

ژلاسیون PVC

اندازه‌گیری، تشخیص و کنترل

ژلاسیون در فرآیند تولید PVC یکی از مهم‌ترین پدیده‌هاست که مستقیماً بر کیفیت، استحکام و پایداری محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. کنترل ژلاسیون به معنای تولید پایدار، اقتصادی و محصول با کیفیت بالا است.

هدف نهایی:

تولید پایدار، اقتصادی و
محصولی با کیفیت ممتاز



اندازه‌گیری دقیق
پایش مداوم ژلاسیون
با ابزارهای پیشرفته



تشخیص به موقع
شناسایی زودهنگام
مشکلات ژلاسیون



درک مکانیزم
تحلیل رفتار انرژی، حرارت
و ساختار پلیمر



کنترل مؤثر
تنظیم پارامترها برای
بهینه‌سازی فرآیند

ماهیت ژلاسیون PVC

ژلاسیون نه ذوب است، نه صرفاً انرژی...
بلکه ترکیبی از انرژی + ساختار است.

ژلاسیون PVC

یکی از مهم‌ترین
پدیده‌هاست که
مستقیماً بر کیفیت،
استحکام و پایداری
محصول نهایی تأثیر
می‌گذارد.

ساختار

(تغییرات مولکولی
و مورفولوژیکی)



ژلاسیون
PVC

انرژی

(حرارت + برش)



ژلاسیون یعنی:

- ✓ نابودی کامل ساختار پودری
- ✓ اتصال ذرات به یکدیگر
- ✓ نفوذ زنجیرهای مولکولی بین ذرات
- ✓ توسعه و درهم‌تنیدگی زنجیرها
- ✓ عدم ذوب کلاسیک، بلکه همجوشی
نفوذ مولکولی
- ✓ تغییر رفتار ماده از حالت پودری
به ویسکوالاستیک



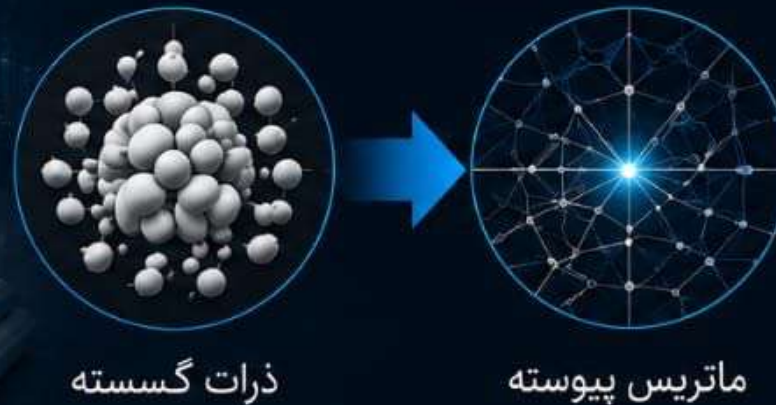
حدود 80% از مشکلات PVC ناشی از کنترل نادرست ژلاسیون است.

تعریف ژلاسیون

تبدیل ذرات گسسته PVC
به یک ماتریس پیوسته و همگن

ویژگی‌های فرآیند ژلاسیون

- ✓ ناحیه شدن مرزهای بین ذرات
- ✓ اتصال ذرات بین ذرات
- ✓ نفوذ زنجیرهای مولکولی به یکدیگر
- ✓ توسعه و درهم‌تنیدگی زنجیرها
- ✓ عدم ذوب کلاسیک، بلکه همجوشی
نفوذ مولکولی
- ✓ تغییر رفتار ماده از حالت پودری به
ویسکوالاستیک



ذرات گسسته

ماتریس پیوسته

داده‌های دقیق = کنترل فرآیند + بهبود کیفیت محصول



بررسی رفتار ذرات



کنترل دمای فرآیند



بهینه‌سازی ساختار



افزایش کیفیت نهایی



مکانیزم فیزیکی فرآیند ژلاسیون

ژلاسیون در اثر اعمال انرژی (حرارت و برش) رخ می‌دهد و باعث تغییرات ساختاری در زنجیرهای PVC و ناحیه بین ذرات می‌شود.

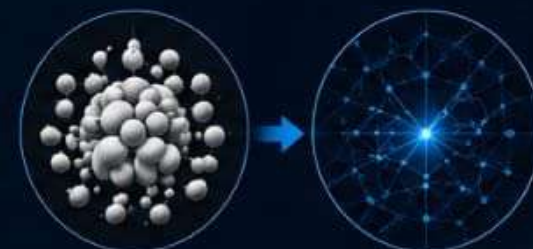
ژلاسیون یعنی:

تبدیل ذرات گسسته PVC به یک ماتریس پیوسته و همگن

منطقه تخلیه
(ژلاسیون و پلاستیکه)

منطقه فشردگی
(همگن سازی)

منطقه تغذیه
(غیرپلاستیکه)

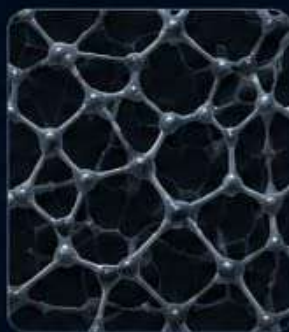


ذرات گسسته

ماتریس پیوسته

قبل از ژلاسیون
(ذرات گسسته)

بعد از ژلاسیون
(ماتریس پیوسته)



پیامدهای اصلی در طول فرآیند:

-  تغییر شکل زنجیره‌های PVC و افزایش درهم‌تنیدگی
-  کاهش فضای بین ذرات
-  دستیابی به ماتریس پیوسته و همگن
-  افزایش چسبندگی بین ذرات
-  شکل‌پذیری بهتر و یکنواختی ذوب
-  کاهش تخلخل و بهبود کیفیت نهایی

انرژی ژلاسیون

انرژی ژلاسیون، متغیر کلیدی در فرآیند تولید PVC است

انرژی کافی = ژلاسیون کامل و یکنواخت = محصول با کیفیت پایدار

مزایای انرژی ژلاسیون بهینه

- ✓ ژلاسیون کامل و یکنواخت
- ✓ بهبود خواص مکانیکی محصول
- ✓ سطح صاف و براق لوله
- ✓ افزایش پایداری فرآیند تولید
- ✓ کاهش مصرف انرژی و مواد
- ✓ کاهش ضایعات و برگشتی
- ✓ افزایش طول عمر تجهیزات



ژلاسیون چیست؟

فرآیند ترکیب کامل رزین PVC با افزودنی‌ها تحت تأثیر حرارت و برش مکانیکی، که به شکست ذرات و تشکیل ژل یکنواخت منجر می‌شود.

عوامل مؤثر بر انرژی ژلاسیون

دمای فرآیند (سیلندر و قالب)	سرعت ماریج (RPM)	طراحی ماریج (L/D, کانال‌ها)	زمان ماند	فرمولاسیون و نوع رزین و افزودنی‌ها	مقدار بار ورودی اکسترودر

تأثیر انرژی ژلاسیون بر کیفیت محصول

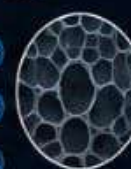
انرژی ناکافی



- ✗ ژلاسیون ناقص
- ✗ سطح زبر و مات
- ✗ خواص ضعیف
- ✗ افزایش ضایعات

VS

انرژی بهینه



- ✓ ژلاسیون کامل
- ✓ سطح صاف و براق
- ✓ خواص مکانیکی عالی
- ✓ کیفیت پایدار



عوامل مؤثر بر انرژی ژلاسیون

انرژی ژلاسیون تحت تأثیر ترکیبی از عوامل فرمولاسیونی، فرآیندی و محیطی قرار دارد.

1

فرمولاسیون



- نوع و مقدار رزین PVC
- نوع و مقدار روان کننده
- سیستم پایدارکننده
- نوع و مقدار پرکننده

2

شرایط فرآیند



- دمای فرآیند
- سرعت پیچ
- زمان (Residence Time)
- نرخ برش (Shear Rate)

3

ویژگی‌های مواد



- وزن مولکولی رزین
- توزیع اندازه ذرات
- ساختار و مورفولوژی رزین
- تطابق اجزای فرمولاسیون

4

محیط و تجهیزات



- طراحی و هندسه مارپیچ
- نوع و اندازه قالب (دای)
- سیستم خنک کننده
- وضعیت سطوح و نوله

5

شرایط محیطی



- دمای محیط
- رطوبت نسبی
- شرایط نگهداری مواد

چرا کنترل این عوامل مهم است؟



- ✓ کنترل انرژی ژلاسیون
- ✓ جلوگیری از ژل‌های نسوخته
- ✓ پایداری فرآیند و کیفیت پایدار
- ✓ افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات

تعادل بهینه بین عوامل

بهینه‌سازی همزمان عوامل فوق، منجر به رسیدن به انرژی ژلاسیون مناسب و کیفیت محصول ایده‌آل می‌شود.



عملکرد فرآیند

کیفیت محصول

نکات کلیدی



هر تغییر کوچک می‌تواند انرژی ژلاسیون را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد.



پایش و کنترل مداوم فرآیند ضروری است.



آزمایش و ثبت داده‌ها برای یافتن شرایط بهینه الزامی است.



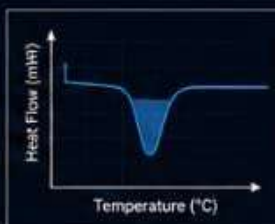
بهینه‌سازی انرژی ژلاسیون، کلید تولید پایدار و اقتصادی است.

روش‌های اندازه‌گیری انرژی ژلاسیون

اندازه‌گیری دقیق انرژی ژلاسیون، کلید کنترل فرآیند و تضمین کیفیت محصول نهایی است.

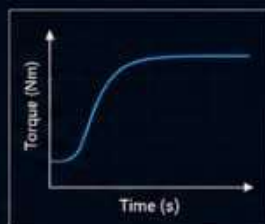
روش‌های متداول اندازه‌گیری

کالیمتری تفاضلی روبشی (DSC)



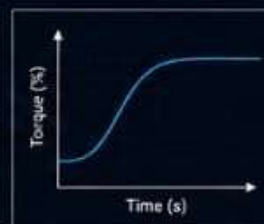
- اندازه‌گیری مستقیم انرژی جذب‌شده در فرایند ژلاسیون
- دقت بالا و نتایج قابل تکرار
- مناسب پژوهش‌های دقیق و توسعه فرمولاسیون

رئومتر گشتاوری



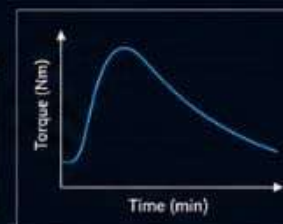
- اندازه‌گیری گشتاور در حین اختلاط و ژلاسیون
- ارزیابی انرژی از روی مساحت زیر منحنی گشتاور-زمان
- مناسب کنترل فرآیند در خط تولید

داده‌های اکسترودر



- استفاده از داده‌های گشتاور و دما در اکسترودر
- محاسبه انرژی ژلاسیون به صورت غیرمستقیم
- کاربردی برای پایش و بهینه‌سازی فرآیند

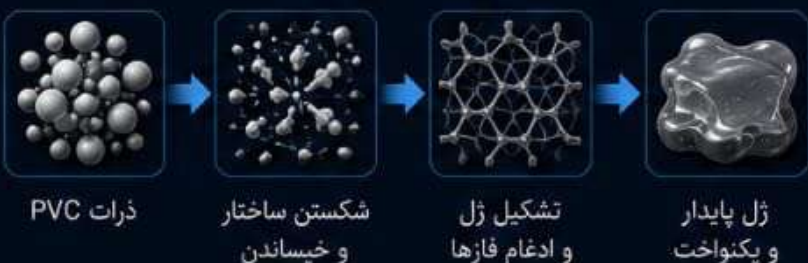
میکسر برابندر



- اندازه‌گیری گشتاور در میکسر برابندر
- محاسبه انرژی از مساحت زیر منحنی
- استاندارد مرجع در بسیاری از صنایع

چه چیزی اندازه‌گیری می‌شود؟

انرژی ژلاسیون برابر است با کل انرژی مصرف‌شده برای شکستن ساختار ذرات PVC و جذب پلاستیسیایزر و تشکیل ژل پایدار.



عوامل مؤثر بر دقت اندازه‌گیری

- ترکیب فرمولاسیون و نوع مواد
- سرعت اختلاط یا دور screw
- دما و پروفایل حرارتی
- مقدار نمونه و نحوه آماده‌سازی
- کالبراسیون دستگاه و روش تحلیل داده

نکات کلیدی

- ✓ انتخاب روش مناسب با توجه به هدف (کنترل فرآیند یا تحقیق)
- ✓ کالبراسیون و نگهداری منظم تجهیزات
- ✓ تکرار تست و گزارش‌گیری برای افزایش اطمینان نتایج
- ✓ استفاده از داده‌های انرژی ژلاسیون برای بهینه‌سازی کیفیت و بهره‌وری



اندازه‌گیری دقیق انرژی ژلاسیون، پایه‌ای برای کنترل فرآیند، کیفیت پایدار و کاهش هزینه‌های تولید است.

روش‌های کنترل انرژی ژلاسیون

کنترل دقیق انرژی ژلاسیون با استفاده از روش‌های مناسب، تضمین‌کننده کیفیت پایدار و عملکرد بهینه محصول نهایی است.

1

کنترل فرمولاسیون



- انتخاب دقیق نوع و مقدار رزین PVC
- تعیین مقدار مناسب روان‌کننده‌ها
- بهینه‌سازی سیستم پایدارکننده
- استفاده صحیح از پرکننده‌ها

2

کنترل دمای فرآیند



- تنظیم دقیق دمای رونه‌های اکسترودر
- جلوگیری از نوسانات دمایی
- کنترل دمای قالب و مسیر سرمایش
- حفظ دمای یکنواخت در کل فرآیند

3

کنترل سرعت برش



- تنظیم سرعت چرخش پیچ اکسترودر
- کنترل نرخ برش در هر رونه
- جلوگیری از برش بیش از حد
- هماهنگی سرعت و ظرفیت تولید

4

کنترل زمان ماند (Residence Time)



- تنظیم طول موثر اکسترودر
- کنترل سرعت تغذیه مواد
- جلوگیری از ماند بیش از مواد
- متناسب با نوع فرمولاسیون

5

کنترل رطوبت مواد



- خشک‌کردن کامل مواد اولیه
- کنترل رطوبت محیط تولید
- استفاده از سیستم‌های خشک‌کن کارآمد
- پایش مداوم رطوبت مواد

ابزارها و تجهیزات کمکی



سنسورهای دما
پایش دقیق دما



تورک‌متر آنالاین
اندازه‌گیری گشتاور



ویسکومتر آنالاین
اندازه‌گیری ویسکوزیته



سیستم کنترل فرآیند
پایش و کنترل پارامترها



ثبت و تجلیل داده‌ها
بهبود مستمر فرآیند

نتیجه کنترل صحیح انرژی ژلاسیون



کیفیت پایدار
محصول یکنواخت
و پاکیزگی



عملکرد بهتر
خواص مکانیکی
بهینه



کاهش ضایعات
صرفه‌جویی در مواد
و هزینه‌ها



افزایش بهره‌وری
تولید پایدار و
اقتصادی

نکته کلیدی



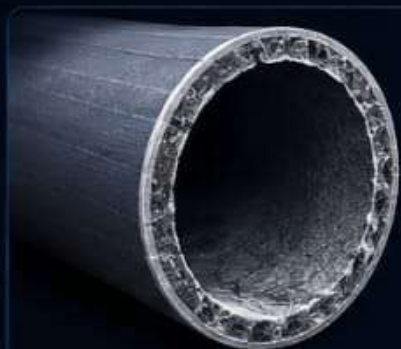
ترکیب صحیح این روش‌ها و پایش مداوم پارامترهای فرآیند، کلید اصلی کنترل انرژی ژلاسیون و دستیابی به محصولی با کیفیت پایدار است.



کنترل علمی و دقیق انرژی ژلاسیون، تضمین‌کننده کیفیت، پایداری و رقابت‌پذیری محصولات PVC شماست.

خرابی‌های مرتبط با ژلاسیون

ژلاسیون خارج از محدوده بهینه می‌تواند منجر به کاهش کیفیت، افت عملکرد و افزایش ضایعات شود.



ژلاسیون کم
(Under-Gelation)
 انرژی ژلاسیون کمتر
 از محدوده بهینه

خرابی‌ها و نشانه‌ها

- جسبندگی ضعیف بین ذرات
- سطح زبر و ناهموار
- استحکام پایین
- شکندگی و ترک‌خوردگی
- نشتی و آب‌بندی ضعیف

راهکارها

- افزایش دمای فرایند
- افزایش زمان اختلاط (ژلاسیون)
- کاهش سرعت پیچ اکسترودر
- بهینه‌سازی فرمولاسیون و روان‌کننده‌ها
- بررسی یکنواختی توزیع رزین و افزودنی‌ها



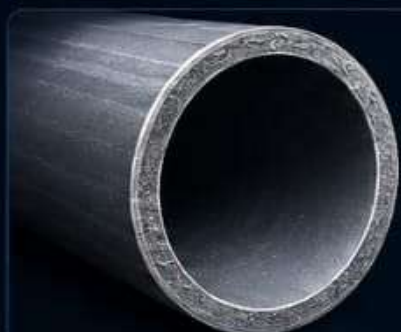
ژلاسیون بیش از حد
(Over-Gelation)
 انرژی ژلاسیون بیشتر
 از محدوده بهینه

خرابی‌ها و نشانه‌ها

- تجزیه حرارتی PVC
- تغییر رنگ (زردی تا قهوه‌ای)
- کاهش استحکام و انعطاف‌پذیری
- بوی سوختگی
- ایجاد رسوب و لکه روی قالب و پیچ

راهکارها

- کاهش دمای فرایند
- کاهش زمان اختلاط (ژلاسیون)
- افزایش سرعت پیچ اکسترودر
- بررسی سیستم خنک‌کننده و تهویه
- استفاده از پایدارکننده‌های حرارتی مناسب



ژلاسیون بهینه
(Optimal Window)
 انرژی ژلاسیون در محدوده
 بهینه

نتایج مطلوب

- اتصال قوی بین ذرات
- سطح صاف و یکنواخت
- استحکام و انعطاف مناسب
- کیفیت سطح خوب
- عملکرد پایدار و طول عمر بالا

راهکارها برای حفظ شرایط بهینه

- کنترل دقیق دما و زمان ژلاسیون
- تنظیم سرعت پیچ و RPM مناسب
- فرمولاسیون استاندارد و پایدار
- پایش و ثبت داده‌های فرایند
- نگهداشت و سرویس منظم تجهیزات



هدف: دستیابی به کنترل پایدار ژلاسیون برای تولید لوله PVC با کیفیت، عملکرد بالا و حداقل ضایعات.

پنجره ژلاسیون بهینه

بازه انرژی ژلاسیون تعیین کننده کیفیت نهایی است.

<60%

ژلاسیون کم
(Under-Gelation)

- محصول شکننده
- اتصال ضعیف بین ذرات
- استحکام مکانیکی پایین
- ظاهر نامطلوب

70% - 85%

ژلاسیون بهینه
(Optimal Window)

- بیشترین عملکرد
- استحکام عالی
- پایداری ابعادی مناسب
- کیفیت سطح خوب

>95%

ژلاسیون بیش از حد
(Over-Gelation)

- زردی و تغییر رنگ
- تجزیه مواد (HCl)
- کاهش استحکام
- شکستگی و ترک خوردگی



هدف: تگه داشتن انرژی ژلاسیون در محدوده 70 تا 85 درصد



کاهش
ضایعات



کیفیت
پایدار



عالی
کفی



پایداری
فرآیند



کاهش
هزینه‌ها

انرژی ژلاسیون، نتیجه تجمع کار و حرارتی در طول سیستم است.

1- انرژی ژلاسیون (متغیر کلیدی)

انرژی ژلاسیون، نتیجه تجمع کار و حرارتی در طول سیستم است.

که در آن:

E_g : انرژی ژلاسیون (J)

τ : تنش برشی (Pa)

$\dot{\gamma}$: نرخ برش (s^{-1})

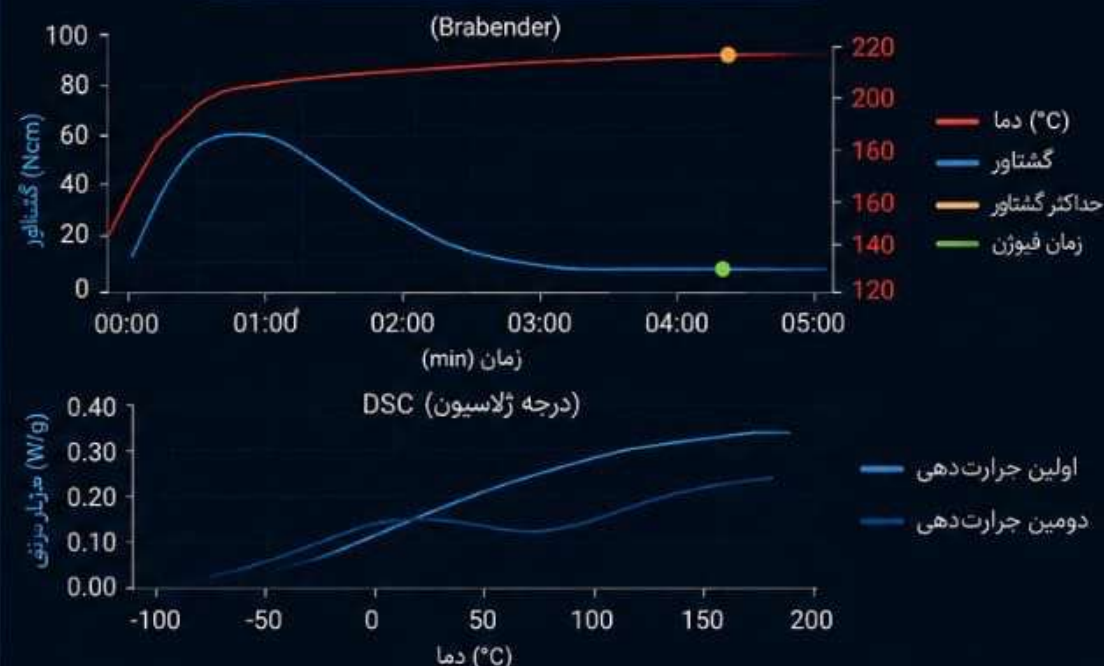
t : زمان (s)

$$E_g \approx \int \tau \cdot \dot{\gamma} dt$$



کنترل انرژی ژلاسیون = کنترل کیفیت محصول نهایی

2- نمونه نتایج اندازه‌گیری (Brabender)



داده‌های دقیق = کنترل فرآیند + بهبود کیفیت محصول

نکات کلیدی



انرژی ژلاسیون شاخصی جامع برای وضعیت ذوب و ژل شدن محصول است.



اندازه‌گیری دقیق، کلید کنترل پایدار فرآیند و کیفیت محصول است.



تحلیل نمودارهای گشتاور و DSC جهت شناسایی پنجره ژلاسیون بهینه ضروری است.



هدف نهایی: دستیابی به انرژی ژلاسیون در بازه بهینه برای حداکثر کیفیت و کارایی.



کنترل انرژی ژلاسیون، پایه‌ای برای تولید پایدار، کیفیت بالا و رقابت‌پذیری محصولات PVC است.

کنترل دقیق انرژی ژلاسیون، کلید تولید پایدار و باکیفیت PVC است.

آنچه آموختیم



ژلاسیون فرآیندی حیاتی است که مستقیماً بر کیفیت، عملکرد، پایداری و قابلیت فرآیندی PVC اثر می گذارد.



کنترل انرژی ژلاسیون (Eg) شاخصی کلیدی برای تنظیم پنجره ژلاسیون بهینه و دستیابی به کیفیت مطلوب است.



پنجره ژلاسیون بهینه (۷۰ تا ۸۵ درصد انرژی) بهترین توازن بین کیفیت، کارایی و پایداری را فراهم می کند.



انحراف از پنجره بهینه (کم زل یا بیش زل) منجر به افت کیفیت، افزایش ضایعات و مشکلات فرآیندی می شود.



اندازه گیری های دقیق آزمایشگاهی و پایش مداوم فرآیند، پایه تصمیم گیری صحیح و کنترل پایدار ژلاسیون است.

کنترل مؤثر انرژی ژلاسیون



انتخاب و ترکیب بهینه مواد اولیه و افزودنی ها



تنظیم دقیق دماهای فرآیند و نرخ برش اکسترودر



کنترل زمان ماند مناسب در اکسترودر



پایش و تحلیل مستمر داده ها و آزمایش ها



واکنش سریع به تغییرات و اصلاح پارامترها



مزایای کنترل ژلاسیون در پنجره بهینه



کیفیت بالاتر محصول و یکنواختی بهتر



بهبود خواص مکانیکی و ظاهری



پایداری تولید و کاهش نوسانات فرآیند



کاهش ضایعات و هزینه های تولید



افزایش بهره وری و رقابت پذیری محصول در بازار

پیام کلیدی

درک عمیق درفتر ژلاسیون، اندازه گیری دقیق و کنترل هوشمندانه انرژی ژلاسیون، مسیر دستیابی به تولید پایدار، اقتصادی و رقابتی PVC با کیفیت ممتاز را هموار می سازد.



تحلیل و پایش دقیق



کنترل هوشمند فرآیند



پنجره ژلاسیون بهینه
(۷۰ تا ۸۵ درصد انرژی)



کیفیت پایدار و ممتاز



ارزش بیشتر برای مشتری
و موفقیت مداوم



کنترل علمی و دقیق ژلاسیون، تضمین کننده کیفیت، پایداری و رقابت پذیری محصولات PVC شماست.