

# اصول مهندسی سرامیک

بخش دوم: روشهای ساخت بدنه های سرامیکی

تدریس: ارغوان کاظمی

# فرآیندهای ساخت سرامیک ها

- ریخته گری دوغابی (Slip casting)
- شکل دهی پلاستیک (اکستروژن، جیگر، جولی و...)
- پرس (Press)
- ریخته گری نواری (Tape Casting)
- قالبگیری تزریقی (Injection Molding)
- ریخته گری ژلی (Gel Casting)
- سل - ژل (Sol- Gel)
- پرینتر سه بعدی (3D Printing)

# ریخته گری دوغابی

- **ریخته گری دوغابی** شامل ریختن یک دوغاب ریخته گری به داخل یک قالب متخلخل (معمولا از جنس گچ)، دادن زمان مناسب (از چند دقیقه تا چند ساعت) برای انتقال آب از دوغاب به قالب در اثر مکش لوله موئین، ایجاد یک لایه روی سطح و خارج کردن دوغاب اضافی است.
- این فرآیند به ریخته گری توخالی معروف است.
- در نوع دیگر این روش که ریخته گری تو پر نام دارد و در ابتدا برای بدنه های بهداشتی به کار برده می شد، تمام آب دوغاب به درون قالب جذب می شود.
- در هر دو مورد خشک شدن نسبی بدنه در قالب سبب کمی انقباض در بدنه می شود که خروج آن را از قالب برای خشک کردن کامل ممکن می سازد.

- مدت زمانی که دوغاب در داخل قالب باقی می ماند در قطر لایه ایجاد شده و یا به عبارت دیگر در ضخامت بدنه خام تاثیر بسیار زیادی دارد.
- بدین معنی که چنانچه دوغاب اضافی همچنان در قالب باقی مانده و تخلیه نگردد و اصطلاحاً زمان بیشتری به دوغاب داده شود، قطر لایه ایجاد شده افزایش خواهد یافت.
- باید توجه داشت که با گذشت زمان سرعت تشکیل لایه ثابت نبوده و به مرور کند تر می شود چرا که در این شرایط، خود لایه ایجاد شده به صورت سدی در مقابل نفوذ آب به داخل گچ، عمل می نماید.

# لازمه های یک دوغاب خوب ریخته گری

- ۱- باید قابلیت ریختن داشته باشد و بتواند گوشه های قالب را پر کند.
- ۲- ذرات آن رسوب نکنند.
- ۳- سرعت ریخته گری باید زیاد باشد ولی نه آنقدر که از کنترل خارج شود.
- ۴- باید مرز بارز و مشخصی بین جداره ریخته شده و مابقی دوغاب وجود داشته باشد، به طوریکه مابقی دوغاب به خوبی تخلیه شود.
- ۵- باید کمی انقباض خشک شدن وجود داشته باشد تا بدنه ریخته شده به راحتی از قالب جدا شود ولی انقباض نباید به حدی باشد که سبب تاب برداشتن و ترک در طول عمل خشک شدن شود.
- ۶- بدنه ریخته شده باید محکم بوده و استحکام خشک کافی داشته باشد.
- ۷- در دوغاب نباید حباب های هوا محبوس شود، در غیر این صورت سبب ایجاد حفرات ته سوزنی در بدنه می شود.
- ۸- دوغاب باید تا حد ممکن آب کمی داشته باشد تا از اشباع شدن بیش از حد قالب ها و طولانی شدن زمان خشک کردن جلوگیری شود.

# انواع روش های ریخته گری دوغابی

انواع روش های ریخته گری دوغابی عبارتند از:

- ریخته گری ساده درون یک قالب یک تکه

- ریخته گری ساده درون یک قالب چند تکه

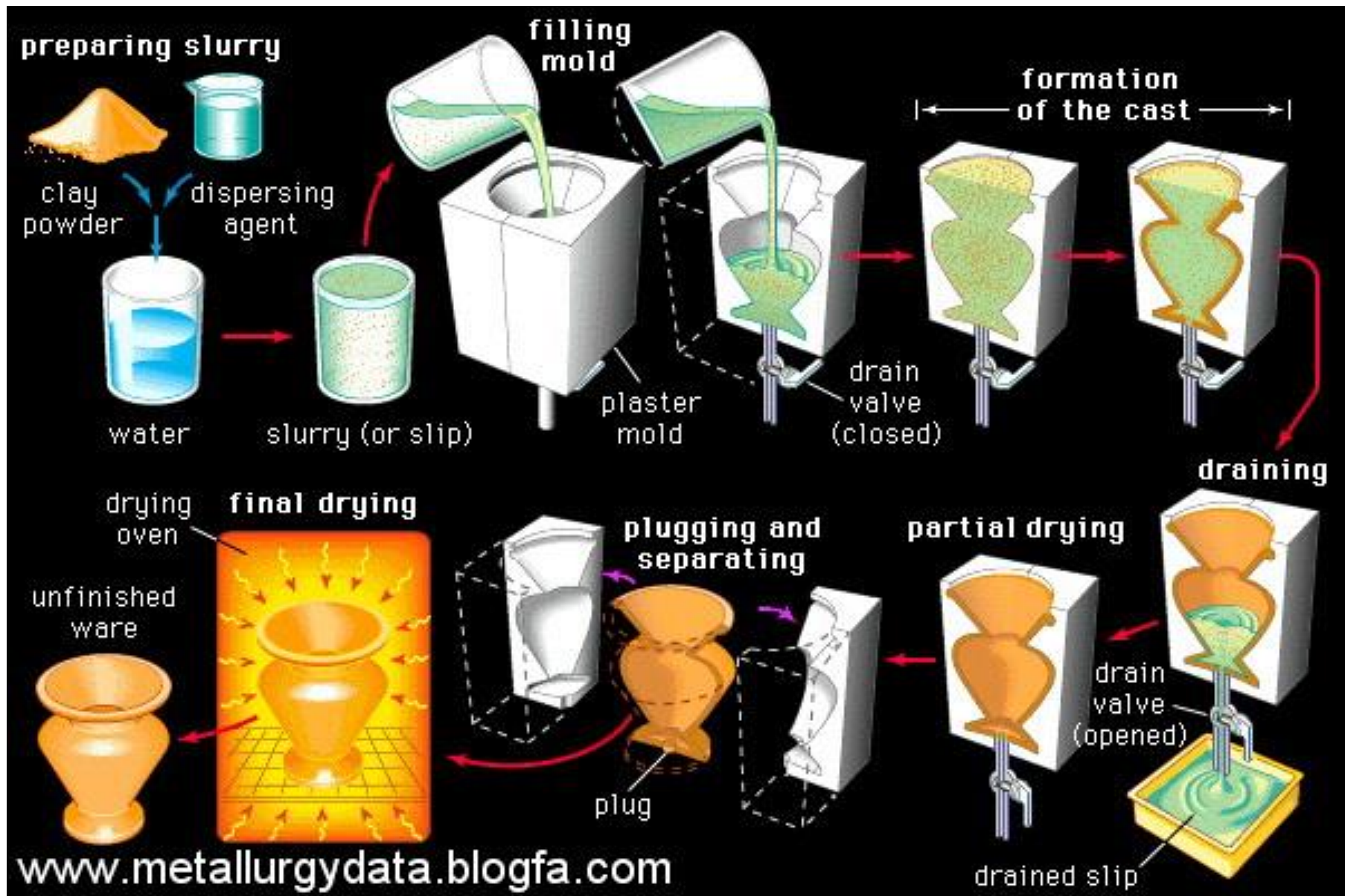
- ریخته گری توخالی

- ریخته گری جامد

- ریخته گری در خلا

- ریخته گری گریز از مرکز (سانتریفوژ)

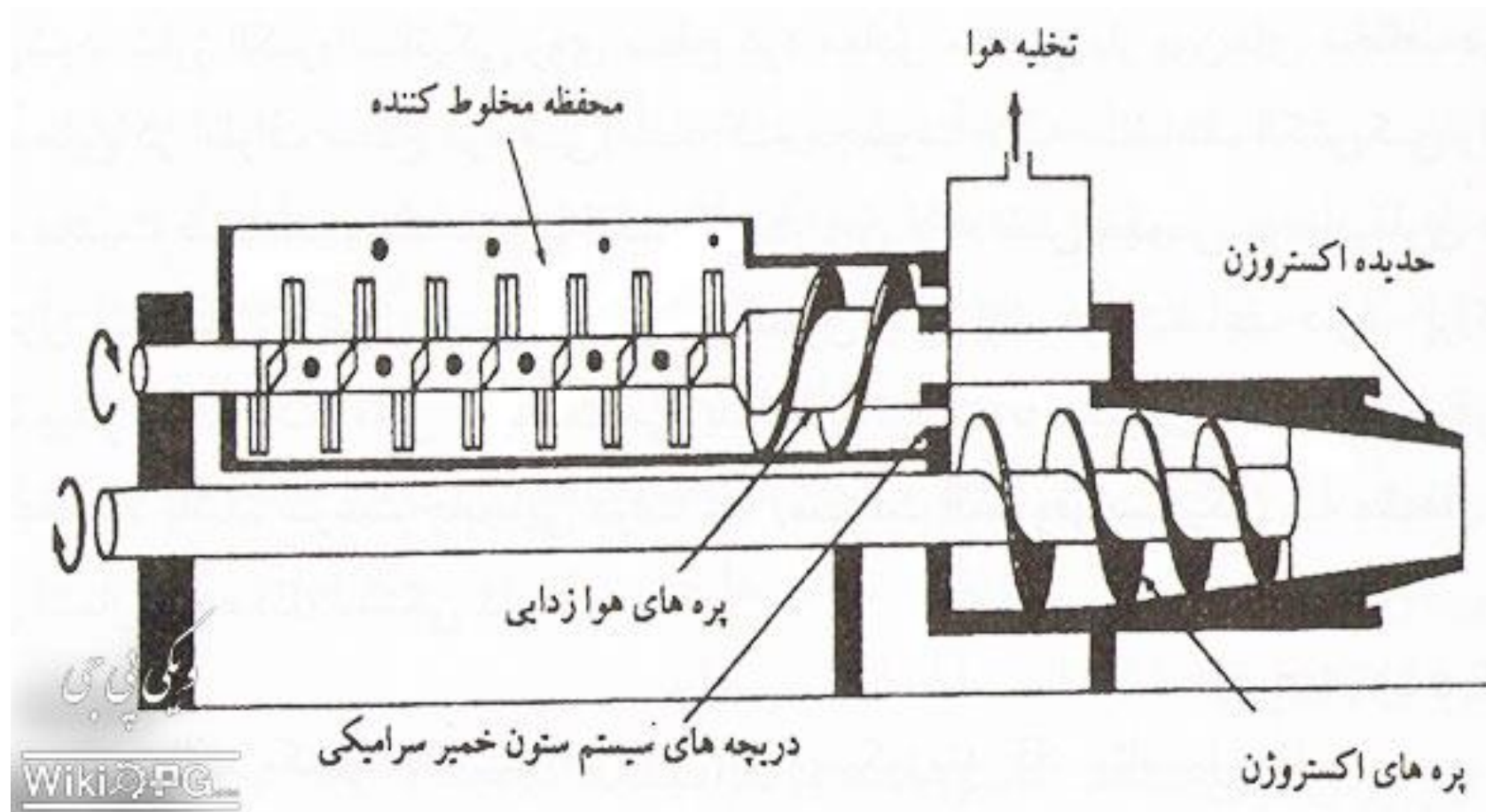
- ریخته گری تحت فشار



# اکستروژن

- برای تولید اجزای سرامیکی با سطح مقطع ثابت مورد استفاده قرار می گیرد.
- طول قطعه نیز با بریدن قطعه در زوایای مناسب مشخص می شود.
- رطوبت بدنه های اکستروژن شده بسته به مواد خام می تواند از ۱۴-۱۵٪ تا ۲۰-۲۲٪ افزایش یابد.
- ماشین های **اکستروژن سرامیک ها** از سه بخش اصلی تشکیل شده اند:
  - ۱- سیستم رانش: که بدنه سرامیکی را فشرده کرده و موجب می شود تا بدنه از روزنه اکستروژن خارج شود.
  - ۲- روزنه اکستروژن که از روزنه ای با شکل خاص ایجاد شده و به بدنه فرم می دهد.
  - ۳- ابزار برش دهنده که قطعه اکستروژن شده را به اندازه مورد نظر برش می زند.
- از جمله مواردی که با این روش تولید می شوند می توان به آجرهای دیرگذاز، لوله های توخالی، عایق های الکتریکی، فیلترهای توری شکل، پره های رادیاتور و مبدل های حرارتی اشاره نمود.







# پرس

- تعریف:

فشردن و شکل دهی همزمان یک پودر یا گرانوله در داخل یک قالب صلب یا ارتجاعی

- انواع پرس:

- تک محوری سرد

- تک محوری گرم

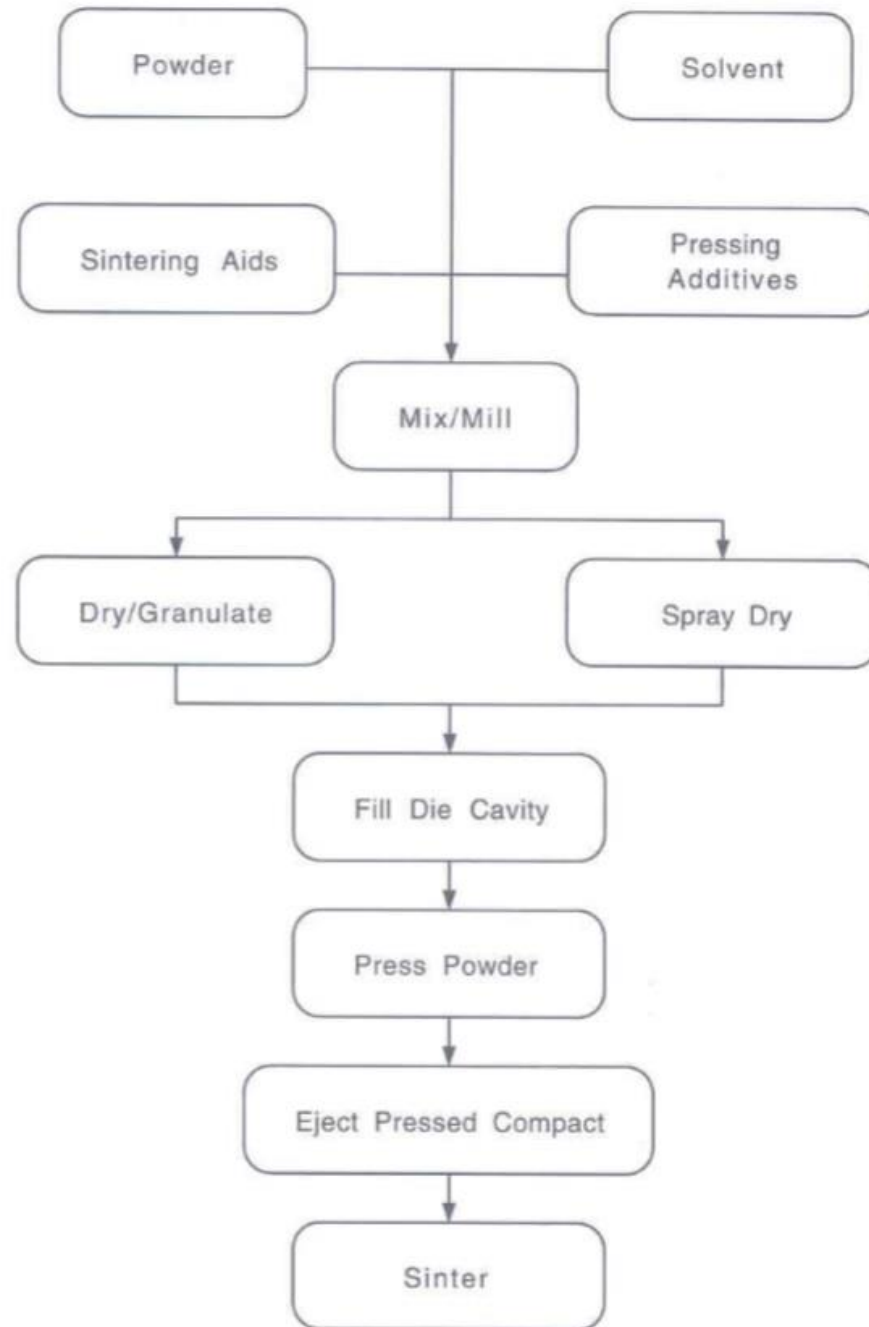
- ایزواستاتیک گرم

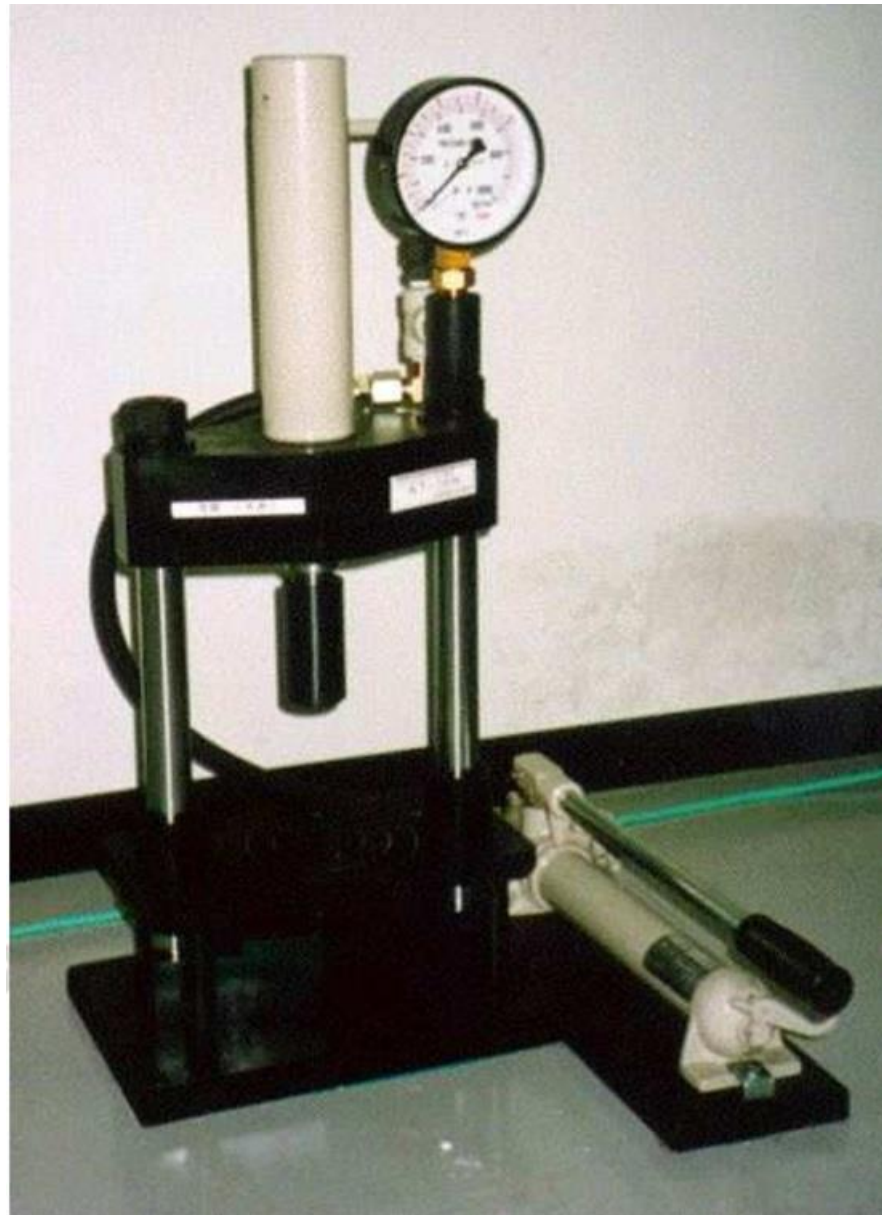
- ایزواستاتیک سرد

# مزایای روش پرس تک محوری

- امکان استفاده از مواد خام تقریباً غیرپلاستیک
- دقت ابعادی زیاد
- کوتاه شدن زمان خشک شدن کامل بدنه
- نیاز به حضور آب کمتر
- صرفه جویی در مصرف انرژی
- سرعت بالا
- کم بودن ضایعات تولید
- نیاز به فضای کار کمتر
- بالا بودن راندمان سیستم
- تراکم زیاد ذرات در بدنه
- امکان اتوماسیون و اجرای عملیات شکل دادن مداوم
- نیاز به تعداد کمی قالب
- امکان دکور

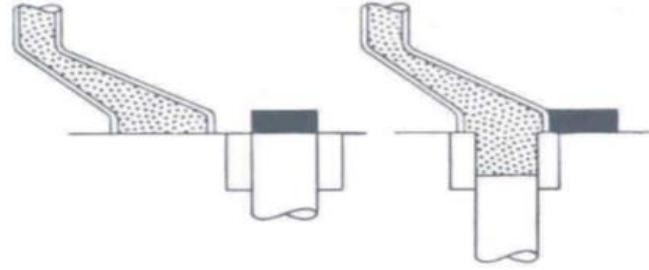
# فلوچارت



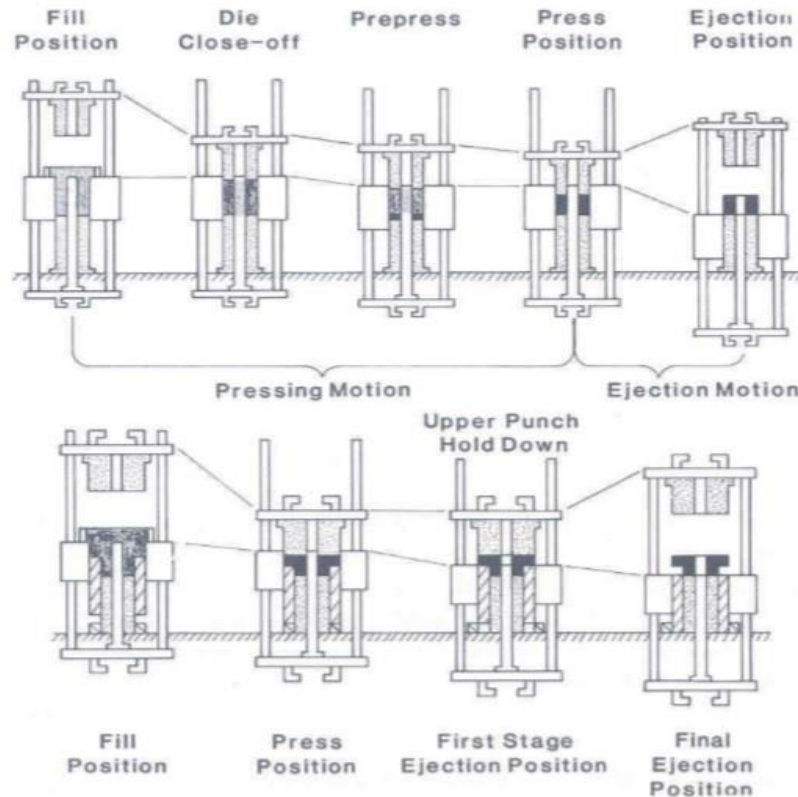




# مراحل پرس، تک محوری



- پر کردن قالب
- تراکم و شکل دهی
- خروج



# عیوب قطعات پرس شده

- دانسیته یا اندازه نامناسب
- سایش قالب
- اختلاف دانسیته در قطعه
- ترک خوردگی و لایه لایه شدن



## دانسیتة یا اندازه نامناسب:

- نامناسب بودن پودر یا قالب

## اختلاف دانسیته در قطعه:

- عدم روغنکاری مناسب
- بالا بودن نسبت طول به قطر قطعه

## سایش قالب:

- نامناسب بودن جنس قالب
- عدم روغنکاری
- نامناسب بودن روانکار مورد استفاده
- بالا بودن سختی پودر

## ترک خوردگی و لایه لایه شدن:

- تنش ارتجاعی متفاوت در حین خروج
- طراحی ناصحیح قالب
- حبس هوا در نمونه
- فشار زیاد

## رفع:

- کاهش فشار
- تغییر ترکیب افزودنی
- روانکاری
- استفاده از قالب مناسب با سطوح صاف و ورودی پخ خورده

# پرس گرم

- تعریف:

افزایش تراکم چگالی با اعمال همزمان فشار خارجی و دما

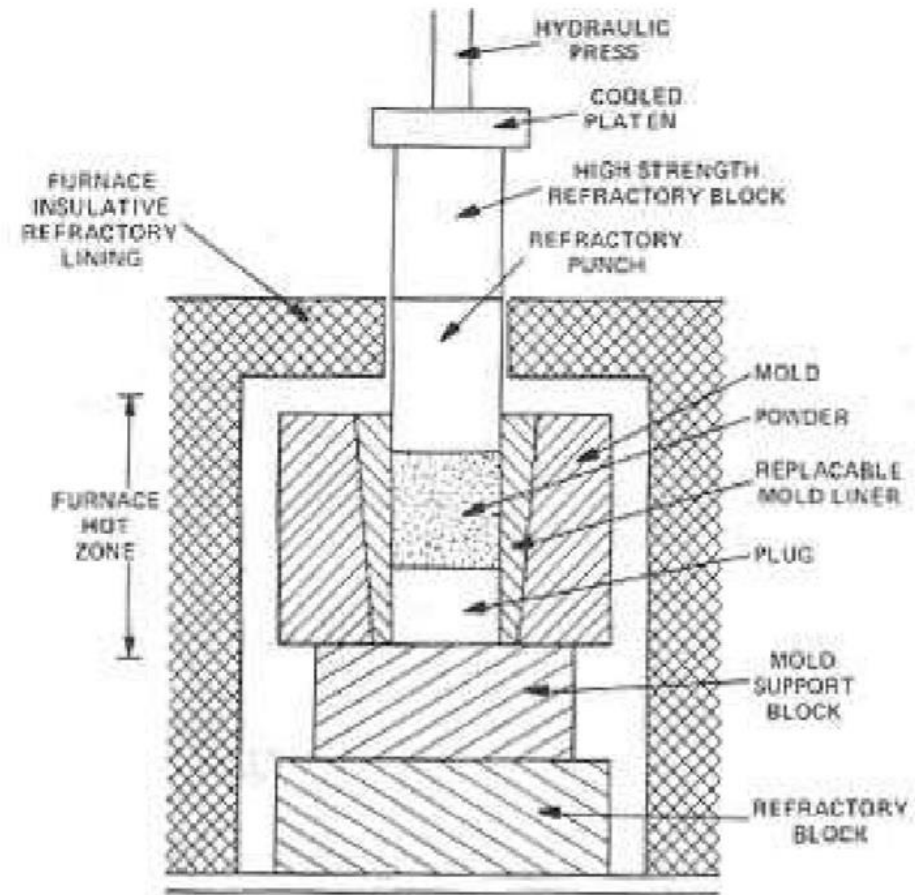
- محاسن:

- کاهش دمای زینترینگ

- کنترل ریزساختار

- کاهش تخلخل

# شماتیک تجهیزات گرم



# معیارهای انتخاب قالب و سنبه

- واکنش بین پودر و قالب
- خواص مکانیکی
- مقاومت به خزش
- استحکام نهایی
- مکانیزم شکست
- ضریب انبساط حرارتی در مقایسه با پودر
- سهولت ماشین کاری
- هزینه

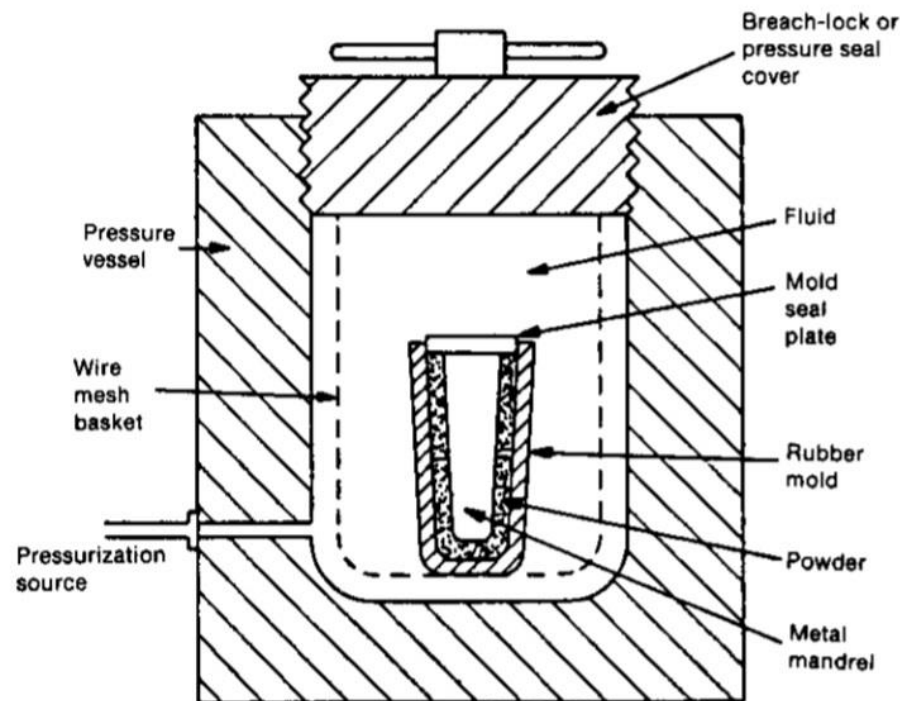
# موارد مورد استفاده به عنوان قالب و سنبه

- گرافیت
- سیلیکون کارباید
- آلومینا
- فلزات دیرگداز

# مزایای روش پرس گرم

- زینتر بهتر در حین اعمال فشار و حصول دانسیته بالا
- کاهش مقدار کمک زینتر
- عدم نیاز به چسب (در صورت استفاده از پودر)
- کاهش دما و زمان زینتر
- کاهش رشد دانه
- بهبود خواص مکانیکی (ناشی کاهش تخلخل و اندازه دانه)
- امکان رسیدن به دقت های ابعادی بالا
- افزایش مقاومت به خزش بدنه
- انجام همزمان شکل دهی وزینترینگ

# پرس ایزواستاتیک سرد



## • تعریف:

فشردن پودر یا قطعه در داخل  
یک قالب ارتجاعی توسط فشار  
هیدرواستاتیک

# مزایا و معایب پرس ایزواستاتیک سرد

## معایب

- طولانی بودن زمان توسعه و پایدارسازی یک فرآیند کامل
- سرمایه گذاری اولیه بالا

## مزایا

- محدودیت ابعادی کم
- دانسیته خام یکنواخت
- دانسیته خام بالا (فشارهای بالا تا ۱۳۸۰ مگاپاسکال)
- عدم نیاز به چسب
- زمان نسبتاً کوتاه فرآیند
- حساسیت کمتر ناخالصی (مثلاً در مقایسه با روش دوغابی)
- سرعت تولید بالاتر (نسبت به روش هایی که به خشک کردن نیاز دارند)
- کاهش ضایعات



# پرس ایزواستاتیک گرم

- پرس ایزواستاتیک گرم یک فرایند ساخت است، که در آن ذرات پودر شده فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها تحت فشار ایزواستاتیک و حرارت بالا به همدیگر می‌چسبند و یک جز واحد را تشکیل می‌دهند.
- این روش برای کاهش تخلخل فلزات و افزایش چگالی بسیاری از سرامیک‌ها به کار می‌رود.



# ریخته گری ژلی

- فرایند ریخته گری ژله ای یک روش جدید برای شکل دهی سرامیک های متخلخل و متراکم و ساختار های فلزی از طریق پلیمریزاسیون است. در این روش همگنی مناسبی در بدنه خام تامین می شود و قطعات خارج شده از قالب دارای ابعاد دقیق و سطوح بسیار صاف می باشد.
- شکل های ساده پیچیده و مرکب مستقیماً توسط این روش ریخته گری می شوند و به دلیل حصول استحکام کافی در این روش امکان ماشینکاری قطعات وجود دارد. این روش شکل دهی دوغاب سرامیکی را از طریق پلیمریزاسیون مونومرها امکان پذیر می سازد.
- در این روش همگنی مناسبی در بدنه خام تامین می شود و قطعات خارج شده از قالب دارای ابعاد دقیق و سطوح بسیار صاف می باشد. این روش قابلیت استفاده از انواع قالب ها و ماشین کاری را دارا می باشد بنابراین برای تولید قطعات سرامیکی پیچیده به کار می رود.

# فرایند ریخته گری ژله ای

شکل های ساده پیچیده و مرکب مستقیماً" توسط این روش ریخته گری می شوند. به دلیل حصول استحکام خام کافی در این روش امکان ماشینکاری قطعات قبل از زینتر وجود دارد.

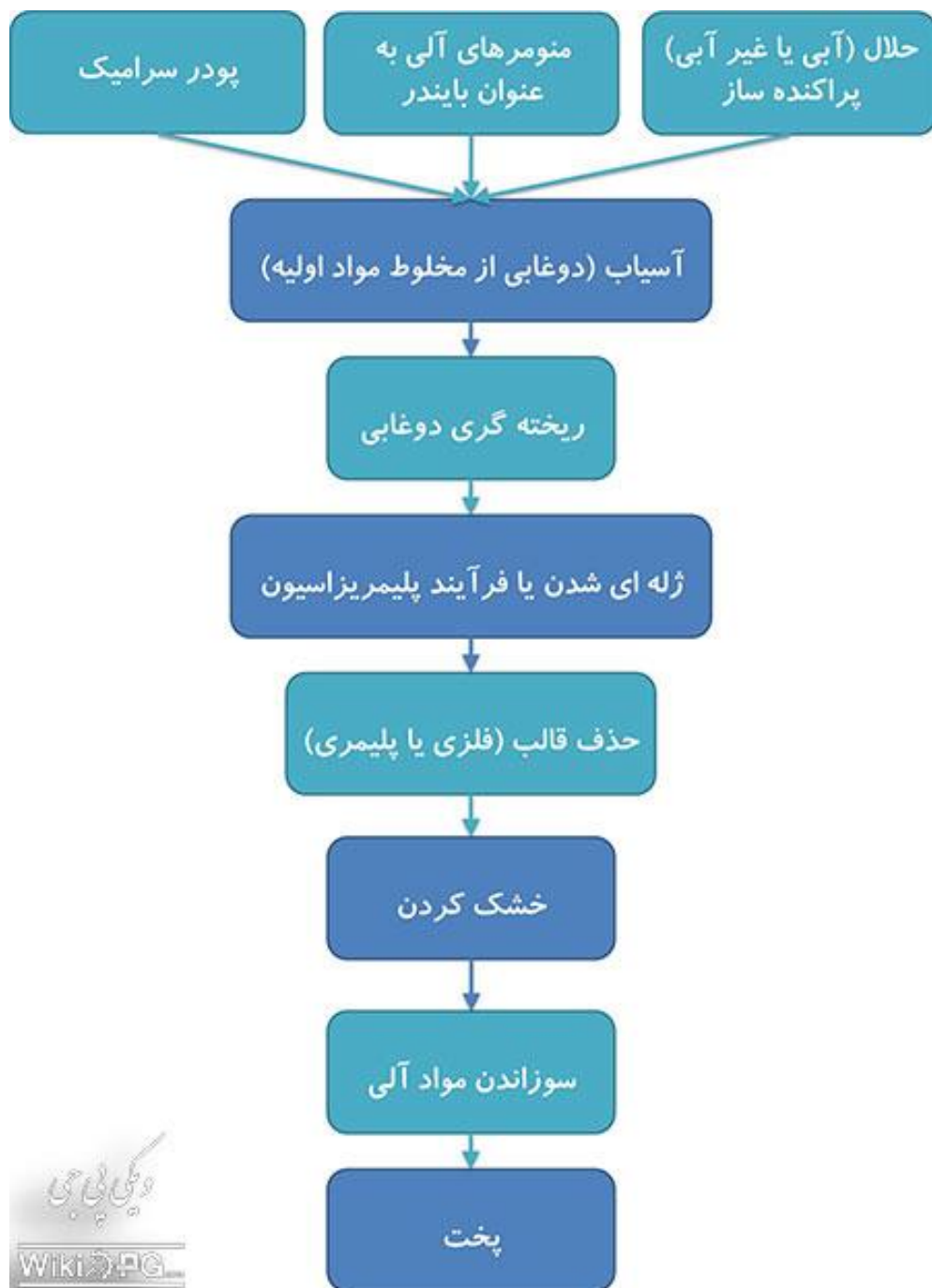
• عوامل مهم موفقیت فرآیند ریخته گری ژله ای:

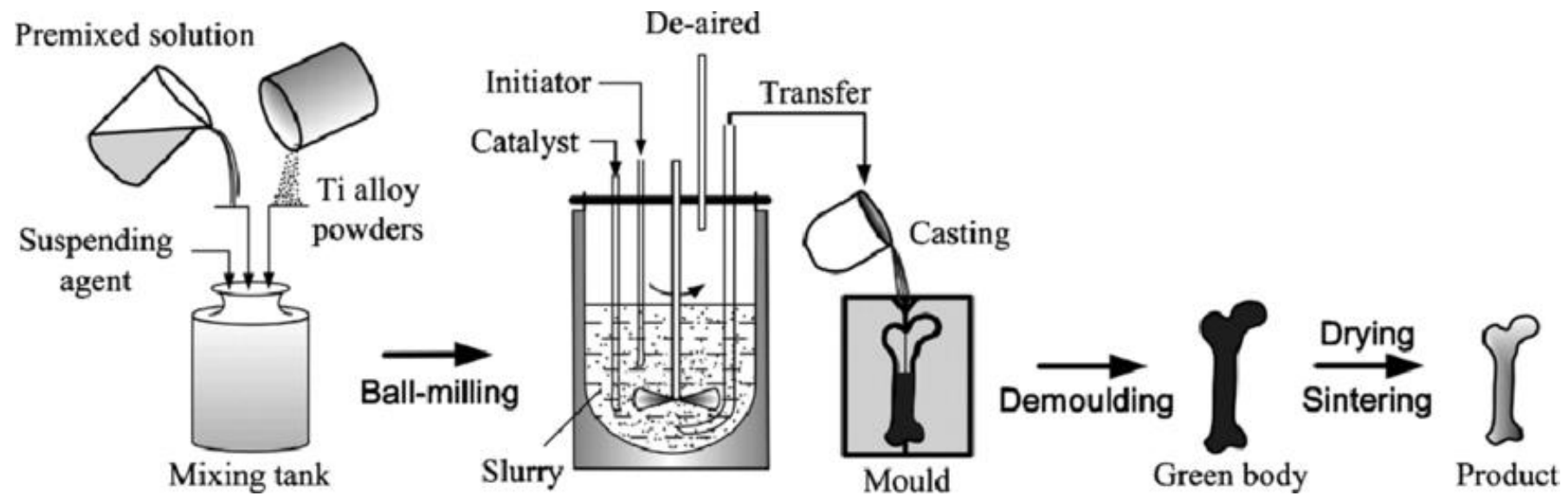
I. بهینه سازی جریان دوغاب

II. انتخاب ماده قالب

III. طراحی قالب

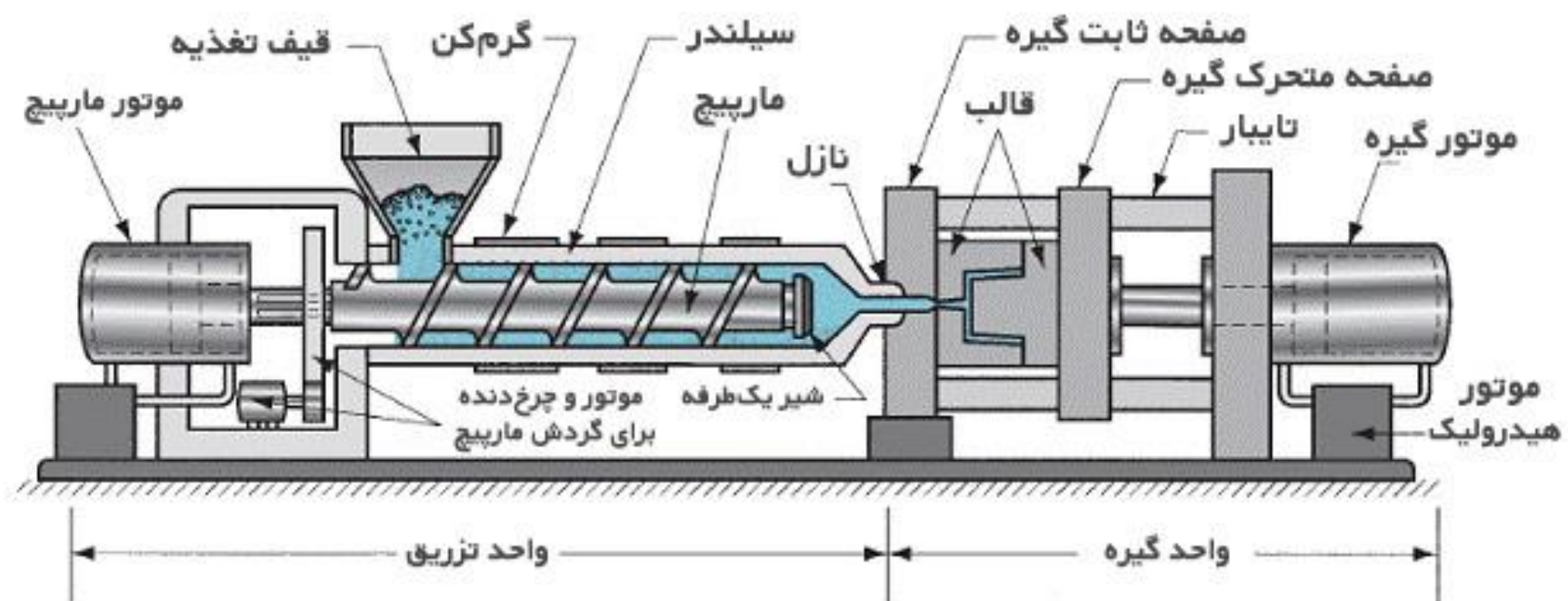
IV. شرایط خشک کردن.





# قالبگیری تزریقی

- یکی از روش‌های تولید، ساخت قطعات بوسیله موادی است که قابلیت تزریق در داخل حفره یک قالب را دارند.
- مواد اصلی که قابلیت تزریق دارند شامل: فلزات، شیشه، الاستومرها و بیشتر پلیمرهای گرما سخت و گرما نرم رایج در بازار می‌باشد.
- مواد ابتدا داخل یک محفظه گرم شده و با یکدیگر ترکیب می‌شوند سپس با فشار داخل حفره قالب وارد می‌شوند. در آنجا سرد شده، سخت شده و شکل هندسی حفره قالب را به خود می‌گیرند.
- روش کار به این صورت است که ابتدا محصول بوسیله یک طراحی صنعتی یا مهندس طراحی شده و سپس قالبهای مربوط به آن توسط قالبساز ساخته می‌شود.
- جنس قالبها فلزی بوده و معمولاً فولاد یا آلومینیوم می‌باشد که با دقت ماشینکاری شده تا به فرم قطعه دلخواه درآید.
- قالبگیری تزریقی کاربرد گسترده‌ای در ساخت قطعات مختلف دارد. از کوچکترین جز خودرو تا کل بدنه خودرو.



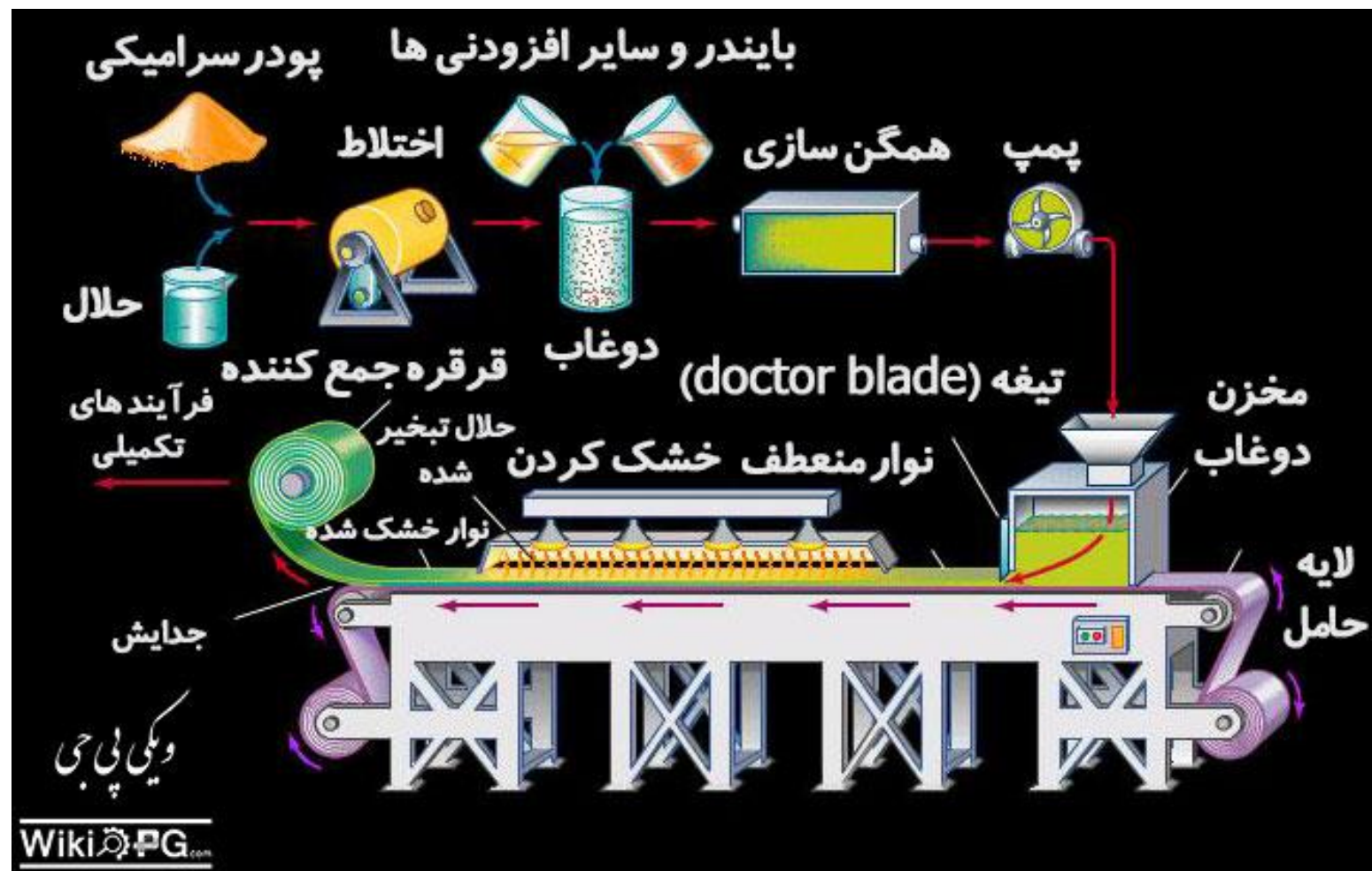




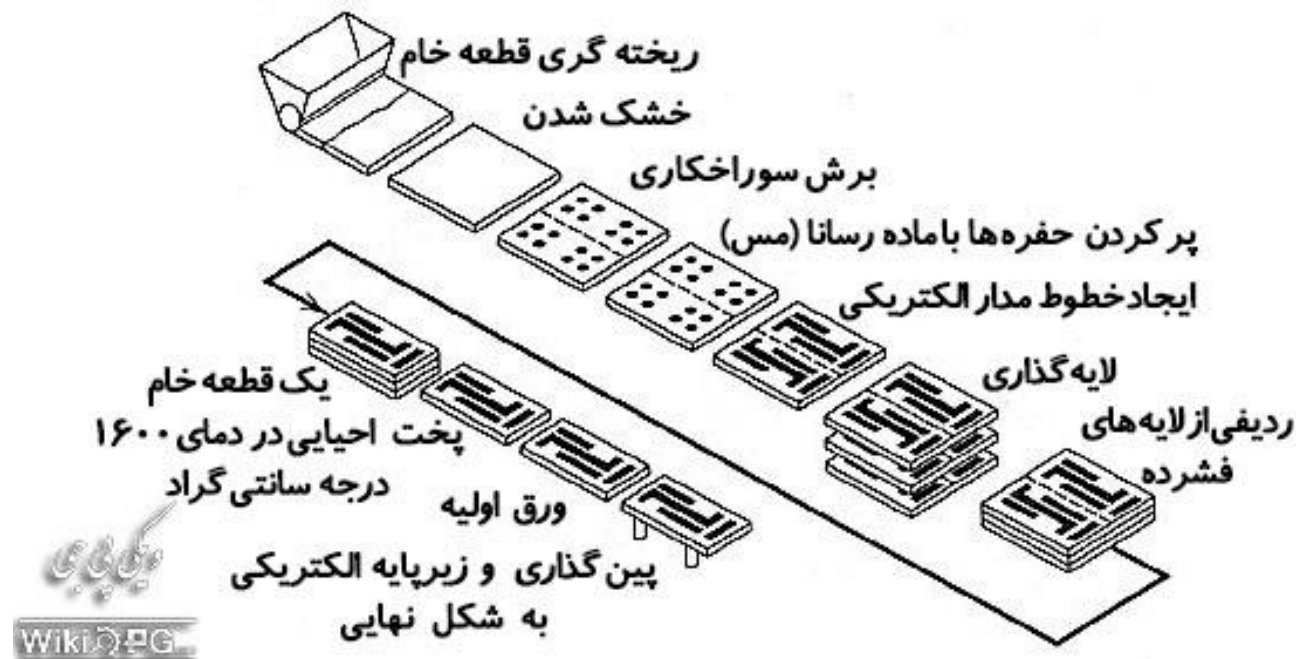
# ریخته گری نواری ( Tape Casting )

- روشی برای شکل دهی سرامیک ها و ایجاد ورقه های نازک از دوغاب سرامیکی است. ورق های نازک سرامیکی چون آلومینا، مولایت، زیرکونیا و دیگر سرامیک های مهندسی جهت پایه های سرامیکی در صنعت الکترونیک کاربرد زیادی پیدا نموده اند، این پایه ها به صورت فیلم نازک چند لایه ای مورد استفاده قرار می گیرد. زیرپایه الکترونیکی خصوصا از نوع آلومینا در سلول های خورشیدی فتوولتایی به صورت سطوح بزرگ و ضخامت کم مورد استفاده قرار گرفته زیرا کمترین آلودگی را روی لایه سیلیسیم ایجاد کرده، ضریب انبساط نزدیک به سیلیسیم دارد و استحکام فشاری مطلوبی نیز دارد. **ریخته گری نواری** روش مناسبی برای شکل دادن قطعات با سطوح بزرگ و ضخامت کم (۱۰۰۰-۲۰ میکرون) است. تولید این ورق های نازک در محیط های آبی با استفاده از عوامل پراکنده ساز جهت افزایش پایداری دوغاب و بایندر های سلولزی جهت افزایش استحکام و چسبندگی و همین طور عوامل روان ساز جهت نرمی و کاهش شکنندگی نمونه خام انجام می گیرد.

# ریخته گری نواری



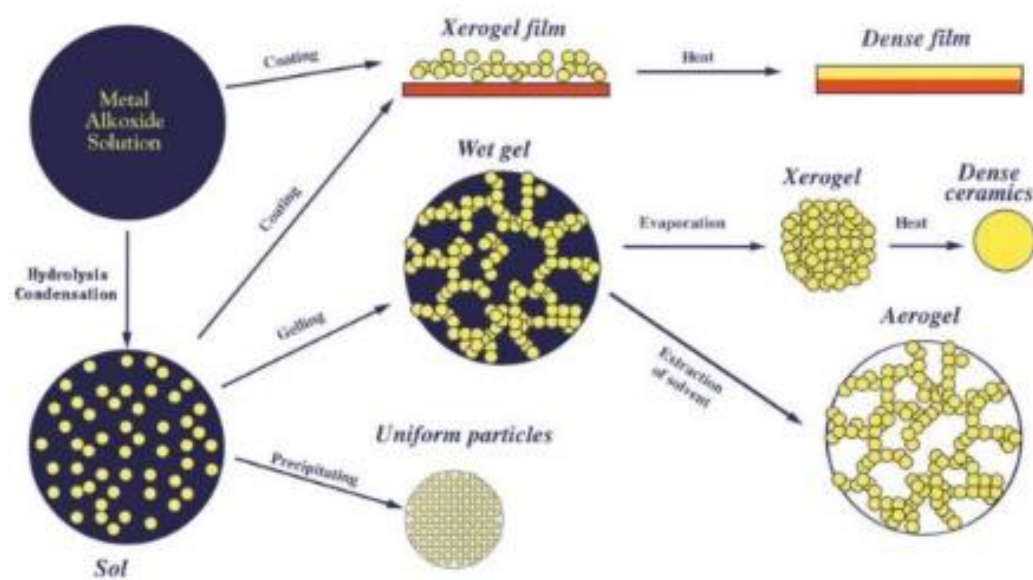
- شمایی از کاربرد فرآیند ریخته‌گری نواری در ساخت زیرپایه‌های الکترونیکی چندلایه‌ای از جنس آلومینا جهت مصرف در مدارهای تجمعی الکترونیک



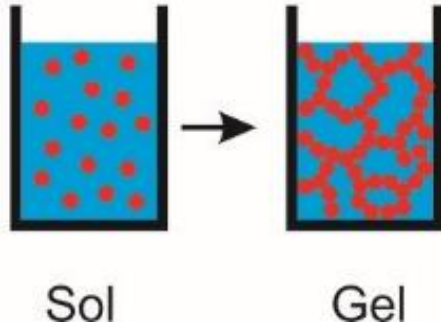
# سل-ژل

روش شیمیایی تر  
حلال ( آب یا الکل)  
دمای پایین واکنش

سل-ژل می تواند به عنوان ماده قالب  
گیری یا به عنوان حد واسط فیلم های  
خیلی نازک از اکسیدهای فلزی برای  
فرآیندهای مختلف استفاده شود.

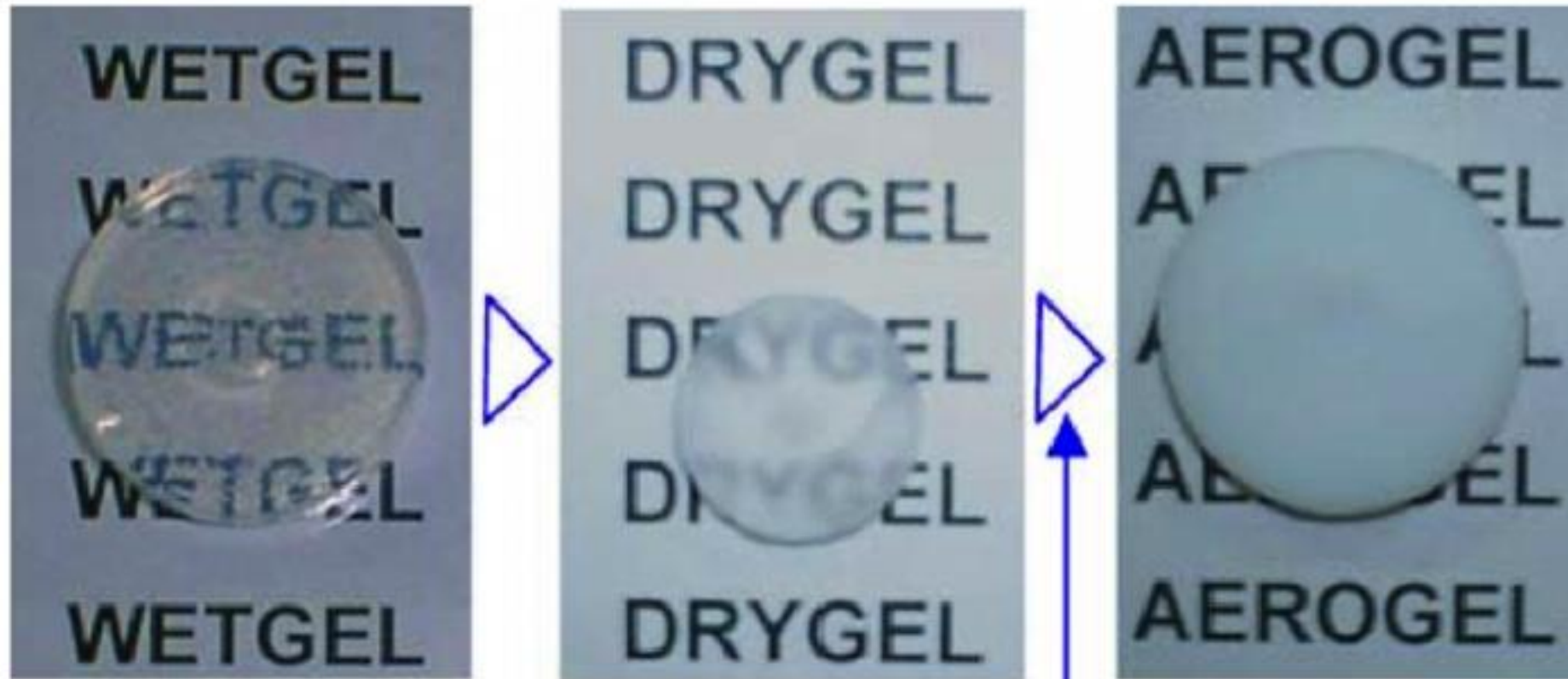


## • محبوبیت روش سل - ژل:



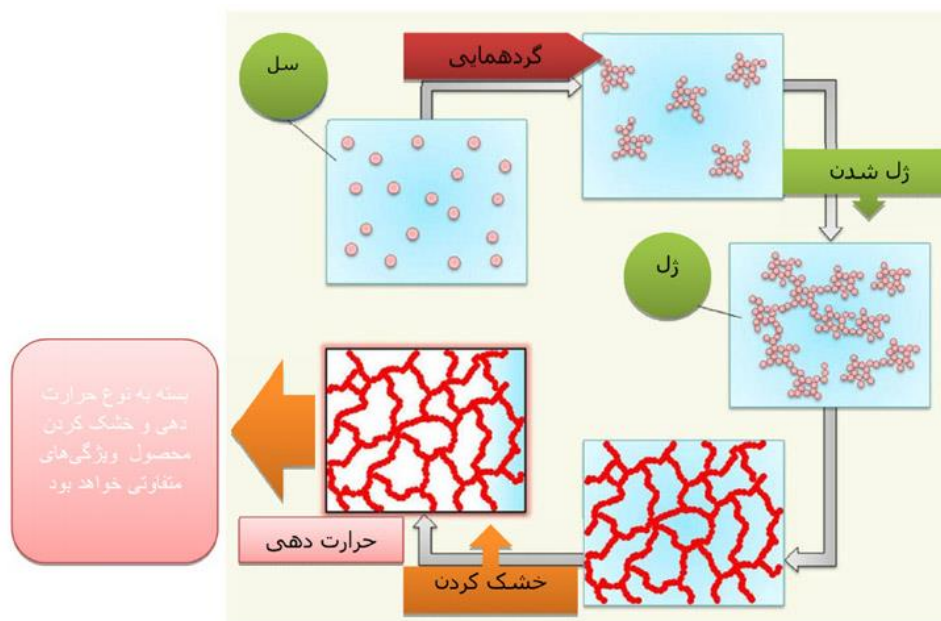
- (۱) سنتز در دمای پائین
- (۲) ابزار انجام آن ساده است
- (۳) تهیه محصولاتی با خلوص بالا
- (۴) راندمان تولید بسیار بالا
- (۵) تولید قطعات اپتیکی با اشکال پیچیده
- (۶) سنتز ترکیبات یکنواخت به صورت اکسیدهای کامپوزیتی
- (۷) امکان طراحی ترکیب شیمیایی و به دست آوردن ترکیب همگن وجود دارد
- (۸) امکان استفاده از محصول به اشکال خاص مثل الیاف، آئروژل و تهیه پوشش سطوح
- (۹) امکان استفاده از این فرایند برای سنتز مواد در حالت بی-شکل و به کارگیری آنها جهت لایه‌های نازک
- (۱۰) تولید مواد دارای خواص فیزیکی اصلاح شده مانند ضریب انبساط حرارتی پایین و جذب اشعه UV کم و شفافیت اپتیکی بالا
- (۱۱) تولید مواد متخلخل که اجازه غنی شدن با ترکیبات آلی و پلیمری را می‌دهد
- (۱۲) واکنش پذیری شیمیایی بالای پیش ماده‌ها به دلیل انجام فرایند در فاز محلول
- (۱۳) کنترل دقیق ساختار مواد با امکان تنظیم متغیرهای مرحله اولیه تشکیل سل و تشکیل شبکه
- (۱۴) سرمایه‌گذاری اولیه کم و در عین حال کیفیت بالای محصولات





**Springback phenomena**

# مراحل فرآیند سل - ژل



- مخلوط کردن مواد اولیه

- شکل دهی

- ژل شدن

- پیرشدگی

- خشک کردن

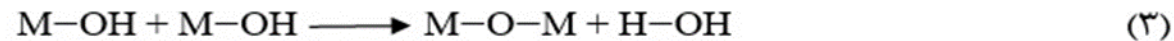
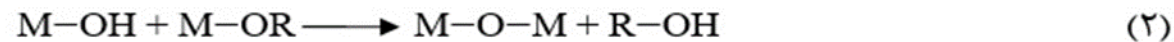
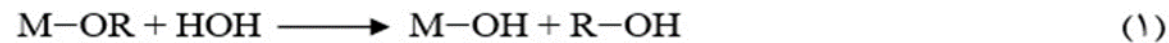
- آب زدایی

- متراکم کردن



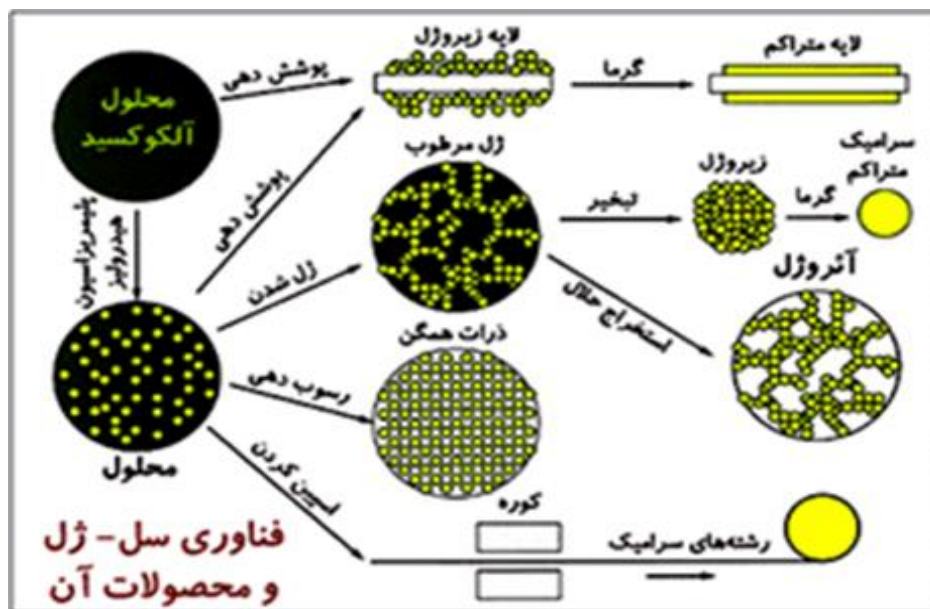
# مخلوط کردن مواد اولیه

- شامل مخلوط کردن پیش ماده با آب، حلال و مواد افزودنی دیگر
- سل اولیه معمولاً شفاف است
- مواد افزودنی میتوانند شامل عامل کمپلکس ساز ، عامل پلیمرساز و کاتالیزورها
- با اضافه کردن آب هیدرولیز و پلیمریزاسیون طبق واکنشهای ۱ تا ۳ اتفاق میافتند.



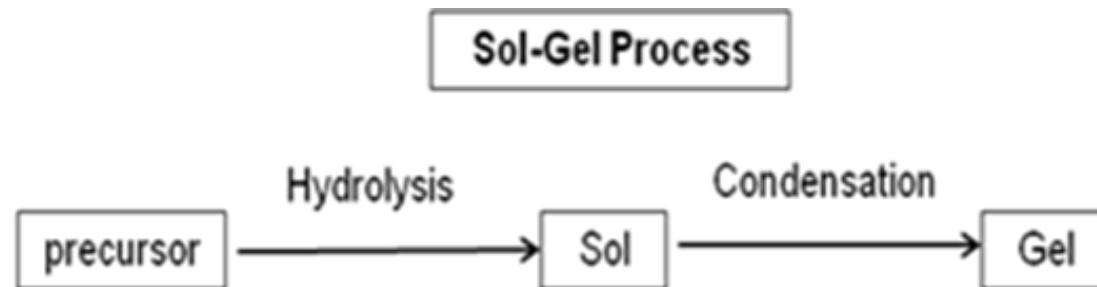
# شکل دهی

- پارامتر مهم و قابل کنترل برای تهیه محصولات مختلف، ویسکوزیته سل و ژل است.
- ویسکوزیته محلول تحت تاثیر واکنش های هیدرولیز، پلیمریزاسیون و اندازه ذرات سل می باشد. در مرحله شکل دهی از فرآیند سل ژل می توان سل، که محلولی با ویسکوزیته کم است، را با تغییر ویسکوزیته به قالب معینی شکل داد.



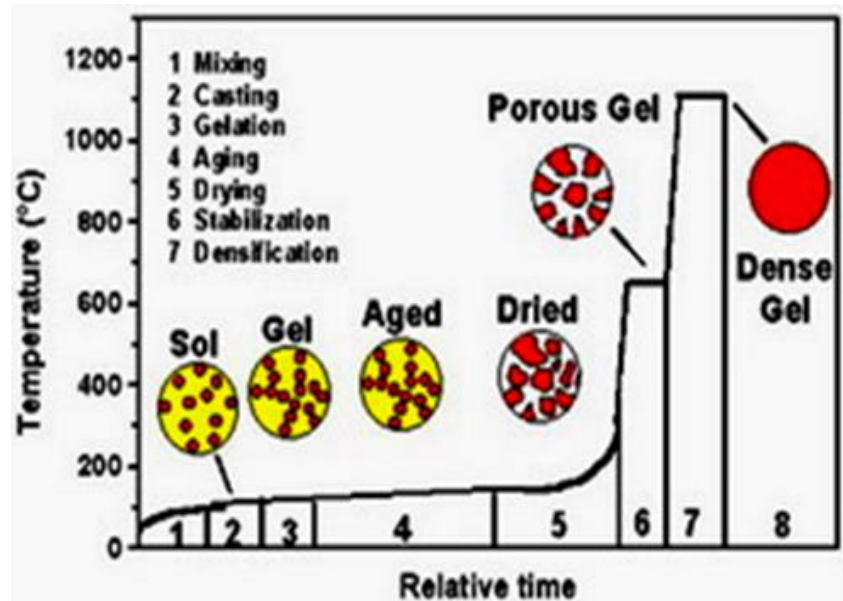
# ژل شدن

- در این مرحله واکنش های هیدرولیز و پلیمریزاسیون باعث تبدیل مولکول های محلول هموژن اولیه (سل) به یک مولکول نامحدود سنگین سه بعدی پلیمری به عنوان "ژل" می شوند. در طول فرآیند سل-ژل در یک بازه، ویسکوزیته سل به شدت افزایش می یابد که به آن نقطه ژل شدگی می نامند.



# پیرشدگی

- ماندگاری شامل رها کردن سل متراکم در محیط و در بازه ای از زمان به همراه تغییر فیزیکی سل، است. در طول فرآیند ماندگاری پلیمریزاسیون ادامه یافته است. بعد از رسیدن سل به نقطه ژل شدگی عملیات ماندگاری با افزایش به هم پیوستگی و اتصال بین ذرات سبب تقویت، استحکام و رشد ساختار شبکه ای ژل می شود. دوره زمانی ماندگاری می تواند شامل چند ساعت و یا چند روز باشد.



## خشک کردن

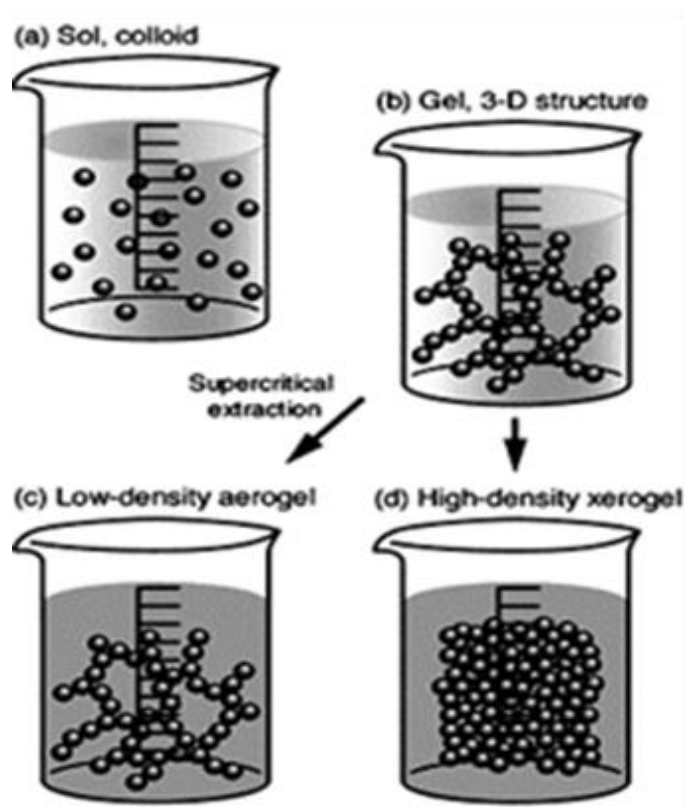
- در طول مرحله خشک کردن، مایع از شبکه منافذ به هم پیوسته خارج شده و استحکام شبکه، به علت تراکم فاز جامد، افزایش یافته و شبکه ژل تغییر شکل می دهد.

## آب زدایی

- شامل حذف گروه های هیدروکسیل سطحی از شبکه خلل و فرج هاست، که منجر به تهیه جامد با تخلخل زیاد می شود.

# متراکم شدن

- متراکم کردن، آخرین مرحله سنتز مواد، به روش سل ژل است و شامل حرارت دهی ژل متخلخل در دمای بالا است. در این مرحله منافذ و خلل و فرج ها کاهش می یابند و چگالی افزایش می یابد.

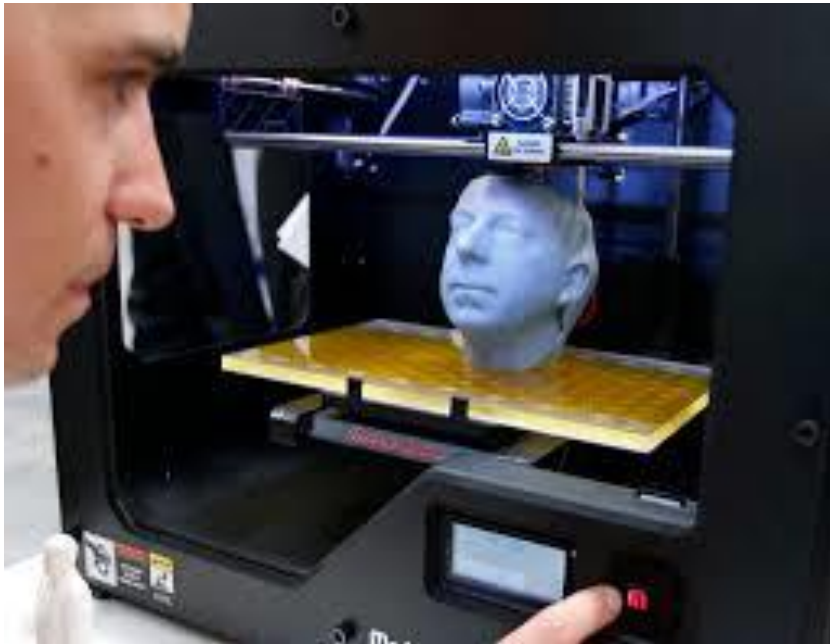


## پرینت سه بعدی

- پرینت سه بعدی به روشی از ساخت گفته می شود که با قرار دادن لایه به لایه مواد بر روی هم قطعه ی نهایی را می سازند. پرینتر های سه بعدی توانایی ساخت پیچیدگی هایی را دارند که هیچ دستگاه دیگر نمی تواند. همچنین نمونه سازی سریع و توانایی تولید تعداد زیادی از قطعات منحصر به فرد بدون نیاز به تمهیدات و آماده سازی خاص، یکی دیگر از ویژگی های بی نظیر این تکنولوژی است.



- خاستگاه پرینت سه بعدی در “نمونه سازی سریع” و در اصول نمونه سازی صنعتی با هدف سرعت بخشیدن به مراحل اولیه ی تولیدات به روشی سریع و ساده یافت شده است، که امکان تکرار چندباره ی تولید یک محصول برای دستیابی به بازده و سرعت بیشتر در یک محصول بهینه سازی شده را فراهم می نماید. این امر باعث صرفه جویی در زمان و پول در ابتدای فرایند کلی توسعه ی تولید یک محصول شده و تجهیز فرایند تولید را تضمین می نماید.





# کاربرد

- پزشکی و دندانپزشکی
- هوافضا
- خودرو
- جواهرسازی
- مجسمه سازی

