

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده عمران و حمل و نقل

گروه مهندسی محیط زیست

پروژه کارشناسی ارشد رشته‌ی عمران گرایش مهندسی محیط زیست

کاربرد DAF در حذف جامدات معلق و چربی در فاضلاب‌ها

استاد راهنما:

دکتر علی دهنوی

دانشجو:

سیدجمال الدین علوی

دی ماه ۱۴۰۴

چکیده

پژوهش حاضر، با تمرکز بر کاربرد فرآیند شناورسازی با هوای محلول در حذف جامدات معلق و چربی از فاضلاب‌ها، به بررسی جامع تاریخی، مبانی نظری، روش‌های مرسوم و نوین، مطالعات موردی، مزایا و معایب این فناوری پرداخته است. فرآیند شناورسازی با هوای محلول، که از قرن نوزدهم در جداسازی مواد معدنی آغاز شد و در دهه‌های ۱۹۳۰ تا ۲۰۲۵ با نوآوری‌هایی همچون نسل سوم توربولانسی، میکروحباب‌های نوین، نانومواد هیدروفوبیک و ترکیب با غشاهای راکتورهای زیستی توسعه یافت، بر پایه تولید حباب‌های ریز هوا برای جداسازی آلاینده‌ها عمل می‌کند. اهداف اصلی این مطالعه، ارزیابی کارایی شناورسازی با هوای محلول در صنایع کاغذ، غذا، نفت و گاز، فاضلاب شهری و آب آشامیدنی، و مقایسه روش‌های سنتی (مانند ADKA و Sveen-Pedersen) با رویکردهای نوین است. روش‌شناسی بر پایه بررسی ادبیات، تحلیل مطالعات موردی (مانند تصفیه پساب پالایشگاه نفت، کشتارگاه طیور و صنایع لبنی) و مقایسه کمی پارامترهایی همچون نرخ جریان (تا ۶۰ متر بر ساعت در نسل نوین)، راندمان حذف (بیش از ۹۵ درصد برای TSS و روغن) و عوامل مؤثر (فشار اشباع ۳۰۰-۵۰۰ kPa و دوز کوآگولانت ۱۰-۲۰ mg/L) بنا نهاده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که روش‌های نوین، با غلبه بر محدودیت‌های هیدرولیکی و انرژی‌بر بودن روش‌های مرسوم، کارایی بالاتری (۱۰-۳۰ درصد بهبود) در حذف آلاینده‌ها ارائه می‌دهند و پتانسیل بالایی برای بازچرخش آب و تولید بیوگاز از لجن دارند. با این حال، معایبی همچون حساسیت به شرایط عملیاتی (pH=۵ و زمان ماند < ۱۵ دقیقه) و هزینه اولیه تجهیزات وجود دارد. در نتیجه، شناورسازی با هوای محلول به عنوان یک فناوری پایدار و مقاوم، گزینه‌ای کارآمد برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری تلقی می‌شود و پیشنهاد می‌گردد تحقیقات آتی بر ادغام با انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی برای مقیاس بزرگ تمرکز یابد.

فهرست

- فصل اول ۱
- تاریخچه شناورسازی با هوای محلول ۱
- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۱-۲- استفاده اولیه از شناورسازی برای جداسازی مواد معدنی ۲
- ۱-۳- توسعه شناورسازی با هوای محلول برای صنعت کاغذ ۳
- ۱-۴- سازگاری شناورسازی با هوای محلول برای تصفیه فاضلاب صنعتی ۴
- ۱-۵- شکل‌گیری بنیان نظری شناورسازی با هوای محلول ۵
- ۱-۶- شناورسازی با هوای محلول برای تصفیه آب آشامیدنی در دهه ۱۹۶۰ ۶
- ۱-۷- گسترش جهانی شناورسازی با هوای محلول از دهه ۱۹۷۰ ۷
- ۱-۸- کنفرانس‌های بین‌المللی شناورسازی با هوای محلول ۷
- ۱-۹- پذیرش و استقرار جهانی شناورسازی با هوای محلول ۸
- ۱-۱۰- احیای جهانی و پذیرش گسترده شناورسازی با هوای محلول در دهه ۱۹۹۰ ۸
- ۱-۱۱- پیشرفت‌های فنی و نرخ‌های بالا در دهه ۲۰۰۰ ۹
- ۱-۱۲- نوآوری‌های پایدار و کاربردهای نوظهور از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ ۱۰
- فصل دوم ۱۲
- تعاریف، مبانی و کاربردهای شناورسازی با هوای محلول ۱۲
- ۲-۱- مقدمه ۱۲
- ۲-۲- اجزای شناورسازی با هوای محلول ۱۲
- ۲-۲-۱- بخش پیش‌تصفیه شیمیایی (انعقاد و لخته‌سازی) ۱۲
- ۲-۲-۲- سیستم تولید و تزریق حباب‌های ریز هوا ۱۳
- ۲-۲-۳- واحد اصلی جداسازی ۱۳
- ۲-۳- انواع روش شناورسازی با هوای محلول ۱۴

- ۲-۴- عناصر درگیر در فرآیند..... ۱۴
- ۲-۵- نیروها و تعاملات درگیر..... ۱۵
- ۲-۶- چالش‌ها در اجرا..... ۱۶
- ۲-۷- پارامترهای اصلی..... ۱۶
- ۲-۸- کاربردهای شناورسازی با هوای محلول..... ۱۷
- ۲-۸-۱- کاربرد در صنعت کاغذ..... ۱۷
- ۲-۸-۲- کاربرد در صنعت غذا..... ۱۸
- ۲-۸-۳- کاربرد در صنعت نفت و گاز..... ۱۸
- ۲-۸-۴- کاربرد در فاضلاب شهری..... ۱۹
- ۲-۸-۵- کاربرد در آب آشامیدنی..... ۱۹
- ۲-۸-۶- کاربرد در آب دریا (نمک زدایی)..... ۱۹
- فصل سوم..... ۲۰
- روش‌های مرسوم و نوین شناورسازی با هوای محلول..... ۲۰
- ۱-۳- روش‌های مرسوم..... ۲۱
- ۱-۱-۳- نسل اول سیستم‌های شناورسازی با هوای محلول، سیستم‌های ADKA و Sveen-Pedersen..... ۲۱
- ۲-۱-۳- نسل دوم شناورسازی با هوای محلول..... ۲۱
- ۳-۱-۳- فیلتر شناوری..... ۲۲
- ۴-۱-۳- شناورسازی با هوای محلول با بازچرخش آب پراکنده..... ۲۳
- ۲-۳- روش‌های نوین..... ۲۴
- ۱-۲-۳- نسل سوم شناورسازی با هوای محلول در شرایط جریان آشوبناک (توربولانسی)..... ۲۴
- ۲-۲-۳- شناورسازی با هوای محلول با میکرو حباب‌های نوین..... ۲۵
- ۳-۲-۳- شناورسازی با نانومواد هیدروفوبیک..... ۲۶
- ۴-۲-۳- شناورسازی با هوای محلول دو مرحله‌ای..... ۲۷
- ۵-۲-۳- شناورسازی با هوای محلول بهینه‌شده برای فاضلاب نفتی..... ۲۸
- ۶-۲-۳- شناورسازی با هوای محلول پیشرفته با فرآیندهای ترکیب..... ۲۹
- ۷-۲-۳- شناورسازی با هوای محلول با کوآگولانت‌های طبیعی..... ۳۳

۳۳	۳-۳- مقایسه روش های مرسوم و نوین
۳۳	۳-۳-۱- طراحی و ساختار مخازن
۳۴	۳-۳-۲- نرخ جریان و شرایط جریان
۳۵	۳-۳-۳- راندمان حذف آلاینده ها و عوامل مؤثر
۳۷	فصل چهارم
۳۷	مطالعات موردی
۴۳	فصل پنجم
۴۳	مزایا و معایب روش های شناورسازی با هوای محلول
۴۳	۵-۱- مزایای روش های شناورسازی با هوای محلول
۴۳	۵-۱-۱- کارایی بالا در حذف آلاینده ها
۴۴	۵-۱-۲- نرخ جریان و بهره وری هیدرولیکی بالا
۴۴	۵-۱-۳- مزایای اقتصادی و عملیاتی
۴۴	۵-۱-۴- انعطاف پذیری در کاربردها
۴۵	۵-۲- معایب روش های شناورسازی با هوای محلول
۴۵	۵-۲-۱- محدودیت های هیدرولیکی و جریان
۴۵	۵-۲-۲- نیاز به انرژی و تجهیزات پیچیده
۴۶	۵-۲-۳- حساسیت به شرایط عملیاتی و آلاینده ها
۴۶	۵-۲-۴- محدودیت های اقتصادی و زیست محیطی
۴۶	۵-۲-۵- جدول خلاصه مزایا و معایب
۴۸	فصل ششم
۴۸	نتیجه گیری
۴۹	منابع

فصل اول

تاریخچه شناورسازی با هوای محلول

۱-۱- مقدمه

شناورسازی با هوای محلول^۱ یکی از روش‌های فیزیکی-شیمیایی پرکاربرد در تصفیه آب و فاضلاب است که برای جداسازی و حذف ذرات معلق، روغن و چربی، جامدات معلق ریز (TSS)، و برخی آلاینده‌های کلوئیدی از فاضلاب یا آب به کار می‌رود.

این فرآیند بر پایه تغییر حلالیت هوا در آب با فشار عمل می‌کند. هوا (یا گاهی گازهای دیگر) تحت فشار بالا (معمولاً ۳ تا ۶ بار) در بخشی از آب (اغلب آب تصفیه‌شده خروجی که به آن بازچرخش می‌گویند) حل می‌شود. سپس این آب اشباع‌شده با هوا از طریق یک شیر فشارشکن وارد مخزن اصلی شناورسازی می‌گردد. در لحظه کاهش ناگهانی فشار به فشار اتمسفری، هوای حل‌شده دیگر نمی‌تواند در آب بماند و به صورت حباب‌های بسیار ریز (معمولاً ۲۰ تا ۱۰۰ میکرومتر) از آب خارج می‌شود.

این حباب‌های میکروسکوپی به ذرات معلق، لخته‌ها، ذرات روغن یا چربی چسبیده و به آنها نیروی شناوری (بالا برنده) می‌دهند. چون چگالی مجموعه حباب + ذره خیلی کمتر از چگالی آب می‌شود، این ذرات به سرعت به سطح آب صعود می‌کنند و یک لایه کف (فوم یا اسکیم) تشکیل می‌دهند. در نهایت این لایه کف توسط اسکیمر (تیغه‌های جمع‌کننده) جمع‌آوری و خارج می‌شود و آب نسبتاً زلال از پایین مخزن خارج می‌گردد.

¹ Dissolved Air Flotation (DAF)

۲-۱- استفاده اولیه از شناورسازی برای جداسازی مواد معدنی

تا دوره قرون وسطی، فرآیند جداسازی مواد معدنی از سنگ معدن به صورت دستی انجام می‌گرفت. با معرفی آسیاب‌های مکانیکی و سنگ‌شکن‌ها، امکان خردایش سنگ تا ذرات ریزتر فراهم شد و این موضوع، جداسازی مواد معدنی را بر اساس اختلاف چگالی در یک محیط سیال امکان‌پذیر ساخت. این روش‌ها پیشرفت قابل توجهی در بازیابی مواد معدنی ایجاد کردند، اما فقط برای ذرات بزرگ‌تر از تقریباً ۰/۳ میلی‌متر مؤثر بودند و ذرات ریزتر همچنان به صورت باطله از دست می‌رفتند (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در سال ۱۸۶۰ میلادی، ویلیام هینز^۲ در انگلستان کشف کرد که ذرات بسیار ریز دارای تمایل طبیعی برای چسبیدن به قطرات روغن هستند. این پدیده باعث شد که ذرات همراه با قطرات روغن به سطح آب صعود کنند و در آنجا لایه‌ای سطحی از مواد غلیظ‌شده تشکیل دهند. این اصل، نقطه آغاز شناورسازی توده‌ای با روغن بود (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در سال ۱۸۷۷، برادران آدولف^۳ و آگوست بسل^۴ که مالک یک کارخانه تولید کاشی در درسدن^۵ آلمان بودند، این اصل را برای جداسازی گرافیت^۶ به کار گرفتند. آنها دریافتند که افزودن هوا به دوغاب باعث افزایش سرعت جداسازی می‌شود. در ابتدا، آنها با جوشاندن سوسپانسیون^۷ ذرات، حباب‌های هوا تولید می‌کردند؛ روشی که بعدها در همان سال به ثبت اختراع رسید. یادبود صدمین سالگرد این اختراع با برگزاری سمپوزیومی^۸ در شهر فرایبرگ^۹ آلمان برگزار شد. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در سال ۱۸۸۶، برادران بسل^{۱۰} اختراع دیگری ثبت کردند که مبتنی بر تولید حباب‌های گاز از واکنش کربنات‌ها^{۱۱} با اسید هیدروکلریک^{۱۲} بود. پس از آن، ثبت اختراعات متعدد در بریتانیا، آمریکا و استرالیا با هدف بهبود فرآیند انجام شد. تا سال ۱۹۱۲، حداقل ۱۴۰ ثبت اختراع توسط ۵۷ فرد مختلف که مرتبط با فناوری شناورسازی با روغن و یا

² William Haynes

³ Adolph Brothers

⁴ August Bessel

⁵ Dresden

⁶ graphite

⁷ suspension

⁸ Symposium

⁹ Freiberg

¹⁰ Bessel Brothers

¹¹ Carbonates

¹² Hydrochloric Acid

همراه با هوا بودند، به ثبت رسید. بررسی‌های متعددی درباره تاریخچه این اختراعات اولیه منتشر شده است (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در دهه اول قرن بیستم، روش‌های جدیدی برای افزودن هوا به مخازن شناورسازی پیشنهاد و ثبت شد:

- 1902، پاتر^{۱۳} در آمریکا پیشنهاد داد که شناورسازی می‌تواند تنها با واکنش اسید سولفوریک^{۱۴} با کربنات‌ها بدون استفاده از روغن انجام شود.
- در همان سال، دلپرات^{۱۵} استفاده از سدیم بی‌سولفات^{۱۶} را به‌عنوان جایگزینی ارزان‌تر پیشنهاد کرد.
- 1904، فرانسیس المور^{۱۷} اختراع تشکیل حباب با الکترولیز^{۱۸} آب و همچنین شناورسازی تحت خلأ را ثبت کرد.
- سپس، تزریق مستقیم هوا همراه با پراکندگی توسط پروانه^{۱۹} در سال‌های ۱۹۰۶ تا ۱۹۱۰ و پراکندگی مستقیم هوا از کف متخلخل مخزن در سال ۱۹۱۴ ثبت شد.

صنعت معدن به‌سرعت از این نوآوری‌ها بهره‌برداری کرد. اولین کاربرد صنعتی شناورسازی کف‌زا در سال ۱۹۰۵ در بروکن هیل^{۲۰} در استرالیا با استفاده از روش پاتر-دلپرات اجرا گردید (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

۳-۱- توسعه شناورسازی با هوای محلول برای صنعت کاغذ

موفقیت اولیه فناوری شناورسازی در صنعت معدن، توجه صنایع دیگر را نیز به این روش معطوف ساخت. نخستین استفاده گسترده و سیستماتیک از شناورسازی با هوای محلول در صنعت خمیر و کاغذ صورت گرفت، جایی که نیاز به جداسازی الیاف باقیمانده در جریان‌های آب فرآیندی وجود داشت. در این صنعت، هدف بازیابی الیاف و کاهش افت مواد اولیه بود؛ مسئله‌ای که از نظر اقتصادی بسیار مهم بود. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

در اوایل دهه ۱۹۳۰، کارخانه‌های کاغذسازی در اسکانندیناوی شروع به ارزیابی کاربرد شناورسازی برای جداسازی الیاف کردند. دو سامانه مهم که در این دوره توسعه یافتند عبارت بودند از:

¹³ Potter

¹⁴ Sulfuric Acid

¹⁵ Delprat

¹⁶ Sodium Bisulphate

¹⁷ Francis Elmore

¹⁸ Electrolysis

¹⁹ Impeller

²⁰ Broken Hill

- سیستم سوین-پترسن^{۲۱}

که در آن آب پیش از ورود به مخزن شناورسازی تحت فشار قرار می‌گرفت و در نتیجه حباب‌های بسیار ریز ایجاد می‌شدند.

- سیستم آدکا^{۲۲}

که بر پایه ایجاد خلأ کار می‌کرد؛ در این روش دوغاب الیاف پس از اشباع شدن با هوا، در محفظه‌ای با فشار کمتر رها می‌شد و حباب‌ها به صورت ناگهانی آزاد می‌شدند.

در هر دو سیستم، تخلیه حباب‌های درشت پیش از ورود دوغاب به محفظه شناورسازی ضروری بود. سرعت بارگذاری هیدرولیکی در سیستم سوین-پترسن حدود ۴ تا ۶ متر بر ساعت و در سیستم آدکا ۵ تا ۸ متر بر ساعت بود. مصرف انرژی نیز بین ۰/۲۵-۰/۳۰ kWh/m³ گزارش شد، در حالی که سیستم آدکا انرژی کمتری مصرف می‌کرد.

این کاربرد موفق، زمینه را برای انتقال فناوری شناورسازی به دیگر صنایع پردازشی و نهایتاً به حوزه تصفیه آب و فاضلاب فراهم ساخت. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

۴-۱- سازگاری شناورسازی با هوای محلول برای تصفیه فاضلاب صنعتی

با وجود موفقیت فناوری در صنعت کاغذ در دهه ۱۹۳۰، مقاومت و تردیدهایی برای استفاده از شناورسازی با هوای محلول در فاضلاب‌های صنعتی وجود داشت. نخستین گزارش از به‌کارگیری شناورسازی با هوای محلول برای تصفیه فاضلاب صنعتی به آمریکا در دهه ۱۹۴۰ بازمی‌گردد. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

پیش از این دوره، استفاده از شناورسازی عمدتاً به حذف چربی از فاضلاب صنایع غذایی از طریق تزریق مستقیم هوا با اندازه حباب بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر محدود بود. نقطه عطف فناوری در سال ۱۹۴۲ با معرفی فرایندی تحت عنوان:

”Vacuator” توسط شرکت Dorr به وجود آمد؛ این سامانه با بهره‌گیری از دو مرحله انحلال و جداسازی تحت خلأ امکان جداسازی مؤثر چربی‌ها و ذرات معلق را فراهم ساخت. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

²¹ Sveen-Petersen

²² Adka

در سال ۱۹۵۰، شرکت Gibbs نخستین سیستم شناورسازی با هوای محلول تحت فشار را برای آب صنعتی ساخت که در آن بخشی از جریان و نه کل جریان تحت فشار اشباع^{۲۳} شد. فشار اعمالی بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال بسته به غلظت ذرات تغییر می‌کرد و انرژی مصرفی بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ kWh/m³ بود (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در دهه ۱۹۵۰، این فناوری برای تغلیظ لجن فعال نیز با موفقیت به کار گرفته شد. تلاش برای جداسازی لجن فاضلاب شهری تنها پس از افزودن مواد فعال سطحی در سال ۱۹۴۳ به نتیجه رسید؛ مشابه افزودن کف‌سازها در فرآیند استخراج مواد معدنی. با وجود این پیشرفت‌ها، تا سال ۱۹۶۰ شناورسازی با هوای محلول هیچ کاربردی در تصفیه آب آشامیدنی نداشت (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

۵-۱- شکل‌گیری بنیان نظری شناورسازی با هوای محلول

در ابتدا، استفاده از شناورسازی با هوای محلول عمدتاً تجربی بود، اما تجربیات گسترده صنعتی به تدریج موجب ایجاد فهم علمی و نظری منسجم از فرایند شد. در آغاز دهه ۱۹۶۰، مجموعه‌ای از مقالات و کتاب‌ها منتشر شدند که چارچوب علمی طراحی و تحلیل عملکرد شناورسازی با هوای محلول را بنیان نهادند (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

سه منبع کلیدی در این دوره عبارتند از:

۱- مقاله ادوارد ورابلیک^{۲۴}

که اصول بنیادی و پارامترهای طراحی شناورسازی با هوای محلول را ارائه کرد و برای نخستین بار یک نظریه عمومی و مستقل از کاربرد صنعتی مطرح نمود. ورابلیک اندازه حباب‌ها و نرخ صعود نظری آنها را اندازه‌گیری کرد و یک روش پیشنهادی طراحی ارائه داد. او عنوان نمود که:

شناورسازی با هوای محلول نیازمند مطالعه سه فاز است: گاز، مایع و جامد.

۲- رساله دکتری بالفرید هانیش^{۲۵}

²³ Part-Stream Aeration

²⁴ Vrablik, 1959

²⁵ Hanisch, 1960

که به بررسی حل شدن هوا، تنش سطحی و رفتار حباب‌ها در تعلیق پرداخت و نتایج آزمایش‌های تجربی را ارائه کرد.

۳- کتاب «مقدمه‌ای بر نظریه شناورسازی» نوشته کلاسن و موکروسوف^{۲۶}

که با رویکردی بنیادی و ریاضی سازوکار تشکیل حباب‌ها، آزادسازی آنها تحت کاهش فشار و پدیده هم‌جوشی حباب‌ها را تشریح نمود. این منابع، پایه نظری شناورسازی با هوای محلول را به‌طور رسمی شکل دادند و مسیر پیشرفت به سمت کاربردهای جدید، به‌ویژه آب آشامیدنی را هموار کردند (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

۶-۱- شناورسازی با هوای محلول برای تصفیه آب آشامیدنی در دهه ۱۹۶۰

تا سال ۱۹۶۰، استفاده از شناورسازی با هوای محلول صرفاً به کاربردهای صنعتی محدود بود و هیچ استفاده ثبت‌شده‌ای از این فناوری برای تصفیه آب سطحی جهت تولید آب آشامیدنی وجود نداشت. با این حال، شرایط ویژه منابع آب در کشورهای شمال اروپا باعث شد که استفاده از شناورسازی با هوای محلول به‌عنوان یک گزینه جدی مورد بررسی قرار گیرد. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در سوئد و فنلاند، بخش بزرگی از منابع آب سطحی دارای ویژگی کدورت پایین، غلظت بالای مواد آلی طبیعی و وجود جلبک‌ها، به‌ویژه در ماه‌های تابستان بود. این ویژگی‌ها موجب ناکارآمدی روش متداول ته‌نشینی ثقلی می‌شد، زیرا ذرات جلبکی وزن مخصوص بسیار پایینی دارند و به‌سختی ته‌نشین می‌شوند (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در سال ۱۹۶۵، نخستین واحد عملیاتی شناورسازی با هوای محلول با ظرفیت کامل برای تصفیه آب آشامیدنی در شهری^{۲۷} در سوئد راه‌اندازی شد. این سامانه توسط شرکت Purac توسعه داده شد و نتایج موفق آن به‌سرعت باعث گسترش استفاده از شناورسازی با هوای محلول در دیگر شهرهای اسکاندیناوی شد (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

²⁶ Klassen & S Mokrousov, 1963

²⁷ Örnsköldsvik

کاربرد شناورسازی با هوای محلول در این منطقه به تدریج استاندارد²⁸ غالب تصفیه آب‌های دارای جلبک تبدیل شد و از آنجا به اروپا و سایر کشورها انتقال یافت (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

۷-۱- گسترش جهانی شناورسازی با هوای محلول از دهه ۱۹۷۰

پس از موفقیت در کشورهای شمال اروپا، شناورسازی با هوای محلول در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ به‌طور چشمگیری در سطح جهانی گسترش یافت. دلایل اصلی پذیرش گسترده فناوری عبارت بودند از:

- افزایش آلودگی منابع آب سطحی به دلیل رشد صنعتی و شهری
 - وقوع شکوفایی جلبکی فزاینده در مخازن و رودخانه‌ها
 - نیاز به افزایش ظرفیت تصفیه در فضاها محدود
 - پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی تجهیزات، به‌ویژه سیستم‌های تولید میکروحباب
- در این دوره، شناورسازی با هوای محلول در حوزه‌های زیر به‌صورت گسترده به‌کار گرفته شد:

- تصفیه آب آشامیدنی
- پساب صنایع غذایی، نساجی، پتروشیمی و فلزات
- تغلیظ لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری
- احیای الیاف و آب سفید در صنعت کاغذ

تا اواخر دهه ۱۹۸۰، سیستم‌های شناورسازی با هوای محلول با سیستم تزریق مستقیم هوا جایگزین شد و از روش‌های بخشی-جریانی²⁹ با راندمان بالاتر استفاده شد. بهبود قابلیت اطمینان مکانیکی و کاهش مصرف انرژی نیز نقش مهمی در این گسترش داشت. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

۸-۱- کنفرانس‌های بین‌المللی شناورسازی با هوای محلول

برگزاری کنفرانس‌های تخصصی نقش بزرگی در تثبیت جایگاه علمی فناوری شناورسازی با هوای محلول و ایجاد تبادل اطلاعات بین صنعت و دانشگاه داشت. نخستین کنفرانس مهم در زمینه شناورسازی با هوای محلول در سال

²⁸ Standard

²⁹ Partial-Stream

۱۹۷۶ در استکهلم^{۳۰} سوئد برگزار شد، که نقطه عطفی برای رشد کاربردهای این فناوری بود (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در ادامه، مجموعه‌ای از کنفرانس‌های بین‌المللی با شرکت کشورهای متعددی برگزار شد و موضوعاتی مانند:

- طراحی پیشرفته تجهیزات شناورسازی با هوای محلول
- بررسی رفتار برخورد ذره-حباب
- بهینه‌سازی مواد کمکی مانند لخته‌سازها
- استفاده از شناورسازی با هوای محلول در تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب مجتمع‌ها

مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

۹-۱- پذیرش و استقرار جهانی شناورسازی با هوای محلول

تاریخچه فناوری شناورسازی با هوای محلول نشان می‌دهد که پذیرش این فناوری به صورت تدریجی و مرحله‌ای رخ داد. با وجود اینکه اصول آن بیش از ۱۰۰ سال پیش شناخته شده بود، انتقال آن از حوزه معدن به صنعت، سپس به فاضلاب صنعتی و در نهایت به تصفیه آب آشامیدنی ده‌ها سال به طول انجامید (James. Edzwald & Haarhoff, 2011).

در دهه ۱۹۹۰، فناوری شناورسازی با هوای محلول به‌عنوان یک فرآیند تثبیت‌شده و قابل اعتماد در مقایسه با ته‌نشینی ثقلی شناخته شد و در بسیاری از موارد به‌عنوان جایگزین مناسب برای اصلاح عملکرد تصفیه‌خانه‌های موجود پذیرفته شد. شناورسازی با هوای محلول در کشورهایی با محدودیت منابع آب سطحی یا مشکلات جلبکی به یکی از بخش‌های استاندارد فرآیند تصفیه تبدیل شده است. (James. Edzwald & Haarhoff, 2011)

۱۰-۱- احیای جهانی و پذیرش گسترده شناورسازی با هوای محلول در دهه ۱۹۹۰

دهه ۱۹۹۰ نقطه عطفی در تاریخ شناورسازی با هوای محلول بود، جایی که فناوری از مرحله آزمایشگاهی و صنعتی به پذیرش گسترده در تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب شهری رسید. پس از موفقیت‌های اولیه در اسکاندیناوی و گسترش در دهه ۱۹۷۰-۱۹۸۰، کنفرانس‌های بین‌المللی کلیدی نقش محوری ایفا کردند. کنفرانس شناورسازی با

³⁰ Stockholm

هوای محلول در آنتورپ^{۳۱} (بلژیک، ۱۹۹۱) و اورلاندو^{۳۲} (آمریکا، ۱۹۹۴) بر نوآوری‌های فرآیندی تمرکز داشتند و شناورسازی با هوای محلول را به عنوان جایگزینی کارآمد برای ته‌نشینی ثقلی در شرایط جلبکی و کدورت بالا معرفی کردند. این کنفرانس‌ها، با شرکت کشورهای مختلف، مباحثی مانند بهینه‌سازی نرخ بارگذاری هیدرولیکی (تا ۱۵ متر بر ساعت) و ادغام شناورسازی با هوای محلول با فیلتراسیون^{۳۳} را بررسی کردند (Haarhoff, 2008).

در این دهه، شناورسازی با هوای محلول در کشورهای در حال توسعه مانند آفریقای جنوبی و آسیا گسترش یافت، جایی که محدودیت منابع آب و آلودگی صنعتی نیاز به فناوری‌های فشرده را افزایش داد. برای مثال، در بریتانیا و استرالیا، سیستم‌های شناورسازی با هوای محلول برای تولید آب آشامیدنی از منابع سطحی آلوده به مواد آلی طبیعی به کار گرفته شد. پیشرفت‌های فنی شامل کاهش زمان ماند هیدرولیکی در فلوکولاسیون^{۳۴} (از ۲۰-۳۰ دقیقه به ۵-۱۰ دقیقه) و توسعه فرآیندهای اختصاصی مانند CoCoDAFF (ترکیب فلوکولاسیون و شناورسازی با هوای محلول) بود که کارایی جداسازی را افزایش داد. این دوره با چالش‌هایی مانند مصرف انرژی بالا (0.25-0.5 kWh/m³) همراه بود، اما بهبودهای مکانیکی مانند پمپ‌های تحت فشار کارآمد، شناورسازی با هوای محلول را به گزینه‌ای اقتصادی تبدیل کرد (Crossley & Valade, 2006).

۱۱-۱- پیشرفت‌های فنی و نرخ‌های بالا در دهه ۲۰۰۰

دهه ۲۰۰۰ شاهد جهش در نرخ‌های هیدرولیکی شناورسازی با هوای محلول بود، که از ۵-۱۰ متر بر ساعت در دهه‌های پیش به ۲۰-۴۰ متر بر ساعت رسید. این پیشرفت، عمدتاً به دلیل درک بهتر دینامیک^{۳۵} حباب‌ها و مدل‌های جریان لایه‌ای در ناحیه جداسازی، امکان‌پذیر شد. مقاله (J. K. Edzwald, 2007) توضیح داد که نرخ صعود حباب‌های میکرو^{۳۶} (۵۰-۱۰۰ میکرومتر) و هم‌جوشی با فلوک‌ها^{۳۷}، بدون کاهش کارایی جداسازی (بالای ۹۰٪ برای ذرات معلق)، اجازه طراحی مخازن با بارگذاری بالا را می‌دهد. این مدل، که بر پایه تعادل نرخ صعود و جریان هیدرولیکی است، نشان داد که جریان لایه‌ای (با جداسازی عمودی) از مدل ساده ذرات معلق کارآمدتر است (J. K. Edzwald, 2007).

³¹ Antwerp
³² Orlando
³³ Filtration
³⁴ Flocculation
³⁵ Dynamics
³⁶ Micro
³⁷ Flukes

کنفرانس‌های شناورسازی با هوای محلول در لندن^{۳۸} (۱۹۹۷) و هلسینکی^{۳۹} (۲۰۰۰) بر ادغام شناورسازی با هوای محلول با فناوری‌های نوین تمرکز کردند (Haarhoff, 2008).

در زمینه نظری (Han et al., 2009)، اندازه‌گیری عمق لایه حبابی با شمارنده ذرات نشان داد که عمق ۱-۲ متری لایه حبابی با نرخ بارگذاری بالا همخوانی دارد و کیفیت آب خروجی را افزایش می‌دهد.

۱۲-۱- نوآوری‌های پایدار و کاربردهای نوظهور از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵

در اوایل این دهه، ترکیب شناورسازی با هوای محلول با سیستم‌های هیبریدی^{۴۰}، به ویژه بیوراكتور غشایی^{۴۱}، به عنوان پیش‌تصفیه فاضلاب خانگی مورد توجه قرار گرفت. بر اساس مطالعه‌ای تجربی، شناورسازی با هوای محلول بدون افزودن لخته‌ساز، حذف ۸۳ درصد مواد معلق^{۴۲}، ۷۰ درصد اکسیژن خواهی شیمیایی^{۴۳} و ۷۳ درصد اکسیژن خواهی بیوشیمیایی^{۴۴} را از فاضلاب ورودی فراهم می‌کند. در سیستم هیبریدی (DAF-MBR)، راندمان کلی به ۹۹/۵ درصد برای SS، ۹۵/۹ درصد برای COD و ۷۸/۲ درصد برای فسفر کل^{۴۵} می‌رسد، که SS خروجی را به ۱/۲۷ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌دهد و از گرفتگی غشا جلوگیری می‌کند (Kim et al., 2014).

همزمان، نوآوری‌هایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی توسعه یافت، از جمله استفاده از حباب‌های دی‌اکسید کربن (CO₂) به جای هوا در فرآیند شناورسازی محلول‌شده دی‌اکسید کربن (DCF) حباب‌های CO₂ با قطر ۱۰۰-۲۰۰ میکرومتر و پتانسیل زتا بالاتر، چسبندگی بهتری به ذرات نشان می‌دهند و حذف ۸۵ درصد SS را در فشار اشباع ۲۰۰ کیلوپاسکال فراهم می‌کنند. این روش، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد، هرچند چالش‌هایی^{۴۶} مانند تشکیل حباب‌های درشت (ماکرو^{۴۷}) در فشارهای بالا مشاهده شده است (Kwak & Kim, 2013).

در سال‌های اخیر، فناوری شناورسازی هوا محلول به عنوان یکی از روش‌های کلیدی تصفیه فاضلاب، به سمت سیستم‌های مدولار^{۴۸} کم‌مصرف و کارآمد سوق یافته است. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از نانوحباب‌ها^{۴۹} (با قطر کمتر

³⁸ London

³⁹ Helsinki

⁴⁰ Hybrid

⁴¹ Membrane Bioreactor (MBR)

⁴² Suspended Solids (SS)

⁴³ Chemical Oxygen Demand (COD)

⁴⁴ Biochemical Oxygen Demand (BOD)

⁴⁵ Total Phosphorus

⁴⁶ Challenge

⁴⁷ Macro

⁴⁸ Modular

از ۱ میکرومتر) و میکرو حباب‌ها^{۵۰}، جداسازی روغن و مواد معلق را از فاضلاب روغنی بهبود بخشیده‌اند، زیرا نانوحباب‌ها به دلیل اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و سرعت صعود آهسته، چسبندگی بهتری به ذرات روغن ایجاد می‌کنند و بدون آلودگی ثانویه، راندمان بالایی ارائه می‌دهند (Shen et al., 2022).

سیستم‌های مدولار شناورسازی با هوای محلول، که برای کاربردهای شهری، صنعتی و پاسخ به نشت نفت طراحی شده‌اند، مصرف انرژی را به سطوح پایینی کاهش داد/ه‌اند؛ برای مثال، با استفاده از شناورسازی گازی مبتنی بر نانو/میکرو حباب‌ها، راندمان جداسازی روغن/آب به ۹۸/۸ درصد رسیده است، در حالی که ترکیب با جداسازی ثقلی و زمان شناورسازی بهینه (۳۸ دقیقه) این فرآیند را تسریع می‌کند (Koirala, 2024).

⁴⁹ Nanobubbles
⁵⁰ Microbubbles

فصل دوم

تعاریف، مبانی و کاربردهای شناورسازی با هوای محلول

۲-۱- مقدمه

شناورسازی با هوای محلول فرآیندی است که برای جداسازی فاز جامد از فاز مایع، به ویژه در تصفیه آب، به کار می‌رود. این فرآیند بر پایه چسبندگی حباب‌های کوچک هوا به ذرات جامد و شناور کردن آن‌ها به سطح آب عمل می‌کند. حباب‌ها با قطر ۱۰ تا ۱۵۰ میکرومتر (معمولاً ۴۰ تا ۷۰ میکرومتر) تولید می‌شوند و به عنوان میکروحباب شناخته می‌شوند. تولید این حباب‌ها از طریق افزایش فشار آب به ۴ تا ۶ بار و حل کردن هوا در آن، سپس کاهش فشار به سطح اتمسفری، صورت می‌گیرد. آب حاوی میکروحباب‌ها با آب خام مخلوط شده و ذرات جامد را شناور می‌سازد. لازم به ذکر است کلیه مطالب فصل دوم بر اساس منبع (Kaltchev, R. (2024) می‌باشد.

۲-۲- اجزای شناورسازی با هوای محلول

یک سیستم استاندارد شناورسازی با هوای محلول که برای تصفیه فاضلاب صنعتی، شهری و آب آشامیدنی طراحی شده است، از اجزای اصلی زیر تشکیل می‌شود. این اجزا بر اساس اصول مهندسی و تجربیات عملی توصیف شده‌اند و هر یک نقش کلیدی در بهینه‌سازی فرآیند جداسازی ذرات معلق، روغن و مواد آلی ایفا می‌کنند. تمرکز بر تجهیزات عملی و بهترین شیوه‌ها است و اجزا را بر اساس عملکرد فیزیکی-شیمیایی و هیدرولیکی دسته‌بندی می‌کند:

۲-۲-۱- بخش پیش تصفیه شیمیایی (انعقاد و لخته‌سازی)

- تجهیزات تزریق و اختلاط مواد منعقدکننده و پلی‌الکترولیت^{۵۱}

- میکسرهای استاتیک^{۵۲} یا دینامیک^{۵۳}

- مخازن یا لوله‌های انعقاد/لخته‌سازی

۲-۲-۲- سیستم تولید و تزریق حباب‌های ریز هوا

این بخش قلب فناوری شناورسازی با هوای محلول است و شامل موارد زیر می‌شود:

- پمپ فشارقوی^{۵۴} یا پمپ حل‌کننده هوا^{۵۵}
- مخزن اشباع^{۵۶} هوا از نوع: بدون پکینگ^{۵۷}، پک‌دار^{۵۸}، فشرده^{۵۹}
- دستگاه‌های کاهش فشار و تولید حباب: نازل‌های مخصوص، شیرهای کاهش فشار، لوله‌های سوراخ‌دار، دیفیوزرهای^{۶۰} فشرده

۲-۲-۳- واحد اصلی جداسازی^{۶۱}

دو نوع اصلی دارد که هر کدام زیرمجموعه‌های خود را دارند:

الف) صاف‌کننده‌های دایره‌ای

- مخزن دایره‌ای با دیواره عمودی یا شیب‌دار
- سیستم ورودی آب خام + آب سفید (مرکزی یا شعاعی)
- مکانیزم^{۶۲} جمع‌آوری لجن شناور: اسکرپر^{۶۳} سطحی چرخان (با درایو مرکزی یا محیطی)، اسکوپ مارپیچی^{۶۴} (پیشرفته‌ترین نوع)

⁵¹ Polyelectrolyte
⁵² Static Mixers
⁵³ Dynamic Mixers
⁵⁴ Pressurization Pumps
⁵⁵ Air Dissolving Pumps
⁵⁶ Saturators
⁵⁷ Unpacked
⁵⁸ Packed
⁵⁹ Compact
⁶⁰ Diffusers
⁶¹ Flotation tank/Clarifier
⁶² Mechanism
⁶³ Scraper
⁶⁴ Spiral Scoop

- جمع‌آوری آب صاف‌شده از کف یا لاترال‌ها

(ب) صاف‌کننده‌های مستطیل‌شکل

- مخزن مستطیل‌شکل با کف صاف یا شیب‌دار
- ورودی آب خام و توزیع‌کننده‌های آب سفید در یک سمت
- سیستم جمع‌آوری لجن شناور: اسکرپر زنجیری (دو یا سه شفت)، چرخ پارویی^{۶۵}، اسکرپر رفت و برگشتی^{۶۶}، اسکرپر ترکیبی
- سیستم جمع‌آوری لجن ته‌نشین‌شده (در صورت وجود): اسکرپر کف زنجیری یا رفت و برگشتی، نقاله مارپیچ^{۶۷}، قیف‌های هرمی معکوس

۴-۲-۲- تجهیزات جانبی ضروری

- مخزن یا کانال جمع‌آوری و تخلیه لجن شناور
- سیستم جمع‌آوری و بازگردانی آب صاف‌شده
- سیستم کنترل سطح، فشار، جریان و اتوماسیون^{۶۸}

۳-۲- انواع روش شناورسازی با هوای محلول

روش‌های فشارسازی عبارتند از: فشارسازی با آب بازیافتی (رایج‌ترین)، فشارسازی کل جریان، فشارسازی جزئی، و فشارسازی با آب تمیز خارجی. شناورسازی با هوای محلول در مقابل شناورسازی با گاز القایی قرار دارد که حباب‌های بزرگ‌تری تولید می‌کند و برای کاربردهای خاصی مانند صنایع نفتی مناسب است. شناورسازی با هوای محلول عمدتاً برای ذرات با چگالی نزدیک به آب به کار می‌رود و با رسوب‌گذاری هم‌پوشانی دارد، اما مزایایی مانند سرعت بالاتر و فضای کمتر دارد.

۴-۲- عناصر درگیر در فرآیند

⁶⁵ Paddle wheel
⁶⁶ Reciprocating scraper
⁶⁷ Screw conveyor
⁶⁸ Automation

- مواد معلق (SS)

ذرات با اندازه ۱ میکرومتر تا چند میلی‌متر که مسئول کدورت آب هستند. ویژگی‌های کلیدی شامل بار الکترواستاتیک^{۶۹} (معمولاً منفی) و کشش سطحی با آب (آب‌گریز یا آب‌دوست) است. این ذرات می‌توانند به راحتی تجمع یابند و با گرانش جدا شوند.

- مواد کلوئیدی^{۷۰}

ذرات ۱ نانومتر تا ۱ میکرومتر با بار الکترواستاتیک قوی (معمولاً منفی) که پایدار می‌مانند و تحت تأثیر گرانش نیستند. ساختار شامل لایه مثبت و لایه منفی است. پتانسیل زتا پایداری آن‌ها را تعیین می‌کند (بالتر از -۴۰ میلی‌ولت پایدار است).

- مواد محلول

ذرات کوچکتر از ۱ نانومتر (مولکول‌ها) که با روش‌های فیزیکی جدا نمی‌شوند، اما بر تعادل کلوئیدی تأثیر می‌گذارند.

- میکروحباب‌ها

کلید فرآیند شناورسازی با هوای محلول؛ دارای بار منفی و اندازه ۴۰-۷۰ میکرومتر، اندازه آن‌ها به فشار، مواد محلول/کلوئیدی، و دستگاه کاهش فشار بستگی دارد. پایداری آن‌ها با مواد سطح‌فعال افزایش می‌یابد.

۵-۲- نیروها و تعاملات درگیر

- تشکیل تجمع ذره-حباب

سه مدل: برخورد مستقیم، گیر افتادن حباب در فلاک، و رشد حباب روی ذره. عوامل مؤثر شامل بار الکترواستاتیک، زاویه تماس، و آب‌گریزی است. ذرات دارای بار منفی با حباب‌های هم‌بار دافع یکدیگرند.

- کوآگولاسیون و فلوکولاسیون

برای تبدیل کلوئیدها به SS:

⁶⁹ Electrostatic

⁷⁰ Colloid

- فلوکولانت‌های آلی: پلیمرهای بلندزنجیر (کاتیونی/آنیونی)^{۷۱} با مزایایی مانند دوز کم و لجن غلیظ، اما قدرت محدود برای کلوئیدهای پایدار.

- کواگولانت‌های معدنی: مانند سولفات آلومینیوم^{۷۲} یا کلرید فریک^{۷۳}؛ کارآمد برای کلوئیدهای قوی، اما دوز بالا، نیاز به تنظیم pH، و لجن حجیم.

- ترکیبی: کواگولاسیون سریع سپس فلوکولاسیون برای فلاک‌های بزرگ و پایدار.

۲-۶- چالش‌ها در اجرا

انتخاب بین رسوب‌گذاری، شناورسازی با هوای محلول، یا فیلتراسیون بر اساس چگالی، مواد جامد معلق، فضا، و انرژی. شناورسازی برای بارهای هیدرولیکی بالا (۶-۲۵ متر/ساعت) مناسب است، اما مصرف انرژی بیشتری دارد. چالش‌ها شامل حل هوا، کاهش فشار، اختلاط، شناورسازی، دفع لجن شناور/ته‌نشین، و جمع‌آوری آب شفاف است. انتخاب بر اساس قابلیت اطمینان و سازگاری انجام می‌شود.

۲-۷- پارامترهای اصلی

• حلالیت هوا و گازها در آب

حلالیت هوا در ۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۱ بار: ۰/۰۱۸۷ لیتر/لیتر؛ با افزایش دما کاهش می‌یابد. ارتفاع و دما بر چگالی هوا تأثیر گذارند.

• نسبت هوا به جامد (A/S)

مقدار هوا (میلی‌گرم/میلی‌گرم SS) برای شناورسازی؛ ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲۵ برای لجن بیولوژیکی، ۰/۲ تا ۰/۵ برای آب آشامیدنی.

• نرخ اشباع در اشباع‌کننده

۴۰-۹۰٪؛ بسته به تماس هوا-آب و زمان. برای فاضلاب ۶۰-۶۵٪ بهینه است.

⁷¹ Cationic/Anionic

⁷² Aluminum Sulfate

⁷³ Ferric Chloride

- نرخ فشارسازی

۸-۱۰٪ جریان خام برای SS کم؛ بیش از ۲۰٪ برای لجن غلیظ، بر اساس نیاز هوا و اشباع.

- فشار اشباع

۴-۶ بار؛ بر اساس فشار هوا موجود و کارایی پمپ.

- بار هیدرولیکی

۵-۱۰ متر/ساعت برای فاضلاب غیرکمی؛ ۳۰-۱۵+ برای آب آشامیدنی، شامل جریان فشارسازی.

- بار جامد

۶-۱۰ کیلوگرم/مترمربع ساعت برای لجن بیولوژیکی؛ بر اساس غلظت SS و استخراج لجن.

- نرخ جذب

درصد کاهش آلاینده (SS، COD و غیره)؛ وابسته به زمینه (٪) برای ۱۰۰۰ میلی‌گرم/لیتر SS ممکن، اما برای ۵۰ میلی‌گرم/لیتر چالش برانگیز)

۸-۲- کاربردهای شناورسازی با هوای محلول

شناورسازی با هوای محلول در بیشتر موارد شفاف‌سازی قابل اعمال است، مشروط بر رعایت شرایط پایه: مواد معلق (SS) نباید بیش از حد سنگین یا فشرده باشند (سرعت ته‌نشینی کمتر از ۴-۵ متر/ساعت)، فلاک‌ها باید بار الکترواستاتیک مناسب برای چسبندگی میکروحباب‌ها داشته باشند، و غلظت SS تا حداکثر ۱۰-۱۲ گرم/لیتر باشد. این بخش به معرفی کاربردهای سنتی و رایج شناورسازی با هوای محلول در صنایع کاغذ، غذا، نفت، فاضلاب شهری، آب آشامیدنی و آب دریا می‌پردازد.

۱-۸-۲- کاربرد در صنعت کاغذ

صنعت کاغذ اولین و همچنان یکی از بزرگ‌ترین کاربران فناوری شناورسازی با هوای محلول است. مصرف آب در این صنعت بالاست (۲۰-۶۰ تن پالپ و ۵-۲۰ تن کاغذ). شناورسازی با هوای محلول عمدتاً برای شفاف‌سازی آب سفید، بازیابی الیاف، کاهش بار آلودگی خروجی و صرفه‌جویی در مصرف آب تازه به کار می‌رود.

مزایای شناورسازی محلول نسبت به رسوب‌گذاری: فضای اشغالی کمتر، لجن غلیظتر (۳-۶٪)، کاهش بو ناشی از تخمیر بی‌هوازی.

مزایای شناورسازی با هوای محلول نسبت به فیلتراسیون: هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری پایین‌تر (هرچند گاهی نیاز به پلیمر دارد).

۲-۸-۲- کاربرد در صنعت غذا

پساب‌های صنایع غذایی معمولاً حجم کم (۱۰-۱۲۰ m³/h) اما بار آلودگی بسیار بالا (چربی، پروتئین، COD بالا) دارند. شناورسازی با هوای محلول به دلیل توانایی حذف سریع چربی و پروتئین و جلوگیری از ایجاد شرایط آنوکسیک^{۷۴} و بوی تعفن، گزینه بسیار مناسبی است.

- صنایع لبنی و پنیرسازی: حذف چربی و پروتئین شیر و پنیرآب؛ گاهی بدون مواد شیمیایی و گاهی با کواگولانت آلومینیوم یا آهن.

- تولید روغن خوراکی و غذاهای آماده: مرحله اول شناورسازی با هوای محلول بدون مواد شیمیایی برای بازیابی روغن قابل فروش، مرحله دوم با FeCl₃ و پلیمر آنیونی (کاهش ۵۰-۹۰٪ COD و بیش از ۹۰٪ مواد قابل استخراج با هگزان^{۷۵}).

- کشتارگاه‌ها و صنایع گوشت: شناورسازی با هوای محلول دو یا سه مرحله‌ای برای حذف خون، چربی و مو؛ راندمان COD معمولاً ۵۵-۸۵٪.

غلظت لجن شناور معمولاً ۴-۸٪ (به مراتب غلیظتر از لجن رسوبی).

۲-۸-۳- کاربرد در صنعت نفت و گاز

آب تولیدی^{۷۶} میدان‌های نفتی اغلب ۸۰-۹۰٪ کل سیال تولیدی را تشکیل می‌دهد. شناورسازی با هوای محلول (یا ترکیب DAF+IGF/GDF) با گاز نیتروژن یا متان تحت فشار، غلظت روغن (HEM) را به کمتر از ۱۰ mg/L می‌رساند. تجهیزات از جنس پلی‌استر تقویت‌شده یا استیل ضدزنگ با $PREN > ۴۰$ ساخته می‌شوند.

⁷⁴ Anoxic

⁷⁵ Hexane Extractable Material (HEM)

⁷⁶ Produced Water

- پالایشگاه‌ها: تصفیه پساب فرآیند، آب باران آلوده و آب بالاست با سیستم‌های API/CPI + DAF دو مرحله‌ای؛ راندمان COD معمولاً ۵۰-۸۵٪.

۴-۸-۲- کاربرد در فاضلاب شهری

• تصفیه‌خانه‌های شهری

- تصفیه اولیه: حذف ۵۰-۶۵٪ BOD و COD با کواگولانت.

- شفاف‌سازی پساب فرآیندهای بیولوژیکی پیشرفته (راکتور بیوفیلمی یا ایستر متحرک^{۷۷}، لجن فعال با بیوفیلیم تلفیقی^{۷۸} و حتی لجن فعال معمولی^{۷۹}): شناورسازی با هوای محلول جایگزین بسیار فشرده تانک‌های ثانویه رسوبی.

- غلیظ‌سازی لجن اولیه و ثانویه: ۳-۵٪ خشکی با یا بدون پلیمر کاتیونی (۰/۶-۳ kg/ton DS)؛ بار جامد ۴-۶ kg SS/m².h

- تصفیه ثالثیه (حذف فسفر و COD مقاوم): با نمک‌های آلومینیوم یا آهن؛ فسفر > ۱ mg/L.

مزیت اصلی: فضای بسیار کم و لجن غلیظ؛ عیب: مصرف انرژی بالاتر (۱۸/۰-۲۵/۰ kWh/m³).

۵-۸-۲- کاربرد در آب آشامیدنی

شناورسازی با هوای محلول به‌ویژه برای آب‌های سطحی غنی از مواد آلی طبیعی (کربن کل آلی^{۸۰} بالا) و جلبک بسیار مؤثر است.

راندمان حذف TOC معمولاً ۵۰-۸۰٪ و کدورت نهایی کوچکتر از ۰/۸ NTU

۶-۸-۲- کاربرد در آب دریا (نمک زدایی)^{۸۱}

شناورسازی با هوای محلول به عنوان پیش‌تصفیه قبل از اسمز معکوس^{۸۲} برای کاهش شاخص تراکم لجن^{۸۳} و حذف روغن و مواد آلی استفاده می‌شود.

⁷⁷ Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)

⁷⁸ Integrated Fixed-film Activated Sludge (IFAS)

⁷⁹ Conventional Activated Sludge (CAS)

⁸⁰ Total Organic Carbon (TOC)

⁸¹ Desalination

فصل سوم

روش‌های مرسوم و نوین شناورسازی با هوای محلول

⁸² Reverse Osmosis (RO)

⁸³ Silt Density Index (SDI)

۳-۱-۱- نسل اول سیستم‌های شناورسازی با هوای محلول، سیستم‌های ADKA و Sveen-Pedersen

در میان نخستین سیستم‌های شناورسازی با هوای محلول به‌کاررفته در تصفیه آب و فاضلاب، سیستم‌های ADKA و Sveen-Pedersen قرار داشتند. ویژگی اصلی این سیستم‌ها ابعاد مخزن شناورسازی آنهاست که مخازن نسبتاً بلند، باریک و بسیار کم‌عمق بودند. معمولاً یک شفت ورودی عمودی در ابتدای مخزن قرار داشت که عرض آن برابر عرض مخزن بود. آب ورودی در نزدیکی کف این شفت وارد می‌شد و در همانجا آب پر فشار حاوی هوای محلول نیز از طریق چند نازل نزدیک کف شفت تزریق می‌گردید.

در شفت ورودی شرایط جریان آشوبناک حاکم بود و آب به سمت بالا و سطح مخزن جریان می‌یافت؛ در نتیجه حباب‌های میکرو آزادشده در نزدیکی کف شفت، به‌طور نسبتاً یکنواخت در کل توده آب ورودی مخلوط می‌شدند. سپس آب حاوی حباب‌های میکرو به‌صورت تقریباً افقی در فضای شناورسازی جریان می‌یافت، زیرا آب زلال‌شده از نزدیکی کف انتهای مخزن کم‌عمق خارج می‌شد.

نرخ جریان آب در فضای شناورسازی معمولاً ۲ تا ۳ متر مکعب بر مترمربع در ساعت و در هر حال به‌وضوح کمتر از ۵ متر بر ساعت بود. به‌دلیل نرخ جریان بسیار پایین و جهت جریان نزدیک به افقی، تنها یک پتوی بسیار نازک از حباب‌های میکرو درست زیر سطح آب در مخزن شناورسازی تشکیل می‌شد و در بسیاری موارد در انتهای مخزن اصلاً پتوی حبابی وجود نداشت.

بنابراین در این نسل اول تقریباً هیچ اثر فیلتراسیونی از پتوی حباب‌های میکرو وجود نداشت و حذف مواد معلق عمدتاً از طریق چسبیدن حباب‌ها به ذرات در شفت ورودی انجام می‌شد. با این حال، هنگام بهره‌برداری با نرخ‌های جریان مناسب مذکور، راندمان حذف مواد معلق کاملاً بالا به‌دست می‌آمد. هنوز هم برخی از این سیستم‌های قدیمی از نوع Sveen-Pedersen برای زلال‌سازی آب فرآیند در صنعت کاغذ و خمیرکاغذ در حال بهره‌برداری هستند (Kuri, ۲۰۰۱).

۳-۱-۲- نسل دوم شناورسازی با هوای محلول

این نسل در دهه ۱۹۶۰ معرفی شد و هنوز هم به‌طور گسترده استفاده می‌شود (امروزه رایج‌ترین نوع است).

مخازن تقریباً مربعی شکل هستند (معمولاً طول کمی بیشتر از عرض دارند) و نسبت به نسل اول به مراتب عمیق تر هستند. در جلوی دیواره پشتی مخزن یک دیواره زیر جریان^{۸۴} وجود دارد که در پایین مخزن یک شکاف باریک افقی دارد تا آب زلال شده از آنجا خارج شود. نرخ جریان آب در فضای شناورسازی معمولاً ۵ تا ۷ متر بر ساعت است و حداکثر کمتر از ۱۰ متر بر ساعت (در عمل تا حدود ۱۰ متر بر ساعت).

جهت جریان آب در فضای فلوتاسیون به طور قابل توجهی پایین تر از حالت تقریباً افقی نسل اول است؛ زاویه جریان حدود ۳۰ تا ۴۵ درجه پایین تر از افقی است. در ابتدای مخزن یک لایه نسبتاً ضخیم از حباب های ریز زیر پتوی لجن خشک وجود دارد. ضخامت این لایه حباب در ابتدای مخزن ممکن است حدود ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر باشد؛ این لایه به تدریج به سمت انتهای مخزن نازک تر می شود و در انتها اغلب فقط ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر ضخامت دارد.

به دلیل جهت دار شدن جریان به سمت پایین و افزایش نرخ جریان، بخش عمده ای از آب عبوری مجبور می شود از میان این لایه حباب عبور کند؛ بنابراین لایه حباب اثر فیلتراسیون واضحی دارد و به افزایش چسبندگی حباب ها به ذرات کمک می کند (Kuri, 2001).

۳-۱-۳- فیلتر شناوری^{۸۵}

یک کاربرد ویژه شناورسازی با هوای محلول که فیلتر شناوری نامیده می شود، در اواخر دهه ی ۱۹۶۰ اختراع شد. این یک ترکیب شناوری و فیلتراسیون شن سریع است که هر دو در یک مخزن قرار دارند. شناوری در بخش بالایی مخزن انجام می شود و فیلتر در بخش پایینی آن قرار گرفته است. جهت جریان آب اکنون به صورت عمودی رو به پایین از سطح آزاد آب در مخزن به سمت فیلتر عمیق است. این موضوع جهت جریان در فضای شناوری مخزن بالای بستر فیلتر را کنترل می کند. نرخ جریان آب در فیلترهای شناوری ممکن است ۱۰-۱۵ متر در ساعت باشد، اما شرایط جریان هنوز لامینار است. در عمل، تهدید رشد بیش از حد سریع افت هد فیلترهاست که نرخ جریان هیدرولیکی فیلترهای شناوری را در این محدوده محدود می کند.

جریان آب در یک فیلتر شناوری ممکن است حداقل ۲۵-۲۰ متر در ساعت باشد، اما معمولاً ظرفیت تحمل بار نسبتاً پایین یک فیلتر شن معمولی برای مواد معلق، نرخ جریان را محدود می کند به طوری که بیش از ۱۵ متر در

⁸⁴ Under-Flow Wall

⁸⁵ Flotation Filter

ساعت نشود تا رشد بیش از حد سریع افت هد فیلتر ایجاد نشود. این به این معناست که شناوری به وضوح در شرایط جریان لامینار انجام می‌شود.

ارتفاع فضای شناوری بالای بستر فیلتر به اندازه کافی بزرگ است، نرخ جریان آب در شناورسازی با هوای محلول و همچنین در فیلتراسیون به راحتی می‌تواند ۱۵-۱۰ متر در ساعت باشد که به جای خود به معنای آن است که ضخامت بستر حباب‌های ریز ۸۰-۱۲۰ سانتی‌متر است. یک فیلتر عمیق حباب‌های ریز واضح در بخش بالایی فضای شناوری وجود دارد و آب مجبور است از میان آن فیلتر حباب‌های ریز جریان یابد. نقش این فیلتر حباب‌های ریز در حذف مواد جامد احتمالاً بسیار بزرگ‌تر از نقش مخلوط کردن حباب‌های ریز با آب در شفت ورودی مخزن است.

مقاومت جریان بستر فیلتر آن قدر بالاست که جریان آب را در سراسر فضای شناوری یکنواخت می‌کند، به طوری که نرخ جریان عمودی رو به پایین آب در همه جای فضای شناوری دقیقاً یکسان است. این به این معناست که یک بستر حباب‌های ریز نسبتاً ضخیم در بخش بالایی مخزن وجود دارد که سطح زیرین آن دقیقاً افقی است (Kuri, 2001).

۳-۱-۴- شناورسازی با هوای محلول با بازچرخش آب پراکنده^{۸۶}

در فرآیند شناورسازی با هوای محلول مجهز به سیستم بازچرخش آب پراکنده، نسبت بازچرخش آب پراکنده در محدوده ۱۱ تا ۲۴ درصد (به‌طور معمول ۱۴ تا ۲۲ درصد) از پساب خروجی فرآیند تنظیم شده و این آب تحت فشار ۵۰۰-۶۰۰ کیلوپاسکال) در یک مورد معادل تقریبی ۴۱۴ کیلوپاسکال یا ۶۰ psi در مخزن فشار اشباع گردیده و سپس از طریق نازل(های) تزریق به داخل تانک شناورسازی با هوای محلول وارد می‌شود.

در تصفیه پساب اولیه فاضلاب شهری با استفاده از کوآگولانت پلی‌آلومینیوم کلراید^{۸۷} در دوز ۲ تا ۱۲ میلی‌گرم آلومینیوم در لیتر، میانگین حذف مواد جامد معلق کل برابر ۷۷ درصد به‌دست آمده است. در تصفیه پساب ماشین ظرفشویی رستوران با بهره‌گیری از سیستم شناورسازی با هوای محلول شیمیایی با نسبت بازچرخش حدود ۱۴

⁸⁶ Recycle Dispersion Water

⁸⁷ Poly Aluminum Chloride (PAC)

درصد و فشار ۶۰ psi و استفاده از آلوم^{۸۸} به عنوان کوآگلانت اصلی، حذف مواد جامد معلق کل و روغن و گریس به ترتیب ۹۸/۶۸ درصد و ۹۳/۱۶ درصد گزارش شده است.

بنابراین در کاربردهای تصفیه فاضلاب شهری و رستورانی، کارایی حذف جامدات معلق با این روش در بازه ۷۷ تا ۹۸/۶۸ درصد و کارایی حذف روغن و گریس تا ۹۳/۱۶ درصد مشاهده گردیده است (Chung & Young, ۲۰۱۳; Koi vunen & Hbi nonen-Tanski, ۲۰۰۸).

۳-۲- روش های نوین^{۸۹}

۳-۲-۱- نسل سوم شناورسازی با هوای محلول در شرایط جریان آشوبناک (توربولانسی)

نسل سوم شناورسازی با هوای محلول در اواخر دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت. ایده عملیاتی آن بر پایه فیلتر شناورسازی استوار است، با این تفاوت که بستر فیلتر شنی واقع در کف مخزن با یک صفحه نازک و سخت جایگزین شده که در سراسر آن تعداد بسیار زیادی روزنه گرد تعبیه شده است. این صفحه، که مقاومت هیدرولیکی بسیار کمتری نسبت به بستر فیلتر شنی دارد، جریان آب را در فضای شناورسازی فوقانی به صورت عمودی کنترل می کند و آن را به طور یکنواخت در کل مقطع افقی مخزن توزیع می نماید.

مخزن شناورسازی از بالا تقریباً مربعی شکل است و عمق آن به وضوح بیش از طول و عرض آن است. این نوع واحد شناورسازی می تواند با نرخ جریان آب در محدوده ۲۵ تا ۴۰ متر بر ساعت بهره برداری شود؛ حتی نرخ جریان بیش از ۶۰ متر در ساعت نیز برای این نوع واحدها گزارش شده است. هیچ خطری مبنی بر گرفتگی صفحه توسط مواد معلق وجود ندارد که بتواند نرخ جریان را محدود کند.

در این شرایط، شناورسازی با هوای محلول حتی در رژیم جریان آشوبناک نیز قابل انجام است. عمق بستر حباب های میکروسکوپی زیر سطح آب می تواند بین ۱/۵ تا ۲/۵ متر باشد. در واقع، یک بستر حباب میکروسکوپی به طور مداوم بازسازی شونده در مخزن وجود دارد که آب از درون آن فیلتر می شود. سطح زیرین این بستر حباب میکروسکوپی کاملاً افقی و اندکی بالاتر از صفحه کنترل کننده جریان قرار دارد. آب شفاف شده زیر این بستر حباب کاملاً زلال است.

⁸⁸ Alum

⁸⁹ Advanced Methods

می‌توان گفت که در این حالت، حذف مواد معلق بسیار بیشتر از طریق فیلتراسیون آب توسط یک فیلتر عمیق حباب میکروسکوپی رخ می‌دهد تا صرفاً از طریق چسبیدن حباب‌های میکروسکوپی به ذرات جامد در زمان مخلوط شدن آن‌ها در شفت ورودی واحد؛ زیرا زمان ماند آب در شفت ورودی بسیار کوتاه است (Kuri, 2001).

۳-۲-۲- شناورسازی با هوای محلول با میکرو حباب‌های نوین^{۹۰}

سیستم شناورسازی با میکرو حباب نوین با سیستم شناورسازی سنتی با هوای محلول در پیش‌تصفیه فاضلاب رستورانی حاوی روغن مقایسه شد.

در شرایط بهینه شامل دوز پلی‌آلومینیوم کلراید برابر ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان واکنش ۱۵ دقیقه، فشار عملیاتی ۳۵/۰ مگاپاسکال و نسبت بازچرخش ۲۵ درصد، راندمان حذف روغن، COD و کدورت در سیستم شناورسازی با میکرو حباب به ترتیب $98 \pm 0/98$ درصد، $8/8 \pm 0/9$ درصد و $9/5 \pm 2/2$ درصد بود که به ترتیب ۱۰/۳، ۲۲/۶ و ۱۵ درصد بالاتر از سیستم سنتی بود. بیشینه راندمان حذف روغن و کدورت در شناورسازی با میکرو حباب به ترتیب ۹۸ درصد و ۹۷/۵ درصد به دست آمد.

قطر میکرو حباب‌ها در سیستم شناورسازی با میکرو حباب در فشار ۰/۹ مگاپاسکال به حداقل ۱۹/۳۲ میکرومتر (تقریباً ۲۰ میکرومتر) رسید و این میکرو حباب‌ها به صورت پیوسته و پایدار تولید می‌شدند. بررسی‌ها نشان داد که بیشینه راندمان حذف روغن در شناورسازی با میکرو حباب زمانی به دست می‌آید که اندازه میکرو حباب‌ها و قطرات روغن تقریباً هم‌اندازه باشند. به دلیل اندازه بسیار کوچک‌تر میکرو حباب‌ها، سطح ویژه بسیار بالاتر، زمان اقامت طولانی‌تر در آب و چگالی عدد حباب بسیار بیشتر نسبت به شناورسازی با هوای محلول سنتی، برخورد و چسبندگی مؤثرتری بین حباب‌ها، لخته‌ها و قطرات روغن رخ می‌دهد و در نتیجه راندمان حذف به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

همچنین مشاهده شد که در شناورسازی با میکرو حباب با دوز بسیار کمتر کواگولانت، ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر در برابر ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر در و زمان واکنش کوتاه‌تر، راندمان بالاتری به دست می‌آید؛ این امر به دلیل توانایی میکرو حباب‌ها در برخورد و چسبندگی مؤثر حتی با لخته‌های کوچک و فشرده است.

⁹⁰ Microbubble Air Flotation (MAF)

در نتیجه، فناوری شناورسازی با میکرو حباب نوین نسبت به طور قابل ملاحظه‌ای برتر از شناورسازی سنتی با هوای محلول است و می‌تواند به عنوان روشی کارآمد، کم‌هزینه و کم‌حجم برای پیش‌تصفیه فاضلاب‌های روغنی رستورانی و مشابه به کار گرفته شود (Zheng et al., ۲۰۱۵).

۳-۲-۳- شناورسازی با نانومواد هیدروفوبیک^{۹۱}

صنعت نساجی مقدار بسیار زیادی آب مصرف می‌کند و در نتیجه فاضلاب‌هایی با حجم بالا و حاوی آلاینده‌های متنوع شامل مواد آلی، رنگ، سورفکتانت‌ها^{۹۲}، فلزات سنگین، چربی و روغن، مواد معلق و ... تولید می‌کند. یکی از مراحل کلیدی و مؤثر در تصفیه این فاضلاب‌ها، شناورسازی با هوای محلول است که به‌ویژه برای حذف مواد معلق، چربی، روغن و الیاف بسیار کارآمد است.

یک واحد شناورسازی با هوای محلول نوآورانه طراحی و یک نمونه آزمایشگاهی (دمونستراتور^{۹۳}) از آن ساختند و کارایی آن را به‌طور عملی اثبات کردند. مهم‌ترین نوآوری این واحد عبارت است از:

۱- کیسول فشارشکن اختصاصی و ثبت‌شده که آب تصفیه‌شده و هوا را تحت فشار ۵ بار با یکدیگر مخلوط می‌کند و سپس با کاهش ناگهانی فشار، میکرو حباب‌های بسیار ریز هوا (۲۰ تا ۱۰۰ میکرومتر) تولید می‌کند. آب از بالا به‌صورت قطرات بسیار ریز (اسپرینکلر چهارگانه^{۹۴}) وارد کیسول می‌شود.

هوا از پایین از طریق لوله استیل ضدزنگ سوراخ‌دار (قطر سوراخ ۱ میلی‌متر) به‌صورت حباب‌های کوچک تزریق می‌گردد.

برای افزایش زمان تماس و راندمان انحلال هوا، داخل کیسول با قطعات کوچک پلاستیکی متحرک (حامل‌های بیوفیلیم^{۹۵}) پر شده است.

۲- استفاده از نانومواد هیدروفوب به‌عنوان کلکتور^{۹۶} شناورسازی

⁹¹ Nanoparticle-Enhanced DAF

⁹² Surfactants

⁹³ Demonstrator

⁹⁴ Quadruple Sprinkler

⁹⁵ Biofilm

⁹⁶ Collector

شناورسازی نقش حیاتی در حذف آلاینده‌ها دارند و امروزه نانوذرات هیدروفوب می‌توانند جایگزین یا مکمل کلکتورهای سنتی (سورفکتانت‌های با وزن مولکولی کم) شوند. مکانیسم عمل به این صورت است:

نانوذرات هیدروفوب (مانند پلی‌استایرن، SiO_2 ، TiO_2 ، $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ و $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) دارای سطح خارجی هیدروفیلی و هسته هیدروفوبی هستند.

این ساختار دوگانه باعث می‌شود که نانوذرات به راحتی به ذرات آلاینده هیدروفیلی (مواد معلق، چربی، رنگ و ...) متصل شوند و همزمان به میکروحباب‌های هوا بچسبند.

در نتیجه، اتصال ذره-حباب به‌طور چشمگیری تقویت شده و احتمال جدا شدن مجدد کاهش می‌یابد.

نانوذرات همچنین با ایجاد مانع فیزیکی بین حباب‌ها، پایداری کف و ضخامت لایه کف را افزایش می‌دهند و باعث می‌شوند کف مدت طولانی‌تری پایدار بماند و حذف آن آسان‌تر شود.

۳- سیستم دوزینگ^{۹۷} نانومواد^{۹۸}

یک سیستم تزریق دقیق شامل پمپ دوزینگ، مخزن سوسپانسیون نانومواد، همزن و دیفیوزر^{۹۹} داخل حوضچه لاملا^{۱۰۰}یی طراحی شده است تا نانوذرات به صورت یکنواخت در فاضلاب پخش شوند و سپس همراه کف جمع‌آوری و حتی قابلیت بازیافت داشته باشند.

۴- طراحی بهینه حوضچه لاملایی

با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی، ابعاد و آرایش صفحات لاملایی بهینه شد تا جریان‌های ترجیحی حذف شود و راندمان ته‌نشینی مواد معلق به حدود ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر (از ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ورودی) برسد (Moga et al., ۲۰۱۹).

۳-۲-۴- شناورسازی با هوای محلول دو مرحله‌ای^{۱۰۱}

⁹⁷ Dosing

⁹⁸ Nanomaterials

⁹⁹ Diffuser

¹⁰⁰ Lamella

¹⁰¹ Two-Stage DAF

سیستم‌های شناورسازی دو مرحله‌ای به‌منظور دستیابی به کارایی بسیار بالای حذف مواد معلق و روغن و گریس طراحی شده‌اند. در این آرایش، مرحله اول شناورسازی با هوای محلول به‌عنوان واحد شفاف‌سازی اولیه^{۱۰۲} عمل می‌کند و قادر است تا حدود ۹۵-۹۰ درصد از کل مواد معلق و بخش عمده‌ای از روغن و گریس شناور را حذف نماید. پس از آن، جریان خروجی مرحله اول وارد مرحله دوم شناورسازی با هوای محلول می‌شود که در آن مجدداً هوای محلول تزریق می‌گردد و شناورسازی ثانویه انجام می‌پذیرد. این مرحله دوم به‌طور خاص برای حذف ذرات ریز باقی‌مانده و مواد کلوئیدی که در مرحله اول جدا نشده‌اند، بسیار مؤثر است.

در سیستم‌های مدرن شناورسازی با هوای محلول دو مرحله‌ای که توسط شرکت Krofta Engineering توسعه یافته‌اند، نرخ بارگذاری هیدرولیکی تا ۷/۵ لیتر بر مترمربع در ثانیه قابل دستیابی است، در حالی که زمان ماند هیدرولیکی کل سیستم تنها حدود ۳ دقیقه می‌باشد. این عملکرد فوق‌العاده بالا به‌دلیل استفاده از مخازن دایره‌ای کم‌عمق، توزیع یکنواخت حباب‌های بسیار ریز هوا (قطر ۳۰-۷۰ میکرومتر) و سیستم جمع‌آوری لجن شناور خودکار است.

این نوع سیستم به‌ویژه برای فاضلاب‌های شهری و صنعتی با بار آلی بالا و محتوای قابل توجه روغن و گریس توصیه می‌گردد، زیرا مرحله اول بار اصلی مواد شناور و چربی را حذف می‌کند و مرحله دومین مرحله کیفیت پساب را تا حد قابل بازچرخانی یا تخلیه مستقیم بهبود می‌بخشد (Vang et al., n.d).

۳-۲-۵- شناورسازی با هوای محلول بهینه‌شده برای فاضلاب نفتی^{۱۰۳}

۱- نقش کوآگلانت (پلی آلومینیوم سولفات)

مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل، دوز پلی آلومینیوم سولفات بود. این ماده با بی‌ثبات‌سازی قطرات روغن امولسیون، بار الکتریکی آن‌ها را خنثی و امکان تجمع و تشکیل فلوک‌های بزرگ‌تر را فراهم کرد. افزایش دوز پلی آلومینیوم سولفات از ۵ به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌طور چشمگیری حذف چربی و TSS را افزایش داد.

۲- فشار اشباع‌کننده هوا

¹⁰² primary clarification

¹⁰³ Oil Refinery Wastewater

با افزایش فشار از ۲۰۰ به ۵۰۰ کیلوپاسکال، مقدار هوای محلول و در نتیجه تعداد و کیفیت حباب‌های ریز افزایش یافت و حذف آلاینده‌ها بهبود یافت. فشارهای بالاتر از ۵۰۰ کیلوپاسکال تأثیر قابل‌توجهی نداشت (به دلیل اشباع کامل).

۳- نسبت هوا به آب

نسبت ۵٪-۱۵٪ بهترین عملکرد را نشان داد. افزایش بیش از ۱۵٪ نه تنها بهبود ایجاد نکرد، بلکه در مورد TSS حتی کمی کاهش راندمان مشاهده شد.

۴- زمان شناورسازی

زمان ۱۵ دقیقه کافی و بهینه بود. زمان‌های طولانی‌تر (بیش از ۲۰-۳۰ دقیقه) به دلیل تنش برشی باعث تخریب فلوک‌ها و کاهش راندمان شد.

عملکرد شناورسازی با هوای محلول آزمایشگاهی برای تصفیه فاضلاب پالایشگاه نفت در شرایط بهینه شامل PH برابر ۵، دوز پلی‌آلومینیوم سولفات به میزان ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، فشار اشباع‌کننده هوا ۳۰۰-۵۰۰ کیلوپاسکال، نسبت هوا به آب ۵-۱۵ درصد و زمان شناورسازی ۱۵ دقیقه، بیش از ۸۰ درصد حذف برای روغن-گریس، مواد جامد معلق کل، کدورت و تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) به دست آمد. دوز پلی‌آلومینیوم سولفات مهم‌ترین عامل مؤثر شناخته شد؛ زیرا با بی‌ثبات‌سازی قطرات روغن امولسیون و ایجاد امکان تجمع و چسبندگی مؤثرتر آنها به حباب‌های هوا، راندمان فرآیند را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای ارتقا داد (Tet t eh & Rat hi l al , ۲۰۱۸).

۳-۲-۶- شناورسازی با هوای محلول پیشرفته با فرآیندهای ترکیب^{۱۰۴}

شناورسازی در ترکیب با فیلتراسیون

یکی از پیشرفته‌ترین اشکال شناورسازی با هوای محلول، ترکیب یکپارچه شناورسازی و فیلتراسیون در یک واحد است که تحت نام‌های (DAFF (Dissolved Air Flotation/Filtration یا FLOFILTER شناخته می‌شود. در این سیستم‌ها، پس از شناورسازی و حذف لجن شناور، آب شفاف‌شده مستقیماً از میان بستر فیلتر معمولاً بستر

¹⁰⁴ Hybrid DAF-Filtration

شنی-آنتراسیتی^{۱۰۵} یا کربن فعال دانه‌ای که در همان مخزن شناورسازی قرار دارد، عبور می‌کند و در نتیجه نیازی به واحد فیلتراسیون جداگانه نیست (Arnold et al., ۱۹۹۵; Crossley & Valade, ۲۰۰۶).

سیستم اختصاصی FLOFILTER با قرار دادن فیلتر سطح ثابت در داخل مخزن شناورسازی، دو فرآیند شناورسازی و فیلتراسیون را در یک سازه ادغام کرد. جریان خروجی فیلتر توسط شیر مدولاتور و سوئیچ سطح مخزن کنترل می‌شود. (Arnold et al., ۱۹۹۵).

در رویکرد DAFF نیز که به‌ویژه در تصفیه آب آشامیدنی رایج است، پس از بخش شناورسازی، آب از زیر لایه شناور عبور کرده و بلافاصله وارد مرحله فیلتراسیون می‌شود. چندین فرآیند اختصاصی و پتنت‌شده با همین مفهوم توسعه یافته‌اند، از جمله CoCoDAFF®, DAFRapide® و AquaDAF® که همگی در دسته high-rate hybrid DAF قرار می‌گیرند (Crossley & Valade, ۲۰۰۶).

علاوه بر این، استفاده از فیلتراسیون، تصفیه بیولوژیکی یا تصفیه شیمیایی به‌عنوان پس‌تصفیه پس از شناورسازی با هوای محلول می‌تواند حذف آلاینده‌ها و راندمان کلی سیستم را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد، هرچند این ترکیب‌ها به‌صورت متوالی و نه یکپارچه در یک واحد هستند (Ali & Aziz, ۲۰۲۳).

شناورسازی در ترکیب با غشا^{۱۰۶}

۱- ابتدا شناورسازی با هوای محلول بخش عمده ذرات معلق، روغن، گریس، فلزات سنگین، جلبک و مواد کلوئیدی را با حباب‌های ریز (> ۱۰۰ μm) به سطح می‌آورد و به صورت کف حذف می‌کند.

۲. آب تقریباً شفاف خروجی شناورسازی با هوای محلول مستقیماً به ماژول غشایی (MF, UF, NF یا RO) فرستاده می‌شود.

۳. غشا فقط ذرات بسیار ریز باقی‌مانده و مواد محلول را حذف می‌کند و آب بسیار باکیفیت (اغلب مناسب استفاده مجدد یا حتی استاندارد آشامیدنی) تولید می‌کند.

مزایای اصلی این ترکیب

¹⁰⁵ Anthracite

¹⁰⁶ Hybrid Flotation-Membrane Process

گرفتگی غشا به شدت کاهش می‌یابد، عمر غشا طولانی‌تر می‌شود و نیاز به شست‌وشوی شیمیایی و تعویض غشا کمتر می‌شود.

شار غشا (flux) به طور قابل توجهی بالاتر می‌رود (در آزمایش‌ها تا ۸۸٪ بهبود نسبت به MF تنها گزارش شده).

فشار عملیاتی غشا (TMP) خیلی پایین می‌ماند (مثلاً ۰/۰۳ تا ۰/۱ بار).

سطح غشای مورد نیاز کمتر می‌شود، هزینه سرمایه‌گذاری و فضای اشغالی کاهش می‌یابد.

هزینه عملیاتی کل فرآیند ترکیبی کمتر از مجموع شناورسازی با هوای محلول جدا به علاوه غشا جدا است (در برخی موارد تا ۶۰-۵۰٪ صرفه‌جویی).

کیفیت آب خروجی بسیار بالا: حذف بیش از ۹۹٪ روغن، بیش از ۹۹-۹۵٪ فلزات سنگین، توربیدیتی نزدیک صفر، COD و BOD خیلی پایین، حتی رسیدن به غلظت فلزات $> 0.05 \text{ mg/L}$.

بازایی آب بالاتر (تا ۹۵٪ و بیشتر) و مصرف انرژی و مواد شیمیایی کمتر نسبت به غشا به تنهایی.

-برای انواع پساب‌های صنعتی (نساجی، نفتی، فلزات، کشتارگاه، معدن، الکترونیک، کاغذسازی) و حتی پیش‌تصفیه آب دریا قبل از RO بسیار مؤثر است (Zoubi et al., 2009).

شناورسازی در ترکیب با راکتور زیستی

جداسازی به‌کمک شناورسازی با هوای محلول بدون افزودن کوآگولانت به‌عنوان پیش‌تصفیه سیستم راکتور زیستی غشایی برای تصفیه فاضلاب شهری بررسی شد. نتایج نشان داد که شناورسازی با هوای محلول به‌تنهایی توانست بیش از ۷۰٪ CODCr، ۷۳٪ BOD₅، ۸۳٪ مواد معلق (SS)، ۵۵٪ نیتروژن کل (TN) و ۶۵٪ فسفر کل (TP) را از فاضلاب ورودی حذف کند. میانگین حذف کلی پارامترهای کیفی آب در سیستم ترکیبی DAF-MBR بسیار بالا و به‌ترتیب برابر با ۹۵/۹٪ برای CODCr، ۹۹/۷٪ برای BOD₅، ۹۳/۶٪ برای CODMn، ۶۹/۸٪ برای TN، ۹۸/۵٪ برای NH₄-N، ۷۸/۲٪ برای TP و ۹۹/۵٪ برای SS بود که تمامی این مقادیر استانداردهای خروجی پساب را برآورده می‌کرد. جداسازی غشایی در سیستم راکتور زیستی غشایی غلظت بسیار پایینی از مواد معلق به مقدار ۱/۲۷

میلی گرم بر لیتر در پساب نهایی ایجاد کرد. نتایج پژوهش ثابت کرد که فناوری جداسازی شناورسازی با هوای محلول گزینه‌ای عالی برای پیش تصفیه فاضلاب، به‌ویژه پیش از سیستم راکتور زیستی غشایی است.

انتظار می‌رفت که شناورسازی با هوای محلول، بار گرفتگی غشاء را کاهش دهد و بار آلی و مواد مغذی ورودی به سیستم راکتور زیستی غشایی را نیز پایین بیاورد. به همین دلیل کواگولانت به فاضلاب اضافه نشد تا از رسوب‌گذاری همزمان فسفر جلوگیری شود.

دستگاه آزمایشی شامل یک واحد شناورسازی با هوای محلول و سپس یک سیستم راکتور زیستی غشایی متشکل از مخزن آنوکسیک و مخزن هوادهی بود. پساب شناورسازی با هوای محلول روزانه به مدت یک ساعت تولید و در مخزنی ذخیره و سپس با نرخ ۱۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به مخزن آنوکسیک پمپ می‌شد. غلظت مواد جامد معلق مخلوط (MLSS) در مخزن آنوکسیک بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ و در مخزن هوادهی بین ۷۰۰۰ تا ۸۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر حفظ شد. زمان ماند هیدرولیکی هر دو مخزن ۴ ساعت و نرخ بازچرخش داخلی از هوادهی به آنوکسیک حدود ۲۰۰٪ بود. غشای به‌کاررفته از نوع میکروفیلتراسیون هیدروفیلک PVDF با اندازه منافذ ۰/۳ تا ۰/۴ میکرومتر بود که به‌صورت ۷ دقیقه کار و ۳ دقیقه توقف عمل می‌کرد.

فاضلاب ورودی از تصفیه‌خانه شهری اولسان کره تأمین شد. حتی بدون افزودن کواگولانت، شناورسازی با هوای محلول عملکرد بسیار خوبی در کاهش بار اکثر پارامترهای کیفی از جمله BOD₅، COD، نیتروژن کل، فسفر کل و مواد معلق نشان داد. لایه حباب‌های ریز در شناورسازی با هوای محلول مانند بستری فیلتری عمل کرد که ذرات آلی معلق را به‌دام انداخت، در حالی که مواد محلول و کلوئیدی از این لایه عبور کرده و در سیستم راکتور زیستی غشایی حذف شدند.

حذف کلی BOD₅ بیش از ۹۹٪ و غلظت آن در پساب نهایی کمتر از ۲ میلی‌گرم بر لیتر بود. حذف COD_{Cr} بیش از ۹۵٪ و غلظت نهایی آن حدود ۱۱ تا ۱۴ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد. مواد معلق با حذف نزدیک به ۹۹٪ به غلظت متوسط ۳۳/۱ میلی‌گرم بر لیتر در پساب نهایی رسید. حذف نیتروژن و فسفر کل به ترتیب تا ۷۵٪ و ۶۴٪ بود که به شرایط عملیاتی راکتور زیستی غشایی وابسته است و ارتباطی با جداسازی غشایی ندارد.

در نهایت، فاضلاب شهری به‌صورت پایدار و با نرخ حذف بسیار بالا توسط سیستم ترکیبی DAF-MBR تصفیه شد. حتی بدون استفاده از کواگولانت، شناورسازی با هوای محلول توانست بیش از ۶۶٪ COD_{Cr}، ۷۱٪ BOD₅، ۵۱٪

CODMn و SS ٪۸۲ را همراه با TN ٪۴۴ و TP ٪۵۳ حذف کند. جداسازی غشایی در MBR امکان تولید پساب با کیفیت عالی و غلظت SS برابر ۱/۳۳ میلی‌گرم بر لیتر را فراهم آورد. نتایج این پژوهش پایلوت نشان داد که جداسازی به کمک شناورسازی با هوای محلول فناوری بسیار مناسبی برای پیش‌تصفیه فاضلاب شهری، به‌ویژه پیش از سیستم راکتور زیستی غشایی است (Ki met al ., ۲۰۱۴).

۳-۲-۷- شناورسازی با هوای محلول با کوآگلانت‌های طبیعی^{۱۰۷}

علاوه بر کوآگلانت‌های مصنوعی رایج مورد استفاده همراه با فرآیند شناورسازی با هوای محلول، کوآگلانت‌های طبیعی نیز مورد بررسی قرار گرفتند که قادرند اثرات تغییرات اقلیمی کنونی را کاهش دهند. نتایج نشان داد که شناورسازی با هوای محلول از پتانسیل بالایی برای تصفیه فاضلاب و بهره‌برداری از پسماند برخوردار است؛ تولید حجم زیاد لجن شناورسازی با هوای محلول، فرصتی برای تولید انرژی پاک فراهم می‌آورد، زیرا این لجن‌ها قابل استفاده در تولید بیوگاز هستند (Muñoz et al ., ۲۰۲۱).

۳-۳- مقایسه روش‌های مرسوم و نوین

۳-۳-۱- طراحی و ساختار مخازن

روش‌های مرسوم، مانند نسل اول (سیستم‌های ADKA و Sveen-Pedersen) از مخازن بلند، باریک و کم‌عمق استفاده می‌کنند که شفت ورودی عمودی در ابتدای مخزن قرار دارد و آب و هوای محلول از کف شفت تزریق می‌شود. این طراحی منجر به مخلوط‌سازی نسبتاً یکنواخت حباب‌ها با آب ورودی در شرایط آشوبناک می‌شود، اما فضای شناورسازی عمدتاً افقی و کم‌عمق است، که پتوی حبابی نازک و محدود را ایجاد می‌کند. در نسل دوم، مخازن مربعی‌شکل و عمیق‌تر هستند، با دیواره زیرجریان در انتها که آب زلال‌شده را خارج می‌کند، و زاویه جریان حدود ۳۰ تا ۴۵ درجه پایین‌تر از افقی است. فیلتر شناوری، به عنوان یک کاربرد ویژه، شناورسازی را در بخش بالایی مخزن با فیلتراسیون شن در بخش پایینی ترکیب می‌کند و جریان را عمودی رو به پایین هدایت می‌نماید. همچنین، در روش با بازچرخش آب پراکنده، سیستم بر پایه تزریق آب تحت فشار (۵۰۰-۶۰۰ کیلوپاسکال) به مخزن استوار است.

¹⁰⁷ Natural Coagulants in DAF

در مقابل، روش‌های نوین طراحی‌های پیچیده‌تری دارند تا کارایی را افزایش دهند. نسل سوم بر پایه فیلتر شناورسازی است، اما بستر فیلتر شنی را با صفحه‌ای نازک و سوراخ‌دار جایگزین می‌کند که مقاومت هیدرولیکی کمتری دارد و جریان را به طور یکنواخت در کل مقطع افقی توزیع می‌نماید. مخازن نوین عمق بیشتری نسبت به طول و عرض دارند و عمق بستر حباب‌ها تا ۱/۵ تا ۲/۵ متر می‌رسد. شناورسازی با میکروحباب‌های نوین از نازل‌های خاص برای تولید حباب‌های بسیار ریز (حدود ۲۰ میکرومتر) استفاده می‌کند و سیستم را برای فاضلاب‌های روغنی بهینه می‌سازد. در شناورسازی با نانومواد هیدروفوبیک، نوآوری شامل کپسول فشارشکن اختصاصی برای تولید میکروحباب‌های ۲۰ تا ۱۰۰ میکرومتر، همراه با تزریق نانوذرات هیدروفوب (مانند TiO_2 یا SiO_2) به عنوان کلکتور است که اتصال ذرات به حباب‌ها را تقویت می‌کند. سیستم‌های دو مرحله‌ای از مخازن دایره‌ای کم‌عمق با توزیع یکنواخت حباب‌های ۳۰-۷۰ میکرومتر بهره می‌برند. شناورسازی بهینه‌شده برای فاضلاب نفتی بر تنظیم دوز کوآگلانت (مانند پلی‌آلومینیوم سولفات) و فشار اشباع (۳۰۰-۵۰۰ کیلوپاسکال) تمرکز دارد. روش‌های پیشرفته ترکیبی مانند DAFF یا FLOFILTER، شناورسازی را با فیلتراسیون (شن-آنتراسیت) در یک واحد ادغام می‌کنند، و ترکیب با غشا (MF/UF/NF) یا راکتور زیستی غشایی (MBR) جریان خروجی شناورسازی با هوای محلول را مستقیماً به غشا یا راکتور هدایت می‌کند تا گرفتگی را کاهش دهد. شناورسازی با کوآگلانت‌های طبیعی نیز بر تولید لجن قابل استفاده برای بیوگاز تأکید دارد.

به طور کلی، طراحی مرسوم ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است، اما محدود به فضاهای کوچک و نرخ‌های پایین، در حالی که نوین‌ها با اجزای پیشرفته مانند صفحات سوراخ‌دار، نانومواد و سیستم‌های ترکیبی، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بالاتری ارائه می‌دهند.

۳-۳-۲- نرخ جریان و شرایط جریان

در روش‌های مرسوم، نرخ جریان بسیار پایین است: نسل اول ۲-۳ مترمکعب بر مترمربع در ساعت (کمتر از ۵ متر بر ساعت) با جریان تقریباً افقی و لامینار^{۱۰۸}؛ نسل دوم ۵-۷ متر بر ساعت (حداکثر ۱۰ متر بر ساعت) با زاویه جریان پایین‌تر از افقی؛ و فیلتر شناوری ۱۰-۱۵ متر بر ساعت، اما همچنان لامینار به دلیل محدودیت افت هد فیلتر، بازچرخش آب پراکنده نیز نرخ‌های مشابهی دارد و جریان را به صورت افقی یا نیمه‌عمودی نگه می‌دارد.

روش‌های نوین نرخ‌های بسیار بالاتری را تحمل می‌کنند: نسل سوم ۲۵-۴۰ متر بر ساعت (حتی تا ۶۰ متر بر ساعت) در شرایط آشوبناک (توربولانتی)، بدون خطر گرفتگی، میکروحباب‌ها نرخ جریان را با تولید حباب‌های پایدار و کوچک افزایش می‌دهند، و سیستم‌های دو مرحله‌ای نرخ بارگذاری هیدرولیکی تا ۷/۵ لیتر بر مترمربع در ثانیه با زمان ماند تنها ۳ دقیقه را ممکن می‌سازند. در فاضلاب نفتی، نرخ‌ها با تنظیم نسبت هوا به آب (۵٪-۱۵٪) بهینه می‌شوند. ترکیبات پیشرفته مانند DAFF نرخ‌های بالا (تا ۱۵ متر بر ساعت) را با فیلتراسیون همزمان حفظ می‌کنند، و ترکیب با غشا شار غشا را تا ۸۸٪ بهبود می‌بخشد با فشار TMP پایین (۱/۳-۰/۰ بار). ترکیب-DAF MBR نرخ بازچرخش ۲۰۰٪ و زمان ماند ۴ ساعته را بدون کوآگولانت مدیریت می‌کند.

این تفاوت نشان‌دهنده پیشرفت نوین‌ها در غلبه بر محدودیت‌های جریان مرسوم است، که اجازه بهره‌برداری در مقیاس‌های بزرگ‌تر و با انرژی کمتر را می‌دهد.

۳-۳-۳- راندمان حذف آلاینده‌ها و عوامل مؤثر

راندمان روش‌های مرسوم عمدتاً بر چسبندگی حباب به ذرات در شفت ورودی تکیه دارد، با حذف TSS تا ۹۸/۶۸-۷۷ درصد در فاضلاب شهری و رستورانی با کوآگولانت‌هایی مانند PAC (۲-۱۲ mg/L Al) یا آلوم، و حذف روغن/گریس تا ۹۳/۱۶ درصد با بازچرخش ۱۴ درصد و فشار ۶۰ psi.

نسل اول پتوی حبابی نازک دارد و فیلتراسیون محدود است، در حالی که نسل دوم با لایه حباب ۳۰-۵۰ سانتی‌متر، فیلتراسیون را بهبود می‌بخشد. فیلتر شناوری لایه حباب ۸۰-۱۲۰ سانتی‌متری ایجاد می‌کند که حذف را افزایش می‌دهد.

روش‌های نوین راندمان بالاتری نشان می‌دهند: میکروحباب‌ها حذف روغن ۹۸ درصد، COD ۸۸/۹ درصد و کدورت ۹۵/۲ درصد را با دوز PAC ۲۰ mg/L و فشار ۰/۳۵ MPa به دست می‌آورند، که ۱۰٪-۲۲٪ بهتر از سنتی است، به دلیل حباب‌های کوچک‌تر (۲۰ μm) و چسبندگی مؤثرتر. نانومواد هیدروفوبیک اتصال را تقویت کرده و کف پایدارتری ایجاد می‌کنند، TSS را از ۳۰۰ به ۳۰ mg/L کاهش می‌دهند. سیستم دو مرحله‌ای ۹۰٪-۹۵٪ TSS و روغن/گریس را حذف می‌کند. در فاضلاب نفتی، بیش از ۸۰٪ حذف روغن، TSS، کدورت و COD با دوز ۱۰ mg/L پلی‌آلومینیوم سولفات، فشار ۳۰۰-۵۰۰ kPa و زمان ۱۵ دقیقه حاصل می‌شود. ترکیبات DAFF حذف را با فیلتراسیون پس از شناورسازی افزایش می‌دهند. ترکیب DAF -غشا بیش از ۹۹٪ روغن و فلزات سنگین، و ۹۵-

۹۹٪ COD/BOD را حذف می‌کند با بازیابی ۹۵٪، و DAF-MBR بدون کوآگولانت ۹۵/۹ درصد COD، ۹۹/۷ درصد BOD و ۹۹/۵ درصد TSS را به دست می‌آورد. کوآگولانت‌های طبیعی لجن قابل استفاده برای بیوگاز تولید می‌کنند.

نوین‌ها با عوامل بهینه مانند حباب‌های ریزتر، نانومواد و ترکیبات، راندمان را ۱۰٪-۳۰٪ افزایش داده و مصرف کوآگولانت را کاهش می‌دهند، در حالی که مرسوم‌ها به نرخ‌های پایین‌تر و دوزهای بالاتر وابسته‌اند.

جدول ۱-۳ مقایسه روش‌های مرسوم و نوین

ویژگی	روش‌های نوین (نسل ۳، میکرو حباب، نانومواد، دو مرحله‌ای، ترکیب‌ها)	روش‌های مرسوم (نسل ۱-۲، فیلتر شناوری، بازچرخش)
نرخ جریان m/h	۱۵-۶۰ (آشوبناک، بدون محدودیت)	۲-۱۰ (لامینار، محدود به افت هد)
عمق بستر حبابی	عمیق (۱/۵-۲ متر)، فیلتراسیون غالب	نازک (۱۰-۱۵ سانتی متر)، فیلتراسیون ضعیف
حذف TSS	< ۹۵٪-۹۹٪ (با دوز کمتر، ترکیب غشا/MBR)	۷۷٪-۹۸٪ (وابسته به کوآگولانت، دوز بالا)
حذف چربی و روغن	۹۸٪-۹۹٪ (میکرو حباب/نانو، فاضلاب نفتی/انساجی)	۹۳٪ (در رستورانی، با آلوم)
مصرف کوآگولانت	پایین (۱۰-۲۰ mg/L، طبیعی/نانو)	بالا (۲۰-۶۰ mg/L PAC، آلوم)
مزایا	نرخ بالا، کارایی برتر، کاهش گرفتگی/هزینه	ساده، ارزان در هزینه اولیه، گسترده
معایب	پیچیده‌تر، نیاز به فناوری پیشرفته	پتوی نازک حباب، نرخ پایین، لجن زیاد
کاربرد غالب	فاضلاب روغنی/صنعتی پیچیده، بازیافت آب	فاضلاب شهری اولیه، رستورانی

فصل چهارم

مطالعات موردی

در مطالعه ای (Tet t eh & Rat hi l al , ۲۰۱۸) که در سال ۲۰۱۸ با عنوان بررسی عوامل شناورسازی با هوای محلول برای تصفیه پساب پالایشگاه نفت انجام شد و نتیجه این شد که شناورسازی با هوای محلول پیش تصفیه شده

با انعقادکننده، نیازمند دوز مناسب برای خنثی‌سازی بار الکتریکی قطرات روغن و همزمان، ادغام قطرات روغن به منظور بهبود کارایی شناورسازی با هوای محلول است. در نتیجه، افزودن پلی آلومینیوم سولفات نیروی دافعه الکترواستاتیک امولسیون روغن را کاهش داد و منجر به تجمع آن شد که عملکرد تصفیه‌پذیری شناورسازی با هوای محلول را افزایش داد. علاوه بر این، تولید حباب‌ها سطح تماس بین‌مرزی را افزایش داد و محیطی برای اتصال مؤثر قطرات روغن-حباب‌ها ایجاد کرد. بنابراین، در این مطالعه، کارایی شناورسازی با هوای محلول مستقیماً متناسب با تولید حباب است که به فشار اشباع‌کننده هوا (۳۰۰-۵۰۰ کیلوپاسکال)، نسبت هوا-آب (۵-۱۵ درصد)، نیروی پیوندی به عنوان پلی آلومینیوم سولفات در دوز ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، و pH برابر ۵ نسبت داده می‌شود.

در مطالعه دیگری (D angarandl a et al ., ۲۰۱۸) در همان سال با موضوع سیستم شناورسازی با هوای محلول پشتیبانی‌شده توسط بیوفلوکولانت برای حذف جامدات معلق، لیپیدها و مواد پروتئینی از پساب کشتارگاه طیور، انجام شد، این مطالعه بر طراحی و کارایی سیستم‌های Bio-DAF^{۱۰۹}، در مقایسه با Chem-DAF^{۱۱۰} و Conv-DAF^{۱۱۱}، برای حذف FOG، TSS و پروتئین تمرکز داشته است. نتایج نشان داد که Bio-DAF موفق به حذف ۹۱ درصد TSS، ۹۳ درصد FOG و ۷۹ درصد پروتئین شد، در حالی که Chem-DAF تنها ۸۴ درصد TSS، ۹۲ درصد FOG و ۷۱ درصد پروتئین را حذف کرد. بنابراین، اثبات شد که Bio-DAF در حذف TSS، FOG و پروتئین موجود در پساب کشتارگاه طیور (PSW) کارآمدتر از Chem-DAF و Conv-DAF است. از آنجا که Bio-DAF یک مفهوم طراحی نسبتاً جدید است، توصیه می‌شود که عملکرد آن، و بنابراین قابلیت اطمینان عملیاتی‌اش، تحت بارگذاری‌های شوک متغیر ارزیابی شود.

در مطالعه ای دیگر (D os Santos Per eira et al ., ۲۰۲۰) در سال ۲۰۲۰ با موضوع مقایسه شناورسازی اوزون محلول (DOF) و شناورسازی با هوای محلول در تصفیه پساب صنایع لبنی انجام و مشخص شد در شرایط تجربی پژوهش، شناورسازی با اوزون محلول عملکرد بهتری نسبت به شناورسازی با هوای محلول نشان نداد و تنها تمایل اندکی به بهبود حذف تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) و تقاضای بیولوژیکی اکسیژن (BOD) داشت. در تمامی آزمون‌های شناورسازی هوای محلول و شناورسازی با اوزون محلول، با و بدون افزودن پراکسید هیدروژن، نتایج تصفیه بهتر در pH برابر با ۴ حاصل شد.

¹⁰⁹ Biofloculant-supported Dissolved Air Flotation

¹¹⁰ Chemical-supported Dissolved Air Flotation

¹¹¹ Conventional Dissolved Air Flotation

آزمون‌های انجام‌شده با پراکسید هیدروژن در نسبت‌های H_2O_2/O_3 برابر با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در pH برابر با ۴، کاهش تدریجی کارایی تصفیه را با افزایش نسبت نشان داد و در pH برابر با ۱۱/۴ تمایل اندکی به افزایش داشت، اما همچنان به طور قابل توجهی پایین‌تر از نتایج بدون پراکسید هیدروژن بود.

نتایج حاصل از پساب با نتایج سه پساب صنایع لبنی متفاوت بود و تنها به نتایج یکی از آن‌ها که حاوی بیشترین آثار باقی‌مانده شیر و پنیر بود، نزدیک‌تر بود.

برای آزمایش‌های آتی با استفاده از همان سیستم شناورسازی، پیشنهاد می‌شود آزمون‌هایی با غلظت اوزون برابر با ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یا بیشتر انجام شود. همچنین پیشنهاد می‌شود آزمون‌هایی با سیستم شناورسازی عملیاتی در جریان پیوسته، همراه با بازگردانی پساب شفاف‌شده و مخزن اوزوناسیون اضافی، انجام گیرد و آزمون‌های با پراکسید هیدروژن با افزودن پیوسته آن در مخزن اوزوناسیون تکمیلی، در محدوده pH از ۸ تا ۱۲ و با نسبت‌های H_2O_2/O_3 متغیر از ۰/۵ تا ۳ صورت پذیرد.

در مطالعه ای دیگر (Ali & Azi Z, ۲۰۲۳) در سال ۲۰۲۳ با موضوع پارامترهای عملیاتی و محدودیت‌های شناورسازی با هوای محلول در تصفیه فاضلاب‌ها نتیجه حاصل شد کارکرد اصلی و مهم شناورسازی با هوای محلول، حذف جامدات معلق و کلوئیدی از فاضلاب خام ورودی از طریق شناورسازی (بالا آمدن) یا کاهش چگالی ظاهری آن‌ها است.

فناوری شناورسازی با هوای محلول، یک روش پیش‌تصفیه کارآمد پیش از تصفیه بیولوژیکی به شمار می‌رود، زیرا غلظت بالای COD و روغن و چربی را تا ۹۲/۵ درصد و ۹۰ درصد، به ترتیب، حذف می‌کند.

سه عامل فشار هوا، نسبت بازچرخانی، و نسبت هوا به جامد، بر عملکرد شناورسازی با هوای محلول و کارایی این فرآیند تأثیرگذار هستند.

پیش‌تصفیه و پس‌تصفیه شناورسازی با هوای محلول منجر به کارایی حذف بالاتر می‌شود؛ با این حال، هزینه و عملیات سیستم بالا است.

تمرکز کارهای آتی باید بر توسعه فناوری‌های شناورسازی با هوای محلول متمرکز باشد که از انرژی‌های تجدیدپذیر بهره می‌برند، و همچنین راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی اجزای مختلف (مانند پمپ‌های فشار، موتورها، کمپرسورهای هوا، و سیستم‌های مکانیکی).

در مطالعه ای دیگر (Mirpanta et al., ۲۰۲۳) در همان سال با موضوع تصفیه پساب کارخانه فرآوری ماهی با استفاده از شناورسازی با هوای محلول و فیلتراسیون ستونی بیوچار در مقیاس پایلوت نتیجه کارایی روش شناورسازی با هوای محلول را در حذف روغن و چربی از پساب کارخانه فرآوری ماهی نشان داد. علاوه بر این، حذف فسفر به دلیل افزودن ماده منعقدکننده مبتنی بر آهن، کارآمد بود. با این حال، انواع دیگر مواد منعقدکننده نیز باید برای کاهش حذف مواد مغذی در فرآیند شناورسازی با هوای محلول آزمایش شوند. این امر، بازیابی و استفاده مجدد محلی از مواد مغذی را تسهیل می‌کند. روش شناورسازی با هوای محلول همچنین به طور مؤثر کدورت پساب را از طریق جداسازی ذرات معلق کاهش داد. لجن حذف‌شده در فرآیند شناورسازی با هوای محلول عمدتاً شامل روغن، چربی و سایر جامدات حاصل از فرآوری ماهی، و همچنین آهن و پلی‌آکریل‌آمید از فرآیند شناورسازی با هوای محلول بود. این لجن برای تولید بیوگاز مورد استفاده قرار گرفت. فیلتراسیون از طریق مخلوطی از بیوچار کنف و صنوبر، پساب فرآوری‌شده با شناورسازی با هوای محلول را بیشتر شفاف‌سازی کرد و بخشی از مواد مغذی باقی‌مانده را بازیابی نمود. بر اساس آزمایش‌های لرزشی دسته‌ای، بیوچار کنف اندکی کارآمدتر در حذف COD و نیتروژن بود، در حالی که بیوچار صنوبر فسفر را بهتر جذب کرد. هرچند رهاسازی پساب فرآوری‌شده با شناورسازی با هوای محلول و فیلترشده با بیوچار به محیط زیست ممکن نیست، اما درمان یکپارچه به طور قابل توجهی بار آلی در کارخانه تصفیه فاضلاب شهری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، اتصال مواد مغذی محلول به بیوچار مشاهده شد. احتمال استفاده از بیوچار مصرف‌شده به عنوان بهبوددهنده خاک، جذابیت فیلتراسیون بیوچار را به عنوان روشی برای درمان پساب‌های غنی از مواد مغذی افزایش می‌دهد. فیلترهای بیوچار مخلوط ممکن است در درمان پساب‌های حاوی مواد مغذی متنوع، سودمند باشند. با این حال، پژوهش‌های بیشتری برای گسترش دانش و درک مزایای بیوچار به عنوان تکنیکی برای درمان پساب فرآوری ماهی مورد نیاز است. یکی از چالش‌ها در یافتن روش درمان مناسب، فصلی بودن صنعت فرآوری ماهی است و درمان پساب‌ها باید در شرایط سرد نیز کارآمد باشد.

در مطالعه ای دیگر (Legar da Ber múdez et al ., ۲۰۲۴) در سال ۲۰۲۴ با موضوع ارزیابی عملکرد یک مولد حباب از نوع کاویتاسیون هیدرودینامیکی در یک واحد شناورسازی پروتوتایپ در مقیاس آزمایشگاهی برای تصفیه فاضلاب صنعت فرآوری طیور انجام و در این پژوهش، طراحی و آزمون عملیاتی یک پروتوتایپ واحد شناورسازی ارائه شد که در آن، مخزن اشباع و کمپرسورهای پرفشار موجود در شناورسازی با هوای محلول سنتی با تزریق کننده میکرو حباب CARMIN جایگزین شده‌اند. ارزیابی کارایی حذف TSS و چربی و روغن سیستم پیشنهادی با در نظر گرفتن پیکربندی‌های اولیه مختلف تزریق کننده (به منظور تغییر اندازه میکرو حباب‌های تولید شده)، چهار نوع فاضلاب سنتتیک و پلی‌آلومینیوم کلراید به عنوان منعقدکننده انجام گرفت تا پتانسیل این سیستم برای تصفیه فاضلاب صنعت فرآوری طیور بررسی شود.

نتایج نشان داد میانگین اندازه میکرو حباب‌ها بین ۴۷/۴۱ تا ۱۱۶/۱۷ میکرومتر متغیر بود. میانگین کارایی حذف TSS در غلظت بالای ذرات معلق (۱۵۶۰ میلی‌گرم بر لیتر) بیش از ۶۵٪ و در غلظت پایین تر TSS (۷۹۵ میلی‌گرم بر لیتر) بیش از ۸۰٪ بود. همچنین، به ترتیب ۷۰٪ و ۹۰٪ از روغن و گریس در غلظت‌های اولیه بالا (۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و پایین (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) حذف شد.

در سال ۲۰۲۵ در مطالعه دیگر (Par edes-Qui r oz et al ., ۲۰۲۵) با موضوع کارایی سیستم شناورسازی با هوای محلول در حذف مواد آلی و ترکیبات لیپیدی از پساب شهری نتیجه گیری شد که کارایی سیستم شناورسازی با هوای محلول در حذف آلاینده‌های آلی و جامدات از پساب شهری با تغییر فشار گیج (۱ تا ۵ بار) و زمان بازچرخش (۱ تا ۲۰ دقیقه) ارزیابی شد. غلظت اولیه پارامترها در پساب ورودی به ترتیب عبارت بود از: ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر جامدات کل (TS)، ۵۹۰ میلی‌گرم بر لیتر جامدات معلق کل (TSS)، ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر روغن و گریس (O&G)، ۳۶۰ میلی‌گرم بر لیتر نیاز اکسیژن بیوشیمیایی پنج‌روزه (BOD_5) و ۷۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نیاز اکسیژن شیمیایی (COD).

غلظت هوای محلول (که به صورت فوق‌اشباع اکسیژن تفسیر شد) به ۱۰۲/۳ میلی‌گرم بر لیتر رسید و بازده حذف به ترتیب ۸۴/۴ درصد برای روغن و گریس، ۸۸/۹ درصد برای BOD_5 ، ۸۸/۷ درصد برای COD و ۸۵ درصد برای TSS به دست آمد؛ در حالی که pH و جامدات محلول پایداری خود را حفظ کردند.

اهمیت این پژوهش در آن است که نشان می‌دهد شرایط عملیاتی به‌طور مستقیم باعث بهبود انحلال اکسیژن و عملکرد شناورسازی می‌شود و مسیری برای بهینه‌سازی ارائه می‌دهد که تاکنون به‌ندرت برای پساب‌های شهری گزارش شده است. نتایج حاکی از آن است که فناوری شناورسازی با هوای محلول، فرآیندی پایدار، مقاوم و کم‌مصرف از نظر انرژی است که قادر به حذف مؤثر بارهای آلی و لیپیدی از پساب شهری بوده و گزینه‌ای پایدار برای پیش‌تصفیه و بازچرخانی پساب شهری به‌شمار می‌رود.

فصل پنجم

مزایا و معایب روش‌های شناورسازی با هوای محلول

۵-۱- مزایای روش‌های شناورسازی با هوای محلول

روش‌های شناورسازی با هوایی محلول، به ویژه در نسخه‌های نوین، مزایای متعددی در کارایی، اقتصادی و عملیاتی ارائه می‌دهند. این مزایا از ویژگی‌های طراحی مخازن، نرخ جریان بالا و ترکیب با فناوری‌های دیگر ناشی می‌شوند:

۵-۱-۱- کارایی بالا در حذف آلاینده‌ها

در نسل دوم، لایه حباب‌های ریز به عنوان فیلتر عمل کرده و حذف مواد معلق را از طریق عبور آب از این لایه افزایش می‌دهد، که منجر به راندمان بالای حذف (تا ۹۸/۶۸٪ برای مواد معلق و ۹۳/۱۶٪ برای روغن و گریس در فاضلاب رستورانی) می‌شود.

در روش‌های نوین مانند شناورسازی با میکرو حباب، راندمان حذف روغن، COD و کدورت به ترتیب $98 \pm 0.09\%$ ، $95/2 \pm 2/2\%$ می‌رسد، که $1.0/3\%$ ، $22/6\%$ و 15% بالاتر از روش سنتی است؛ این به دلیل اندازه کوچک‌تر حباب‌ها (حدود ۲۰ میکرومتر)، سطح ویژه بالاتر و چسبندگی مؤثرتر است.

در شناورسازی دو مرحله‌ای، مرحله اول ۹۰٪-۹۵٪ مواد معلق و روغن را حذف می‌کند و مرحله دوم ذرات ریز و کلوئیدی را هدف قرار می‌دهد، که برای فاضلاب‌های با بار آلی بالا ایده‌آل است و نرخ بارگذاری هیدرولیکی تا ۷/۵ لیتر بر مترمربع در ثانیه را با زمان ماند ۳ دقیقه فراهم می‌کند.

ترکیب شناورسازی با هوای محلول با غشا (مانند UF/MF/RO) حذف بیش از ۹۹٪ روغن، ۹۵٪-۹۹٪ فلزات سنگین و توربیدیتی نزدیک صفر را به همراه بازیابی آب تا ۹۵٪ ارائه می‌دهد، و در ترکیب با راکتور زیستی غشایی (MBR)، حذف کلی CODCr (۹۵/۹٪)، BOD5 (۹۹،۷٪) و TSS (۹۹،۵٪) را بدون نیاز به کوآگولانت اضافی محقق می‌کند.

در کاربرد برای فاضلاب نفتی، با دوز ۱۰ mg/L پلی آلومینیوم سولفات، فشار ۳۰۰-۵۰۰ kPa و نسبت هوا به آب ۵-۱۵٪، بیش از ۸۰٪ حذف روغن-گریس، TSS، کدورت و COD به دست می‌آید.

۵-۱-۲- نرخ جریان و بهره‌وری هیدرولیکی بالا

نسل سوم در شرایط آشوبناک نرخ جریان ۲۵-۴۰ m/h (حتی تا ۶۰ m/h) را بدون خطر گرفتگی تحمل می‌کند، و بستر حباب میکروسکوپی (عمق ۱/۵-۲/۵ متر) فیلتراسیون عمیقی فراهم می‌آورد.

فیلتر شناوری نرخ ۱۰-۱۵ m/h را با شرایط لامینار و لایه حباب ۸۰-۱۲۰ سانتی متر پشتیبانی می‌کند، که حذف مواد جامد را بیشتر از مخلوط‌سازی اولیه افزایش می‌دهد.

در ترکیب با نانومواد هیدروفوبیک برای فاضلاب نساجی، تولید میکرو حباب‌های ۱۰۰-۲۰ میکرومتر و سیستم دوزینگ دقیق، راندمان ته‌نشینی را به ۳۰ mg/L (از ۳۰۰ mg/L ورودی) می‌رساند و پایداری کف را افزایش می‌دهد.

۵-۱-۳- مزایای اقتصادی و عملیاتی

کاهش حجم تجهیزات و فضای اشغالی: ترکیب شناورسازی با هوای محلول با غشا شار غشا را ۸۸٪ افزایش داده، فشار TMP را به ۰/۳-۰/۱ bar محدود می‌کند و هزینه عملیاتی را ۶۰-۵۰٪ کاهش می‌دهد.

استفاده از کوآگولانت‌های طبیعی یا دوز پایین (مانند ۲۰ mg/L PAC در میکرو حباب، ۶۰ mg/L در سنتی) زمان واکنش را کوتاه‌تر (۱۵ دقیقه) و هزینه مواد شیمیایی را پایین می‌آورد.

تولید لجن شناور قابل استفاده برای بیوگاز (انرژی پاک) و بازیافت نانومواد، که اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد.

در نسل اول، با نرخ جریان پایین (۲-۳ m/h)، راندمان حذف مواد معلق بالا بدون پتوی حبابی ضخیم به دست می‌آید، و هنوز در صنایع کاغذسازی فعال است.

۵-۱-۴- انعطاف‌پذیری در کاربردها

مناسب برای فاضلاب‌های متنوع (شهری، رستورانی، نفتی، نساجی) و حتی پیش‌تصفیه آب دریا قبل از RO، با کاهش گرفتگی غشا و افزایش عمر آن.

در DAF-MBR بدون کواگولانت، بیش از ۷۰٪ CODY، ۸۳٪ TSS و ۶۵٪ TP را در پیش‌تصفیه حذف می‌کند و بار آلی را برای MBR کاهش می‌دهد.

۵-۲- معایب روش‌های شناورسازی با هوای محلول

علی‌رغم مزایا، شناورسازی با هوای محلول چالش‌هایی در طراحی، عملیات و هزینه دارد که عمدتاً از نیاز به کنترل دقیق پارامترها و محدودیت‌های هیدرولیکی ناشی می‌شود:

۵-۲-۱- محدودیت‌های هیدرولیکی و جریان

در نسل اول، نرخ جریان بسیار پایین (کمتر از ۵ m/h) و عدم تشکیل پتوی حبابی ضخیم، اثر فیلتراسیونی را حذف می‌کند و حذف عمدتاً به شفت ورودی وابسته است؛ در انتهای مخزن ممکن است پتوی حبابی وجود نداشته باشد.

نسل دوم نرخ ۷-۵ m/h (حداکثر ۱۰ m/h) دارد، اما جهت جریان ۳۰-۴۵ درجه پایین‌تر از افقی، لایه حباب را نازک (۱۰-۲۰ سانتی متر در انتها) می‌کند و ممکن است برای بارهای بالا ناکافی باشد.

در فیلتر شناوری، نرخ ۱۵-۱۰ m/h محدود به جلوگیری از افت هد سریع فیلتر است، و جریان لامینار شناورسازی را به شرایط آرام محدود می‌کند.

در فاضلاب نفتی، زمان شناورسازی بیش از ۲۰-۱۵ دقیقه باعث تنش برشی و تخریب فلوک‌ها می‌شود، و نسبت هوا به آب بیش از ۱۵٪ راندمان TSS را کاهش می‌دهد.

۵-۲-۲- نیاز به انرژی و تجهیزات پیچیده

اشباع هوا تحت فشار (۵۰۰-۶۰۰ kPa یا ۶۰ psi) و بازپخش ۲۴-۱۱٪ (معمولاً ۲۲-۱۴٪) انرژی قابل توجهی مصرف می‌کند، به ویژه در روش‌های نوین مانند نسل سوم با نرخ ۴۰-۲۵ m/h

در میکروحباب، تولید حباب‌های پایدار (قطر ۱۹/۳۲ μm در ۰/۹ MPa) نیاز به تجهیزات پیشرفته دارد، و بدون بهینه‌سازی اندازه حباب و قطرات روغن، راندمان کاهش می‌یابد.

ترکیب با نانومواد نیاز به سیستم دوزینگ دقیق (پمپ، همزن، دیفیوزر) و کپسول فشارشکن ثبت شده دارد، که پیچیدگی و هزینه اولیه را افزایش می دهد.

در شناورسازی دو مرحله ای، زمان ماند کوتاه (۳ دقیقه) نیاز به توزیع یکنواخت حباب های ۷۰-۳۰ μm و جمع آوری خودکار لجن دارد، که برای مقیاس بزرگ چالش برانگیز است.

۵-۲-۳- حساسیت به شرایط عملیاتی و آلاینده ها

وابستگی شدید به کوآگولانت ها: دوز ناکافی (مانند کمتر از ۱۰ mg/L پلی آلومینیوم سولفات) حذف چربی و TSS را کاهش می دهد، و pH نامناسب (خارج از ۵) راندمان را مختل می کند.

در ترکیب DAF-غشا، بدون پیش تصفیه مناسب، ذرات باقی مانده ممکن است غشا را بگیرد، هرچند این ترکیب گرفتگی را ۸۸٪ کاهش می دهد.

تولید حجم زیاد لجن شناور، که اگرچه برای بیوگاز مفید است، مدیریت آن (جمع آوری و دفع) هزینه بر است.

در DAF-MBR، بدون کوآگولانت، حذف TN و TP (تا ۷۵٪ و ۶۴٪) به شرایط بیولوژیکی وابسته است و ممکن است ناپایدار باشد.

خطر گرفتگی صفحه در نسل سوم وجود ندارد، اما در فیلترهای هیبریدی مانند DAFF، بستر شنی-آنتراسیت نیاز به نگهداری دارد.

۵-۲-۴- محدودیت های اقتصادی و زیست محیطی

هزینه سرمایه گذاری بالا برای تجهیزات فشارشکن، نازل ها و مخازن عمیق (در نسل سوم عمق بیش از طول/عرض).

در کاربردهای صنعتی مانند نساجی، سورفکتانت ها و فلزات سنگین ممکن است پایداری کف را مختل کنند، مگر با نانومواد.

فشار اشباع بیش از ۵۰۰ kPa تأثیر اضافی ندارد و انرژی را هدر می دهد.

۵-۲-۵- جدول خلاصه مزایا و معایب

جدول ۱-۵ مزایا و معایب روش های مرسوم و نوین

معایب کلیدی	مزایا کلیدی	روش
نرخ جریان بسیار پایین ($m/h < 5$)، عدم پتوی حبابی ضخیم و فیلتراسیون ضعیف؛ وابستگی کامل به شفت ورودی	راندمان حذف مواد معلق بالا با نرخ جریان پایین (۲-۳ m/h)؛ مخلوط سازی یکنواخت در شفت ورودی؛ هنوز در صنعت کاغذ فعال	نسل اول (ADKA/Sveen-Pedersen)
نرخ حداکثر $10 m/h$ ؛ لایه حباب نازک در انتها (۱۰-۲۰ cm)، جهت جریان غیرافقی	لایه حباب فیلتراسیونی (۳۰-۵۰ سانتی متر)، نرخ $5-7 m/h$ ؛ حذف بالا در فاضلاب شهری/رستورانی (۷۷-۹۸٪ TSS، ۱۶٪ روغن، ۹۳٪)	نسل دوم
محدودیت افت هد فیلتر؛ جریان عمودی رو به پایین محدودکننده؛ نرخ بیش از ۱۵ m/h خطرناک	ترکیب شناور سازی و فیلترشن؛ نرخ $10-15 m/h$ لامینار؛ لایه حباب $80-120 cm$ برای فیلتراسیون عمیق	فیلتر شناوری
نیاز به صفحه کنترل جریان؛ عمق مخزن زیاد؛ انرژی اشباع بالا	نرخ بالا $25-40 m/h$ (تا ۶۰)؛ بستر حباب $1.5-2.5 m$ بدون گرفتگی؛ فیلتراسیون مداوم	نسل سوم (آشوبناک)
نیاز به فشار $0.9 MPa$ برای حباب کوچک؛ حساس به تطبیق اندازه حباب/روغن	راندمان 98% روغن، 88.9% COD (۱۰-۲۲٪ بالاتر از سنتی)؛ دوز کوآگولانت پایین ($20 mg/L$)، حباب های پایدار $20 \mu m$	میکرو حباب نوین
پیچیدگی دوزینگ و کپسول فشار شکن؛ هزینه نانومواد	میکرو حباب $100-200 \mu m$ ؛ اتصال قوی ذره-حباب؛ ته نشینی به $30 mg/L$ ؛ بازیافت نانومواد	با نانومواد هیدروفوبیک
نیاز به دو واحد؛ توزیع حباب دقیق	حذف $95-90\%$ در مرحله اول + ذرات ریز در دوم؛ نرخ $7.5 L/m^2/s$ با زمان $3 min$	دو مرحله ای
حساس به $pH=5$ و زمان $>15 min$ (تخریب فلوک)؛ نسبت هوا $>15\%$ کاهش راندمان	$>80\%$ حذف روغن TSS/COD با دوز $10 mg/L$ ؛ فشار $300-500 kPa$	بهینه شده برای فاضلاب نفتی
وابستگی به پیش تصفیه؛ انرژی غشا MBR/	حذف $>99\%$ آلاینده ها؛ کاهش 88% گرفتگی غشا؛ هزینه $50-60\%$ کمتر؛ $SS < 1.33 mg/L$	ترکیبی با غشا MBR
تولید حجم زیاد لجن؛ نیاز به مدیریت	کاهش اثرات اقلیمی؛ لجن برای بیوگاز؛ پتانسیل بالا برای پسماند	با کوآگولانت های طبیعی

فصل ششم

نتیجه گیری

با بررسی جامع تاریخچه، مبانی نظری، روش‌های مرسوم و نوین، مطالعات موردی، و مزایا و معایب فرآیند شناورسازی با هوای محلول در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که این فناوری به عنوان یک روش کارآمد و نوآورانه در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری، نقش برجسته‌ای در حذف جامدات معلق و چربی‌ها ایفا می‌کند. از آغاز کاربرد در جداسازی مواد معدنی در قرن نوزدهم تا توسعه آن در صنایع کاغذسازی، نفت و گاز، و غذا در دهه‌های اخیر، این فرآیند تکامل یافته و با ادغام فناوری‌های نوین مانند میکروحباب‌ها، نانومواد هیدروفوبیک، و سیستم‌های دو مرحله‌ای، راندمان حذف آلاینده‌ها را به سطوح بالایی (بیش از ۹۰ درصد برای TSS و چربی‌ها در شرایط بهینه) رسانده است.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که شناورسازی با هوای محلول در مقایسه با روش‌های سنتی مانند ته‌نشینی ثقیلی، مزایای هیدرولیکی بالایی دارد، از جمله نرخ جریان تا ۴۰ متر بر ساعت در نسل سوم سیستم‌ها، که امکان پردازش حجم‌های بزرگ فاضلاب را فراهم می‌سازد. در کاربردهای فاضلاب، این روش به ویژه در حذف چربی‌ها از فاضلاب‌های روغنی (مانند صنایع نفتی و غذایی) مؤثر است، جایی که حباب‌های ریز هوا (۱۰۰-۲۰ میکرومتر) با اتصال به ذرات معلق و چربی‌ها، آنها را به سطح منتقل کرده و جداسازی را تسهیل می‌کنند. مطالعات موردی بررسی‌شده، مانند کاربرد در فاضلاب شهری و صنعتی، تأیید می‌کنند که با تنظیم پارامترهایی نظیر فشار اشباع (۳۰۰-۵۰۰ کیلوپاسکال)، نسبت هوا به جامد (۱۵ درصد یا بیشتر)، و استفاده از کوآگولانت‌های طبیعی، راندمان حذف COD، TSS و چربی‌ها به ۸۰-۹۹ درصد می‌رسد، در حالی که مصرف انرژی (۰/۲۵-۰/۰۵ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب) و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد.

با این حال، چالش‌هایی مانند حساسیت به شرایط عملیاتی (pH، زمان ماند، و اندازه حباب)، پیچیدگی تجهیزات در روش‌های نوین، و تولید لجن اضافی، نیازمند بهینه‌سازی بیشتر است. مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی شناورسازی با هوای محلول، از جمله کاهش اثرات اقلیمی با استفاده از کوآگولانت‌های طبیعی و امکان بازیافت لجن برای تولید بیوگاز، آن را به گزینه‌ای پایدار تبدیل کرده است. در نهایت، این پژوهش پیشنهاد می‌کند که تحقیقات آتی بر ادغام شناورسازی با هوای محلول با فناوری‌های ترکیبی مانند غشاهای MBR و هوش مصنوعی برای کنترل پارامترها تمرکز کند، تا کارایی آن در تصفیه فاضلاب‌های پیچیده افزایش یابد و به اهداف توسعه پایدار کمک نماید. این یافته‌ها نه تنها مبنایی برای طراحی سیستم‌های تصفیه پیشرفته فراهم می‌آورند، بلکه بر لزوم سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین برای مدیریت منابع آب تأکید دارند.

منابع

- Ali, S., & Aziz, S. Q. (2023). Dissolved air flotation (DAF) Operational Parameters and Limitations for Wastewaters Treatment with Cost Study. *Reciklaza i Odrzivi Razvoj*, 16, 91–97. <https://doi.org/10.5937/ror2301091A>
- Al-Zoubi, H., Althyabat, S., & Alkhatib, L. (2009). A hybrid flotation-membrane process for wastewater treatment: An overview. *Desalination and Water Treatment - DESALIN WATER TREAT*, 7, 60–70. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.726>
- Arnold, S. R., Grubb, T. P., & Harvey, P. J. (1995). Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design. *Water Science and Technology*, 31(3–4), 327–340. <https://doi.org/10.2166/wst.1995.0541>
- Chung, W., & Young, S. (2013). Evaluation of a chemical dissolved air flotation system for the treatment of restaurant dishwasher effluent. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(12), 1164–1172. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0357>
- Crossley, I. A., & Valade, M. T. (2006). A review of the technological developments of dissolved air flotation. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 55(7–8), 479–491. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.057>
- Dlangamandla, C., Ntwampe, S. K. O., & Basitere, M. (2018). A bioflocculant-supported dissolved air flotation system for the removal of suspended solids, lipids and protein matter from poultry slaughterhouse wastewater. *Water Science and Technology*, 78(2), 452–458. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.324>
- Dos Santos Pereira, M., Borges, A., Muniz, G., Heleno, F., & Faroni, L. (2020). DOF/DAF comparison for the treatment of milk industry wastewater. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 15. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2553>
- Edzwald, J. K. (2007). Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 56(6–7), 399–409. <https://doi.org/10.2166/aqua.2007.013>
- Edzwald, James., & Haarhoff, Johannes. (2011). *Dissolved Air Flotation For Water Clarification*. McGraw-Hill Publishing.
- Haarhoff, J. (2008). Dissolved air flotation: progress and prospects for drinking water treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 57(8), 555–567. <https://doi.org/10.2166/aqua.2008.046b>
- Han, M., Kim, T., & Kwak, D. (2009). Measurement of bubble bed depth in dissolved air flotation using a particle counter. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 58(1), 57–63. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.110>
- Kaltchev, R. (2024). *Springer Water Dissolved Air Flotation Equipment, Best Practice and Applications*.

- Kim, Y., Choi, D., Cui, M., Lee, J., Kim, B., Park, K., Jung, H., & Lee, B. (2014). Dissolved air flotation separation for pretreatment of membrane bioreactor in domestic wastewater treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 64(2), 186–193. <https://doi.org/10.2166/aqua.2014.003>
- Kiuri, H. J. (2001). Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). *Water Science and Technology*, 43(8), 1–7. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0450>
- Koirala, N. (2024). *IMPROVED OIL/WATER SEPARATION USING NANO/MICRO BUBBLE GAS FLOTATION TECHNOLOGY*.
- Koivunen, J., & Heinonen-Tanski, H. (2008). DISSOLVED AIR FLOTATION (DAF) FOR PRIMARY AND TERTIARY TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATERS. *Environmental Technology*, 29(1), 101–109. <https://doi.org/10.1080/09593330802009410>
- Kwak, D.-H., & Kim, M.-S. (2013). Feasibility of carbon dioxide bubbles as a collector in flotation process for water treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 62(1), 52–65. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.156>
- Legarda Bermúdez, G., Gaviria López, C., & Guarín Arenas, F. (2024). Evaluation of a hydrodynamic cavitation-type bubble generator in a prototype bench-scale flotation unit for poultry processing wastewater treatment. *Environmental Technology*, 45(7), 1436–1448. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2143295>
- Moga, I. C., Matache, M., & Covaliu Mierla, C. I. (2019). Advanced wastewater treatment stage for textile industry. *Industria Textila*, 69, 478–482. <https://doi.org/10.35530/IT.069.06.1501>
- Muñoz, J., Muñoz, E., & Florez Marulanda, J. (2021). Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Uses in Wastewater Treatment. *TecnoLógicas*, 24, e2111. <https://doi.org/10.22430/22565337.2111>
- Paredes-Quiroz, L. R., Ccasani-Dávalos, H., Bejarano-Luján, D. L., Ccopa-Flores, R. M., & Lozano, F. (2025). Efficiency of a DAF System in Removing Organic Matter and Lipid Compounds from Municipal Effluent. *Water (Switzerland)*, 17(24). <https://doi.org/10.3390/w17243474>
- Shen, W., Mukherjee, D., Koirala, N., Hu, G., Lee, K., Zhao, M., & Li, J. (2022). Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: a review. In *Environmental Reviews* (Vol. 30, Issue 3, pp. 359–379). Canadian Science Publishing. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0127>
- Tetteh, E., & Rathilal, S. (2018). *INVESTIGATING DISSOLVED AIR FLOTATION FACTORS FOR OIL REFINERY WASTEWATER TREATMENT*.
- Virpiranta, H., Okyere Abayie, S., Mäkikangas, J., Puirava, M., Koivula, K., & Leiviskä, T. (2023). Treatment of fish processing plant wastewater using dissolved air flotation and

pilot-scale biochar column filtration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110853>

Wang, L. K., Shammass, N. K., Selke, W. A., & Aulenbach, D. B. (n.d.). *Flotation Technology (Handbook of Environmental Engineering, Volume 12)*. <http://www.springer.com/series/7645>

Zheng, T., Wang, Q., Shi, Z., Huang, P., Li, J., Zhang, J., & Wang, J. (2015). Separation of Pollutants from Oil-Containing Restaurant Wastewater by Novel Microbubble Air Flotation and Traditional Dissolved Air Flotation. *Separation Science and Technology*, 50, 150707113117003. <https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1062396>