

چکیده

حذف کدورت نه تنها از جهت تولید آب زلال دارای اهمیت است، بلکه با حذف میکروارگانیزم های متصل به این ذرات باعث از بین رفتن بسیاری از پاتوژن ها می شود. در صنایع تصفیه آب و فاضلاب، انعقاد یکی از پرکاربردترین روش ها برای حذف ذرات معلق و کلوئیدی است و تاکنون منعقدکننده های مختلفی برای این منظور تولید شده و مورد استفاده قرار گرفته اند که از آن جمله می توان به منعقدکننده های معدنی و منعقدکننده های پلیمری اشاره نمود. این نوع منعقدکننده ها به سبب تولید زیاد و کارکرد آسان در مقیاس وسیع مورد استفاده قرار گرفته اند، اما با توجه به هزینه بالای واردات این مواد و آشکار شدن مشکلات بالقوه ناشی از استفاده این منعقدکننده ها بر روی سلامتی انسان، تلاش های بسیاری به منظور جایگزینی این مواد با مواد طبیعی انجام گرفته است. به دلیل وجود فلزات مضر از جمله آلومینیوم و ناخالصی هایی همچون منومرهای آلوده و فلزات سنگین در این نوع منعقدکننده ها، اخیراً استفاده از مواد آلی طبیعی مورد توجه قرار گرفته است.

هدف اصلی این تحقیق مطالعه عملکرد نشاسته به عنوان منعقدکننده همراه با بنتونیت به عنوان کمک منعقدکننده در حذف کدورت آب بود. در این مطالعه از سه نوع نشاسته آزمایشگاهی و صنعتی درجه ۱ و درجه ۲ و دو نوع کدورت طبیعی رودخانه زاینده رود و کدورت مصنوعی (کائولین) استفاده شد. به منظور بهینه سازی و بررسی عوامل مختلف بر روی فرایند انعقاد، چهار عامل pH، غلظت منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده و کدورت اولیه در راکتور ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفتند. به جهت بررسی سهم هر یک از عوامل مذکور از روش طراحی آزمایش های فاکتوریل کامل استفاده شد و با استفاده از این روش شرایط بهینه برای حذف کدورت تعیین شد. نتایج کلی بدست آمده از آزمایش ها نشان داد که در شرایط بهینه، کارایی حذف کدورت مصنوعی به کمک نشاسته و بنتونیت بیش از ۸۴٪ می باشد. همچنین آنالیز واریانس نشان داد که تمامی پارامترهای مورد مطالعه، در حذف کدورت معنادارند. با توجه به آنالیز واریانس نمونه ها مشاهده شد که درصد مشارکت خطا در تمامی آزمایش ها ۱۳٪ است. بررسی اثرات متقابل پارامترها نشان داد که در این نمونه اثر متقابل pH در کدورت اولیه بیشترین اهمیت را داراست. مطالعات نشان داد که از بین چهار مکانیزم موجود در فرآیند انعقاد، احتمالاً تنها دو مکانیزم ایجاد پل شیمیایی بین ذرات و مکانیزم جاروب کردن در فرآیند انعقاد توسط نشاسته و بنتونیت موثرند. آزمایش جار در دماهای مختلف نشان داد که راندمان حذف توسط نشاسته و بنتونیت وابسته به دمای آب خام می باشد. همچنین آزمایشات نشان داد که در انعقاد توسط نشاسته و بنتونیت فرایندهای لخته سازی و ته نشینی در زمان بلندتری نسبت به منعقدکننده های متعارف تکمیل می گردد. به عنوان نتیجه کلی تحقیق، می توان چنین اظهار داشت که نشاسته و بنتونیت قادر به حذف و یا کاهش غلظت ذرات کلوئیدی از محیط های آبی می باشد و می تواند به عنوان گزینه ای ارزان، به جای منعقدکننده های متداول در تصفیه مقدماتی فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: کدورت، انعقاد و لخته سازی، نشاسته، بنتونیت، فاکتوریل کامل

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات

یکی از فاکتورهایی که در تصفیه آب و فاضلاب همواره به آن توجه شده است، حذف ذرات معلق می‌باشد. وجود این ذرات باعث عوارض نامطلوبی مانند رنگ، طعم، رشد میکروبی، کاهش زمانی فاصله بین دو شستشوی فیلترها، ازدیاد مصرف مواد اکسیدکننده و گنگلظتدا و ایجاد فرآورده‌های جانبی خطرناک در فرایندهای اکسیداسیون و گنگلظتدایی می‌شود. این ذرات را می‌توان توسط فرایندهای انعقاد، لخته سازی، ته نشینی و فیلتراسیون از آب حذف نمود. تاکنون در فرایند انعقاد، منعقدکننده‌های معدنی همچون نمک‌های آهن و آلومینیوم به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این منعقدکننده‌ها در تصفیه‌خانه آب باعث ایجاد عوارض نامطلوبی در آب می‌شود که در ذیل می‌آید [۱].

استفاده از نمک‌های آهن در فرآیند انعقاد باعث تغییر pH آب می‌گردد، به این دلیل در بعضی شرایط لازم است pH آب بعد از فرآیند انعقاد با افزودن مقداری آهک به آب تنظیم شود. از طرفی راندمان حذف کدورت توسط نمک‌های آهن به شدت وابسته به دما بوده و راندمان حذف کدورت توسط این نمک‌ها در دماهای پائین (زیر ۱۰ درجه سانتیگراد) به شدت کاهش می‌یابد. استفاده از نمک‌های آلومینیوم نظیر آلوم و پلی‌آلومینیوم کلراید در آب باعث تغییر چندانی در pH آب نمی‌شود، و پلی‌آلومینیوم کلراید در مقایسه با نمک‌های آهن حساسیت کمتری

در برابر تغییرات دمای آب دارد. استفاده از نمک‌های آلومینیوم در آب می‌تواند باعث افزایش میزان آلومینیوم موجود در آب تصفیه شده شود. افزایش میزان آلومینیوم در بدن انسان باعث بیماری آلزایمر می‌شود. هر چند تحقیقات سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۰۴ نشان داد رابطه قطعی بین ابتلا به بیماری آلزایمر و وجود آلومینیوم در آب آشامیدنی وجود ندارد، ولی به دلیل نگرانی‌های موجود میزان مجاز (۰/۵ میلی گرم در لیتر) برای غلظت این فلز در آب تعیین گردید همچنین وجود ناخالصی‌هایی همچون فلزات سنگین و منومرهای آلوده در پلیمرهای مصنوعی باعث بروز بیماری‌های مختلفی می‌شود [۲].

نگرانیهایی موجود در زمینه مصرف منعقدکننده‌های معدنی در آب باعث شد، اخیراً استفاده از مواد آلی طبیعی، همچون کیتوسان و نشاسته به عنوان منعقدکننده در صنعت تصفیه آب مورد توجه بیشتر قرار گیرد. این نوع از منعقدکننده‌ها به دلیل کاهش میزان مصرف منعقدکننده و نیز خوراکی بودن آنها قسمت عمده‌ای از نگرانیهایی بهداشتی مربوط به منعقدکننده‌های معدنی را برطرف می‌کنند. تاکنون تحقیقات متنوعی در زمینه مصرف مواد آلی طبیعی به عنوان کمک‌منعقدکننده و منعقدکننده صورت گرفته است [۳].

در زمینه مصرف نشاسته به عنوان کمک‌منعقدکننده در صنایع تصفیه آب و فاضلاب مطالعات گوناگونی صورت گرفته است. مطالعات انجام شده در زمینه مصرف نشاسته به عنوان کمک‌منعقدکننده جهت حذف ذرات معلق کائولینیت نشان می‌دهد راندمان نشاسته در حذف ذرات کائولینیت از آب به شدت وابسته منعقدکننده مصرفی می‌باشد. در مجموع از تحقیقات موجود نتیجه گیری می‌شود که عملکرد نشاسته به عنوان کمک‌منعقدکننده در فرایند انعقاد به میزان غلظت مصرفی منعقدکننده در آب وابسته می‌باشد. درمورد کاربرد نشاسته به عنوان منعقدکننده در تصفیه آب شهری نکاتی مطرح است که تحقیقات چندانی در مورد آنها صورت نگرفته است.

۱-۲- اهداف مطالعه

در این تحقیق سعی شده است کاربرد نشاسته به عنوان منعقدکننده در آب به همراه بنتونیت به عنوان کمک‌منعقدکننده مورد بررسی قرار گرفته و با سایر منعقدکننده‌های متعارف مقایسه گردد. به این منظور کارآیی آن در حذف ذرات معلق کلوئیدی در چندین نمونه با کدورت ساختگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و بر اساس مباحث مطرح شده طرح آزمایشات مشخص گردیده است. مباحث مطرح شده که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است به قرار زیر است.

- بررسی عملکرد نشاسته به عنوان منعقدکننده در تصفیه آب.

- بررسی عملکرد بنتونیت به عنوان کمک‌منعقدکننده در تصفیه آب.

- مقایسه عملکرد نشاسته و بنتونیت با پلی آلومینیوم کلراید.

- بررسی پارامترهای موثر بر راندمان حذف کدورت همچون pH، کدورت اولیه نمونه آب، سرعت اختلاط سریع و لخته سازی و زمان فرآیند انعقاد، لخته سازی و ته نشینی.

- بررسی عملکرد خلوص نشاسته به عنوان منعقد کننده در تصفیه آب.

۱-۳- ساماندهی پایان نامه

بر اساس تحقیق انجام شده ساختار زیر جهت ارائه مطالب در پایان نامه مد نظر قرار گرفت.

در فصل اول مقدمه ای از دلایل انجام پروژه آورده شده و اهداف اصلی ارائه می شود. فصل دوم به بیان کلیاتی در مورد مفهوم ذرات کلوئیدی، پیشینه استفاده از منعقد کننده ها، مکانیزم های انعقاد و عوامل موثر در این فرآیند پرداخته می شود. در فصل سوم به خواص و کاربردهای نشاسته اشاره می شود. نتایج مطالعات انجام شده توسط دیگر محققین در زمینه های گوناگون کاربرد نشاسته و بنتونیت در صنعت تصفیه آب در فصل چهارم ارائه می گردد. در فصل پنجم مواد و روش های آزمایش ها ارائه می شود. نتایج به دست آمده از این آزمایش ها در فصل ششم ارائه و در مورد آن ها بحث می شود. در فصل هفتم نتایج حاصل شده از این تحقیق و پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه این مبحث ارائه می گردد. در بخش آخر هم مراجع مختلف مورد استفاده به طور کامل ارائه شده اند.

فصل دوم

انعقاد و لخته سازی

۲-۱- تعریف انعقاد و لخته‌سازی^۱

آب‌های طبیعی سطحی معمولاً حاوی ذرات معلق آلی و معدنی می‌باشد. ذرات معلق معدنی ناشی از فرسایش^۲ طبیعی خاک شامل رس، لای^۳، اکسیدهای معدنی و ذرات معلق آلی شامل ویروس‌ها، باکتری‌ها، جلبک‌ها و کیست‌ها می‌باشد. به طور کلی مواد معلق و محلول آلی موجود در آب‌های طبیعی را به عنوان مواد آلی طبیعی^۴ می‌شناسیم. مواد معلق آلی در آب باعث مشکلات زیر می‌شوند [۴ و ۵].

۱- کاهش شفافیت آب.

۲- بیماری‌زا بودن برخی از این ذرات مانند ویروس‌ها، باکتری‌ها و پروتوزواها.

۳- سمی بودن برخی از این ذرات مانند برخی مواد آلی صنعتی.

۴- جذب مواد سمی همچون فلزات و مواد آلی بر روی این ذرات.

به منظور کاهش غلظت مواد آلی در آب از فرآیند انعقاد و فیلتراسیون استفاده می‌شود. فرآیند انعقاد فرآیندی

است که در طی آن ذرات معلق و کلوئیدی در آب با اضافه نمودن مواد شیمیایی، ناپایدار و به هم پیوسته شده و با

¹ Flocculation

² Erosion

³ Silt

⁴ Natural Organic Mater (NOM)

ته نشین شدن از آب جدا می شوند. در تصفیه خانه های آب این فرآیند در طی سه واحد مجزای ۱- اختلاط سریع ۲- لخته سازی ۳- ته نشینی صورت می گیرد [۶].

مراجع مختلف تعاریف مختلفی برای فرایندهای انعقاد و لخته سازی ارائه داده اند. برخی از مراجع فرایند انجام شده در مراحل اختلاط سریع، لخته سازی و ته نشینی را به ترتیب معادل انعقاد، لخته سازی و ته نشینی در نظر گرفته اند. سایر مراجع فرایندهای انعقاد و لخته سازی را در نوع واکنش انجام شده در این فرایندها در نظر گرفته اند. در این تعریف به فرآیندی که در آن ذرات معلق و کلوئیدی موجود در آب ناپایدار می شوند، انعقاد به فرآیندی که طی آن ذرات ناپایدار در تماس با یکدیگر تشکیل لخته می دهند، لخته سازی گفته می شود. به عبارت دیگر انعقاد فرآیندی است که در آن مواد شیمیایی تقویت کننده و ناپایدارکننده به آب اضافه می شود تا سبب ناپایداری ذرات معلق و کلوئیدی در آب شوند. لخته سازی فرآیندی است که در آن کلوئیدهای ناپایدار در معرض تماس با ذرات معلق موجود در آب قرار گرفته و تشکیل لخته می دهند، که می توان آنها را بوسیله فرایندهای ته نشینی و فیلتراسیون حذف نمود. برای انجام فرایند انعقاد به زمان کم (حدود ۱ تا ۲ دقیقه) نیاز است در صورتی که برای فرآیند لخته سازی زمان بیشتری (حدود ۵ تا ۱۵ دقیقه) مورد نیاز است [۱ و ۶].

در فرآیند انعقاد از مواد شیمیایی معدنی مختلفی نظیر سولفات آلومینیوم، کلرید فریک و فریک سولفات استفاده می شود. این مواد به سرعت در آب هیدرولیز شده و رسوب غیرمحلول ایجاد می کنند. رسوب غیر محلول حاصل سبب ناپایدار شدن ذرات معلق می شود. پلیمرهای مصنوعی و طبیعی نیز به منظور ناپایدار کردن ذرات به کار می روند که با مکانیزم های مختلفی به ذرات اجازه لخته شدن می دهند. از آنجا که واکنشهای موثر در انعقاد (مکانیزم های انعقاد) بسیار متنوع و پیچیده است و تعداد واکنش های آن قابل پیش بینی نیست، تنها واکنش های ساده آن در کتابهای موجود مورد بحث قرار می گیرد [۵]. مکانیزم های ناپایدار شدن ذرات معلق عبارتند از ۱- تراکم لایه دو تایی ۲- جذب سطحی و خنثی سازی الکتریکی ۳- به تله انداختن ذرات کلوئیدی ۴- جذب و پل زدن بین ذرات [۶].

در تعریف اول از انعقاد و لخته سازی می توان انجام واکنش های فوق (مکانیزم های ناپایدار کردن ذرات) را در فرآیند انعقاد در نظر گرفت، البته باید توجه داشت که این واکنش ها در مرحله لخته سازی نیز انجام می شوند. اما در تعریف دوم می توان مکانیزم های تراکم لایه دو تایی و همچنین جذب سطحی و خنثی سازی مربوط به مرحله انعقاد و مکانیزم های به تله انداختن ذرات کلوئیدی و جذب و پل زدن بین ذرات مربوط به مرحله لخته سازی دانست. در مجموع مشاهدات نشان می دهد در هیچکدام از تعاریف بیان شده نمی توان مرزی برای محل وقوع این واکنش ها در نظر گرفت زیرا بسته به نوع ماده شیمیایی مصرف شده محل انجام این واکنش ها متغیر است. به عنوان نمونه برای منعقدکننده های معدنی ناپایدارسازی ذرات در مرحله اختلاط سریع و تشکیل لخته ها در مرحله لخته سازی اتفاق می -

افتد، در صورتی که در منعقدکننده‌های پلیمری ناپایدارسازی ذرات و قسمت عمده‌ای از تشکیل لخته‌ها در فرآیند اختلاط سریع اتفاق می‌افتد [۶].

۲-۲- تحلیل انعقاد و لخته سازی

قبل از بررسی واکنش‌های مرتبط با فرآیند انعقاد لازم است خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات معلق موجود در آب مورد بررسی قرار گیرد.

۲-۲-۱- خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات معلق در آب

رفتار ذرات کلوئیدی موجود در آب به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این ذرات وابسته است. در این بخش به بررسی برخی از خصوصیات مؤثر آن‌ها در فرآیند انعقاد می‌پردازیم.

• اندازه ذرات

قطر ذرات کلوئیدی موجود در آب بین $1-0.001 \mu m$ می‌باشد. ذرات معلق به ذراتی گفته می‌شود که از $1 \mu m$ بزرگتر باشد و به ذرات کوچکتر از $1 \mu m$ ذرات کلوئیدی گفته می‌شود. این مرز به صورت تئوریک در نظر گرفته شده و در عمل مشخص نمودن مرز ذرات کلوئیدی از ذرات معلق بسیار دشوار است. در جدول ۱-۲ قطر ذرات معلق موجود در آب و زمان مورد نیاز برای ته نشینی آنها آمده است [۷].

• مقدار و توزیع ذرات

تعداد ذرات در آب خام برحسب محل، زمان و شرایط نمونه برداری بین $100/ml$ تا $1000/ml$ متغیر است. توزیع اندازه ذرات بسته به پارامترهای مختلفی بیان می‌شود که از آن جمله می‌توان به تعداد، جرم، قطر، سطح و حجم ذرات اشاره نمود. در صنعت آب عموماً توزیع ذرات بوسیله دستگاه شمارشگر سائز ذرات^۱ مشخص می‌شود [۷].

^۱ Particles Size Counter

جدول ۲-۱- سرعت طبیعی ته نشینی ذرات موجود در آب [۷]

نوع ذرات	قطر ذرات (میلیمتر)	زمان لازم برای ته نشینی در عمق ۱ فوت
ذرات قابل ته نشینی		
سنگ ریزه	۱۰	۰/۳ ثانیه
شن درشت	۱	۳ ثانیه
شن ریز	۰/۱	۳۸ ثانیه
گل و لای	۰/۰۱	۳۳ دقیقه
ذرات غیر قابل ته نشینی		
باکتری	۰/۰۰۱	۵۵ ساعت
رنگ	۰/۰۰۰۱	۲۳۰ روز
ذرات کلوئیدی	۰/۰۰۰۰۱	۶/۳ سال
ذرات کلوئیدی	۰/۰۰۰۰۰۱	حداقل ۶۳ سال

• شکل ذرات

شکل ذرات را می توان به دسته های کروی، شبه کروی، بیضوی، میله ای، دیسکی و سوزنی تقسیم نمود. در عمل شکل ذرات بسیار متنوع بوده و بر روند انعقاد و لخته سازی تاثیر گذار است [۸].

۲-۲-۲- منابع مختلف بار ذرات

عامل اصلی خواص الکتریکی مواد معلق موجود در آب، بار سطحی آنها می باشد که باعث می شوند ذرات برای مدت زیادی به صورت معلق در آب باقی بمانند.

اغلب ذرات، بار را از منابع مختلفی بدست می آورند که آنها را می توان به چهار گروه زیر تقسیم نمود [۱].

۱. جانشینی هم گروه

عموماً در مراحل زمین شناسی فلزات موجود در اکسیدهای معدنی می توانند با اتم های فلزی با ظرفیتهای کمتری جانشین شوند و باعث ایجاد بار منفی در کریستال شوند. به عنوان مثال فلز آلومینیوم می تواند جانشین سیلیس در خاک رس شده و سبب شود تا ذره ای دارای بار منفی گردد.

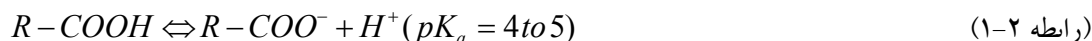
۲. نقص ساختاری

در رس و برخی دیگر از کانیها، شکستن پیوندها بر روی لبه های کریستال باعث ایجاد بار منفی بر روی سطح ذره می شود.

۳. ترجیح در جذب یونهای خاص

در برخی ذرات، مواد آلی بر روی سطح ذره جذب شده و سبب تشکیل ماکرومولکولی می‌شود که ماکرومولکول حاصل در pH بالا با آزاد کردن یون هیدروژن بار منفی پیدا می‌کند [۱].

به عنوان مثال



۴. یونیزه شدن گروه‌های غیر آلی روی سطح ذرات

در ذرات سیلیسی دارای گروه‌های هیدروکسل بار ذره تابع pH است به طوری که با افزایش pH این ذرات می‌توانند یک پروتون از دست بدهند [۱].



همانگونه که مشاهده می‌شود سیلیس در $pH = 2$ بدون بار می‌باشد. بار این ذره در pH های بالاتر منفی و در pH های پائین تر مثبت می‌باشد. در ذرات آلومینیوم این تغییر وضعیت در $pH = 9$ رخ می‌دهد. به این pH، نقطه بار صفر^۱ ذرات گفته می‌شود. در pH بالاتر از ZPC بار سطحی ذرات منفی و در pH پائین تر از آن بار سطحی ذرات مثبت می‌باشد. نقطه^۲ بار صفر برخی از ذرات در جدول ۲-۲ آمده است. باید توجه داشت اعداد ارائه شده در جدول برای حالتی درست است که مقاومت یونی^۲ محلول کم باشد [۱].

^۱ Zero point of charge (ZPC)

^۲ Ionic strength

جدول ۲-۲- نقطه بار صفر ذرات موجود در آب [۱]

	Type of Particles	Zero Point of Charge (pH_{ZPC})
Inorganic	$Al(OH)_3$	7.5-8.5
	Al_2O_3	9.1
	CuO_3	9.5
	$Fe(OH)_3$	8.5
	MgO	12.4
	MnO_2	2-4.5
	SiO_2	3.3-4.6
	Kaolinite	2.5
	Montmorilloite	10-12
	Chrysotile	5-6
	Crocidolite	8-9
	$CaCO_3$	6-7
	$Ca_5(PO_4)_3OH$	3
$FePO_4$ $AlPO_4$	4	
Organic	Algae	3-5
	Bacteria	2-4
	Humic acid	3
	Oil Droplets	2-5

۲-۳- تئوری لایه الکتریکی دوتایی

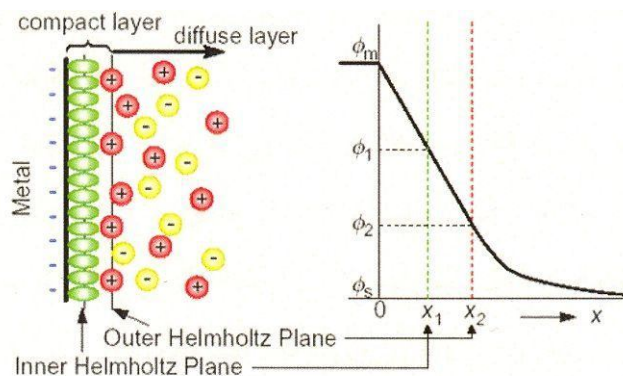
به منظور بررسی رفتار ذره در آب تئوریهای مختلفی ارائه گردیده است. تئوری لایه دوتایی اولین بار توسط هلمولتز^۱ بیان گردید. در این تئوری اهمیت ویژه‌ای برای لایه‌های الکتریکی اطراف ذره در نظر گرفته شده است. براساس این تئوری یون‌های دارای بار مخالف با بار ذرات، روی سطح ذرات جمع می‌شوند، در این حالت پیوند محکمی بین لایه باردار و ذره ایجاد می‌شود که به آن لایه ثابت جذب می‌گویند. این لایه که ناشی از نیروی جاذبه الکترواستاتیکی است ضخامتی در حدود ۵ آنگستروم دارد و به نام لایه هلمولتز^۲ و یا لایه استرن^۳ شناخته می‌شود (شکل ۲-۱). دورتر از لایه استرن، میدان مغناطیسی ناشی از بار منفی، کاتیون‌ها را جذب و آنیون‌ها را دفع می‌کند و سبب حرکت آنها می‌شود به طوری که آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر اثر دیفیوژن حرکت کرده و این پدیده آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا پتانسیل الکتریکی از بین برود و شرایط خنثی پدید آید. به فاصله میان لایه هلمولتز و محلول در شرایط

¹ Helmholtz

² Helmholtz layer

³ Stern layer

خنثی لایه پخش^۱ گفته می‌شود. بسته به خصوصیات محلول، ضخامت این لایه می‌تواند تا ۳۰۰ آنگستروم باشد. به دلیل تشابه این مدل و مدل اولیه ارائه شده توسط Helmholtz-Perrin و نیز Gouy-Chapman، گاهی مدل لایه دوتایی، Gouy-Chapman نیز نامیده می‌شود. ذرات در آب بر اثر پدیده‌های ۱- حرکت ذرات در اثر میدان الکتریکی، ۲- حرکت ذرات در اثر الکتریسیته ساکن، ۳- پتانسیل ته‌نشینی و ۴- پتانسیل جاری شدن ذرات جابجا می‌شوند که به مجموع این پدیده‌ها پدیده الکتروستاتیک گفته می‌شود [۱].



شکل ۲-۱- فضای اطراف ذره باردار [۱]

هنگامی که ذره‌ای با بار منفی بین دو الکتروود مثبت و منفی قرار گیرد به سمت الکتروود مثبت حرکت می‌کند که به عامل این حرکت Electrophoresis گفته می‌شود. بر اثر حرکت ذره در آب مقداری از آب و ذرات باردار همراه با حرکت ذره جابه‌جا می‌شوند این حرکت باعث ایجاد صفحه‌ای اصطکاکی می‌شود، این سطح اصطکاکی که درون لایه پخش واقع است دارای پتانسیلی نسبت به محلول در سایر نقاط است که به آن پتانسیل زتا می‌گویند. پتانسیل زتا توسط روابط ۲-۳ و ۲-۴ تعریف می‌شود [۹].

$$Z = \frac{4\pi qy}{D} \quad (\text{رابطه ۲-۳})$$

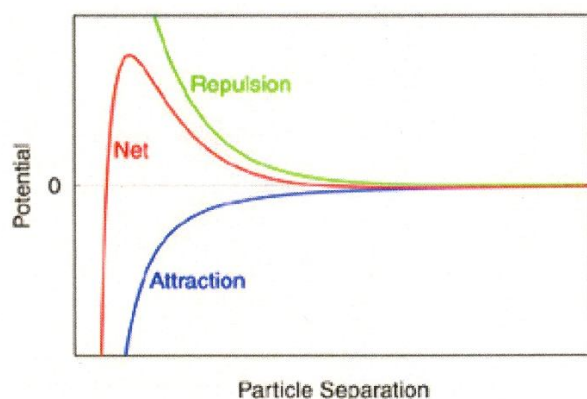
که در آن Z پتانسیل زتا برحسب mV ، q معرف بار ذره، y معادل ضخامت منطقه‌ای است که تحت تاثیر بار ذره قرار دارد و D ثابت دی‌الکتریک مایع است.

$$Z = \frac{v^{\circ} k_z \mu}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (\text{رابطه ۲-۴})$$

^۱ Diffused layer

در رابطه فوق Z پتانسیل زتا برحسب mV ، v° قابلیت حرکت الکتریکی برحسب $\mu m/s$ یا V/cm ، k_z ثابتی در حدود $4p$ تا $6p$ ، ϵ_0 ثابت دی الکتریک در خلا و ϵ ثابت دی الکتریک نسبی بر حسب C^2/j می-باشد.

پایداری ذرات در آبهای طبیعی ناشی از تعادل میان دو نیروی دافعه الکترواستاتیکی و نیروی جاذبه‌ی جرمی است. نیروی دافعه الکترواستاتیکی همانگونه که بحث گردید ناشی از بار منفی روی سطح ذرات بوده و بزرگی آن به میزان بار ذره و خواص محلول بستگی دارد. نیروی جاذبه جرمی که به نام واندروالس شناخته می‌شود، در اثر عوامل مختلف مغناطیسی و الکتریکی هنگامیکه دو ذره نزدیک یکدیگر قرار گیرند ایجاد می‌شود. در واقع این نیرو بر اثر الکترون در اتم‌های ذره بوجود می‌آید. این نیرو هنگامیکه الکترون‌ها دو اتم هم جهت گردش کنند، نیروی قابل توجهی می‌شود. بزرگی این نیرو بستگی به قابلیت پلاریزه شدن ذرات دارد. برای بررسی انعقاد لازم است رفتار دو ذره باردار در هنگام نزدیک شدن به هم مورد ارزیابی قرار گیرد. بررسی رفتار دو ذره باردار در کنار یکدیگر، اولین بار توسط Derjaguin (۱۹۴۱) انجام گرفت و سپس توسط Landau (۱۹۴۱) توسعه یافت و مطالعات تکمیلی در این زمینه توسط Verwey و Overbeek (۱۹۴۸) صورت گرفت. نتایج مطالعه رفتار ذرات باردار در مجاورت یکدیگر با نام DVLO مخفف نام محققان آن نامیده شد. در تحقیقات انجام شده توسط این محققان ذرات باردار توسط صفحات مسطح با بار مشابه مدل سازی شده است. نیروها در این مدل نیروی دافع الکتریکی و نیروی جاذبه واندروالس در نظر گرفته شد. در شکل ۲-۲ نیروی جاذبه، دافعه و برآیند نیروها نمایش داده شده است [۱].



شکل ۲-۲- برآیند نیروهای بین دو ذره بر حسب فاصله میان ذرات [۱]

۲-۲-۴- مکانیزم‌های مختلف انعقاد

اکنون با توجه به حرکت ذرات در محیط‌های آبی رقیق به توصیف عوامل فیزیکی و شیمیایی انعقاد می‌پردازیم. همانگونه که اشاره گردید برای عمل انعقاد لازم است به گونه‌ای بر نیروی دافعه میان ذرات غلبه شود تا ذرات به یکدیگر نزدیک شده و لخته‌های قابل ترسیب تشکیل دهند. این امر بر اثر پدیده‌های زیر امکان پذیر است.

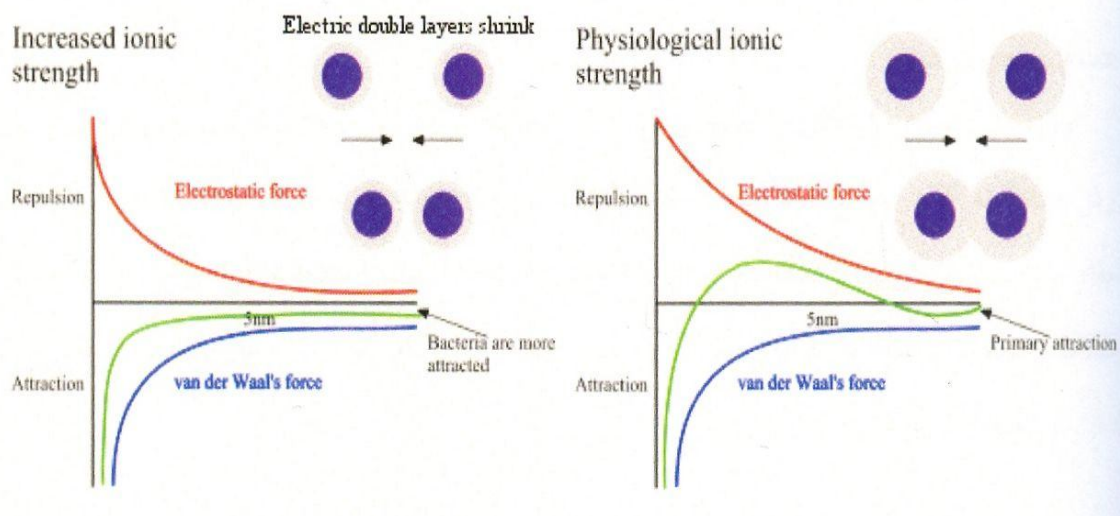
تراکم لایه دوتایی

هنگامیکه غلظت ذرات یونی موجود در آب، یا به عبارتی مقاومت یونی محلول افزایش می‌یابد، فاصله ذرات کاهش می‌یابد. می‌توان گفت دامنه لایه پخش کاهش می‌یابد و پتانسیل زتا کاهش می‌یابد. در جدول ۲-۳ تاثیر افزایش غلظت یونی بر ضخامت لایه پخش نمایش داده شده است. در این جدول I/K معرف ضخامت لایه دوتایی برحسب آنگستروم می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت یونی از 0.001 مولار به 0.9 مولار ضخامت لایه دوتایی از 96.2 آنگستروم به 3.2 آنگستروم می‌رسد. در شکل ۲-۳ تاثیر غلظت یونی در نیروی برآیند بین ذرات نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در اثر افزایش قدرت یونی ضخامت لایه دوتایی کاهش یافته در نتیجه نیروهای دافعه کاهش می‌یابد و برآیند نیروها تغییر می‌کند [۱].

در صورتی که انعقاد توسط این پدیده انجام شود امکان ایجاد بار معکوس روی ذرات و پایداری مجدد آنها وجود ندارد، همچنین رابطه استوکیومتری بین میزان افزوده شدن غلظت بارهای اضافه شده به محلول و ذرات رسوب داده شده برقرار نیست [۳].

جدول ۲-۳- اندازه لایه دوتایی الکتریکی در برابر غلظت مواد [۱]

$C (mol / L)$	$K (cm)$	$I/K (A^\circ)$
0.001	1.4×10^6	96.2
0.004	2.8×10^6	48.1
0.009	3.12×10^6	32.1
0.01	3.29×10^6	30.4
0.04	5.57×10^6	15.2
0.09	9.86×10^6	10.1
0.1	1.04×10^7	9.6
0.4	2.08×10^7	4.8
0.9	3.12×10^7	3.2



شکل ۲-۳- تاثیر غلظت یونی در نیروی برآیند بین ذرات [۱]

جذب سطحی و خشی سازی الکتریکی

بر اثر هیدرولیز کاتیون‌های فلزی جای H_2O در آنها با OH^- عوض می‌شود. ذرات باردار حاصل، ذرات معلق موجود در آب را جذب نموده و سبب ناپایدار شدن آنها می‌شود.



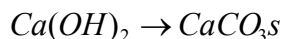
اگر انعقاد بر اثر پدیده فوق انجام پذیرد، میزان منعقدکننده کمتری نسبت به حالت جذب و پل زدن و تراکم لایه دوتایی مورد نیاز است. همچنین بین ذرات ناپایدار شده و ماده مصرف شده رابطه استوکیومتری برقرار است و نیز امکان ایجاد بارمعکوس روی ذرات و پایداری مجدد وجود دارد [۱۰].

به تله انداختن ذرات

برخی نمکها در آب به میزان ناچیزی حل می‌شوند و زود رسوب می‌کنند. این ذرات در هنگام ته‌نشینی ذرات باردار را به تله انداخته و سبب ته‌نشینی آنها می‌شود. به این مکانیزم فرایند لخته جاروکننده^۱ گفته می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان به نمکهای سولفات آلومینیوم، کلرید فریک و آهک اشاره نمود که واکنش این نمکها در آب به صورت زیر می‌باشد [۱۰].



^۱ Sweep-Fluke



(رابطه ۲-۸)

در انعقاد بر اثر این فرآیند، رابطه معکوس بین منعقدکننده لازم و غلظت ذرات کلوئیدی برقرار است، همچنین معمولاً در این روش pH بهینه‌ای وجود دارد که در آن راندمان حذف کدورت در انعقاد بهینه است.

جذب و پل زدن بین ذرات

رشته‌های پلیمری با مکانیزم جذب و پل زدن باعث به هم پیوستن ذرات کلوئیدی می‌شوند. در این روش بر اثر مصرف زیاد منعقدکننده ذرات دوباره پایدار می‌شوند و انعقاد صورت نمی‌گیرد. این مکانیزم انعقاد به شدت وابسته به شدت اختلاط و لخته‌سازی است، شدت اختلاط و لخته‌سازی باید به گونه‌ای باشد که ضمن ایجاد فرصت کافی برای لخته‌سازی سبب گسسته شدن ذرات از لخته‌ها نشود [۱].

با توجه به آنچه گفته شد در بررسی فرآیند انعقاد می‌توان انعقاد را توسط شکل ۲-۴ توجیه نمود.

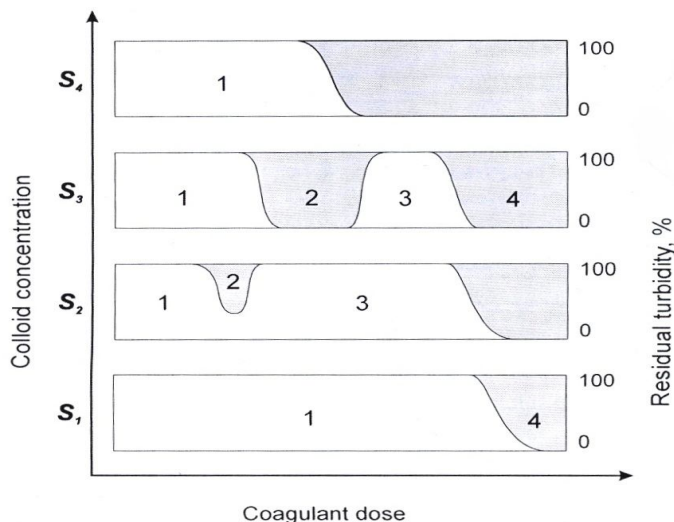
- در نمودار S₁ غلظت ذرات کلوئیدی کم بوده و برای ایجاد برخوردهای مناسب لازم است منعقدکننده زیادی مصرف شود.

- در نمودار S₂ ناپایداری ذرات توسط مکانیزم جذب رخ می‌دهد، به همین دلیل در اثر اضافه نمودن منعقدکننده، پایداری مجدد اتفاق می‌افتد و سپس در اثر مصرف بسیار زیاد منعقدکننده ذرات بر اثر جاروب شدن حذف می‌شوند.

- در نمودار S₃ فرصت تماس برای مکانیزم جذب بیشتر است و در اثر مصرف زیاد منعقدکننده به ترتیب پدیده‌های پایداری مجدد و جاروب کردن اتفاق می‌افتد.

- در نمودار S₄ پدیده به تله انداختن عامل انعقاد است و امکان اتفاق افتادن پایداری مجدد ذرات وجود

ندارد.



شکل ۲-۴- مکانیزمهای مختلف انعقاد و لخته سازی [۱]

۳-۲- انواع منعقد کننده

به طور کلی منعقد کننده‌ها به دو دسته کلی معدنی و آلی تقسیم می‌شوند.

۳-۲-۱- منعقد کننده‌های معدنی

منعقد کننده‌های معدنی ابتدایی ترین منعقد کننده‌ها بوده و به سبب کاربری ساده و موثر امروزه کاربرد

فراوانی دارند. در جدول ۲-۴ انواع متداول منعقد کننده‌های معدنی آورده شده است.

جدول ۲-۴- انواع متداول منعقد کننده‌های معدنی [۱]

توضیحات	فرمول شیمیایی	منعقد کننده
متداولترین منعقد کننده در ایالات متحده، که اغلب به همراه پلیمرهای کاتیونی مصرف می‌شود.	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	سولفات آلومینیوم
در برخی کاربردها از آلوم موثرتر است.	$FeCl_3$	کلرید فریک
اغلب به همراه آهک به منظور سختی زدایی در آب مصرف می‌شود.	$Fe_2(SO_4)_3$	سولفات فریک
نسبت به آلوم وابستگی کمتری به pH دارد.	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$	سولفات فرو
شامل پلی آلومینیوم کلراید و پلی آلومینیوم سولفات است.	-	پلیمرهای آلومینیوم
همراه آلوم به منظور بهبود فرایند انعقاد مصرف می‌شود.	$Na_2Al_2O_4$	آلومینات سدیم
^x می‌تواند بین ۰/۵ تا ۴ باشد اجزاء سلیس فعال به عنوان کمک منعقد کننده مصرف می‌شود.	$Na_2O(SiO_2)_x$	سیلیکات سدیم

اولین منعقدکننده‌های شناخته شده نمکهای فلزی از فلزات آهن و آلومینیوم نظیر آلوم (سولفات آلومینیوم) و کلرید فریک بود که در ادامه به برخی از خواص این منعقدکننده‌ها اشاره می‌شود.

آلوم

از آنجائی که آلوم متداول‌ترین ماده منعقدکننده مصرفی در تصفیه‌خانه آب است، درک و فهم اینکه این ترکیب چگونه به فرآیند ته‌نشینی ذرات کمک می‌کند حائز اهمیت است فرایند انعقاد آلوم شامل مراحل زیر است [۴ و ۱۱].

آلوم افزوده شده به آب با قلیائیت طبیعی آب واکنش داده و باعث تولید ذرات لخته‌ای ژلاتینی شکل هیدروکسید آلومینیوم می‌شود. لذا، برای تشکیل هیدروکسید آلومینیوم قلیائیت آب باید مکفی باشد. در این فرایند اگر قلیائیت موجود در آب کافی نباشد، لازم است قلیائیت آب افزایش داده شود. در فرایند انعقاد توسط آلوم ابتدا یونهای سه ظرفیتی مثبت آلومینیوم، ذرات دارای بار الکتریکی منفی را جذب و خنثی می‌کند. این واکنش طی ۱ تا ۲ ثانیه بعد از افزودن ماده شیمیایی، به آب رخ می‌دهد. سپس طی چند ثانیه، ذرات ناپایدار شده به یکدیگر چسبیده، ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند. آلوم در pH بین ۵/۵ تا ۸/۵ بسیار خوب عمل می‌کند. در سایر pHها ذرات تجمع نیافته و ته‌نشین نمی‌شوند و در pH بسیار پائین آلوم محلول می‌باشد [۱].

نمکهای آهن

نمکهای آهن نظیر کلرید فریک و سولفات فرو را می‌توان به طور موثر در دامنه وسیع تر از pH نسبت به آلوم به کار برد، اما این ترکیبات خورنده بوده و برای نگهداری و حمل و نقل آنها به وسایل مخصوص نیاز است. نمکهای آهن نیز مانند آلوم با قلیائیت طبیعی آب واکنش می‌دهند و در صورتی که قلیائیت آب به میزان کافی نباشد لخته مناسبی شکل نمی‌گیرد. البته در حالتی که قلیائیت آب به میزان کافی نباشد به علت تغییر pH در مراحل مختلف تصفیه آب عمل لخته سازی در سایر قسمت‌های تصفیه اتفاق می‌افتد، لخته‌های حاصل فرصت ته‌نشینی پیدا نکرده و وارد شبکه توزیع آب می‌شوند که شکایات مصرف کنندگان و مشکلاتی نظیر رسوبگذاری در سیستم لوله کشی را به دنبال خواهد داشت [۱۱].

کلرید فریک در مقایسه با آلوم دارای مزایا و معایبی بوده که از مزایای آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود

[۱۱]:

- ۱- کارایی بهتر در حذف طعم و بو.
- ۲- کمتر بودن میزان باقیمانده منعقدکننده در آب.
- ۳- غیرمضر بودن وجود آهن در مقایسه با آلومینیوم.

۴- تشکیل لخته های بزرگتر.

۵- افزایش طول عمر فیلترها.

۶- کاهش زمان مورد نیاز برای ته نشینی.

۷- وابستگی کمتر به pH آب خام.

و از معایب آن می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- سختی شرایط حمل و نگه داری.

۲- کمی راندمان حذف.

۳- وابستگی بیشتر نسبت به تغییرات دما.

و در سایر موارد مزیت استفاده از آلوم نسبت به کلرید فریک بستگی به شرایط شیمیایی آب دارد، مانند راندمان حذف مواد آلی در طی فرایند انعقاد. با وجود مزایا و معایب مذکور آلوم مقبولیت بیشتری کسب نموده و به طور گسترده تری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

با پیشرفت علوم پلیمری، پلی آلومینیوم کلراید، پلی آلومینیوم سولفات و پلی کلرید فریک به منظور انعقاد به

کار گرفته شده اند که در مقایسه با نسل قبلی منعقدکننده ها دارای مزایای زیر هستند [۱۱]:

۱- کاربری ساده تر به دلیل انحلال سریعتر و بهتر.

۲- راندمان بالاتر در حذف کدورت و مواد آلی.

۳- کاهش غلظت مصرفی.

۴- کاهش وابستگی راندمان حذف نسبت به تغییرات شرایط فیزیکی و شیمیایی آب.

با وجود مزایای مذکور این منعقدکننده ها نتوانسته اند برخی معایب نمکهای ساده فلزی را برطرف کنند و خود

باعث پیدایش مشکلات جدیدی شده اند. از جمله معایب منعقدکننده های معدنی دارای آلومینیوم خطر باقیماندن

آلومینیوم در آب می باشد که به دلیل خطر ابتلا به آلزایمر مورد توجه است. جهت بررسی عوارض ناشی از وجود

پلی آلومینیوم کلراید پس از مرحله انعقاد تحقیقات انجام شده قبلی مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۱۹۹۸ جمعیتی در

حدود ۲۰۰۰۰ نفر در منطقه Comelford انگلستان بواسطه اینکه در تصفیه خانه آب شهر از سولفات آلومینیوم استفاده

می کردند بصورت تصادفی (ناگهانی) میزان آلومینیوم ورودی به شبکه آبرسانی آنها افزایش پیدا کرد و علائمی از

قبیل تهوع، استفراغ، زخم دهان، بثورات پوستی قابل توجه بود ولی کلیه علائم ملایم و کوتاه مدت بودند و اثرات

پایدار بر روی سلامت افراد مشاهده نشد که این اثرات به آلومینیوم موجود در آب آشامیدنی نسبت داده شود [۱۳].

فرضیه ای وجود دارد که در معرض آلومینیوم قرار گرفتن، برای پیشرفت یا شتاب پیدا کردن بیماری آلزایمر در

انسانها بعنوان یک فاکتور خطر یا ریسک می‌باشد. مطالعات Srinivasan نشان داد کسانی که آلومینیوم در رژیم غذایی آنها بواسطه استفاده از ظروف پخت آلومینیومی و ظروف ذخیره و نگهداری مواد غذایی وارد میشود ۶/۸ برابر بیماری آلزایمر در آنها بیشتر دیده می‌شود [۱۴]. مطالعه یک گزارش از فرانسه نشان می‌دهد که غلظت آلومینیوم در آب به میزان بالاتر از ۰/۱ میلی گرم در لیتر ممکن است یک فاکتور خطر برای ابتلا به بیماری آلزایمر باشد [۱۵]. تحقیقات انجام شده در کانادا و فرانسه نشان می‌دهد که آلومینیوم در آب آشامیدنی در ابتدا توسط پوست، شش‌ها و بینی در طی دوش گرفتن در حمام جذب می‌شود و جذب از طریق فوق بیشتر از معده می‌باشد [۱۶]. مطالعات McIachan و Forde در کانادا نشان داد که نگهداری pH آب آشامیدنی در حدود ۷/۹ می‌تواند میزان ابتلاء به بیماری آلزایمر را به میزان ۵۰٪ کاهش دهد [۱۷]. البته مطالعات سازمان WHO تا سال ۲۰۰۴ نشان دادند که رابطه‌ای میان مصرف خوراکی آب دارای آلومینیوم و شیوع بیماری آلزایمر وجود ندارد، با این وجود توصیه شده است که میزان آن در آب از حد معینی تجاوز نکند [۲]. مشکل عمده مصرف منعقدکننده‌های معدنی پلیمری وجود ناخالصی در این نوع منعقدکننده‌ها از جمله فلزات سنگین و منومرهای آلوده می‌باشد [۱۸].

۲-۳-۲- منعقدکننده‌های آلی

پلیمرهای آلی به دو منظور در آب به کار گرفته می‌شوند:

- ۱- به عنوان منعقدکننده برای ناپایدار کردن ذرات.
 - ۲- به عنوان کمک‌منعقدکننده برای تشکیل ذرات درشت تر، افزایش سودمندی زلال سازی و در نتیجه افزایش طول عمر فیلترها.
- پلیمرهای آلی معمولاً بعد از ناپایدار شدن ذرات توسط منعقدکننده‌های معدنی به عنوان کمک‌منعقدکننده همراه منعقدکننده‌های معدنی مصرف می‌شوند. پلیمرها به دو دسته پلیمرهای طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند.

۱- پلیمرهای آلی مصنوعی

پلیمرهای مصنوعی عموماً ارزان‌تر از پلیمرهای طبیعی می‌باشند. در جدول ۲-۵ انواع پلیمرهای مصنوعی دارای خاصیت منعقدکننده‌گی آورده شده است.

Type	Molecular weight (g/M)	Common Application	Typical Example	Other Example
Anionic	$10^4 - 10^7$	Coagulant aid Filter aid Flocculent aid Slug conditioning	Hydrolyzed Polycryla Midis	Hydrolyzed polyacrylamides Hydrolyzed polyacrylates Hydrolyzed polyacrylic Hydrolyzed polyacryrene Hydrolyzed sulfonate
Cationic	$10^4 - 10^6$	Primary Coagulant Turbidity and color Removal Slug conditioning	Pechora Hydrin Dim ethyl Amin Polydiallydim Ethyl Ammonium	Aminomethyl polyacrylamides Aminomethyl polyalkylene Aminomethyl polyalkyamines Aminomethyl polyethylenimine Polydimethyl aminomethyl Polydimethyl polyacrylamides Polydimethyl ployvinylbenzyl Polydimethyl termethyl Polydimethyl ammonium Polydimethyl chloride
Non ionic	$10^5 - 10^7$	Coagulant aid Filter aid Slug conditioning	Polyacryla Mides	Ployacrylamides polyethylene Polyacrylnides oxide
Others	Variable	-	Sodium Alginate	Alginic aid Dextran Derivatives Guar gum

پلیمرهای مصنوعی کاتیونی به دلیل مصرف کمتر منعقدکننده، لخته‌های کوچکتر، چگالتز و چسبنده‌تری تولید می‌کند. این نوع پلیمرها در برخی موارد برای انعقاد مناسب نمی‌باشند، زیرا نمی‌توانند کیفیت آب را به حد پلیمرهای آنیونی برسانند و به ندرت در فرایند فیلتراسیون مستقیم^۱ استفاده می‌شوند. بر این اساس اصولاً این مواد به عنوان کمک‌منعقدکننده همراه موادمعدنی مصرف شده و میزان مصرف منعقدکننده‌های معدنی را بین ۲۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهند و باعث تولید لجن کمتر، مصرف کمتر قلیا و کاهش تغییرات pH می‌گردند [۱].

به دلیل دشواری پیش‌بینی واکنشهای منعقدکننده‌های آلی و تداخل کارایی آنها همراه با منعقدکننده‌های معدنی انتخاب آنها به امری تجربی مبدل شده است. عموماً منعقدکننده‌های آلی به میزان ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۵ میلی گرم در لیتر به آب شستشوی معکوس^۲ اضافه شده تا راندمان فیلتراسیون افزایش یابد. در صورتی که این ماده در فیلتراسیون مستقیم استفاده شود سبب تولید گلوله لجن می‌شود و گلوله حاصل در عملیات شستشوی معکوس ساده شسته

¹ Direct Filtration

² Back wash