خشک کن پاششی

مقدمه

- **خشک کردن پاششی:** تغییر شکل از حالت مایع به شکل ذره خشک شده به وسیله پاشیدن مایع به داخل محیط خشک کننده داغ.

-این فرایند تک مرحله ای برای تبدیل شکل‌های مختلف مایع همچون محلول های آبی و آلی امولسیون ها و سوسپانسیون به پودر های خشک استفاده می شود.

- **مزایای خشک کردن پاششی :**

۱-ساده و سریع است

۲-در صنایع دارویی، غذایی و شیمیایی متداول است.

۳-تجهیزات خشک کردن پاششی به طور تجاری موجود میباشد.

۴-پودر های تولیدی دارای کیفیت بالا و محتوای رطوبت پایین و در نتیجه ماندگاری بالا هستند.

۵-اثر سرد کنندگی تبخیر حلال باعث حفظ دمای قطرات در محدوده نسبتاً پایین می شود که موجب می شود این روش مناسب برای محصولات حساس به حرارت باشد.

۶-انعطاف پذیری بالا برای کنترل اندازه ذره و مورفولوژی به وسیله تغییر پارامترهای فرآیند و فرمولاسیون ورودی.

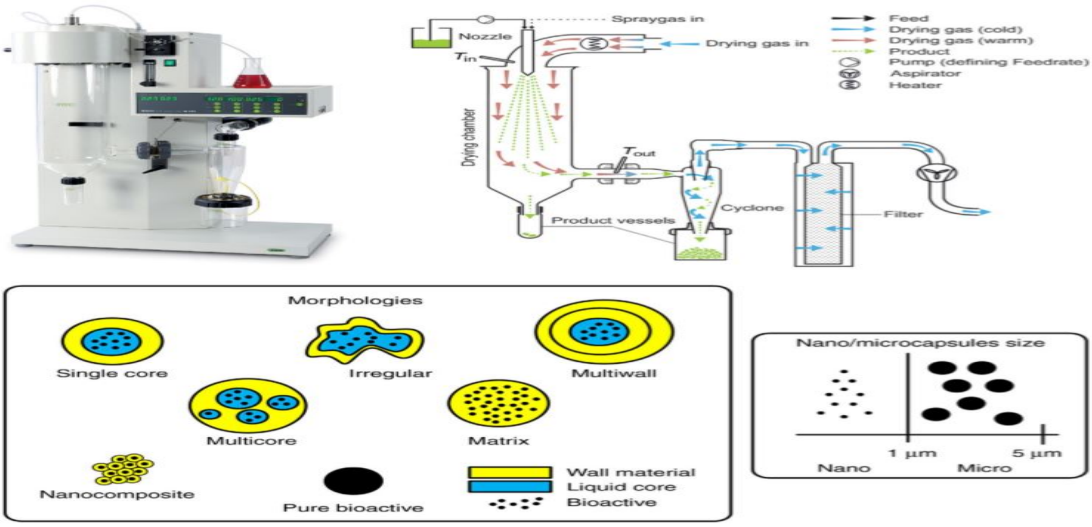
۷-پودر خشک شده پایداری بالاتر، محافظت بهتر در مقابل شرایط محیطی (همچون اکسیداسیون، نور و دما)، جابجایی و نگهداری راحت تر و انحلال پذیری مجدد در محلول های آبی را دارا می باشد.

کاربردها: استفاده برای درونپوشانی طعم دهنده ها، ویتامین ها، مواد معدنی، نمک ها، رنگ ها، روغن‌ها و چربی‌ها، ادویه ها، پلی فنول ها، پروتئین ها، کاروتنوئیدها، آنتی اکسیدان ها، سلولهای زنده پروبیوتیک، آنزیم ها، پپتیدها و بسیاری موارد دیگر

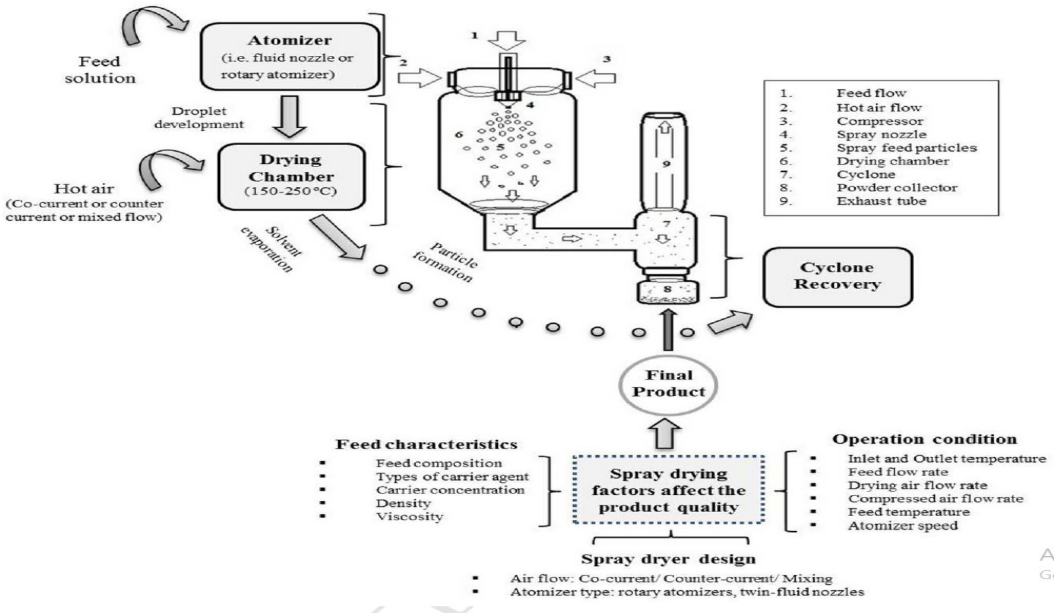
فرآیند خشک کردن پاششی شامل سه مرحله اساسی است:

1. اتمیزه کردن خوراک مایع
2. خشک کردن قطرات پاشیده شده در گاز خشک کننده و تشکیل ذرات خشک
3. جداسازی و جمع آوری محصول خشک شده از گاز خشک کننده

خشک کن پاششی مرسوم و مورفولوژی و اندازه ذرات



فاکتورهای موثر بر کیفت محصول خشک کن پاششی مرسوم



انواع ذره پاش (ATOMIZER)

۱- **نازل های فشاری یا تک سیالی** : سیال با فشار زیاد از داخل یک منفظ به داخل محفظه خشک کن پاشیده می شود.

۲- **ذره پاش چرخان**: با استفاده از نیروی گریز از مرکز ذرات مایع به صورت پودر در می آیند.

۳- **نازل های دو سیالی**: اساس کار این نازل ها مانند نازل های فشاری است، با این تفاوت که در این نوع نازل برای ریز کردن مایع، هوا از دو مسیر تحت فشار با ماده غذایی مخلوط می شود و آن را به صورت ذرات مورد نظر در می آورد.

۴- **نازل غربالی** (مورد استفاده در نانو خشک کن)

نوآوری های جدید در زمینه خشک کن پاششی

۱- خشک کن پاششی نانو

۲- خشک کن پاششی خلایی (**VACUUM SPRAY DRYING**)

۳-خشک کن پاششی با هوای رطوبت زدایی شده (***DEHUMIDIFIED AIR SPRAY DRYING***)

خشک کن پاششی نانو (NANO SPRAY DRYER)

- **مشکلات تولید نانو ذره با روش خشک کردن پاششی:**

۱-سیکلون های معمولی قادر به جمع آوری ذرات زیر ۲ میکرومتر نیستند حتی با یک سیکلون شیشه‌ای با عملکرد بالا متوسط اندازه ذره نمی‌تواند به زیر ۱/۴میکرومتر کاهش داده شود.

۲- محدودیت دیگر جریان گاز ناهمسان (آشفته) است که باعث رسوب ذرات بر دیواره محفظه خشک کن می شود.

۳- اتمیزه کننده های مرسوم اجازه تولید قطرات به اندازه کمتر از میکرون را نمی دهند.

خشک کردن پاششی نانو

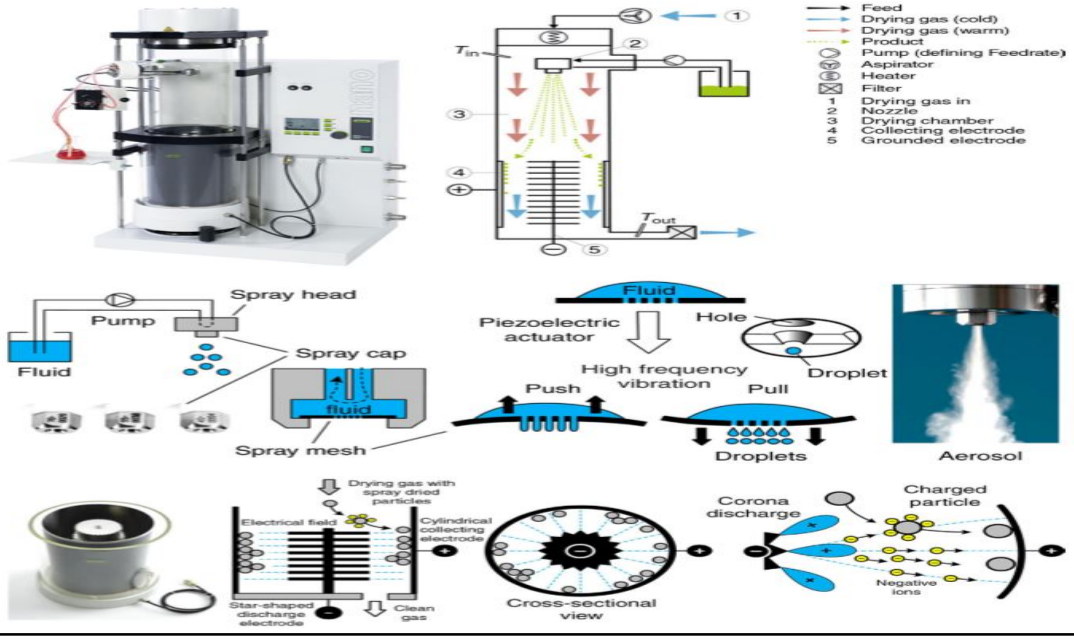
- خشک کن پاششی نانو در سال ۲۰۰۹ معرفی شد.
- **این فناوری نوظهور بر پایه موارد زیر برای حل مشکلات خشک کن های مرسوم ایجاد شد:**

۱-جریان آرام گاز خشک کن به صورت لامینار

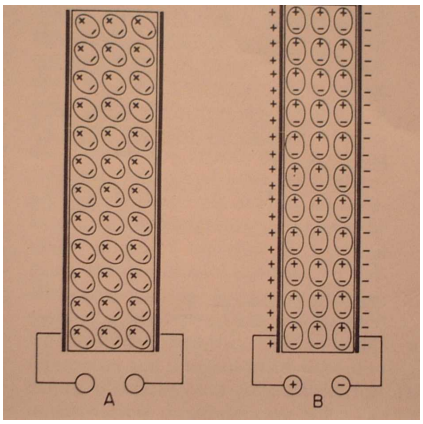
۲-فن آوری سرند (غربال) لرزنده پاششی برای تشکیل قطرات کوچک

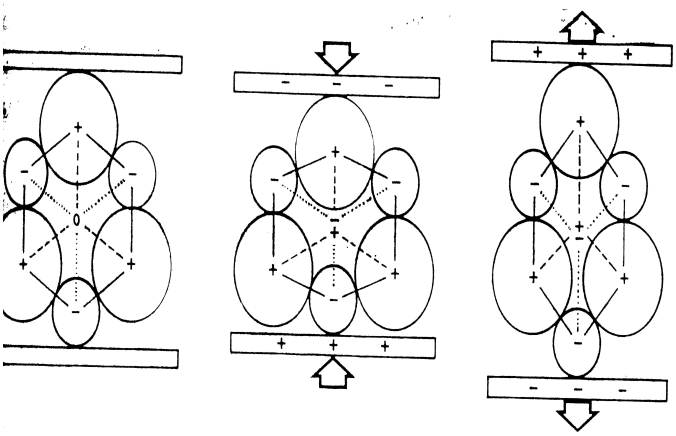
۳-رسوب دهنده الکتروستاتیکی بسیار کارآمد برای جمع آوری نانو ذرات

نانو خشک کن پاششی و عملکرد آن
پایین: اصول کار جمع کننده ذره الکترواستاتیک

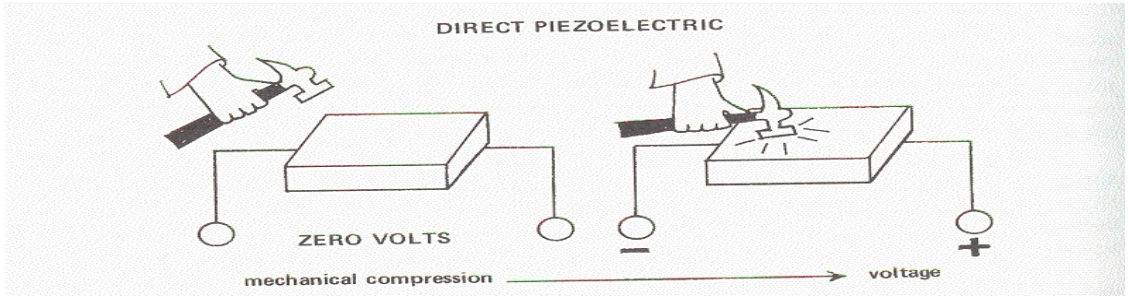


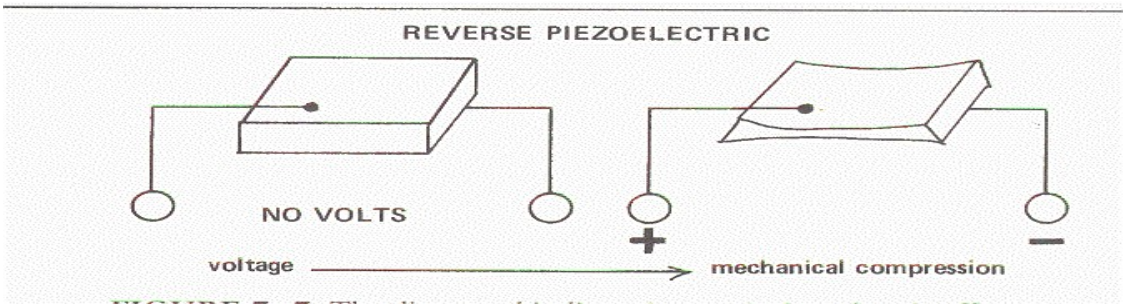
مواد پیزوالکتریک



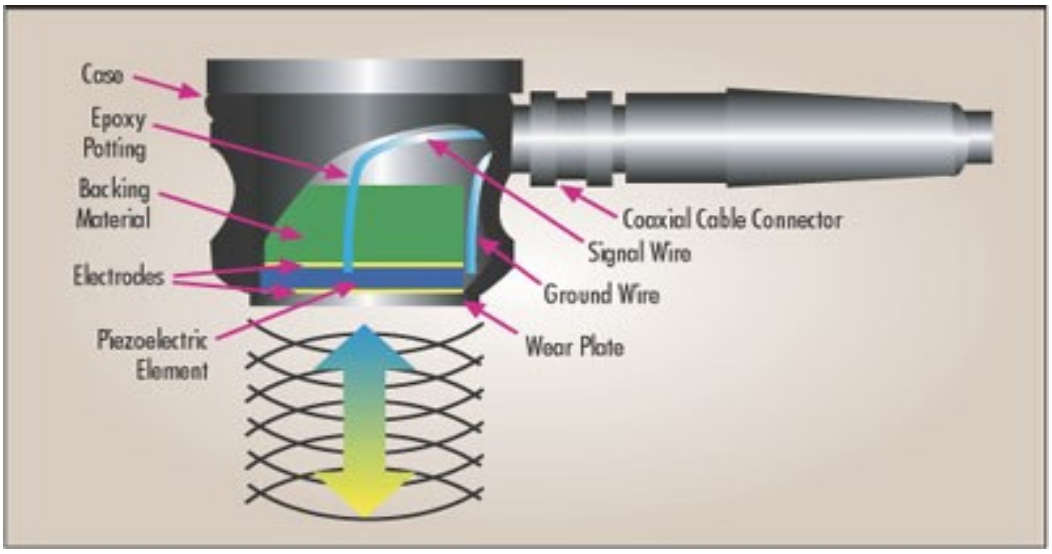


– برخی از مواد با ایجاد فشار روی آنها ایجاد جریان الکتریسیته کرده و بالعکس با ایجاد جریان منقبض یا منبسط می شوند.


DIRECT PIEZOELECTRIC
ZERO VOLTS
mechanical compression
voltage


REVERSE PIEZOELECTRIC
NO VOLTS
voltage
mechanical compression

ساختار مولد امواج فراصوتی



تولید قطره با نازل غربالی

- تولید قطره در نانو خشک کن پاششی برپایه فناوری غربال لرزاننده است.
- فناوری غربال لرزاننده حاوی یک سر پاششی و یک فعال کننده پیزوالکتریک برانگیخته شده به وسیله یک مدار الکترونیکی است.
- یک کلاهک پاشش قابل تعویض پیچ شده روی بخش پایین تر از سر پاششی قرار دارد.
- غربالهای پاششی موجود با قطر روزنه ۷،۵/۵،۴ میکرومتر موجود هستند.
- تعداد زیاد سوراخ ها در غشای نازک به وسیله سوراخ کردن با لیزر ساخته می‌شوند.
- سوراخ ها یک شکل مخروطی با قطر بزرگتر به سمت منبع مایع و قطر باریک به سمت آزادسازی قطره دارند.
- لرزش سریع به عنوان یک پمپ کوچک عمل می کند که مایع را از طریق سوراخ برای تشکیل قطرات با اندازه یکسان می کشد.
- میلیون‌ها قطره با اندازه دقیق با توزیع اندازه باریک در هر ثانیه ایجاد می شود.
- اندازه قطره به اندازه سوراخ غربال و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی مایع همچون ویسکوزیته و کشش سطحی بستگی دارد.
- مایعات بسیار ویسکوز ممکن است منجر به مکث در تولید قطره و یا حتی توقف در تولید شوند.
- مزیت اصلی فناوری غربال لرزاننده توانایی آیروسل سازی از مقدار بسیار کم مایعات در حد میلی لیتر است.

جمع آوری ذره

- مکانیسم جمع آوری ذره در خشک کن پاششی نانو بر اساس باردهی الکترواستاتیک است که برخلاف سیکلونها مستقل از جرم ذره می باشد.
- اصل کار کرد جمع کننده ذره الکترواستاتیک شامل مراحل اساسی زیر است:

-تولید یک میدان الکتریکی حدود ۱۵ کیلوولت بین الکترودهای تخلیه و جمع کننده

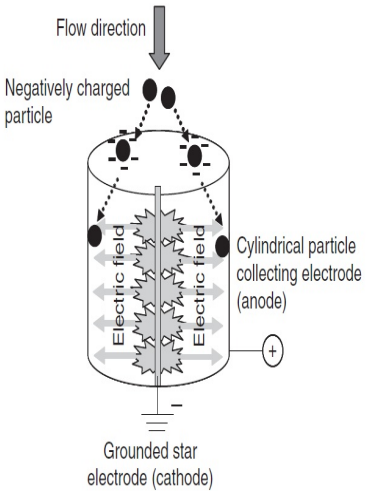
-تولید یون های باردار منفی در گاز

-باردهی ذرات خشک شده پاششی

-انحراف ذرات به الکترود جمع‌آوری کننده

Table 2. Types of particle collectors.

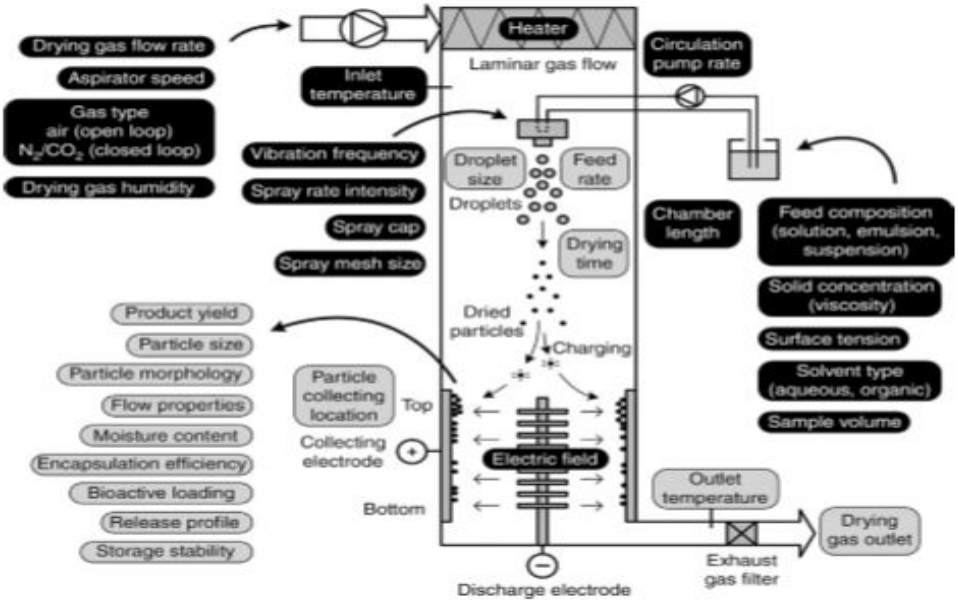
Collector	Collection efficiency	Effective collection size range (μm)	Strengths/weaknesses
Filtration (filter bag)	Up to 90 – 99%	0.1 – 20	Medium to high equipment cost Medium to high operating cost Possible contamination of particles with fiber during recovery
Cyclone	Up to 60 – 70%	2 – 100	Medium equipment cost Medium operating cost Pure, free-flowing powder
Electrostatic precipitator	Up to 90 – 99%	0.05 – 10	High equipment cost Small to medium operating cost Pure, caked powder



مقایسه ویژگی های اصلی نانوخشک کن پاششی با خشک کن پاششی مرسوم آزمایشگاهی

Characteristics	Nano Spray Dryer B-90	Mini Spray Dryer B-290
Major benefits	Small sample quantities, fine particles, high yields	Traditional spray drying, established process
Minimum sample amount	2 mL	30 mL
Maximum sample viscosity	<10 cps	<300 cps
Spray generation device	Vibrating mesh	Two-fluid nozzle (optional: ultrasonic nozzle)
Spray generation energy	Piezoelectric actuator (ultrasonic frequency)	Pressurized gas (two-fluid nozzle), ultrasonic vibration (ultrasonic nozzle)
Nozzle diameter	4.0, 5.5, and 7.0 µm (spray mesh hole size)	0.7, 1.4, and 2.0 mm (nozzle tip diameter)
Water droplet size range	3–8 µm (4.0 µm spray mesh), 4–12 µm (5.5 µm), 5–15 µm (7.0 µm)	5–30 µm (0.7 mm tip)
Water droplet size distribution	Narrow (span 1.2–1.6)	Broader (span 1.8) (span = $(d_{90}-d_{10})/d_{50}$)
Dried particle size range	0.3–5 µm	2–25 µm
Maximum drying temperature	120°C	220°C
Maximum drying gas flow	10 m^3/h (laminar)	35 m^3/h (turbulent)
Drying chamber diameter	0.18 m	0.165 m
Water evaporation capacity	200 mL/h	1 L/h
Water feed rate (depends on application, parameter settings, and spray head)	10–20 mL/h (4.0 µm spray mesh) 25–50 mL/h (5.5 µm) 80–150 mL/h (7.0 µm)	Depends on peristaltic pump settings, 50% corresponds to about 900 mL/h
Particle separation device	Electrostatic particle collector	Cyclone and glass vessel
Yield	Up to 90%	Up to 70%
Scale-up capability	Limited by vibrating mesh technology and electrical particle collector	Possible to upscale to kg and ton scale

پارامترهای فرآیند و متغیرهای فرمولاسیون (سیاه) قابل تنظیم، خروجیها(خاکستری)



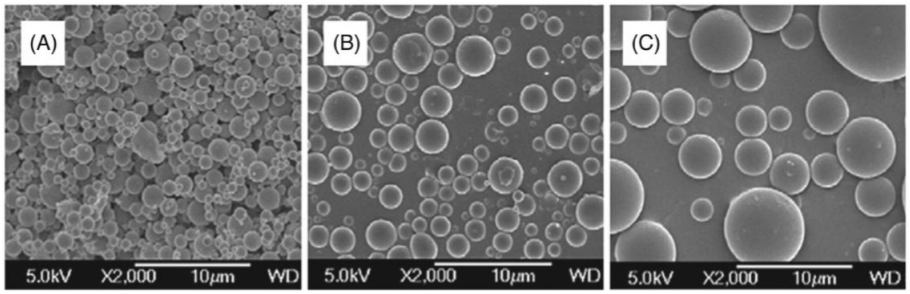
پارامترهای اصلی فرآیند خشک کردن پاششی و اثرشان را بر روی ویژگی های پودر نهایی

Parameter	Drying gas flow rate ↑	Drying gas humidity ↑	Inlet temperature ↑	Spray mesh size ↑	Spray rate intensity ↑	Circulation pump rate ↑	Solid concentration (viscosity) ↑	Surfactant/ stabilizer in feed ↑	Solvent instead of water
Outlet temperature	⬆	↑	⬆	↑	⬇	—	↑	—	⬆
Droplet size	—	—	—	⬆	↑	↑	—	↓	↓
Particle size	—	—	↑	⬆	↑	↑	⬆	↓	↓
Feed rate	—	—	—	⬆	⬆	↑	⬇	↑	↑
Moisture content	⬇	⬆	↓	—	↓	—	↓	—	⬇
Yield	—	↓	↑	—	—	—	↑	↑	↑
Stability	—	—	⬇	↑	⬇	↑	—	⬆	—

⬆/⬇, Strong increasing/decreasing influence; ↑/↓, weak increasing/decreasing influence; —, minimal or no influence.

اثر اندازه غربال پاششی و غلظت جامد را بر روی اندازه ذرات(نانومتر)

Substance	Solvent	Concentration (% w/v)	Mesh size			References
			4.0 μm	5.5 μm	7.0 μm	
Chitosan (low-density)	0.5% acetic acid	0.025	95	215	265	Ngan et al. (2014)
Ethambutol	Water	1	220	—	—	Ahmad et al. (2014)
Gentamicin sulfate in alginate/ pectin	Water	0.1	310	520	850	De Cicco et al. (2014)
		0.25	345	550	980	
		0.5	405	610	1000	
Arabic gum	Water	0.1	355	—	—	Li et al. (2010)
		1	580	—	—	
Whey protein	Water	0.1	420	—	—	Li et al. (2010)
		1	595	—	—	
Sodium chloride	Water	0.1	515	—	—	Li et al. (2010)
		1	995	—	—	
Disodium phosphate	Water	0.1	500	—	—	Schmid et al. (2011)
Trehalose	Water	0.1	800	—	—	Schmid et al. (2011)
Bovine serum albumin (with surfactant)	Water	0.1	460	—	—	Lee et al. (2011)
		1	700	1700	2600	
Sodium alginate	Water	0.13	760	—	—	Blasi et al. (2010)
Vancomycin in chitosan	0.5% acetic acid	0.2	450	—	—	Cerchiara et al. (2015)
Curcumin in albumin	Water	0.5	715	—	—	Jain (2014)
Salbutamol sulfate	Water	1	1000	1600	3100	Littringer et al. (2013)
Galactosidase in trehalose	Water	5	1800	4500	4900	Bürki et al. (2011)



عکس های SEM قطرات سرم آلبومین گاوی با اندازه غربال پاشش۴ و ۵/۵ و۷ میکرومتر به ترتیب ذرات با اندازه تقریبی ۷.۷۰.۱و۲/۶ میکرومتر به ترتیب در غلظت ٪۱

غلظت جامد

- غلظت جامد بر سرعت خوراک دهی، اندازه ذره و دمای خروجی اثر می گذارد.
- سطح بالاتر مواد جامد باعث وجود مایع کمتری برای تبخیر خواهد شد و این باعث افزایش دمای خروجی می شود.
- غلظت مواد جامد بالاتر در یک قطره باعث افزایش اندازه ذره می شود.
- افزایش وزن مولکولی باعث افزایش اندازه ذره می شود.

نرخ خوراک

مقدار مایع پاشیده شده در واحد زمان نرخ خوراک می باشد.

- نرخ خوراک وابسته به اندازه غربال پاشش، پارامترهای فرآیند و فرمولاسیون خوراک است.
- افزایش اندازه غربال باعث افزایش نرخ خوراک می شود.
- افزودن حلالهای آلی به آب باعث افزایش نرخ خوراک می شود.
- پیش تیمار غربال با محلولهای سورفاکتانت باعث افزایش نرخ خوراک می شود.
- غلظت جامد بالاتر باعث کاهش تخلیه قطرات از سوراخهای غربال لرزان و در نتیجه نرخ خوراک پایین‌تر می شود.

بازدهی محصول

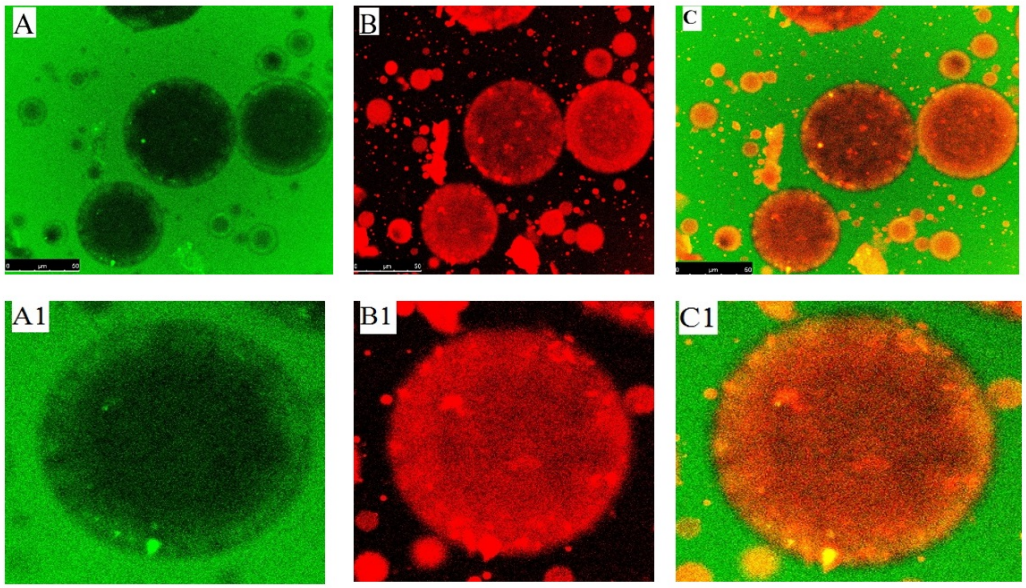
- بازدهی محصول برپایه جرم جامد اولیه در خوراک و وزن پودر حاصل شده بعد از خشک کردن پاششی نانو محاسبه می شود.
- تحت شرایط بهبود یافته بازدهی بسیار بالای ۷۶ تا ۹۶ درصد می‌تواند برای ۱۰۰ میلی گرم نمونه از مواد مختلف به دست آید.
- بازدهی بالا از مقدار بسیار کم نمونه، نانو خشک کن پاششی را برای مواد بیولوژیکی گرانبها همچون پادتن های مونوکلونال و پروتئین های نوترکیب مناسب می سازد.
- نمونه های پودر بخش پایین تر الکترود جمع کننده به صورت جزئی کوچکتر از ذرات حاصل از بخش بالایی می باشند.
- نانو خشک کن پاششی به‌طور محوری متقارن است در نتیجه رسوب ذرات با اندازه یکسان در موقعیت افقی یکسان سیلندر جمع کننده اتفاق می افتد.

مورفولوژی ذره

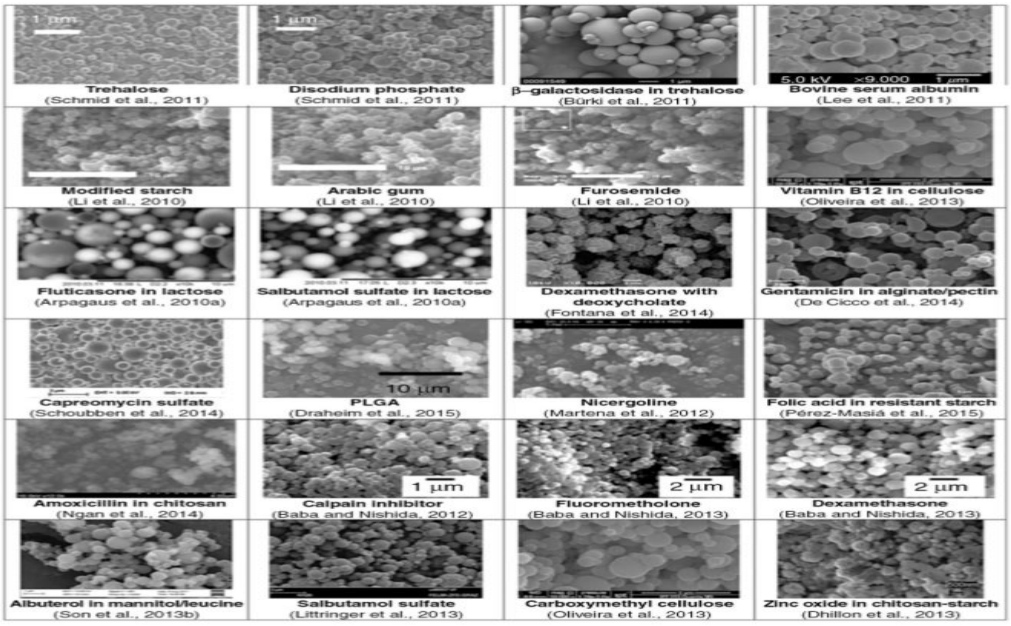
- SEM به طور معمول برای بررسی پودرهای خشک شده پاششی نانو استفاده می شود که اطلاعات مهمی را راجع به مورفولوژی ذره همچون اندازه، شکل و ساختار سطحی ذرات فراهم می کند.
- میکروسکوپ نوری فلورسنت برای تایید درون پوشانی مناسب استفاده میشود.
- مورفولوژی ذرات تهیه شده به وسیله روش خشک کردن پاششی نانو شامل تراکم، خالی بودن، تخلخل و ساختار های درونپوشانی شده با شکل های کروی، چروکیده، خشکیده و شبیه دونات می باشند.
- شکل ذره به ویژگی‌های خوراک (مثل نوع ماده، غلظت جامد، حلال و سورفاکتانت) و شرایط خشک کردن (مثل دما) بستگی دارد.
- خشک کردن آهسته باعث ذرات متراکم تر می شود.
- خشک کردن سریع باعث ذرات توخالی می شود.
- شکل کروی پایدارترین شکل برای یک قطره است.
- بهبود صافی و کرویت ذرات با افزودن سورفاکتانت ها.
- ذرات چروکیده/خشک شده حاصل از فرمولاسیون های بدون سورفاکتانت.
- ذرات بزرگتر برای داشتن سطوح خشکیده محتمل تر هستند.
- ذرات شبیه دونات نتیجه از دست رفتن پایداری ساختاری قطرات پاشیده شده به واسطه ویسکوزیته بالا است.

-شکل دونات در درونپوشانی بدلیل داشتن سطح مخصوص بالاتر در مقایسه با یک شکل کروی ترجیح داده نمی‌شود.

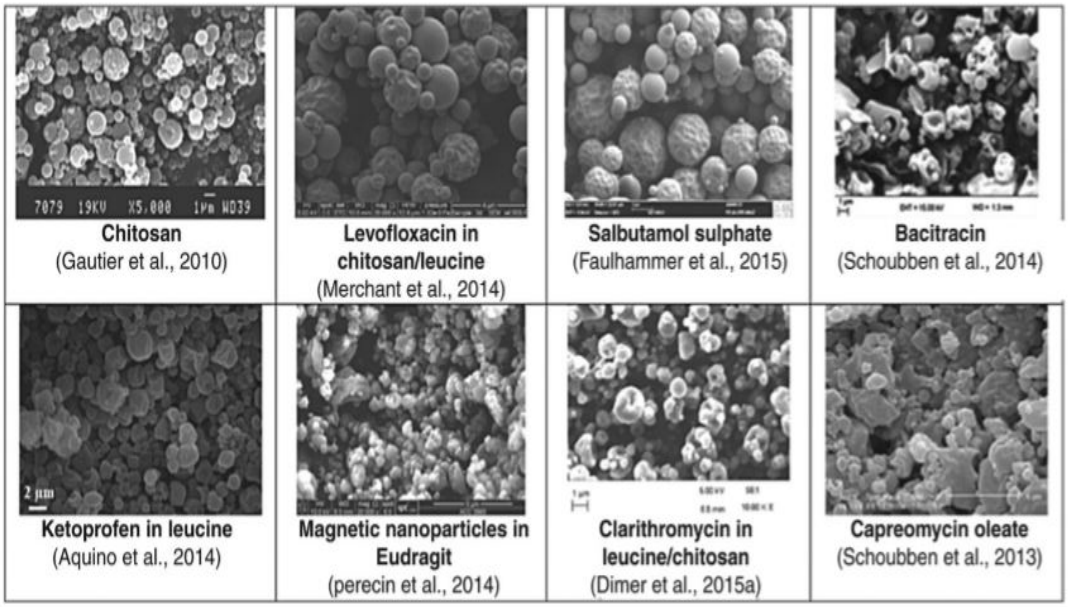
عکس های حاصل از میکروسکوپCLSM



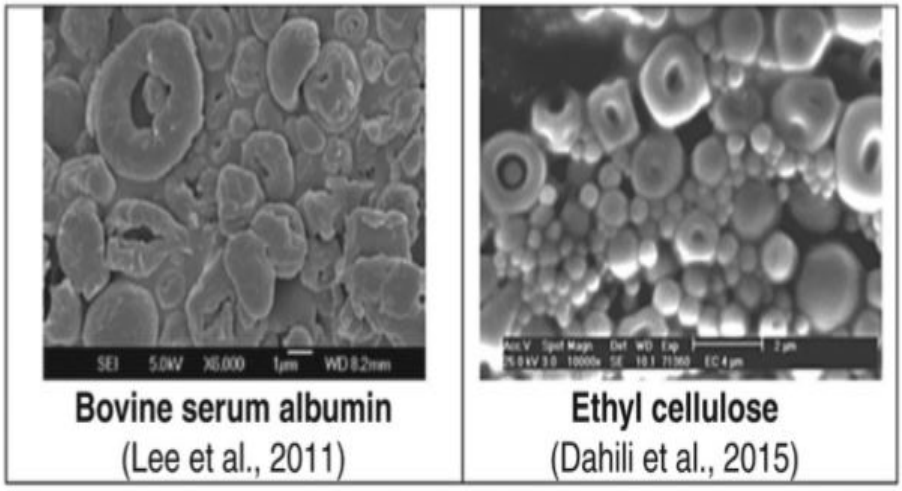
ذرات کروی تهیه شده بوسیله نانو خشک کن پاششی



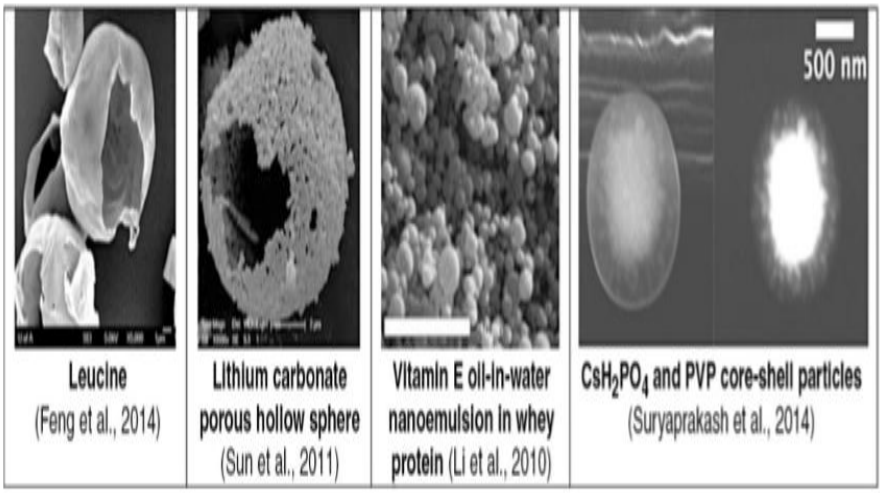
ذرات چروکیده تهیه شده بوسیله نانو خشک کن پاششی



ذرات شبیه دونات تهیه شده بوسیله نانو خشک کن پاششی



ذرات و کپسول های درونپوشانی شده با مایع توخالی تهیه شده بوسیله نانو خشک کن پاششی



چالش ها در خشک کردن پاششی نانو

- عدم کاربرد در مقیاس صنعتی
- انسداد نازل: مایعات بسیار ویسکوز و سوسپانسیون ها ممکن است سوراخهای غربال را محدود کنند که باعث مکث یا توقف تولید قطرات می شود. همچنین زمان فناوری ممکن است به تدریج افزایش یابد. محصول ممکن است حتی بر روی غربال لرزاننده ایجاد رسوب کند و بازدهی محصول را کاهش دهد.
- اصلاح انسداد نازل:

- پاک کردن غربال پاشش در یک حمام اولترا صوت
-فراصوت کردن محلول قبل از خشک کردن پاششی نانو
-تکان دادن مداوم در هنگام پمپ کردن برای جلوگیری از آگلومریزاسیون
-جایگزین کردن غربال پاشش با یک غربال جدید (هنگامیکه نرخ خوراک به طور زیادی کاهش یافت)
-فیلتراسیون خوراک یا سانتریفیوژ کردن برای حذف ناخالصی ها
-رقیق سازی خوراک برای جلوگیری کردن از انسداد غربال
-افزودن سورفاکتانت یا افزایش دهنده دیسپرسیون برای بهبود دادن عملکرد عمل لرزاننده غربال
-تغییر دادن مخلوط حلال

کاربردهای غذایی و مکملی انجام شده بوسیله نانو خشک کن پاششی

Substance	Application	Wall material	Solvent	*T* in (°C)	*T* out (°C)	Drying gas (L/min)	Particle size (μm)	References
Nano spray drying								
Sodium alginate	Polymeric wall material	—	Water	110	—	100	0.4–1.2	Blasi et al. (2010)
Arabic gum, whey protein, polyvinyl alcohol, modified starch, maltodextrin	Polymeric wall materials	—	Water	100	38–60	100	0.2–1.1	Li et al. (2010)
Trehalose	Protein stabilizer	Surfactant, Polysorbate	Water	60–100	30–45	115	0.3–3.0	Schmid et al. (2009)
Chitosan	Bioresorbable biopolymer, fat blocker	—	Water acetic acid	120	55	130	0.6–1.6	Gautier et al. (2010)
Hydroxypropyl methylcellulose	Excipient for oral medicaments	—	Acetone	56	—	120	2–10	Gu et al. (2015)
Poly(lactic-*co*-glycolic acid)	Biodegradable polymer	Surfactants, poloxamer, sorbitan monostearate	Acetone, ethyl acetate DCM	50–90	29–36	115 (N_2/CO_2)	2.4–8	Draheim et al. (2015)
PLGA suspensions	Biodegradable polymer	—	DCM	30–50	20–30	100	2.8–4.4	Beck-Broichsitter et al. (2012)
Hydroxypropyl methylcellulose (hypromellose)	Enteric polymer film coating	—	Acetone	56	—	120	2–10	Gu et al. (2015)

کاربردهای غذایی و مکملی انجام شده بوسیله نانو خشک کن پاششی

Nanoization/Structural Change								
Sodium chloride	Surface-salted cheese crackers	—	Water	95	—	125	0.5–1.9	Moncada et al. (2015)
Sodium chloride	Model of water soluble salt	—	Water	100	—	100	0.5–1.0	Li et al. (2010)
Nanoencapsulation								
Vitamin B_{12}	Water-soluble vitamin	Arabic gum, cashew nut gum, sodium alginate, carboxymethyl cellulose, eudragit RS100	Water	120	50–60	130	0.2–5.5	Oliveira et al. (2013)
Folic acid (synthetic Vitamin B_9)	Water-soluble vitamin	Guar gum, whey protein, resistant starch	Water	90	45	140	0.2–4.5	Pérez-Masiá et al. (2015)
Vitamin E acetate (nanoemulsion)	Vitamin supplement	Arabic gum, modified starch, maltodextrin, whey protein	Water	100	38–60	100	0.4–1.1	Li et al. (2010)
Curcumin	Antioxidant Food additive	Human serum albumin	Water	120	—	150	0.2–0.7	Jain (2014)
Leucine	Aminoacid, Nutritional supplement	Trehalose	Water	75	45	100	2.1–5.4	Feng et al. (2011)
Bovine serum albumin	Model protein derived from cows	Surfactant, polyoxyethylene, sorbitan monoleate	Water	80–120	36–55	150	0.5–2.6	Lee et al. (2011)
β-galactosidase	Enzyme catalyzing hydrolysis of saccharides	Trehalose	Water	80	36–53	100–110	1–5	Bürki et al. (2011)

—, Data not known.

کاربردهای انتقال دارو

Substance	Application	Wall material	Solvent	*T* in (°C)	*T* out (°C)	Drying gas (L/min)	Particle size (μm)	References
Nano spray drying								
Calpain inhibitor	Drug to cure Alzheimer's and Parkinson's diseases	—	Ethanol	50	35	100 (N_2/CO_2)	0.1–1.3	Baba and Nishida (2012)
Ciprofloxacin and gatifloxacin	Antiinflammatory, antibacterial		Water	120	40–45	120 (N_2)	0.8–3.6	Lee et al. (2013)
Dexamethasone	Antiinflammatory steroid, asthma drug	—	Ethanol	50	35	100 (N_2/CO_2)	0.4–2.2	Baba and Nishida (2013)
Ethambutol	Antituberculosis drug for inhalation	—	Water	110	—	—	0.2	Ahmad et al. (2014)
Fluorometholone	Antiinflammatory steroid, asthma drug	—	Ethanol	50	35	100 (N_2/CO_2)	0.4–1.2	Baba and Nishida (2013)
Furosemide	Drug to treat congestive heart failure and edema	—	Acetone	100	—	100	0.7–1.7	Li et al. (2010)
Griseofulvin	Antifungal drug	—	Methanol, acetone	70	40–45	120 (N_2)	3.4–6.5	Schmid (2011)
Nicergoline	Blood pressure regulating drug	—	Ethanol, water	50	—	90	0.1–1.6	Martena et al. (2012)
Salbutamol	Asthma drug	—	Water	80–120	40–50	110	1.0–6.4	Littringer et al. (2013)
Salbutamol	Asthma drug	—	Water ethanol	100–120	—	110	1–5	Zellnitz et al. (2015a)

کاربردهای انتقال دارو

Nanoencapsulation								
Amoxicillin	Antibacterial drug to treat stomach infections	Gelatine	Water	80	—	—	0.6	Harsha (2013)
Amoxicillin	Antibacterial drug to treat stomach infections	Chitosan	Water acetic acid	120	80	130	0.1–0.4	Ngan et al. (2014)
Azithromycin	Antiinflammatory drug to treat cystic fibrosis	Sodium chloride, mannitol, leucine	Water	80	45	120	1–5	Hindle et al. (2015)
Capreomycin	Antituberculosis drug for inhalation	Leucine	Ethanol, acetone, water	80–120	—	100	1–5	Schoubben et al. (2015, 2014, 2013)
Clarithromycin	Antibiotic to treat lung infections	Leucine, chitosan	Water ethanol	80	—	120	0.3–2.5	Dimer et al. (2015a)
Clozapine and risperidone	Antipsychotic drugs to treat Schizophrenia	PLGA, polyvinylalcohol	DCM water	60	31–38	110–118 (N_2)	0.2–0.4	Panda et al. (2014)
Coumarin	Fluorescent dye suspended in fibrin glue for surgery	PLGA	DCM	45	—	100	0.8–3.0	Bege et al. (2013)
Cyclosporin	Immune system suppressant drug	PLGA	DCM ethanol	29–32	28–32	102–132 (N_2/CO_2)	0.9–2.2	Schafroth et al. (2012)
Dexamethasone	Steroid, antiinflammatory drug	Polycapro-lactone, deoxy-cholate	Acetone water	55	34	110	0.6–1.6	Fontana et al. (2014)
Dexamethasone	Steroid, antiinflammatory drug	Surfactants	Ethanol acetone propanol	55	—	110	0.4–1.2	Durli et al. (2014)

(*Continued*)

کاربردهای علم مواد

Substance	Application	Wall material	Solvent	*T* in (°C)	*T* out (°C)	Drying gas (L/min)	Particle size (μm)	References
Nano spray drying								
Lithium carbonate ($LiHCO_3$) (nanosuspension)	Material for rechargeable lithium batteries	—	Water	90	—	130	0.2 (primary) 4–9 (composites)	Sun et al. (2011)
Magnesium sulfate ($MgSO_4$) nanoparticles	Supplement for algae to produce lipid from waste glycerol	—	Water	120	—	120	0.1 (individual) 4–5 (aggregates)	Sarma et al. (2014b)
Ferric citrate ($C_6H_5FeO_7$) nanoparticles	Supplement for microorganism to produce hydrogen	—	Water	120	—	120	0.5–1.7	Sarma et al. (2014a)
Nanoencapsulation and nanoenglobing								
Horseradish peroxidase enzyme	Enzymatic removal of phenols from wastewaters	Ethyl cellulose	DCM	40	—	100 (N_2)	1.5–3.4	Dahili et al. (2015)
CsH_2PO_4 nanoparticles	Solid acid fuel cells	Polyvinyl-pyrrolidone	Methanol water mixture	30–120	—	60–150 (N_2, CO_2)	0.1–0.8	Suryaprakash et al. (2014)
Zinc oxide powder	Antimicrobial and antibiofilm agent	Chitosan citric acid whey starch glycerol	Water acetic acid	120	—	150–160	0.1–0.4	Dhillon et al. (2014)
Magnetite nanosuspension	Cancer therapy by magnetic hyperthermia	Polycaprolactone	Acetone	65	—	—	0.6	Perecin et al. (2015)
Magnetic iron oxide nanosuspension	Cancer therapy by magnetic hyperthermia	Eudragit maltodextrin	Water	120	54	130	0.3–1	Perecin et al. (2014)

خشک کن پاششی خلایی

- خشک کن پاششی خلاء ترکیبی از خشک کن پاشی و خلاء است. در این سیستم خشک کردن، مواد غذایی مایع با استفاده از بخار فوق گرم به عنوان منبع گرما ، در دمای خشک کردن کم به پودر تبدیل می شوند. دمای تبخیر وابسته به میزان خلاء دمای اشباع است. از آنجا که خشک کردن تحت خلاء انجام می شود ، دمای خشک کردن می تواند در دمای پایین (۶۰-۴۰ درجه سانتیگراد) انجام شود، که برای جلوگیری از آسیب و یا از بین رفتن مواد مغذی حساس به گرما مناسب است. سیستم خشک کردن پاششی خلاء شامل چهار مرحله یعنی اتمیزه کردن، خشک کردن خلایی، بازیابی سیکلون و جمع آوری پودر است.

۱-مرحله اتمیزه کردن

- نازل های پاششی به منظور تولید قطرات کوچکتر (۱۰-۵۰ میکرومتر) از هوای فشرده در طول اتمیزه استفاده می کنند. همزمان، بخار گرم شده با دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد از طریق نازل بخار دیگری به محفظه خشک کن به همراه مایع اتمیزه شده وارد می شود.

۲- مرحله خشک کن خلایی

- در محفظه خشک کردن، هنگامی که قطرات اتمی با بخار گرم شده تماس بگیرند، تبادل گرما اتفاق می افتد. گرمای نهان مورد نیاز برای تبخیر آب قطرات، توسط منبع گرما (بخار گرم شده) تامین می شود. علاوه بر این، بخار گرم شده دارای توان حرارتی بالاتری در مقایسه با هوای گرم است که برای تحویل گرمای موردنیاز کارآمدتر است. با این حال، یک قطره متوسط بطور کامل فوراً خشک نمی شود، زیرا قطره در حالت خلاء به دمای بخار اشباع که ۴۰ درجه سانتیگراد است، نمی رسد. بنابراین، محفظه اصلی خشک کن توسط پمپ خلاء فشرده زدایی شده و همچنین در اطراف محفظه خشک کن آب گرم با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد جریان دارد که این امر منجر به تبخیر آب قطرات و در نتیجه تولید ذرات پودری می شود.

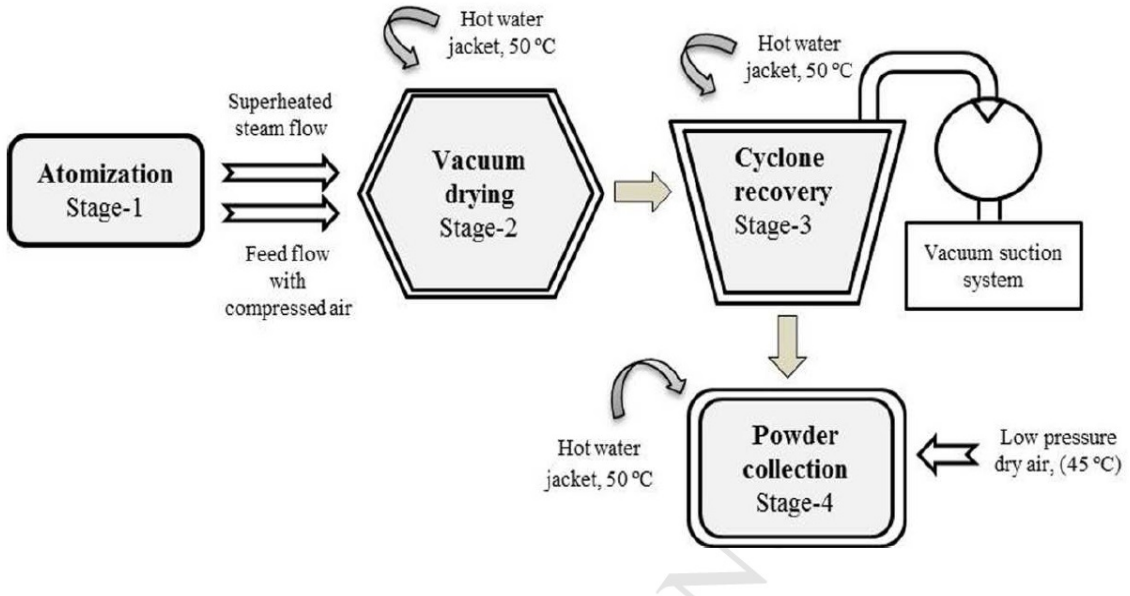


Fig. 3. Process flow diagram of the vacuum spray drying process

خشک کن پاششی با هوای رطوبت زدایی شده

- خشک کن پاششی با هوای رطوبت زدایی شده، یک خشک کن پاششی اصلاح شده است که از یک خشک کن پاششی معمولی متصل به یک سیستم خشک کن هوا جهت رطوبت زدایی هوا تشکیل شده است. هوای رطوبت زدایی شده به داخل خشک کن پاششی فرستاده می شود. همچنین هوای فشرده شده مورد استفاده برای نازل نیز رطوبت زدایی می شود. مراحل دیگر خشک کردن مشابه خشک کردن پاششی معمولی است.
- این سیستم در کاهش مشکلات چسبندگی و بهبود بازیافت پودر عملکرد بهتری نسبت به خشک کن پاششی معمولی دارد. این روش خشک کردن نسبت به خشک کردن پاششی معمولی باعث رطوبت کمتر و دانسیته توده ای بیشتر محصول پودری می شود. علاوه بر این، باعث کاهش دمای خروجی و کاهش رطوبت هوا می شود که منجر به صاف شدن ذرات حاصل می شود. در این سیستم خشک کردن، دمای خروجی پایین تر و رطوبت پایین نیز می تواند به کاهش تلفات اکسیداسیون حرارتی ترکیبات حساس کمک کند.

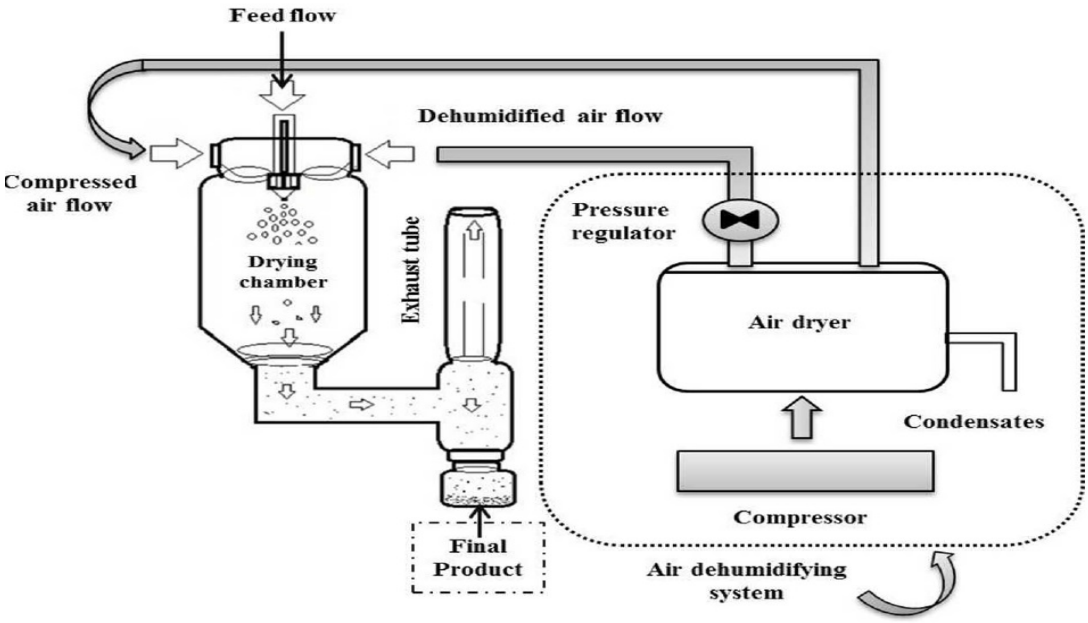


Fig. 4. Schematic depiction of the dehumidified air spray drying system