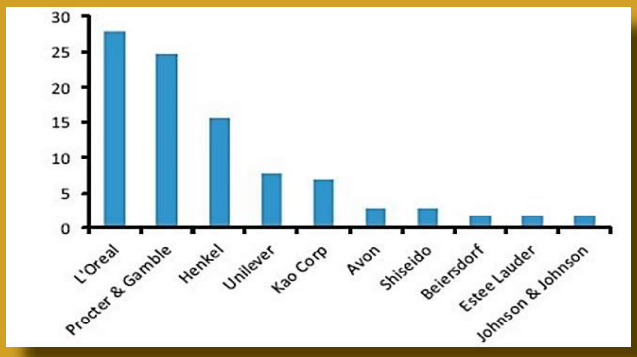
شکل ۳سمت راست نانوامولسیون شفاف را در قیاس با امولسیون‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر[۳]

کاربردهای نانوامولسیون در صنعت

نانوامولسیون‌ها نیز مانند امولسیون‌ها در صنایع مختلفی کاربرد دارند؛ در اینجا چند صنعت را به‌طور مختصر بررسی می‌نماییم.

۱. صنعت آرایشی و بهداشتی

گرچه علاقه به نانوامولسیون‌ها از حدود ۲۰ سال پیش افزایش‌یافته است، بیشترین کاربردهای مستقیم نانوامولسیون‌ها در محصولات مصرفی مربوط به فرآورده‌های دارویی و آرایشی بوده است. امروزه در قیاس با گذشته، مصرف‌کنندگان از کیفیت و مواد مصرفی در محصولات آرایشی و بهداشتی آگاهی بیشتری دارند. این آگاهی مشتریان را به سمت استفاده از محصولاتی که کارایی بیشتری دارند، سوق می‌دهد. نانوامولسیون‌ها در صنعت آرایشی و بهداشتی کاربردهای فراوانی دارد. به‌طور مثال، نانوامولسیون‌ها به‌عنوان کرم‌های ضد چروک و پیری نفوذ مؤثرتری نسبت به امولسیون‌ها در پوست دارند که منجر به بازدهی بیشتر محصول در رساندن مواد مؤثره به پوست می‌شود. [۴][۱]



شکل ۴ میزان مصرف شرکت‌های مختلف آرایشی از فناوری نانو در سال ۲۰۱۲[۵]

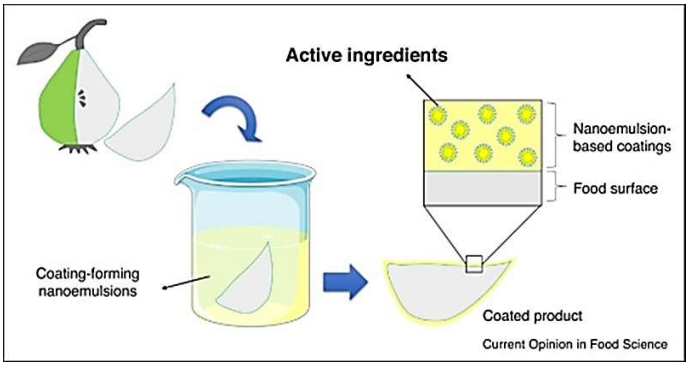
شکل ۵ نمونه یک نانوامولسیون برای مرطوب کردن پوست صورت در صنعت آرایشی و بهداشتی

۲. صنعت غذایی

متخصصان صنایع غذایی در طی سال‌های اخیر در پی استفاده از این ساختارهایی برای یکپارچه‌سازی ترکیبات فراسودمند آب‌گریز (چربی‌دوست) در شبکه‌های غذایی هستند. البته لازم به یادآوری است که به‌رغم مزایا و خواص منحصربه‌فرد نانوامولسیون‌ها، کاربرد آن‌ها در سامانه‌های غذایی هنوز با چالش‌هایی ازجمله فرایند تولید، به‌ویژه هزینه تولید، توصیف نانوامولسیون‌های حاصل و نیز پذیرش و سلامت سامانه‌های غذایی که نانوامولسیون‌ها در آن‌ها به کار می‌روند، روبه‌رو است. [۱]

شکل ۶ نمونه‌ای از امولسیون‌ها در صنایع غذایی

پیش‌بینی می‌شود. استفاده از فناوری نانو در ساخت امولسیون‌ها جدیدترین و بروزترین فناوری موجود در صنایع غذایی است. در سال‌های اخیر، با افزایش نمایی جمعیت جهان که به همراه آن نیاز غذایی افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود نیاز به انواع جدید امولسیون کننده‌ها در صنایع غذایی افزایش یابد. با وجود اینکه ابتکار این تکنولوژی منجر به افزایش هزینه کنونی تولید می‌گردد، اما رشد و کاهش هزینه‌های آتی بهره‌گیری و نصب بیشتر تولیدکنندگان محلی از این فناوری را به دنبال خواهد داشت.[۶]

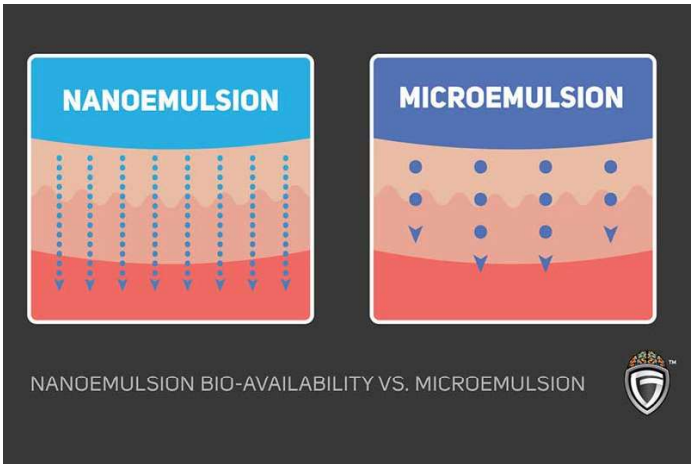


شکل ۷ نانوامولسیون ها به‌عنوان پوشش‌های خوراکی[۷]

۳. صنعت دارویی

تعداد فزاینده‌ای از شرکت‌های دارویی زیستی علاقه‌مند به استفاده از نانوامولسیون در واکسن‌ها هستند. تحقیقات و آزمایشات نتایج مثبتی را برای استفاده از این محصول در بازار واکسن‌ها نشان داده است. این واکسن‌ها برای درمان عفونت‌های مزمن و بیماری‌های سرطانی از طریق درمان‌های هدفمند تولید می‌شوند. [۸][۹]

نانوامولسیون‌ها به‌عنوان نانو واکنش‌گرها نیز اهمیت زیادی در فرمولاسیون‌های دارویی و بهداشتی دارند. آن‌ها در کنترل و انتشار دارو، رهایش مناسب ترکیبات فعال در سراسر پوست، هدف‌گیری دارو در بخش‌های ویژه در بدن، دریافت واکسن‌ها، حمل‌کننده‌های ژن و اعمال داخل وریدی، به سبب انجام اهداف دقیق در مسیر اجرا، مفید هستند. همچنین، برای تحویل دارو یا پلاسمیدهای DNA از میان پوست بعد از اعمال جلدی مناسب هستند. [۱]



شکل ۸ مقایسه تحویل دارویی میکروامولسیون‌ها (سمت راست) با نانوامولسیون‌ها (سمت چپ)[۱۰]

۴. صنعت پاک‌کننده‌ها و شوینده‌ها

شوینده‌ها حاوی سورفکتانت و یا مواد فعال سطحی هستند که مثل یک پل بین فاز آلی و آبی عمل می‌کنند و یا با کمک سورفکتانت و ماده فعال، سطح را از آلودگی پاک خواهند کرد. همچنین با استفاده از نانوامولسیون‌های شوینده ضمن صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف آب، می‌توان از مخاطرات ناشی از مصرف شوینده‌های موجود در بازار ازجمله شوینده‌های الکلی پیشگیری نمود. [۱]

شایان ذکر است این فناوری و محصول در تصفیه پساب، کشاورزی، اکسیژن‌رسانی به آبزیان نیز کاربرد دارد که باعث بهبود و تسریع فرایند هرکدام در جهت کمک به حفظ محیط‌زیست می‌شود.

چشم‌انداز آینده در صنایع پایین‌دستی

با توجه افزایش روزافزون جمعیت، شاهد افزایش چشمگیر تقاضا برای انواع محصولات مصرفی، مواد غذایی، دارویی، آرایشی و بهداشتی و... در صنعت هستیم. به‌طورکلی در ایران اکثر امولسیون کننده‌ها به کشور وارد می‌شوند، این واردات موجب خروج ارز از کشور می‌شود. با ساخت نانوامولسیون‌ها میزان نیاز کشور به امولسیون کننده‌ها کاهش می‌یابد و این اتفاق موجب حفظ ارز می‌شود. از سوی دیگر با ساخت نانوامولسیون‌ها در صنایع مختلف در دنیا مورد نیاز هستند که با صادرات به نقاط مختلف دنیا می‌توان ارزآوری کرد.

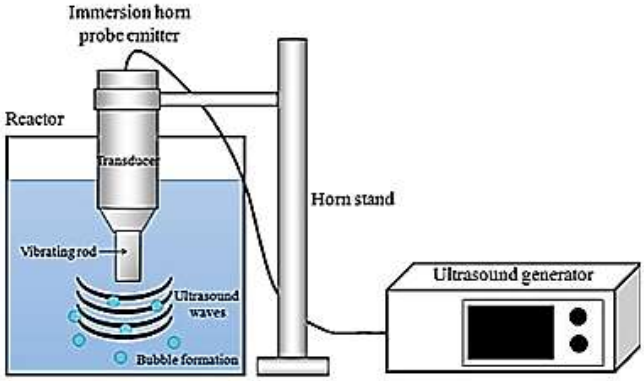
با توجه به مزیت فناوری حباب فراریز در کاهش چشمگیر استفاده از امولسیفایر و پایداری و کیفیت بیشتر محصولات تولیدی و در نهایت کاهش قیمت تمام‌شده و هزینه‌های تولید، این فناوری می‌تواند در صنعت فراگیر شود و بازاری حداقل بین ۲۵ تا ۵۰۰ میلیاردی را تصاحب کند. [۱۱][۱۲] افزایش

قیمت ماشین‌آلات جدید و هزینه بالای تولید امولسیون کننده‌ها مانع رشد هر چه بیشتر بازار امولسیون‌ها می‌شود. با کاهش هزینه‌هایی مانند هزینه ماشین‌آلات، رشد بازار از سطح داخلی را مشاهده‌گر خواهیم بود. [۶]

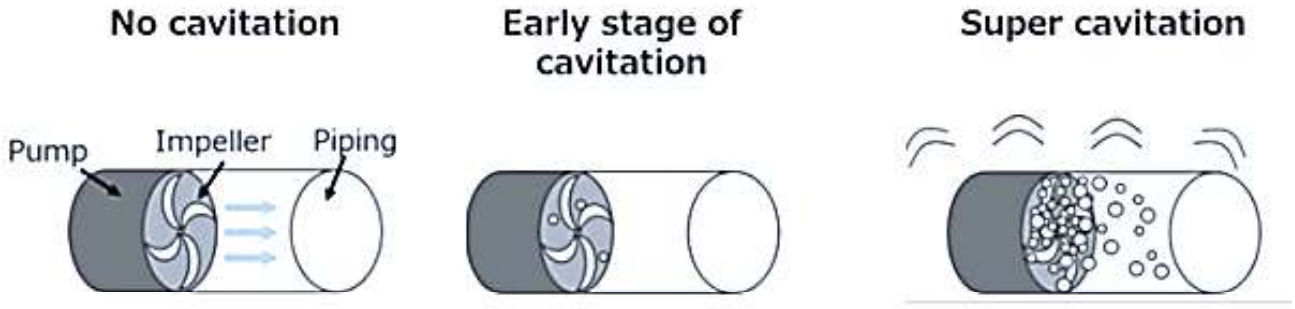
تکنیک‌های مختلفی برای تولید نانوامولسیون‌ها وجود دارد که هر یک از آن‌ها باعث تولید نانو امولسیون‌هایی با ویژگی‌های متفاوت می‌شود و هر یک دارای مزایا و معایبی است. [۱]

روش ایجاد نانوحباب‌ها (کاویتاسیون)

کاویتاسیون فرآیندی است که طی آن در ناحیه‌ای از مایع با فشار پایین، حباب بخار شکل می‌گیرد. کاویتاسیون مشابه پدیده جوشش است، با این تفاوت که جوشش به صورت عمومی، در نتیجه افزایش دمای مایع به وجود می‌آید ولی کاویتاسیون در اثر کاهش فشار ایجاد می‌شود. در بسیاری از سیستم‌ها (پمپ) به علت استهلاک بالا و صدای گوش‌خراش کاویتاسیون را پدیده‌ای منفی تلقی می‌کنند درحالی‌که در برخی فناوری‌ها من جمله ایجاد حباب در ابعاد میکرو و نانو این فناوری بسیار با ارزش می‌باشد. [۱۳]



شکل ۰۱ ایجاد حباب در روش کاویتاسیون التراسونیک



شکل ۹ پدیده کاویتاسیون در پمپ‌ها

کاویتاسیون به روش التراسونیک(Ultrasonic Cavitation)

یک روش شناخته‌شده کاویتاسیون، روش التراسونیک با ایجاد امواج شدید فشاری در یک محیط مایع، است. در اصل وقتی موج التراسونیک در یک محیط مایع منتشر می‌شود، الگوی تکراری «متراکم شدن و کاهش تراکم» موجب حرکت موج صوت می‌شود و به علت کاهش فشار، حباب‌های خیلی ریز در نواحی‌ای که کاهش تراکم رخ می‌دهد، شکل می‌گیرند. [۱۴].

امواج فراصوت (التراسونیک) به دسته‌ای از امواج مکانیکی گفته میشود که فرکانس نوسان آن‌ها بیشتر از محدوده شنوایی انسان (02KHz20-Hz) است. اساس کار دستگاه تولید کاویتاسیون به روش التراسونیک تبدیل انرژی الکتریسیته به امواج مافوق صوت و انتقال آن به یک مایع است. جریان برق شهری با عبور از قسمت منبع تغذیه دستگاه به جریانی با ولتاژ بالا تبدیل می شود. این جریان از طریق صفحات فلزی (که معمولاً از جنس مس هستند) به حلقه‌های پیزوسرامیک (پیزوسرامیک: سرامیکی که خاصیت پیزوالکتریکی معکوس دارد، یعنی در اثر اختلاف ولتاژ به ارتعاش درمی‌آیند) منتقل می‌شوند. [۱۴]

معایب این روش:

۱. امواج فراصوت دارای اثرات مضر روی فازهای ثانویه‌اند؛ به‌طور مثال در زمانی که فاز روغنی و فاز آبی داریم، امواج فراصوت بر روی فاز روغنی اثر کرده و دچار تغییراتی مخرب بر روی مولکول‌های این فاز می‌شوند هرچند در فاز آبی این‌گونه نیست. این اثر مخرب شیمیایی بر روی فاز ثانویه سبب می‌گردد تا کاربرد آن در صنایع کاهش یابد. در واقع بر کیفیت محصولات دارویی، غذایی، آرایشی و بهداشتی اثر منفی دارد.

۲. استفاده از این روش به صورت ممتد باعث بالا رفتن دمای امولسیون شده و در مواردی که جزءهای روغنی حساس به دما باشند، استفاده از این روش با محدودیت همراه است.

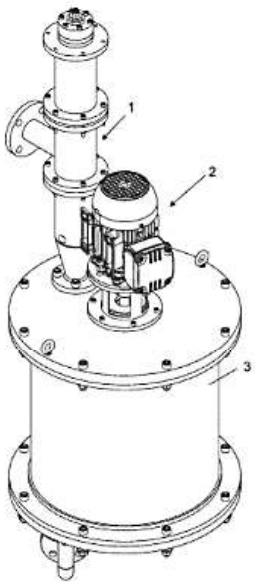
۳. برق مصرفی در این روش در مقایسه با روش‌های دیگر، بسیار پرهزینه است.

کاویتاسیون به روش هیدرودینامیک:

پدیده کاویتاسیون هیدرودینامیک هنگامی ایجاد می‌شود که سیال ورودی در هنگام حرکت از هندسه‌های مخصوص مانند ونتوری و یا اریفیس دچار کاهش فشار شود. در این حالت حباب‌های بخارآب به وجود آمده و در مراحل بعدی با جبران فشار از دست‌رفته، حباب‌ها منفجر می‌شوند. ادامه فرآیند مشابه فرآیند کاویتاسیون التراسونیک است، که موجب پایداری فاز روغن در فاز آب می شود. [۱۵]

مزایا استفاده از کاویتاسیون هیدرودینامیک در مقایسه با کاویتاسیون التراسونیک عبارت‌اند از:

۱. قابلیت استفاده در مقیاس‌های بالا (Scale-up)
۲. مصرف انرژی به‌مراتب کمتر (تجهیزات برقی کم‌مصرف‌تر)
۳. پایداری بیشتر (کاهش اندازه ذرات و قرارگیری در بازه مناسب پتانسیل زتا)
۴. استفاده کمتر امولسیفایر نسبت بهروش‌های مشابه
۵. مدت‌زمان مناسب (نسبتا کم) تولید
۶. توزیع اندازه یکنواخت حباب‌ها برای ساخت نانوامولسیون



در راکتور کاویتاسیون هیدرودینامیک براساس نوع فازهای روغنی و آبی، هندسه های گوناگونی قابلیت استفاده دارند، اجزایی مانند پمپ، مخازن و... نیز بسته به نوع فازهای روغنی و آبی به گونهای انتخاب می‌شوند تا گستره وسیعی از محصول را در بر بگیرند.[۱۶]روش مکانیکی یا کاویتاسیون خود به چند صورت قابل انجام است که نقطه مشترک بین همهی آنها این است که عمدتا ساده هستند و نیازی به تجهیزات پیچیدهای ندارند چند روش معمول در کاویتاسیون هیدرودینامیک از قرار زیر است[۱۶] : استفاده از جریان چرخشی، ونتوری، اجکتور و همزن.

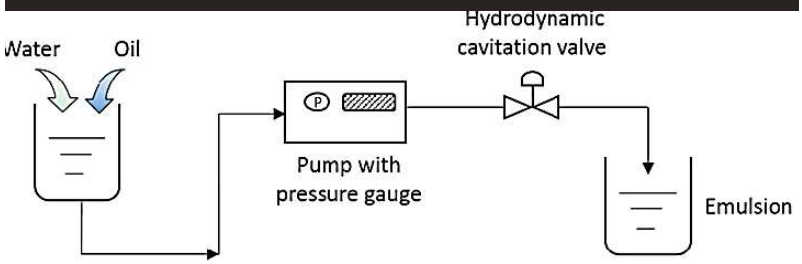


Fig. 1. The schematic diagram of the hydrodynamic cavitation emulsification process.

شکل۱۲ اجزای اصلی تشکیل دهنده کاویتاسیون هیدرودینامیک

پارامترهای موثر در روش کاویتاسیون هیدرودینامیک:[۱۶] [۱۵]

۱. هندسه راکتور کاویتاسیون هیدرودینامیک: هندسه راکتور نقش مهمی در میزان افت فشار و در نتیجه تولید حباب‌ها ایفا میکند. به همین منظور لازم است، با هر فاز روغنی و آبی راکتورها متناسب ساخته شود.

۲. فشار ورودی به راکتور: با درنظر گرفتن افت فشار یکسان در راکتورها، فشار ورودی بر قطر حباب‌ها، چگالی حباب‌ها و در نتیجه میزان اختلاط فاز روغنی و آبی تاثیر بسزایی دارد.

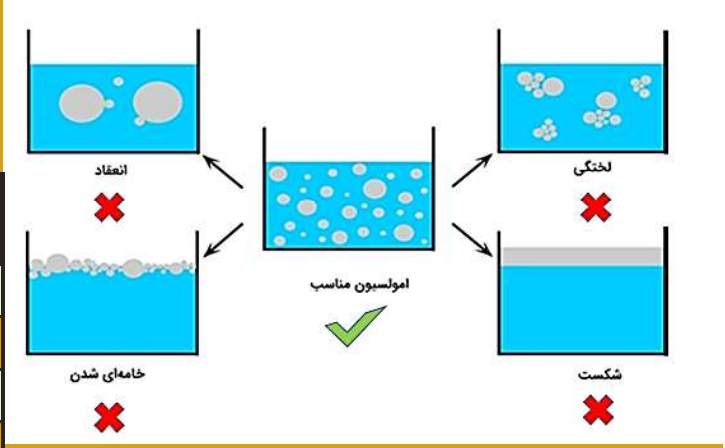
۳. تعداد دفعات عبوری فازهای روغنی و آبی از راکتور: امولسیون با هر بار عبور از کاویتاسیون، شفاف تر می شود. این بدین معنی است که اندازه ذرات در هر بار عبور کاهش می یابند و ریزتر می‌شوند.

۴. نسبت فاز روغنی به فاز آبی: فاز روغنی تا درصد مشخصی قابلیت حل در فاز آبی را داشته و در صورت اشباع، به صورت فاز ثانویه در امولسیون باقی میماند.

۵. درصد سرفکتانت: در برخی از کاربردهای دارویی، آرایشی بهداشتی و ... به منظور افزایش ماندگاری، از سرفکتانت ها با درصد بسیار کمی استفاده می شود.

پایداری نانوامولسیون‌ها

یکی از اصلی ترین و مهم ترین ویژگی های محصول نهایی پروژه، پایداری بلند مدت آن است. مفهوم پایداری به معنای توانایی یک سیستم در مقابله با تغییر مشخصات آن سیستم در گذر زمان است و در امولسیونها منظور از پایداری، جلوگیری از بروز عوارض لختگی، انعقاد و خامهای شدن فاز پخش شونده است. هر یک از عوارض نام برده شده، در نهایت منجر به جدایی دو فاز تشکیل دهندهی امولسیون میشود. [۱۷]



شکل ۱۳ مقایسه امولسیون پایدار و ناپایدار

شرایط و عوامل مختلفی در پایداری مناسب امولسیون تاثیر گذار هستند. از جمله ی این عوامل، میتوان به مقدار پتانسیل زتا اشاره کرد. پتانسیل زتا، معیاری برای میزان پتانسیل الکتروسینتیکی در مواد شیمیایی همچون کلوئیدها و امولسیونها است. در امولسیونها، اگر قدرمطلق این عدد از ۳۰ میلیولت بیشتر باشد (چه مثبت و چه منفی) پایداری مناسبی در امولسیون وجود خواهد داشت. در پتانسیل زتای بالای ۶۰ میلیولت، پایداری بسیار قوی خواهد بود. البته پتانسیل زتا به تنهایی کافی نیست زیرا که مقدار آن به میزان اسیدی یا بازی بودن (مقدار pH) و نیز قدرت یونی محلول وابستگی زیادی دارد. [۱۸]

عامل دیگری که در پایداری امولسیون موثر است، اندازهی حبابهای فاز پخش شوندگی امولسیون است. طبق بررسیها، نانوامولسیونها که دارای حبابهای مقیاس نانو (حدود ۱۰۰ نانومتر) هستند، به صورت سینتیکی پایدار هستند. این امولسیونها بدون اضافه کردن هیچگونه مواد فعال سطحی، به دلیل سایز حبابهای موجود، تا یک سال پایداری قابل قبولی خواهند داشت و در صورت افزوده شدن مواد نگهدارنده، پایداری آنها بالطبع افزایش چشمگیری پیدا خواهد کرد. [۱۸]

تاثیر اقتصادی تولید و تجاری سازی نانوامولسیونها:

پیش از ارائه هر مطلبی باید اشاره شود که خروجی پروژه حاضر بیشتر به گسترش یک فناوری در حوزهی علم نانو می‌پردازد که حوزهی کاربرد آن محدوده‌ی بسیار گسترده‌ای از محصولات در صنایع مختلف را شامل می‌شود و میتواند بهعنوان نسل جدیدی از همزنها و هموژنایزرها برای ساخت امولسیون مورد استفاده قرار بگیرد. [۱۰]

حال به بررسی آمار صادرات و واردات امولسیونها و مهمتر از آن امولسیفایرها میپردازیم،[۱۱] [۱۲] میدانیم امولسیفایرها مواد با ارزش و گران قیمتی هستند که استفاده بهینه از آنها منجر به کاهش قیمت محصول نهایی میگردد. همچنین کیفیت امولسیونهای ایجاد شده با فناوری حباب فرارین را افزایش خواهند داد.

جدول ۱ هزینه و جرم امولسیفایر ورودی به کشور

سال	کل جرم امولسیفایر ورودی به کشور(کیلوگرم)	مجموع هزینه‌ها (دلار)
1390	3053143	11189089
1391	3246378	13612084
1392	3516499	12796817
1393	3391659	12374053
1394	5687905	14584613
1395	5808560	13153263
1396	5365293	12717140
1397	5078599	12388423

این واردات موجب خروج ارز از کشور می‌شود. با ساخت نانوامولسیون‌ها میزان نیاز کشور به امولسیفایرها کاهش می‌یابد و این حفظ ارز را به دنبال دارد. از سوی دیگر با ساخت نانوامولسیون‌ها در صنایع مختلف در دنیا موردنیاز هستند. با صادرات این فناوری به نقاط مختلف دنیا می‌توان ارزآوری کرد.

برخلاف واردات وسیع و چشمگیر امولسیفایر دور از انتظار نیست که نرخ صادرات آن بسیار ناچیز باشد زیرا در این بخش نیاز بسیاری به شرکت‌ها و کارخانه‌های تولیدکننده احساس می‌شود. ایران به دانش تولید امولسیفایر های صنایع غذایی دست‌یافته است، شرکت پارس بهبود آسیا اولین تولیدکننده امولسیفایرهای خوراکی در ایران است. [۱۹]

سخن آخر

هدف اصلی از انجام این پروژه، ساخت دستگاهی است که با استفاده از فناوری حباب فرارین (کاویتاسیون هیدرودینامیک)، نانوامولسیونهایی با اندازه ذرات کمتر از ۲۰۰ نانومتر و با پایداری مناسب تولید کند. که به این جهت فرضیاتی منطقی در روند ساخت پیاده شد و شبیه‌سازی‌های مکانیکی لازم صورت گرفت و طرح مکانیکی دستگاه نهایی تهیه گردید و

نمونه اولیه پمپ و تجهیزات ساخته شد در نهایت به کمک آزمون‌های سنجش کیفیت موارد مهمی نظیر تراکم، سایز ذرات و پایداری‌شان آنالیز گردید، نتیجه حاصل حاکی از کیفیت رضایت‌بخش امولسیون بود. امید است با بهره‌گیری از این فناوری محصولات بسیاری تهیه و به بازار وارد شوند تا علاوه بر افتخارات علمی تأثیر مثبتی بر وضعیت اقتصادی کشور و تولید ملی داشته باشیم.

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از راهبر پروژه شرکت راصد، دکتر ابوذر سهرابی، و تمامی اعضای تیم که با تلاش و همکاری توانستیم این پروژه را به سرانجام برسانیم.

منابع و مراجع

[۱] عادل میرمجیدی، سلیمان عباسی. نانوامولسیون‌ها؛ معرفی، تولید، کاربرد. ماهنامه فناوری نانو. ۱۳۹۲، شماره ۱۹۳.

[۲] C. Solans, P. Izquierdo, J. Nolla, N. Azemar, and M. J. Garcia-Celma, "Nano-emulsions," Current Opinion in Colloid and Interface Science, vol. 10, no. 3–4. Elsevier, pp. 102–110, Oct. 01, 2005, doi: 10.1016/j.cocis.2005.06.004.

[3] "https://embarknano.com/." .

[4] "Özgün, Sinan. Nanoemulsions in Cosmetics. Nanomaterials and Nanotechnology Lecture. 2013." .

[5] S. Raj, S. Jose, U. S. Sumod, and M. Sabitha, "Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges," Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, vol. 4, no. 3. Wolters Kluwer -- Medknow Publications, pp. 186–193, Jul. 2012, doi: 10.4103/0975-7406.99016.

[6] Aniket Kadam , Roshan Deshmukh. Nanoemulsion Market by Type (Small-molecule Surfactant, Protein-stabilized Emulsions, and Polysaccharide) and Application (Beverage, Dairy, and Bakery): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast 2019-2026 (market re. .

[7] A. Acevedo-Fani, R. Soliva-Fortuny, and O. Martín-Belloso, "Nanoemulsions as edible coatings," Current Opinion in Food Science, vol. 15. Elsevier Ltd, pp. 43–49, Jun. 01, 2017, doi: 10.1016/j.cofs.2017.06.002.

[8] W. Cao et al., "An oil-in-water nanoemulsion enhances immunogenicity of H5N1 vaccine in mice," Nanomedicine Nanotechnology, Biol. Med., vol. 12, no. 7, pp. 1909–1917, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.nano.2016.04.005.

[9] S. H. Wang et al., "A novel combination of intramuscular vaccine adjuvants, nanoemulsion and CpG produces an effective immune response against influenza A virus," Vaccine, vol. 38, no. 19, pp. 3537–3544, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.vaccine.2020.03.026.

[10] "http://guardianathletic.com/." .

[11] "https://tpo.ir/." .

[12] "http://irica.ir." .

[13] and M. Z. S. M. M. Modarres-Gheisari, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Malaki, P. Safarpour, "Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions," University of Melbourne.

[14] and A. G. A. Saady, P. Sudhakar, M. Nassir, "Ultrasonic assisted synthesis of styrylpyridinium dyes: Optical properties and DFT calculations." Ultrason - Sonochemistry journal, p. vol. 67, doi: https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105182.

[15] D. Panda, V. K. Saharan, and S. Manickam, "Controlled hydrodynamic cavitation: A review of recent advances and perspectives for greener processing," Processes, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.3390/pr8020220.

[16] J. J. Zhiliang Zhang, GuangquanWang, Yong Nie, "Hydrodynamic cavitation as an efficient method for the formation of sub-100 nmO/W emulsions with high stability." Chinese J. Chem. Eng, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.04.011.

[17] D. A. Nelson, R. L. Kirkwood, and J. M. Douglas, "MAKING STABLE EMULSIONS, A Guide to Formulation and Processing," Simulation Series, vol. 20, no. 4. Colloid and interface science in pharmaceutical research and development, ELSEVIER Science. Ch.8, P157.

[18] H. K. Kumar, "Ultrasonication assisted formation and stability of water-in-oilnano-emulsions: Optimization and ternary diagram analysis." Ultrasonics - Sonochemistry, p. Pages 79-88, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.022.

[19] "http://parsbehbood.com/." .