

به نام خداوند بخشناينده مهربان

تكنولوژى توليد الياف پيشرفته I

Advanced Fiber
Spinning Technology

Edited by
Prof T.Nakajima

ترجمه:

پیشگفتار

قهرست

مبانی تولید الیاف

موضوعات بسیار زیادی تحت الشعاع عنوان مبانی تولید الیاف قرار می‌گیرند. و لیکن در این بخش تنها به بحث درباره اساس مدل سازی ریاضی جهت تولید الیاف و یافته های نوین درباره تشکیل ساختاری طی تولید و ساختار الیاف اکتفا شده است.

این بحث و مدل سازی باید برای روشهای متفاوت تولید الیاف شامل: ذوب ریزی^۱، خشک ریزی^۲ و تر ریزی^۳ انجام شود که تمرکز اصلی روی ذوب ریزی بوده است. زیرا از نظر فرموله نمودن ساده ترین نوع بوده و بهمین دلیل تئوری آن قابل فهم تر خواهد بود. درباره دو روش دیگر مختصراً بحث شده و جهت وارد شدن به جزئیات آن مراجع مربوطه معرفی شده اند بهر حال نویسندگان امیدوارند که این مباحثه مختصر بتواند جهت درک دیگر بخشهای این کتاب مفید واقع شود.

۱-۱- مقدمه

روش ذوب ریزی برای تولید الیاف مصنوعی در اوایل دهه ۱۹۳۰ معرفی شد. در آغاز تاریخ تولید الیاف مصنوعی نحوه پیشرفت در تکنولوژی تولید عمدتاً بصورت تجربی و روش سعی و خطا بوده و بعنوان مثال یکسری از پارامترهای موثر در تولید لیف تغییر داده میشوند و سپس خواص و تغییرات ایجاد شده روی لیف حاصله بررسی می شود. در آن زمان روی تغییرات شیمی فیزیکی و تشکیل ساختاری الیاف تولید شده در ناحیه بین رشته ساز^۴ و غلتک برداشت^۵ تحقیقات اندکی صورت گرفته بود. با پیشرفت سریع صنعت تولید الیاف مصنوعی در دهه ۱۹۴۰ فراگیری اصول ریسندگی جهت بهبود تولید و کنترل کیفیت به صورت یک نیاز واقعی در آمد. در نتیجه با نزدیک شدن به انتهای دهه ۱۹۵۰ ضیا بیکی Ziabicki مجموعه ای از مقالات را درباره ذوب ریزی منتشر کرد. در این مقالات فرآیند ذوب ریزی بصورت ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و می توان گفت که این مجموعه مقالات بعنوان محرکی قوی برای علاقمندان به تحقیق در این زمینه در آمد. در اواسط دهه ۱۹۶۰، Kase و [1,2] Matsuo روشی را برای توصیف کمی فرآیند ذوب ریزی بر پایه هیدرودینامیک، رئولوژی و تئوری انتقال حرارت ارائه کردند. بعد از آن [3] Katayama و همکارانش روی تشکیل ساختاری و کریستالی شدن الیاف طی فرآیند ذوب ریزی تحقیق نمودند که به این منظور از یک دستگاه مدل تولید الیاف استفاده نمودند. از آن پس در این زمینه مطالعات گسترده ای در ژاپن و دیگر نقاط انجام شده است که اکثر نتایج آنها را

1 - Melt spinning

2 - Dry spinning

3 - Wet spinning

4- Spinneret

5- Take up device

میتوان در مراجع مختلف پیدا نمود [۹-۴]. در فرآیند ذوب ریسی اگر شرایط تولید لیف و خواص رئولوژیکی پلیمر مشخص باشند میتوان قطر، درجه حرارت و کشش فیلامنت را در ضمن تولید پیش بینی نمود، بصورتیکه بنحویکه با نتایج تجربی نیز توافق کامل داشته باشند. اما این موضوع هنگامی میسر است که ضمن فرآیند تولید هیچگونه پدیده کریستالی شدن رخ ندهد. و اگر هدف آن باشد که این پدیده نیز منظور شود، مدل سازی ریاضی کمیت های فوق (قطر، درجه حرارت و ...) بسیار پیچیده خواهد شد.

در این صورت دانستن اطلاعات کمیتی کامل از چهار مورد ذیل جهت مدل سازی ریاضی فرآیند ذوب ریسی الزامی خواهد بود:

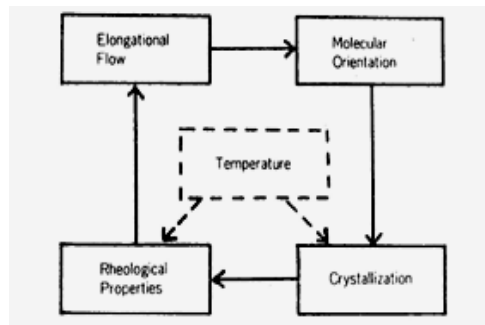
- آرایش یافتگی مولکولی ناشی از ازدیاد طول یافتن جریان پلیمر مذاب

- تأثیر آرایش یافتگی مولکولی روی کنتیک کریستالی شدن

- تغییرات در خواص رئولوژیکی پلیمر بواسطه آرایش یافتگی مولکولی و کریستالی شدن

- کنتیک کریستالی شدن غیر ایزوترمال

ارتباط بین چهار مورد فوق الذکر در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. در این شکل مبدا فلش نشان دهنده عاملی است که روی مقصد فلش تأثیر می گذارد.



شکل ۱-۱- ارتباط بین عوامل تعیین کننده فرآیند ذوب ریسی

در تئوری Kase و Matsuo از مقادیر میانگین درجه حرارت و تنش در کل سطح مقطع عرضی فیلامنت استفاده شده است. اما در فرآیندهای تولید الیاف با سرعت زیاد متغیرهایی نظیر درجه حرارت، تنش، آرایش یافتگی و کریستالی شدن را باید تابع دو عامل در نظر گرفت:

۱- تابع فاصله شعاعی از محور مرکزی فیلامنت،

۲- تابع فاصله از رشته ساز.

بعنوان مثال در نظر گرفتن توزیع شعاعی اینگونه متغیرها در بحث ساختارهای ناهمگن^۱ نظیر ساختار غلاف - مغزی الزامی است. جهت آنکه فرآیند تولید لیف درک شود، دانستن چگونگی تشکیل ساختار آن طی فرآیند تولید کاملاً ضروری می باشد. و علاوه بر آن باید امکان تجزیه و تحلیل جزئی فرآیند نیز فراهم باشد. در مطالب ذیل معادلات اصلی که فرآیند ذوب ریزی را به همراه تشکیل و گسترش کریستالی شدن تفسیر می کنند، شرح داده شده اند. از این به بعد تبلور آرایش یافته که وابستگی زیادی به تشکیل ساختاری طی فرآیند تولید دارد، وارد بحث خواهد شد و تفاوت‌های بین تبلور آرایش یافته و آرایش نیافته مورد ملاحظه قرار میگیرد. بعد از آن به اهمیت ژل شدن در فرآیند محلول ریزی و جدائی فازی اشاره ای خواهد شد. در آخر نیز مثالهایی از مدل سازی ریاضی فرآیند ذوب ریزی در سرعت بالا آورده می شود.

۱-۲- آنالیز تفکیکی تولید لیف

جهت آنالیز تولید لیف سه معادله کلی بترتیب از انتقال انرژی، انتقال گشتاور و انتقال جرم بدست می آوریم. جهت سادگی دو اپراتور جزئی بشرح ذیل تعریف میشوند.

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (1-1)$$

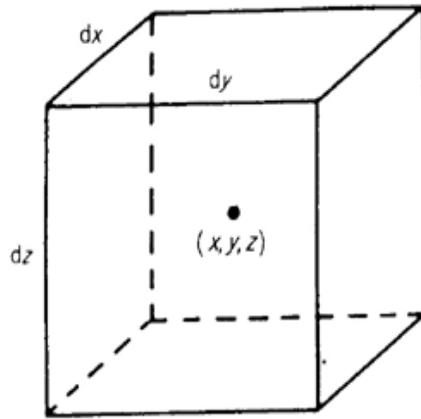
$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} + V_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (1-2)$$

در این معادلات t زمان، (x,y,z) مختصات فضائی، (V_x, V_y, V_z) سرعت پلیمیر و i, j, k به ترتیب بردارهای واحد در جهات x, y, z می باشند. [۱۰]

۱-۲-۱- معادلات اصلی (ذوب ریزی)

۱-۲-۱-۱- بقا انرژی

اگر المان حجمی (dv) بصورت ثابت در فضا در امتداد مسیر تولید فرض شود (شکل ۱-۲) و برای آن تغییر آنتالپی قائل شد، میتوان معادله اصلی را برای انتقال انرژی بدست آورد.



شکل ۲-۱-۱-المان حجمی

۱-۲-۱-۲- جریان ورودی حرارت از طریق هدایت

فرض می‌شود که هدایت حرارتی پلیمر K_c مستقل از درجه حرارت T باشد. جریان ورودی حرارت خالص در واحد زمان از طریق صفحه XY به المان در نظر گرفته شده که مرکز آن در (X, Y, Z) است بشرح ذیل خواهد بود.

$$\left(K_c \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z+dz/2} - K_c \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z-dz/2}\right) dxdy = K_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dxdydz \quad (1-3)$$

طبق این معادله، با خلاصه نمودن کمیتها برای سه جهت، حرارت انتقال یافته در واحد زمان به المان مورد نظر عبارتست از :

$$K_c \nabla^2 T dv \quad (\nabla^2 : \text{Laplacian}) \quad (1-4)$$

۱-۲-۱-۳- جریان ورودی حرارت همراه با انتقال جرم

حرارت ویژه در فشار ثابت، حرارت تبلور، تبلور و دانسیته پلیمر بترتیب با $\rho, X, \Delta H, C_p$ و نشان داده میشوند. فرض می‌شود که C_p و ΔH مستقل از T و آنتالپی در واحد جرم (H) تابعی از T و X باشد. آنتالپی خالصی که در واحد زمان از طریق صفحه XY بدخل حجم جزئی dv جریان پیدا می کند بقرار زیر است:

$$\left(-\rho H V_z \Big|_{z+dz/2} + \rho H V_z \Big|_{z-dz/2}\right) dxdy = -\frac{\partial(\rho H V_z)}{\partial z} dv \quad (1-5)$$

طبق این معادله با خلاصه نمودن کمیتها در سه جهت دیگر خواهیم داشت.

$$-\nabla \cdot (\rho H V) dv \quad (1-6)$$

با استفاده از معادله پیوستگی $\partial \rho / \partial t = -\nabla \cdot (\rho V)$ (معادله اصلاح شده (۱-۴) خواهیم داشت.

$$-\nabla \cdot (\rho H V) dv = H \frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho V \cdot \nabla H \quad (1-7)$$

۱-۲-۱-۴ - بقا آنتالپی

اگر به بقا آنتالپی در داخل المان dv توجه شود:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = K_C \nabla^2 T + H \frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho V \cdot \nabla H \quad (1-8)$$

از آنجائیکه $\partial H / \partial X = -\Delta H$ و $\partial H / \partial T = C_p$

$$\nabla H = C_p \nabla T - \nabla H \cdot \nabla X \quad (1-9)$$

با جایگذاری این رابطه در معادله (۱-۸) خواهیم داشت.

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = K_C \nabla^2 T - C_p \rho V \cdot \nabla T + \rho \Delta H V \cdot \nabla X \quad (1-10)$$

برای حالت پایدار، معادله (۱-۱۰) به معادله ذیل تبدیل می‌شود.

$$V \cdot \nabla T - k \nabla^2 T = \frac{\Delta H}{C_p} V \cdot \nabla X \quad (1-11)$$

در این معادله $k = K_C / (\rho C_p)$ نفوذ حرارتی می‌باشد. عبارت ساده D/Dt را می‌توان بعنوان $V \cdot \Delta$ در نظر گرفت.

۱-۲-۱-۵ - بقا جرم

معادله ذیل بر اساس اصول تعادل جرمی که بداخل المان حجمی جریان پیدا می‌کند (همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است) بدست آمده است.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot V \quad (1-12)$$

با فرض آنکه پلیمر سیال غیر قابل تراکم باشد:

$$\Delta \cdot V = 0 \quad (1-13)$$

۱-۲-۱-۶ - بقا گشتاور

معادله زیر بر اساس تعادل گشتاوری که بداخل حجم المان جریان پیدا می‌کند (شکل ۱-۲) بدست آمده است.

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P - [\nabla \cdot p] + \rho g \quad (1-14)$$

در این معادله P فشار سیال ایزوتروپیک، p تنسور کششی¹ افزوده، g شتاب جاذبه و $[\nabla \cdot p]$ بردار می‌باشد. که بعنوان مثال یکی از اجزاء آنرا می‌توان بصورت زیر بیان نمود.

$$[\Delta \cdot p]_x = \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z} \quad (1-15)$$

با در نظر گرفتن فرض غیر قابل تراکم بودن سیال، P هیچگونه مفهوم فیزیکی ندارد. ولی آنرا می‌توان بواسطه شرایط مرزی تعریف نمود. هنگامیکه جهت تولید لیف در جهت محور Z انتخاب شود کمیت Pzz-Pxx نشان دهنده تنش کششی² خواهد بود.

۷-۱-۲-۱- معادلات دیگر

علاوه بر سه معادله بقا انرژی، جرم و گشتاور باید معادلات اصلی دیگری (معادلات رئولوژیکی) همچون معادلات کنتیک تبلور، معادله در برگیرنده آرایش یافتگی مولکولی (ضریب شکست مضاعف Δn) و معادله ترمودینامیکی حالت را نیز در نظر گرفت. قبل از آنکه به بحث راجع به هر کدام از این معادلات پرداخته شود، باید به تعداد متغیرهای و مجهول معادلات توجه نمود. جدول (۱-۱) نشان دهنده تعداد متغیرهای مجهول و معادلات است که هر کدام ۱۴ عدد می‌باشند. بنابراین حل اینگونه معادلات هنگامی میسر می‌شود که شرایط مرزی مشخص باشند. معادلات مهمی که تعیین کننده شرایط مرزیند، معادله هدایت حرارتی روی سطح فیلامنت و معادله مقاومت هوا می‌باشند.

۸-۱-۲-۱- معادلات اصلی (ساختاری)

تا بحال فرمولهای پیچیده متعددی که تنسور کششی افزوده \mathbf{P}^3 را به سابقه حرارتی و تغییر شکل پذیری [۸] مربوط می‌کنند، بعنوان معادلات ساختاری پیشنهاد شده اند. که از ساده ترین آنها می‌توان به معادله ویسکوزیته نیوتن اشاره نمود.

جدول ۱-۱- تعداد متغیرهای مجهول و معادلات

متغیرهای مجهول	
۳	V_x, V_y, V_z
۶	$P_{xx}, P_{yy}, P_{zz}, P_{yz}, P_{zy}, P_{xy}$
۳	P, T, ρ
۲	$X, \Delta n$

- Stress tensor

- Tensile stress

- Excess stress tensor

۱۴ جمع

معادلات

۱	معادله بقا انرژی
۱	معادله بقا جرم
۳	معادله بقا گشتاور
۶	معادلات ساختاری
۱	معادله کنتیک تبلور
۱	معادله مربوط به آرایش یافتگی مولکولی
۱	معادله حالت

۱۴ جمع

۹-۱-۲-۱- معادله کنتیک تبلور

سرعت تشکیل هسته در پلیمرها در دمای ثابت بمقدار زیادی با آرایش یافتگی مولکولی فزونی می یابد. و لیکن در حال حاضر فرمولی کلی که ارتباط کمیته را بین سرعت تبلور و آرایش یافتگی مولکولی بیان کند، وجود ندارد. علاوه بر آن ممکن است که تبلور تحت آرایش یافتگی مولکولی با تبلور غیر آرایش یافته معمولی که با عناوینی نظیر سرعت تشکیل هسته، سرعت رشد هسته ها و طرز رشد هندسی مطرح میشوند، متفاوت باشد. تا بحال موضوع فرآیند تغییر ساختاری در تبلور آرایش یافته روشن نشده است. درباره این موضوع در قسمت های متعاقب این بخش بحث خواهد شد. اگر کنتیک تبلور را به فرم معادله: $X=1-\exp(-K_A t^n)$ بیان شود با افزایش آرایش یافتگی مولکولی ثابت سرعت K_A بشدت افزایش پیدا کرده و شاخص n Avrami به مقدار واحد یا حتی زیر آن کاهش پیدا خواهد کرد. در عمل معادله Avrami تنها در مراحل اولیه تبلور کاربرد دارد، و باید توجه شود که تبلور ثانویه در مراحل پیشرفته (آخر) تبلور پدیدار می گردد. با قرار دادن ضریب شکست مضاعف Δn (یا تنش کششی σ) بعنوان پارامتر مرتبط با آرایش یافتگی مولکولی، تقریباً می توان ثابت سرعت تبلور k_A را در درجه حرارت ثابت بعنوان تابعی از T و Δn در نظر گرفت. بهر حال هنوز این سؤال که چگونه از داده های مربوط جهت توصیف تبلور غیر ایزوترمال استفاده شود به قوت خود باقی خواهد ماند. اگر چه هیچ پاسخ کاملاً تایید شده ای برای این سؤال وجود ندارد ولی می توان از رابطه زیر جهت محاسبه تبلور استفاده نمود. (رابطه ۱۶-۱۴).

$$X=1-\exp \left\{ - \left(\int_0^t k(T, \Delta n) dt' \right)^n \right\} \quad (1-16)$$

در این عبارت معادله کنتیک تبلور ایزوترمال جهت تبلور غیر ایزوترمال بسط داده شده و رابطه از سابقه T و Δn (به نام σ) توصیف می کند.

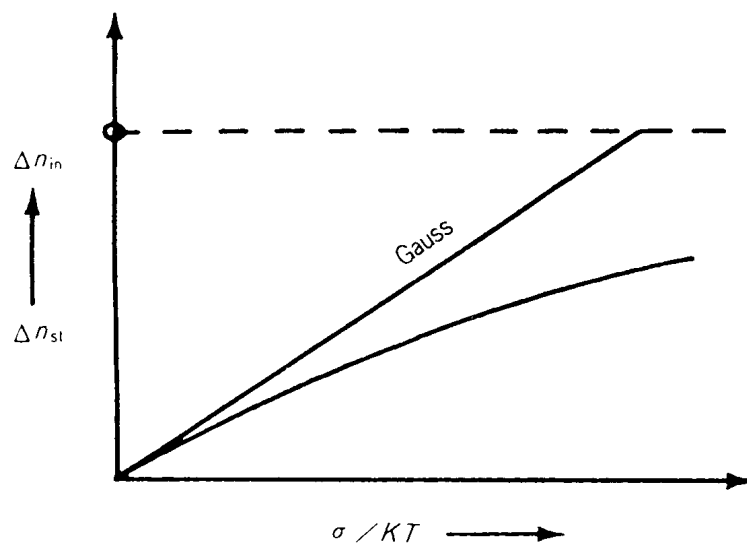
۱-۱-۲-۱-۱۰- ارتباط بین تنش کششی و ضریب شکست مضاعف

بصورت تجربی توانسته اند رابطه ای خطی بین ضریب شکست مضاعف Δn و تنش کششی σ بدست آورند. این رابطه برای فرآیند تولید PET و هنگامیکه تنش کششی σ کم باشد ($\sigma < 3 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$) مصداق دارد [۱۶].

فهم این رابطه بسیار ساده است زیرا تئوری الاستیسیته (کشسانی) صریحاً اثبات نموده است که σ/Kt ثابت بولتزمن می باشد) برای مقادیر پایین σ (با تقریب Gaussian chain) مستقیماً با Δn متناسب است. و لیکن در مورد تولید با سرعت بالا باید به رابطه بین Δn و σ برای مقادیر بزرگ σ توجه شود، بدلیل آنکه σ براحتی به مقادیر بالائی تا حد $10^8-10^9 \text{ dyn/cm}^2$ می رسد. در حالیکه σ میتواند بینهایت بزرگ شود ولی Δn مقدار ماکزیممی دارد که این مقدار با ضریب شکست مضاعف ذاتی Δn_{in} تعریف می شود. از این رو با افزایش σ سرعت ازدیاد Δn کاهش یافته و Δn به مقدار ثابتی می رسد. Ziabicki و [۱۸]. Jarecki رابطه ای عددی بین مقدار Δn در حالت پایدار (Δn_{st}) و σ/KT برای Langevin chains بدست آورده اند (شکل ۳-۱). این رابطه برای جریان حالت پایدار کاربرد دارد ولی فرآیند تولید لیف با در نظر گرفتن آرایش یافتگی مولکولی در حالتی ناپایدار است بنابراین Δn همواره کوچکتر از Δn_{st} (مقدار Δn در حالت پایدار به ازای σ موجود) می باشد. با در نظر گرفتن زمان تاخیر t :

$$D \Delta n / Dt = (\Delta n_{st} - \Delta n) / t \quad (۱-۱۷)$$

از طریق σ/KT مشخص می شود که Δn_{st} تابعی از موقعیت و زمان است (و از طریق t, T تابع می باشد)



شکل ۳-۱- رابطه بین ضریب شکست مضاعف در حالت پایدار و σ/KT [۱۸].

۱-۲-۲-۲-۱- محلول ریسی

۱-۲-۲-۱- خشک ریسی

در فرآیند خشک ریسی ساختار لیف بواسطه رانش محلول پلیمر از داخل نازلی ظریف و سپس تبخیر حلال شکل می گیرد. طبق آنچه گفته شد در فرآیند خشک ریسی شکل گیری ساختار لیف باید در سیستمی دو جزئی متشکل از پلیمر و حلالش در نظر گرفته شود. بنابراین آنالیز تکنولوژیکی خشک ریسی بسیار مشکل تر از ذوب ریسی می باشد. زیرا در ذوب ریسی مشکل بررسی تشکیل ساختاری تنها در سیستمی تک فازی مطرح است. برای بررسی تشکیل ساختاری در خشک ریسی نیاز به معادله پخش یا انتشار که تشکیل ساختاری را در داخل فیلامنت شرح دهد است و همچنین نیاز به معادله ای خواهد بود که روی سطح فیلامنت نرخ تبخیر حلال را در مرز بین دو فاز توصیف نماید. علاوه بر آن برخی از معادلاتی که در عملیات ریاضی ذوب ریسی استفاده میشوند باید اصلاح شوند تا بتوان آنها را برای فرآیند خشک ریسی بکار برد، جزئیات در مراجع موجودند [۲۰، ۱۹، ۴].

۱-۲-۲-۲-۲- ترریسی

در فرآیند ترریسی با توجه به آنکه محلولی از پلیمر با فشار از طریق یک نازل به داخل ضد حلال رانده می شود باید به انتقال جرم حلال و ضد حلال نیز توجه شود. بنابراین آنالیز تکنولوژیکی ترریسی حتی از خشک ریسی نیز مشکل تر خواهد بود و در واقع هنگامیکه فرآیند تولید واکنشهایی شیمیایی را نیز به همراه داشته باشد آنالیز کمی آن تقریباً غیر ممکن می باشد. شبیه فرآیند تولیدی که در آن هیچگونه واکنش شیمیایی وجود ندارد در اینگونه موارد نیز می توان دیگرامی سه

فازی با استفاده از مثلث مختصات برای سیستم سه جزئی پلیمر (P)، حلال^۱ (S) و ضد حلال^۲ (N) رسم نمود. در این مورد نسبت F_N/F_S سرعت جریان حلال از فیلامنت بداخل حمام تولید لیف (FS) و نرخ جریان ضد حلال از حمام بداخل فیلامنت (FN) می‌باشند، که مسیر دیاگرام فازی فرآیند تشکیل لیف را تعیین می‌کند [۵].

۳-۱- تشکیل ساختاری هنگام تولید لیف

در این قسمت تغییرات ساختاری در فرآیند تولید، تبلور، ژل شدن و جدائی فازی بحث می‌شوند. تبلوری که از حالت آرایش یافتگی مولکولی پلیمر در داخل محلول پلیمر، مذاب و یا جامد آمورف بوجود می‌آید. تبلور آرایش یافته^۳ نام دارد. تبلور طی تولید لیف می‌تواند نمونه‌ای بارز از تبلور آرایش یافته باشد. تشکیل ساختاری در حالت تبلور آرایش یافته از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد زیرا پدیده‌ای است که ماهیت ماکرو مولکول‌ها را نمایان می‌سازد.

از دهه ۱۹۶۰ تا بحال تحقیقات روی تبلور آرایش یافته در سطح گسترده‌ای انجام شده که اشاره نمودن به همه آنها ممکن نیست. در بین تمامی آنها تبلور ناشی از جریان^۴ پلی اتیلن توجه محققین را بخود جلب نموده است. هنگامیکه که پلی اتیلن در محلولی با غلظت ۵-۵٪ بواسطه هم زدن محلول متبلور شود ساختاری بوجود می‌آید که به آن ساختار شیش کباب^۵ گویند [۲۱، ۲۲].

موارد ذیل صورتهای کلی تبلور آرایش یافته است:

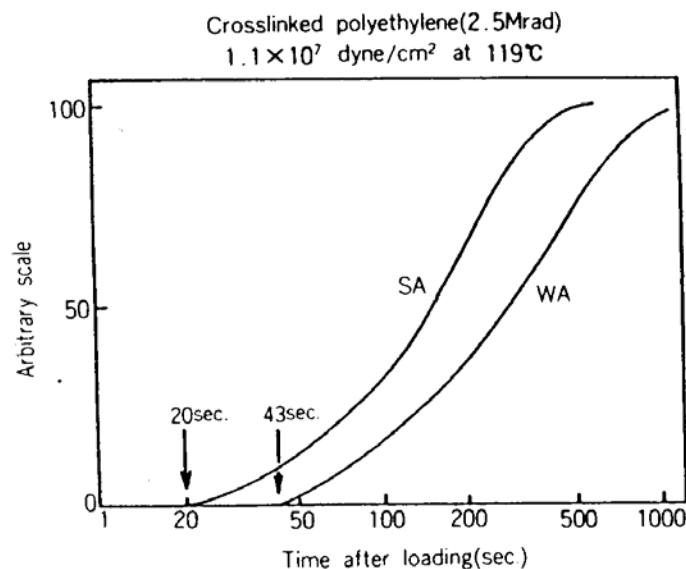
شکل مواد متبلور شده با توجه به درجه آرایش یافتگی مولکولی متفاوت است. با افزایش درجه آرایش یافتگی مولکولی، درجه حرارتی که در سرعت متبلور شدن ماکزیمم است افزایش می‌یابد، حتی در برخی موارد حد سرعت ماکزیمم نیز تا چندین برابر افزایش می‌یابد. مکانیزم تبلور آرایش یافته می‌تواند بسیار متفاوت از تبلور غیر آرایش یافته باشد.

۳-۱-۱- تبلور آرایش یافته پلیمرهای مذاب

اطلاعاتی که ما تا بحال از تشکیل ساختاری پلیمرهای مذاب و آرایش یافته انعطاف پذیر بدست آوردیم بشرح ذیل خلاصه شده اند.

-
- Solvent
 - Non- solvent
 - Oriented crystalization
 - Flow- induced
 - Shish- kebab

با پیشرفت تبلور، نایکنواختی فضائی دانسیته رخ می دهد [۲۳]. که در آن ناحیه با دانسیته بالاتر دارای شکل میله ای ماندنی است که در امتداد جهت کشش آرایش یافتگی مولکولی داشته و با افزایش درجه آرایش یافتگی این قطر کاهش می یابد. بعبارت ساده می توان گفت اندازه این ناحیه بقدری است که با میکروسکوپ نوری قابل مشاهده است. در داخل چنین ناحیه ای تغییرات دانسیته در داخل ساختار لاملا مانند توده ای در مقیاس دهها نانومتر که در آن اجزا لاملا بصورت عمود بر جهت آرایش یافتگی مولکولی گسترده میشوند، اتفاق می افتد. این نوسانات دانسیته را می توان به کمک تفرق اشعه x meridional small angle تشخیص داد [۳]. در این مرحله از تشکیل ساختاری هنوز تفرق اشعه x wide-angle از حالت کریستالی مشاهده نمیشود. پس می توان نتیجه گرفت که حالتی بینابینی mesomorphic طی تبدیل حالت آمورف به حالت کریستالی وجود دارد (شکل ۴-۱ مرجع ۳).



شکل ۴-۱- تبلور آرایش یافته پلی اتیلن با اتصالات متقاطع هنگامی که تفرق اشعه x پهن (WA) و اشعه x کوچک (SA) بطور هم زمان در بخش کریستالی تحت نیروی ثابت ملاحظه می گردد، تفرق اشعه (SA) ابتدا قبل از تفرق (WA) ظاهر می شود که دلالت بر تابع دانسیته داشته و در شکل لاملا کشیده شده عمود بر راستای تنش ظاهر می شود.

در ساختمان شیش کباب و ساختمان ردیفی^۱ (ساختاری که ظاهری شبیه حصیر ژاپنی tatami دارد) لاملاهای کریستالی در جهت آرایش یافتگی بصورت توده در آمده اند. اینچنین ساختاری را Keller و همکارانش بعنوان ساختاری که از کریستالهای لاملائی نوع زنجیرهای تاخورد^۲ تشکیل شده است تفسیر نموده اند [۲۴-۲۵]. که در آن کریستالها

-
- Row structure
 - Folded chain lamellar

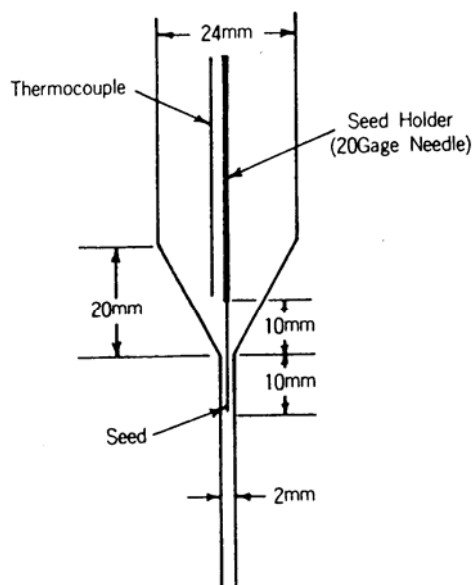
بصورت همسو محوری (هم محور) روی هسته هائی رشد یافته اند و این هسته ها باریک و بلندتر از زنجیرهای امتداد یافته تشکیل شده اند. و لیکن ساختمان ردیفی حتی در پلیمرهای مذاب که آرایش یافتگی خیلی کمی نیز دارند ظاهر می شود، در فیلم نازکی از پلیمر ما می توانیم هسته های متعددی را که در یک خط در ناحیه ای میله ای مانند ردیف شده اند مشاهده نمائیم [۲۶]. بنابراین اینطور در نظر گرفته می شود که مفهوم هسته های متشکل از زنجیرهای امتداد یافته حاصل دو حد مدل ساختمانی آرایش یافته و بسیار کم آرایش یافته است. بنابراین گمان آنکه ویژگی تشکیل ساختاری در تبلور آرایش یافته، هسته های آرایش یافته ای می باشند که متمایل برای ردیف نمودن خوشان هستند می تواند ریسک بزرگی باشد [۲۷]. و لیکن ما نمی توانیم وجود کریستالهای زنجیرهای امتداد یافته را منکر شویم، زیرا در فیلم های نازکی که تحت آرایش یافتگی با درجه بالا متبلور شده اند بکمک میکروسکوپ الکترونی با تفکیک پذیری بالا توانسته اند ناحیه ای کریستالی با حدود ۲۰۰ nm طول و حدود ۱۵ nm عرض را بعنوان ناحیه ای از ریشک های شبکه ای^۱ مشاهده نمایند. بنابراین جهت آنکه درک بهتری از تشکیل ساختاری در طی تبلور، هنگام جریان داشتن پلیمر مذاب (که آنرا بعنوان تبلور آرایش یافته می شناسیم) داشته باشیم، باید شکل فضائی کلی چند زنجیر خاص در پلیمر را تعیین نمائیم این کار را احتمالاً می توان با تفرق neutron انجام داد.

اخیراً موضوع نایکنواختی دانسیته در یک سیستم پلیمری که بصورت مکانیکی قبلاً در آن ایجاد شده است و یا در حال ایجاد است مورد توجه قرار گرفته است، و این حالت را بنام جدای فازی ناشی از تنش نام گذاری کرده اند [۲۸]. در این زمینه نتیجه ای جالب با استفاده از مدل سازی بدست آمده است. در این مقاله ژلی دو بعدی با در نظر گرفتن شبکه ای مثلثی در حالت تعادل فرض شده است [۲۹]. حالتی را با ازدیاد طول نسبی های متفاوت که بستگی به موقعیت (مکان) دارد را به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته اند و فرآیند رهایش ازدیاد طول نسبی با زمان را بر پایه های دینامیک مولکولی افت مدل سازی نموده اند. نتیجه این مدل سازی پیش بینی وجود حالت metastable است که در آن فاز های منبسط و منقبض هر دو با همدیگر وجود دارند. حال اگر ما پلیمر مذاب را بعنوان ژلی در نظر بگیریم که در آن نقاط درگیری بطور موقت پدیدار و سپس ناپدید می شوند، می توان به این حقیقت رسید که در فرآیند رهایش سیستم تغییر شکل بواسطه ازدیاد طول ناشی از جریان پلیمر و مذاب حالت metastable وجود دارد که نایکنواختی فضایی دانسیته دارد.

۲-۳-۱- تبلور آرایش یافته در محلول

در بخش قبل (۱-۳-۱) مواد لیفی حاصله از رشد رسوب در محلول پلی اتیلن با دانسیته بالا معرفی شدند، که دارای ساختاری معروف به شیش کباب می باشند. لازم بذکر است که فرآیند تشکیل چنین ساختاری تا همین اواخر کاملاً تشریح نشده بود. در این قسمت مطالعات McHugh و همکارانش درباره فرآیند تشکیل عنوان میشوند [۳۰-۳۱].

جهت این تحقیق محلول ۰/۰۱٪ وزنی (۰/۰۱ wt) xylene از پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد را (3×10^6) از داخل لوله ای قیف مانند (شکل ۵-۱) بجریان درآوردند و با میکروسکوپ نوپلاریزه فرآیند تشکیل فیبریل در سر هسته کریستالی که در لوله معلق شده بود مشاهده گردید.



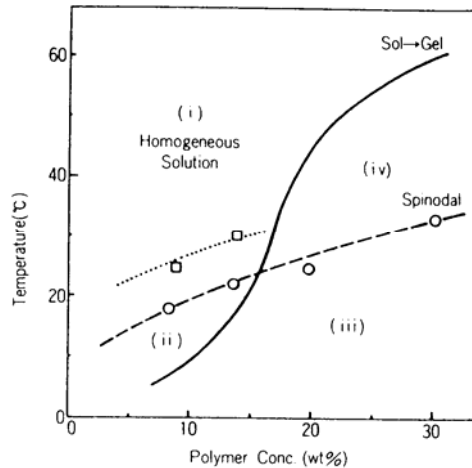
شکل ۵-۱- دستگاه برای تبلور آرایش یافته پلی اتیلن بفرم محلول [۳۰]

نتایج نشان دادند که در مرحله اول فیبریل‌های آمورف ژل مانند که حاوی غلظت بالایی از پلیمر بودند و آرایش یافتگی نداشتند (یا بمقدار خیلی کم آرایش یافته بودند) تشکیل شدند. سپس مرحله تبلور به همراه پیدایش ضریب شکست مضاعف.

سپس در اثر تنش کششی اعمالی روی فیبریل به واسطه حرکت سیال در لوله، متبلور شدن به همراه پیدایش ضریب شکست مضاعف آغاز شد. با اندازه گیری تغییرات ضریب شکست مضاعف نسبت به زمان، متبلور شدن با معادله Avrami با شاخص Avrami برابر با ۲ بیان شد. بنابراین McMugh و همکارانش نتیجه گرفتند که تبلور مورد بحث از رشدی یک بدی (رشد در جهت جریان) شکل می گیرد و از طریق تشکیل هسته های هموزن آغاز می شود. تشکیل ساختمانی مقدماتی قبل از تبلور مشابه تشکیل ساختار در تبلور آرایش یافته در پلیمر مذاب می باشد، بنابراین از اهمیت زیادی برخوردار است.

۳-۳-۱- ژل شدن و جدائی فازی

اخیراً مطالعات عملی و تئوری روی ژل شدن و جدائی فازی سیستم های پلیمری بسیار مطرح شده است. طبق آزمایشات و تجربیاتی که Komatsu و همکارانش روی سیستم دو جزئی پلی وینیل الکل (PVA) آب داشته اند منحنی گذر از حالت محلول به ژل منحنی^۱ SD را قطع کرده (شکل ۶-۱) و دیاگرام فازی را به چهار ناحیه تقسیم می کند [۳۲].



شکل ۶-۱- دیاگرام فازی سیستم PVA- آب برای گذر از حالت محلول به ژل spinodal (منحنی خط چین)، bimodal (منحنی نقطه چین) [۳۲]

i - ناحیه ای مربوط به حالت محلول یکنواخت
ii - ناحیه ای که در آن جدائی مایع - مایع ناشی از SD انجام میگیرد ولی ژل شدن اتفاق نمی افتد.
iii - ناحیه ای که در آن ژل شدن ناشی از SD اتفاق می افتد.
iv - ناحیه ای که در آن ژل شدن بدون هیچگونه جدائی مایع - مایع اتفاق می افتد.
واضح است که در اثر جریان داشتن چنین محلولی آرایش یافتگی مولکولی پدید می آید که باعث شیفت این منحنی ها خواهد شد.

در خشک ریزی سیستم مورد بحث مسیری که سیستم در دیاگرام فازی دنبال می کند با توجه به شرایط تولید لیف و نوع تشکیل ساختاری منتج و خود ساختار در فیلامنت رسیده شده متفاوت خواهد بود.
در مرجع ۵ علاوه بر آن که تجزیه و تحلیل کاملی در مورد تشکیل ساختار در ترریسی سیستمی سه جزئی آورده شده، در این مورد نیز بحث کاملی انجام شده است.

۴-۱- ساختار لیف

در مورد پلیمر های انعطاف پذیر با آزاد نمودن زنجیرهای بهم پیچ خورده بواسطه کشش آرایش یافتگی تک محوری ایجاد می شود. اینچنین آرایش یافتگی را میتوان در یک پلیمر سخت نیز با به جریان درآوردن فاز کریستالی مایع پلیمر در جهت طول ایجاد نمود، در واقع آرایش یافتگی محوری خصوصیت ساختاری الیاف است. با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپ الکترونی انعکاسی (SEM)، تفرق اشعه ایکس^۱ و غیره ساختار الیاف تجاری مورد بررسی قرار گرفته اند. تا به حال فقط طرحی کلی از ساختار لیف ارائه شده است ولی با کمک مطالعاتی که اخیراً توسط میکروسکوپ TEM روی ساختار لیف انجام میگیرد تصاویر واضح تری از آن ارائه خواهد شد [۳۳]. قسمت های بعدی این بخش را باید تنها بعنوان ضمیمه ای در نظر گرفت، و لیکن نویسنده امیدوار است که این مطالب بتواند در درک ارتباط بین ساختمان و خواص فیزیکی لیف مفید واقع شوند.

۴-۱-۱- ساختار لیفی زنجیرهای پلیمری انعطاف پذیر

۴-۱-۱-۱- پلی اتیلن (PE)

جهت تهیه نمونه، ابتدا فیلم نازکی از PE روی سطح آب داغ با فاکتور ۳ الی ۴ کشش داده شد و بعد از آن در دمای ۱۲۶ °C مورد عمل انیلینگ^۲ قرار گرفت [۳۳].

شکل (۱-۷a) تصویر زمینه ترایک با استفاده از بازتابش های ۱۱۰ و ۲۰۰ روی خط استوایی می باشد (مستطیل کوچک در شکل ۱-۷ ملاحظه شود)، که نشان دهنده کریستالهائی با طول و عرض ۲۰ nm می باشد.

کریستالهائی که بخوبی آرایش یافته اند تولید نقاط روشن در تصویر می نمایند. اینگونه کریستالها تمایل دارند خود را در خطی در امتداد با محور لیف (جهت عمودی) آرایش دهنده که این موضوع می تواند دلیلی بر حضور میکروفیبریلها در نمونه محسوب شود. در مکان های مختلف می توان نواحی مختلفی را مشاهده نمود که در آن کریستالها بوسیله نواحی آمورف احاطه شده اند که پیوستگی آرایش یافتگی آنها بالغ بر ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر در امتداد محور لیف می باشد.

با توجه به آرایش یافتگی یک بعدی تصویر ناحیه تاریک (شکل ۱-۷b) با استفاده از بازتابش ۰۰۲ روی مدار نصف النهاری بصورت کلی دارای روشنائی یکنواختی است و بهمین دلیل تباین آن نسبت به شکل (۱-۷a) کمتر می باشد.

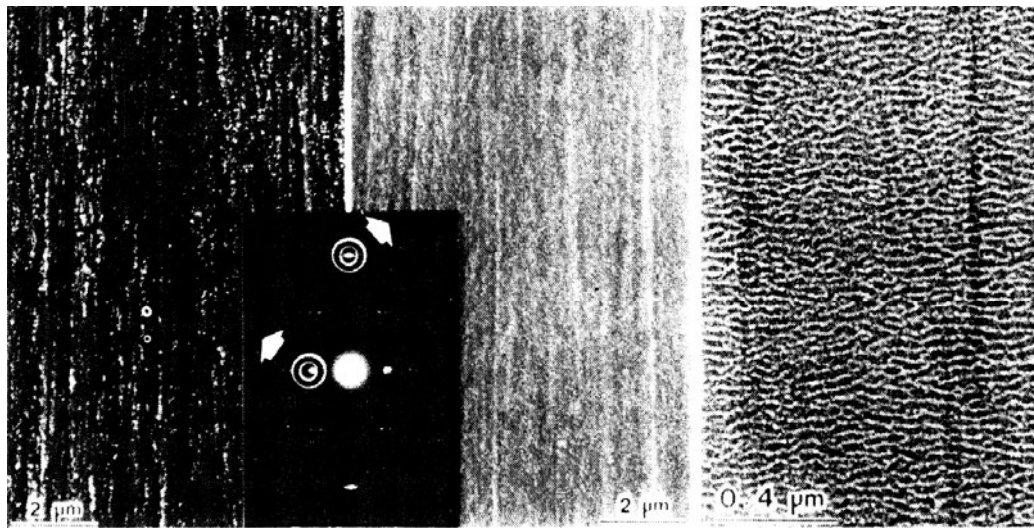
شکل (۱-۷c) تصویر تباین فازی همان نمونه است که در مقادیر نسبتاً بزرگ غیر کانونی گرفته شده است. این شکل بوضوح لاملاهای موجی توده شده در جهت محور لیف را نشان می دهد، از آنجائیکه طول و عرض اینگونه لاملاها بسیار بزرگتر از کریستالها است، استنتاج می شود که هر کدام از این لاملاها انباشتی موزائیک شکل از کریستالها هستند. در نتیجه فیلم آرایش یافته PE دارای دو وجه ساختاری فیبریلی و لاملائی است. PE تحت تابش پرتو الکترونی بسیار ناپایا

- X-ray diffraction

- Annealing

- Contrast

است که این موضوع می تواند اینچنین حالت‌های ظاهراً ضد و نقیص ساختاری را هنگام بررسی با TEM با درجه تفکیک بالا توجیه نماید.



(a)

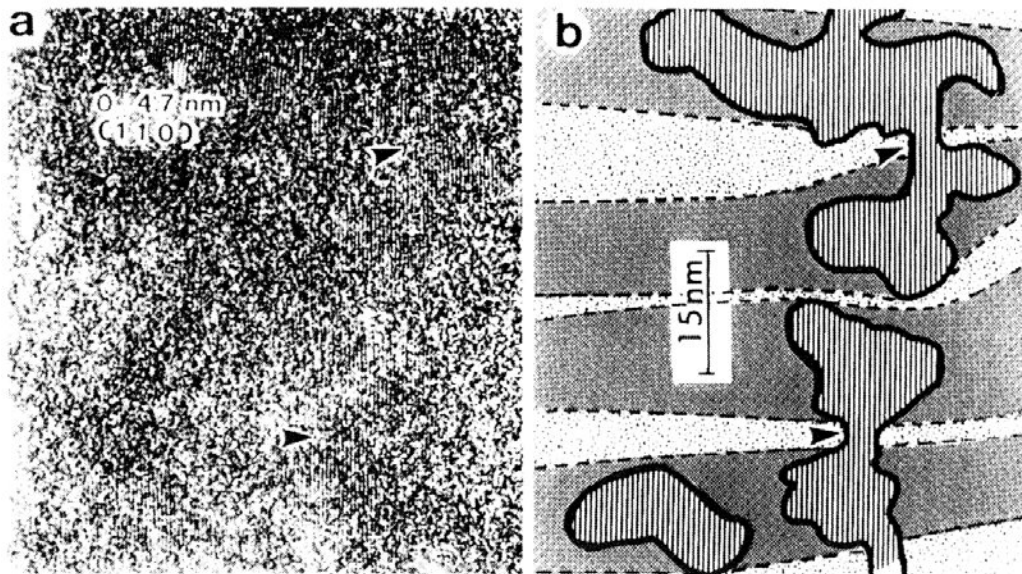
(b)

(c)

شکل ۷-۱- تصویر ناحیه تاریک پلی اتیلن (PE) (a) با استفاده از بازتابش‌های 110 و 200، (b) با استفاده از بازتابش 002، (c) با استفاده از تصویر تباین فازی. جهت کشش عمودی است

۲-۱-۴-۱- پلی (آریل - اتر - اتر - کتون)

حال به فیلم آرایش یافته PEEK توجه می کنیم [۳۴]. PEEK در برابر بمباران الکترونی نسبتاً مقاوم است بنابراین ماده مناسبی جهت گرفتن تصاویر شبکه ای (نقاط) بوسیله TEM با قدرت تفکیک پذیری بالا می باشد. جهت آزمایش چندین قطره از محلول داغ PEEK در α -chloronaphthalen بین دو اسلاید شیشه ای در دمای 300°C بصورت ساندویچ در آورده شدند. درست به محض تبخیر حلال به فیلم ذوب شده نازک PEEK در بین دو اسلاید بوسیله جابجا کردن یکی از دو اسلاید آرایش یافتگی و تبلور داده شد. شکل (a ۱-۸) تصویر شبکه ای (110) از اینچنین نمونه ای است و شکل (b ۱-۸) رابطه بین ساختار لاملاری^۱ و مناطقی که در آن شبکه ای (110) قابل تشخیصند را بیان می کند.



شکل ۸-۱- تصویر با قدرت تفکیک بالای پلی (آریل-اثر-اثر-کتون) (PEEK) که نشان دهنده tie-crystallite (نوک پیکان) می باشند، a- تصویر شبکه ای نشان دهنده تنش عمودی (پیکان ها)، b- توضیح نموداری ساده که نشان دهنده رابطه بین ساختار لاملاری و حوزه هائی است که در (a) مشاهده میشوند

این ساختار لاملاری بواسطه تصویر تباین فازی نمونه قابل تفسیر است (شکل ۹-۱) این تصویر با حد بالای فوکس به محض آنکه نمونه تحت تابش الکترون قرار گرفت تا از آن تصویر شبکه (110) تهیه شود گرفته شده است و تبلور ظریفی که لاملارهای مجاور را در جهت محور لیف بهم متصل می کند بوضوح دیده میشود، نویسندگان این مقاله آنها را tie-crystallite نامیده اند. نویسندگان اینگونه این مسئله را توجیه نموده اند که ارتباط و همبستگی در آرایش یافتگی بین کریستالهائی که متعلق به یک میکروفیبر بلند بواسطه tie-crystallite برقرار می شود. این چنین tie-crystallite ممکن است از چندین لاملا عبور کنند. tie-crystallite را همچنین در تصویر شبکه ای فیلم های نازک آرایش یافته تک محوری PE و پلی (4-methyl-1-pentene) نیز مشاهده کرده اند که تصاویر شان در ۴/۲ k با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری Cryogenic مجهز به لنزهای شیئی Superconducting گرفته شده است [۳۵].

۳-۱-۴-۱- پلی استایرن ایزوتاکتیک (i-PS)

شکل (۹-۱) تصویر با درجه تفکیک بالای فیلم نازک آرایش یافته i-ps است که با استفاده از رویه ای که Tsuji و همکارانش ارائه کرده اند، تهیه شده است [۲۷]. در این شکل ریشک های شبکه ای (110) در حال موازی شدن با محور لیف هستند. ناحیه منسجمی که در آنها ریشک ها مشاهده میشوند، عرضشان در حدود ۱۵ nm و طولشان به ۲۰۰ nm می رسد. ریشک ها اندکی تاخوردند و قسمتی از آنها نیز ضعیف است. ولی بنظر می رسد که منطقه دارای هیچ نقصی

نیست. این ناحیه مربوط به محور در ساختار شیش کباب است که در تبلور آرایش یافته ظاهر میشود، و بعنوان نوعی از tie-crystallite در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۹-۱- ساختار فیلم نازک پلی استایرن ایزوتاکتیک آرایش یافته، جهت کشش در راستای عمود میباشد در بخش (۱-۴-۱) اشاره شد که ساختار لیف PE دارای دو صورت ساختاری لاملاری و فیبریلی است. در الیاف یا فیلمهای فوق کشیده شده^۱ PE با وزن مولکولی فوق بالا یکی از این دو صورت (ساختمان لاملاری) ناپدید شده و صورت دیگر (ساختمان فیبرلاری) که دارای تعداد زیادی از Tie-crystallites است تقویت می گردد. بنابراین طبق آنچه که گفته شد الیاف یا فیلمها دارای خواص فیزیکی عالی نظیر مقاومت و مدول های بالا میباشند.

۲-۴-۱- ساختمان الیاف با زنجیره های پلیمری سخت

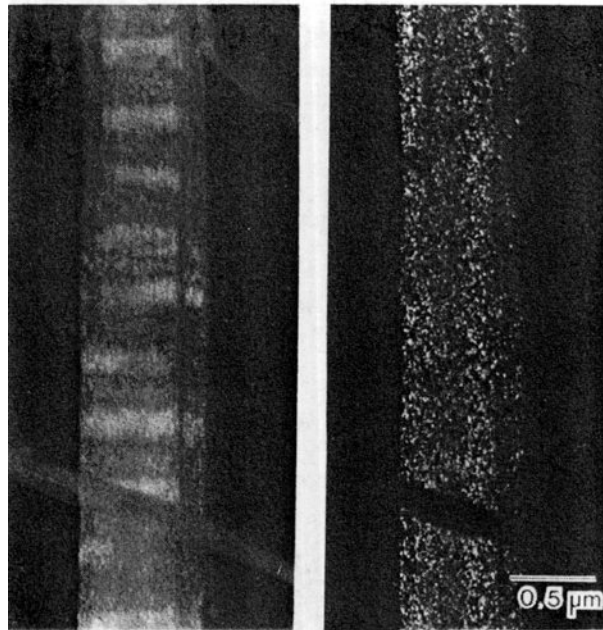
الیافی که زنجیره های پلیمرشان سخت است معمولاً بواسطه جامد شدن نواحی کریستالی مایع که در آنها زنجیره های توسعه یافته با هم آرایش می یابند، تولید میشوند، ضمن آنکه در نواحی کریستالی مایع زنجیره های امتداد یافته بصورت موازی با همدیگر مرتب شده اند و در آنها تمامی زنجیرها بصورت هم محور با توجه به جریان ازدیاد طولی که روی نواحی اعمال میشود، آرایش می یابند. بعنوان مثال از الیافی که بدین طریق ساخته میشوند p-phenylene terephthamide در زیر بحث میشود.

۱-۲-۴-۱- پلی - پارا- فنیلن ترفتالیمید

لیف کولار در دمای 400°C تحت شرایط طول ثابت تحت عملیات انیلینگ قرار گرفت و سپس قطعات فیبریلی با جدا کردن آنها از لیف بدست آمدند. اینگونه قطعات بعنوان نمونه هائی برای TEM استفاده شدند. شکل (a-10) تصویر زمینه تاریک این نمونه با استفاده از انعکاس 006 meridional است که نشان دهنده یک اتصالات دوره ای تکسچره است که شامل باندهای تاریک و روشن بصورت متناوب پیروی در حدود 500 nm است. اینچنین طرح اتصالی همچنین در بخش نازک طولی [36 و 37] و در قطعات فیبریلی PPTA نیز دیده می شود [38]. شکل (a-10) آشکار می سازد که میکروفیبریلهائی وجود دارند که در بین این باندها در امتداد جهت محور لیف عبور کرده اند. ساختار اتصالی بواسطه خمش متناوب زنجیرهای پلیمری ایجاد می شود. شکل (b-10) تصویر ناحیه تاریک همان قسمت از نمونه است که برای شکل (1-10) استفاده شده است. شکل فوق با استفاده از انعکاسات 110 و 200 روی خط استوایی گرفته شده است. نقاط روشن در شکل (b-10) یعنی کریستالهائی که آرایش یافته اند و بازتابهای 110 و 200 را می دهند، بصورت اتفاقی توزیع شده اند. و لیکن با بررسی دقیق شکل مشخص می شود که در برخی مناطق کریستالها در امتداد میکروفیبریلها مرتب شده اند. اندازه کریستالها بین 20-100 nm (هم طول و هم عرض) قرار گرفته و بسیار کوچکتر از اندازه مورد انتظار از ماهیت زنجیر پلیمری سخت و طول زنجیر بنظر می رسد. این تناقض از پیچش میکروفیبرلها اطراف محورهای زنجیر خودشان نشأت میگیرد. ابعاد مناطقی که در آن ریشک های شبکه ای (110) منسجم بوسیله TEM با قدرت تفکیک بالا دیده میشوند نیز شبیه به اندازه تخمین زده شده کریستالهای بالا می باشد.

- Periodic banded texture

- Banded



شکل ۱۰-۱- تصاویر ناحیه تاریک فیلم نازکی از

Poly(p-phenylene terephthalamide) (PPTA), a- با استفاده از باز تابش 006 و b- با استفاده از باز تابش 110 و 200 محوره‌های لیف در جهت عمودی است

۵-۱- شبیه سازی تولید لیف با سرعت بالا

جهت افزایش سود تولید الیاف و بکار بردن آنها در زمینه های جدید روش ذوب ریسی با سرعت بالا پیشنهاد گردید [۱] تا بتوانند بدین طریق به واسطه فرآیندی یک مرحله ای و بدون نیاز به مرحله کشش بعد از تولید به فیلامنتهایی با درجه آرایش یافتگی بالا دست یابند.

مطالعات روی تولید لیف با سرعت بالا از زمان عرضه شدن جمع کننده صنعتی با سرعت برداشتی حدود 6000 m/min در نیمه دوم دهه ۱۹۷۰ به بازار پیشرفت قابل ملاحظه ای داشته است.

موارد قابل توجه در تولید لیف با سرعت بالا بشرح زیر است:

- ۱- پلی اتیلن ترفتالات (PET) در ذوب ریسی معمولی بمقدار قابل توجهی کریستالی نمیشود ولی این عمل در سرعت تولید لیف حدود 4000 m/min یا بیشتر انجام میگردد.
- ۲- گردنی مانند شدن ناگهانی قطر فیلامنت ها طی تولید لیف با سرعت بالا مشاهده می شود که بمقدار خیلی زیادی مربوط به تبلور است [۴۰،۳۹].

۳- فیلامنتهای رسیده شده دارای ساختار غلاف مغزی هستند؛ ناحیه پوسته تا حد بالائی آرایش یافته و متبلور است، ولی ناحیه مغزی آرایش یافتگی ضعیف و تبلوری کم دارد.

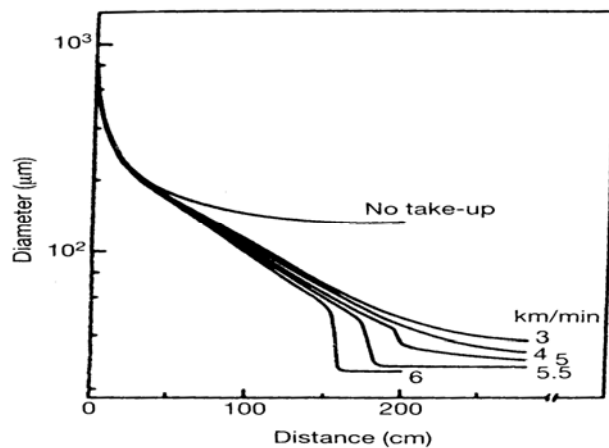
۴- فیلامنتهای رسیده شده نسبتاً قابلیت کشش آمدن بالائی دارند و بنابراین فقط می توان آنها را جهت مصارف خاصی بکار برد.

در سرعت تولید لیف 7000 m/min یا بیشتر کیفیت فیلامنتهای رسیده شده کاهش پیدا می کند. هدف این بخش تشریح برخی از نتایج شبیه سازی تولید لیف با سرعت بالا است که بر اساس موارد و فرمولهای اشاره شده در بخش ۱-۲ انجام گرفته است. ابتدا پدیده گردنی شدن مورد بحث قرار میگیرد.

شکل (۱۱-۱) نشان دهنده تغییر قطر فیلامنت PET ناشی از تولید لیف سرعت بالا در ذوب ریسی است که توسط Shimizu [40] تجربه شده است. در این تجربیات تأیید شده است که بالا و پایین رفتن نقطه گردنی شدن در محدوده مشخصی انجام میشود و آنکه تبلور بندرت قبل از گردنی شدن اتفاق می افتد ولی با شروع گردنی شدن مقدار آن بطور خیلی ناگهانی افزایش می یابد. دلیل واقعی پدیده گردنی شدن هنوز کاملاً مشخص نشده است، یکی از دلایل می تواند بر پایه وابستگی زمانی ویسکوزیته در هنگام ازدیاد طول باشد.

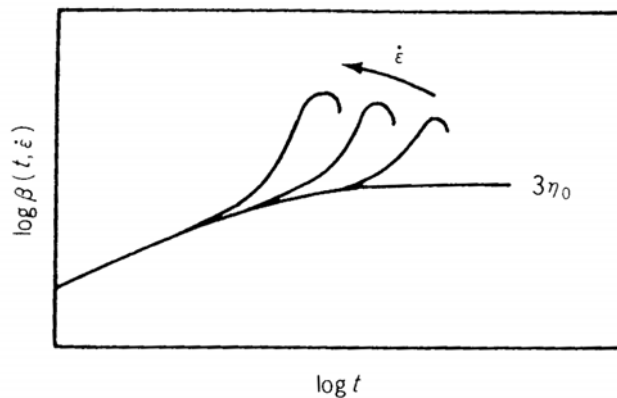
شکل (۱۲-۱) منحنی حرکت ویسکوزیته در هنگام ازدیاد طول $\beta(t\epsilon)$ در حالتی غیر پایدار در برابر زمان می باشد، هنگامیکه پلیمر مذاب PE با دانسیته کم با مقدار کرنش ثابت ϵ ازدیاد طول یابد مقدار $\beta(t\epsilon)$ با پیشرفت زمان افزایش یافته و به ماکزیمم مقدار خود می رسد [۴۱].

این مسئله خاطر نشان می سازد که تغییرات ساختاری ناشی از ازدیاد طول پلیمر مذاب تأثیر پیچیده ای روی ویسکوزیته دارد. بطوریکه ویسکوزیته بستگی به کرنش و همچنین میزان آن دارد. از اینرو شاید بتوان استنتاج نمود که ویسکوزیته طی فرآیند تولید لیف به ماکزیمم مقدار خود می رسد، که ناگهان باعث تشکیل گردن می شود ولی از طرف دیگر اینچنین ماکزیممی ممکن است ناشی از خطای تجربی باشد و نمی تواند وجود داشته باشد [۴۲]. از نقطه نظر دوم که متکی بر مشاهدات تجربی است، گردنی شدن هنگامی اتفاق می افتد که نسبت ویسکوزیته در هنگام ازدیاد طول به ویسکوزیته برشی از عدد ۳ فراتر رود. طبق این نتیجه می توان گفت که گردنی شدن هنگامی اتفاق می افتد که کرنش در هنگام ازدیاد طول طی تولید لیف به بزرگی مشخص برسد [۴۳]. نظریه سوم متکی بر تغییر ساختاری قبل از تبلور آرایش یافته می باشد. این نظریه بیان می دارد که سیستم تغییر حالت داده و به وضعیتی می رسد که در آن گردنی شدن براحتی اتفاق می افتد (Shimizu این حالت را حالت فاز مزوی آرایش یافته می نامند [۴۰]). در حال حاضر نمی توان تعیین نمود که کدامیک از این سه نظر بالا صحیح می باشد. جهت شروع شبیه سازی واقعی نیاز به مقادیر عددی یا روابطی برای تمامی کمیت های مربوطه می باشد. جهت مدل سازی از PET با وزن مولکولی در حدود 23000 بعنوان پلیمر مدل استفاده شد و از روابط ریاضی در مراجع بهره گرفته شد. همانند روابط عددی نامعلوم در اینجا نیز فرض های مناسب در نظر گرفته شد و فرضیه ای نیز برای مکانیزم تشکیل ساختاری طی فرآیند تولید لیف در نظر گرفته شد. جزئیات محاسبات در مرجع ۱۰ آورده شده است و در اینجا تنها نتایج ارائه شده اند.



شکل ۱۱- تغییر قطر در امتداد فیلامنت در سرعت های تولید لیف متفاوت

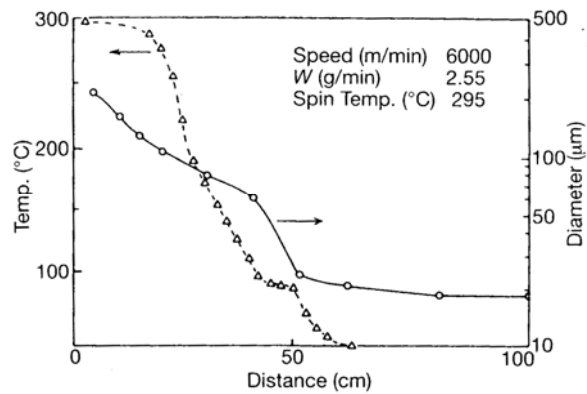
جهت مقایسه از نتایج تجربی موجود در مرجع ۱۶ برای خروجی جرمی (W) بمقدار $2/55$ g/min، درجه حرارت رشته ساز (درجه حرارت لیف) 295°C و قطر نازل $0/3$ mm استفاده شده که جهت راحتی مقایسه، اصلاح شده اند تا در مقیاس نتایج شبیه سازی قرارگیرد (شکل ۱۳-۱). در شبیه سازی نیز از همان شرایط فوق الذکر نمونه تجربی استفاده شد و شرایط سرد شدن به واسطه هوای سرد کننده با سرعت 40 cm/sec ثابت گردید.



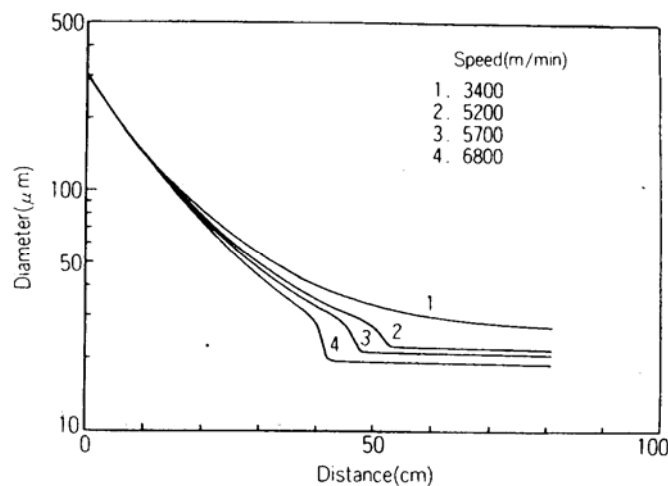
شکل ۱۲- تغییر ویسکوزیته در جریان ازدیاد طولی

اگر چه بزرگی کشش اولیه باید به عنوان شرایط اولیه محاسبات داده شود ولی با تقریب زیاد بواسطه در نظر گرفتن فرآیندی که در آن از تبلور چشم پوشی میشود، تخمین زده شد. از آنجائیکه سرعت برداشت را اصولاً باید از نتایج محاسبه شده تعیین نمود آنرا نمی توان بعنوان شرایط تولید لیف مطرح کرد.

شکل (۱-۱۴) نشان دهنده تغییر قطر فیلامنت طی تولید لیف است. در شکل (۱-۱۵) تغییرات قطر، درجه حرارت سطح و تبلور در طی مسیر تولید لیف برای موردی با سرعت تولید لیف 5700 m/min نشان داده شده است. در شکل (۱-۱۶) توزیع شعاعی تبلور مربوطه در چندین فاصله مختلف از رشته ساز برای سرعت تولید لیف 5700 m/min تشریح شده است. این شکل بوضوح رفتار پیشرفت تبلور از سطح فیلامنت به مغز آنرا نشان می دهد.



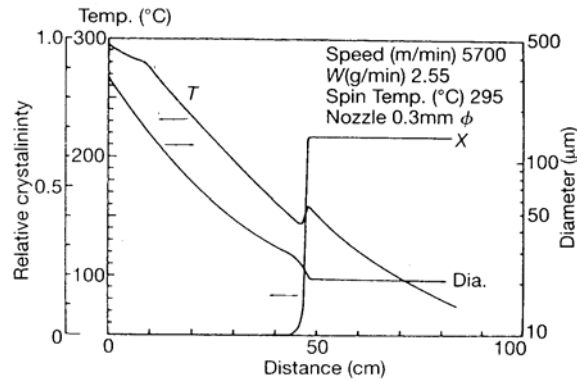
شکل ۱-۱۳- مثالی از تجربه ذوب ریسی سرعت بالا برای پلی اتیلن ترفتالات



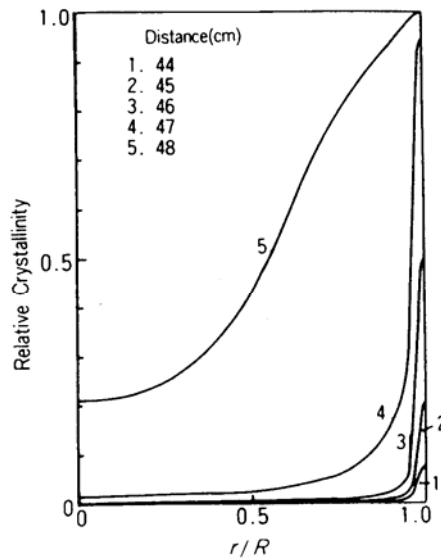
شکل ۱-۱۴- نازک شدن فیلامنت (شبیه سازی)

منحنی پایینی در شکل (۱-۱۷) منحنی مقاومت کششی محاسبه شده در سطح فیلامنت در برابر درجه حرارت است. منحنی بالاتر در همان شکل نشان دهنده تنش گردنی شدن تجربی (کشش گردنی شدن مساحت در سطح مقطع درست لحظه قبل از شروع مرحله گردنی شدن) برای فیلم PET غیر آرایش یافته تحت عملیات انیلینگ قرار گرفته بمدت ۳

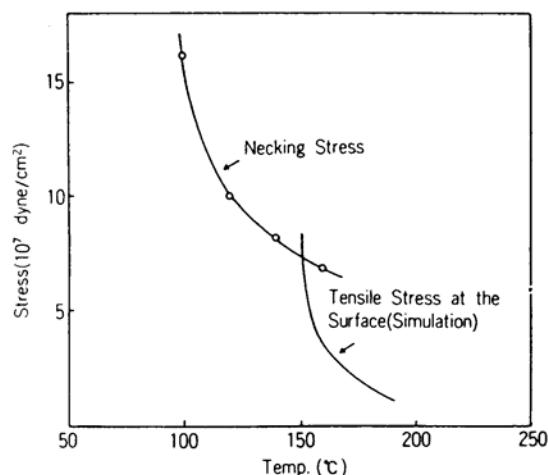
ساعت در 120°C می‌باشد. استنتاج می‌شود که تنش گردنی شدن حقیقی طی ریسندگی باید نسبتاً کوچکتر از تنش گردنی شدن عملی اشاره شده در قبل باشد. و لیکن این حقیقت که در شکل (۱۷-۱) دو منحنی همدیگر را در نقطه‌ای مربوط به حدود 150°C قطع می‌کنند که توانسته وقوع گردنی شدن را در حدود این نقطه طی ذوب ریزی در سرعت بالا، بطور مشخص پیش بینی نماید.



شکل ۱۵-۱- تغییرات قطر، درجه حرارت سطحی و تبلور طی مسیر تولید لیف (شبیه سازی)



شکل ۱۶-۱- توزیع شعاعی تبلور مربوط در ۵ فاصله از رشته ساز در سرعت ریسندگی حدود 5700m/min (شبیه سازی)



شکل ۱۷-۱- تنش گردنی شدن فیلم آرایش یافته و نیافته پلی اتیلن ترفتالات (مشاهده شده) و تنش کششی در سطح فیلامنت (شبیه سازی، سرعت ریسندگی ۵۷۰۰ m/min)

۶-۱- نکات نتیجه گرفته شده

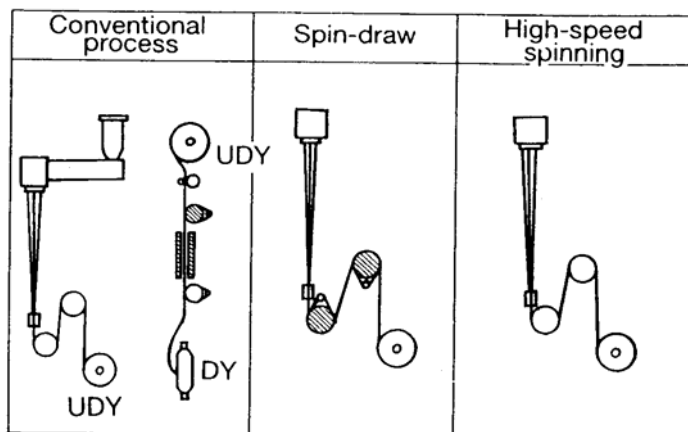
در این بخش، فرمولاسیون ریاضی برای آنالیز تفکیکی فرآیند ریسندگی و حالت‌های تشکیل ساختاری در تبلور آرایش یافته بحث شدند و کاربرد آنها برای شبیه سازی ذوب ریزی با سرعت بالا نشان داده شد. قصد از چنین شبیه سازی بدست آوردن توافق کمیتی بین مقادیر محاسبه شده خواص فیزیکی و مقادیر مشاهده شده در فرآیند ریسندگی واقعی نیست بلکه جهت تعیین آن است که چه کمبود اطلاعاتی برای شبیه سازی دقیق و ساخت چهار چوبی جهت محاسبات وجود دارد. فقدان درک کافی از تبلور آرایش یافته نقصی جدی در شبیه سازی فعلی است. هنگامیکه فقط تبلور اولیه که قابل بیان با معادله Avrami می‌باشد در نظر گرفته شود می‌توان پیش بینی نمود که تبلور بطور خیلی ناگهانی اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن درجه حرارت فیلامنت بسرعت تا 10°C یا بیشتر افزایش پیدا می‌کند. و لیکن عملاً محتمل است که میزان تبلور در نیمه دوم فرآیند تبلور که تبلور ثانویه نقش مهمی در آن ایفا می‌کند خیلی زیاد نباشد. روی این موضوع باید در آینده تحقیق شود، همانگونه که باید روی وابستگی حرارتی مقدار تبلور و وابستگی آن به درجه آرایش یافتگی هم در آینده بررسی شود. جهت درک کامل پدیده گردنی شدن اندازه گیری های دقیق ضمن تولید و تحقیقات ساختاری بیشتر مورد نیاز است.

ذوب ریسی

۲-۱- مقدمه

در این فصل، ریسندگی با سرعت بسیار بالای پلی اتیلن ترفتالات (PET) به عنوان مثالی از الیاف مصنوعی ذوب ریسی شده، تشریح می گردد. نخ پلی اتیلن ترفتالات در سال ۱۹۵۸ در ژاپن به صورت معمولی ریسیده و تحت کشش قرار گرفت. در آن فرآیند PET بفرم مذاب ریسیده می شد و سپس با سرعت 1200 m/min پیچیده می گردید. نخ غیر کشش یافته^۱ (UDY) تولیدی ۳-۵ برابر کشیده می شد و حرارت می دید تا نخ DR یا^۲ FOY تولید شود، این مطلب صورت شماتیک در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. نخ کششی یافته پلی اتیلن ترفتالات عموماً بدین طریف تولید می شد. در ریسندگی با سرعت بسیار بالا می توان مرحله کشش را حذف و نخ کشیده شده را طی یک مرحله تولید نمود تا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه شود. این ایده توسط شرکت Du pont در دهه ۱۹۵۰ ثبت شد [۲]. به هر حال پیشرفت نهائی این تکنولوژی یک مرحله ای، نیازمند توسعه تکنولوژی پیچیدن نخ با سرعت بسیار بالا بود و این عمل تا سال ۱۹۸۸ هنگامی که ریسندگی مافوق سریع تجاری، با سرعت 6000 m/min آغاز شد، به مرحله اجرا در نیامد. فرآیند کشش ریسندگی به طور رسمی در دهه ۱۹۶۰ با یک مرحله ای شدن عملیات ریسندگی و کشش توسعه یافت (شکل ۲-۱). با افزایش تقاضا برای نخهای موج دار^۳ در دهه ۱۹۷۰، عملیات کشش و تکسچرایزینگ در یک فرآیند ادغام شدند و روش ریسندگی جدیدی برای تولید نخهایی با آرایش یافتگی کم^۴، با سرعت ریسندگی $3000-3500 \text{ m/min}$ بوجود آمد که در آن عمل تکسچرایزینگ و کشش بطور همزمان انجام میگردد.

-
- Undrawn yarn (UDR)
 - Fully oriented yarn (FOY)
 - Crimped yarn
 - Partially oriented yarn (POY)



شکل ۱-۲- شکل فرضی جهت سیستم تولید نخ PET

در دهه ۱۹۷۰ با روند بهبود عمل پیش امکان افزایش سرعت ریسندگی نیز فراهم شد و انگیزه تحقیق در مورد ریسندگی با سرعت بالا را افزایش داد. برای مثال Ueda و Kanotsuna لیف نایلون ۶ را که با روش ریسندگی سرعت بالا 9800 m/min تولید شده بود، در سال ۱۹۷۱ معرفی کردند [۲]. از سال ۱۹۷۵، بمدت ده سال فرآیند ریسندگی با سرعت بالا توسط محققین متعددی همچون Shimizu مورد تحقیق قرار گرفت و نتایجی در مورد ریسندگی با سرعت بالا برای پلی استر، نایلون و پلی اولفینها گزارش گردید [۳]. در سال ۱۹۸۳ انجمنی جهت بهینه سازی تکنولوژی تولید الیاف مصنوعی در ژاپن آغاز به کار کرد. که از جمله اهداف آن دادن وام برای تحقیق و توسعه فرآیندهای نوین تحت نظر وزارت صنایع و بازرگانی بود. بخش ریسندگی آن انجمن همکاری در انجام پروژه ای جهت تولید الیاف پلی استر با سرعت بالایی معادل $9000-14000 \text{ m/min}$ را آغاز کرد. نتیجه این تحقیقات شرایط بهینه ریسندگی در سرعت بالا و مکانیزم تشکیل ساختار لیف طی این فرآیند را آشکار کرد. امروزه ریسندگی با سرعت بالا در حدود $6000-8000 \text{ m/min}$ ، روشی تجاری جهت تولید نخهای مصنوعی همچون نایلون و پلی استر محسوب می شود.

در این فصل ساختمان، خواص فیزیکی نخ فیلامنت پلی استر که در سرعت بالا تولید شد است، مکانیزم تشکیل ساختمان لیف در ضمن عملیات و کاربردهای تجاری آن بررسی می شود.

۲-۲- خواص مکانیکی و ساختاری نخهای تولید شده در سرعتهای بالا

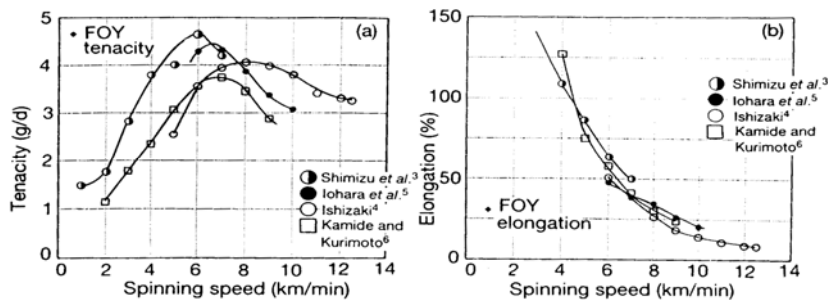
در این بخش خلاصه ای پیرامون ساختار و خواص فیزیکی نخ PET تولید شده از طریق ریسندگی سرعت بالا ارائه می گردد.

۲-۲-۱- کیفیت کلی نخ

شکل (a) و (b) ارتباط سرعت ریسندگی با مقاومت^۱ و افزایش طول^۲ نخ پلی استر را نشان می‌دهد. شکل (۲-۳) منحنی تنش-کرنش برای نخهای ریسیده شده در سرعتهای مختلف را نشان می‌دهد. هرچه سرعت تولید افزایش می‌یابد، مقاومت نخ زیادتر شده و افزایش طول تا حد پارگی کاهش می‌یابد. هنگامی که سرعت ریسندگی از ۵۰۰۰ m/min بالا می‌رود، ازدیاد طول به کمتر از ۷۰ درصد می‌رسد و نقطه تسلیم در منحنی تنش - کرنش همانند نخهای FOY معمول واضح نمی‌باشد.

مقاومت نخ در سرعتهای ۶۰۰۰-۷۰۰۰ m/min به بیشترین مقدار خود می‌رسد، سپس همانطور که در شکل (a) (۲-۲) ملاحظه می‌شود کاهش می‌یابد (اطلاعات بر اساس تحقیقات [4] Ishizaki و همکاران بیشترین مقدار را در سرعت های بالای ۸۰۰۰ m/min از خود نشان داده است که ممکن است ناشی از اختلاف در ساختمان شیمیایی PET باشد، زیرا جهت افزایش قابلیت ریسندگی از PET اصلاح شده استفاده شده است). مقاومت نخهای ریسیده شده با سرعت خیلی زیاد در محدوده ۳/۸-۴/۷ g/d می‌باشد، که کمی کمتر از نخ FOY است. افزایش طول با سرعت ریسندگی کاهش می‌یابد و در سرعتهای بالای ۸۰۰۰ m/min به کمتر از ۲۵٪ می‌رسد. در سرعت ریسندگی ۳۰۰۰-۴۰۰۰ m/min مدول یانگ به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در (شکل ۲-۴) تغییرات بزرگی در ساختمان لیف در این نقطه به نظر می‌رسد. طبق نظریات [3] Shimizu، [6] Kanide، و Kunmoto همکارانش مدول یانگ به طور مداوم تا سرعت بیش از ۶۰۰۰ m/min افزایش پیدا می‌کند و طبق نتایج [۷] Fujimoto ممکن است با افزایش سرعت تولید این مقدار در سرعتهای بالاتر (بالای ۸۰۰۰ m/min) کاهش یابد.

مدول یانگ نخ PET ریسیده شده در سرعت بالا همانند نخ FOY به مقدار زیادی در حدود ۱۰۰ g/d می‌رسد.



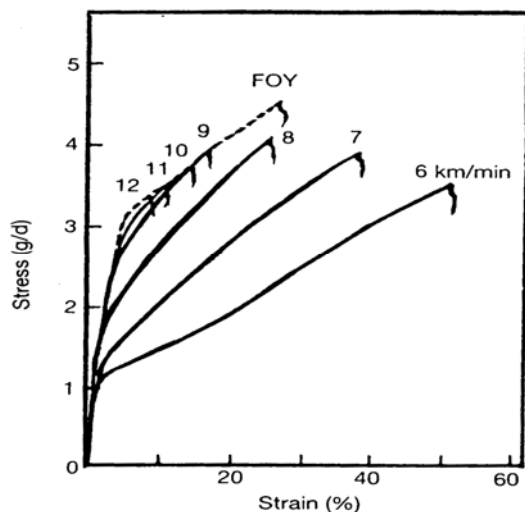
شکل ۲-۲- a- وابستگی استحکام به سرعت ریسندگی و b- وابستگی ازدیاد طول به سرعت ریسندگی

[۳-۶]

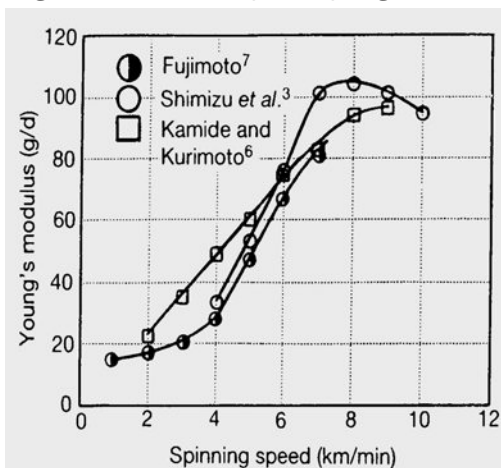
- Tenacity

- Elongation

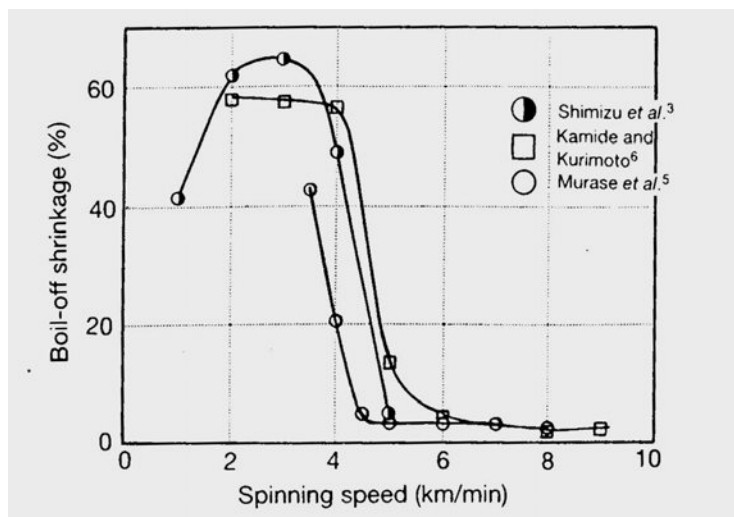
شکل (۲-۵) نشان دهنده ارتباط بین سرعت ریسندگی و میزان جمع شدگی در آب جوش^۱ است. جمع شدگی در اثر حرارت بیشترین مقدار خود را در حدود ۶۰٪ در سرعت ریسندگی ۲۰۰۰-۳۰۰۰ m/min نشان می‌دهد و سپس تا حد زیادی افت کرده به طوری که در سرعت ۶۰۰۰ m/min به حدود ۲-۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین ثبات جمع شدگی حرارتی در نخهای PET تولید شده با سرعتهای بالا خوب است.



شکل ۲-۳- منحنی تنش - کرنش در سرعتهای ریسندگی مختلف



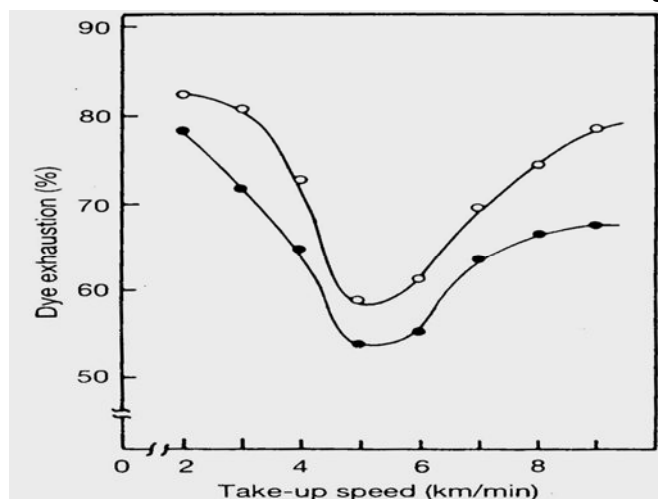
شکل ۲-۴- ارتباط مدول یانگ با سرعت ریسندگی [۳، ۶، ۷]



شکل ۵-۲- ارتباط بین سرعت ریسندگی و جمع شدگی در حالت جوش [۳، ۵، ۶]

میزان جذب رنگ در مدت ۶۰ دقیقه رنگریزی، با دو نوع رنگ با وزن مولکولی مختلف، به عنوان تابعی از سرعت

ریسندگی بررسی شد، (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲- ارتباط بین میزان رنگ جذب شده و سرعت ریسندگی [۶] (عملیات رنگریزی برای مدت ۶۰ دقیقه با رنگهای

• (Diacellition Fast Orange GL, Resolin Blue TBL)

هر دو رنگ کمترین میزان جذب را در سرعت ۵۰۰۰ m/min نشان دادند، و در سرعت بالاتر، میزان جذب افزایش

می یابد. جذب رنگ نخ PET تولید شده با سرعتی حدود ۹۰۰۰ m/min هنگام رنگریزی با رنگ دیسپرس Resolin

Blue FBL در فشار اتمسفر و دمای ۱۰۰°C حدود ۷۰٪ می باشد. که این میزان به مقدار محاسبه شده برای نخ FOY

رنگریزی شده با همان L:R تحت فشار بالا در دمای 130°C سانتیگراد می‌باشد، لذا میتوان آن را نشانه ای از رنگ پذیری خوب دانست.

خصوصیت نخهای PET ریسیده شده با سرعت بالا به صورت زیر خلاصه می‌شود:

استحکام و مدول ینگ به مقدار جزئی از نخهای FOY کمتر است.

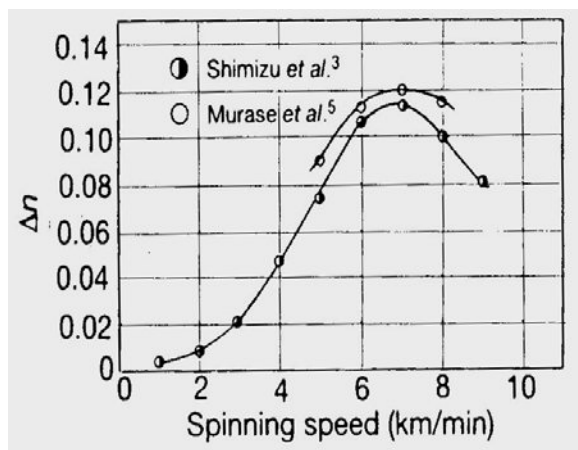
ماکزیمم مقاومت در منحنی تنش - کرنش برای نخهای تولید شده با سرعت بالا بیشتر از نخهای FOY است.

ثبات مناسبی از لحاظ جمع شدگی در برابر حرارت دارد.

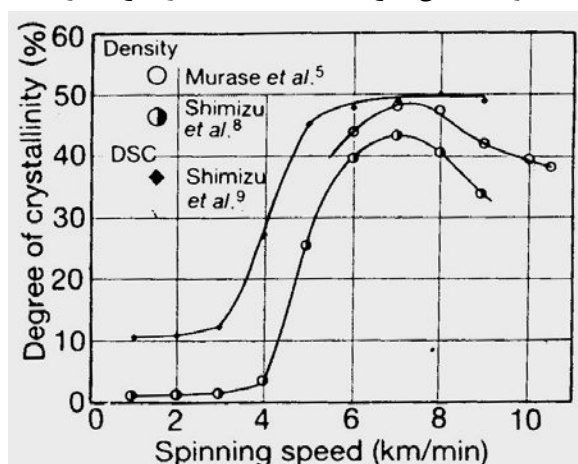
قابلیت رنگپذیری خوب

۲-۲-۲- رابطه سرعت ریسندگی با خواص فیزیکی نخ تولید شده در سرعت بالا

با افزایش سرعت ریسندگی زنجیرهای پلیمری آرایش یافته، کریستالی شده و ساختار لیفی بیشتر شکل می‌گیرد. ضریب شکست نوری مضاعف Δn ، و درجه کریستالی شدن (که از دانسیته محاسبه شده است) همانطور که به ترتیب در شکل (۲-۷) و (۲-۸) نشان داده شده، بستگی به سرعت ریسندگی دارند. Δn در ابتدا به آرامی افزایش می‌یابد (تا سرعت ریسندگی 2000 m/min) و آنگاه بالای سرعت ریسندگی 3000 m/min به سرعت افزایش می‌یابد و در سرعت ریسندگی 7000 m/min به بیشتری مقدار خود معادل $\Delta n = 0.12$ می‌رسد اما در سرعت 9000 m/min تا $\Delta n = 0.08$ کاهش می‌یابد و این برابر با مقداری است که در سرعت 5000 m/min بدست می‌آید. به طور مشابه، درجه کریستالی شدن در سرعت ریسندگی 7000 m/min به ماکزیمم مقدار خود بین $45-50\%$ درصد افزایش می‌یابد شکل (۲-۸)، و با رسیدن سرعت ریسندگی به 10000 m/min به مقدار 40% کاهش می‌یابد. با اینکه مقدار Δn از سرعت تولید 2000 m/min شروع به زیاد شدن می‌کند [۸،۴]، ولی درجه کریستالی شدن به ندرت تا رسیدن به سرعت 4000 m/min تغییر کرده و معمولاً پس از گذشتن از آن ناگهان افزایش می‌یابد [۹،۸،۴]. Slimizu و همکارانش همانطور که در شکل (۲-۹) شان داده شده است، نقطه شکستی در منحنی دانسته در نقطه $\Delta n = 0.055$ یافتند [۳]. این نتایج نشان می‌دهد که در سرعتهای زیر 4000 m/min با افزایش سرعت، آرایش یافتگی مولکولی افزایش یافته و تبلور به مقدار کمی تغییر می‌کند در حالی که در سرعتهای بیش از 4000 m/min تبلور ناشی از آرایش یافتگی رخ می‌دهد. Δn و درجه کریستالی شدن ماکزیممی را در سرعت 7000 m/min از خود نشان میدهند، که از ساختمان نایکنواخت سطح مقطع لیف، ناشی از پخش آرایش یافتگی مولکولی در امتداد شعاع، نتیجه می‌شود. ارتباط سرعت ریسندگی با درجه کریستالی شدن که بوسیله DSC اندازه گیری شده است تا سرعت 7000 m/min مشابه حالتی است که بوسیله اندازه گیری دانسیته بدست آمده است، شکل (۲-۸). ولی در سرعت بالای 7000 m/min کاهشی مشاهده نمیشود، که ناشی از وجود حفره هایی در سطح لیف و ساختار غلاف مغزی لیف می‌باشد.



شکل ۷-۲- ارتباط بین ضریب شکست (Δn) و سرعت ریسندگی [۹،۸،۴]



شکل ۸-۲- ارتباط بین درجه کریستالی شدن و سرعت ریسندگی [۹،۵،۴]

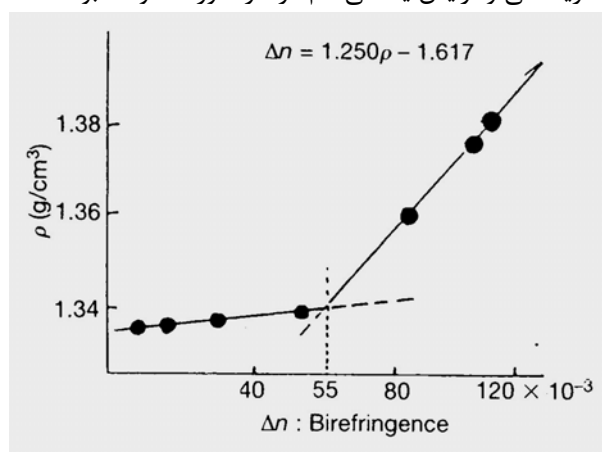
آرایش یافتگی زنجیر به طور جداگانه در فازهای کریستالی و آمورف با استفاده از ضریب شکست نوری مضاعف قابل محاسبه است. کل ضریب شکست مضاعف به صورت ضریب شکست مضاعف در فاز کریستالی Δn_c ، ضریب شکست نوری در فاز آمورف Δn_a و درجه جزء حجمی کریستال X داده شده است:

$$\Delta n = \Delta n_c X + \Delta n_a (1 - X) \quad (2-1)$$

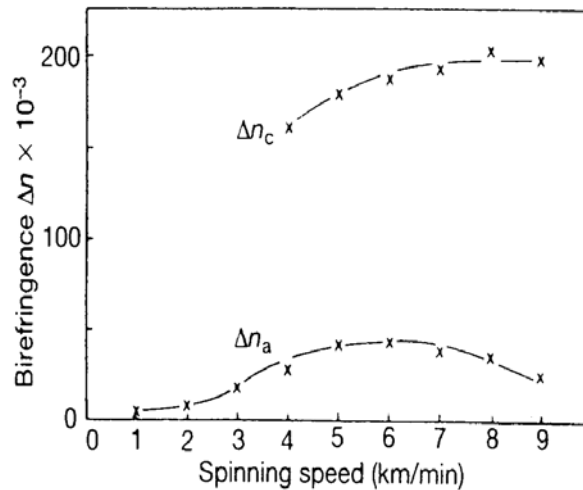
$$\Delta n_c = f_c \Delta n_{c0} \quad (2-2)$$

f_c نمایانگر درجه آرایش یافتگی در فاز کریستالی است که با روش تفرق اشعه X محاسبه می شود و ضریب شکست مضاعف حدی در فاز کریستالی در حدود $\Delta n_{c0} = 0.212$ محاسبه می شود. شکل (۲-۱۰) رابطه بین سرعت ریسندگی و

Δn_c و Δn_a که از رابطه (۲-۱) محاسبه شده است را نشان می‌دهد. اگر چه ضریب شکست مضاعف در فاز کریستالی Δn_c را تا هنگامی که فاز کریستالی تشکیل نشود (سرعت بالای 4000 m/min) نمی‌توان اندازه‌گیری نمود، ولی بزرگی مقدار Δn_c ($\Delta n_c = 0.16$) در سرعت ریسندگی 4000 m/min و افزایش آن تا میزان 0.2 در سرعت ریسندگی 8000 m/min نشان دهنده آن است که آرایش یافتگی زنجیره‌های مولکولی با تبلور ارتباط نزدیکی دارد. ضریب شکست مضاعف در فاز آمورف Δn_a در سرعت 6000 m/min به بیشترین مقدار خود می‌رسد و آنگاه با افزایش سرعت ریسندگی تدریجاً کاهش می‌یابد. ضریب شکست مضاعف Δn لیف در سرعت 7000 m/min به بیشترین مقدار خود یعنی 0.12 می‌رسد (شکل ۲-۷) که این مقدار کمتر از مقدار بدست آمده برای نخهای FOY (کاملاً آرایش یافته) یعنی 0.15 است. احتمالاً این مسئله ناشی از آرایش یافتگی نسبتاً پایین در فاز آمورف است. به طور خلاصه می‌توان گفت نخ ریسیده شده با سرعت بالا دارای آرایش یافتگی بالا در فاز کریستالی و آرایش یافتگی کم در فاز آمورف خواهد بود.



شکل ۲-۹- ارتباط بین دانسیته و ضریب شکست مضاعف [۸،۹]



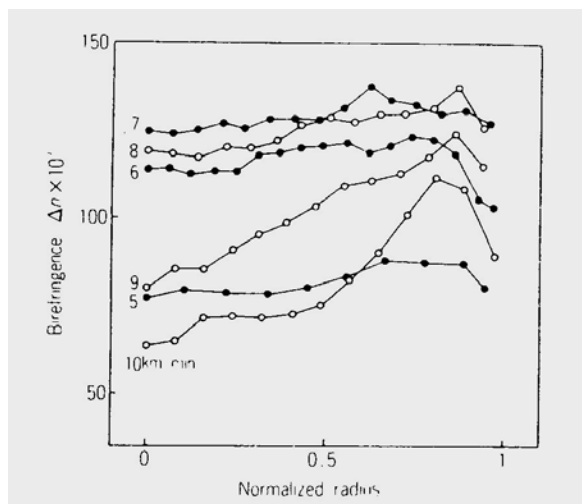
شکل ۱۰-۲- ارتباط بین ضریب شکست مضاعف فاز کریستالی آرایش یافته (Δn_c) و ضریب شکست

مضاعف فاز آمورف آرایش یافته (Δn_a) با سرعت ریسندگی [۸.۹]

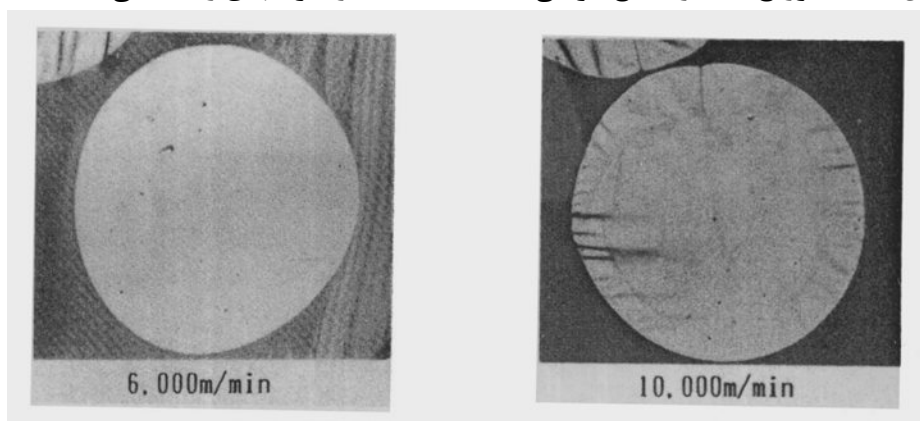
۳-۲-۲- ساختمان غلاف - مغزی لیف

شکل (۱۱-۲) تغییرات ضریب شکست مضاعف Δn یک فیلامنت به طور شعاعی از مرکز به سطح را نشان می‌دهد. فقط یک تغییر اندکی را تا سرعت ریسندگی 8000 m/min نشان می‌دهد اما این مقدار در مرکز لیف وقتی که سرعت از 9000 m/min فراتر رود بطور ناگهانی کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که نخ رسیده شده با سرعت فوق زیاد (سرعت ریسندگی 8000 m/min) دارای ساختار شعاعی ناهمگنی است بطوریکه مقدار Δn در سطح لیف زیاد و در مرکز آن کم می‌باشد.

شکل (۱۲-۲) نشان دهنده میکروگرافهای TEM سطح مقطع فیلامنتهای است که با سرعتهای 6000 m/min و 10000 m/min رسیده شده اند و سپس با اسید اسمیک^۱ رنگ شده اند. در این شکل مشخص می‌شود که مرز مشخصی بین پوسته و مغزی در سطح مقطع فیلامنت رسیده شده در سرعت 10000 m/min وجود دارد. Δn مغز این فیلامنت در حدود 0.06 بوده که نزدیک به مقدار Δn نخهای POY می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که مغزی دارای ساختاری شبیه به فیلامنتهای POY باشد.



شکل ۱۱-۲- توزیع Δn در مقطع عرضی فیلامنت PET در سرعت‌های ریسندگی مختلف [۷]



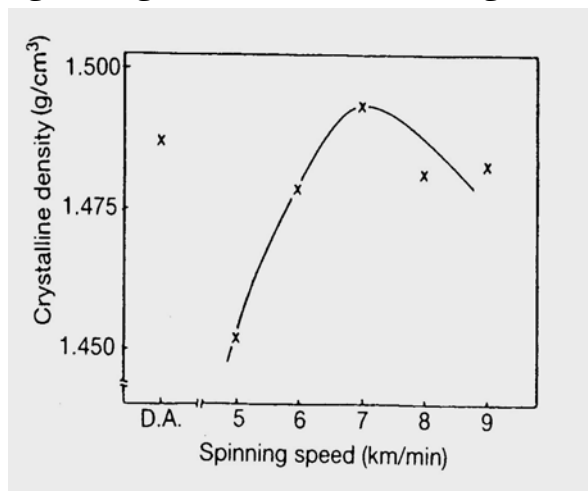
شکل ۱۲-۲- عکس سطح مقطع فیلامنت ریسیده شده با سرعت بالا که توسط میکروسکوپ الکترونی

انتقالی (TEM) گرفته شده است [۷، ۱۰]

۴-۲-۲- رابطه سرعت ریسندگی و ساختمان فاز کریستالی

فضاهای Bragg در مورد فیلامنت‌های ریسیده شده در سرعت بالا در جدول (۱-۲) خلاصه شده اند. فضای (010) و (100) با افزایش سرعت ریسندگی کاهش می یابد، اما فضای (105) هیچ گونه تغییری را نشان نمی دهد، این موضوع می تواند بیانگر آن باشد که شبکه کریستالی فیلامنت ریسیده شده با سرعت بسیار بالا، در جهت شعاع نسبت به محور لیف دارای تراکم بیشتری است. دانسیته کریستالی که از ثابت های شبکه برآورد می شود با بالا رفتن سرعت ریسندگی تا سرعت

۷۰۰۰ m/min افزایش یافته، صورت آرایش کریستالی ارتقاء می یابد، شکل (۱۳-۲). و لیکن در سرعت‌های بالای ۸۰۰۰ و ۹۰۰۰ m/min ساختمانی شش‌گانه نایک‌واخت شده و دانسیته کریستالی کاهش می یابد.



شکل ۱۳-۲- ارتباط بین دانسیته کریستالها و سرعت ریسندگی
جدول ۱-۲- ارتباط بین فضا‌های Bragg و سرعت ریسندگی

	Bragg spacing				
	(010)	(100)	(200)	($\bar{1}03$)	($\bar{1}05$)
5000m/min	5.07 Å	3.48 Å	(3.47) Å	3.40 Å	2.11 Å
6000m/min	5.01 Å	3.44 Å	(3.44) Å	3.37 Å	2.10 Å
7000m/min	4.98 Å	3.42 Å	(3.42) Å	3.37 Å	2.10 Å
8000m/min	4.99 Å	3.42 Å	(3.42) Å	3.38 Å	2.10 Å
9000m/min	4.99 Å	3.42 Å	(3.42) Å	3.38 Å	2.10 Å
Drawn and heat-treated	5.04 Å	3.46 Å	(3.45) Å	3.36 Å	2.10 Å

اندازه کریستالها نیز با زیاد شدن سرعت ریسندگی افزایش می یابد. جدول (۲-۲) فهرستی از ابعاد کریستال است که توسط Shimizu و همکارانش طبق معادلات Scherrer و Hosemann اندازه گیری شده است [۸، ۱۱]. اندازه کریستال بر اساس فرمول Hosemann در جهت محور c که از صفحات (103) و (105) محاسبه شده در سرعت ریسندگی ۵۰۰۰ m/min از فیلامنت‌های ریسیده شده معمولی و تحت عملیات حرارتی قرار گرفته بزرگتر است، و تا سرعت ۸۰۰۰ m/min این اندازه افزایش می یابد تا جایی که اندازه کریستال دو برابر بزرگتر از فیلامنت های ریسیده شده معمولی و تحت عملیات حرارتی قرار گرفته می‌شود. اندازه کریستال در سرعت ۹۰۰۰ m/min کاهش می یابد، اما با این حال از اندازه

کریستال در فیلامنت ریسیده شده و کشیده شده که تحت عملیات حرارتی قرار گرفته است بزرگتر است. مشخص شده است اندازه کریستال در جهت شعاعی محور لیف همانطور که در بعد عمودی توسط طرحهای (100) و (010) محاسبه شده است با سرعت ریسندگی بطور یکنواخت افزایش می یابد. اندازه کریستال تا سرعت 6000 m/min از فیلامنت ریسیده شده و تحت عملیات حرارتی قرار گرفته کوچکتر است. مقادیر داخل کروهه در جدول (۲-۲) بوسیله تقسیم اندازه کریستال به واحد همان کریستال بدست می آید و بدین صورت تعداد واحد کریستالهای مجتمع شده در جهات مربوطه تعیین می شود. کریستال از حدود ۱۵ واحد کریستالی در سرعت ریسندگی 7000 m/min تشکیل می شود. تعداد واحدهای کریستال در جهت (110) بعنوان مثال در جهت عمود بر صفحه (100) از جهات دیگر بزرگتر است، و در سرعت بالای 8000 m/min به مقدار ۲۰ می رسد. با در نظر گرفتن این که حلقه آروماتیک روی صفحه (100) واحد کریستال قرار میگیرد، عمل کریستالی شدن در جهت خاصی که در آن حلقه های آروماتیک جمع میشوند، پیشرفت می کند.

جدول ۲-۲- ارتباط بین سرعت ریسندگی و اندازه کریستالها

	According to Scherrer			According to Hosemann			
	(010)	(100)	(200)	(100),(200)	g_{II}	(103),(105)	g_{II}
5000m/min	49.4 Å [9.7]	29.7 Å [7.5]	29.5 Å [8.5]	(29.5) Å	-	66.8 Å [6.2]	1.12%
6000m/min	59.6 Å [11.9]	49.5 Å [12.6]	46.0 Å [13.4]	47.8 Å [13.9]	4.5%	91.6 Å [8.5]	0.75%
7000m/min	67.2 Å [13.5]	53.9 Å [13.8]	53.3 Å [15.6]	55.8 Å [16.3]	4.4%	102.9 Å [9.6]	0.71%
8000m/min	72.1 Å [14.4]	60.9 Å [15.4]	63.9 Å [18.7]	69.0 Å [20.2]	4.5%	115.6 Å [10.8]	0.61%
9000m/min	81.1 Å [16.3]	69.3 Å [17.6]	65.2 Å [19.1]	72.5 Å [21.2]	4.8%	90.0 Å [8.4]	0.53%
Drawn and heat-treated	64.1 Å [12.7]	47.8 Å [12.3]	41.0 Å [11.9]	42.1 Å [12.3]	4.4%	60.1 Å [5.6]	0.40%

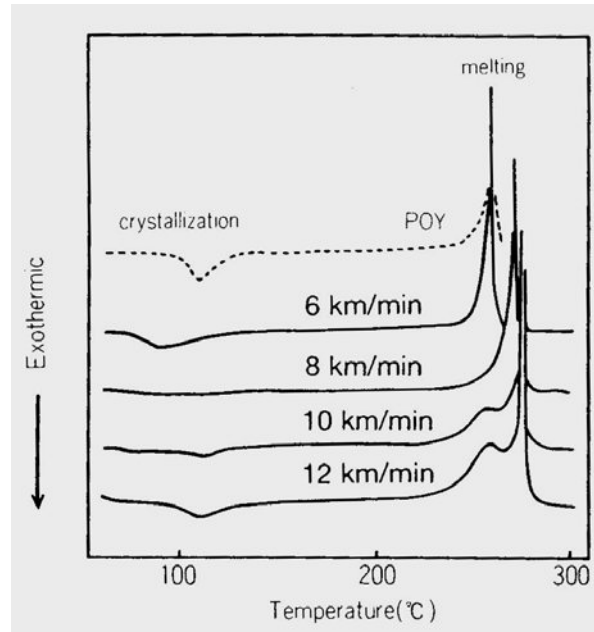
منحنی^۱ DSC فیلامنتهای پلی استر از پیکهای گرمازا^۲ (ناشی از کریستالی شدن در دمای پایین تر) و گرماگیر^۳ (ناشی از ذوب شدن در دمای بالاتر) تشکیل شده است، (شکل ۱۴-۲). پیک کریستال شدن در سرعت 6000 m/min به دمای پایین تری تغییر مکان می یابد و شدت آن ضعیف می شود. هنگامی که کریستال شدن ناشی از آرایش یافتگی در سرعت 8000 m/min انجام میگیرد پیک کریستالی ناپدید می شود. دمای پیک ناشی از ذوب با افزایش سرعت ریسندگی به سمت درجه حرارت های بالاتر انتقال می یابد و هنگامی که سرعت ریسندگی از 10000 m/min تجاوز کند شانه ای (فرورفتگی) در درجه حرارت پایین تر از پیک ذوب اصلی پدیدار می شود.

- Differential scanning calorimetre

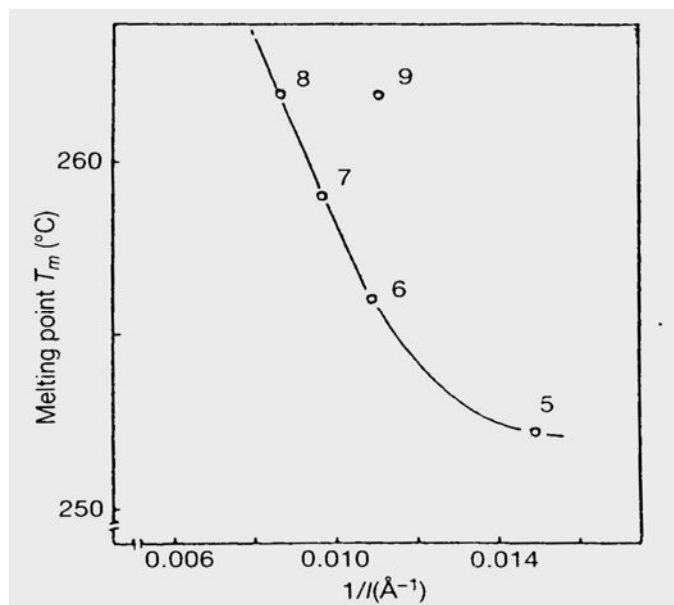
- Exothermic

- Endothermic

چنین تصور می‌شود که شانه ناشی از ذوب قسمت مغزی در ساختمان پوسته - مغز فیلامنت است. با پدیدار شدن این شانه پیکی گرمازا ناشی از کریستالی شدن در دمای 105°C مشاهده می‌شود. Kikutani و همکارانش چنین اندیشیدند که این پیک گرمازا ناشی از ساختمان POY مانندی است که در قسمت مغزی در سرعت‌های بیش از 10000 m/min ایجاد می‌شود. شکل (۲-۱۵) بر اساس نتایج Shimizu و همکارانش می‌باشد، که در آن درجه حرارت پیک ذوب در برابر عکس ضخامت کریستالی (که از طریق تفرق اشعه X از نوع زاویه باز تخمین زده شده است) رسم شده است. از این منحنی چنین نتیجه گیری می‌شود که نقطه ذوب با بیشتر شدن ضخامت کریستال افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۱۴- نمودارهای DSC جهت فیلامنت PET رسیده شده در سرعت‌های مختلف [۵]



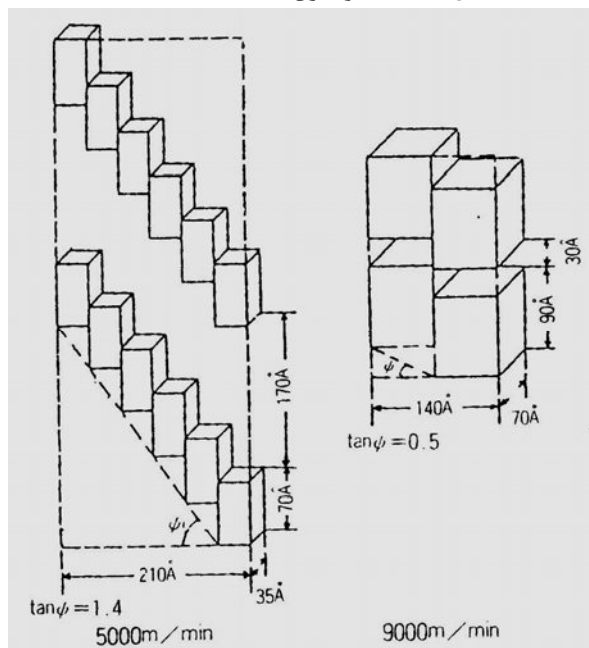
شکل ۱۵-۲- پیک دمای ذوب (T_m) به عنوان تابعی از ضخامت کریستال [۱۱،۸]

۵-۲-۲- ساختار فوق منظم فیلامنت رسیده شده با سرعت بالا

شکل (۲-۱۶) به صورت شماتیک تفرق اشعه از نوع زاویه بسته فیلامنتهای PET رسیده شده با سرعت بسیار بالا را نشان می‌دهد. تصویر چهار نقطه ای به شکل X که در سرعتهای ریسندگی ۵۰۰۰-۶۰۰۰ m/min مشاهده می‌شود با افزایش سرعت از ۷۰۰۰ m/min شروع به تغییر می‌کند. تصویر حاصله در سرتهای ۸۰۰۰-۹۰۰۰ m/min شامل تصویر دو نقطه ای به شکل دو مثلث (که رأس آنها به مرکز است) و نواری در جهت افقی می‌باشد. Shimizu و همکارانش شدت تفرق را از مدلی که از کریستالهای آرایش یافته به طریقی خاص طبق تئوری Tsvankin به دست آمده است، محاسبه کردند و پروفیل تفرق زاویه اشعه x, small - angle را شبیه سازی نمودند، این نتایج در شکل (۲-۱۷) نشان داده شده است. در این شکل هر بلوک مجزی متشکل از شش کریستال کوچک آرایش یافته است که به صورت شطرنجی قرار گرفته اند و فاصله فضای میانی بلوکها در سرعت ۵۰۰۰ m/min زیاد است. این نمونه با یک تک بلوک متشکل از دو کریستال بزرگتر با فاصله فضایی میانی کوچکتر در سرعت ۹۰۰۰ m/min، مقایسه شده است و منطقه آمورف دو بلوک کریستالی را در جهت افقی به هم متصل میکند و یک ساختمان میکروفیبریلی تشکیل می‌دهد.

5000m/min	6000m/min	7000m/min	8000m/min	9000m/min

شکل ۱۶-۲- الگو تفرق اشعه x , small - angle



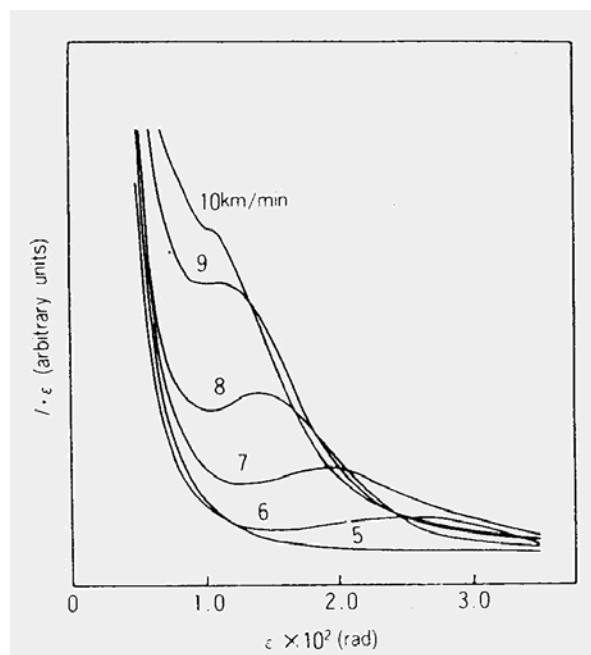
شکل ۱۷-۲- مدل ساختمانی دقیق از فیلامنتهای رسیده شده در سرعت ۵۰۰۰ m/min و ۹۰۰۰ m/min [۱۱.۸]

کسر کریستال (یعنی ضخامت کریستال / طول تکرار) از مدل دو فازی کریستالهای تکرار شونده و فاز آمورف معادل ۲۸٪ (۲۶٪ cf.x) که از طریق دانسیته محاسبه شده است) برای فیلامنت رسیده شده با سرعت ۵۰۰۰ m/min برآورد شده است، اما این مقدار در سرعت تولید ۹۰۰۰ m/min به مقدار خیلی بیشتری افزایش یافته و به حدود ۷۵٪ می رسد (۳۴٪ cf.x) که از طریق دانسیته محاسبه شد است).

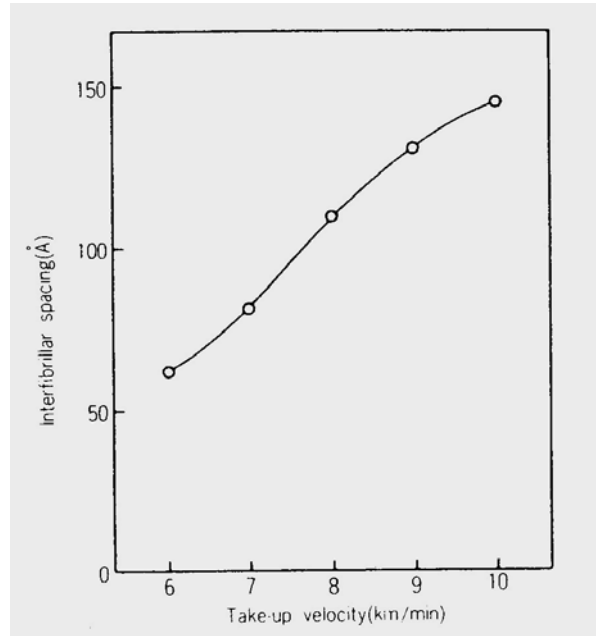
Shimizu نتیجه گرفت که چنین اختلافی ناشی از فضاهاى خالی بین میکروفیبریلهاى است که در محاسبه منظور

نشده اند.

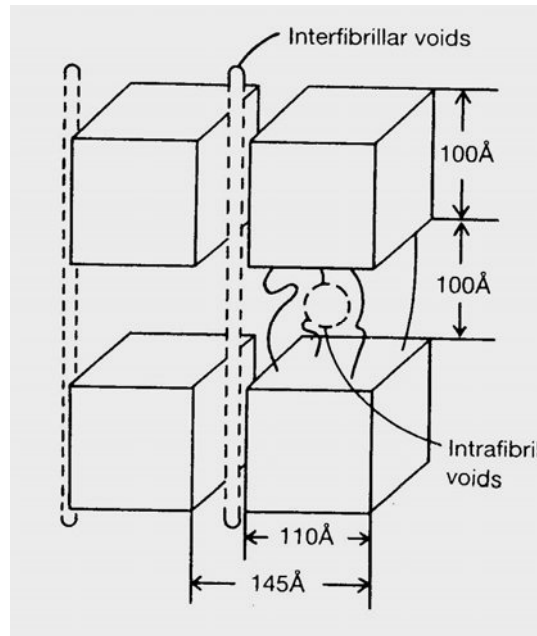
[5,7] Inshizaki یک مدل ساختمانی ظریف را بر اساس نتایج پروفیل تفرق اشعه X و خط افقی پیشنهاد کرد که با زاویه شکست θ تصحیح شده است، شکل (۲-۱۸). شدت تفرق به طور یکنواخت تا سرعت 5000 m/min ، در حالیکه یک برآمدگی یا ماکزیمم در منحنی تفرق در سرعت ریسندگی بالاتر از 6000 m/min مشاهده میشود، کاهش می یابد. از آنجا که پیک پهن در پروفیل تفرق، در سرعت $8000-9000 \text{ m/min}$ ظاهر میشود، فاصله بین میکروفیبریلی متوسط با بکارگیری معادله Bragg، محاسبه شده است. همانطور که در شکل (۲-۱۹) مشاهده میشود، با افزایش سرعت ریسندگی این فواصل زیاد می شود. فاصله بین میکروفیبریلی در سرعت 6000 m/min معادل 62°A و تا مقدار 145°A در سرعت 10000 m/min افزایش می یابد. خط افقی و شدت در جهت عمودی نیز، با سرعت ریسندگی افزایش می یابد. با در نظر گرفتن این نتایج، نویسندگان یک مدل ریز ساختمانی را برای بخش پوسته ارائه دادند که در شکل (۲-۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸- معادله شدت جهت SAXS از فیلامنتهای PET که در سرعتهای مختلف ریسیده شده اند [۷،۵]



شکل ۱۹-۲- فاصله درون فیبریلی به عنوان تابعی از سرعت ریسندگی [۵،۷]

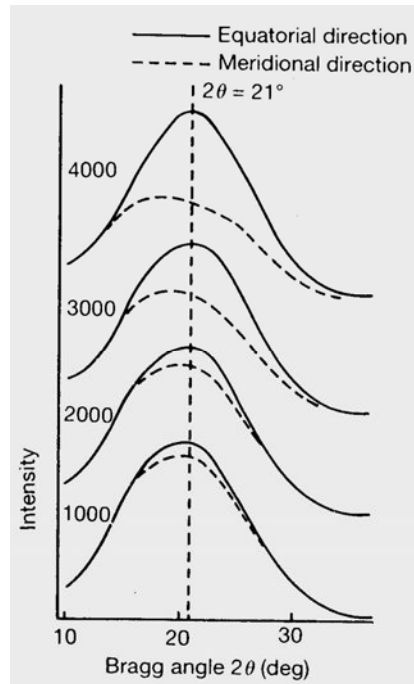


شکل ۲۰-۲- مدل ساختمانی دقیق برای سرعت ریسندگی 10000 m/min (بر اساس نظر Ishizaki و همکارانش) [۱۰]

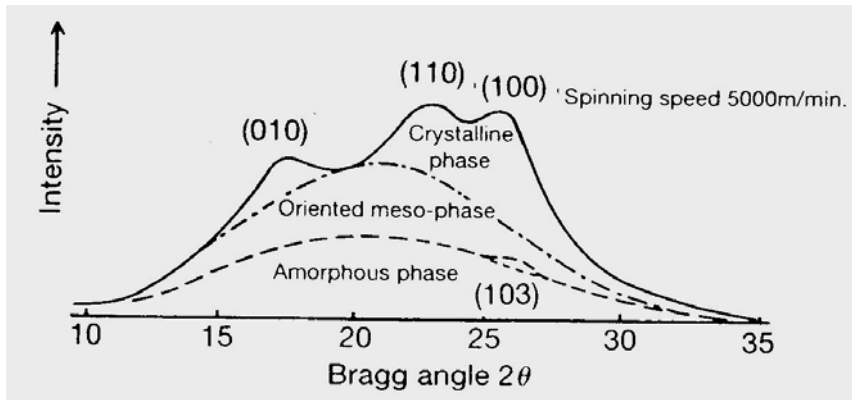
۶-۲-۲- فاز مزوی آرایش یافته

ریز ساختار و یا ساختار فوق منظم الیاف با استفاده از مدل دو فازی شامل نواحی کریستالی و آمورف مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. در این تجزیه و تحلیل تمامی فازهایی که کریستالی نبودند به فاز آمورف نسبت داده شدند. Shimizu و همکارانش نظریه فاز مزو آرایش یافته^۱ را به منظور ساختمان فاز غیر کریستالی ارائه کردند. میزان کریستالی شدن که از دانسیته محاسبه شده است، تا سرعت 4000 m/min به ندرت افزایش می یابد. البته همانطور که قبلاً ذکر شد میزان آرایش یافتگی دائماً بهبود می یابد. بنابراین ساختمان لیف به شدت آرایش یافته می شود ولی در محدوده سرعت ریسندگی بین $3000-4000 \text{ m/min}$ لیف هنوز آمورف است. تفرق اشعه X تنها یک حفره دایره ای را مانند نخ ریسیده شده در سرعتهای $1000-2000 \text{ m/min}$ نشان می دهد که در این حالت شدت اشعه X متفرق شده، در جهات افقی و عمودی همانطور که در شکل (۲-۲۱) نشان داده شده مساوی می باشد. هنگامی که سرعت ریسندگی افزایش می یابد، اختلاف در شدت اشعه های متفرق شده بین جهات افقی و عمودی افزایش یافته و در سرعت 4000 m/min به بیشترین مقدار خود می رسد. از آنجا که شدت در جهت افقی بیشترین مقدار خود را در $\theta = 21^\circ$ نشان می دهد، زنجیر مولکولی با ساختار تکرار شونده به طول 4°A در نظر گرفته می شود. شدت اشعه X متفرق شده به سه قسمت که مربوط به فاز کریستالی، فاز مزو آرایش یافته و فاز آمورف است تقسیم می شود (شکل ۲-۲۲). هر ناحیه متناسب با جزء فاز مورد نظر است و شکل (۲-۲۳) رابطه بین سرعت ریسندگی و منطقه هر فاز را نشان می دهد.

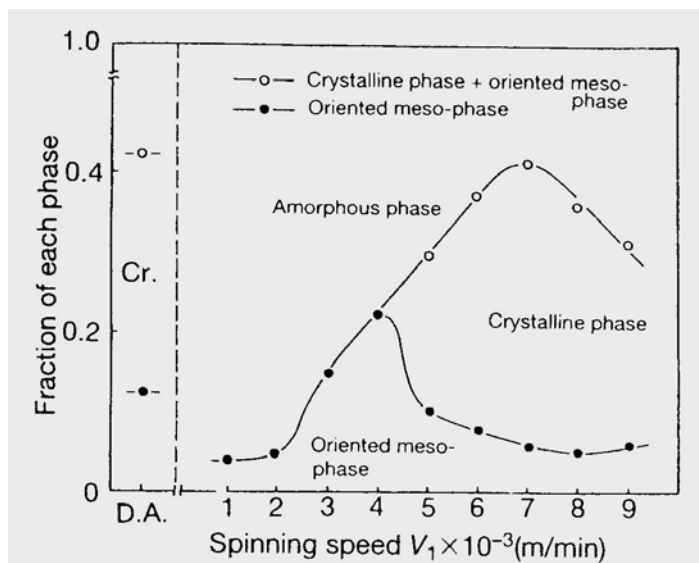
در این شکل جزء فاز مزو آرایش یافته افزایش می یابد و در سرعت 4000 m/min حداکثر به بیش از ۲۰٪ می رسد. هنگامی که کریستال شدن ناشی از آرایش یافتگی (در سرعت ریسندگی 5000 m/min) صورت می پذیرد، فاز مزو آرایش یافته به فاز کریستالی تغییر شکل می دهد. در سرعت های بالای 7000 m/min فاز کریستالی کاهش می یابد و فاز آمورف افزایش می یابد در حالیکه فاز مزو آرایش یافته به مقدار ناچیزی کاهش می یابد. این انتقالات فازی از طریق شکل گیری ساختار غیر همگن در جهت شعاعی و در نتیجه از بین رفتن آرایش یافتگی مولکولی در مغز لیف در سرعت بالای 7000 m/min رخ می دهد.



شکل ۲-۲۱- شدت توزیع استوائی و نصف النهاری راجع به WAXS از ناحیه آمورف [۱۲،۱۱،۸]



شکل ۲-۲۲- طرح تفرق اشعه x در رابطه با جدایی فازهای کریستالی، مزو آرایش یافته و آمورف [۱۲]



شکل ۲۳-۲- کسری از فازهای کریستالی، مزو آرایش یافته و آمورف به عنوان تابعی از سرعت ریسندگی [۱۲،۱۱،۸]

۲-۳- تشکیل ساختمان لیف در فرآیند ریسندگی با سرعت بالا

خواص فیزیکی و ساختمان فیلامنت ریسیده شده در سرعت بالا در بخشهای گذشته مرور شد. در این بخش به تشریح چگونگی شکل گیری ساختمان لیف در طول خط ریسندگی پرداخته می شود.

۲-۳-۱- گردنی شدن در فرآیند ریسندگی

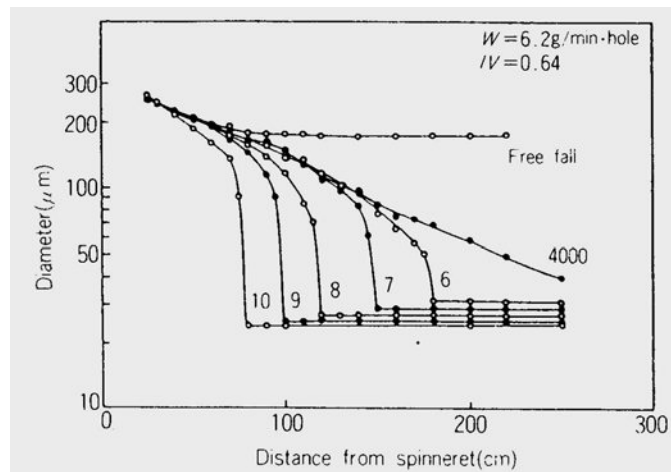
در [13] Perez، [14] Matsui و [8,15] Shimizu با همکاری نازک شدن سریع ضخامت فیلامنت PET در یک نقطه در خط ریسندگی با سرعت بالا را تأیید کرده اند. این پدیده در فرآیند تولید لیف گردنی شدن^۱ نام دارد، زیرا دقیقاً شبیه به پدیده گردنی شدن در مرحله کشش است. قطر فیلامنت در خط ریسندگی به عنوان تابع فاصله از رشته ساز^۲ اندازه گیری شد و نتایج آن در شکل (۲-۲۴) آورده شده است. برای جزئیات بیشتر در مورد سیستم اندازه گیری قطر فیلامنت در جریان تولید به مرجع ۸ مراجعه شود.

قطر فیلامنت از رشته ساز تا غلتک برداشت در سرعت 4000 m/min بطور یکنواخت کاهش می یابد. وقتی که سرعت ریسندگی به 6000 m/min افزایش می یابد، نازک شدن سریع ضخامت و قطر فیلامنت در یک نقطه معین مشاهده میشود، یعنی همان پدیده گردنی شدن. اگر چه باید ذکر کرد که در حدود 5 cm زیر رشته ساز، صرف نظر از سرعت ریسندگی نازک شدن تدریجی قطر فیلامنت در هر صورت اتفاق می افتد. قطر فیلامنت برداشت شده تقریباً مساوی

- Necking

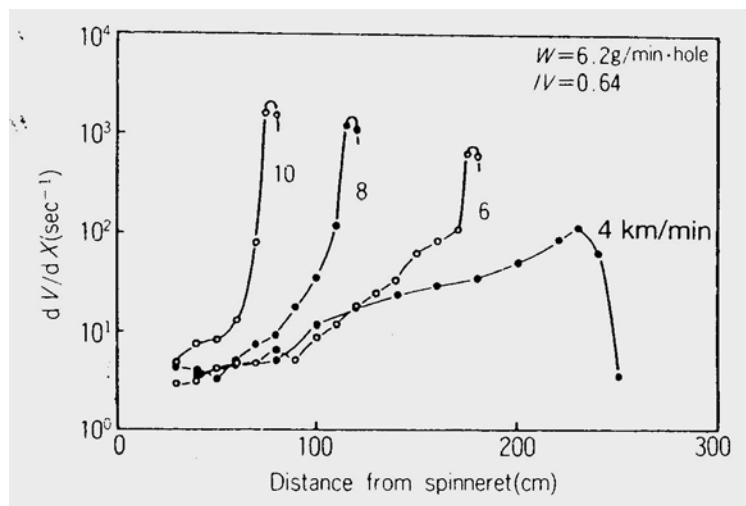
- Spinneret

قطر فیلامنت در پایان نقطه گردنی شدن می‌باشد و شروع گردنی شدن در خط ریسندگی با افزایش سرعت ریسندگی به سمت بالاتری تغییر مکان می‌دهد یا به عبارتی نقطه گردنی شدن به رشته ساز نزدیکتر می‌شود. این بدان معنی است که در سرعت‌های ریسندگی بالاتر تغییرات ساختاری در فیلامنت سریعتر و شدیدتر است.



شکل ۲۴-۲- تغییرات قطر فیلامنت در سرعت ریسندگی ۴۰۰۰ m/min الی ۱۰۰۰۰ m/min [۱۶]

شکل (۲-۲۵) متوسط مقادیر میزان تغییر شکل dv/dx در فواصل بزرگتر از ۵ cm از داده‌های ارائه شده در شکل (۲-۲۴) را نشان می‌دهد. میزان تغییر شکل در نقطه گردنی شدن به حداکثر مقدار خود رسیده و ماکزیمم مقدار تغییر شکل آن در سرعت‌های بالاتر افزایش پیدای می‌کند. برای مثال بیشترین تغییر شکل در سرعت ریسندگی ۴۰۰۰ m/min معادل 100 sec^{-1} است که در این حالت هیچگونه گردنی شدنی مشاهده نمی‌شود. در حالیکه این میزان در سرعت ۱۰۰۰ m/min به بالای 1500 sec^{-1} میرسد. از آنجائیکه نرخ تغییر شکل محاسبه شده در اینجا در فواصلی با میانگین بالای ۵ cm تخمین زده شده است، نرخ تغییر شکل در نقطه گردنی شدن ممکن است که به 20000 sec^{-1} افزایش یابد، ریسندگی با سرعت بالا تنها مثال شناخته شده از این تغییر شکل فوق العاده عظیم در عملیات کشش می‌باشد.



شکل ۲۵-۲- نسبت میزان تغییر شکل در خط ریسندگی

تنش ریسندگی به هنگام فرآیند نازک شدن در طول خط ریسندگی طبق معادله زیر محاسبه می شود.

$$F = F_L + \int_x^l \rho A g dx - W(V_l - v) - \int_x^l c_f (\rho_a / 2) v^2 \pi D dx \quad (2-3)$$

$$C_f = 0.37 Re^{-0.61} \quad (2-4)$$

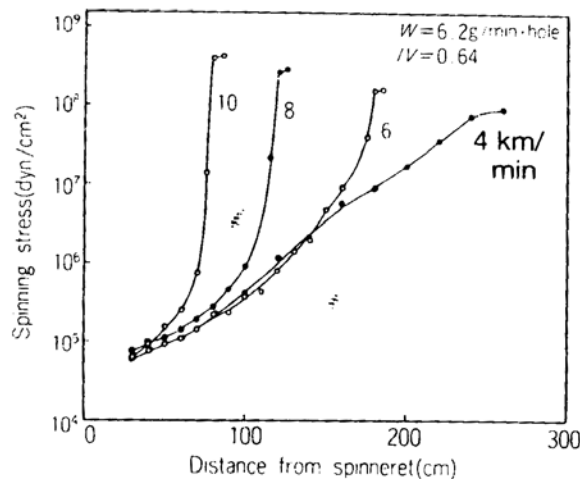
در اینجا X فاصله بین رشته ساز و یک نقطه در خط ریسندگی را نشان می دهد، L فاصله بین رشته ساز و نقطه برداشت، F تنش ریسندگی در نقطه X ، F_L تنش در نقطه برداشت، ρ دانسیته پلیمر، A مساحت سطح مقطع فیلامنت در نقطه X ، g شتاب جاذبه، W وزن پلیمر خارج شده، V_L سرعت برداشت، v سرعت فیلامنت در نقطه X و ρ_a دانسیته هوا، C_f ضریب کشش هوا، D قطر فیلامنت در نقطه X و Re عدد رینولدز^۱ می باشند.

قسمت دوم معادله (۲-۳) ناشی از جرم پلیمر، قسمت سوم ناشی از نیروی اینرسی و قسمت چهارم ناشی از مقاومت هوا می باشد. از کشش سطحی صرف نظر شده و معادله Matsui برای C_f تنظیم شده است [۱۴]. بنابراین تنش ریسندگی در نقطه X با کم کردن نیروی اینرسی تولید شده بین نقطه X و نقطه برداشت و تنش حاصله به واسطه مقاومت هوا از مجموع تنش برداشت در انتهای خط ریسندگی و جرم پلیمر در نقطه X بدست می آید. تنش ریسندگی بطور ناگهانی در شروع مرحله گردنی شدن افزایش می یابد، این موضوع که با افزایش سرعت برداشت (سرعت ریسندگی) در تنش ریسندگی پایین تری افتاق می افتد در شکل (۲-۲۶) نشان داده شده است. تنش ریسندگی بخصوص در سرعت 10000 m/min از 10^5 dyne/cm^2 به 10^8 dyne/cm^2 افزایش می یابد. این افزایش ناگهانی تنش ریسندگی در نقطه ای حدود 40 cm زیر رشته ساز در سرعت ریسندگی 10000 m/min به چشم می خورد. تحقیقات نشان می دهد که

^۱ - Reynolds number

تنش ریسندگی ابتدا توسط نیروهای اینرسی در قسمت جریان بالایی خط ریسندگی در طول ریسندگی با سرعت بسیار بالا اندازه گیری شده است.

این افزایش ناگهانی تنش ریسندگی در نقطه ای زیر رشته ساز رخ می دهد و با افزایش سرعت به رشته ساز نزدیکتر می گردد. بعنوان مثال در سرعت 10000 m/min حدود 40 cm زیر رشته ساز است. بررسی ها حاکی از آنند که تنش ریسندگی در ریسندگی های فوق سریع عمدتاً بواسطه نیروی اینرسی در قسمت بالای خط ریسندگی تعیین می شود.



شکل ۲۶-۲- تغییرات تنش ریسندگی در خط ریسندگی [۱۶]

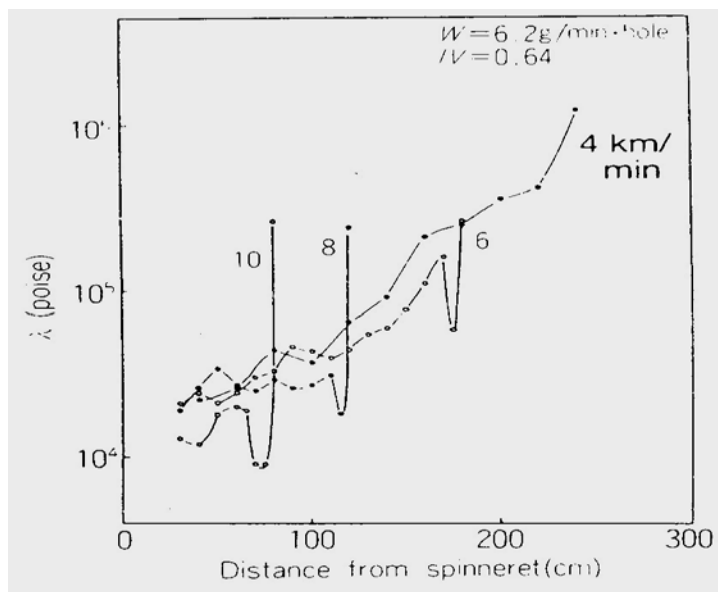
ویسکوزیته به هنگام افزایش طول را میتوان از سرعت تغییر شکل و تنش ریسندگی بر طبق معادله رئولوژی زیر

محاسبه کرد:

$$\sigma = \lambda \frac{dv}{dx} \quad (2-5)$$

در اینجا σ نشان دهنده تنش ریسندگی، λ ویسکوزیته به هنگام افزایش طول، X فاصله از رشته ساز و V سرعت فیلامنت در نقطه X را نشان می دهد.

رابطه ویسکوزیته با فاصله از رشته ساز در شکل (۲-۲۷) رسم شده است. در اینجا با افزایش فاصله X در سرعت ریسندگی 4000 m/min هنگامی که هیچگونه عمل گردنی شدن وجود ندارد، ویسکوزیته بصورت یکنواخت افزایش می یابد. وقتی که عمل گردنی شدن اتفاق می افتد، در سرعت بالای 6000 m/min ، ویسکوزیته تا فاصله خاصی افزایش پیدا کرده و سپس افت منطقه ای خواهد کرد. با افزایش سرعت ریسندگی نقطه ای که ویسکوزیته افت می کند به سمت بالای خط ریسندگی رفته و مقدار ویسکوزیته نیز کاهش می یابد. بعد از افت منطقه ای، ویسکوزیته ازدیاد طول به تندی افزایش می یابد و ضخامت فیلامنت ثابت می شود.



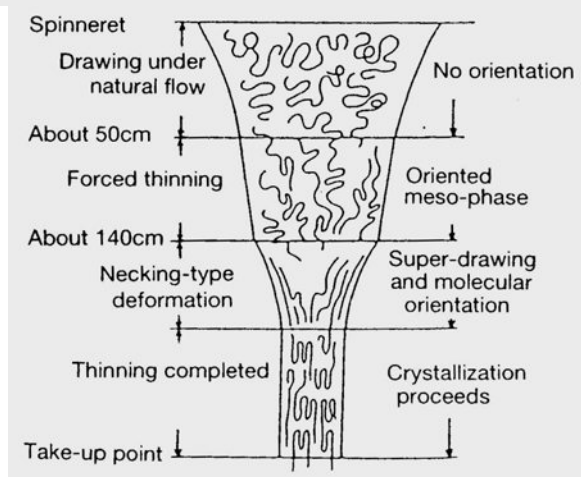
شکل ۲۷-۲- تغییرات ویسکوزیته از دیاد طول در خط ریسندگی [۱۶]

تصور می‌شود که این افت منطقه ای در ویسکوزیته به شروع عمل گردنی شدن مرتبط است. جدول (۲-۳) به طور خلاصه سرعت فیلامنت، تنش ریسندگی، ویسکوزیته و دمای فیلامنت را در نقطه شروع گردنی شدن نشان می‌دهد. برای آنکه عمل گردنی شدن در سرعت ریسندگی (سرعت برداشت) 6000 m/min رخ دهد، سرعت فیلامنت (سرعت تولید) در هنگام گردنی شدن در حدود 2000 m/min خواهد بود. در این حالت درجه حرارت فیلامنت در پایین تر مقدار خود (125°C) و میزان تنش ریسندگی آن در بالاترین مقدار $1/8 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$ می‌باشد. این رفتار را بصورت زیر بیان نموده اند؛ آرایش یافتگی زنجیری و کریستالی شدن به طور قابل ملاحظه ای توسط عمل گردنی شدن بهبود می‌یابد. آرایش یافتگی زنجیری و کریستالی باید در مدت زمان کوتاهی انجام گیرد زیرا در آن ناحیه سرعت فیلامنت (سرعت تولید) هنگامی که سرعت ریسندگی (سرعت برداشت) به عنوان مثال 5000 m/min است به بزرگی 3000 m/min می‌باشد. هنگامیکه آرایش یافتگی زنجیر توسعه می‌یابد، PET یک ساختمان پیش کریستالی را تولید می‌کند که سهولت کشش فیلامنت را افزایش می‌دهد و در نهایت شیب سرعت افزایش می‌یابد. همینطوری که آرایش یافتگی مولکولی بهبود بیشتری می‌یابد کریستالی شدن تسریع می‌شود و فاز مزو آرایش یافته تشکیل می‌شود. آنگاه ویسکوزیته از دیاد طول ناشی از کریستال شدن افزایش می‌یابد و در نهایت سیستم ثابت می‌شود. این وضعیت به صورت شماتیک در شکل (۲-۲۸) نشان داده شده است.

جدول (۲-۳) سرعت فیلامنت، نسبت تغییر شکل، تنش ریسندگی، ویسکوزیته از دیاد طول و دمای فیلامنت در آغاز گردنی

شدن

Take-up velocity (m/min)	Fiber velocity (m/min)	dv/dx (sec^{-1})	σ (dyn/cm^2)	λ (poise)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)
6000	2014	111	1.8×10^7	1.6×10^5	125
7000	928	164	5.2×10^5	3.2×10^4	150
8000	887	119	3.7×10^7	3.1×10^4	180
9000	493	65	1.1×10^7	1.7×10^4	199
10000	288	18	3.5×10^7	1.9×10^4	221



شکل ۲۸-۲- تغییر در ساختار لیف در سرعت ریسندگی بالا [۱۱.۸]

در مورد سرعت بسیار بالای ریسندگی در 10000 m/min ، فیلامنت سرعت پایین (288 m/min)، درجه حرارت بالا (221°C) و تنش ریسندگی بینهایت کم را در نقطه شروع عمل گردن شدن نشان می‌دهد، این نتایج نشان می‌دهد که آرایش یافتگی زنجیری و کریستال شدن بعدی، در نقطه شروع عمل گردنی شدن در سرعت‌های بالای 8000 m/min کمترین مقدار است. تصور می‌شود که تغییر در ویسکوزیته در عمل گردنی شدن توسط تغییرات ساختمانی که در اثر رقابت بین نیروی متقابل بین مولکولی در پلیمر مذاب و تنش ریسندگی بوجود می‌آید نتیجه می‌شود. بنابراین عمل گردنی شدن لزوماً با کریستال شدن ناشی از آرایش یافتگی همراه نیست، بلکه ترجیحاً بدون آرایش یافتگی و کریستال شدن اتفاق می‌افتد.

اگر چه این فرضیه بحث مکانیزم تشکیل ساختمان لیف را مطرح می‌کند ولی هنوز هیچ مدرک تجربی برای تصدیق این تحقیقات نظری ارائه نشده است.

۲-۳-۲- تشکیل ساختار لیف در خط ریسندگی

سوال آن است که در ریسندگی با سرعت بالا نظیر 10000 m/min در کدامین نقطه از خط ریسندگی ساختار لیف شکل خواهد گرفت؟

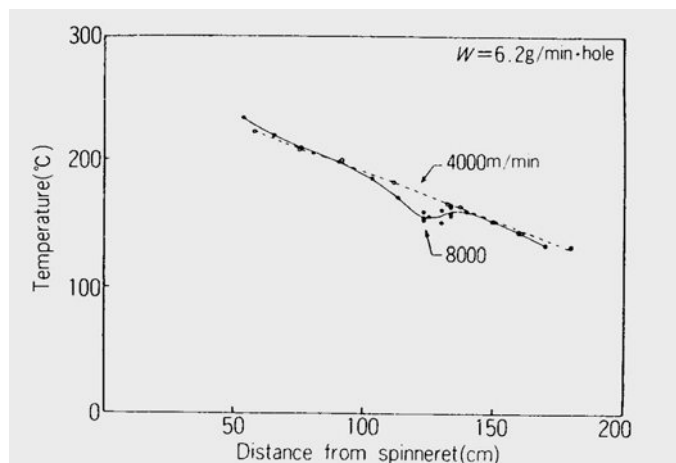
شکل (۲-۲۹) نشان دهنده درجه حرارت فیلامنت در طول خط ریسندگی است که بواسطه ترمومتر تشعشی مادون قرمز از نوع غیر تماسی اندازه گیری شده است. درجه حرارت فیلامنت به طور خطی تا نقطه 100 سانتیمتری زیر رشته ساز در سرعتهای 4000 m/min و 8000 m/min کاهش می یابد. درجه حرارت فیلامنت در سرعت 4000 m/min کاهش بیشتری را به طور یکنواخت تا حدود غلتک برداشت نشان می دهد. ولی در سرعت 8000 m/min درجه حرارت فیلامنت به طور ناگهانی با نازک شدن فیلامنت، هنگامیکه عمل گردنی شدن اتفاق می افتد، افت می کند. افت دما، زمانی که عمل گردنی شدن کامل می شود کندتر شده و آنگاه یک افزایش دما بطرف 20 سانتیمتر زیر جریان پلیمر مشاهده می گردد. در شکل (۲-۳۰) منحنی سرد شدن تجربی با منحنی سرد شدن محاسباتی در سرعت 8000 m/min مقایسه شده است. دمای فیلامنت از معادله زیر با فرض اینکه هیچگونه کریستالی شدنی اتفاق نمی افتد محاسبه شده است.

دما محیط برای 10 سانتیمتری زیر رشته ساز 150°C است و در دیگر نقاط 20°C می باشد.

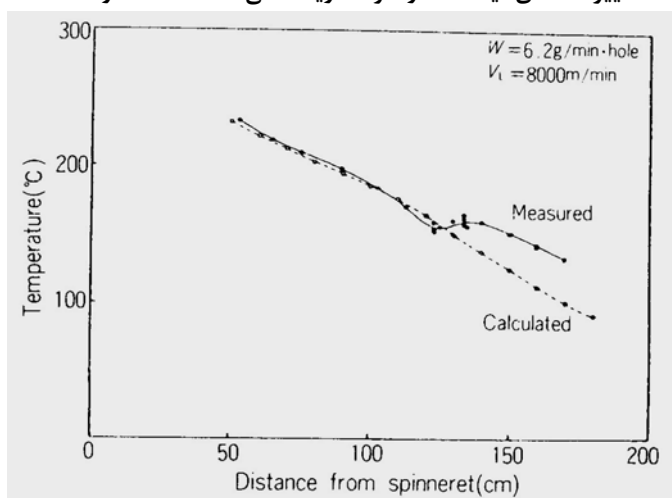
$$\text{Nu} = hD/k_a = 0.42 \text{Re}^{0.334} [1 + (8v_y/v)^2]^{0.167} \quad (2-6)$$

$$\text{WC}_p = (dT/dx) = -\pi Dh(T - T_a) \quad (2-7)$$

در اینجا W نشان دهنده وزن خروجی پلیمر، C_p گرمای ویژه پلیمر، T دمای فیلامنت، T_a دمای محیط، D قطر فیلامنت، Nu عدد ناسلت، k_a هدایت حرارتی، h ضریب انتقال حرارتی، Re عدد رینولدز، v سرعت فیلامنت و v_y سرعت سرد شدن هوای تهویه شده در راستای عمودی می باشد. دمای محاسبه شده با دمای اندازه گیری شده فیلامنت تا زمانی که عمل گردنی شدن کامل میشود، مطابقت دارد. این مسئله در شکل (۲-۳۰) نشان داده شده است. دمای اندازه گیری شده فیلامنت از این نقطه به پایین از دمای محاسبه شده، انحراف دارد. این اختلاف، احتمالاً ناشی از کریستالی شدنی است که در مدل محاسباتی در نظر گرفته نشده است. گرمازا بودن تبلور باعث افزایش اندک درجه حرارت فیلامنت شده که بواسطه سرد شدن آن جبران می شود.



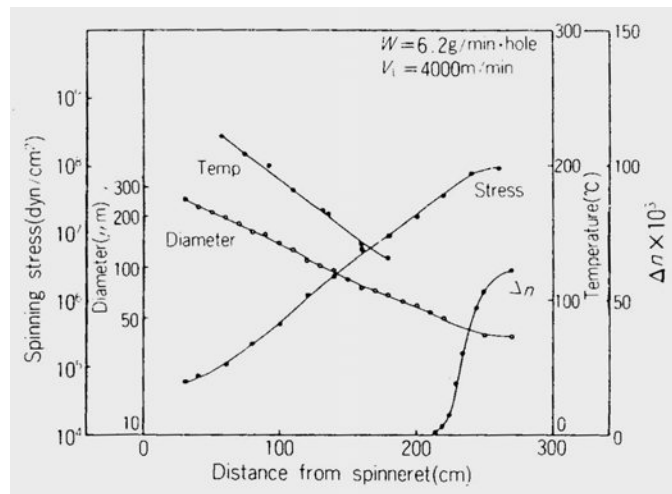
شکل ۲-۲۹- تغییرات دمای فیلامنت در سرعت ریسندگی ۴۰۰۰ m/min و ۸۰۰۰ m/min [۱۷]



شکل ۲-۳۰- دمای محاسبه شده و اندازه گیری شده برای فیلامنت در خط ریسندگی [۱۷]

شکل‌های (۲-۳۱) و (۲-۳۲) تغییرات قطر فیلامنت، تنش ریسندگی و ضریب شکست مضاعف (Δn) در خط ریسندگی در سرعت‌های ۴۰۰۰ m/min و ۸۰۰۰ m/min را نشان می‌دهند. در سرعت ۴۰۰۰ m/min ضریب شکست مضاعف از نقطه‌ای که قطر فیلامنت و سرعت فیلامنت به ترتیب شامل ۶۰ μm و ۲۰۰۰ m/min است، بتدریج افزایش می‌یابد تا به حد نهایت خود یعنی اتمام عمل نازک شدن فیلامنت برسد. در سرعت ریسندگی ۸۰۰۰ m/min ضریب شکست مضاعف (Δn) به سرعت از نقطه‌ای که گردنی شدن تمام می‌شود افزایش می‌یابد. قطر و سرعت فیلامنت در این نقطه به ترتیب ۳۵ μm و ۵۵۰۰ m/min می‌باشد. تنش ریسندگی در این نقطه 10^8 dyne/cm^2 است، که برای پیشرفت آرایش یافتگی زنجیری کافی است. آنگاه در نقطه‌ای که

گردنی شدن خاتمه می یابد ضریب شکست از ۰/۰۴ به ۰/۱۱ در فاصله ۱۵ cm پایین تر از خط ریسندگی افزایش می یابد. دمای فیلامنت در ارتباط با این افزایش سریع ضریب شکست مضاعف بالا رفته و عمل کریستالی شدن پیشرفت می کند.

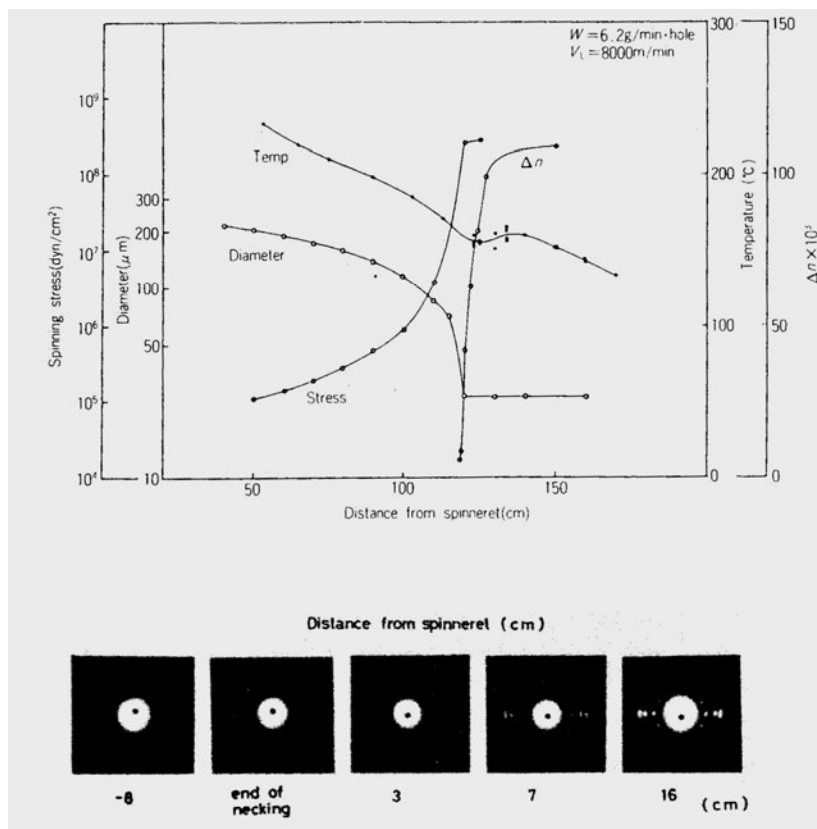


شکل ۳۱-۲- تغییرات در خواص شاخص در خط ریسندگی با سرعت ۴۰۰۰ m/min [۱۷]

طرح تفرق اشعه X زاویه گسترده^۱ هاله آمورفی را در فیلامنت نمونه گیری شده در ۸ سانتیمتر بالاتر از گردن^۲ آشکار می کند. نقاط کوچکی از کریستالها، ابتدا در زمان کامل شدن عمل گردنی شدن ظاهر میشوند و نقاط کریستالی واضحی از فیلامنت نمونه گیری شده در هفت سانتیمتر پایین تر از انتهای گردنی شدن، مشاهده شده است و کریستالها در نقطه ۱۶ سانتیمتری پایین گردنی شدن بخوبی رشد کرده اند. نتایج نشان می دهد که عمل کریستالی شدن در انتهای گردنی شدن شروع می شود و با سرعت در ۲۰ سانتیمتر پایین تر پیشرفت می کند. این بدین معنی است که یک تنش ریسندگی بالا برای افزایش سریع آرایش یافتگی متمایل به کریستالی شدن اعمال می شود و ساختمان لیف در مدت کوتاهی بعد از اینکه عمل گردنی شدن کامل شد، پایداری می یابد.

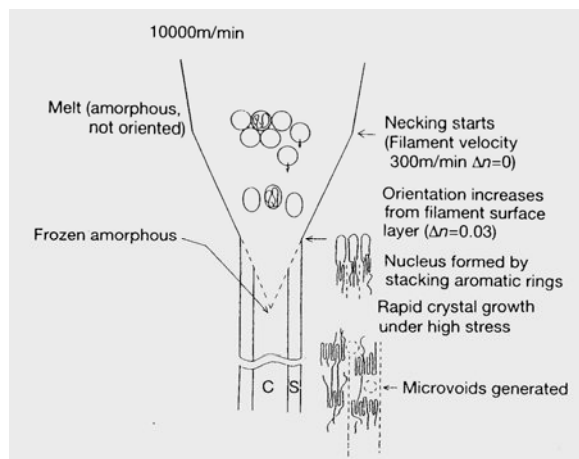
- Wide- angle

- Neck



شکل ۳۲-۲ تغییرات در خواص شاخص در خط ریسندگی با سرعت ۸۰۰۰ m/min [۱۷]

این فرآیند نازک شدن لیف و تشکیل ساختمان بعدی توسط [10] Ishizaki و [5] Ichara در شکل (۲-۳۳) به طور فرضی نشان داده شده است. وقتی که یک پلیمر مذاب با سرعت ۱۰۰۰۰ m/min از رشته ساز خارج میشود، برای کاهش ویسکوزیته خطی تسلیم شده و عمل گردنی شدن سریعاً در سرعت پایین فیلامنت ۳۰۰ m/min توسعه می یابد. زیرا تعادل بین نیروی پیوستگی و تنش ریسندگی باید وجود داشته باشد. آرایش یافتگی مولکولی عمدتاً در سطح فیلامنت توسعه می یابد و Δn با کامل شدن عمل گردنی شدن تا ۰/۰۳ افزایش می یابد. آنگاه حلقه های آروماتیک برای تشکیل کریستالهای هسته ای اجتماع می کنند و کریستالها به سرعت در چند سانتی متر پایین تر رشد می کنند. اگر چه این فرآیند از سطح نخ به داخل آن نفوذ می کند، رشد کریستال آنقدر سریع است که حفره های بسیار ریز میکروسکوپی در منطقه غیر کریستالی در میان و داخل فیبریلها تولید می گردد. از آنجا که تنش ریسندگی روی سطح لیف متمرکز است آرایش یافتگی مولکولی در قسمت مرکزی فیلامنت که ساختار آمورف در آن متمرکز است، پیشرفت نخواهد کرد. پیشرفت تشکیل ساختمان فیلامنت به طور شماتیک در شکل (۲-۳۳) نشان داده شده است. ع

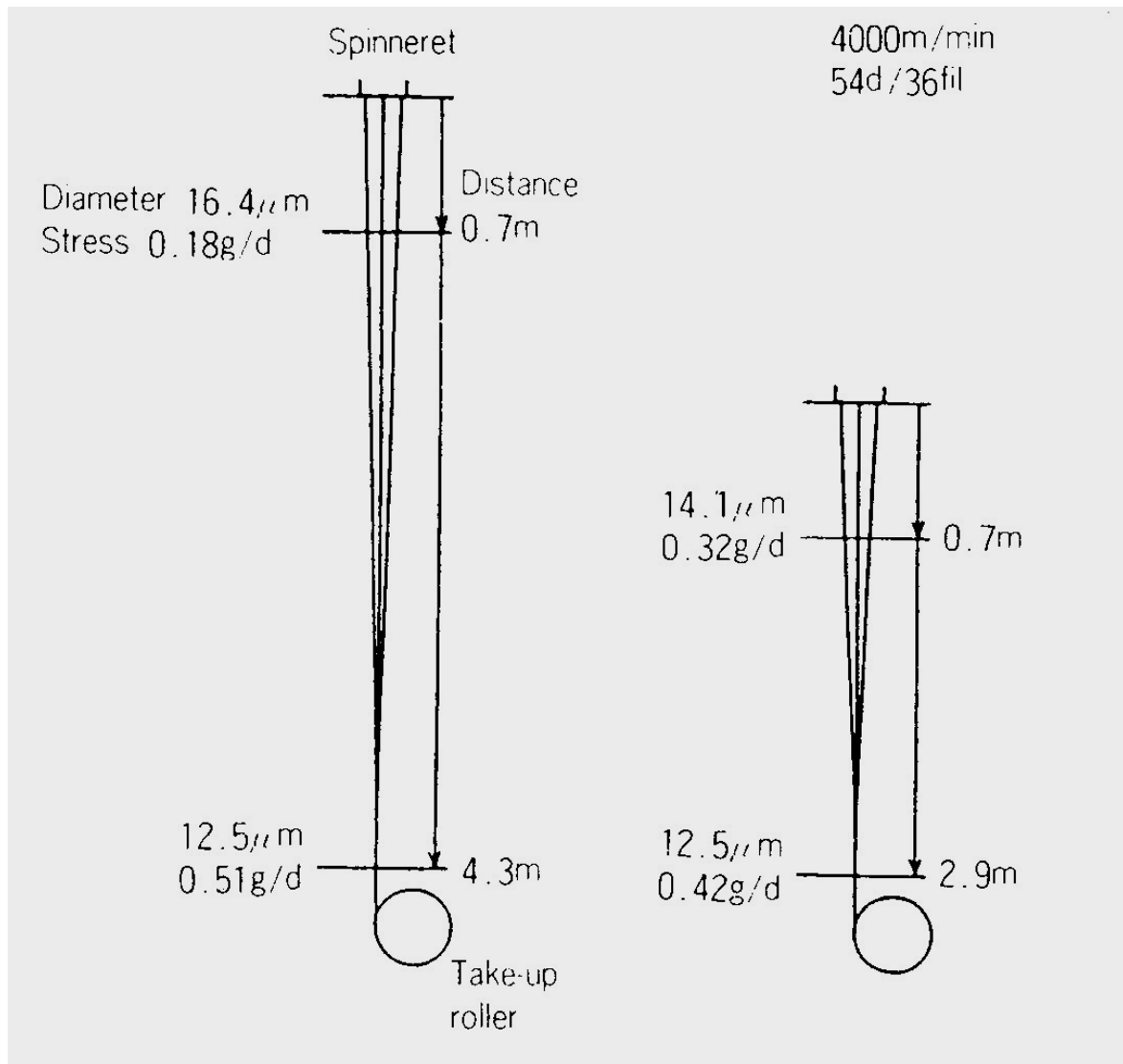


شکل ۳۳-۲- مدلی جهت شکل گیری ساختمان لیف (بر اساس تحقیقات [5] Ichara و همکارانش و همچنین [10] Ishizaki و همکارانش)

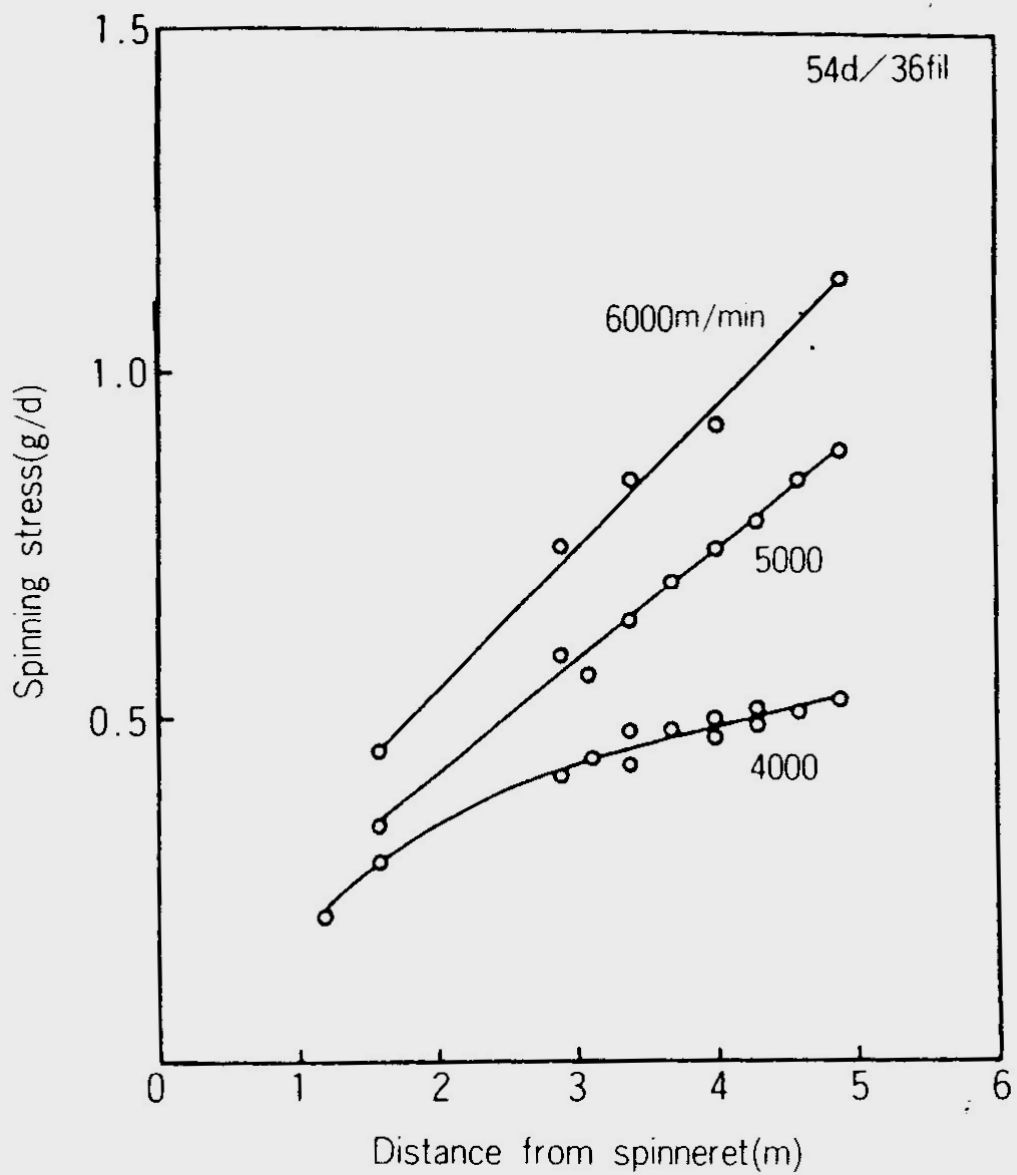
۳-۲-۲- تأثیر مقاومت هوا در عملیات ریسندگی بسیار سریع

تنش ریسندگی در سرعت ریسندگی بالا ناشی از نیروی اینرسی و مقاومت هوا می‌باشد. در کل پذیرفته شده است که تشکیل ساختمان، عمدتاً بواسطه نیروی داخلی انجام می‌گیرد و مقاومت هوا نقش مهمی را در سرعت‌های ریسندگی مافوق بالای 8000 m/min بازی نمی‌کند. ولی در مواردی نیز مشاهده شده است که مقاومت هوا، میتواند روی تشکیل ساختمان لیف در فیلامنت‌های ظریف (کمتر از ۱ دنیر) در سرعت بالا حدود $4000-5000 \text{ m/min}$ تأثیر گذارد. در این فصل تأثیر مقاومت هوا در عملیات ریسندگی بررسی شده است. شکل (۳۴-۲) نشان دهنده طریقه آزمایش تولید لیف است که در آن با کم و زیاد شدن فاصله رشته ساز و غلتک برداشت (هنگامیکه سرعت برداشت خروجی پلیمر و شرایط سرد شدن ثابتند) مقاومت هوای اعمال شده تغییر می‌کند.

هنگامیکه طول در گردش فیلامنت تغییر می‌کند مقدار تنش ریسندگی (تنش برداشت) در نقطه برداشت نیز تغییر می‌کند، همانطور که در شکل (۳۵-۲) نشان داده شده است در این شکل دانسیته خطی نخ چند فیلامنتی (۳۶ فیلامنتی) 54 d است. در سرعت‌های $4000-6000 \text{ m/min}$ مقدار تنش برداشت با افزایش طول در گردش فیلامنت بطور یکنواخت زیاد می‌شود.

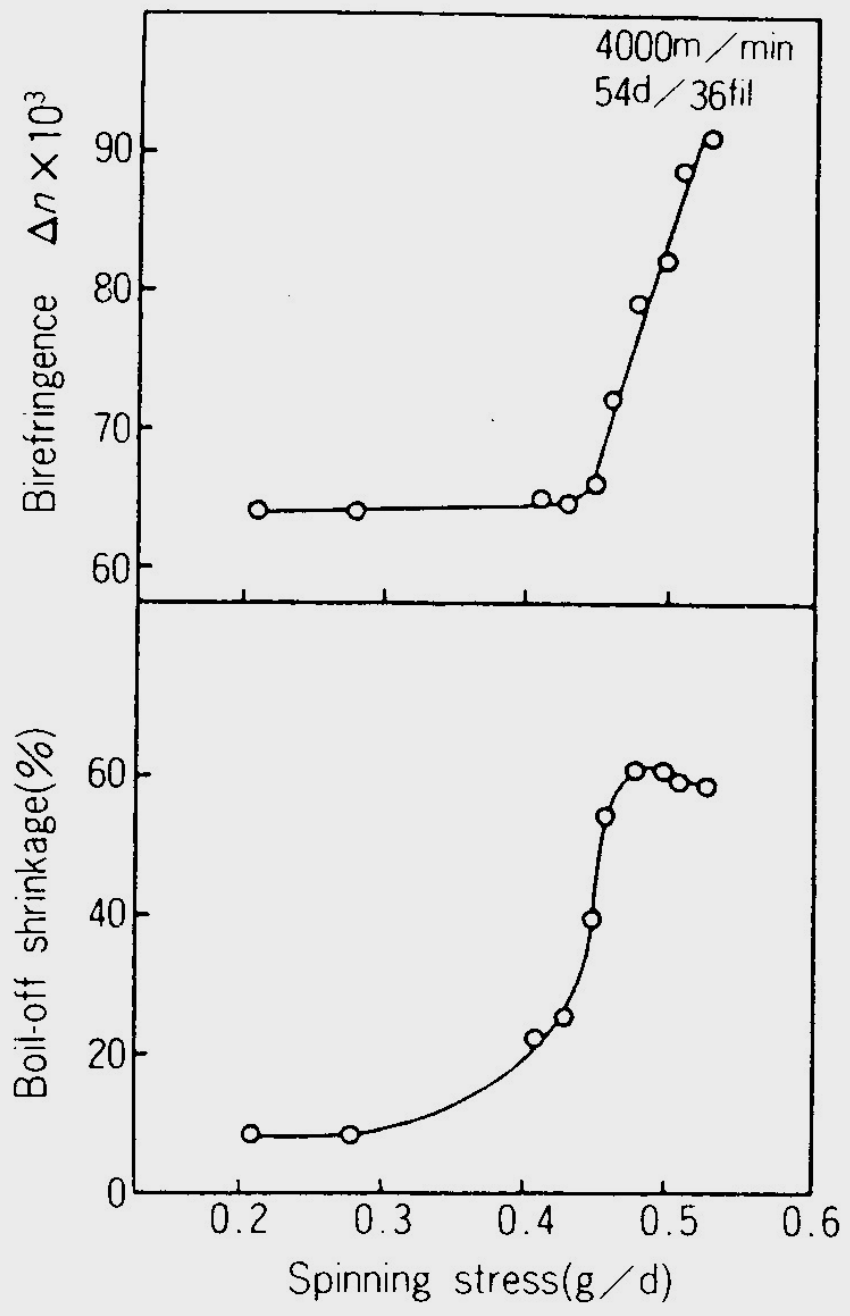


شکل ۳۴-۲- تصویر فرضی از آزمایش ریسندگی برای تغییرات مداوم طول فیلامنت [۱۸]



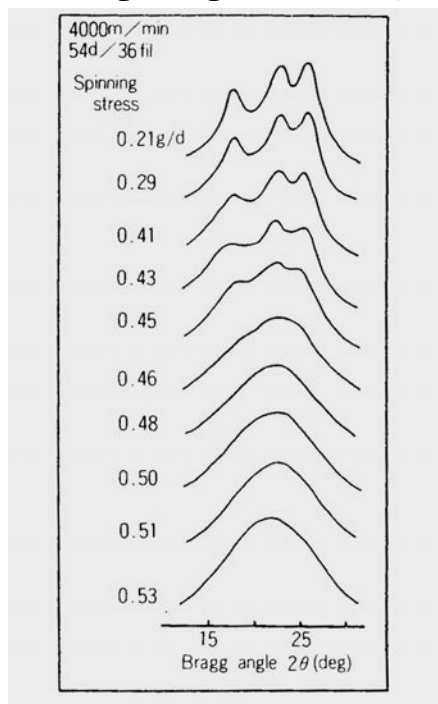
شکل ۲۵-۲- تنش ریسندگی در نقطه برداشت به عنوان تابعی از طول جاری^۱ در سرعت‌های ریسندگی مختلف

برای مثال در سرعت ریسندگی 4000 m/min ضریب شکست مضاعف (Δn) و میزان جمع شدگی در جوش^۱ به عنوان تابعی از تنش ریسندگی اندازه گیری شده اند (شکل ۳۶-۲) و البته هنگامیکه دانسیته خطی فیلامنت و سرعت ریسندگی در $1/5 \text{ d}$ و 4000 m/min ثابت نگه داشته شده اند. هنگامیکه مقدار تنش برداشت از $0/45 \text{ g/d}$ فراتر می رود Δn و میزان کوتاه شدن حرارتی هر دو افزایشی ناگهانی را نشان می دهند. از آنجائیکه سرعت غلتک برداشت، خروجی پلیمر و شرایط سرد شدن بدون تغییر نگه داشته میشوند این تغییر عمده در ضریب شکست مضاعف و آبرفت حرارتی ناشی از تأثیر مقاومت هوا در نظر گرفته می شود. شدت تفرق اشعه X استوائی از همان نمونه در تنش پایین برداشت پایین ($0/45 \text{ g/d}$) (۱/۲۱) تفرق کریستالی را نشان می دهد، اما هنگامی که تنش برداشت از $0/45 \text{ g/d}$ فراتر می رود هیچگونه طرح یا الگوی تفرق کریستالی مشاهده نمیشود (شکل ۳۷-۲).



شکل ۳۶-۲- ضریب شکست مضاعف و میزان کوتاه شدن در آب جوش به عنوان تابعی از تنش ریسندگی در سرعت 4000 m/min [۱۸]

بنابراین وقتی که طول ریسندگی فیلامنت طولانی تر می شود، تنش برداشت نخ تا مقدار معینی بالا می رود (البته در حالیکه مابقی شرایط ریسندگی یکسان نگه داشته می شود) و ساختمان لیف آمورف کاملاً آرایش یافته تصور می شود. این نشان می دهد که کاهش میزان کریستالی ناشی از بالا بودن نرخ سرعت سرد شدن برای فیلامنت ظریف نیست بلکه مقاومت هوا روی تشکیل ساختمان در منطقه پایین خط ریسندگی تأثیر می گذارد.



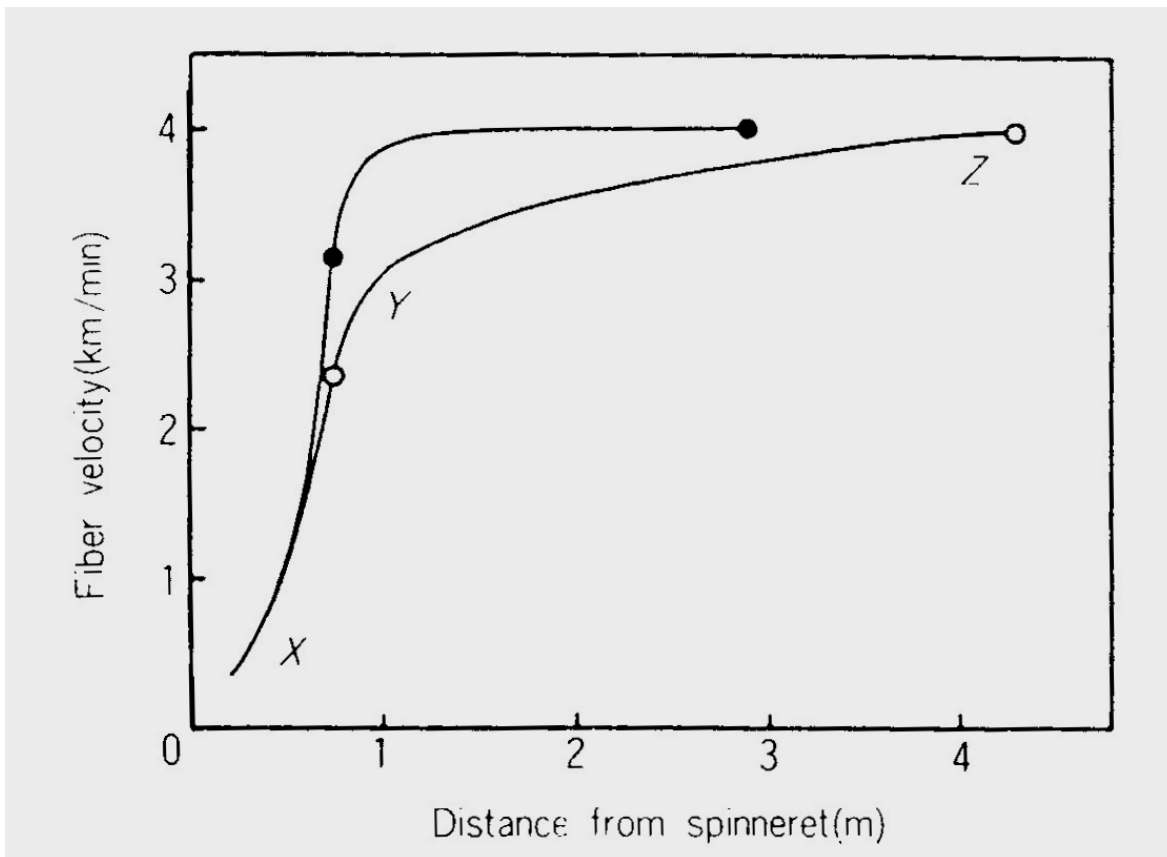
شکل ۳۷-۲- نیم رخ تفرق استوایی اشعه X به عنوان تابعی از تنش ریسندگی در نقطه برداشت (سرعت ریسندگی 4000 m/min) [۱۸]

در شکل (۲-۳۸) سرعت فیلامنت از قطر فیلامنت و تنشهای ریسندگی، در نقطه 70 سانتیمتری زیر رشته ساز و در نقطه برداشت محاسبه شده است. در این نقطه طولهای فیلامنت در گردش $2/9 \text{ m}$ و $4/3 \text{ m}$ با نمره ثابت $1/5 \text{ d}$ در سرعت ثابت 4000 m/min است.

شکل (۲-۳۸) نشان می دهد که سرعت فیلامنت هنگامی که طول فیلامنت در گردش بلند است ($4/3 \text{ m}$) در دو مرحله افزایش می یابد. مرحله اول از X تا Y در شکل (۲-۳۸) مربوط به فرآیند نازک شدن لیف در ذوب ریزی های معمول است و مرحله دوم از Y تا Z مربوط به تغییر شکل ناشی از کشش سرد است زیرا در این منطقه دمای فیلامنت

نسبتاً پایین می‌باشد. هنگامی که طول فیلامنت در گردش بلند است و مقاومت هوا بالا است، تغییر شکل بواسطه کشش سرد در مرحله دوم سرعت فیلامنت را در γ به کمتر از حالتی که طول فیلامنت در گردش کوتاه است می‌رساند و در نتیجه رشد کریستال‌ها متوقف می‌شود. اگر طول فیلامنت بلندتر شود، نسبت کشش سرد افزایش می‌یابد، سرعت فیلامنت کاهش بیشتری می‌یابد و هیچگونه عمل کریستال شدن در γ اتفاق نمی‌افتد. در این مورد زنجیرهای مولکولی بواسطه کشش سرد در مرحله دوم آرایش یافتگی زیادی می‌یابند و ساختمان لیف آمورف با درجه آرایش یافتگی بالا در نظر گرفته می‌شود.

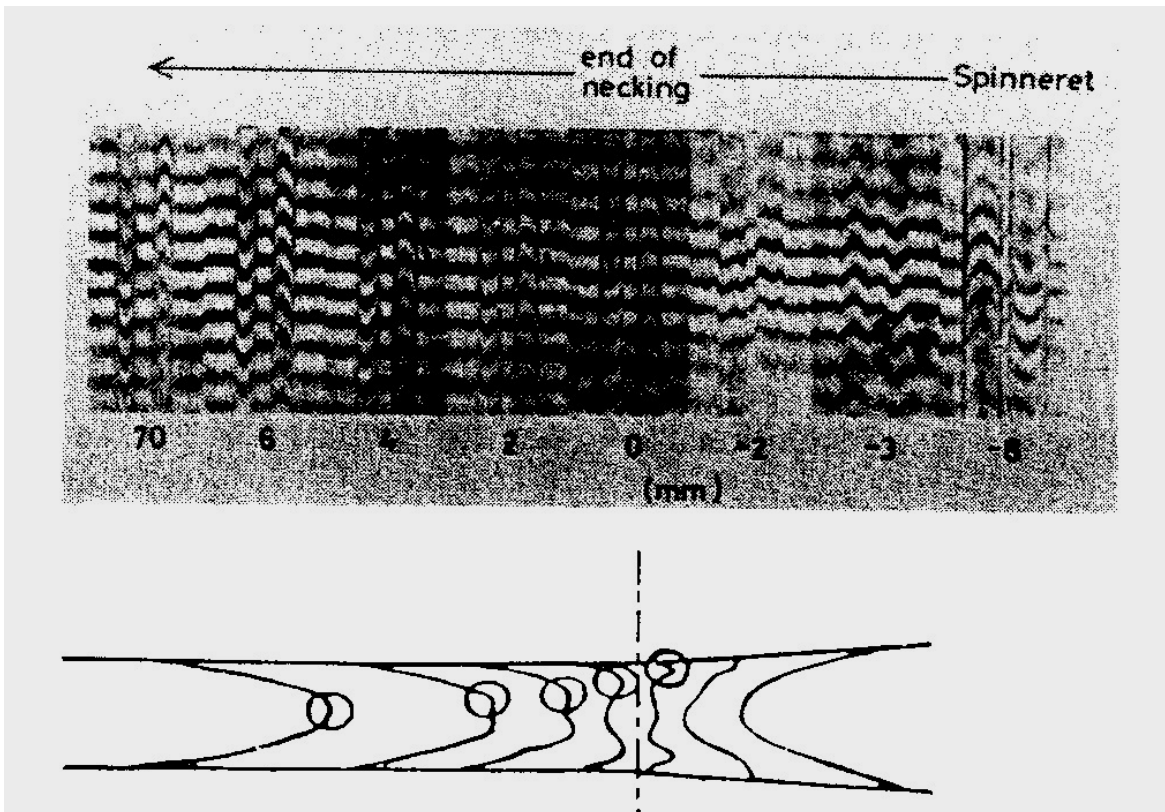
کشش سرد بستگی به تعادل دقیق مقاومت هوا و سرعت کریستالی شدن دارد. در سرعت‌های بسیار بالا ($4000-5000 \text{ m/min}$) مقاومت هوا بالا است و سرعت کریستال شدن پایین است، بنابراین میزان کریستال شدن فیلامنت کمترین مقدار بوده و کشش سرد اتفاق می‌افتد.



شکل ۳۸-۲- تخمین سرعت فیلامنت برای دو طول جریان مختلف (سرعت ریسندهی 4000 m/min) [۱۷] (دایره های توخالی معرف فاصله برداشتی معادل 430 cm از رشته ساز و دایره های توپر معرف فاصله 290 cm است.)

۲-۳-۴- تشکیل ساختمان غلاف - مغزی

طرح تداخل انکسار طی مرحله گردنی شدن تغییر می کند. شکل (۲-۳۹) طرح تداخل نمونه فیلامنت رسیده شده با سرعت 6000 m/min طی مرحله گردنی شدن است. تغییر طرح از لایه سطح فیلامنت شروع می شود و در مغز فیلامنت به طرف پایین خط ریسندگی افزایش می یابد. این موضوع نشان می دهد که تمرکز تنش ناشی از سرد شدن، آرایش یافتگی مولکولی را ابتدا در لایه سطح و سپس در مغز فیلامنت توسعه می دهد. آرایش یافتگی مولکولی در سطح مقطع فیلامنت در نقطه ای واقع در هفت سانتیمتری پایین انتهای گردنی شدن در سرعت 6000 m/min یکنواخت است. به هر حال در سرعت های ریسندگی بالا یعنی فراتر از 8000 m/min تنش عمدتاً در لایه سطحی متمرکز میشود، و ساختمان آمورف در مغز فیلامنت قبل از آرایش یافتگی کامل متمرکز می شود و در نتیجه ساختمان غلاف - مغزی تشکیل می شود.



شکل ۲-۳۹- الگوهای شکست درونی از نمونه فیلامنت ها در خط ریسندگی [۱۷،۱۰،۵]

۲-۴- کاربردهای ریسندگی در سرعت های بالا

۲-۴-۱- کاربردهای خاص نخ های رسیده شده با سرعت بالا [۱۹،۵]

ریسندگی با سرعت بالا، به عنوان یک سیستم تولید موثر به کار گرفته می‌شود. تلاشهای بسیاری جهت به کارگیری خصوصیات نخ ریسیده شده با سرعت بالا و ارتقا خواص آنها انجام شده است. بعنوان مثال Asahi Chemical Co. نخ پلی استر را تولید کرده است که به آسانی در فشار معمولی رنگ می‌شود [۲۰]. ریسندگی پلی استر در سرعت بالای 7000 m/min با در نظر گرفتن شرایط سرد کردن خاص میتواند لیف پلی استری را تولید کند که در فشار معمولی قابل رنگریزی بوده و دارای خواص فهرست شده در جدول (۴-۲) باشد. مشخصه این نخ مناطق آمورف با دانسیته پایین و کریستالی بالا است که دانسیته پایین قابلیت رنگریزی را افزایش می‌دهد و کریستالی بالا ثبات حرارتی را تضمین می‌کند. منحنی دیسپرسیون دمایی جهت ویسکوالاستیکی در 110 Hz ، دانسیته پایین و مناطق آمورف کمی را تایید می‌کند که این امر از $\tan \delta$ پیک حرارتی (برابر با α دیسپرسیون)، T_{max} که به دمای پایین تری تغییر مکان می‌دهد و مقدار پیک که $(\tan \delta)_{max}$ کوچکتر میشود، مشهود است. میزان کریستالی شدن که توسط زاویه تفرق اشعه X اندازه گیری می‌شود به بزرگی ۷۰ درصد است. کریستالها از لحاظ اندازه همانطور که از بازتاب (110) محاسبه میشوند بزرگ هستند و دارای آرایش یافتگی بالایی می‌باشند همانطور که از انعکاس (010) مشخص می‌شود بطوریکه کریستالهای درشت و پایدار تشکیل می‌شوند، میزان تغییر ضریب شکست معادل 0.13 الی 0.11 بوده و از مقدار محاسبه شده برای نخهای FOY که معادل 0.173 است کوچکتر می‌باشد و آرایش یافتگی کمتری را در مناطق آمورف نشان می‌دهد. با توجه به نسبت بالای حفظ مدول (E'_{220} / E'_{150}) در دمای 220°C نسبت به دمای 150°C پایداری حرارتی خوب می‌باشد. نشان داده شده است که این نسبت بیش از 0.75 بوده که در مقایسه با نسبت 0.53 نخهای FOY بزرگتر می‌باشد.

جدول ۴-۲- خواص ویژه جهت نخ قابل رنگرزی در فشار نرمال

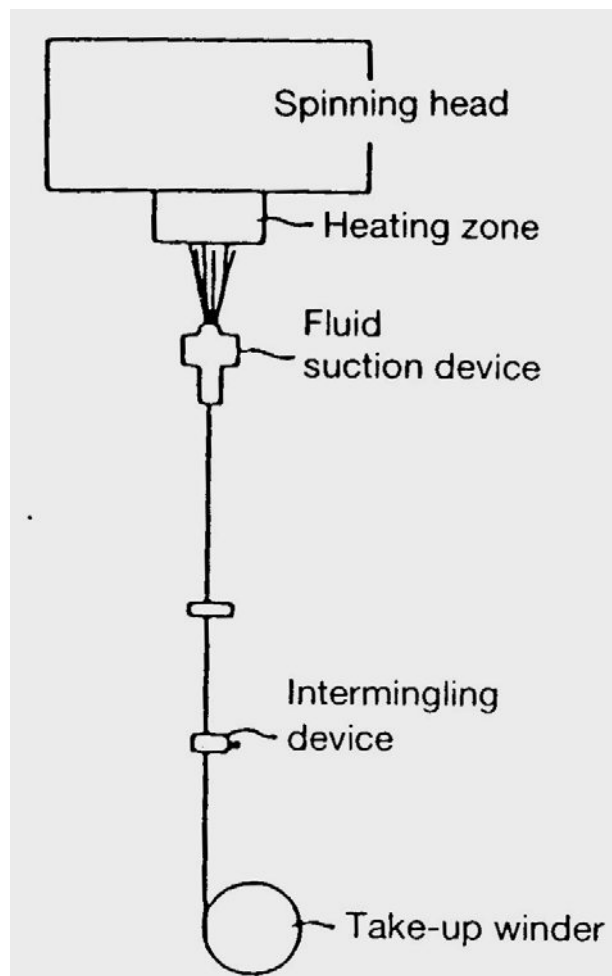
		1	2	Reference FOY yarn 1		Desirable range
Spinning						
Take-up velocity	(m/min)	9000	7000	6000	1500	7000 m/min
Draw ratio					3.3	no drawing
Viscoelasticity						
T_{max}	(°C)	102	104	114	132	85–110°C
$(\tan \sigma)_{max}$	(-)	0.126	0.129	0.182	0.110	0.115–0.135
E'_{30}	(g/d)	74	73	49	97	over 50 g/d
Refractive index						
Δn	(-)	0.083	0.108	0.116	0.173	0.03–0.110
Average refractive index	(-)	1.660	1.677	1.673	1.691	1.65–1.70
Difference of refractive indices						
$n_{0.8} - n_0$	(-)	0.031	0.026	0.009	0.002	0.01–0.08
X-ray						
Degree of crystallinity	(%)	77	75	66	58	over 70%
Crystallite size	(Å)	65	56	36	18	over 55Å
Degree of orientation	(%)	94	94	91	90	over 90%
Yarn property						
Tenacity	(g/d)	3.5	4.3	4.1	5.0	over 3 g/d
Elongation at break	(%)	25	46	62	22	20–60%
Boil-off shrinkage	(%)	2.9	3.2	3.9	7.8	
E'_{220}/E'_{150}		0.79	0.70	0.64	0.53	over 0.75
Equilibrium exhaustion	(%)	89	75	52	49	

ویژگی دیگر این نخ غیر یکنواختی خاص ساختمان لیف در جهت شعاع فیلامنت می باشد. این غیر یکنواختی بواسطه اختلاف ضریب انکسار Δn (0.8-0) که به صورت زیر تعیین میگردید اندازه گیری می شود.

$$\Delta n (0.8 - 0) \equiv n_{0.8} - n_0$$

n_0 نشانگر متوسط ضریب شکست در مرکز فیلامنت برای نور نوسانی موازی تابیده شده به محور لیف و $n_{0.8}$ نشانگر ضریب شکست در نقطه $r/8$ از مرکز است. در اینجا r شعاع فیلامنت است. Δn (0.8 - 0) در محدوده 0.1 تا 0.8 قرار دارد که متضاد مقدار آن برای نخهای FOY که 0.02 است می باشد. در اینجا توزیع ضریب شکست نسبت به مرکز فیلامنت متقارن است.

وجود سرعت ریسندگی بالای 7000 m/min ضرورت اولیه جهت تولید نخهایی هستند که دارای خصوصیات ساختمانی بالا باشند. خط ریسندگی نخ به یک ناحیه حرارتی که در انتهای رشته ساز است و یک دستگاه مکش سیال که به منظور جلوگیری از اطفاء فیلامنت یا سرد شدن غیر یکنواخت آن در نظر گرفته شده، مجهزند (شکل ۴۰-۲).
تعادل رمق کشی با رنگ دیسپرس در 100°C به بزرگی حدود ۷۵-۸۹ درصد (۴۹٪ Cf. برای نخ FOY رنگریزی شده تحت شرایط مشابه) است که مشابه ۸۵ درصد مربوط به نخ FOY رنگریزی شده در دمای 130°C و فشار بالا است.



شکل ۴۰-۲- تصویر فرضی از خط ریسندگی

از دیرباز پی برده اند که با انجام عملیات حرارتی روی فیلامنت در ضمن تولید (حرارت دادن در ضمن خط ریسندگی^۱ (SLH) می توان خصوصیات مکانیکی فیلامنت را بهبود بخشید. بعنوان مثال Griehl و Versaumer[21] کم شدن میزان افزایش طول نایلون ۶ را در سال ۱۹۵۸ زمانی که یک ناحیه حرارتی در خط ریسندگی در حین عمل ریسندگی تعبیه شد، نشان دادند. در سال ۱۹۶۹ Hamana[22] گزارش کرد که ضریب شکست مضاعف فیلامنت (Δn) از ۰/۰۰۶۴ به ۰/۰۱۰۴ توسط یک وسیله حرارتی ۳۰ سانتیمتری با قدرت حرارتی 200°C در ۷۰ سانتیمتری زیر رشته ساز در خط ریسندگی، زمانی که سرعت ریسندگی 900 m/min میباشد، افزایش یافته است. البته از آنجا که سرعت

- Spinline heating: (SLH)

ریسندگی کم است مقدار Δn هنوز کوچک است و در نتیجه فیلامنت ها به عنوان فیلامنت کشیده شده نمی توانند مورد استفاده قرار گیرند.

بعداً ایده حرارت دادن خط ریسندگی با سرعت ریسندگی بالا تلفیق شد و طرحهای بسیاری برای تولید یک مرحله ای نخ FOY در سرعت ریسندگی $4000-6000 \text{ m/min}$ عنوان شدند و این زمانی بود که هیچگونه وسیله برداشت کننده نخ با سرعت بالا در دسترس نبود. در این محدوده سرعت های ریسندگی خواص مکانیکی نخ شامل مقاومت کششی ($4/5 \text{ g/d}$) و افزایش طول تا حد پارگی و نقطه تسلیم رضایت بخش نبود. روشهای SLH متعددی همانطور که در نمونه های بحث شده زیر آمده است، پیشرفت کرده است.

Toyobo در تولید نخ پلی استر با مقاومت کششی ($4/5 \text{ g/d}$)، افزایش طول تا حد پارگی 35% و کاهش طول در حرارت خشک در دمای 160°C حدود 12% با سرعت ریسندگی 4000 m/min موفق بود که این امر را بواسطه یک وسیله حرارتی 2 متری (200°C) حدود 30 سانتیمتر زیر رشته ساز (جدول ۵-۲) میسر نمود [۲۳]. هنگامی که سرعت ریسندگی تا 6000 m/min افزایش یافت مقاومت کششی تا 5 g/d بهبود می یابد. موقعیت ناحیه حرارتی عامل مهمی در میزان تأثیر SLH میباشد، این قسمت باید در مکانی قرار گیرد که فیلامنت در آن محل به $90-100$ درصد مقدار نازکی مورد نیاز جهت بدست آوردن دنیر نهائی رسیده باشد.

Toray بخار تحت فشار را برای SLH جهت گرم کردن مجدد فیلامنتهای سرد شده بمنظور کشش استفاده کرد [۲۴]. از آنجا که جهت بهتر انجام شدن کشش باید روی فیلامنت کشش بالائی باشد، فیلامنت را از داخل محفظه حرارتی پر شده با بخار تحت فشار عبور می دادند تا بتوانند از مزیت مقاومت هوای افزوده شده که بواسطه بخار تحت فشار با دانسیته بالا ایجاد می شود سود برند. ورودی و خروجی محفظه حرارتی باید به اندازه کافی برای عبور فیلامنتهای باریک شده به طور آئرودینامیک بسته شود تا فشار حفظ گردد. محفظه حرارتی جریان هوا را در هنگام ورود و خروج سد میکند و در نتیجه اثر عملیات حرارتی بهبود می یابد. بخش حرارتی از ظرف سیلندری شکل با ابعاد چهل سانتیمتری و قطر داخلی شصت میلیمتر با شکافهایی به ابعاد $0.2 \text{ mm (D)} \times 0.2 \text{ mm (D)} \times 30 \text{ mm (L)}$ که در سروته سیلندر قرار دارند، تهیه شده است. دانسیته خطی فیلامنت تولید شده 1 d بوده و مقاومت کششی آن به ($4/5 \text{ g/d}$) بهبود می یابد (جدول ۶-۲).

جدول ۵-۲- تأثیر SLH (بر اساس فعالیت Toyobo) [۲۳]

	Spinning speed (m/min)	SLH	Tenacity (g/d)	Elongation (%)	Dry shrinkage at 160°C (%)
1	4000	none	2.7	85	22.1
2	4000	heating jacket	4.5	35	12.0
3	6000	none	3.3	68	5.7
4	6000	heating jacket	5.0	29	9.2

جدول ۶-۲- تأثیر SLH (بر اساس فعالیت Toray) [۲۴]

	Vapor pressure (kg/cm ²)	Tenacity (g/d)	Elongation (%)	Boil-off shrinkage (%)
1	(none)	3.5	82	11.5
2	1.0	4.0	33	9.0
3	3.2	4.4	23	4.9

Toray کشش و عملیات حرارتی را با SLH ترکیب کرد تا مقاومت کششی نخ پلی استر را بهبود بخشد [۲۵]. در نتیجه آن نخ پلی استری با استحکام بالا توسط عملیات حرارتی SLH تحت نسبت کشش ۱/۱ - ۰/۸ در دمای ۸۰ °C تولید شده. Teijin گلتک برداشت را برای SLH نخ ریسیده شده به یک گلتک مخروطی شکل تغییر داد و کشش را به ۲۰-۱ درصد رساند [۲۶]. روش SLH، همچنین برای تعادل مقاومت کششی و افزایش طول تا حد پارگی نخ و جهت تولید نخ ریسیده شده با سرعت بالا، با خواص مکانیکی نخ ریسیده شده با سرعت پایین، و بهبود کارایی فرآیند ریسندگی با سرعت بالا بکار می رود.

تلاشهایی جهت سرد کردن فیلامنت ها در خط ریسندگی بجای گرم کردن آنها انجام شده است. بر طبق تحقیقات Kikutoni [27] هدف سرد کردن در سه مورد زیر خلاصه می شود:

۱- تولید نخ آمورف بسیار آرایش یافته بوسیله پایین آوردن دما درست بعد از مرحله گردنی شدن

۲- تولید نخ آمورف بسیار آرایش یافته توسط کنترل دمای آب سرد و تغییر شکل نخ در آب

۳- تولید نخ بسیار آرایش یافته با بکارگیری آب جوش به عنوان واسط سرد کردن

به عنوان مثالی از نکته ۱ در بالا، شرکت Du Pont طرح استفاده از نخ ریسیده شده به سرعت بسیار بالا را به عنوان نخ ریسیده شده برای تاب کاذب ارائه کرد [۲۸]. خصوصیات موجی و فردار بودن، هنگامی که نخ کریستالی برای تاب کاذب در نظر گرفته شود از بین می رود. نخ های POY که با سرعتهای زیر ۴۰۰۰ m/min ریسیده شده اند را معمولاً جهت تاب مجازی بکار می برند. نخ آمورف بسیار آرایش یافته، طبق اظهارات شرکت Du Pont توسط نخ پلی استر ریسیده شده با

سرعت بالا و آب سرد شده در خط ریسندگی، با سرعت بالای ۵۵۰۰ m/min قابل تولید است. جدول (۷-۲) مثالی از نخ پلی استر با ۷۵ دنیر شامل ۱۷ فیلامنت که با سرعت ۵۶۶۹ m/min ریسیده شده را نشان می‌دهد. نخ آمورف بسیار آرایش یافته با جمع شدگی بالا در آب جوش توسط کاهش دما در نقطه ۹۶/۵ سانتیمتری زیر رشته ساز بدست آمده است. در اینجا موقعیت سرد کردن سریع^۱ نقشی کلیدی ایفا می‌کند. برای یک فیلامنت با دانسیته خطی ۴/۴ d در سرعت ریسندگی ۵۹۹۴ m/min، نخ آمورف با ۵۶٪ جمع شدگی در جوش توسط پایین آوردن دمای آن در نقطه ۷۶ سانتیمتر زیر رشته ساز بدست می‌آید، در حالیکه با تغییر موقعیت سرد کردن به نقطه ۸۱ سانتیمتر زیر رشته ساز مقدار کریستالی شدن افزایش یافته که این موضوع با جمع شدگی کم در جوش حدود ۱۰/۸ درصد تأیید می‌شود.

جدول ۷-۲- سرد کردن سریع با آب و جمع شدگی در جوش

Quench bath position (cm below spinneret)	Boil-off shrinkage (%)	Density (g/cm ³)	X-ray diffraction
96.5	67	1.357	amorphous halo
107	15	1.385	crystalline spots

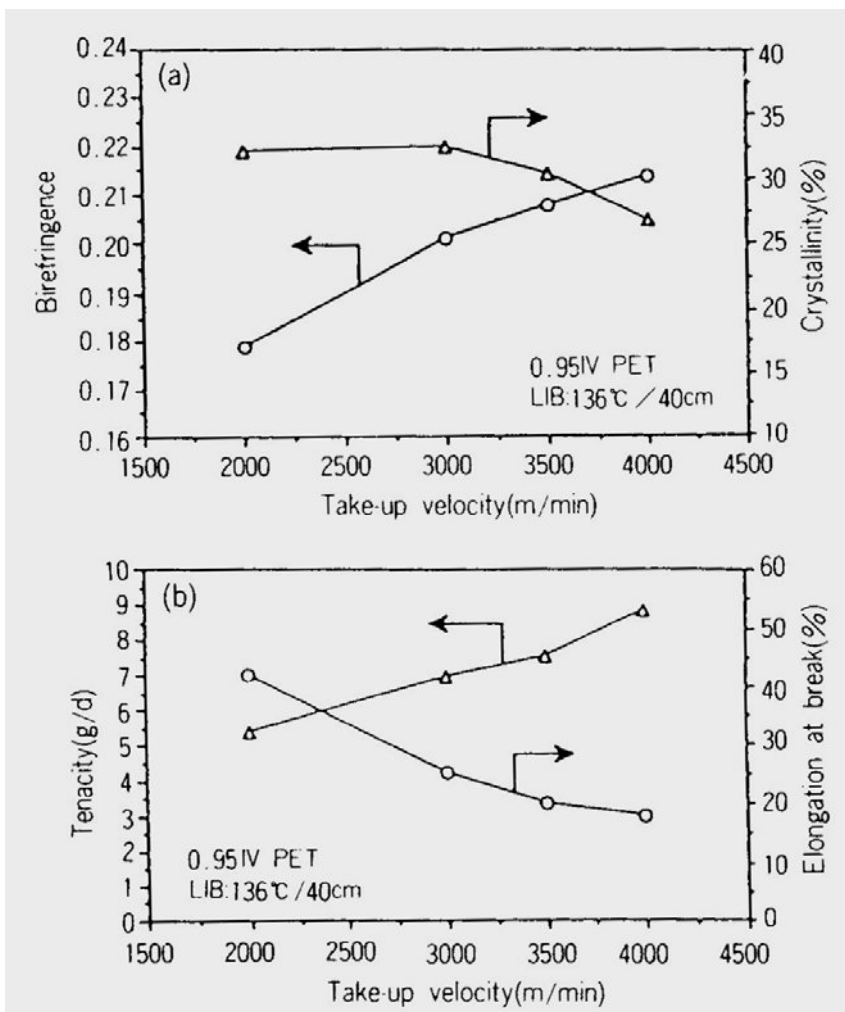
Toyobo روش سرد سازی مورد دوم فوق الذکر را برای تولید نخ با استحکام بالا PET به کاربرد [۲۹]. برای فرآوری نخ PET با استحکام بالا نخ در حال رسیدن باید از نوع نخ آمورف بسیار آرایش یافته باشد. بر اساس این روش ثبت شده، با سرد سازی فیلامنتها در خط ریسندگی در هنگام ریسندگی با سرعت بالا یک ساختار آمورف بسیار آرایش یافته شکل میگیرد. بعنوان مثال در ریسندگی با سرعت ۴۲۰۰ متر در دقیقه (جدول ۸-۲) در نقطه ای به فاصله کمتر از پنج سانتیمتر به طرف بالا رشته ساز یعنی نقطه ای که نازک شدن فیلامنت با سرد سازی بوسیله هوا تکمیل میشود، سرد سازی با وارد کردن جریان آب شروع می‌شود. در نقطه ای به فاصله ۴۸ سانتیمتری زیر رشته ساز، نازک سازی فیلامنت با سرد سازی بوسیله هوا تکمیل می‌گردد و فیلامنتها در حمام آبی که طول آن ۲۵ سانتیمتر است و به فاصله ۳۶ سانتیمتری زیر رشته ساز قرار دارد سرد می‌شود.

همانگونه که در جدول (۸-۲) نشان داده شده است، از این روش در هنگام ریسندگی نخ آمورف با آرایش یافتگی بالا بدست می‌آید و بوسیله کشش مستقیم قوام و مدول نخ به ترتیب تا مقادیر ۱۱/۳ g/d و ۱۷ g/d افزایش می‌یابد. با اینحال دمای ظرف سرد کننده نسبتاً بالاست و لذا این فرآیند بخوبی از فرآیند SLH در حالت مورد سوم ذکر شده متمایز نمیشود. گزارشی که Cuculo و همکارانش داده اند را میتوان به عنوان نمونه ذکر نمود [۳۰]. ریسندگی تک مرحله ای با سرعت بالا، نخی با حداکثر قوام ۴-۵ g/d تولید می‌کند.

Cuculo و همکارانش با کنترل خط ریسندگی به صورت دینامیکی، نخ PET پردوام را برای نخ تایر تولید کردند. آنها از PET با ویسکوزیته IV0.95 نخ پردوام با قوام ۴ g/d و ضریب شکست (Δn) بالای ۰/۲۱ تولید کردند. د راین روش سرعت ریسندگی ۴۰۰۰ m/min بود و یک LIB (حمام مایع ایزوترمال) که دمای آن 136°C بود در زیر رشته ساز قرار داشت (شکل ۴۱-۲).

جدول ۸-۲- سیستم سرد سازی و خواص نخ

Cooling system below spinneret	Undrawn		Drawn		
	Δn	Density (g/cm ³)	Tenacity (g/d)	Elongation (%)	Modulus (g/d)
Water bath (36cm)	0.150	1.3582	11.3	7.4	171
Air cooling	0.088	1.3722	8.2	7.6	148



شکل ۴۱-۲- ریسندگی یک مرحله ای جهت تولید نخ پردوام در شرایطی که از حمام LIB استفاده شده
(بر اساس فعالیت [30] Cuculo) Δn (a) و قوام و ازدیاد طول بعنوان تابعی از سرعت ریسندگی

۳-۴-۲- سایر کاربردها

با آنکه نخ ریسیده شده با سرعت بسیار بالا^۱ هنوز به صورت تجاری به عنوان منبع عمده جهت تقویت لاستیک مورد استفاده قرار نگرفته، اما تلاشهای زیادی صورت گرفته است تا ریسندگی با سرعت بالا^۱ برای تولید نخ تایر با استحکام زیاد (۹ g/d) بکار گرفته شود.

نخ تایر PET با استحکام زیاد تاکنون با کشش به نسبت زیاد از نخ ریسیده شده با سرعت کم که درصد تبلور و آرایش کمی دارد تولید میشده است. ایده اصلی این روش در روش ثبت شده Du Pont ارائه گردیده [۳۱]. در سال ۱۹۸۷ Hoechst- Celanese تولید نخ پرقوام با ثبات گرمایی خوب و مقاومت سایشی بهتر را با استفاده از نخ بسیار آرایش یافته ریسیده شده با سرعت بالا /تنش بالا، به ثبت رساند [۳۲]. در جدول (۹-۲) دو روش Du Pont و Hoechst- Celanese با هم مقایسه شده اند. در اینجا سرعت ریسندگی در دو روش Hoechst- Celanese ۱۳۰۰ متر در دقیقه است که بسیار بیشتر از سرعت ریسندگی در روش Du Pont است (۲۲۸ متر در دقیقه)، با اینهمه هنوز سرعت ریسندگی به میزان معمول POY نرسیده است.

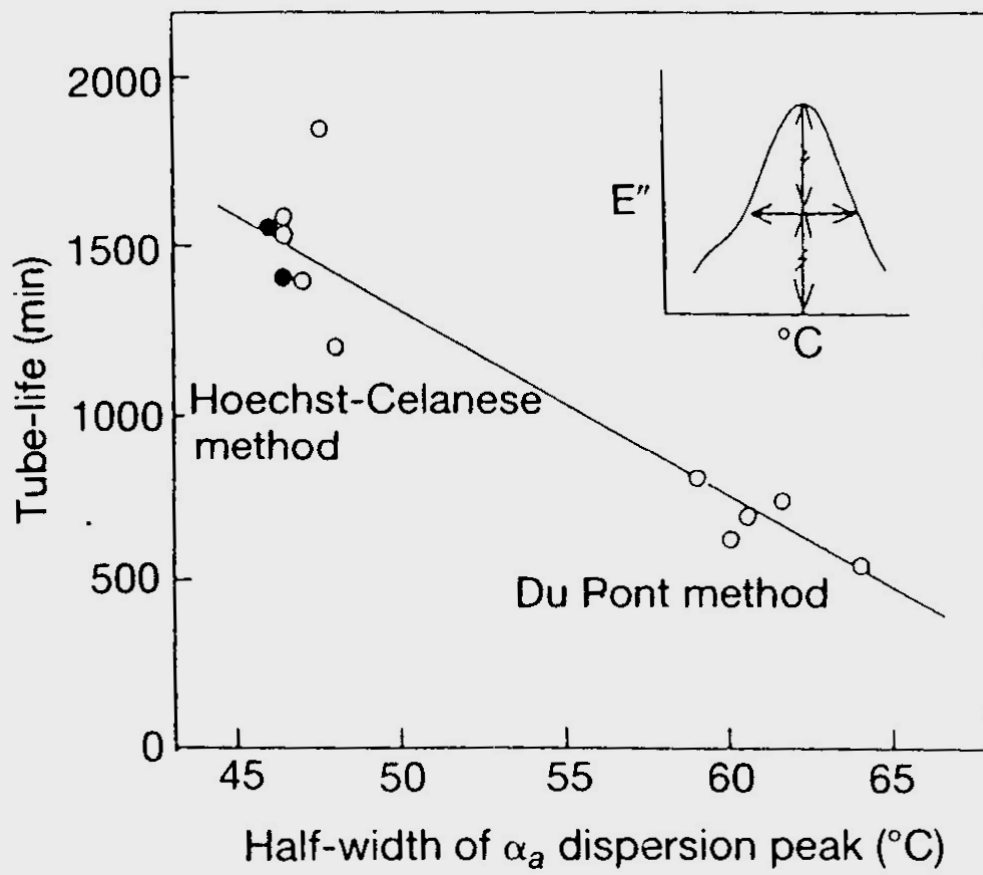
نخ تایری که بوسیله روش Hoechst- Celanese تولید می شود جمع شدگی گرمایی کمتری دارد، یعنی ثبات گرمایی بهتری دارد که منجر به اتلاف هیستریزیس^۲ کمتر، تولید گرمای کمتر و مقاومت سایشی بهتر می شود. عمر تیوپ (که با استفاده از آزمایش GY Malory Tube ارزیابی می گردد) تایرهای دارای این نوع نخها ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر و دمای سطح تیوپ 28°C پایین تر از تیوپ تایرهای دارای نخ ریسیده شده در سرعت پایین Du Pont می باشد. با آنکه در این مورد استحکام کمی کمتر است ولی نخ به گونه ای طراحی شده تا طول عمر بسیار خوبی در برابر انقباض و انبساط های مکرر تایر در حال چرخش زیر بار داشته باشد.

این دو روش ریسندگی ساختارهای لیفی ظریف متفاوتی بوجود می آورند. در لیف تولید شده به روش Hoechst- Celanese نواحی آمورف آرایش یافته آن کمتر است. با آنکه این موضوع از نقطه نظر استحکام یک نقص است ولی زنجیره های مولکولی موجود در ناحیه آمورف کمتر محدود هستند و بنابراین تولید گرما کاهش می یابد. در تصویر (۴۲-۲) عمر لاستیک بر روی نیمه میانی عرض انتشار α_a کشیده شده است (انتشار عمده در دامنه دمای 130°C - 120°C در منحنی انتشار دمای ویسکوالاستیک) که انتشار آرایش زنجیره های مولکولی در ناحیه آمورف را اندازه گیری میکند [۳۳]. هنگامی که نیم پهنای^۳ کاهش می یابد، عمر لاستیک بیشتر میشود، یعنی زنجیره ای مولکولهای آمورف در یک جهت بیشتر آرایش می یابند. با آنکه میزان آرایش آمورفی در نخ Hoechst - Celanese اندک است انتشار آرایش یافتگی باریک است و دو فاز (فازهای کریستال و آمورف) با ظرافت به هم آمیخته شده اند، جدول (۹-۲). بر همین اساس طول عمر نیز افزایش می یابد. روش Hoechst- Celanese جهت تولید الیاف POY مناسب برای نخ تایر تغییر و پیشرفت بسیاری داشته است. تولید تجاری این نخ با استفاده از این روش در سال ۱۹۸۳ در ژاپن آغاز گردید. برای این کار سرعت ریسندگی به ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر در دقیقه افزایش می یابد و یک پلیمر با وزن مولکولی بالاتر برای برآوردن نیازهای مکانیکی و گرمایی مورد استفاده قرار میگیرد.

- High speed

- Hysteresis

- Half - width



شکل ۴۲-۲- منحنی عمر لاستیک و نیمه عرض انتشار α_a [۲۲]

جدول ۹-۲- فرآیند ریسندگی، ساختمان و خواص نخ تایر

	Du Pont ³¹	Hoechst-Celanese ³²
Spinning		
Atmosphere below spinneret	Heating shroud (375°C)	Heating zone (room temperature)
Cooling	[conventional]	homogeneous
Tension (g/d)	0.0026	0.076
Spinning speed (m/min)	228	1300
Draw ratio	6.25	2.52
Properties and structure		
UD filament Δn	0.0005	0.038
Tenacity (g/d)	9.6	8.8
Elongation-at-break (%)	15.6	6.8
Dry shrinkage (%)	(14)	5.0
4.5kg load (%)	(6.3)	6.1
Hysteresis loss (in-lb)	(0.09)	0.014
Stability index	(0.8)	14.1
Tension index (g/d)	(1250)	1148
Amorphous orientation	(0.6↑)	0.56
Long period (Å)	180	140

Stability index = 1/(hysteresis loss × 175°C dry shrinkage).
 Tension index = tenacity × modulus.
 Bracketed figures indicate estimated values.

۵-۲- وضعیت کنونی عملیاتهای ریسندگی با سرعت بالا

صنایع شیمیایی Asahi طرحی را اعلام نمود که بر اساس آن در سال ۱۹۸۷ ریسندگی با سرعت بیش از m/min ۶۰۰۰ را راه اندازی کرد. تولید در آوریل ۱۹۸۸ با ظرفیت ۵/۱ تن در روز آغاز گردید. این نخ با نام تجاری TEC^R با سرعت ۷۰۰۰ m/min ریسیده می شود و مستقیماً بدون عبور از روی غلتک گودت بر روی غلتک می آید. بعداً، Mitsubishi Rayon, Toray و Teijin طرحهای خود را برای راه اندازی عملیاتهای ریسندگی با سرعت بالا اعلام نمودند که در جدول (۱۰-۲) به طور خلاصه ارائه شده است.

نخ ریسیده شده با سرعت بالای Asahi (TEC) دارای مشخصات نرمی، مدول کم، رنگ پذیری آسان و جمع شدگی گرمایی اندک در مقایسه با نخ FOY قدیمی تر می باشد. از این نخ برای استرکت و شلوار مردانه (که باید نرم

باشد)، در تهیه پارچه های بافت تریکو^۱ برای صندلی ماشین (که رنگ پذیری آسان لازم است) و آستر لباس (که جمع شدگی بر اثر گرما باید اندک باشد) کاربرد دارد.

Teijin بوسیله ریسندگی با سرعت بالا (۶۰۰۰ m/min) از طریق غلتکهای گودت نخ HOY (نخ بسیار آرایش یافته) را تولید می نماید. کارخانه اول آنها نخهای خاصی مانند نخهای آنتی استاتیک، رنگ پذیری به صورت درخشان یا نخهای رنگ پذیر کاتیونی تولید می کند. در کارخانه دوم آنها یک FMS^۲ (سیستم تولید انطاف پذیر) بکار رفته است تا از پلیمرهای مختلف به طور همزمان نخ تولید شود و نخهایی با خصوصیات مختلف تولید شود و هر دستگاه به طور مستقل بوسیله کامپیوتر کنترل می شود. سیستم تولید نیز به گونه ای طراحی شده تا نیازهای بسیار را برآورده سازند. شرکت Toray یک پیچنده^۳ سه کیلوگرمی نیز ساخته است که انواع گوناگون با حجمهای اندک تولید می نماید. کل سیستم قادر است نخهای گوناگونی را تولید نماید از جمله SILLOOK^R و همچنین الیافی با خواص ظرافت فوق العاده^۴، رنگ پذیری آسان، زیر دست نرم و کرک مناسب. این سیستم تمام فرایندها از ریسندگی تا تکمیل را تحت پوشش قرار می دهد.

جدول ۱۰-۲- ریسندگی PET با سرعت بسیار بالا در ژاپن

	Operational State (1993)			Remarks	Plan	
	Operation started (year-month)	Spinning speed (m/min)	Amount (t/month)		Fully-operational (year)	Amount (t/month)
Asahi Kasei	88-4	7000	300	Direct take-up, easy dyeability, soft hand	-	600
		5500	300	Godet		
Teijin	88-6	6000	1100	Godet, specific yarn, FMS	92	1100
Toray	90-3	6000	2060	Godet, versatile production unit	-	-
Mitsubishi Rayon	89-4	6000	500	Godet, provided with downstream processing system	91	720
Toyobo	?	6000	110	Godet (up to 4), also capable of spinning nylon	91	~450
Unitika	?	6000	?	Godet, for regular yarn	90	~800

۲-۶- نتیجه گیری

در این فصل ریسندگی با سرعت بالا، مخصوصاً لیف PET را به عنوان مثالی از پیشرفته ترین تکنولوژی ذوب ریسی توضیح داده شد. اگر چه نخهای خاصی عرضه شده اند ولی ریسندگی در سرعت فوق العاده بالا قابلیت تولید نخهایی با عملکردهای بالاتر را که هنوز کاملاً بهره برداری نشده است را دارد. اگر چه PET مربوط به شرکت Shingosen در بازار فروش از لحاظ زیر دست عالی بر پارچه های طبیعی برتری دارد، اما ممکن است نخهای ریسیده شده با سرعت فوق العاده

- Tricot

- Flexible manufacturing system

- Take-up

-Ultra- fine

بالا که به طور موثرتری تولید شده اند جای آنها را بگیرند. در آینده محتمل است نخی با مقاومت بالاتر از نخ لاستیک معمولی به روش ریسندگی با سرعت فوق العاده تولید شود. ریسندگی با سرعت فوق العاده بالا نه تنها از لحاظ بازدهی، بلکه از لحاظ قابلیت تولید انواع جدید نخها با کاربردهای عالی نیز پیشرفت خواهد کرد.

محلول ریسی

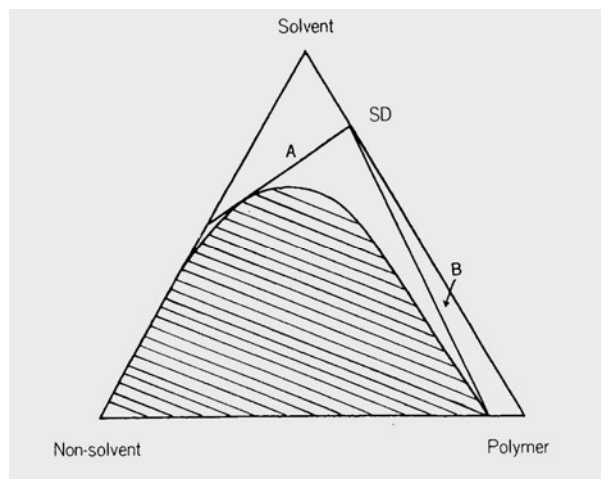
۱-۳- مقدمه

محلول ریسی را در کل می توان به دو روش تقسیم کرد، خشک ریسی و ترریسی. خشک ریسی هنگامی است که محلول پلیمر طی تبخیر حلال پلیمر جامد شود.

ترریسی را هم میتوان به سه روش که بر پایه سه گونه اصول مختلف شیمی فیزیکی قرار گرفته است، تقسیم نمود؛ که عبارتند از: روش کریستال مایع^۱، روش ژل^۲ و روش جدائی فازی^۳، در روش کریستال مایع محلول پلیمر لیوتروپیک که به صورت کریستال مایع است از طریق تشکیل ناحیه کریستالی جامد، سخت می گردد. در روش ژل محلول پلیمری طی تشکیل باندهای بین مولکولی در محلول جامد می شود. که این پدیده ژل شدن^۴ نام دارد. ژل شدن بعلت تغییر درجه حرارت یا غلظت در محلول حادث می شود. در حالت جدائی فازی دو فاز مختلف در محلول پدیدار می شود، فاز غنی و فاز غیر غنی (کم غلظت) از پلیمر.

شکل (۱-۳) دیاگرام فازی سیستمی سه فازی متشکل از پلیمر، حلال و ماده رسوب دهنده (ضد حلال) را نشان می دهد. خط منحنی نماینده مرز بین سیستمی تک فازی یکنواخت^۵ (بالای خط منحنی) و سیستمی دو فازی نا یکنواخت^۶ (زیر خط منحنی) است. در خشک ریسی دپ ریسندگی (SD) در امتداد خط (محور) غلظت پلیمر از SD تا پلیمر خالص افزایش می یابد. در ناحیه بالای خط A غلظت پلیمر دپ ریسندگی در غلظت پلیمر کاهش یافته و هرگز جامد شدن رخ نمی دهد. در سمت راست خط B غلظت پلیمر افزایش پیدا کرده و محلول ریسندگی طی تشکیل ژل (یا کریستالهای آرایش یافته در مورد پلیمر لیوتروپیک) جامد میشود. همانطور که از مقدمه بالا روشن شده است، روشهای کریستال مایع و ژل منجر به تشکیل یک فاز یکنواخت جامد شده که بعنوان ساختمان مبنای لیف هستند، ولی در حالت جدائی فازی یک سیستم دو فازی غیر یکنواخت بعنوان ساختمان اولیه لیف ظاهر میشود. این تفاوت در ساختمان باندازه زیادی انتخاب روش برای تهیه لیف را تحت الشعاع قرار میدهد. در این فصل پیشرفتهای جدید در زمینه محلول ریسی (ریسندگی محلول) هم از نظر تئوری و هم از نظر جنبه های عملی ارائه شده است. که این کار با اشاره به ریسندگی لیف اکریلیک و Bemberg (ویسکوز) بعنوان نمایندگانی از ترریسی و لیف پلی یورتان بعنوان نماینده خشک ریسی انجام شده است.

-
- Liquid- crystal
 - Gel method
 - Phase- separation
 - Gelation
 - Homogeneous
 - Heterogeneous



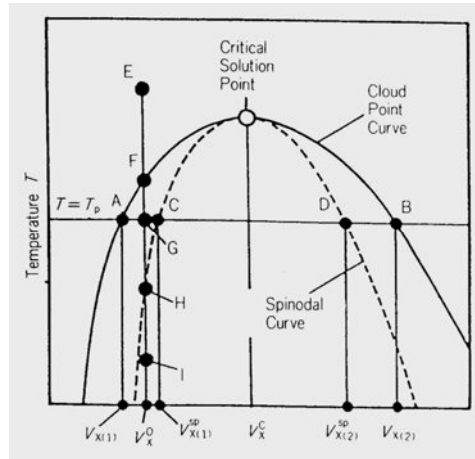
شکل ۳-۱- دیاگرام فازی سیستمی سه تایی متشکل از پلیمر، حلال و ضد حلال (دپ ریسندگی = SD)

۳-۲- فن آوری ریسندگی نخ فیلامنتی اکریلیک

۳-۲-۱- تئوری ریسندگی لیف اکریلیک

اخیراً، پیشرفتهای مهمی در زمینه تعادل فازی و جدائی فازی محلولهای پلیمری حاصل شده است، که باعث فهم تئوری فن آوری ریسندگی الیاف اکریلیک شده است. شکل (۳-۲) دیاگرام فازی محلول دو جزئی پلیمر و حلال را نشان می‌دهد [۱]. اگر درجه حرارت یک محلول پلیمری یکنواخت از نقطه E به F کاهش یابد، محلول از نظر ترمودینامیکی ناپایدار خواهد شد. که این امر باعث ایجاد نوسان غلظت^۱ میشود. محلول از نظر ظاهری کدر میشود و بهمین خاطر به نقطه F «نقطه ابری^۲» و خطی که نقاط کدری را بهم متصل می نماید، منحنی نقطه ابری^۳ گویند. افت بیشتر درجه حرارت محلول پلیمری یعنی کمتر از درجه حرارت نقطه F منجر به جدا شدن محلول به دو فاز شامل فاز غیر غنی از پلیمر (A) و فاز غنی از پلیمر (B) می‌شود.

-
- Concentration fluctuation
 - Cloud point
 - Cloud point curve



شکل ۲-۳- دیاگرام فازی سیستمی دو تائی شامل پلیمر و حلال [۱]

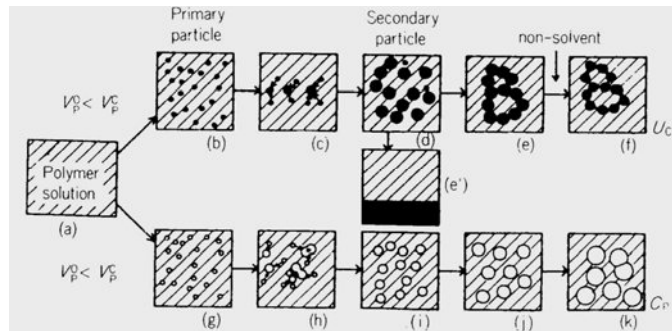
Kamide و [۲] Manabe ثابت نموده اند که اینگونه جدائی فازی طبق فرآیندی بنام جدایی میکرو فازی^۱ انجام میگیرد. شکل (۳-۳) این فرآیند را بصورت شماتیک نشان میدهد. در محلول پلیمری هسته بحرانی^۲ بدلیل نوسان غلظت تشکیل میشود البته اگر درجه حرارت محلول به درجه حرارتی پایین نقطه ابری تنزل کند هسته بحرانی به ذره های بزرگتری بنام ذره های اولیه رشد پیدا می کنند. اگر غلظت پلیمر در محلول (V_X^0) پایین تر از غلظت نقطه بحرانی محلول (V_X^c) باشد، فاز غنی از پلیمر بصورت دیسپرس است. از طرف دیگر اگر V_X^0 بزرگتر از V_X^c باشد، فاز غنی از حلال بصورت دیسپرس است. بعد از آن این ذرات اولیه با هم دیگر برخورد کرده و تشکیل ذرات بزرگتری را بنام ذره های ثانویه می دهند. این ذرات بار دیگر با هم ترکیب شده و ساختمان لیف را ایجاد می کنند.

اینگونه پدیده جدائی میکرو فازی فقط در محلولهای سه جزئی شامل پلیمر، حلال و ضد حلال (رسوب دهنده) مشاهده شده است. شکل (۳-۴) نشان دهنده نمونه ای از دیاگرام فازی برای اینچنین سیستم های سه جزئی میباشد که شامل (اکریلونیتریل / متیل اکریلات، حلال (محلول اسید نیتریک غلیظ) و ضد حلال (آب) است [۳]. اگر محلول اسید نیتریک آبدار رقیق (منعقد کننده) E به محلول ریسندگی F اضافه شود، ترکیب در صد مخلوط در طول خطی که F را به E متصل می کند تغییر کرده و در نقطه ای که با دایره سفید مشخص شده است منحنی نقطه ابری را قطع می کند. از

- Micro- phase separation

- Critical nuclei

آنجائیکه غلظت پلیمر در این نقطه پایین تر از نقطه بحرانی محلول است (که با دایره های سفید نقطه چین مشخص شده است) فاز غنی از پلیمر تشکیل فاز دیسپرس شده ای را می دهد. از طرف دیگر، اگر محلول اسید نیتریک رقیق تر (منعقد کننده) D به محلول F اضافه شود غلظت مخلوط منتج در طول خطی که از F به D متصل شده تغییر می کند و منحنی نقطه ابری را در نقطه ای که با مربع توخالی مشخص شده است قطع می کند. از آنجائیکه غلظت پلیمر در این نقطه بالاتر از نقطه بحرانی محلول است، در این مورد فاز غنی از حلال تشکیل فاز دیسپرس شده داده و فاز غنی از پلیمر تشکیل فاز پیوسته را میدهد.

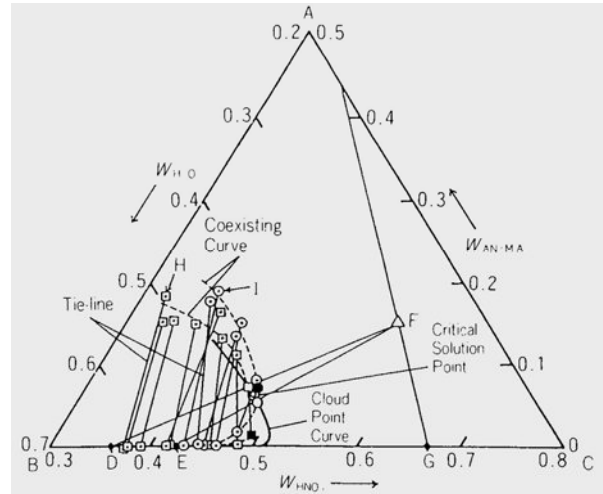


شکل ۳-۳-۳- دیاگرام جدائی میکروفازی [۲]

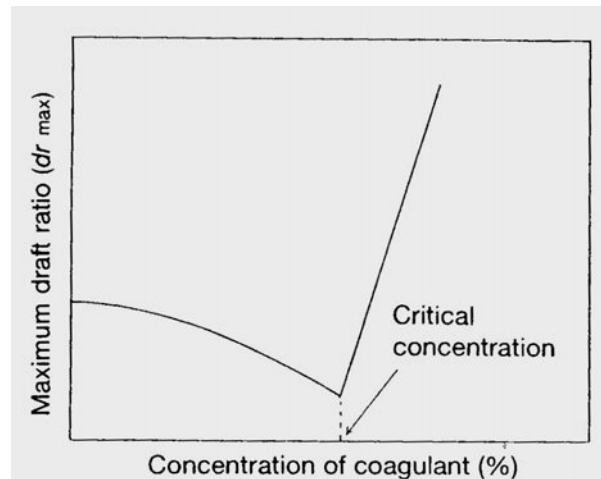
شکل (۳-۵) نشان دهنده ارتباط بین غلظت منعقد کننده و ماکزیمم نسبت کشش (dr_{max}) است یعنی در واقع نسبت سرعت لیف بعد از حمام انعقاد به سرعت دپ ریسندگی هنگام خروج از رشته ساز. زمانی که غلظت منعقد کننده افزایش می یابد ماکزیمم نسبت کشش (dr_{max}) در آغاز بتدریج کاهش می یابد و آنگاه یکدفعه پس از رسیدن به نقطه حداقل بشدت افزایش می یابد. که این غلظت مینیمم غلظت بحرانی^۱ نامیده میشود. روش ریسندگی زمانیکه غلظت منعقد کننده زیر این نقطه باشد ریسندگی با غلظت پایین^۲ و زمانیکه غلظت منعقد کننده بالا آن باشد ریسندگی با غلظت بالا^۳ نامیده میشود. ملاحظه می شود که این غلظت همانند "critical solution point" در شکل (۳-۴) است. وقتی که ریسندگی در ناحیه غلظت پایین انجام میشود لایه پیوسته ای (پوسته) روی سطح دپ بیرون آمده از رشته ساز تشکیل میشود، سپس ضد حلال در حمام انعقاد در امتداد داخل این پوسته انتشار یافته و باعث تسریع انعقاد پلیمر داخل پوسته شده و حجم آن را تغییر می دهد. از آنجائیکه پوسته به نسبتی که حجم داخلی (بواسطه آمیختن ذرات پلیمر) جمع شدگی دارد نسبتاً سخت است، تغییر شکل نمی دهد. و این دلیل آنست که حفره های بزرگ در داخل لیف تشکیل می

-
- Critical concentration
 - Low concentration spinning
 - High concentration spinning

شوند. هر چه غلظت منعقد کننده بیشتر کاهش یابد، تعداد و اندازه حفره های تشکیل شده در داخل لیف بیشتر خواهد شد. اینگونه حفره ها اغلب باعث کدری لیف میشوند. ولی اگر عمل ازدیاد طول و خشک کردن لیف بدرستی انجام شود میتوان لیف شفاف و بدون حفره ای بدست آورد.



شکل ۳-۴- دیاگرام فازی سیستمی سه تائی شامل پلی اکریلونیتریل، اسید نیتریک و آب [۳]



شکل ۵-۳- ارتباط بین ماکزیمم نسبت کشش و غلظت منعقد کننده

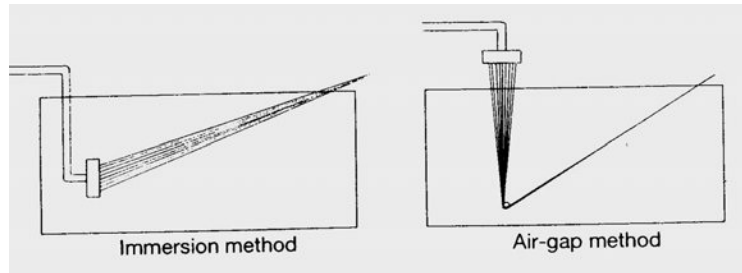
از طرف دیگر، اگر ریسندگی در ناحیه غلظت بالا انجام شود، لیف منعقد شده دیگر پوسته ای نخواهد داشت ولی ساختمان یکنواختی دارد که بواسطه تجمع ذرات پلیمر ایجاد شده است. در این حالت انعقاد بسرعت حالت ریسندگی غلظت پایین انجام نمی پذیرد، ولی در عوض بدلیل فقدان پوسته، هم حلال و هم ضد حلال می توانند بآرامی بین داخل لیف و منعقد کننده خارجی حرکت کنند و بدین طریق ساختمان یکنواخت لیف را ایجاد نمایند. بعلاوه از آنجائیکه جدا شدن فازی درون منعقد کننده در غلظت بالاتری از حلال نسبت به مورد ریسندگی غلظت پایین انجام می گیرد، ذره های پلیمر شامل مقادیر بیشتری حلالند که باعث میشود هنگام اعمال نیروی خارجی خیلی راحتتر از دیاد طول پیدا کنند و با هم دیگر ترکیب شوند. و لیکن ریسندگی غلظت بالا نقائصی نیز دارد. اولاً، لیفی اینگونه مقاومت کمی در حمام انعقاد دارد و تحت نیروهای کششی براحتی گسسته میشود، ثانیاً مقدار خیلی بیشتری از پلیمر نسبت بحالت ریسندگی غلظت پایین وارد حمام انعقاد خواهد شد.

در تاریخچه توسعه الیاف اکریلیک، ابتدا روش تولید الیاف استیپل ارائه شد، سپس به تولید الیاف فیلامنت بر پایه فن آوری تولید الیاف استیپل پرداخته شد. در فن آوری تولید الیاف استیپل، الیاف را بصورت رشته فیلامنتی که دنیرکل آن چندین ده هزار است تولید می کنند بطوریکه سرعت ریسندگی معمولاً کمتر از چند صد متر بر دقیقه می باشد. در حال حاضر اقداماتی در جهت توسعه ریسندگی سرعت بالای نخ فیلامنت مداوم انجام شده است که مورد بحث قرار میگیرند.

۲-۳- فن آوری ریسندگی نخ فیلامنتی اکریلیک

دو روش برای ریسیدن الیاف اکریلیک وجود دارد (شکل ۶-۳). یکی روش جت داخل حمام^۱ است که در آن دپ ریسندگی از رشته سازی بیرون می آید که داخل حمام انعقاد قرار گرفته است. روش دیگر جت ریسندگی خشک - تر^۱ (یا

روش فاصله هوایی^۲) است که در آن دپ ریسندگی از رشته سازی که بالای حمام انعقاد قرار گرفته بیرون می آید و قبل از ورود به حمام از محیطی گازی عبور می کند. در روش جت داخل حمام، دپ ریسندگی بمحض خروج از رشته ساز شروع به انعقاد می نماید. بنابراین کشش فیلامنت ها با نسبت زیاد در داخل حمام انعقاد امکان پذیر نیست بخصوص در مواقعی که ریسندگی غلظت پایین باشد. بر عکس در روش با فاصله هوایی می توان دپ رسیده شده را هنگامی که در خارج از محلول است با نسبت خیلی بالایی کشید، بعلاوه آنکه فیلامنتهای ساخته شده در این فرآیند سطحی نرم و براق در مقایسه با روش اول دارند. فن آوری تولید نخ فیلامنتی اکریلیک بر پایه این دو روش ریسندگی توسعه یافته است.



شکل ۶-۳- روش ریسندگی لیف اکریلیک

۱-۲-۲-۳- روش رشته ساز داخل حمام

شکل (۷-۳) نشان دهنده یک دستگاه ریسندگی است که از روش جت داخل حمام بهره برده است. دپ ریسندگی ساخته شده از پلی اکریلونیتریل یا کوپلیمر اکریلونیتریل (که از این به بعد با علامت^۳ PAN نشان داده میشود) حل شده در محلول اسید نیتریک ۷۰% Ca در داخل حمام انعقادی شامل محلول اسید نیتریک آبدار ۳۰% Ca در دمال ۳°C- ریسیده میشود.

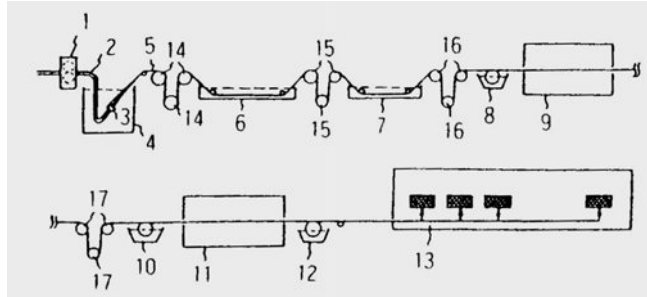
بعد از انعقاد لیف تولیدی به کمک یسکری از مجموعه غلتکهای (۱۴) از حمام انعقاد با سرعتی معادل m/min ۵-۱۰ بیرون کشیده میشود. بعد از برطرف کردن کامل حلال در حمام شستشو (۶) لیف بواسطه مجموعه ای از غلتک های (۱۵) به حمام ازدیاد طول (۷) که با آب داغ یا با بخار پر شده است، انتقال می یابد. لیف حداقل چهار برابر بین غلتکهای (۱۵) و (۱۶) ازدیاد طول می یابد، که بدین طریق لیف آرایش پیدا کرده، سپس لیف در خشک کن اولیه (۹) بعد از استفاده از روغن یا آهار و در خشک کن ثانویه بعد از استفاده از مواد تکمیلی خشک میشود و سرانجام روی غلتک های (۱۳) جمع میشود. دلیل خشک کردن لیف در دو مرحله بدست آوردن خواص مکانیکی خوب می باشد بدین نحو که در

- Dry- jet wet spinning

- Air- gap method

- PAN: polyacrylonitrile

خشک کن اول، لیف ۱۰-۵٪ جمع گشته و در خشک دوم باندازه ۱۰-۰٪ اضافه طول پیدا می کند. با کنترل نسبت ازدیاد طول و جمع شدگی میتوان خواص مکانیکی خوبی بدست آورد، همانطور که در جدول (۳-۱) دیده میشود. از خواص بدست آمده لیف در این فرآیند درخشندگی زیاد و زیردستی شبیه به ابریشم است. این لیف مقاومت کششی بالا و ازدیاد طول کمی دارد.



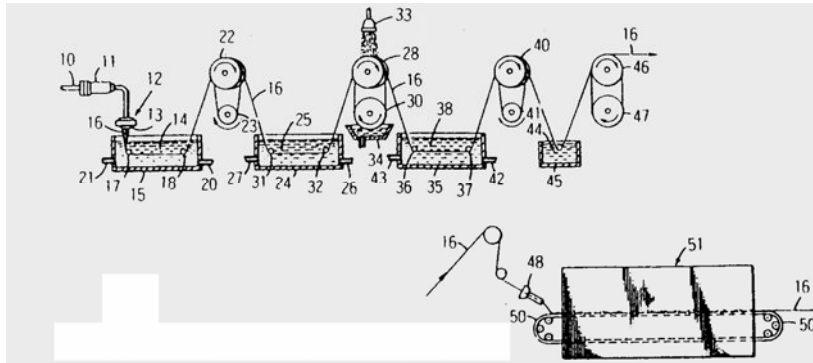
شکل ۳-۷- یک دستگاه ریسندگی که از روش جهت داخل حمام بهره می برد [۴]
جدول ۳-۱- تأثیر جمع شدگی و ازدیاد طول در خشک کن ها

Shrinkage in the first dryer (%)	0	5	10	15	19	19
Elongation in the second dryer (%)	0	0	1	3	0	4
Tensile strength (g/d)	3.9	3.8	3.6	3.6	3.1	3.4
Tensile elongation (%)	8.0	10.7	15.0	16.8	28.0	21.3
Knot strength (g/d)	1.1	1.9	2.1	2.2	3.1	2.5
Knot elongation (%)	1.8	6.0	7.0	10.0	22.4	15.0
Shrinkage at the boil (%)	14	12	11	10	4	6

۲-۲-۲-۲- روش ریسندگی فاصله هوایی

شکل (۳-۸) نشان دهنده یک دستگاه ریسندگی است که از روش ریسندگی جت خارج از حمام که بوسیله شرکت Monsanto ارائه شده، بهره می برد [۵]. حال بشرح نمونه ای از شرایط ریسندگی در چنین فرآیندی پرداخته میشود. دپ ریسندگی که از محلول ۲۶٪ PAN در N'-N دی متیل استامید (DMAC) ساخته شده است از داخل نازل (۱۳) به محیط هوا وارد میشود و بعد از طی حدود ۳cm در هوا وارد حمام انعقادی میشود که شامل ۵۰٪ محلول آبی DMAC است. لیف در حمام انعقاد بواسطه کششی که از جانب غلتک (۲۲) به آن وارد میشود تا حدی ازدیاد طول پیدا کرده و سپس با سرعتی حدود ۹/۳ m/min حمام انعقاد را ترک می کند. آنگاه در حمام ازدیاد طول که حاوی آب داغ ۱۰۰°C است ۶/۱ مرتبه ازدیاد طول پیدا می کند. لیف ۴۰-۳۰ مرتبه روی غلتکهای (۲۸ و ۳۰) بگردش در میآید و با آب

داغ °C ۵۰-۸۰ حلال آن شسته میشود. لیف بعد از آنکه با روغن در حمام (۴۵) عمل شد روی خشک کن های استوانه ای (۴۶ و ۴۷) خشک میشود. سرعت لیف روی استوانه ها در حدود ۴۶m/min خواهد بود.



شکل ۸-۳- یک دستگاه ریسندگی که از روش فاصله هوایی بهره می برد [۵]

خصوصیات این فرآیند عبارتند از ریسندگی فاصله هوایی (air-gap) و خشک نمودن لیف بدون کشش بعد از مرحله ای که لیف در آب داغ ازدیاد طول پیدا کرده باشد. با این فرآیند می توان لیفی با سطح براق، نرم و سفتی زیاد بدست آورد.

۳-۲-۳- ریسندگی سرعت زیاد نخ فیلامنتی اکریلیک

۱-۳-۲-۳- نکات فنی جهت دستیابی به ریسندگی در سرعت بالا

برای رسیدن به سرعت بالا در ریسندگی نخ فیلامنتی اکریلیک به این نکات باید توجه داشت:

۱- انعقاد سریع، در تولید لیف اکریلیک لیف بعد از انعقاد ده ها مرتبه کشیده میشود تا بواسطه آرایش یافتگی مولکولی و متراکم شدن خواص مکانیکی مطلوب حاصل گردد. در مورد تولید الیاف اکریلیک با سرعت زیاد سرعت لیف داخل حمام انعقاد باندازه سرعت الیاف سلولزی بازیافتی در داخل حمام نبوده و لیکن نسبت به روش معمولی بسیار بالاتر است. در خط تولید الیاف سلولزی بازیافتی بعد از انعقاد اگر همان سرعت پیچش استفاده شود، لیف بطور قابل توجهی ازدیاد طول نمی یابد، و به سرعت خیلی بالاتری در مقایسه با روش ریسندگی اکریلیک معمولی نیاز دارد.

جهت دستیابی به انعقاد سریع اعمال زیر باید انجام شوند:

الف - در مورد روش جت داخل محلول

I- سرعت خروجی بالای دپ ریسندگی از رشته ساز هنگامی که غلظت ریسندگی پایین باشند.

II- سرعت خروجی بالای دپ ریسندگی از رشته ساز و نسبت کشش بالا زمانیکه ریسندگی در ناحیه غلظت بالا

باشد.

ب- در روش ریسندگی جت خارج از حمام سرعت خروجی دپ ریسندگی از رشته ساز باید بالا و نسبت کشش زیاد

باشد. با انجام این اعمال در مورد ریسندگی غلظت پایینی که از روش جت داخل محلول بهره می برد با توجه به افزایش

فشار پشت رشته ساز افزایش مقدار کشش روی لیف در حمام انعقاد و dr_{max} پایین، سرعت لیف در حمام انعقاد فقط چند ده متر بر دقیقه است. بنابر این برای توسعه ریسندگی سرعت بالا دو روش دیگر را بکار گرفته اند.

۲- برطرف کردن سریع حلال، همانگونه که قبلاً اشاره شد ازدیاد طول لیف اکریلیک بعد از انعقاد بر خلاف الیاف سلولز بازیافتی امری کاملاً ضروری است. این امر امکان آن را فراهم می سازد که سرعت لیف در حمام انعقاد نسبتاً پایین باشد ولی از طرف دیگر امکان بهره وری از سیستم ناقل شبکه را بعد از زدایش حلال مشکل می سازد.

اقدامات زیر جهت برطرف کردن سریع حلال در ریسندگی سرعت بالا انجام می گیرد؛

الف- مقاومت پایین محلول شستشو و بازدهی بالای شستشو در فرآیند شستشوی به کار گرفته شده همانند فرآیندهایی از نوع Hoffman یا مستقیم

ب- زمان نگهداری کافی لیف در غلتکهای Nelson-type

متد پیشین (روش الف) از نقطه نظر صرفه جویی در مکان و هزینه تجهیزات با صرفه تر است، ولی برقراری تعادل بین تأثیر شستشو و مقاومت محلول شستشو مشکل است. متد دوم از نقطه نظر برقراری تعادل با صرفه تر ولی احتیاج به تجهیزات حجیم تر و گرانتر دارد.

از نقطه نظر خواص مکانیکی بهتر است لیف را در کشش پایین خشک کرد. عملیات زیر کشش لیف را هنگام خشک کردن کاهش می دهد:

۱- اعمال کشش کم هنگام خشک کردن روی خشک کن نوع سیلندری و یا هنگام هر نوع عملیات رهایش بعدی^۱ جهت کاهش کشش باقیمانده روی لیف

۲- خشک کردن روی غلتکهای Nelson و در صورت لزوم استفاده از غلتکهای مخروطی

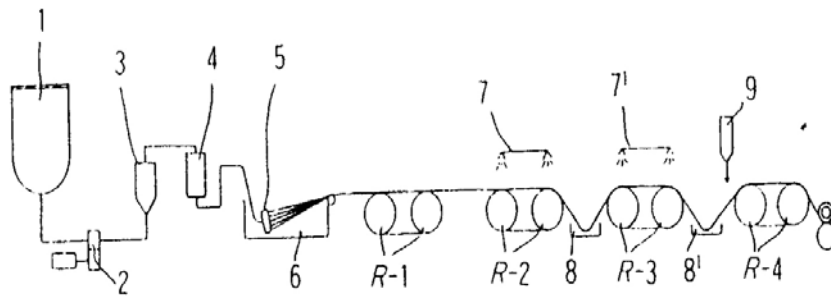
خشک کردن لیف بدون کشش روی انتقال دهنده شبکه ای^۲

۳-۲-۳- ریسندگی سرعت بالا در ناحیه غلظت بالا با روش جت داخل حمام

شکل (۳-۹) نشان دهنده دیگرامی از یک دستگاه ریسندگی سرعت بالا جهت ریسندگی در ناحیه غلظت بالا با استفاده از روش جت داخل محلول ساخت کارخانه Mansanto می باشد [۶]. در زیر مثالی از شرایط ریسندگی بکار گرفته شده در این فرآیند عنوان میشود.

- Subsequent relaxation

- Net conveyor



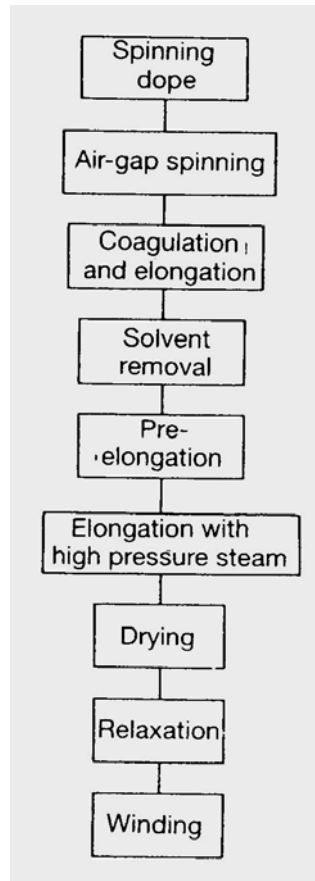
شکل ۹-۳- دستگاه ریسندگی سرعت بالا به روش جت داخل حمام در ناحیه غلظت بالا [۶]

دپ ریسندگی ساخته شده از محلول PAN ۲۵٪ در DMAC داخل حمام انعقادی شامل ۸۳٪ محلول DMAC در دمای 30°C رسیده شده و بوسیله غلتکهای R-1 و R-2 از حمام بیرون کشیده میشود. حلال روی لیف با آب غیر یونی در دمای 70°C هنگامیکه لیف روی غلتکهای R-2 و R-3 است خارج می شود. لیف با بخار 105°C بین غلتکهای شستشو (۸) ازدیاد طول پیدا می کند. سپس لیف که بطور الکتریکی تا 250°C گرم شده دوباره ازدیاد طول یافته (8) با مواد تکمیلی عمل شده روی غلتکهای R-4 خشک شده و در نهایت روی بوبین پیچیده می شود.

در این فرآیند کشش روی لیف در حال حرکت به نحو مناسب کنترل می گردد بویژه هنگام شستشو و خشک کردن که در سطح خیلی پایینی نگه داشته می شود. اگر لیف در محفظه 8' ازدیاد طول پیدا کند، لیفی با مقاومت بالا و ازدیاد طول کم بدست می آید، ولی اگر لیف در این محفظه جمع شود لیفی با مقاومت کم، ازدیاد طول زیاد و جمع شدگی کم در آب جوش حاصل میشود. بعلاوه در آب جوش اگر لیف پیچیده شده روی بوبین با بخار عمل شده باشد جمع شدگی باز هم کمتر می شود. با استفاده از این فرآیند افزایش سرعت ریسندگی تا 1000 m/min امکان پذیر است.

۳-۲-۳- ریسندگی سرعت بالا با روش فاصله هوایی

شکل (۱۰-۳) نشان دهنده فلوجارت ریسندگی سرعت بالا با روش ریسندگی فاصله هوایی از کارخانه Mitsubishi Rayon است [۷]. دپ ریسندگی (محلول PAN در DMAC) از رشته ساز بسمت پایین روان شده و بعد از طی کردن $1-20\text{ mm}$ در هوا وارد حمام انعقادی شامل محلول DMAC آبدار (بعنوان مثال ۷۰٪ در 40°C) میشود. بعد از انعقاد لیف با آب داغ شسته شده و در آب جوش $1/8-4/5$ مرتبه ازدیاد طول پیدا کرده و سپس (مجدداً) با بخار $2-4\text{ kg/cm}^2$ بمقدار ۶-۱۲ برابر ازدیاد طول پیدا می کند. بعد از ازدیاد طول لیف با استفاده از غلتک داغ، صفحه داغ یا بخار با فشار زیاد خشک می شود.



شکل ۱۰-۳- فلوچارت ریسندگی سرعت بالا به روش فاصله هوایی

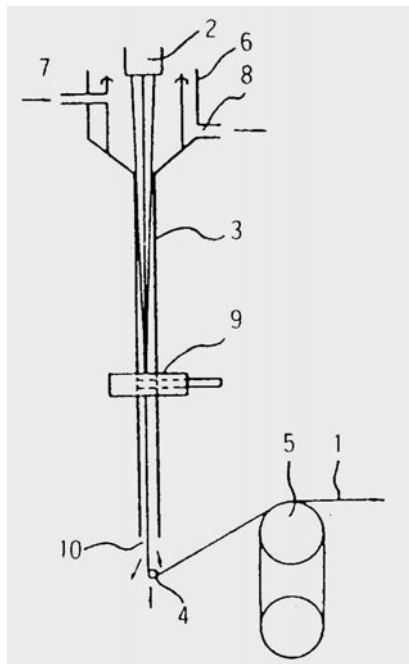
ازدیاد طول اولیه با آب جوش تأثیر زیادی روی ازدیاد طول ثانویه با بخار فشار زیاد دارد. اگر لیف در مرحله اول باندازه کافی ازدیاد طول پیدا نکند، نسبت ازدیاد طول بالا در مرحله دوم امکان پذیر نیست. اگر لیف در مرحله اول ۲-۴ برابر ازدیاد طول پیدا کند نسبت بالای ازدیاد طول در مرحله دوم مسیر بوده و از بیشینه سرعت 2160 m/min قابل حصول است (جدول ۲-۳). شکل (۱۱-۳) نشان دهنده مثالی از دستگاه ریسندگی برای روش فاصله هوایی از کارخانه Asahi Chemical Industry است [۸]. با بکارگیری روش فاصله هوایی، سرعت دپ ریسندگی قبل از انعقاد می تواند افزایش پیدا کند، ولی باید بر مقاومت بالای مایع منعقد کننده نیز غلبه نمود. اگر مقاومت خیلی بالا باشد، لیف در حمام انعقاد گسسته شده بطوریکه نمی توان به سرعت بالا رسید در این دستگاه مایع منعقد کننده از مجرائی (7) وارد شده و در داخل قیف ریسندگی (3) جریان پیدا می کند. در این قیف مایع منعقد کننده اضافی بدخل قیفی خارجی (6) سرریز می

شود. و از مجرائی (8) خارج میشود، تا سطح مایع منعقد کننده در حد مطلوب نگاه داشته شود. سرعت مایع منعقد کننده در قسمت مستقیم قیف را با تغییر قطر داخلی قیف می توان کنترل نمود.

جدول ۲-۳- رابطه بین سرعت ریسندگی و خواص لیف

First stage elongation ratio	Conditions of pressurized steam elongation			Final spinning speed (m/min)	Fiber properties		
	Steam pressure (kg/cm ² -G)	Maximum elongation speed (m/min)	Stable elongation speed (m/min)		Denier (d)	Tensile strength (ad)	Tensile elongation (%)
1.5	2.7	1450	900	810	110	4.10	20.0
2.0	2.9	2430	1700	1530	59	6.31	17.2
3.0	2.0	2400	1600	1440	63	5.90	16.3
3.0	3.2	3020	2400	2160	42	6.82	15.4
3.0	4.0	2370	1500	1350	67	5.50	16.2
4.0	3.5	2260	1500	1350	67	5.43	17.7
5.0	3.6	1330	800	720	125	3.94	18.7

جریان رو به پایین مایع منعقد کننده مقاومتش را نسبت به لیف در مقایسه با حمام انعقاد ساکن کاهش می دهد، بطوریکه لیف بطور یکنواخت منعقد شده و ازدیاد طول پیدا می کند.



شکل ۱۱-۳- تونل ریسندگی جهت روش فاصله هوایی

با بکارگیری این قیف ریسندگی و انتقال دهنده شبکه ای جهت خشک کردن، میتوان به سرعت ریسندگی $1000-2000 \text{ m/min}$ رسید. جدول (۳-۳) نشان دهنده خواص مکانیکی فیلامنت اکریلیک معمولی که از طریق فرآیند جت داخل حمام در ناحیه غلظت پایین تولید شده و فیلامنتی که از طریق فرآیند ریسندگی سرعت بالا با روش فاصله

هوایی تولید شده است، می باشد. لیف حاصله از فرآیند سرعت بالا ازدیاد طول کششی، مقاومت گره ای و مقاومت سایشی بالاتر و همچنین جمع شدگی کمتری در آن جوش نسبت به لیف معمولی دارد. این مزایای لیف بدست آمده از فرآیند سرعت بالا در نتیجه بکارگیری روش فاصله هوایی و خشک کردن بدون کشش روی انتقال دهنده شبکه ای است.

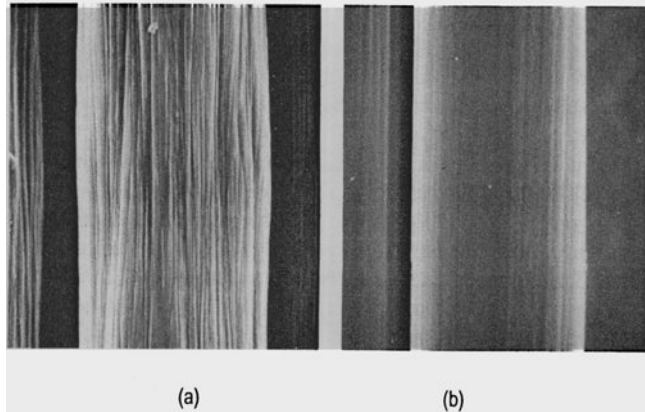
جدول ۳-۳ - خواص لیف حاصله از روش ریسندگی معمول و روش ریسندگی سرعت بالا

	Conventional	High-speed spinning
Tensile strength (g/d)	5.1	3.0
Tensile elongation (%)	13.9	27.8
Knot strength (g/d)	2.6	2.0
Knot elongation (%)	7.5	25.2
Maximum twist number (t/m)	1092	1928
Shrinkage in boiling water (%)	6.8	1.5
Fibrillation grade*	2nd	5th

* Fibrillation grade: evaluation was done by means of a 5-grade scale. The 5th grade is the highest.

شکل (۱۲-۳) نشان دهنده تصویر حاصله از SEM سطح اینگونه الیاف است. لیف معمول (a) نوارهای میکروئی روی سطحش دارد ولی لیف حاصله از روش ریسندگی سرعت بالا (b) سطحی صاف بدون نوارهای میکروئی دارد. اینطور تصور میشود که این نوارهای میکروئی در اثر گودی حفره هائی که وجودشان در الیاف ساخته شده در ناحیه غلظت پایین معمول است، هنگامیکه لیف در حمام انعقاد ازدیاد طول پیدا می کند بوجود می آیند. از طرف دیگر لیف ساخته شده در فرآیند ریسندگی سرعت بالا اکثراً ازدیاد طولش در هنگام خروج از رشته ساز و در هوا و مقدار کمی از آن در حمام انعقاد است لذا اینگونه الیاف سطحی صاف خواهند داشت.

نخ فیلامنتی اکریلیک بندرت در منسوجات گران قیمت مصرف میشود. و لیکن فرآیند سرعت بالا پیشرفتهای عمده ای در زمینه هزینه و کیفیت ایجاد کرده است، که باعث میشود این الیاف در آینده بطوری گسترده در نساجی و زمینه های صنعتی مصرف شوند. همانند نخ فیلامنتی سلولز بازیافتی که قبلاً در اینچنین زمینه هائی استفاده می شد.



شکل ۱۲-۳ - SEM سطح لیف (a) لیف تولید شده به روش رسوم، (b) لیف تولید شده در فرآیند ریسندگی سرعت بالا

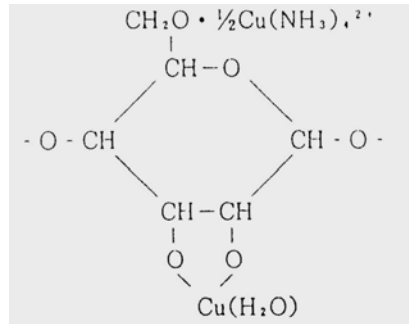
۳-۳- فن آوری ریسندگی

۳-۳-۱- توسعه فن آوری تولید

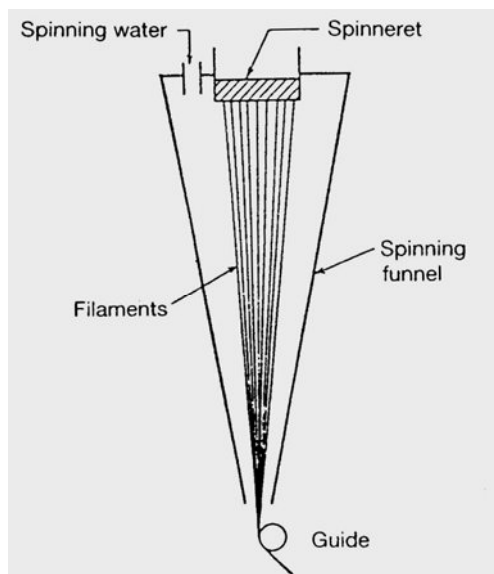
در اواسط قرن نوزدهم پی بردند که سلولز را میتوان در محلولهای آمونیاکی هیدروکسید مس حل نمود. فن آوری صنعتی تولید Bemberg rayon (اصطلاح ISO آن Cupro و اصطلاح FTC برای آن Cupra یعنی Cuprammonium-regenerated cellulose است، از این ببعده اشاره به Bemberg rayon دارند) در سال ۱۹۱۸ بوسیله آقای J.P.Bemberg در آلمان توسعه داده شد. از آن ببعده کمپانیهای متعددی در سراسر دنیا این فن آوری را معرفی کرده و تولید Bemberg rayon را آغاز کردند. امروزه فقط تعداد اندکی از کمپانیها منجمله Asahi Chemical Industry در ژاپن و Bemberg SpA در ایتالیا به تولید Bemberg rayon ادامه می دهند، که این مسئله ناشی از توان کم در رقابت با ویسکوزریون است، زیرا در تولید آن از مواد گران قیمت همانند مس و آمونیاک برای حل کردن سلولز استفاده میشود.

در تولید Bemberg rayon لینترهای پنبه بعنوان ماده اولیه استفاده میشوند. لینترهای پنبه الیاف کوتاهی هستند که از مالش دانه های پنبه بعد از آن که الیاف پنبه از آنها جدا شده اند، بدست می آید. با جوشاندن لینترهای پنبه

خام در محلول قلیائی و سپس سفیدگری آن لینترهای تصفیه شده بدست می آید. لینترهای پنبه تصفیه شده را میتوان با توجه به درجه پلیمریزاسیون، خلوص شیمیائی و زیاد نبودن گروههای اکسید شده دسته بندی نمود. هیدروکسید مس با آمونیاک حل شده و تشکیل نمک کمپلکس (tetra-ammonium copper hydroxide) می دهد. لینترهای تصفیه شده به محلول آمونیاکی مس که شامل هیدروکسید مس می باشد، اضافه میشوند. سلولز تشکیل کمپلکس با هیدروکسید مس آمونیم چهار ظرفیتی داده و در محلول حل میشود. Meyer فرمول شیمیائی زیر را برای کمپلکس حاصله پیشنهاد کرد [۱۰].



فن آوری ریسندگی Bemberg rayon بر پایه روش Thiele در سال ۱۹۰۱ از کشور آلمان می باشد. دپ ریسندگی خارج شده از رشته ساز به همراه آب داغ (منعقد کننده) از داخل قیف ریسندگی که بشکل مخروطی است (شکل ۳-۱۳) بسمت پایین حرکت می کند. در قیف مادامیکه لیف چندین صد مرتبه از دیاد طول پیدا می کند، بتدریج منعقد شده و بدین طریق لیف تشکیل می گردد [۱۲، ۱۱].

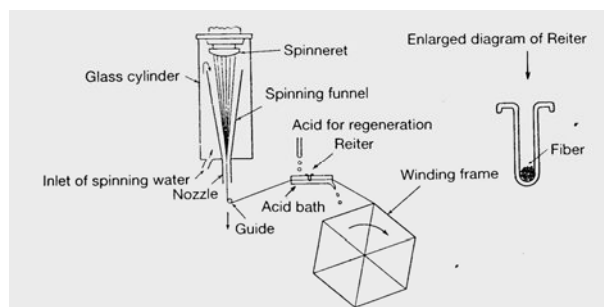


شکل ۱۳-۳- روش ریسندگی Stretch [۱۲]

۳-۳-۲- مرور روش های ریسندگی

۳-۳-۲-۱- روش ریسندگی هنک

روش ریسندگی هنک یکی از قدیمترین روش های ریسندگی Bemberg است که بصورت فرآیند غیر مداوم (بچ) بوده و از چار چوبی برای پیچش نخ استفاده می کند که در آلمان هنک نامیده می شود، (شکل ۱۴-۳). لیف از روی هنک برداشت شده و سپس بازیافت و خشک می شود. سرعت ریسندگی در این روش بین ۴۰-۸۰ m/min است.



شکل ۱۴-۳- روش ریسندگی هنک

محلول کوپرا آمونیم سلولز از رشته سازی با قطر $0.6-1.0$ mm بداخل آب داغ (آب ریسندگی) در داخل قیف ریسندگی ریسیده میشود. دپ ریسندگی ریسیده شده بسمت پایین قیف جریان پیدا کرده و در همین زمان منعقد شده و

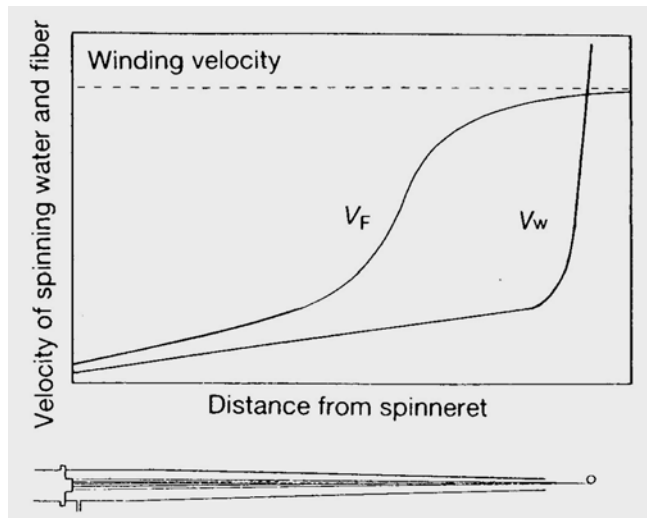
ازدیاد طول پیدا می کند. معمولاً درجه انعطاد بستگی به مقدار آمونیاک و مسی که از لیف خارج میشود نسبت به مقدار آمونیاک و مس اولیه موجود در لیف دارد.

شکل (۳-۱۵) نشان دهنده تغییرات در سرعت آب ریسندگی و لیف در داخل قیف است. در قسمت بالائی قیف دپ ریسندگی تحت نیروی جاذبه از رشته ساز بسمت پایین جریان پیدا می کند، و بخاطر ازدیاد طول پیدا کردن بتدریج نازک تر میشود. در همین زمان، آمونیاک از سطح لیف بداخل آب داغ پخش شده و بنابراین انعطاد از سطح لیف شروع میشود. ازدیاد طول پیدا کردن در این زمان باعث ترک خوردن پوسته سطحی و بدنبال آن پخش آمونیاک از پوسته سطحی جدید و پیشرفت انعطاد میشود. بواسطه تکرار این فرآیند انعطاد و ازدیاد طول ادامه پیدا می کند. هنگامیکه نرخ انعطاد به نقطه خاصی رسید، لیف به کمپلکس غیر محلولی تبدیل میشود که **blue yarn** نامیده میشود. در این نقطه ویسکوزیته لیف سرعت افزایش پیدا کرده و سیالیتش را از دست می دهد. در بخش میانی قیف، مولکولهای سلولز که هنوز با مس تشکیل کمپلکس می دهند بواسطه نیروی پیچشی از قسمت انتهائی قیف به لیف وارد می شود، در جهت طولی آرایش پیدا می کنند. در قسمت پایین تر قیف تنها بمقدار کمی بواسطه نیروی پیچش ازدیاد طول پیدا می کند. بعد از آنکه لیف قیف را ترک می کند با اسید بازیافت شده و در فرآیندهای بعدی بدون هیچگونه ازدیاد طول قابل توجهی خشک میشود. اساس ساختمان لیف که همان آرایش یافتگی مولکولها و درجه کریستالی است در مرحله تشکیل **blue yarn** شکل می گیرد. بنابراین مقدار ازدیاد طول در بخش بالائی قیف و کشش وارده روی **blue yarn** از مرحله تشکیل آن تا مرحله بازیافت تأثیر بسزائی روی خواص لیف دارد.

Bozza و **Elsasser** کل این فرآیند ریسندگی را بررسی کردند. **Bozza** افزایش جزئی سرعت لیف (dv_f) را بوسیله فرمول زیر با استفاده از سرعت لیف (V_f) در فاصله X از رشته ساز، فشار وارده بر لیف در نقطه f ، مساحت سطح مقطع لیف q و ویسکوزیته μ محاسبه نموده :

$$dv_f = (1/3\mu) (f/g) dx$$

dv_f/dx لیف را در مجموعه ای از فواصل نسبت به رشته ساز بوسیله وارد کردن μ و ویسکوزیته f کشش **Elsasser** مستقیماً از قطر لیف در داخل قیف تعیین میشود، از این نتایج او ایده حالت $[dv_f/dx]$ [۱۴]. بداخل این فرمول محاسبه نمود انعطاد ایده ال را عنوان کرد و نتیجه گرفت که کشش وارده به لیف در حالت انعطاد بهینه مقاومت لیف را تعیین می کند. ۵۶۵۰۰ دارد که معادل ویسکوزیته اسفالت نسبتاً **poise** طبق محاسبات ایشان، لیف در این حالت ویسکوزیته ای برابر با نرم است. بنابراین ملاحظه میشود که اکثر ساختمان لیف در این روش ریسندگی در مرحله اولیه انعطاد شکل می گیرد.



شکل ۱۵-۳- تغییر سرعت آب ریسندگی و لیف؛ V_w سرعت آب ریسندگی، V_F سرعت لیف

blue yarn که همراه آب ریسندگی از انتهای قیف خارج میشود جهتش عوض شده و بوسیله مجموعه ای از راهنماهای زیر قیف از آب ریسندگی جدا شده و بعد از آنکه جهت بازیافت نهائی با محلول اسید سولفوریک آبدار ۰.۶٪ عمل شد روی چارچوبی پیچیده میشود. این محلول (اسید سولفوریک) هنگام پیچش روی چارچوب ریخته میشود تا مس و آمونیاک را برطرف کند.

نخ هنک، بدون تاب تولید شده و بهمین صورت یا بعد از آنکه تاب داده شد جهت بافت مورد استفاده قرار میگیرد. در این فرآیند حالت منحصر بفردی بنام انعقاد Reiter وجود دارد که امکان کار با نخ بدون تاب را در فرآیند ریسندگی و فرآیندهای متعاقب میسر می سازد. Reiter وسیله کوچکی است که قبل از دستگاه عملیات بازیافت با اسید سولفوریک قرار داد (شکل ۱۴-۳). هنگامیکه blue yarn به محلول اسید سولفوریک آغشته می شود، با تولید گروههای OH فعال و از بین رفتن آب نخ بازیافت به سرعت اتفاق می افتد. حال اگر فیلامنت ها در نخ با هم بطور نزدیکی در تماس باشند بواسطه پیوندهای شیمیائی ایجاد شده بر پایه گروههای OH بهم دیگر خواهند چسبید. Reiter با انحنائی مناسب در قسمت انتهائی جهت عبور نخ در جائی قرار گرفته که بازیافت نخ با بیشترین شدت انجام می گیرد و امکان اتصال فیلامنتها را بهم دیگر بواسطه پیوندهای OH میسر می سازد. اینگونه پیوندهای OH عمداً تشکیل میشود تا نخ بتواند بسادگی در فرآیندهای تولید ضمن ریسندگی، بافندگی تاری پوری یا حلقوی بکار آید. از طرف دیگر باید تضمین کننده این موضوع باشد که الیاف بتوانند باندازه کافی آزادانه در پارچه جدا از هم حرکت کنند تا به پارچه ظاهری یکنواخت و

زیردستی نرم ببخشند. بهمین علت انعقاد Reiter باید برگشت پذیر باشد. مقدار انعقاد در این مرحله با تغییر موقعیت و انحنای Reiter کنترل میشود.

نخی که روی چارچوب¹ پیچیده شده سپس به دستگاه بازیافت دیگری انتقال می یابد تا بیشتر بازیافت شود، بعداً برای چندین ساعت بطور کامل شسته شده و با روغن تکمیل عمل می گردد و در نهایت بمدت چندین ساعت در خشک کنی خشک می شود.

در فرآیند هنک، سرعت ریسندگی بوسیله دو عامل محدود میشود. یکی از این دو عامل استفاده از چارچوب هنک جهت پیچش است. اگر سرعت ریسندگی افزایش یابد افزایش فشار نخ باعث میشود که نخ پیچیده شده روی چارچوب سفت شده و نخ ها از داخل به همدیگر بچسبند، که منجر به بازیافت و خشک شدن ناکافی میشود. دیگر فاکتور محدود کننده شرایط ریسندگی در داخل قیف است. اینگونه محدودیت ها با بکارگیری روش ریسندگی مداوم زیر برطرف میشود.

۲-۳-۳- روش ریسندگی مداوم

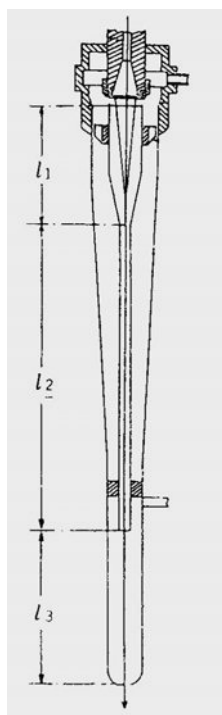
تاکنون دو نوع دستگاه ریسندگی مداوم، نوع Hoffman و نوع Duretta شناخته شده اند. تفاوت عمده این دو روش در فرآیندهای خشک کردن و بازیافت است. در اینجا تنها فرآیند Hoffman مورد بحث قرار میگیرد.

در دستگاه Hoffman لیفی که از قیف بیرون می آید مستقیماً وارد مراحل بازیافت و دستگاه خشک کن شده و بطور مداوم پیچیده میشود. سرعت ریسندگی در این فرآیند ۱۵۰-۱۰۰ m/min می باشد. یکی از دستاوردهای مهم تکنولوژی که سرعت بالاتر را ممکن می سازد بکارگیری روش قیف ریسندگی دوبله است، (شکل ۱۶-۳). در روش قیف ریسندگی تکی فرآیند هنک افزایش سرعت ریسندگی مستلزم انجام موارد زیر می باشد [۱۵]:

۱- اصلاح ابعاد قیف

۲- تغییر در مقدار و درجه حرارت آب ریسندگی

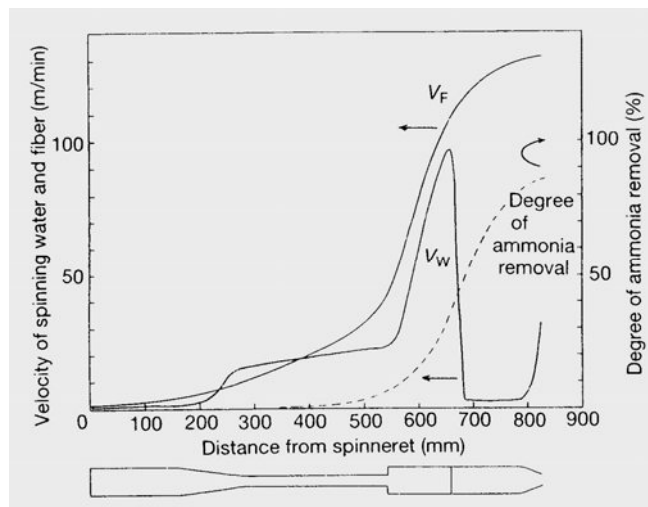
و لیکن باز هم اگر این شرایط تغییر کنند تا ازدیاد طول را در سرعت بالا تسهیل نمایند، لیف منعقد نشده از قیف خارج میشود.



شکل ۱۶-۳- قیف ریسندگی دوبله

این مشکل در روش قیف ریسندگی دوبله با جدا کردن نقش آب ریسندگی به دو قسمت انعقاد و ازدیاد طول برطرف شده است. در این روش، درجه حرارت آب ریسندگی «اولیه» که برای قسمت بالائی قیف استفاده میشود پایین تر از درجه حرارت آب روش Hank است، تا ازدیاد طول تسهیل شود ولی درجه حرارت آب ریسندگی «ثانویه» که برای قسمت پایینی لیف استفاده میشود بالاتر بوده تا انعقاد کافی تضمین شود. بعلاوه در قیف پایینی جریان آشفته ای که بواسطه اختلاط آب اولیه و ثانویه بوجود می آید انعقاد را تسریع می کند.

(-)

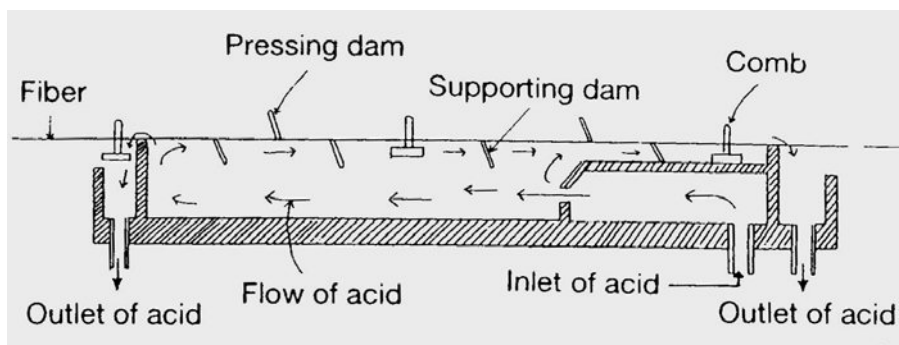


شکل ۱۷-۳- تغییرات سرعت آب ریسندگی و لیف در کیف ریسندگی دوبله

پیشرفت فن آوری لازم دیگر برای فرآیند ریسندگی مداوم در سرعت بالا شتاب و سرعت دادن به بازیافت است. در روش ریسندگی هنک از آنجائیکه الیاف نزدیک یکدیگر بصورت دسته ای قرار گرفته اند بازیافت و خشک کردن الیاف ساعتها طول می کشد. از طرف دیگر در فرآیند Hoffman بازیافت در عرض چند ثانیه انجام می گیرد بدلیل آنکه لیف مستقیماً وارد حمام انعقاد میگردد. در هر صورت این عملیات نباید زیاد طول بکشد زیرا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. برای تسریع بخشیدن بازیافت، تعویض آب اطراف لیف مهم است. همچنین ضروری است که ساختمان لیف را در حالتی نگاه داریم که پخش آب و یونهای نظیر اسید سولفوریک و مس تسهیل شود. شکل (۱۸-۳) نشان دهنده دیگرامی از بخشی از دستگاه بازیافت می باشد.

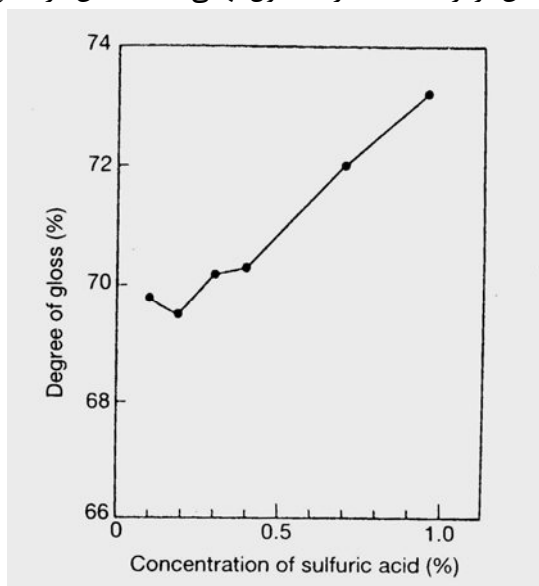
محلول اسید سولفوریک در حمام بازیافت خلاف جهت حرکت لیف جریان دارد. لایه آب که سطح نخ را می پوشاند با تحت فشار قرار دادن و برخورد با موانع جابجا و برطرف می شود. مهمترین نکته آن است که فیلامنت ها در نخ بهمديگر نچسبند یا بعبارت دیگر آنها باید در حمام از یکدیگر جدا باشند.

اگر فیلامنتها از یکدیگر جدا باشند لایه آب با رآمی با آب تازه ای که مقدار غلظت یون مس و آمونیم پایین تری دارد جایگزین میشود. این موقعیت اینطور ایجاد میشود که سطح انعقاد باندازه کافی قبل از آنکه لیف به حمام بازیافت برسد بالا باشد.

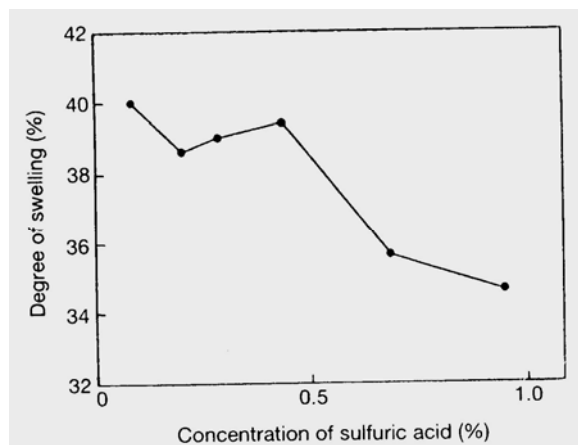


شکل ۱۸-۳- دستگاه بازیافت روش ریسندگی مداوم Hoffman

علاوه بر این عوامل مهم است که ساختمان لیف بخصوص سطح آن را متخلخل نگاه داریم تا پخش یونها در حمامهای بازیافت تسریع شود. شکل (۳-۱۹)، (۳-۲۰) و (۳-۲۱) نشان دهنده رابطه بین درجه شفافیت، تورم و رنگپذیری و غلظت اسید سولفوریکی است که نخ در فرآیند اول با آن مواجه میشود. تمامی این اشکال نشان دهنده آنند که غلظت بالای اسید سولفوریک لیف را متراکم می سازد. شکل (۳-۲۲) نشان دهنده رابطه بین غلظت مس باقیمانده در لیف و غلظت اسید سولفوریک در اولین حمام اسیدی است با اضافه شدن غلظت اسید، غلظت مس لیف درست بعد از اولین حمام اسیدی کاهش می یابد ولی غلظت محصول نهائی افزایش می یابد. این بدان معنی است که غلظت اسید اولین حمام اسیدی باید پایین نگاه داشته شود بعنوان مثال پایین تر از ۰/۵٪ تا در محصول نهائی غلظت مس در سطح پایین باشد.



شکل ۱۹-۳- رابطه بین درجه شفافیت و غلظت اسید سولفوریک [۱۶]



شکل ۲۰-۳- رابطه بین میزان تورم و غلظت اسید سولفوریک [۱۶]

روش ریسندگی نوع Hoffman نسبت به روش ریسندگی Hank برتری دارد بدلیل آنکه مداوم بوده و سرعت ریسندگی آن نیز بالاتر است. و لیکن باز هم معایب زیر را دارد:

۱- سرعت ریسندگی پایین؛ اگر چه این سرعت دو برابر فرآیند هنک است ولی خیلی پایین تر از الیاف مصنوعی دیگر است. سرعت بالاتر باعث تنزل خواص لیف شده و منجر به گسیختگی لیف در فرآیند می گردد.

۲- تماس مکرر لیف با اجزا ماشین؛ این پارامتر باعث گسستگی فیلامنتها (تولید کرک) و حتی پارگی نخ میشود.

۳- مشکلات ناشی از بقایای مس؛ حتی تغییرات اندک در شرایط ریسندگی باعث افزایش بقایای مس در لیف میشوند

که تأثیر عمده ای در رنگپذیری لیف دارند.

۴- با توجه به بازیافت و خشک کردن تحت کشش زیاد استحکام کششی کم است و جمع شدن در آب جوش زیاد

میباشد. گاهی اوقات این خواص در استفاده مناسبند ولی دامنه استفاده لیف را محدود می نمایند.

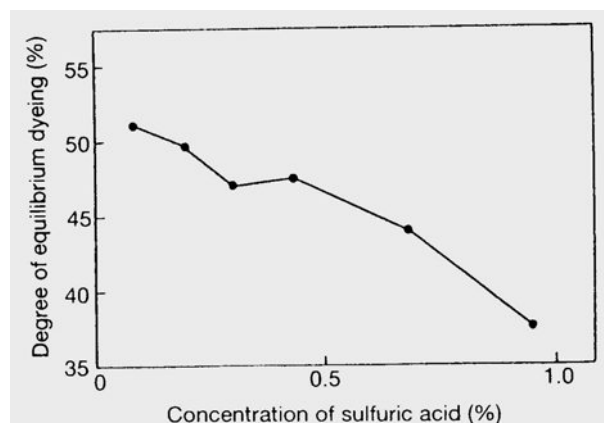
برای غلبه کردن بر معایب این فرآیند و رسیدن به سرعت ریسندگی بالاتر ملزومات زیر باید رعایت شوند.

انعقاد و ازدیاد طول در سرعت خیلی بالاتر

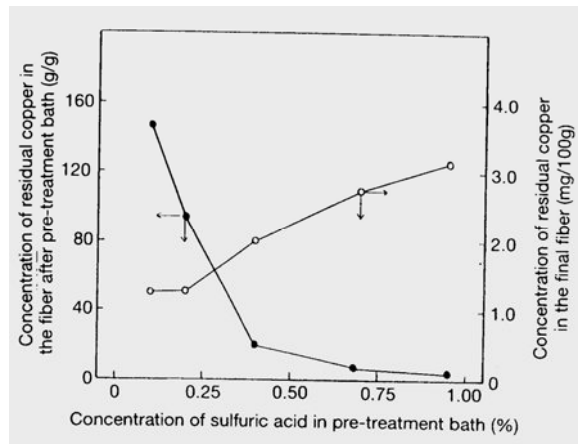
بازیافت و خشک کردن تحت هیچگونه فشاری و یا تحت فشار خیلی کم

فرآیند مداوم از ریسندگی تا پیچش

اینگونه ملزومات با بکارگیری روش ریسندگی سرعت بالای زیر تأمین میشود.



شکل ۲۱-۳- رابطه بین درجه تعادل رنگرزی و غلظت اسید سولفوریک [۱۶]



شکل ۲۲-۳- رابطه بین غلظت باقیمانده مس در لیف و غلظت اسید سولفوریک

۳-۳-۳- روش ریسندگی نوع NP

۳-۳-۳-۱- فن آوری ریسندگی سرعت بالا در روش NP

در روش NP سرعت ریسندگی در حدود 400 m/min است. در روش قیف دو بله فرآیند Hoffman شرایط ذیل

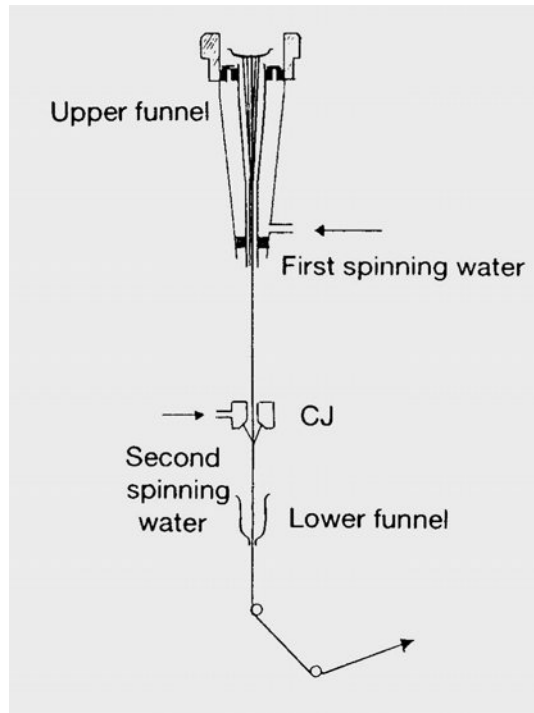
منجر به رسیدن به حداکثر سرعتهای ریسندگی شده است :

درجه حرارت پایین تر و مقدار بیشتر آب ریسندگی اولیه

درجه حرارت بالاتر و مقدار بیشتر آب ریسندگی ثانویه

و لیکن با افزایش سرعت ریسندگی مقاومت آب ریسندگی در برابر لیف در قیف ثانویه افزایش می یابد، در نتیجه خواص لیف تنزل کرده و کرک بسیاری ایجاد می گردد. حد سرعت ریسندگی در قیف دو بله Hoffman در حدود 200 m/min میباشد.

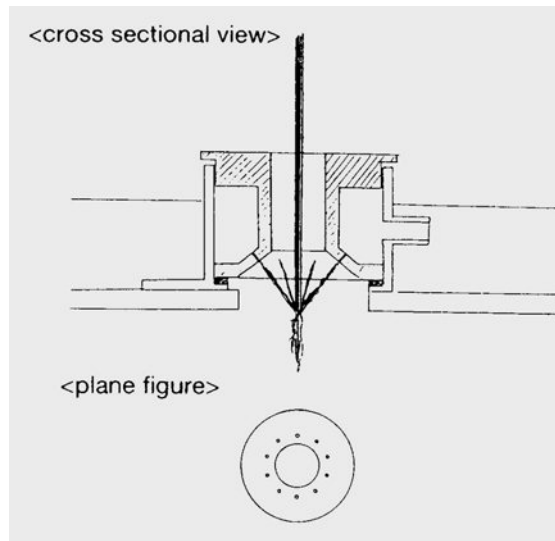
شکل (۳-۲۳) نشان دهنده دستگاه ریسندگی نوع NP است. این دستگاه از قیف بالائی، وسیله ای بنام CJ (مخفف جت انعقاد) و قیف پایینی تشکیل شده است. بخش بالائی قیف بالائی شامل شبکه ای توری مانند جهت یکنواخت کردن آب ریسندگی میباشد تا فیلامنتهایی که از رشته ساز خارج شده اند بهم نچسبند و انعقاد تقویت شود. شکل قیف بالائی طوری طراحی شده که فیلامنتها را بتوانند به آرامی و یکنواخت در حد زیادی از دیاد طول دهند بدون آنکه انعقاد آنها افزایش یابد.



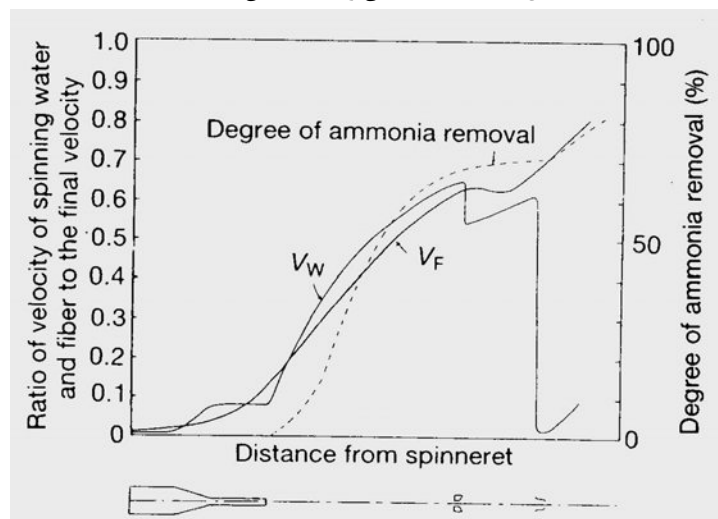
شکل ۳-۲۳- قیف ریسندگی نوع NP

شکل (۳-۲۴) نشان دهنده ساختمان داخلی جت انعقاد (CJ) است. روزنه ها با قطری حدود چند میلیمتر، روی سطح دایره ای قرار دارند که مرکز آن منطبق بر مرکز لیف در حال حرکت روی سطح زیری CJ است. آب ریسندگی ثانویه از این منافذ تأمین میشود. بجز جریان آبهای اولیه و ثانویه که وارد قیف پایینی میشوند و در آنجا با هم مخلوط می

گردند هیچگونه آب ریسندگی دیگری به کیف پایینی تغذیه نمی شود. یک کلاهک کنترل آب در این کیف وجود دارد. شکل (۳-۲۵) نشان دهنده تغییرات در سرعت آب ریسندگی و لیف و درجه انقباض است.



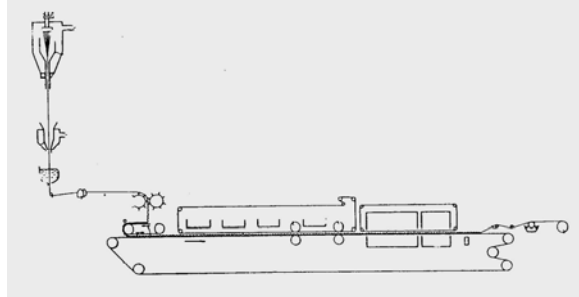
شکل ۳-۲۴- ساختمان وسیله تأمین آب CJ



شکل ۳-۲۵- تغییر در سرعت آب ریسندگی و لیف بعنوان تابعی از فاصله نسبت به رشته ساز

۳-۳-۳-۲ فن آوری بازیافت، خشک کردن و پیچش در روش NP

کاربرد دستگاههای خشک کن و بازیافت فرآیند Hoffman برای ریسندگی سرعت بالا در محدوده بالاتر از چند صد متر بر دقیقه تا هزار متر بر دقیقه عملی نیست زیرا کشش بالا باعث گسستگی مکرر، جمع شدگی زیاد در آب جوش و افزایش هزینه سرمایه گذاری میشود. در فرآیند NP از انتقال دهنده شبکه ای (Mesh) برای بازیافت و خشک کردن لیف استفاده گردد (شکل ۲۶-۳) [۱۷].



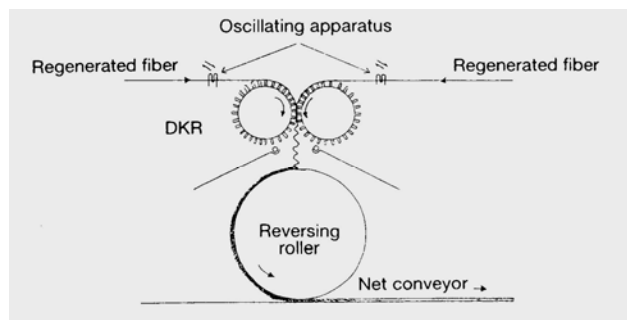
شکل ۲۶-۳- دستگاه ریسندگی نوع NP [۱۷]

وسیله نشان داده شده در شکل (۲۷-۳) جهت جمع آوری لیفی که از قیف با سرعت بالا بیرون می آید استفاده میشود. بعد از آن که لیف با اسید سولفوریک عمل شود با غلتک های هدایت کننده^۱ DKR در جهت پایین به سمت غلتک برگشت دهنده کشیده میشود. لیف بوسیله دستگاهی که در فاصله چند سانتی متری DKR قرار دارد بصورت ضربدری نسبت به جهت حرکتش به نوسان در می آید، بطوریکه لیف روی غلتک تشکیل یک تسمه باریک مداوم با پهنای چند سانتیمتر می کند. تسمه لیف از غلتک به صورت پشت و روی به شبکه انتقال دهنده بصورتی منتقل میشود که نظم آن حفظ شود بطوریکه لیف بتواند تسمه لیف را در حالی منظم ترک کند. تسمه لیف روی شبکه اصلی با اسید سولفوریک و روغن تکمیل آغشته شده سپس خشک می گردد و در نهایت رطوبت داده شده تا میزان آب محتوی آن به ۱۱٪ برسد. تسمه الیاف مادامیکه این فرآیندها را طی می کند با یک توری ظریف پوشیده میشود، تا نظم الیاف حفظ گردد.

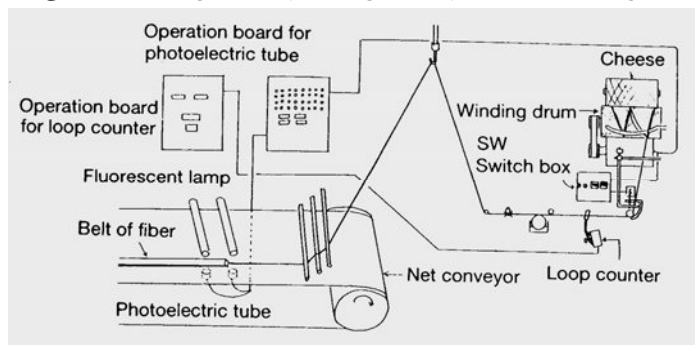
شکل ۲۸-۳- نشان دهنده دستگاه جدا کننده الیاف است. این دستگاه دو کاربرد ویژه دارد:

- ۱- جدا کردن لیف از تسمه لیف و میسر کردن مسیر حرکت روبجلو آن
 - ۲- کنترل موقعیت انتهای تسمه جائیکه لیف کشیده میشود.
- گاهی اوقات لیف از تسمه لیف جدا میشود ولی بخش کوچکی از آن باز نمی شود. این موضوع می تواند منجر به تأثیرات ذیل گردد:

- ۱- باز نشدن نوار بصورت لیفی مستقیم
- ۲- تشکیل یک گره (یا حلقه).
- ۳- گسستگی لیف



شکل ۲۷-۳- دستگاه جهت انتقال فیلامنتها به انتقال دهنده شبکه ای



شکل ۲۸-۳- دستگاه جهت برداشت فیلامنتها از انتقال دهنده شبکه ای

تأثیرات ۲ و ۳ باعث مشکلات کیفیتی و کاهش میزان خروجی می گردند. بنابراین جلوگیری از اینگونه نقائص موضوع مهمی است.

کنترل مکان انتهای نوار بطریق زیر انجام میگردد. نقطه انتهایی نوار بوسیله یک سیستم حساس نوری تشخیص داده میشود، این سیستم حساس نوری از یک منبع نوری بالای شبکه اصلی و یک سلول نوری زیر شبکه اصلی تشکیل شده است. اگر سرعت جدا سازی خیلی پایین باشد، نوار شعاع نور را قطع می کند که در نتیجه آن سرعت پیچش افزایش پیدا کرده تا زمانی که سلول نوری نور دریافت کند، هنگامیکه سلول نوری نور دریافت میکند سرعت پیچش کاهش پیدا میکند. دلایل متعددی جهت تغییرات در نقطه پایینی نوار وجود دارد. از اینگونه دلایل میتوان تفاوت در طول و دنیبر لیف و سختی جدا سازی لیف از تسمه را نام برد.

مزایای بکارگیری انتقال دهنده شبکه ای^۱ جهت فرآیند ریسندگی سرعت بالا بدین قرارند:

۱- سرعت خیلی پایین تر انتقال دهنده شبکه ای در مقایسه با سرعت ریسندگی، زمان کافی جهت بازیافت، خشک

کردن و جذب رطوبت لیف را مهیا می کند.

۲- میتوان لیفی با استحکام کششی بالا و جمع شدگی پایین در آب جوش تولید کرد، زیرا در فرآیند ریسندگی کششی وجود ندارد.

۳- هیچگونه گسیختگی لیف روی شبکه انتقال دهنده رخ نمی دهد. حتی اگر لیف در هنگام پیچش پاره شود، متصدی میتواند آن لیف را از تسمه لیف روی شبکه جدا نماید و پیچش را دوباره آغاز کند.

۴- هزینه های سرمایه گذاری و نگه داری بدلیل سرعت پایین شبکه و تعداد قطعات کم ماشین کاهش یافته است.

۵- از نظر تئوری با استفاده از انتقال دهنده شبکه ای این امکان وجود دارد که اگر فن آوری ریسندگی سرعت بالای مناسبی ایجاد شود، سرعت تولید را به چند هزار متر بر دقیقه رساند.

۳-۳-۳-۳- ساختمان و خواص لیف NP

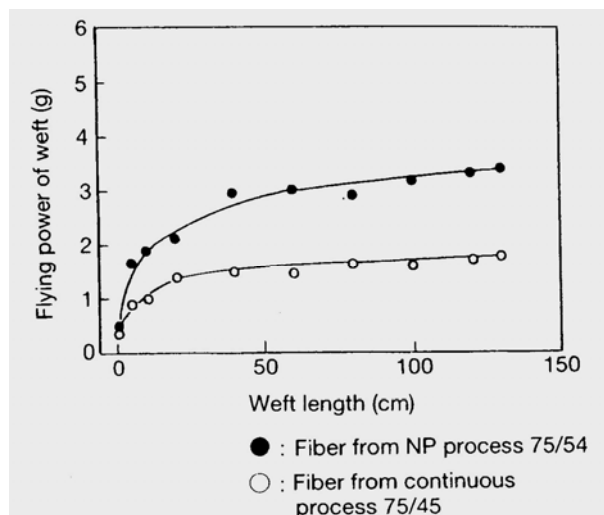
جدول (۳-۴) خواص لیف NP را با لیف هنک و لیف فرآیند مداوم Hoffman مقایسه می کند. الیاف NP و هنک در مقایسه با فرآیند مداوم استحکام کششی بالا و جمع شدگی در جوش پایینی دارند. و این بدان علت است که فرآیندهای بازیافت، خشک کردن و مرطوب سازی تحت فشار کم انجام میشوند. لیف فرآیند مداوم کمترین تعداد پرز^۱ را در واحد طولی لیف دارد و بعد از آن الیاف NP قرار دارند. از ته حلقه های الیاف NP در دستگاههای بافندگی نپ هائی بوجود می آید. از نقطه نظر راحتی تغذیه، خواص و کیفیت لیف NP توان بالقوه خوبی جهت پارچه های تاری پودی یا حلقوی پودی دارد شکل (۳-۲۹) [۱۸]. اخیراً لیف NP بخاطر توانائی بالایش در فرآیند بافندگی جت هوا^۲ که در کل برای بافت الیاف سلولز بازیافتی طراحی شده، مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۳-۴- خواص لیف

Spinning method	Tensile strength (g/d)		Tensile elongation (%)		Shrinkage at the boil (%)	Water absorption (%)	Stiffness (mg/100 filaments)
	Dry	Wet	Dry	Wet			
Hank method	2.0	1.3	14.0	20.0	1.3	86	63
Continuous method	2.7	1.7	10.0	24.0	5.7	84	108
NP method	2.4	1.6	11.0	24.0	3.2	97	16

- Fluff

- Air- jet



شکل ۲۹-۳- رابطه بین توان پرواز پود در ماشین بافندگی جت هوا و طول پود [۱۸]

معایبی نیز در لیف NP وجود دارد نظیر مقاومت سایشی کم بعد از عملیات تکمیل رزینی و تمایل به فیبریل شدن. این معایب با افزایش سرعت ریسندگی آشکارتر می گردند، که احتمالاً ناشی از نقائص ساختمانی در لایه سطحی در نتیجه سرعت ریسندگی بالا است.

۳-۳-۴- روش تولید لیف نوع UNP

۳-۳-۴-۱- روش ریسندگی سرعت بالای نوع UNP

روش UNP نوع پیشرفته روش NP است که جهت بازدهی بیشتر و غلبه بر معایب روش NP معرفی شده و توانایی ریسیدن با سرعتی معادل ۱۰۰۰ m/min را دارد. در این روش همان فن آوری استفاده شده در روش NP بکار گرفته شده بخصوص جهت فرآیندهای بعد از ریسندگی، و لیکن جهت دستیابی به سرعت ریسندگی بالا و خواص بهتری نظیر مقاومت سایشی بعد از عملیات تکمیل رزینی، ملزومات زیر باید بانجام برسند.

۱- افزایش توانایی انعقاد قیف ریسندگی

۲- دستیابی به ازدیاد طول بالا

۳- بهینه سازی ازدیاد طول و انعقاد

جهت رسیدن به سرعت بالای ریسندگی اجرای بندهای ۱ و ۲ الزامیست و بند ۳ نیز جهت ارتقاء خواص لیف ضروری میباشد.

شکل (۳-۳۰) نشان دهنده وابستگی مقاومت سایشی به نسبت سرعت ریسندگی نهایی به ماکزیمم سرعت ازدیاد

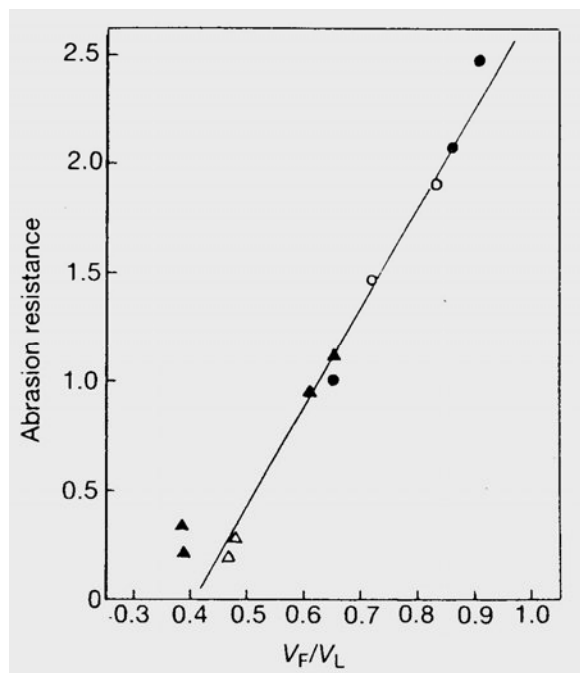
طول ناشی از آب ریسندگی یعنی $\frac{V_F}{V_L}$ است. در اینجا سرعت نهایی V_F سرعت لیف کشیده شده بوسیله DKR و سرعت

ازدیاد طول ماکزیمم V_L در ریسندگی سرعت لیفی است که تنها با آب ریسندگی و بدون هیچگونه نیروی اعمال شده از سوی DKR تولید شده یا سرعت لیف در نقطه ای است که ازدیاد طول با نیروی کشش DKR شروع میشود. از شکل (۳-۳۰) مشخص میشود که مقاومت سایشی با افزایش V_F/V_L افزایش می یابد و جهت بهبود بخشیدن آن لازم است که لیف را در مرحله اول انعقاد ازدیاد طول داد.

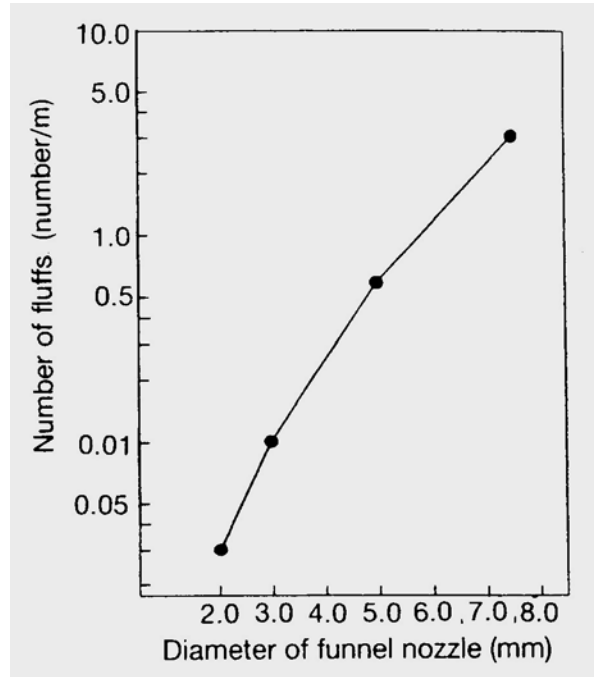
شکل (۱-۳۱) نشان میدهد که قیف مستقیم با قطر کوچکتر الیافی با پرزهای کمتر تولید می کند. این موضوع بدلیل آن است که ازدیاد طول بیشتر در مرحله اولیة انعقاد تعادل ازدیاد طول و انعقاد را بهبود می بخشد و لیکن نشان داده شده است که اینچنین قیف مستقیمی باعث آشفستگی آب ریسندگی شده و بنابراین مسیر لیف مختل شده و حتی ممکن است باعث گسستگی آن شود. نوع جدیدی از قیف برای حل این مشکل معرفی شده است. این نوع جدید انتهائی مخروطی شکل داشته که کوچکترین قطر را در پایین دارد، (شکل ۳-۳۲). هدف از ارائه این قیف جلوگیری از گسستگی لیف بواسطه آشفستگی آب و در همان زمان رسیدن به ازدیاد طول زیاد بوسیله افزایش سرعت آب ریسندگی است.

علاوه بر این نشان داده شده است که قیف ثانویه که برای دستیابی به سطح انعقاد لازم در روش NP مهم است، در روش UNP در برابر لیف مقاومت زیادی ایجاد می کند، بنابراین یک CJ ثانویه را بجای قیف ثانویه جهت کاهش مقاومت حاصله از آب و افزایش توانائی انعقاد بکار گرفتند.

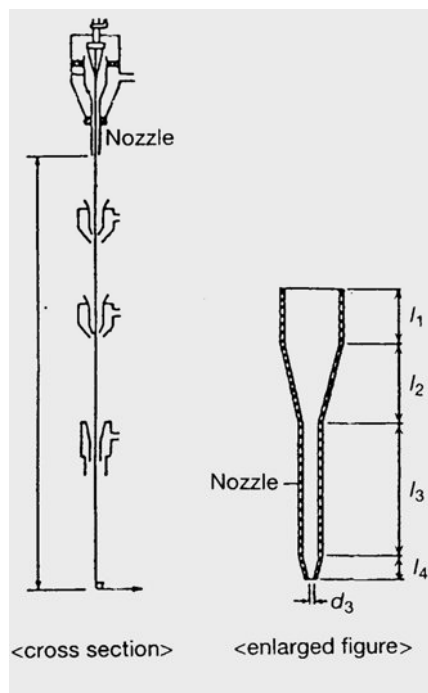
علاوه بر این موارد، طول لیفی که فقط تحت نیروی وزنش به پایین می آید، نیز افزایش یافت. شکل (۳-۳۳) نشان دهنده تغییرات در سرعت آب ریسندگی و لیف و تغییر درجه انعقاد است.



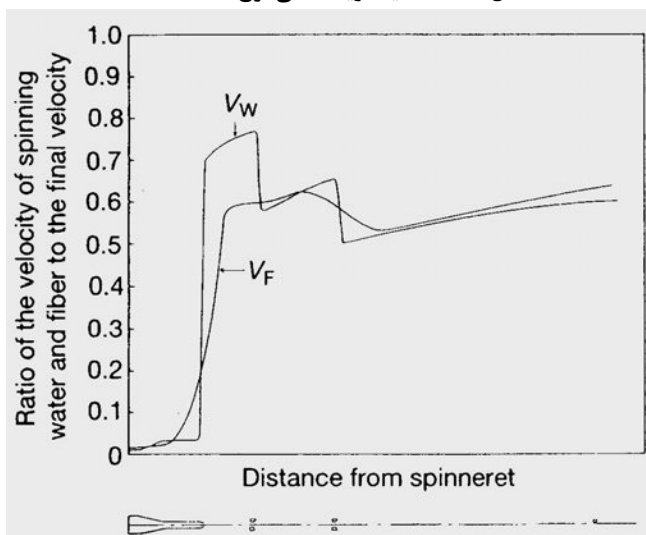
شکل ۳۰-۳- ارتباط بین مقاومت سایشی لیف در برابر نسبت سرعت ریسندگی نهایی به بیشترین سرعت ازدیاد طول [۱۹].
 مقادیر مقاومت سایشی مربوط به مقدار سرعت‌های ریسندگی نهایی ۳۸۰ m/min ، ۳۸۰ m/min ، ۴۳۰ m/min ، ۶۰۰ m/min
 ▲ ۱۰۰۰ m/min ، ●



شکل ۳-۳۱- رابطه بین تعداد نپ ها و قطر نازل کیف ریسندگی [۱۱]



شکل ۳-۳۲- قیف ریسندگی نوع UNP [۲۰]



شکل ۳-۳۳- تغییر سرعت آب ریسندگی و لیف در روش ریسندگی نوع UNP [۲۱]

همانطور که در جدول (۳-۵) نشان داده شده است، بکارگیری این نوع وسیله ریسندگی تولید الیافی با میزان پرز کم، مقاومت سایشی خوب و تمایل فیبریل شدن کم را فراهم نموده است.

جدول ۳-۵-۲- خواص لیف

		High elongation funnel (UNP)				Conventional (NP)	
Spinning conditions	Spinning speed (m/min)	1000	1100	1200	1500	400	600
	Length of $l_1 + l_2$ (mm)	270	270	270	270	275	190
	Length of l_3 (mm)	240	240	240	240	300	300
	Length of l_4 (mm)	40	40	40	40	-	-
	Diameter of d_3 (mm)	1.4	1.3	1.2	1.0	7.5	7.5
	Length of free fall (mm)	2700	2700	2700	2700	1350	1200
	The 1st coagulant temp. (°C)	50	55	60	65	40	45
	The 1st coagulant vol. (ml/min)	1000	1000	1000	1000	800	1200
	The 2nd coagulant temp. (°C)	80	80	80	80	-	-
	The 2nd coagulant vol. (ml/min)	900	1000	1100	1200	1200	1500
	The 3rd coagulant temp. (°C)	80	80	80	80	-	-
	The 3rd coagulant vol. (ml/min)	1500	1500	1500	1500	-	-
	Tension (g)	10	11	15	20	13	12
	Fiber properties	Dry tensile strength (g/d)	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Dry tensile elongation (%)		14.0	13.0	12.2	10.0	13.0	10.3
Wet tensile strength (g/d)		1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.2
Wet tensile elongation (%)		23.0	20.0	18.0	16.0	21.0	17.5
Fibrillation grade		9.0	8.5	8.0	7.5	7.0	5.0
Stiffness (mg/100 filaments)		1.2	1.1	1.0	0.9	1.0	0.3
Fluffs on the surface of the cheese (n)		1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	5.0

۳-۳-۴-۲- خواص دیگر فرآیند UNP

فراوانی حلقه ها در فرآیند UNP یک دهم فرآیند NP است. اینطور گمان می رود که این موضوع ناشی از درگیریهایی کمتر در نوارهای الیاف بدلیل استفاده از کشش DKR و راحتتر جدا شدن لیف از نوارهای الیاف در سرعت های بالاست. ملاحظه شده است که پایه این اثر ناشی از این موضوع است که الیاف کشیده شده بوسیله DKR قبل از آنکه موج تولید شده توسط تیغه های DKR ناپدید شود به شبکه انتقال دهنده می رسند.

۳-۳-۵- خلاصه

ریسندگی سرعت بالای لیف Bemberg در سرعت ۱۰۰۰ m/min با توسعه روش ریسندگی Stretch امکان پذیر شد. این کار اولین بار در سال ۱۹۰۱ توسط Thiele و با گسترش دادن روش انتقال شبکه ای صورت گرفت. این فرآیند همچنین خواص لیف نظیر استحکام کششی، مقاومت سایشی و تمایل فیبریل شدن را بهبود می بخشد. از آنجائیکه فرآیند شبکه ای سرعت ریسندگی را محدود نمی کند، با اصلاح فن آوری انعقاد و ازدیاد طول در کیف، افزایش بیشتر سرعت ریسندگی قابل حصول است.

۴-۳- فن آوری ریسندگی الیاف اسپاندکس

۴-۳-۱- روش تولید لیف اسپاندکس

در دهه ۱۹۳۰ تحقیقات درباره الیاف پلی یورتان اسپاندکس^۱ در آلمان آغاز شد. در دهه ۱۹۴۰ کمپانی IG لیف Perlon U که لیف پلی یورتان غیر الاستیک و تقریباً شبیه نایلون بود، ارائه کرد. در سال ۱۹۵۹ کمپانی Du Pont لیف پلی یورتان الاستیک را ارائه کرد و بعد از آن بسیاری از کمپانیها شروع به تولید الیاف پلی یورتان الاستیک کردند. پلی یورتان مصرفی جهت تولید الیاف پلی یورتان الاستیک کوپلیمری از بخشی نرم و بخشی سخت است. الاستیسیته لاستیک مانند با ترکیب کردن بخشی نرم که به پلیمر ازدیاد طول میدهد و بخشی سخت که به پلیمر استحکام می دهد، بوجود آمده است.

در فرآیند پلیمریزاسیون دی ال^۲ با وزن مولکولی بالا به یک پلیمر واسطه^۳ تبدیل میشود که در دو انتهایش یک گروه ایزو سیانات دارد که بوسیله ترکیب آن با دی ایزوسیانات اکی والانس دو مولار، ایجاد شده است. پلی تترا متیلن گلایکل (PTMG)، پلی ادیپات و یا پلی کاپرولاکتان بعنوان دی ال با وزن مولکولی بالا و diphenyl methane 4,4' diisocyanate (MDI) یا toluene-2,4-diisocyanate(TDI) بعنوان ماده ترکیب شونده دی ایزوسیانات استفاده میشود.

پیش پلیمر فوق سپس از طریق ترکیب شدن با یک ماده پیشرفت دهنده زنجیر نظیر یک دی آمین یا برخی مواد دو عاملی محتوی هیدروژن فعال^۴ نظیر یک دی ال، به پلی یورتان با وزن مولکولی بالا تبدیل میشود. پیوندهای اوره (در مورد دی آمین) یا پیوندهای اورتان (در مورد دی ال) که در این واکنش تشکیل میشوند، بخش سخت را ایجاد می کنند. دی آمین اتیلن و هیدرازین معمولترین دی آمین های مصرفی هستند. از آنجائیکه مقدار زیادی دی ایزوسیانات آزاد در پلیمر واسطه وجود دارد پلیمر تولید شده ساختمان زیر را دارد :



در اینجا I معرف دی ایزو سیانات، A دی آمین و - دی ال با وزن مولکولی بالاست. توالی IAIAIAIAI مربوط به بخش سخت و -I-I-I- مربوط به بخش نرم است.

معمولاً از روش ریسندگی خشک یا تر برای تولید لیف اسپاندکس استفاده میشود ولی روش ذوب ریسی نیز برای تولید آن کاربرد دارد. دو روش ترریسی وجود دارد، یکی با استفاده از محلولی از پلیمر نهائی و دیگر با استفاده از یک پلیمر واسطه.

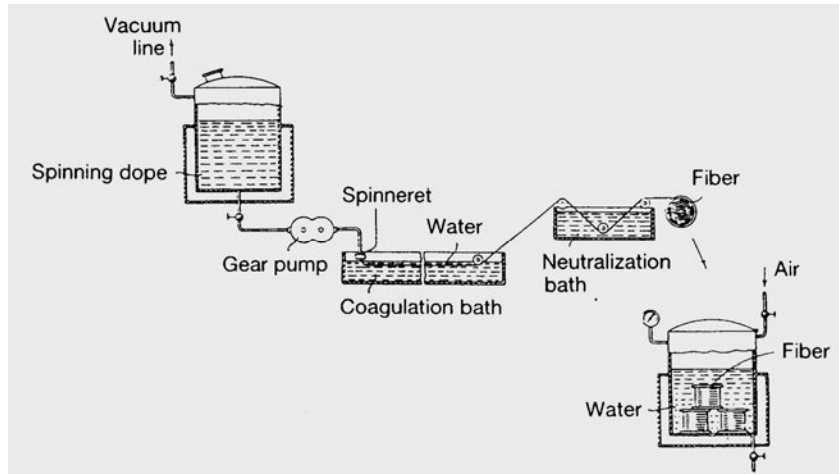
- Spandex polyurethane

- Diol

- Pre- polymer

- Bifunctional active hydrogen compound

در روش اول محلول پلیمر داخل حمام انعقاد ریسیده میشود و بعد از انعقاد، ترکیب و آمیختگی بین فیلامنت ها لیف پیچیده میشود. وقتی که از پلیمر واسط استفاده میشود، محلول پلیمر واسط بداخل محلول دی آمین ریسیده میشود تا در آنجا گسترش زنجیری رخ دهد. در نتیجه به این روش ریسندهگی ریسندهگی واکنشی نیز می گویند (شکل ۳-۳۴) [۲۲]. در مورد خشک ریسی محلول پلیمری حرارت داده شده از رشته ساز بداخل فضای گازی داغی در یک تیوب ریسندهگی ریسیده میشوند. که در این مکان حلال آن خارج میشود. فیلامنتها با هم ترکیب شده و نخ ایجاد میشود، آنگاه با هم دیگر آمیخته شده و پیچیده میشوند، در حال حاضر این روش مرسومترین روش تولید اسپاندهکس است.



شکل ۳-۳۴- روش ترریسی الیاف اسپاندهکس [۲۲]

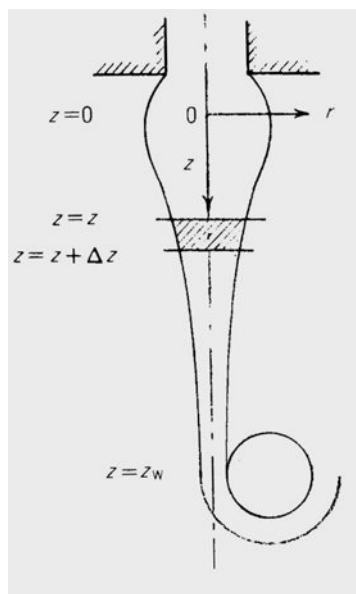
۳-۴-۲- خشک ریسی الیاف اسپاندهکس

۳-۴-۲-۱- تحلیل فرآیند ریسندهگی

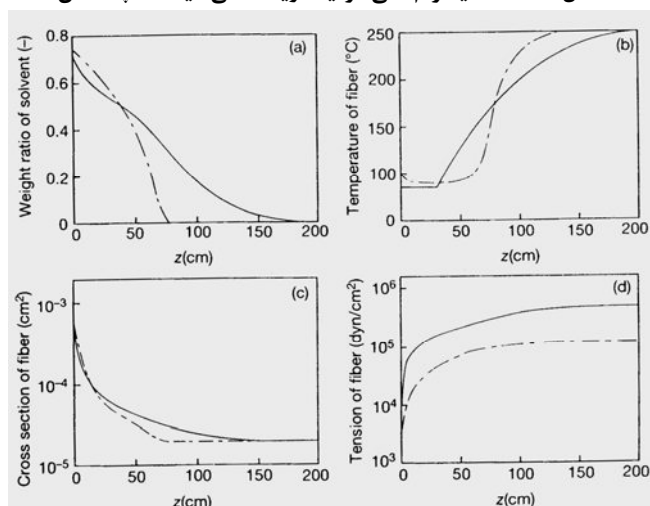
فرآیند تشکیل ساختمان لیف در خشک ریسی بسیار پیچیده تر از ذوب ریسی است، زیرا سیستمی دو جزئی است در حالیکه ذوب ریسی سیستمی یک جزئی است. معهدا با فرض آنکه هیچ تغییر فازی ناشی از تبخیر حلال رخ ندهد و لیف را میتوان بصورت مداوم عمل نمود، فرآیند ریسندهگی را از نظر تئوری می توان شبیه به فرآیند ذوب ریسی تحلیل نمود. اولاً مختصات استوانه ای (r, z) همانند آنچه در شکل (۳-۳۵) نشان داده شده در نظر گرفته شده است، ناحیه ای که بین دو صفحه افقی که به فاصله Δz و سطح استوانه ای شکل لیف است، برای این ناحیه چهار معادله تعادل مواد (پلیمر و حلال)، گشتاور و انرژی را شرح می دهد. با تغییر و تبدیل این معادلات چهار معادله مستقل حاصل میشوند که نسبت وزنی حلال، سطح مقطع لیف، کشش ریسندهگی و درجه حرارت لیف را توصیف می کنند و شرایط ریسندهگی را شرح می دهند. شکل (۳-۳۶) نشان دهنده نتایج این محاسبات با استفاده از این معادلات است. در این شکلها خط چین ها (a)

دلالت بر آن دارند که تبخیر حلال بوسیله یک لایه مرزی محدود میشود و خطوط مداوم (b) دلالت بر آن دارند که تبخیر حلال بعلت انتشار محدود می شود (با شکل ۳۷-۳ مقایسه شود).

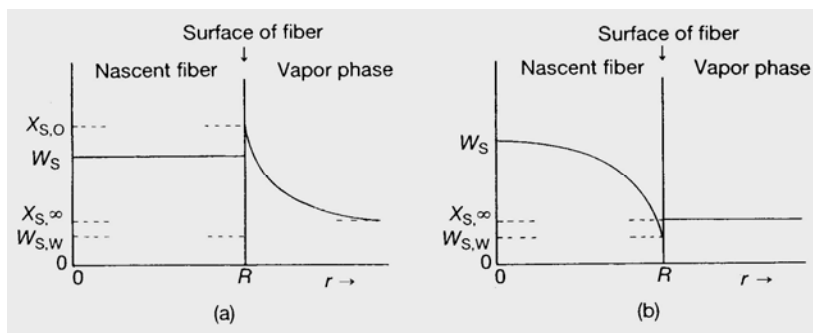
شکل (۳-۳۶) a- نشان میدهد که غلظت حلال در ناحیه نزدیک رشته ساز برای مورد (a) بالاتر از مورد (b) میباشد. ولی غلظت در ناحیه بعدی بشدت کاهش می یابد و برای مورد (a) پایین تر از مورد (b) میشود و زمانی که طول می کشد تا حلال کاملاً برطرف شود برای مورد (a) بیشتر است. در این شکل وابستگی غلظت به ضریب انتقال پخش در نظر گرفته نشده است. در واقع اینطور در نظر گرفته شده است که ضریب پخش با کاهش غلظت حلال کاهش می یابد، بنابراین زمان برطرف کردن حلال بطور کامل خیلی بیشتر طول می کشد.



شکل ۳-۳۵- دیاگرام کلی فرآیند ریسندگی الیاف اسپاندکس



شکل ۳-۳۶- رابطه بین خواص الیاف و فاصله Z (شکل ۳.۳۵): (a) نسبت وزنی حلال، (b) درجه حرارت الیاف، (c) مساحت سطح مقطع، (d) کشش الیاف



شکل ۳-۳۷- توزیع شعاعی غلظت حلال در لیف

(a) تبخیر حلال بوسیله لایه مرزی محدود شده است، (b) تبخیر حلال بواسطه انتشار محدود میشود

شکل (b ۳-۳۶) نشان میدهد که درجه حرارت لیف در مرحله اول پایین می آید سپس برای مدتی ثابت مانده و بعد بتدریج افزایش یافته تا به درجه حرارت گاز بیرون برسد. افت درجه حرارت اولیه در نتیجه تبخیر حلال است که گرمای نهان لیف را می گیرد. سپس درجه حرارت به درجه حرارت wet – bulb رسیده و مدتی ثابت می ماند بدلیل آنکه گرمای نهان با حرارت انتقال یافته از گاز اطراف برابر میشود. بعد از آن با کاهش میزان تبخیر درجه حرارت شروع به افزایش می کند.

در مرحله اول بدلیل ازدیاد طول یافتن لیف مساحت سطح مقطع (شکل ۳-۳۶c) آن بشدت افت می کند و سپس بدلیل تبخیر حلال این مساحت بتدریج کم میشود. بعد از آن با کاهش میزان تبخیر حلال و جامد شدن لیف، میزان تغییر سطح مقطع لیف کم میشود.

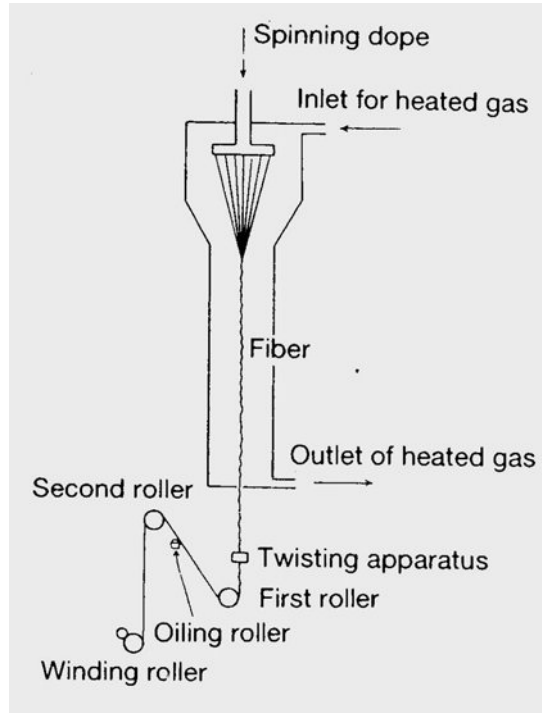
کشش لیف (شکل d ۳-۳۶) که در مرحله اول بسیار کم است با شروع تبخیر حلال بشدت افزایش می یابد ولی خیلی زود به میزان ثابتی می رسد.

این چهار مقدار در طول محور افقی با تغییر یکی از دو عامل اگر میزان دپ ریسندگی دو برابر شود افزایش می یابند. این بدان معنی است که اگر مقدار دپ ریسندگی برای افزایش سرعت ریسندگی زیاد شود، طول تیوب نیز باید به نسبت زیاد شود تا بتوان مقدار دپ ریسندگی را افزایش داد.

۲-۴-۳- خشک ریزی عملی اسپاندکس

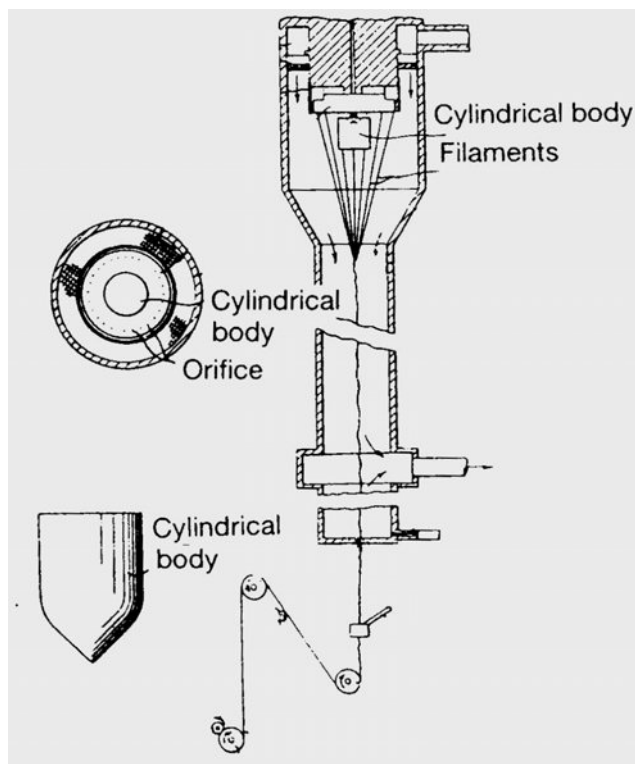
شکل (۳-۳۸) نشان دهنده نمودار مفهومی یک دستگاه ریسندگی جهت خشک ریزی اسپاندکس است محلول پلیمری که قبلاً تخلیه هوایی و فیلتر شده و تا درجه حرارت مورد نیاز داده شده است از داخل رشته ساز به تیوب ریسندگی رسیده میشود. از بالای تیوب گاز بی اثری همانند گاز Kempf بداخل تیوب دمیده میشود. با حرکت لیف بسمت پایین و نازکتر شدن آن حلال برطرف میشود. بعد از بیرون آمدن لیف از تیوب به آن تاب داده میشود. تاب به سمت بالای لیف به نقطه ای واقع در بخش بالائی تیوب منتقل میشود. در این نقطه فیلامنت هائی که لیف را تشکیل می دهند

به هم جوش خورده و تشکیل تجمعی از فیلامنتها را میدهند. این جوش خوردگی برای عملیات بعدی فرآیند ضروری و لازم است البته اگر قرار نباشد که آنرا تخریب نمائیم. از وسائل تاب دهنده مختلفی نظیر جت هوا، جریان مایع و غلتک میتوان جهت ایجاد تاب استفاده نمود. تاب اعمالی زمانی که لیف به اولین غلتک می رسد بوسیله نیروی کششی خود لیف برطرف میشود. سپس لیف در تماس با غلتک تکمیل به روغن تکمیل آغشته شده و از طریق دومین غلتک پیچیده میشود.



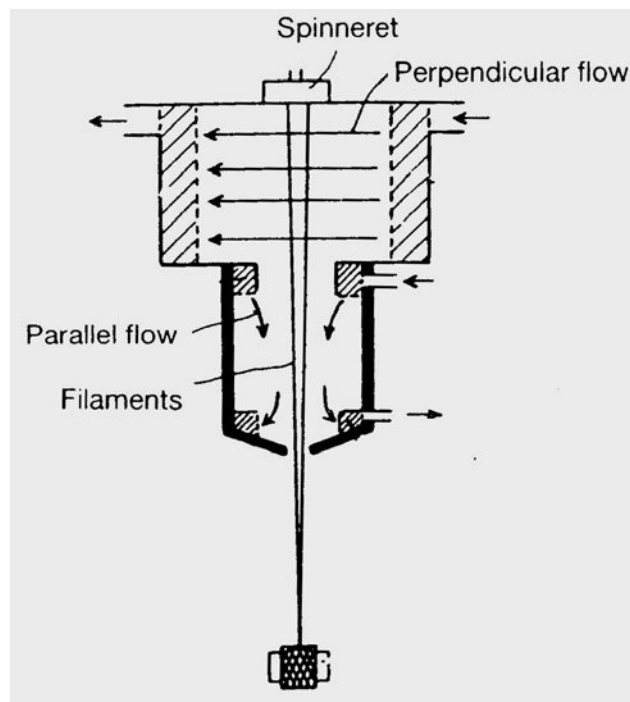
شکل ۳-۳۸ -

پیشرفتهای تکنولوژی گوناگونی در جهت کسب ریسندگی پایدار و کاستن تغییرات دنیر انجام گرفته است. شکل (۳-۳۹) نشان دهنده بهبودی در تکنولوژی کنترل جریان گاز داغ میباشد. گاز داغ بسمت یک مسیر حلقه ای شکل که بین تیوب ریسندگی و یک بدنه سیلندری شکل زیر نازل رشته ساز قرار گرفته حرکت می کند و تیوب را در نقطه ای که باندازه کافی از نازل دور است ترک می کند. این کنترل جریان از نوسان فیلامنتها جلوگیری کرده و تغییرات دنیر را بحداقل می رساند.



شکل ۳-۳۹- روش کنترل جریان جهت گاز حرارت داده شده [۲۴]

بطور معمول در خشک ریزی گاز داغ بفرم موازی با جهت لیف چه بصورت هم جهت و یا چه بصورت خلاف جریان تغذیه میشود. ولی شکل (۳-۴۰) نشان دهنده روشی است که گاز داغ بصورت عمودی به لیف همانند روش ذوب ریزی تغذیه میشود. سرعت گاز ۱-۳۰ cm/sec است. این روش از اغتشاش گاز و تغییرات انتقال حرارتی جلوگیری کرده و بنابراین درگیری الیاف و تغییرات دنییر را کاهش می دهد، این روش تبخیر حلال را سرعت بخشیده و امکان رسیدن به سرعتهای بالا را مسیر می سازد.



شکل ۴۰-۳- جریان گاز حرارت داده شده، سیستم جریان ضربدری [۲۵]

۳-۴-۳- ریسندگی سرعت بالای اسپاندکس

سرعت ریسندگی اسپاندکس معمولاً در حدود 500 m/min است که بسیار پایین تر از سرعت الیف مصنوعی نظیر PET است که با روش ذوب رسی تهیه میشوند. در ریسندگی اسپاندکس افزایش کشش لیف باعث تغییرات نامطلوبی نظیر افزایش مدول و کاهش ازدیاد طول کششی میشود. بنابراین پایین آوردن کشش لیف منظور و هدف اصلی پیشرفت فنی است تا بتوان به سرعت ریسندگی بالا رسید. بعلاوه لازم است که سرعت تبخیر حلال را نیز افزایش داد. رعایت موارد زیر در این فرآیند الزامیست؛

۱- روشی که انرژی حرارتی لازم را برای تبخیر حلال ایجاد کند. مقدار حلالی که قرار است تبخیر شود بصورت مستقیم با سرعت ریسندگی ارتباط دارد. یعنی برای افزایش سرعت ریسندگی مقدار بیشتری حلال باید تبخیر شود و هنوز افزایش طول تیوب ریسندگی به نسبت افزایش سرعت ریسندگی از نقطه نظر جنبه های اقتصادی و کشش لیف مطلوب نیست بنابراین زمان اقامت لیف در تیوب باید کوتاه تر باشد. افزایش نرخ تغذیه گاز باعث آشفته گی جریان می گردد. افزایش درجه حرارت گاز نیز بعلاوه نقطه ذوب لیف محدود است.

۲- فن آوری جهت کاهش کشش لیف . همانگونه که قبلاً اشاره شد، افزایش کشش لیف باعث افزایش مدول و کاهش ازدیاد طول کششی لیف میشود. سرعت گاز کمتر از سرعت لیف میشود. مقاومت گاز در برابر لیف با افزایش سرعت لیف زیاد میشود.

۳- تکنولوژی تاب دادن در سرعت بالا. همانگونه که قبلاً اشاره شد بعد از آنکه لیف از تیوب بیرون آمد بوسیله جت هوا، جریان مایع یا غلتک چرخشی تاب داده میشود. سرعت دوران (چرخشی) تاب دهنده بایستی برای رسیدن به سرعت ریسندگی بالاتر افزایش یابد.

۴- فن آوری پیچش در سرعت بالا. پیچیدن نخ اسپاندکس بعلت مدول پایین و ازدیاد طول کششی بالا مشکل است. ضمناً مشکلات فن آوری متناسب با افزایش سرعت ریسندگی زیاد میشود.

تحقیق و توسعه در زمینه هر کدام از عناوین ذکر شده انجام می گیرد تا خواص الیاف را بهبود بخشند، و لیکن هنوز بدلیل این محدودیت که لیف اسپاندکس را باید تحت فشار پایین رسید تا مدول پایین محصول نهائی تضمین شود رسیدن به سرعت بالای ریسندگی ممکن نشده است.

ریسندگی بی بافتها

۴-۱- مقدمه

در سالهای اخیر تولید منسوجات بی بافت بطور قابل توجهی افزایش یافته است. در سال ۱۹۸۹ تولید جهانی سالیانه این محصولات بیش از ۱/۲ میلیون تن و تولید آن در کشور ژاپن در حدود ۰/۱۶ میلیون تن بوده است [۱]. منسوجات بی بافت طیف کاربرد گسترده ای از کشاورزی، مهندسی راه و ساختمان و احداث بنا، خودروسازی و مواد صنعتی گرفته تا محصولات پزشکی، جراحی، بهداشتی و خانگی را دارند. فرآیندهای متعددی جهت ساخت اینگونه منسوجات بی بافت وجود دارد، که شامل فرآیندهای *flashpun*, *meltblown*, *spunbonded*, *dry-laid*, *wet-laid* و *spunlaced* می باشد.

هر کدام از این فرآیندها خواص خاصی در بی بافت تولیدی ایجاد می کنند و هر محصول نیز جهت مصارف متعددی مصرف میشود، بخصوص مصارفی که با خواص محصول تولید شده هماهنگی داشته باشند. فرآیند *spunbonded* بمعنای خلاصه واژه روش تولیدی است که شامل سه مرحله در یک عملیات کلی است: ذوب ریزی پلیمر ترموپلاستیک با وزن مولکولی بالا، جمع آوری فیلامنتهای مداوم روی یک تسمه جمع آوری متحرک جهت تشکیل تار عنکبوتی و چسباندن فیلامنتها بهم دیگر در تار عنکبوتی جهت تولید بی بافتها. این فرآیند بسیار سود آور است و منسوجات بی بافتی با خصوصیات مکانیکی عالی تولید می نماید. هر ساله در صنعت بی بافتها طرحهای توسعه زیادی در زمینه تسهیل تولید ارائه میشوند. میتوان در معنای گسترده تر واژه فرآیندهای *spunbonded* را بجای فرآیندهای *flashpun* و *meltblown* بکار برد، زیرا همانگونه که در مورد فرآیند *spunbonded* توضیح داده شد این فرآیندها نیز شامل یک فرآیند یک مرحله ای از ریسندگی تا جامد شدن (انسجام) می باشند. و لیکن در پایه مرحله ریسندگی که پلیمر جهت تشکیل فیلامنت نازک میشود، فرآیندهای *meltblown* و *flashspun* فرق می کنند. این بدان معنی است که خواص و شکل فیلامنتهای تولید شده در هر فرآیند متفاوت بوده و بنابراین پارچه های بی بافت حاصله از هر فرآیند از نظر خواص با همدیگر به مقدار زیادی متفاوت خواهند بود.

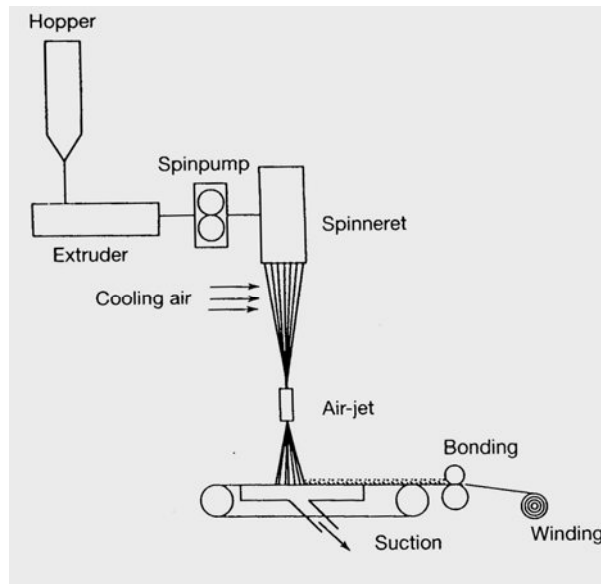
فرآیند *flashpun* به طور متمایزی در مرحله ریسندگی با دو فرآیند دیگر متفاوت است. در فرآیندهای *meltblown* و *spunbonded* پلیمر مذاب از رشته ساز بیرون آمده به صورت الیاف یا فیلامنتهای یکسره در می آید، بنابراین مرحله ریسندگی ذوب ریزی است. ولی مرحله ریسندگی فرآیند *flashpun* ذوب ریزی نیست. در فرآیند *flashpun* فیلامنتها از محلول پلیمری که حلالی آلی با نقطه جوش پایین و غیر فعال نسبت به پلیمر که آنرا در دمای اتاق در خود حل نکرده و فقط در دما و فشار بالا در خود حل می نماید، بدست می آیند، بنابراین خشک ریزی محسوب می شود. در فرآیندهای *meltblown* و *spunbonded* و خشک ریزی معمولی از هر سوراخ رشته ساز تنها یک فیلامنت حاصل می شود. ولی فرآیند ریسندگی *flash* در این مورد متمایز است و امکان تشکیل چندین فیلامنت از محلول

پلیمری را که از یک سوراخ خارج میشود، فراهم میسازد. اینگونه فیلامنتها را فیلامنتهای شبکه ای *plexifilaments* مینامند و تشکیل ساختمانی سه بعدی می دهند. این بخش بر روی روشهای ذوب ریسی بویژه فرآیندهای *meltblown* و *spunbonded* تاکید دارد.

۲-۴- فرآیند *spunbonded*

اولین بار کارخانه *Du Pont* در سال ۱۹۵۹ هنگامیکه فروش بی بافتهای *spunbonded* پلی اتیلن ترفتالات را تحت نام تجاری *Reemay* آغاز نمود، فرآیند *spunbonded* را بصورت تجاری درآورد. شکل (۱-۴) نمائی کلی از فرآیند *spunbonded* را نشان می دهد که اغلب تولید کنندگان از آن بهره میبرند. در این شکل نشان داده شده است که فیلامنتها به کمک جتهای هوا^۱ برداشت میشوند ولی میتوان بجای آنها از غلتکها نیز استفاده نمود. در صنعت دو نوع رشته ساز با سطح مقطع دایره ای و مستطیل شکل استفاده می شوند. شکل (۲-۴) برخی از سیستمهای ریسندهای افشا شده دارای حق امتیاز را نشان می دهد. مهمترین نکته در تولید بی بافتهای باز کردن و کنار هم قرار دادن (آرایش دادن) فیلامنتها جهت تولید تار عنکبوتیهای یکنواخت است. هماهنگی مشخصی بین رشته ساز و وسیله برداشت کننده جهت ایجاد تار عنکبوتی یکنواخت وجود ندارد. تولید کنندگان فن آوریهای متعددی را جهت اصلاح فرآیند باز نمودن مناسب جهت تولید تار عنکبوتیهای یکنواختی خوب ظاهری ارائه کرده اند، همانند پخش کننده هوایی که در روزنه های خروجی جتهای هوا قرار میگیرد، الکتریسته ساکنی که با مالش فیلامنتها روی صفحات فلزی ایجاد می شود و تخلیه کرونا (تخلیه هاله ای) از طریق عبور فیلامنتها از میان وسیله تخلیه کرونا و وسایل انتقال. از هر نوع پلیمری که قابلیت تشکیل فیلامنت دارد میتوان در فرآیند *spunbonded* و جهت تولید پارچه های *spunbonded* استفاده نمود از جمله آنها می توان پلی اتیلن ترفتالات (PET)، پلی اولفین ها، پلی فنیلین سولفاید (PPS)، پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) و پلی آمیدها را نام برد. سرعت ریسندهای معمولاً بین ۳۰۰۰-۶۰۰۰ m/min است. گزینش پلیمرها بستگی به مصارف نهائی دارد. از ترکیب پلیمرها نیز می توان جهت برآورد نمودن احتیاجات متخلف و بی بافتهائی با قابلیتهای خاص استفاده نمود. بعنوان مثال پارچه *spunbonded* کارخانه *Unitika* تحت نام تجاری *ELEVES* تولید می شود که نرمی و استحکام فوق العاده ای دارد. این پارچه با مخلوط کردن PET و پلی اتیلن (PE) تولید می شود و از خواص هر دو جزء همچون مقاومت بالای PET و نرمی PE سود می برد. *ELEVES* فیلامنتهای دو جزئی یکسره ای هستند که در بخش مغزی آن از جزء PET و در بخش پوسته آن از جزء PE استفاده شده است. برخی از تولید کنندگان در حال ساخت لامینتهائی از پارچه های *spunbonded* می باشند که از پلیمرهای مختلف ایجاد شده اند. یکی از اینگونه محصولات *ELFIT* کارخانه *Unitika* است که اولین بار در آوریل ۱۹۹۱ عرضه شد، این محصول لامینتی از دو نوع پارچه *spunbonded* مختلف است یک طرف لامینت پارچه *spunbonded* پلی اتیلن ترفتالات و طرف دیگر آن *ELEVES* است که از فیلامنتهای دو جزئی هسته PET و پوسته PE تشکیل شده است. پلیمرهای دو قسمت نقاط ذوب مختلفی دارند، بنابراین در ترکیب

با دیگر مواد ELFIT فرآیند پذیری آنها را بهبود بخشیده تولید کامپوزیتها را سهل تر ساخته و ملزومات متنوع تری برای بی بافتها برآورد میسازد.



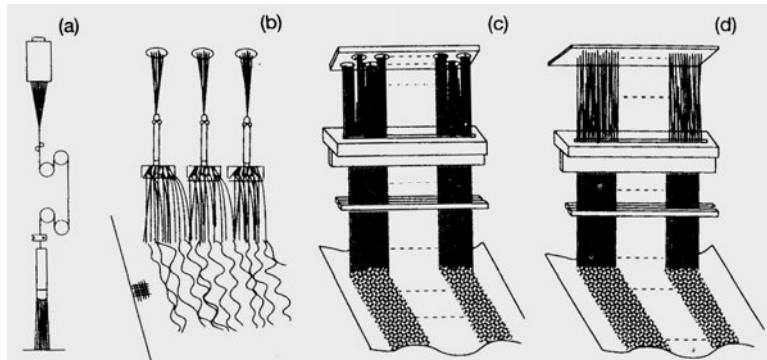
شکل ۱-۴- فرآیند Spunbonded

بی بافتهایی نیز وجود دارند که از فیلامنتهایی فوق العاده ظریف با ظرفیت ۰/۵ دنیر یا کمتر تولید میشوند. اینگونه بی بافتها از تار عنکبوتیهایی متشکل از فیلامنتهای چند جزئی نظیر نوع جزیره - دریا^۱ یا قابل تقسیم^۲ که از نوع پلیمرهای غیر قابل مخلوط شدن در یکدیگرند تولید میشوند. بی بافتهای خام بعد از منسجم نمودن تار عنکبوتیهها یا به وسیله تقسیم فیلامنتها و منسجم نمودن تار عنکبوتی بصورت همزمان انجام می شود. تفکیک تقسیم که در مورد جزیره - دریا استفاده می شود برطرف کردن (حل کردن) بخش پلیمری دریا در حلال است که بعد از آن بخش جزیره باقی مانده و فیلامنتهای فوق العاده ظریفی ایجاد میشوند. این روش فرآیند پیچیده ای است بدلیل آنکه نیاز به حل کردن یا برطرف کردن بخش دریا است، ولی در حال حاضر ظریفترین فیلامنتها با این تکنیک تولید می شود. این تکنیک را اولین بار Toray ارائه نمود، البته قبلاً محققان در آزمایشگاه Okamoto لیف PET را با ظرفیت ۰/۰۰۰۰۹ دنیر و قطر ۰/۱ μm تولید نموده اند و ادعا می نمایند که ظریفترین لیف جهان را تولید نموده اند. شکل (۳-۴) نشان دهنده فیلامنتهای چند جزئی از نوع جزیره - دریا است [۶]. تکنیک تقسیم جهت نوع قابل تقسیم جداسازی دو پلیمری است که فیلامنت را تشکیل داده اند. عمل جداسازی به وسیله نیروی مکانیکی، عمل حرارتی یا اثر ایجاد شده بواسطه آب با فشار زیاد انجام میگیرد. روش تقسیم با

- Sea- island

- Dividable

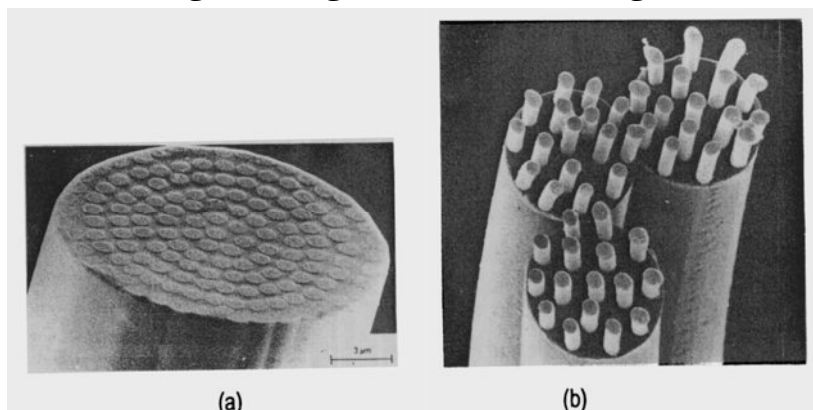
آب تحت فشار زیاد همزمان با جداسازی باعث درگیر شدن فیلامنتها نیز می‌شود که بدین طریق تار عنکبوتی را انسجام بخشیده و محصولی متشکل از فیلامنتهای فوق العاده ظریف تولید می‌کند [۷]. شکل (۴-۴) نشان دهنده فیلامنتهای چند جزئی از نوع قابل تقسیم است [۸].



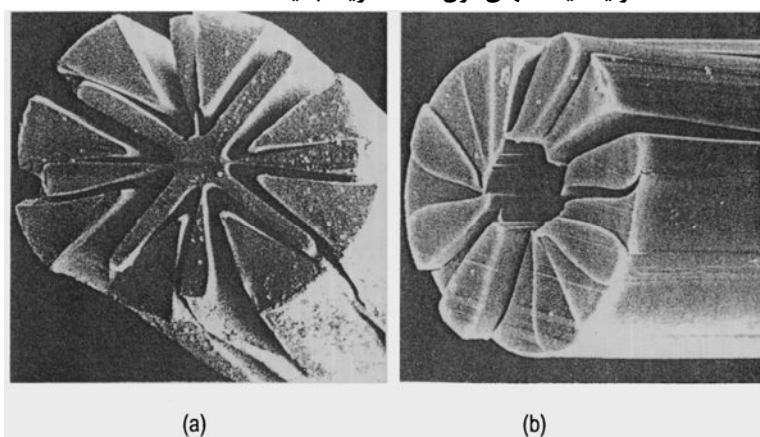
شکل ۲-۴- سیستمهای ریسندگی بی بافتها Spunbonded. a- مرجع ۲، b- مرجع ۳، c- مرجع ۴، d- مرجع ۵.

در بین پارچه های spunbonded پلی اولفینی، پلی پروپیلن (PP) بطور گسترده ای مصرف می‌شود. پارچه spunbonded پلی اتیلنی نیز تولید می‌شود ولی تولید آن اندک است. در بین رزینهای PE، پلی اتیلن خطی دانسیته پایین (LLDPE) قابلیت ریسندگی خوبی دارد، و میتوان آنرا براحتی به طریق melt-spun با دستگاههای معمولی و تکنیکهای مرسوم و با سرعتی بالای 3000 m/min به فیلامنت تبدیل نمود و پارچه هایی را تولید کرد، که ظرافت فیلامنتهایش ۲-۳ دنیر باشد. استحکام کششی پارچه spunbonded از جنس LLDE در مقایسه با پارچه مشابهش از جنس PP پایین تر است ولی نرمی استثنائی آن با PP قابل حصول نیست. جهت رسیدن به سرعت ریسندگی بالاتر میتوان از مخلوط پلی اتیلن دانسیته پایین (LDPE) و PP استفاده نمود [۹]. در نمونه های دارای حق امتیاز افشا شده یکسری از مخلوطها از LDPE با دانسیته 0.96 g/cm^3 ، نقطه ذوب $103/4^\circ\text{C}$ و شاخص ذوب ۷۰ و PP با دانسیته 0.922 g/cm^3 ، دمای ذوب 164°C ، سرعت جریان ذوب $8/7$ و ارزش Q معادل $8/8$ (نسبت وزن به تعداد میانگین وزن مولکولی) حاصل میشوند. شکل (۴-۵) که نشان دهنده نتایج بدست آمده با استفاده از وسایل ریسندگی مرسوم است، مشخص کننده سرعت ذوب ریزی بیشینه در دمای 260°C مخلوطهای مختلف LDPE و PP است. فیلامنتها با استفاده از صفحه رشته سازی شامل ۷۰ سوراخ دایره ای شکل با نرخ جریان پلیمری در هر سوراخ 0.9 g/min ذوب ریزی شده اند و با غلظتی برداشت شده اند. LDPE مخلوط شده با مقدار کمی PP سرعت ریسندگی را افزایش می‌دهد. تجزیه و تحلیل فیلامنتهای melt-spun مخلوطها در سرعتهای بالاتر نشان داد که PP دیسپرس شده در LDPE داخل فیلامنت به صورت قطرک مانند اکثراً با قطری حدود 5 mm و طول 7 mm در می‌آید. بر این باورند که قطرک ماندهای PP در LDPE نرخ کریستالیزاسیون LDPE را بالا برده و در نتیجه مخلوط پلیمری را نسبت به LDPE خالص میتوان در سرعتهای بالاتری melt-spun نمود. از طرف دیگر مخلوط نمودن PP با مقدار کمی از LDPE سرعت ریسندگی را در

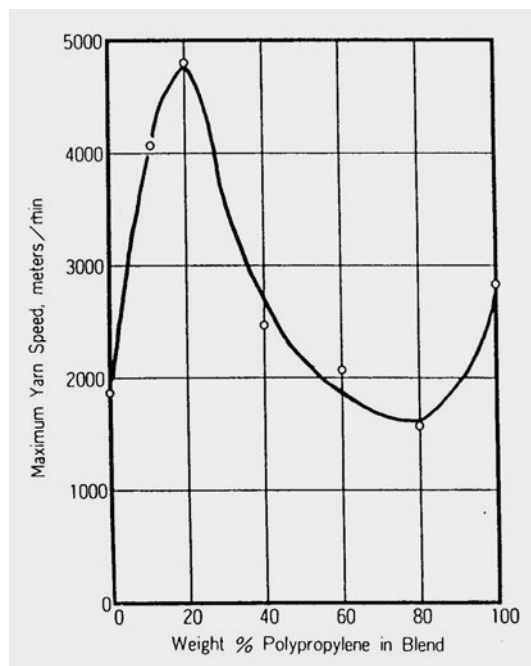
مقایسه با PP مخلوط نشده کاهش می‌دهد. همچنین معتقدند که LDPE مانع کریستالیزاسیون PP شده و در نتیجه مخلوط تأثیر سوئی روی سرعت ریسندگی می‌گذارد. این مقاله مثال جالبی از ذوب ریزی مخلوط‌هاست.



شکل ۳-۴- فیلامنت‌های چند جزئی نوع جزیره در دریا، a- بخش فیلامنت، b- بخش جزایر که بعد از انحلال پلیمر دریا جهت تولید فیلامنت‌های فوق العاده ظریف باقیمانده است



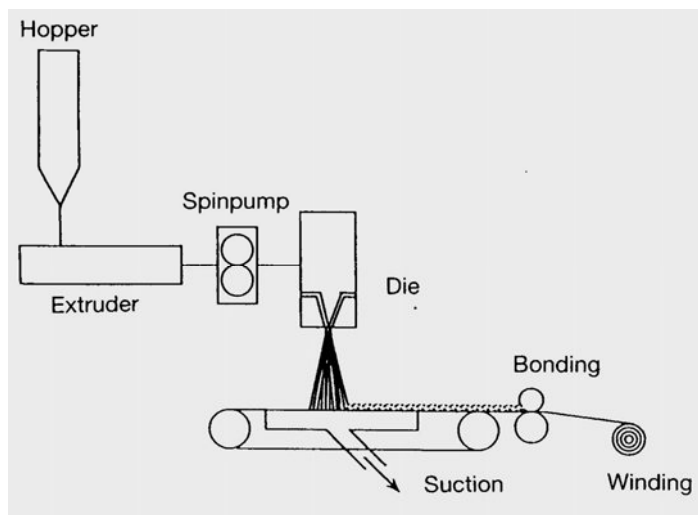
شکل ۴-۴- فیلامنت‌های چند جزئی از نوع قابل تقسیم، a- فیلامنت با سطح مقطع مثلثی PET، b- فیلامنت با سطح مقطع مستطیلی PET و جزء دوم پلی آمیدی



شکل ۴-۵- سرعت گسستگی فیلامنت هنگامیکه LDPE مخلوط با PP ریسیده می شود

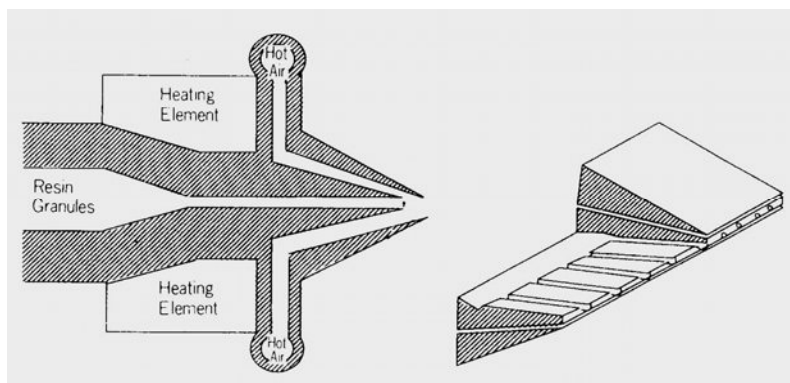
۴-۳- فرایند Meltblown

فرایند meltblown را در سال ۱۹۵۱ آزمایشگاههای تحقیقاتی US Naval هنگام تلاش در جهت تولید میکروفیبریلهای آلی با قطر کمتر از $1\ \mu\text{m}$ بنیان نهادند. محققین این آزمایشگاهها میخواستند الیافی را جهت فیلترهای میکروذیری تولید کنند تا این فیلترها بتوانند ذرات رادیواکتیو در جو فوقانی را جمع آوری کنند. این تحقیق اولیه و توسعه کار روی فرایند meltblown را Exxon در اواسط دهه ۱۹۶۰ ادامه داد و موفق شد اولین واحد meltblown را برای تولید تار عنکبوتیهای میکروذیری در اوایل دهه ۱۹۷۰ ارائه دهد. شکل (۴-۶) نمائی ساده از فرایند meltblown را نشان می دهد.



شکل ۶-۴- فرآیند Meltblown

ساختار روزنه^۱ استفاده شده در فرآیند meltblown بطور عمده ای با روزنه های استفاده شده در فرآیند spunbonded تفاوت دارد. در فرآیندهای meltblown فاصله روزنه تا انتقال دهنده (در حدود ۵۰-۲۰ cm) می باشد، که در مقایسه با فرآیندهای spunbonded (در حدود ۲۰۰-۱۰۰ cm) بسیار کوچک است. در این فرآیند گاز با سرعت بسیار بالا به پلیمر مذاب دمیده می شود تا الیاف ظریف تشکیل شوند. روزنه ردیفی از منافذ کوچک با قطری کمتر از ۱ mm دارد، که مرکز هر منفذ از منفذ دیگر ۰/۵ mm فاصله دارد علاوه بر ردیفی از منافذ کوچک در روزنه شکافهایی نیز وجود دارد که از آنها گازی که بالاتر $300^{\circ}C$ حرارت داده شده به پلیمر ترموپلاستیک ذوب شده ای که از هر روزنه بیرون می آید، دیده می شود. گاز متداول معمولاً هوا می باشد. شکل (۷-۴) روزنه meltblow طراحی شده بوسیله Exxon را نشان می دهد. پلیمرهای متعددی در فرآیند meltblown بکار میروند که معمولترین آنها PP می باشد ولی LDPE، پلی اتیلن سنگین (HDPE) و سبک (LDPE)، پلی اتیلن ترفتالات، پلی آمیدها، پلی استایرن و پلی یورتانها نیز مصرف میشوند.



شکل ۷-۴- روزنه فرآیند meltblowing از نوع Exxon

در فرآیند meltblown به مقدار زیادی گاز با حرارت بالا جهت تولید الیاف میکروندیزی مورد نیاز است. مقدار مصرف گاز بستگی به پلیمر، وزن مولکولی پلیمر و سرعت جریان آن در روزنه دارد. در این فرآیند معمولاً نسبت مصرف گاز ۴۰ تا ۵۰ برابر وزن پلیمر در واحد زمان می‌باشد. که گاهی این نسبت به ۱۰۰ هم میرسد. پس در کل می‌توان نتیجه گرفت فرآیندهای meltblown نیاز به مقدار زیادی انرژی دارند. نیروی وارده از طرف گاز لیف را با سرعت خیلی زیاد نازک می‌نماید بعنوان مثال برای تولید لیف ظریف با قطر $3 \mu\text{m}$ هنگامیکه سرعت جریان پلیمر در هر روزنه 0.2 g/min باشد و نوع پلیمر مصرفی pp با دانسیته 0.9 g/cm^3 باشد سرعت ریسندهی محاسبه شده به 31000 m/min میرسد. برای تولید الیاف ظریف با مصرف انرژی کمتر باید دما و مقدار مصرف گاز را کاهش داد. بدان معنی که بهتر است بجای مصرف مقدار زیادی انرژی از پلیمرهایی با درجه ذوب پایین تر یا با شاخص سیالیت بالاتر یا با هر دو خصوصیت ذکر شده استفاده نمود. معهدا باید خواص مورد لزوم جهت کاربری لیف در عمل نیز حفظ گردد که این موضوع باعث بوجود آمدن یکسری محدودیتها در انتخاب پلیمر میشوند. [10] Shambaugh روی مصرف انرژی در meltblowing پلی پروپیلن تحقیقی را انجام داده است که میتوان آنرا بصورت زیل خلاصه نمود:

- ۱- نازک و ظریف شدن لیف عمدتاً به انرژی جنبشی گاز بستگی دارد.
- ۲- هنگامیکه الیافی با دنیر نامناسب تولید شوند در صورتیکه مقدار کافی گاز نیز مصرف شده باشد، اغلب احتمال می‌رود که انرژی جنبشی گاز بدون بهره‌وری سودمند از آن بهدر رفته باشد.
- ۳- در عمل الیاف تولید شده توزیع قطری گسترده‌ای دارند. بنابراین باید این توزیع بگونه‌ای کاملاً ایده‌ال کامل کنترل شود تا یکنواخت باشد.

۴- هنگامیکه پلیمری نازک می‌شود تا تبدیل به لیف گردد انرژی جنبشی $E(\text{erg})$ را میتوان بصورت زیر بیان نمود:

$$E = 1/2 MV^2 = 8M^3 / (\rho^2 \pi^2 d^4) \quad (4-1)$$

در این معادله M سرعت جریان پلیمر (g/sec)، V سرعت لیف (cm/sec)، ρ ، دانسیته پلیمر (g/cm^3) و d قطر لیف (cm) می‌باشد. Shambaugh انرژی جنبشی لیف را برای توزیع های مختلف الیاف با میانگین قطری برابر ($10\ \mu\text{m}$) با استفاده از معادله (۴-۱) محاسبه نمود که نتایج آن بصورت زیر است:

$$E_1:E_2:E_3=1:3.8:27.7 \quad (4-2)$$

در این معادله E_1 انرژی جنبشی جهت تولید الیاف با توزیع میانگین قطر $10\ \mu\text{m}$ ، E_2 انرژی جنبشی جهت تولید الیاف مخلوط $50:50$ (از نظر تعداد الیاف) با دو توزیع با میانگینهای قطری $3\ \mu\text{m}$ و $17\ \mu\text{m}$ و E_3 انرژی جنبشی جهت تولید الیاف با دو توزیع $50:50$ (از نظر تعداد الیاف) و با میانگین های قطری $1\ \mu\text{m}$ و $19\ \mu\text{m}$ است. از آنجائیکه توزیع قطری الیاف در عمل بدین صورت نخواهد بود بنابراین فقط از داده های فوق الذکر می توان جهت مقایسه استفاده نمود. با مقایسه این داده ها مشخص می‌شود که جهت تولید الیاف با یک توزیع قطری به انرژی بمراتب کمتری نسبت به تولید الیاف با دو توزیع قطری نیاز است. از نقطه نظر انرژی تولید الیافی ظریفتر از آنچه که در عمل مورد نیاز است نکته ای منفی بحساب می آید که موضوع را بسادگی بدون نیاز به محاسبات از طریق فرمولهای پیچیده می توان با معادله ساده زیر بیان داشت.

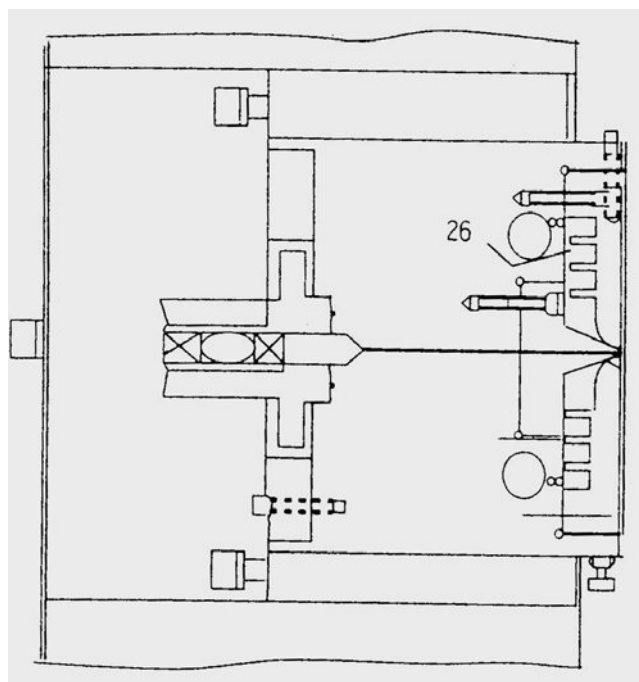
$$E=8m^3/(\rho^2\pi^2d^4) \quad (4-3)$$

انرژی E هنگامیکه d در مقدار ثابت M کاهش یابد، افزایش میابد. جهت دستیابی الیاف با یک توزیع قطری لازم است که نرخ جریان گاز و پلیمر را در هر روزنه هماهنگ ساخت [۱۱]. کارخانه Nippon Kodoshi روزنه را بگونه ای خاص جهت ارتقاء یکنواختی بیرون آمدن گاز و پلیمر طراحی نموده است. روزنه طوری طراحی شده که گاز حرارت داده شده از درون مارپیچی دمیده می‌شود. شکل (۴-۸) روزنه meltblowing اصلاح شده را نمایش می‌دهد که تعداد ۲۶ مارپیچ در این شکل می‌باشد.

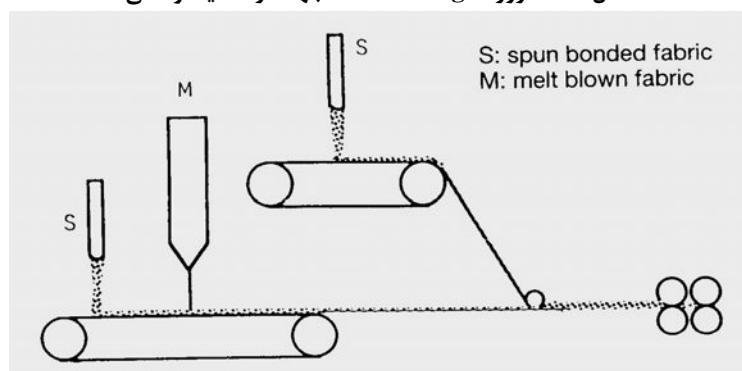
همانگونه که در بخش فرآیندهای spunbonded ذکر شد یکی از راهکارها جهت ارتقا خصوصیات بی بافت meltblowing لامینت نمودن آن با دیگر مواد یا بی بافتهای تولید شده با روشهای دیگر می‌باشد. نمونه ای از آن میتواند لامینت نمودن پارچه های meltblown با پارچه ها spunbonded باشد. شکل (۴-۹) نشان دهنده فرآیند S-M-S می‌باشد [۱۲]. در این روش لایه meltblown بین دو لایه spunbonded ساندویچ می‌شود و در نهایت بی بافتی سه لایه تشکیل می‌گردد. از دیگر روزنه های meltblown که حق امتیاز آنها فاش شده است می توان به روزنه هایی اشاره نمود که توانایی ریسیدن spunbonded و meltblown را بصورت همزمان دارند [۱۳] و یا روزنه هایی که توانایی ریسیدن الیاف دو جزئی کنار هم^۱ یا پوسته و مغزی^۲ را دارند [۱۴].

- Side by side

- Sheath- core



شکل ۸-۴- روزنه meltblowing جهت ارتقاء یکنواختی



شکل ۹-۴- فرآیند S-M-S

۴-۴- نتایج

روش های عمده ذوب ریسی برای بی بافتها در این بخش بحث شد. میتوان گفت که ژاپن راهبر فن آوری ذوب ریسی در دنیاست و محققین و تولید کنندگان با ارائه فن آوریهای نوین در ترکیب پلیمرها و فرآیندهای تولید همواره سعی در خلق محصولاتی با خصوصیات بهتر دارند.

فرآیندهای ژل ریزی

۵-۱- مقدمه

هر چند اصطلاح ژل ریزی اخیراً بخاطر توسعه موفقیت آمیز لیف پلی اتیلن با استحکام بسیار زیاد که از این طریق تولید میشوند، شناخته شده است [۱-۳] ولی تاکنون این فرآیند بوضوح تشریح نشده است. در این فصل ژل ریزی بعنوان روشی جدید جهت تولید لیاف با استحکام بالا از ماده ای واسط که حالت ژل گونه دارد شرح داده خواهد شد. البته پیش از این مطالب بسیاری در مورد معرفی UHSPE و فرآیندهای مربوط به آن منتشر شده است [۴-۱]. در این فصل بررسی تکنیکهای ریسندگی فرآیند ژل ریزی جهت تولید UHSPE مورد توجه می باشد و علاوه بر آن کاربرد فرآیند ژل ریزی جهت تولید پلی وینیل الکل (PVA) و پلی اکریلو نیتریل (PAN) نیز به صورت جمع بندی و خلاصه آورده شده است.

۵-۲- تکنیک ریسندگی لیف پلی اتیلن با استحکام بی نهایت زیاد

فرآیند ریسندگی UHSPE بصورت کلی در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. کلیه نکات تکنیکی (شکل ۵-۱b) به منظور کاستن نواقص ماکرو و میکروسکوپی جهت تولید لیفی ایده ال در این شکل ارائه شده است. این لیف ایده ال دارای ساختاری تقریباً صد درصد کریستالی بوده و از زنجیرهای مولکولی تقریباً کاملاً آرایش یافته نسبت به محور لیف تشکیل شده است.

ساختار ایده ال و مفاهیم کلی ریسندگی ژل نیز در شکل (۵-۲b) نشان داده شده است. در این فصل، نیازهای تکنیکی فرآیند ریسندگی ژل جهت کاهش نواقص مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۲-۱- مواد اولیه و فرآیند تهیه محلول

۵-۲-۱-۱- پلی اتیلن

مقادیر استحکام و مدولهای حاصله تئوری و واقعی چندین نوع مختلف از پلیمرهای انعطاف پذیر در جدول (۵-۱) جهت مقایسه آورده شده اند [۴-۱۴]. دلیل اینکه چرا ریسندگی ژل برای اولین بار جهت تولید لیاف از پلیمر PET موفق بوده را شاید بتوان به خواصی از آن پلیمر نسبت داد که در زیر آمده است:

۱- در بین پلیمرهای انعطاف پذیر بالاترین مقدار تئوریک مدول و استحکام را دارا می باشد.

۲- دارای یک ساختار زنجیری زیگزاگ^۲ صفحه ای ساده بدون هیچگونه گروههای جانبی حجیم است.

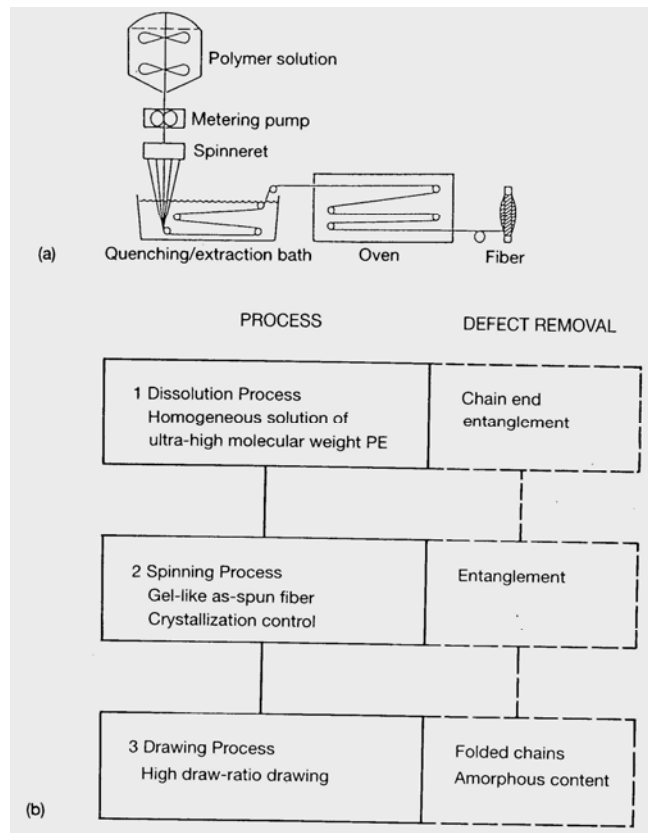
۳- تبلوری بالا دارد.

۴- پلیمریزاسیون مابین زنجیرهای مجاور در حد زیاد وجود ندارد.

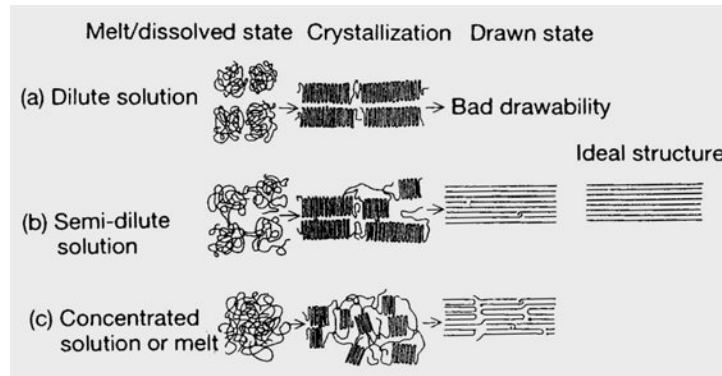
- Ultra- high strength

- Zig-zag

۵- قابلیت دستیابی به وزن مولکولی بینهایت بالای پلیمریزاسیون، مانند باند هیدروژنی وجود دارد. در ادامه با توضیح مفصل این موارد مشاهده می‌شود که موارد ۳ و ۵ مشارکت در کاهش معایب دارند و موارد ۲ و ۴ از نقطه نظر خصوصیات کشش پذیری حائز اهمیت می‌باشند.



شکل ۱-۵- شکلی کلی از (a) فرآیند ریسندگی ژل، (b) نکات تکنیکی فرآیند ریسندگی ژل [۱]



شکل ۲-۵- تشریح کلی از مفهوم کنترل در هم روی زنجیره های مولکولی، a- محلول رقیق، b- محلول نیمه رقیق، c- محلول غلیظ یا مذاب [۱۵]

جدول ۱-۵- خواص استحکامی تئوری و محاسبه شده الیاف

Polymer		Theoretical strength (1) (chain bond) ²		Theoretical strength (2) (thermo-dynamics) ⁵		Actual strength		Theoretical Crystalline Modulus ⁴		Fiber modulus	
		g/d	GPa	g/d	GPa	Commercialized value	Achieved strength ⁶	g/d	GPa	Commercialized value	Achieved modulus ⁶
PE	flexible	372	32	80	6.9	9.0	72 ⁷	2775	240	100	860
UHMwPE	flexible					30-40				1000-2000	2697
Polyamide-6	flexible	316	32	66	6.7	9.5	9.8	1406	142	50	187
PPTA	rigid	235	30	-	-	18-28		1500	183	400-1100	
PET	flexible	232	28	41	5.0	9.5	15.5 ⁸	1023	125	160	285 ⁸
WAP	rigid	-	-	-	-	23				560	
POM	flexible	264	33	-	-	11.7		424	53	310	~400
PVA	flexible	236	27	51	5.9	11-17 ⁹	44 ¹⁰	2251	255	230-387 ⁹	1040 ¹⁰
PP	flexible	218	18	32	2.7	9.0	18	423	34	120	489
PAN	flexible	196	20	-	-	5-14	23 ¹¹	833	86	85	268 ¹¹
PVC	flexible	169	21	28	3.6	4.0		-	-	45	

۲-۱-۲-۵- تأثیر درجه پلیمریزاسیون

درجه پلیمریزاسیون مهمترین خاصیت می باشد. در ریسندگی ژل، پلی اتیلن هایی با مولکولی بینهایت بالا (UHMWPE) با میانگین وزن مولکولی بالای ۶۰۰۰۰۰ g/mol مورد استفاده قرار می گیرند. احتمال می رود دلیل انتخاب اینچنین وزن مولکولی بالائی بشرح زیر باشد.

حتی اگر فرض شود که کلیه زنجیره های مولکولی آرایش یافتگی کامل دارند باز هم انتهای زنجیره های مولکولی بعنوان عیوبی در ساختار باقی مانده که میتوانند بعنوان نقطه ای آغازی در شکل گیری ریز شکافها^۱ باشند، که باعث افت خصوصیات استحکامی می گردند [۱۲-۱۳]. از نقطه نظری دیگر، وزن مولکولی بی نهایت زیاد بطور مستقیم نقشی در استحکام ندارد. اما وزن مولکولی بالا از ملزومات کشش دادن می باشد، و به منتقل شدن نیروی کششی به واسطه نقاط اتصال ما بین زنجیره ها کمک می کند [۵]. وزن مولکولی الیاف PPTA زیر ۱۰۰۰۰ s می باشد که بسیار کمتر از پلی اتیلن

- Micro- crack

می‌باشد. ولی با این حال دارای مدول و استحکام کافی بالایی هستند که می‌تواند مربوط به درهم روی زنجیرها باشد و تایید آن سخت بودن پلیمر می‌باشد. در مورد الیاف پارا-آرامید آرایش زنجیرها عمدتاً ناشی از خواص کریستال مایع می‌باشد که بواسطه زنجیرهای مولکولی سخت این نوع پلیمر است، بنابراین نیازی به وزن مولکولی بالای PE نمی‌باشد. اثر وزن مولکولی بر خواص نهایی در قسمت بعد همراه با اثر غلظت بررسی خواهد شد.

۳-۱-۲-۵- اثر غلظت و کنترل درهم رفتگی

گر چه اخیراً ذوب ریزی مستقیم UHMwPE تحت فرآیندهای خاص گزارش شده است [۱۴]، لیکن عموماً ذوب ریزی امکان پذیر نیست. اینگونه پلیمرها دارای شمار بسیار زیادی در هم رفتگی زنجیری در مولکول هستند، که بخاطر زنجیرهای بسیار بلند مولکولی آنها می‌باشد. همانگونه که بطور کلی در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. این زنجیرهای بلند مولکولی در محدوده زمانی عمل کشش نمی‌توانند از میان یکدیگر عبور کنند. به همین علت در حالت مذاب و یا در هنگام کشش ویسکوزیته بسیار بالائی دارند که فرآیند پذیری UHMwPE را محدود می‌نماید. لازمه تولید الیاف با استحکام بالا کنترل در هم روی مورد بحث می‌باشد. در فرآیند ژل ریزی این موضوع با بکار گیری دو اصل کنترل می‌شود: اول رقیق نمودن پلیمر در محلولی مناسب و دوم کنترل مرفولوژی از طریق فرآیند تبلور. از حلال های مختلفی نظیر تترا لین^۱، دکالین^۲، نفتالین^۳، روغن معدنی^۴، روغن پارافین^۵ و واکس پارافین^۶ جهت ژل ریزی UHMwPE استفاده شده است. از نقطه نظر کاهش عیوب بدلیل آنکه درهم رفتگی نقص و عیب به شمار می‌آید، تنها وجود یک درهم رفتگی در هر زنجیر جهت انتقال کششی بین زنجیرها کافی خواهد بود.

این حالت در غلظت بحرانی (C*) قابل حصول خواهد بود. که غلظت بحرانی غلظتی است که در آن زنجیرهای اتفاقی پیچ خورده شروع به تداخل با یکدیگر می‌نمایند. C* را میتوان بعنوان تابعی از میانگین وزن مولکولی (M) بیان نمود.

$$C^* \propto M/M \quad (۵-۱)$$

که Me وزن مولکولی بین نقاط درهم رفته است.

همانگونه که در این معادله بیان شده، غلظت ایده آل (بحرانی) C* با افزایش M کاهش می‌یابد. در غلظتهای کم نظیر C*، امکان رسیدن به کشش مولکولی ایده آل UHMwPE تا ماکزیمم نسبت کشش تئوریک بوجود خواهد آمد.

-
- Tetralin
 - Decalin
 - Naphthalene
 - Mineral oil
 - Parafin oil
 - Parafin wax

اگر کشش دادن یک زنجیر مولولی اتفاقی پیچ خورده مورد فرض قرار گیرد نسبت کشش ماکزیمم را میتوان از معادله زیر بدست می آید [۱۶]:

$$\lambda_{\max} = cM^{0.5} \quad (5-2)$$

که c ثابت ماده است.

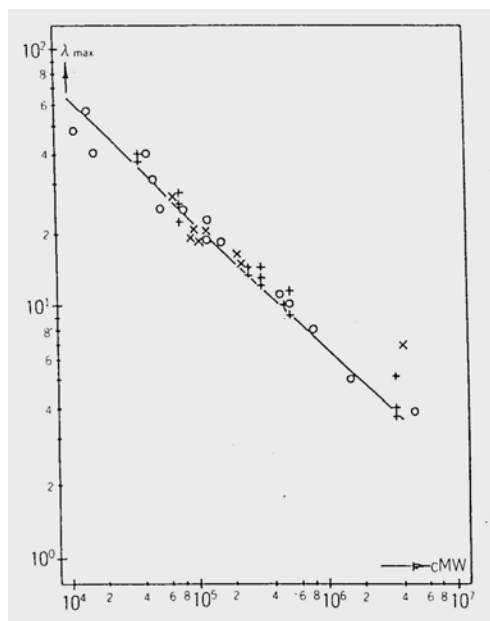
همانگونه که در معادله بیان شد، نسبت کشش ماکزیمم با وزن مولکولی (M) افزایش می یابد. اگر کشش لیف ژل گونه UHMWPE UHM_wPE تحت یک چنین شرایط غلظتی ایده آلی صورت گیرد، بحث فوق معقول به نظر می رسد. ولیکن از نقطه نظر اقتصادی نیاز است که ریسندگی در غلظتی بسیار بالاتر ($C > C^*$) انجام پذیرد. یعنی در حالتی که در اصطلاح رئولوژی محلولها حالتی نیمه رقیق یا غلیظ نامیده میشوند. اخیراً Bastiaansen نسبت کشش ماکزیمم الیاف ژل گونه را برحسب تابعی از غلظت C و وزن مولکولی M بیان داشته است (شکل ۳-۵) و رابطه آنرا بصورت زیر آورده است [۱۷]:

$$\lambda_{\max} \propto cM^{-0.5} C^{-0.5} \quad (5-3)$$

بر خلاف معادله (۵-۲) در اینجا نسبت کشش ماکزیمم با افزایش وزن مولکولی و غلظت کاهش می یابد که این موضوع میتواند به واسطه افزایش تعداد درهم رفتگی ها باشد. بنابراین هر چقدر که غلظت پایین تر باشد ($C \sim C^*$) قابلیت کشش دادن بالاتر خواهد بود. مقادیر تئوری و تجربی C^* برای پلی اتیلن با استحکام بینهایت زیاد که دارای وزن مولکولی بیش از 1000000 g/mol است، در حدود $0.5-0.7 \text{ wt\%}$ گزارش شده است [۱۸].

غلظت و وزن مولکولی بهینه جهت فرآیندهای صنعتی کنونی در شکل (۵-۴) آورده شده است.

در بحث فوق الذکر فرض بر آن است که نقاط درگیری در محلولهای غلیظ و یا نیمه رقیق میتوانند بعنوان پیوندهای عرضی دائمی حتی پس از جامد شدن عمل نمایند.



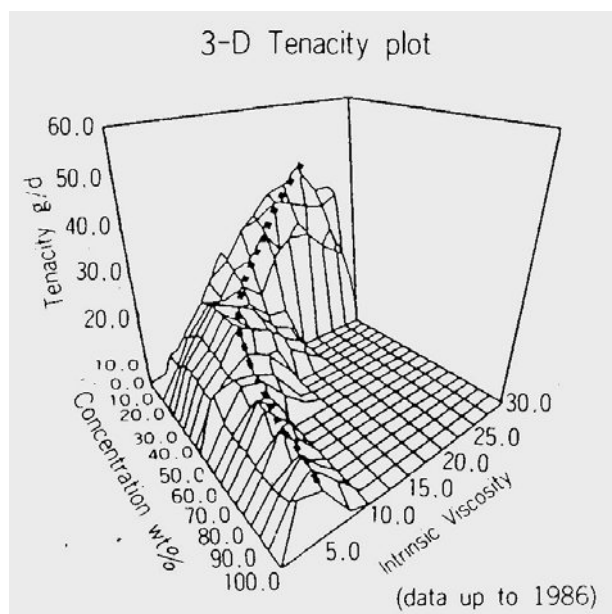
شکل ۳-۵- رابطه بین حداکثر نسبت کشش، غلظت و وزن مولکولی [۱۷]

در پلی اتیلن های معمول در ضمن فرآیند کشش به علت وجود تعداد بیشتر گروههای انتهایی زنجیره ها، زنجیرها از همدیگر جدا میشوند، این موضوع باعث می شود تا رسیدن به آرایش یافتگی در مورد پلیمرهایی با وزن مولکولی زیاد دشوار گردد. علت این موضوع آن است که در اثر از بین رفتن در هم روی ها زنجیرها از کشش آزاد شده و تمایل دارند که به حالت پایدارتر یعنی پیچ خورده اتفاقی تبدیل شوند، بهمین علت است که جهت کشش دادن زیاد UHSPE نیاز به وزن مولکولی بسیار زیاد می باشد.

حتی در مورد UHMwPE نیز احتمال از بین رفتن درگیری در ضمن فرآیند ریسندگی به علت تبلور می رود زیرا تبلور شمار در هم روی ها را کاهش می دهد.

این مکانیزم اجازه تولید UHSPE را، حتی در غلظت بالاتر ($C > C^*$) می دهد، همانگونه که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. این مطلب در بخش (۲-۲-۵) مجدداً بحث خواهد شد.

علاوه بر این، گرچه معادله (۳-۵) تحت شرایط کشش ایده آل بدست آمده است بعنوان مثال، سرعت کشش بینهایت کم، در فرآیندهای صنعتی کنونی که به سرعتهای کشش بسیار بالاتری نیاز است عامل تعیین کننده جهت دستیابی به نسبت کشش ماکزیمم، کاملاً متفاوت خواهد بود. در فرآیندهای ریسندگی فوق سریع خصوصیات ویسکوالاستیک غالب تر خواهد بود، عبارتی زمان استراحت بینهایت طولانی UHMwPE بر عمل کشیدن تأثیر می گذارد. این نکته مجدداً در بخش (۳-۲-۵) بحث خواهد شد.



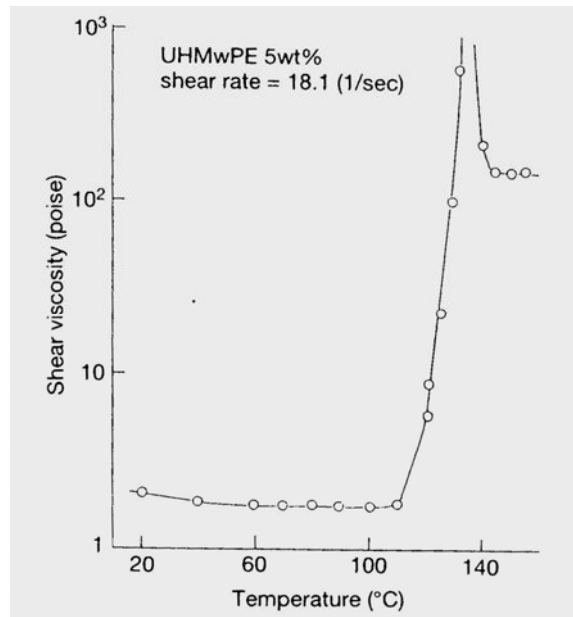
شکل ۴-۵- رابطه بین قوام بدست آمده، غلظت و ویسکوزیته ذاتی [۱۹]

۴-۱-۲-۵- فرآیند انحلال

یک محلول پلی اتیلن با غلظت نسبتاً بالا^۱ میبایست تا حد امکان یکنواخت تهیه شود، برای اینکه هر نایکنواختی^۲ بعنوان یک عیب در ساختار نهایی لیف باقی مانده و خواص مکانیکی الیاف را کاهش می دهد. در شکل (۵-۵) تغییر ویسکوزیته برشی بدست آمده از محلول پنج درصد وزنی (۵wt%) دکالین از پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا در حدود ۲۰۰۰۰۰۰ g/mol، بعنوان تابعی از درجه حرارت نشان داده شده است. نزدیک نقطه ذوب، ویسکوزیته بطور قابل توجهی بالا می رود و اثر ویسن برگ^۳ ملاحظه میشود، که هر دو بر نایکنواختی غلظت محلول اثر خواهد گذاشت. علاوه بر آن هنگامیکه پلیمر حل شده تشکیل محلول ژلی مانند دهد، ضریب انتقال حرارت محلول بطور قابل توجهی کاهش می یابد، و همچنین سبب نایکنواختی توزیع درجه حرارت بطور موضعی در داخل محلول می گردد. برای پرهیز از این مشکل، روش های انحلال گوناگونی گزارش شده است، که میتوان به استفاده از

-
- High-concentration
 - Inhomogeneity
 - Weissenberg effect

اکسترودری مارپیچی^۱، ریختن حلال داغ بر پلیمر کمی متورم شده و تشکیل دادن گویچه های ژلی^۲ اشاره نمود. [۲۱،۲۰]. جزئیات را میتوان در پنت ها پیدا نمود.



شکل ۵-۵- تغییرات ویسکوزیته مخلوط UHMwPE/Decalin تحت شرایط افزایش مداوم درجه حرارت

۵-۲-۲- فرآیند ریسندگی

۵-۲-۲-۱- جریان پلیمر

از نقطه نظر فرآیند ریسندگی، دانستن خواص رئولوژیکی محلول UHMwPE در درجه اول اهمیت قرار دارد. و لیکن بعلت دشواری مشخصه سازی پلیمر UHMwPE، مطالب بسیاری در مورد خواص رئولوژیکی محلول UHMwPE منتشر نشده است. ثوابت رئولوژیکی اصلی محلول UHMwPE که توسط ویسکومتر موئین^۳ بدست آمده، با مقادیر حاصله از ذوب ریزی معمول PE و PET تحت شرایط ریسندگی معمول برای هر کدام مقایسه شده و در جدول (۵-۲) آورده شده است.

-
- Screw-type extruder
 - Gel-spherulites
 - Capillary type viscometer

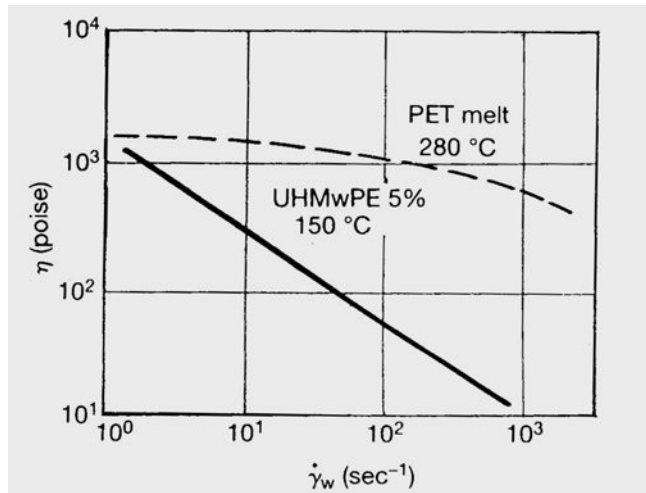
جدول ۲-۵- ثوابت رئولوژیکی برای محلول و مذاب ریسندگی

	UHMwPE5% (Solution) $M_w \sim 2000 \text{ kg/mol}$ $T_{\text{spin}} = 150^\circ\text{C}$	Conventional PE (Melt) $M_w \sim 180 \text{ kg/mol}$ $T_{\text{spin}} = 180^\circ\text{C}$	PET (Melt) $M_w \sim 80 \text{ kg/mol}$ $T_{\text{spin}} = 280^\circ\text{C}$
Shear rate (1/sec)	1000	~ 630	1000
Shear modulus (dyne/cm ²)	~ 9×10^3	~ 5×10^5	~ 5×10^5
Relaxation time (sec)	~ 17×10^{-3}	~ 10×10^{-3}	~ 2×10^{-3}
Shear viscosity (poise)	~ 150	~ 5000	~ 1000

در این مقایسه تقریبی خصوصیت الاستیکی لاستیکی را میتوان به عنوان مشخصه ویژه محلول UHMwPE در نظر گرفت. محلول UHMwPE مدول و ویسکوزیته برشی پایین تری را نسبت به آنچه که از وزن آن انتظار می رود نشان می دهد. و زمان رهایش که معمولاً نسبت مدول برش (G) و ویسکوزیته برشی (η) می باشد برای این محلول بسیار بالاتر است. خصوصیت زمان رهایش بالاتر باعث پدیده ای به نام تأثیر حافظه محلول UHMwPE می شود. این حافظه به معنی بقای تنش اعمال شد در مراحل قبل فرآیند در قسمت ورودی روزنه رشته ساز می باشد که روی واکنش های رئولوژیکی متعاقب در فرآیند تأثیر گذار است. بنابراین می باید در طراحی مسیر حرکتی سیال پلیمر به ویژه در رشته ساز دقت شود.

در شکل (۵-۶) وابستگی میزان تنش روی ویسکوزیته برشی محلول UHMwPE با فرآیند ذوب ریزی PET مقایسه شده است [۲۲].

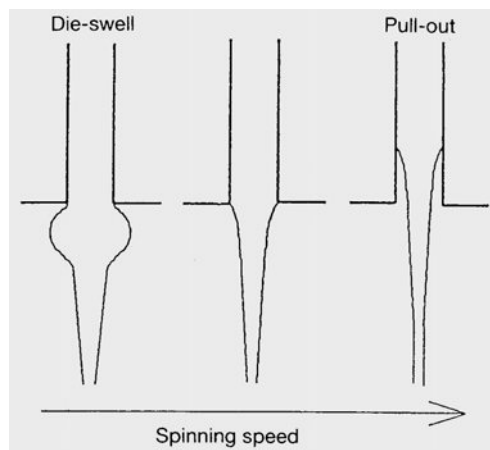
همانگونه که در شکل نشان داده شده است، در محدوده وسیعی از میزان تنش اعمالی این محلول رفتار سیال غیر نیوتنی منحصر بفردی را از خود نشان می دهد. خصوصیت این محلول سبب توزیع نایکناخت ویسکوزیته در مناطق مختلف سیال می گردد، که مجدداً طراحی دقیق خط ریسندگی^۱، بخصوص رشته ساز لازم است. بعنوان مثالی اغراق آمیز تغییر ابعادی محلول ریسیده شده UHMwPE بعنوان تابعی از سرعت ریسندگی بطور کلی در شکل (۵-۷) نشان داده شده است.



شکل ۶-۵- بستگی سرعت برشی نسبت به ویسکوزیته برشی محلول UHMwPE در مقایسه با مذاب PET

در سرعت کم ریسندگی، محلول ریسیده شده مقدار زیادی تورم روزنه ای^۱ از خود نشان میدهد، که مربوط به خصوصیت الاستیکی بالای محلول UHMwPE است. با افزایش سرعت ریسندگی، اندازه تورم روزنه ای بخاطر وجود کشش زیر رشته ساز کوچکتر میگردد و در سرعتهای ریسندگی خیلی بالاتر پدیده pull-out اتفاق می افتد که منجر به شکستگی فیلامنت می شود. در این حالت کاملاً تورم روزنه از بین رفته و حتی می تواند باعث جدا شدن پلیمر از مجرای موئین رشته ساز شود. حالت خاص شاید بتواند استحکام کششی بالاتر محلول و خصوصیات الاستیکی بالای آن را نیز شرح دهد.

از بحث فوق میتوان نتیجه گرفت خصوصیت ویژه محلول UHMwPE غیر نیوتنی بودن و خصوصیت الاستیکی بالای آن می باشد. یکی از نکات مهم تکنیکی ریسندگی ژل UHMwPE، مدیریت سیالی از چنین محلولی است که به میزان زیادی الاستیک است.



شکل ۷-۵- تشریح شماتیکی تأثیر سرعت ریسندگی بر محلول ریسیده شده

۲-۲-۲-۵- کریستالیزاسیون

در فرآیند ژل ریزی محلول ریسیده شده توسط خنک کننده به کمک مایع یا گاز سرد شده و در نتیجه آن تبلور اتفاق می افتد. ضمن فرآیند تبلور، مقداری از در هم روی ها از بین میروند، بعلاوه آنکه در ساختار کریستالی جایی ندارند و زنجیره های مولکولی قبل از تبلور از حالت درگیری خارج میشوند. از این رو، میتوان از درگیری خارج شدن زنجیرها را در نتیجه تبلور پیش بینی نمود که یک نکته تکنیکی دیگر جهت دستیابی به موفقیت در ژل ریزی حتی در غلظت بالا می باشد. اخیراً Pennings و همکارانش ریسندگی بسیار سریع محلول UHMwPE، با استحکام کششی قابل توجه g/d ۲۶ در سرعت ریسندگی 1000 m/min و بدون کشش بعدی را گزارش نموده اند. این موفقیت دلالت بر آن دارد که امکان از بین رفتن موثر مقدار بیشتر درگیریهایی فرآیند وجود دارد، یعنی از بین رفتن درگیری های ناشی از ازدیاد طول دادن [24]. تحقیق در مورد مکانیزم توسعه ساختار در طول مدت کریستالیزاسیون محلول UHMwPE می تواند در این زمینه مفید باشد. در طول فرآیند کریستالیزاسیون محلول جامد شده و به ساختاری ژل مانند که سخت تر است تبدیل می شود. در این حالت کریستال های دیسپرس شده بواسطه شمار کمی از درگیریهایی باقیمانده بعنوان نقاط شبه پیوند عرضی بهم متصل می باشند چنین ساختاری جهت فرآیند کشش ایده ال می باشد که در شکل (۲-۵) شرح داده شده است.

۳-۲-۵- فرآیند کشش

همانگونه که در قسمتهای قبل اشاره شد، عمل کشش یافتن فیلامنت ژل مانند تازه رسیده شده تحت تأثیر شرایط حل شدن (غلظت، وزن مولکولی و غیره) و همچنین ساختار مرفولوژیکی لیف ژل گونه است. علاوه بر آن تحت تأثیر شرایطی است که با مفهوم درگیر شدن زنجیرها یکی میشوند همانگونه که در معادله (۳-۵) آورده شده است.

اگر فرآیند کشش حقیقی بطور ایده ال با سرعت کشش کم انجام پذیرد، تغییر شکل هموزن و موثر ریز ساختار منجر به کشش ایده آل میشود، همانگونه که در معادله (۵-۳) آورده شده است. از سوی دیگر، شرط مهم دیگر برای فرآیند کشش عملی، سرعت کشش بالاتر با حداقل میزان گسستگی نخ است. برای تأمین این شرط رابطه زیر برای تغییر شکل مولکولی باید برقرار باشد [۱].

$$\lambda_{\max} \alpha v \sim 1 / \tau \quad (5-4)$$

که v سرعت شکل گیری و τ مشخصه زمان رهائش است.

اگر سرعت شکل گیری بالاتر ($v > 1 / \tau$) بکار رود زنجیر مولکولی نمی تواند از هیچگونه تنش موضعی افزوده رهائش یابد و در نتیجه آن گسستگی زنجیر مولکولی بوجود می آید. از سوی دیگر، در ($v > 1 / \tau$) زنجیر مولکولی تا حدی زمان برای رهائش دارد که از بین رفتن درهم رفتگی زنجیرها ممکن می شود. مقدار τ تحت تأثیر ساختار مولکولی لیف تازه ریسیده شده و بخصوص تحت تأثیر در هم روی زنجیری قرار دارد. بنابراین مقدار τ وابستگی شدیدی هم به وزن مولکولی و هم به غلظت آن دارد. با استفاده از تئوری های مولکولی که در مورد وابستگی زمان رهائش به وزن مولکولی و غلظت میباشند، τ را میتوان بصورت کلی با رابطه زیر بیان نمود:

$$\tau \propto C^\alpha M^\beta \quad (5-5)$$

و از معادله (۵-۴) می توان نتیجه گرفت که :

$$\lambda_{\max} \propto C^{-\alpha} M^{-\beta} \quad (5-6)$$

مقادیر این ضرایب از مدل [18] Greassley، $\alpha = 1/5$ و $\beta = 3/5$ و از مدل [25] Dio- Edwards model، $\alpha = 1/0$ و $\beta = 3/0$ گزارش شده است. این مقادیر بسیار بزرگتر از مقادیر مشابه در معادله (۵-۳) می باشند. و ما در عمل نیز نتایج مشابهی را با این گونه قوانین توانی تئوری در عمل کشش دادن در سرعت های بالا بدست آورده ایم.

نظر به اینکه حلال در طول مدت فرآیندهای ریسندگی و کشش تماماً و یا جزئی از بین میرود نمی توان هنوز مسائل ایده آل بالا را بطور کامل قبول نمود. اما حداقل می توان نتیجه گرفت که دانسیته درهم رفتگی و یا ساختار درهم رفتگی (که اساساً بواسطه ساخت محلول و فرآیند ریسندگی تعیین می شود همانگونه که در بخشهای قبل شرح داده شده) بر ویژگی کشش پذیری UHMwPE حکم فرماست. فاکتور مهم دیگر که بر ویژگی کشش تأثیر تعیین کننده دارد آسانی بیرون کشیدن زنجیرهای مولکولی از ساختار کریستالی است. این مورد بخصوص در مورد PE بسیار ساده است. زیرا هیچگونه بر هم کنش های قوی بین زنجیری نظیر پیوندهای هیدروژنی وجود ندارد. از سوی دیگر این موضوع یعنی این سادگی در بیرون کشیدن زنجیرها باعث افت مقاومت خمشی الیاف UHSPE می گردد.

۴-۲-۵- مشخصات لیف پلی اتیلن با استحکام بسیار زیاد و توسعه آینده

۴-۲-۵- مشخصات و کاربرد Dyneema SK60TM

قابلیت کاربردی Dyneema SK60 بعنوان نماینده لیف UHSPE در جدول (۵-۳) خلاصه شده است.

جدول ۳-۵ - مقایسه Dyneema SK60 با دیگر الیاف High Performance

		Dyneema SK60	Aramid fiber	Carbon fiber		E-glass fiber	Polyester, polyamide HT filament	Steel fiber
				HT type.	HM type			
Density	(g/cm ³)	0.98	1.4-1.5	1.7-1.9	1.7-1.9	2.54	1.1-1.4	8
Tensile strength	(g/d) (kg/mm ²)	30-45 260-400	22 290	17-22 280-350	12-15 200-250	9.6 220	9-10 100-110	4 280
Modulus	(g/d) (kg/mm ²)	1000-1400 8800-13 000	1500-1000 6000-13 000	1200-1500 20 000-25 000	2000-2500 35 000-40 000	300 7000	50-100 500-1200	260 19 000
Elongation to break	(%)	2-5	2-4	1.0-1.5	0.5	4.0	13-19	2
Thermal behavior			Melt 150°C 420°C	Degraded	2500°C	2500°C 730°C	Melt 240°-260°C	Melt

بسیاری از مصارف در حال گسترش میباشند، بویژه طنابهایی با قابلیت های خاص، پارچه ها با قابلیت های خاص و الیاف تقویت کننده جهت مصرف در کامپوزیتها. در اینگونه مصارف از خواص عالی الیاف UHSPE بهره میبرند که از آنها می توان به وزن کم، استحکام و مدول فوق العاده زیاد، خواص ضربه ای خوب و پایداری شیمیایی و محیطی اشاره نمود.

۲-۴-۵- توسعه آتی

رقابت بین الیاف با قابلیت های خاص باعث پیشرفت های بیشتر در قابلیت های الیاف UHSPE و همچنین سودمندی آنها خواهد شد. این پیشرفت ها بخصوص در زمینه ارتقا خصوصیات استحکامی و مدول آنها به سمت مقادیر تئوری خواهد بود. بعنوان مثالی در عمل توانسته اند به استحکام ۷۲ g/d که نزدیک به مقدار تئوری می باشد برسند. [۷،۵]. پیشرفت ها بر این موضوع تمرکز دارند که چگونه این کارهای آزمایشگاهی را در فرآیندهای واقعی صنعتی با سرعت های کششی بالاتر در ضمن پایین نگه داشتن میزان گسستگی نخ اجرا نمایند.

در کنار خواص کششی نواقصی همچون پایداری حرارتی کم، چسبندگی کم و پایداری خزشی کم نیز ارتقا خواهند یافت [۲۷،۲۶]. کارهایی نیز در زمینه سودمندی بیشتر آنها انجام میگیرد. برای مثال فرآیند ایده آل بدون گسستگی نخ و تکنیکهای جدید نظیر ریسندگی با سرعت بالا توسط Pennings و همکارانش گزارش شده است [۲۴].

۳-۵- ژل ریزی دیگر پلیمرهای انعطاف پذیر

موفقیت فرآیند ریسندگی ژل برای UHSPE کاربرد این تکنولوژی را برای دیگر پلیمرهای انعطاف پذیر تسریع بخشیده است. در قسمت های آتی کاربرد روش ژل ریزی برای دو نماینده از پلی مرهای انعطاف پذیر، پلی وینیل الکل (PVA) و پلی اکریلونیتریل (PAN) شرح داده شده است.

۱-۳-۵- پلی وینیل الکل (PVA)

پلیمر PVA مهمترین منتخب بعد از PET برای کاربرد در روش ژل ریسی می‌باشد. همانگونه که در جدول (۱-۵) نشان داده شده است، استحکام تئوریکی PVA ۲۳۶ g/d و مدول کریستالی آن ۲۲۵۱ g/d می‌باشد. که این مقادیر به مقادیر PE نزدیک است، بنابراین میتوان دستیابی به استحکام و مدول بالاتر را انتظار داشت. در واقع اخیراً استحکامی به بزرگی الیاف آرامید بدست آمده است. بطور کلی میتوان گفت که مفهوم اساسی ژل ریسی PVA مشابه PE می‌باشد. بیشتر کوشش‌ها در مورد ژل ریسی PVA در زمینه کنترل پیوندهای هیدروژنی بین زنجیرهای مولکولی بوده است [۲۸،۹،۴].

کوششهای بسیاری برای تولید الیاف PVA با مقاومت بالا در پنتتها و گزارش‌ها وجود دارد بعنوان مثال، در پنتتها [۲۹]، حلال‌هایی مانند گلیسرول^۱، اتیلن گلیکول^۲ و آب برای PVA با درجه پلیمریزاسیون بالای ۲۰۰۰ استفاده شده‌اند. با سرد نمودن الیاف ژلی حاصل میشوند که حلال آنها را با الکل استخراج می‌نمایند و بیشتر از بیست برابر آنها را تحت کشش قرار میدهند.

استحکام‌های ۲۲ g/d (توسط افزودن اسید بوریک [۳۰])، ۲۴ g/d (توسط استفاده از حلال DMSO/H₂O = ۸۰/۲۰ و نسبت کشش ۴۸)، [۳۱] و مجدداً ۲۴ g/d (توسط استفاده وزن مولکولی بالا PVA که دارای درجه پلیمریزاسیون بالای ۱۰۰۰۰ می‌باشد و استفاده از کشش چند مرحله‌ای) گزارش شده است [۳۳،۳۲]. بعلاوه استحکام بسیار بالای ۴۴ g/d و مدول ۱۰۴۰ g/d در روش ژل ریسی با کاربرد PVA بسیار سیندیوتاکتیک و درجه پلیمریزاسیون بالای ۱۵۰۰۰ و گلیسرول بعنوان حلال بدست آمده است [۱۰]. این گزارش حاکی از آن است که نظم و ترتیب^۳ PVA نیز میتوان از اهمیت بالایی برخوردار باشد. اگر چه وزن مولکولی بیشتر سبب افزایش استحکام کششی میشود، اما نسبت‌های کششی بالاتر بعضی اوقات باعث افت خصوصیات می‌گردد [۹]. این تأثیر را میتوان به فشار حاصله از پیوندهای بین زنجیری قوی نسبت داد.

۲-۳-۵- پلی‌اکریلونیتریل (PAN)

اطلاعات موجود در پنتتها نشان می‌دهد که با حل نمودن PAN با وزن مولکولی بالای ۱۰۰۰۰ به میزان ۱۰-۵٪ در محلول NaSCN/H₂O و منعقد نمودن در حمام با درجه حرارت پایین تر جهت تشکیل لیف در حالت ژل مانند و کشش دادن اول در آب داغ یا گلیسرول سپس در حالت خشک می‌توان به الیافی با استحکام حدود ۲۰ g/d دست یافت. در صنعت استحکامهایی حدود ۱۵-۱۳ g/d گزارش شده است [۱۱].

۴-۵- نتیجه گیری

-
- Glycerol
 - Ethyleneglycol
 - Tacticity

موفقیت های صنعتی در توسعه UHSPE بعنوان محرکی جهت کاربرد فرآیند ژل ریزی برای دیگر پلیمرهای آلی بوده است. نتایج موفقیت آمیزی برای PVA و PAN گزارش شده است که نشان می دهد تکنولوژی ریسندگی ژل در مفهوم ابزاری کلی جهت فرآیند تولید الیاف با ویژگی های خاص از پلیمرهای انعطاف پذیر می باشد. و لیکن حتی در مورد UHSPE نیز مکانیزم توسعه ساختاری طی فرآیند ریسندگی و کشش بخوبی فهمیده نشده است. پیشرفت در زمینه فهم این اصول منجر به پیشبرد بیشتر این تکنولوژی در آینده خواهد شد.

۶- تولید الیاف فوق ظریف

۱-۶- مقدمه

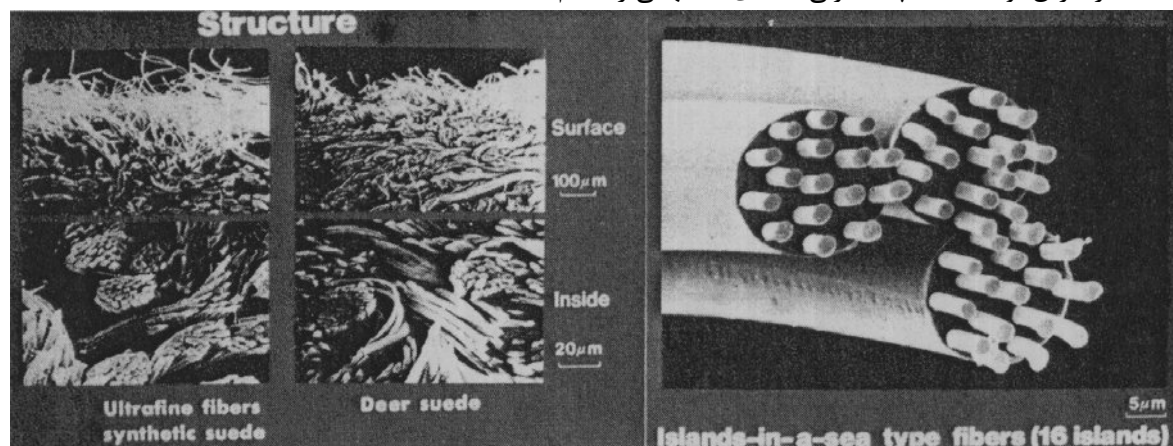
اگر چه تعریف دقیقی برای لیف فوق ظریف^۱ وجود ندارد و لیکن می توان گفت که واژه فوق ظریف به لیفی اطلاق می شود که نمره آن کمتر از ۰/۷ دنیر باشد. یکی از روشهای تولید الیاف فوق ظریف می تواند به واسطه کاهش دبی خروجی پلیمر از رشته ساز و بالا بردن نسبت کشش باشد [۱۱-۱]. اما ایجاد این شرایط برای برخی از الیاف میسر نمی باشد، بعنوان مثال میزان حداقل دبی خروجی پلی استر از رشته ساز ۰/۱۵ g/min می باشد و دبی خروجی کمتر از این مقدار باعث ایجاد گسستگی می شود [۱۲،۱]. از طرف دیگر بواسطه این گونه روشهای تولید حداکثر می توان الیاف فوق ظریفی ایجاد نمود که در حالت کشیده شده نمره ای معادل ۰/۳ دنیر داشته باشند.

در دهه ۱۹۶۰ برای اینگونه الیاف فوق ظریف تولید شده هیچگونه کاربردی نبود و به همین دلیل از نظر فنی و تجارتي زیاد مورد توجه نبودند. این موضوع ادامه داشت تا آنکه در سال ۱۹۷۰ کارخانه Toray کالای جدید جیری شکلی را به نام Ecsaine[®] به بازار عرضه نمود. این کالا در آمریکا به Ultrasuede و در اروپا به Alcantara معروف می باشد [۳]. همانطور که در شکل (۱-۶) دیده می شود در تولید این جیر فوق ظریف از الیاف فوق ظریف پلی استر کمک گرفته شده است و با این الیاف حالت جیری همانند پوست گوزن ایجاد شده که از نظر ریز ساختاری و بزرگ ساختاری بسیار به آن شبیه می باشد. نمره الیاف پلی استر فوق ظریف مصرفی کمتر از ۰/۱ دنیر می باشند. تولید Ecsaine[®] بعنوان پایه ای جهت تولید منسوجات با اینگونه ظاهر و زبردست قرار گرفت. بعد از آن الیاف فوق ظریف جهت تولید منسوجات ابریشمی مانند نیز مطرح شدند و توانستند به کمک آنها منسوجات ابریشمی مانندی تولید نمایند که در برخی از خصوصیات از ابریشم طبیعی نیز برتر بودند. با بوجود آمدن این کاربردها بازار تولید الیاف ظریف با دنیر های بین ۰/۵-۰/۱ در آمریکا و اروپا رونق گرفت. در اواخر دهه ۱۹۵۰ توانستند الیاف فوق ظریف را از طریق فرآیندهای تولید الیاف کوتاه از نوع melt-blow و Flash تولید نمایند. در این روشها امکان تولید فیلامنت وجود نداشت و فقط الیاف کوتاه با طولهای متفاوت تولید می شدند، و تنها کاربرد اینگونه الیاف کوتاه فقط در تولید لایه های بی بافت آنها در مدت زمان بسیار کوتاهی پس از تولید الیاف بود [۵-۱].

سابقه تولید فیلامنتهای فوق ظریف پیوسته به زمانهای بسیار قدیم بر نمی گردد. شاید بتوان عنوان نمود که لیف دوجزئی گلبرگ شکل^۲ در شماره ثبت Du Pont اولین نمونه از این نوع باشد. این شماره ثبت در سال ۱۹۶۱ به همراه چندین شماره ثبت دیگر در زمینه تولید الیاف با سطح مقطع مثلثی^۳ منتشر شد. هدف این مقاله تولید لیفی با سطح مقطعی بود که دارای لبه های تیز باشد و این کار با بهره مندی از مرز موجود بین دو جز A و B انجام گرفت. در مقاله

-
- Ultra- fine- fibers
 - Petal - shaped
 - Triangular Cross- section

دیگری که همزمان توسط Du Pont منتشر شد، جدا سازی الیاف دو جزئی با سطح مقطع غیر مدور از همدیگر بعد از بافندگی شرح داده شد [۱۴]. در آن زمان هیچگونه توجهی به ترکیب این دو روش جهت تولید الیاف فوق ظریف نشد. زیرا در آن زمان تولید مقطع با لبه های تیز در درجه اول اهمیت قرار داشت. در اواسط دهه ۱۹۶۰ Okamoto و همکارانش از کارخانه Toray تکنولوژی تولید الیاف دو جزئی را جهت تولید الیاف فوق ظریف بکار بردند. آنها این کار را به واسطه افزایش جز A و B به چندین جز انجام دادند. در این تکنولوژی دو جز A و B بصورت یک در میان در کنار همدیگر قرار میگرفتند و لیفی چند جزئی را تولید می کردند. اجزا این الیاف طی مراحل بعدی از هم جدا شده و تشکیل الیاف فوق ظریف را می دادند. در سال ۱۹۶۸ Matsui و همکارانش از کارخانه Kanebo نیز جهت تولید فیلامنتهای فوق ظریف تخت^۱ از طریق تولید الیاف چند جزئی لایه ای تلاشهایی را انجام دادند [۱۵].



شکل ۱-۶-۲- ساختار میکروسکوپی جبر مصنوعی تولید شده از الیاف فوق ظریف (سمت چپ) و پوست گوزن (سمت

راست)، b - نوعی الیاف جزیره در دریا که نشان دهنده موقعیت الیاف فوق ظریف است.

۲-۶- خلاصه ای از فرایندهای تولید انواع محصولات فوق ظریف

۱-۲-۶- تعریف و انواع لیف فوق ظریف

در مراجع مختلف برای الیاف فوق ظریف تعاریف متفاوتی یافت می شود [۹-۱۶، ۱۱-۱۸]. بعنوان مثال کمیته نساجی آلمان الیافی را بعنوان لیف ریز دینر معرفی نموده است که برای پلی استر ظریفتر از ۱/۲ dtex و برای پلی آمید ظریفتر از ۱ dten باشند. اگر چه لیف باریک (با ظرافت یک دنیر یا بیشتر) گاهی اوقات بعنوان لیف فوق ظریف تجاری در نظر گرفته می شود، اما لیف فوق ظریف می بایست، مشخصاً لیفی با ظرافت کمتر

از ۰/۵ den باشد. بنابراین در این فصل فیلامنتهایی مورد بحث قرار می‌گیرند که دارای ظرافتی در حدود ۰/۵ den -۰/۰۵ هستند. گاهی اوقات لیفی که دارای ظرافتی کمتر از ۰/۱ den است بعنوان لیف ابر فوق ظریف^۱ شناخته می‌شود. الیاف فوق ظریف به دو دسته ذیل تقسیم بندی می‌گردند:

الف- الیاف فیلامنتی^۲

ب- الیاف کوتاه با طول های متفاوت^۳

نظر به اینکه پیشرفتهای اخیر در زمینه الیاف فوق ظریف بیشتر بر نوع فیلامنت مداوم تمرکز داشته است، همانگونه که مختصراً بخاطر چرم مصنوعی جیر گونه یا Shingosen شرح داده شد، در این فصل نوع فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲-۶- فرآیند تولید الیاف فوق ظریف [۱-۳۴]

۱-۲-۲-۶- نوع فیلامنت مداوم

نوع فیلامنت مداوم، لیف فوق ظریف در حال حاضر به روشهای گوناگونی تولید میشوند که عبارتند از :

ریسندگی مستقیم

ریسندگی مزدوج که خود به موارد زیر تقسیم می‌شود:

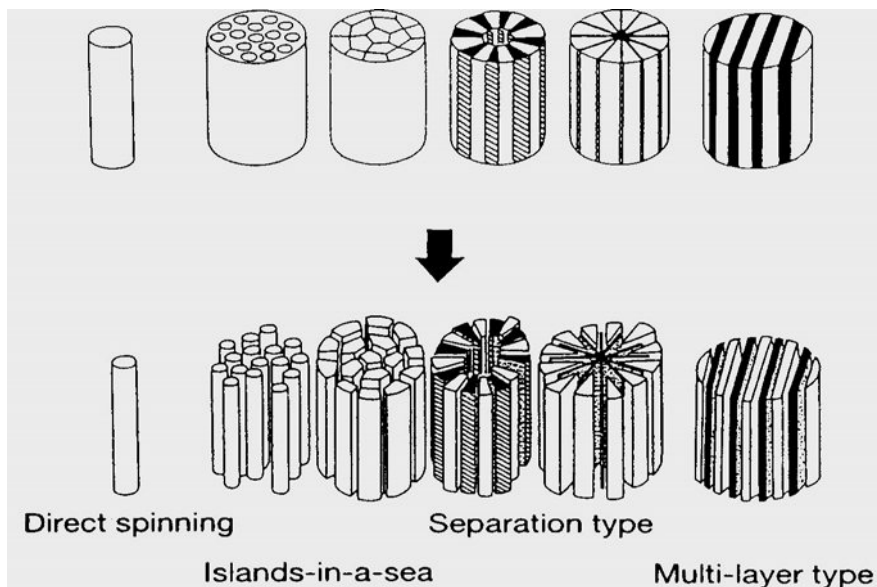
الف- نوع جزیره در دریا^۴

ب- نوع جدا شونده یا شکافته شده^۵

پ- نوع چند لایه^۶

فرآیندهای مختلفی جهت تولید فیلامنتهای فوق در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. در این شکل ردیف بالا الیاف را پس از تولید و ردیف پایین الیاف را بعد از تبدیل شدن به الیاف فوق ظریف نشان می‌دهند.

-
- Super ultra- fine fiber
 - Continuous filament type
 - Random (staple)type
 - Islands – in – a – sea type
 - Separation type or splitting type
 - Multi- layer type



شکل ۲-۶ - فرآیندهای تولید الیاف فوق ظریف نوع فیلامنت مداوم. ردیف بالا الیاف بعد از تولید و ردیف پایین الیاف فوق ظریف حاصله پس از فرآیند شکافتن را نشان می‌دهد.

۲-۲-۶- نوع کوتاه تصادفی

نوع کوتاه تصادفی الیاف فوق ظریف توسط روشهای ذیل تولید می گردند:

۱- دمش مذاب یا ریسندگی جت

۲- ریسندگی Flash

۳- ریسندگی مخلوط پلیمر

۴- ریسندگی سانتریفیوژ

۵- فیبریله شدن یا قابلیت ارتجاعی شدید

۶- قالب جریان آشفته

۷- فرآیند انفجاری^۱

۸- سایر روشها

۳-۲-۶- ویژگیهای الیاف فوق ظریف

الیاف فوق ظریف متفاوتی طراحی شده اند که دارای ویژگیهای زیر هستند:

۱- نرمی، انعطاف پذیری و صافی

۲- ساختار نسجی ظریف

۳- ایجاد حفره های ریز در پارچه

۴- دانستیه بالای فیلامنت در سطح منسوج و خصوصیت بین سطحی ویژه

۵- محدوده سطحی بزرگ در واحد وزن و ویژگی درون وجهی (درگیری درونی)

۶- شعاع انحنا کم (که بر ویژگیهای رنگ و جلا لیف تأثیر می گذارد)

۷- نسبت طول به قطر بالا و پیچ خوری آسان

۸- توانائی نفوذ مناسب در سایر مواد

۹- آزاد سازی سریع تنش

۱۰- مقاومت کم در برابر خمش

۱۱- وابستگی اختصاصی زیستی جهت بافتهای زنده و مایعات

۱۲- لبه های ظریف و تیز

اگر مساحت سطح مقطع عرضی A ، گشتاور لحظه ای سطح مقطع M و پیچش I_p باشد، خواهیم داشت،
 $A=(\pi/4)D^2$ ، $M=(\pi/64)D^4$ و $I_p=(\pi/32)D^4$ که D قطر سطح مقطع عرضی فیلامنت است. این مقادیر بطور نمائی با کاهش D کاهش می یابند. بنابراین انعطاف پذیری (مورد اول لیست فوق) الیاف فوق ظریف ناشی از کوچکی قطر سطح مقطع الیاف است.

۳-۶- تولید نوع فیلامنت مداوم

۱-۳-۶- ریسندگی مستقیم

روش ریسندگی مستقیم حالت توسعه یافته ای از روش ذوب ریزی بوده، که به منظور تولید الیاف فوق ظریف شرایط

تولید آن بهینه سازی شده است. در این روش مشکلات زیر وجود دارند:

۱- پارگی الیاف

۲- تغییرات ضخامت فیلامنت

۳- مسدود شدن رشته ساز

۴- تغییرات دنیبر در میان فیلامنت های یک رشته نخ

پیش بینی های ذیل به منظور رفع این مشکلات صورت میگیرد [۳۳]:

۱- بهینه سازی ویسکوزیته پلیمر (به عنوان مثال افزایش درجه حرارت ریسندگی بمنظور کاهش ویسکوزیته)

۲- بهینه سازی طراحی رشته ساز (بعنوان مثال سوراخ های رشته ساز به گونه ای قرار گیرند که از خنک شدن

یکنواخت اطمینان حاصل شود).

۳- بهینه سازی درجه حرارت محیط زیر رشته ساز (به عنوان مثال کنترل سرعت خنک شدن و عملیات سردسازی سریع پلیمر مذاب^۱)

۴- بهینه سازی سیستم جمع آوری فیلامنت (بعنوان مثال جمع آوری در فاصله ای نزدیک به رشته ساز انجام پذیرد)

۵- بهینه سازی سیستم کشش ریسندگی^۲ (بعنوان مثال کنترل تنش^۳ ریسندگی)

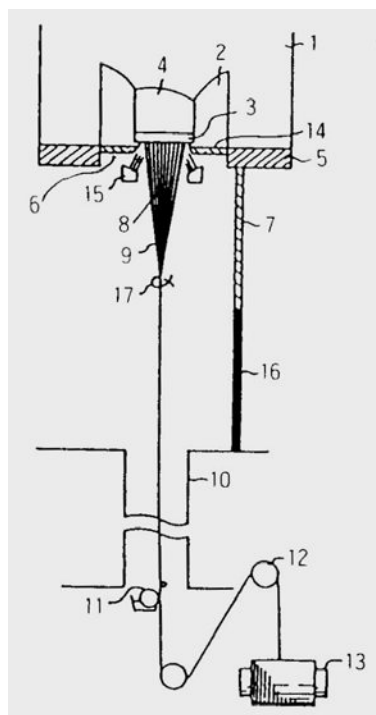
۶- کاهش سرت ریسیدن (بعنوان مثال عبور پایدار پلیمر)

۷- خالص سازی پلیمر ریسندگی (بعنوان مثال فیلتر کردن با راندمان بالا)

شرکت Unitika Co. اولین کمپانی بود که الیاف فوق ظریف با ظرافت $0.5 - 0.3$ den را به بازار عرضه کرد، اگر چه کمپانی Asahi Chemical Industry نیز از طریق بهینه سازی ویسکوزیته پلیمر مذاب، طراحی رشته ساز، درجه حرارت محیط زیر رشته ساز (به عنوان مثال شرایط خنک کردن) و شرایط جمع آوری فیلامنت ظرافت لیف پلی استر را تا $0.3 - 0.1$ den توسعه داد. صریحاً میتوان عنوان داشت که جهت تولید الیاف فوق ظریف با ظرافت کمتر از 0.3 den باید ویسکوزیته پلیمر مذاب کمتر از 950 poise، مساحت سطح مقطع عرضی سوراخ هر رشته ساز باید کمتر از 10^{-4} cm^2 $3/5 \times 10$ ، درجه حرارت محیط در فاصله $1 - 3$ cm زیر رشته ساز معادل 200°C و جمع آوری فیلامنتهای تولید شده در فاصله $10 - 200$ cm زیر رشته ساز باشند. نحوه تولید به طور شماتیک در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.

کمپانی Asahi Chemical Industry موفق شد با استفاده از پلیمر پلی استر مذاب با ویسکوزیته کمتر از 480 poise و بکارگیری رشته سازی با بیش از 300 روزنه با مساحت سطح مقطع کمتر از 10^{-4} cm^2 برای هر روزنه الیاف پلی استر فوق ظریف با نمره کمتر از 0.15 den را تولید کند. با وجود رعایت تمام شرایط کنترلی، اگر زیر رشته ساز کنترل حرارتی مناسب صورت نگیرد، پلیمر تولید شده تمایل به قطره شدن از خود نشان داده و توانایی کشش پذیری نخواهد داشت. بنابراین درجه حرارت محیط در فاصله $1 - 3$ cm زیر رشته ساز باید بوسیله دمیدن هوای سرد، کمتر از 150°C نگهداشته شود تا پلیمر توانایی تحت عملیات کشش قرار گرفتن جهت شکل گیری فیلامنت را داشته باشد. فیلامنتهای متحدالمرکز تولید شده باید همگی با سرعتی ثابت خنک شده و سپس در فاصله $70 - 20$ cm زیر روزنه های رشته ساز جمع آوری شده و بعنوان لیف کشیده نشده پیچیده شوند. لیف کشیده نشده فوق را می توان تحت عملیات کشش قرار داد تا لیف فوق ظریفی با نمره کمتر از 0.15 den تولید شود. در جدول (۱-۶) شرایط ریسندگی برای تولید لیف فوق ظریف پلی استر توسط روش ریسندگی مستقیم ارائه شده است [۳۳].

-
- Quenching
 - Spinning draft
 - Tension



شکل ۳-۶- نمودار فرضی ریسندگی مستقیم، ۱- هد ریسندگی، ۲- دسته رشته ساز، ۳- رشته ساز، ۴- پلیمر مذاب، ۵- عایق بندی هد ریسندگی، ۶- صفحه عایق بندی شده حرارتی، ۷- دمنده، ۸- ناحیه حرارتی کاهش آرام دما، ۹- خط ریسندگی، ۱۰- ستون ریسندگی، ۱۱- غلطک روغن و مواد تکمیلی، ۱۲- غلطت جلوبرنده، ۱۳- سیستم پیچش، ۱۴- صفحه عایق بندی شده حرارتی، ۱۵- دمنده، ۱۶- صفحه مانع شونده از جریان هوا، ۱۷- راهنما همگرایی

کمپانی Teijin اثر اصطکاک هوا را بر تولید الیاف فوق ظریف در فرآیند ریسندگی بسیار سریع بررسی نموده است [۱۹]. Toray و Toyobo نیز لیف فوق ظریف را از طریق ریسندگی مستقیم تولید کرده اند. با سرد نمودن همگن الیاف در خط ریسندگی Unitika موفق به تولید فیلامنتهای فوق ظریف پلی استر با قابلیت رنگرزی با رنگهای کاتیونیک شد. فیلامنت PET معمولاً ۴-۶ برابر کشیده می شود. ولی می توان آن را در شرایط خاصی که ابر کشش^۱ نامیده می شود، معادل ۲۰-۱۰ برابر کشید. کمپانی Du Pont روشی را جهت تولید الیاف فوق ظریف از طریق فرآیند ابر کشش پیشنهاد نموده، اما به دلیل شرایط دشوار و خاص این فرآیند تا بحال مصرف صنعتی پیدا نکرده است [۳-۱].

جدول ۱-۶- شرایط ریسندگی برای تولید لیف فوق ظریف پلی استر به روش ریسندگی مستقیم

	Spinning conditions ^۱	
	< 0.3d	< 0.15d
Number of holes in spinneret	> 140	> 150
Cross-section of output hole (cm)	< 3.5×10^{-4}	< 1.5×10^{-4}
Polymer melt viscosity (poise)	< 950	< 300
Ambient temperature at a point 1-3 cm below spinneret (°C)	< 200	< 150
Filament-assembling position (cm below spinneret)	10-20	20-70
Drawing	conventional	conventional
Tenacity (g/d)	3-5	3-5
Elongation (%)	20-40	20-40

همانگونه که در ذیل اشاره می گردد، الیاف فوق ظریف را میتوان به شیوه تر ریزی نیز تولید نمود. در این راستا موارد زیر باید در خط تولید مد نظر قرار گیرد:

۱- حلال انتخابی نباید هیچگونه ساختار حفره ای در لیف حاصله ایجاد نماید، ضمناً غلظت محلول (و بنابراین ویسکوزیته) می بایست در سطحی بهینه برای تولید لیف ظریف تنظیم گردد.

۲- محلول ریسندگی می بایست توسط فیلتری ظریف صاف شود تا ذرات بزرگتر از $1/3$ قطر نازل از آن جدا گردند.

۳- قطر نازل می بایست کمتر از $30 \mu\text{m}$ بوده و سیستم چند روزنه ای^۱ برای منظور صنعتی مناسب است.

۴- عملیات کشش می تواند توسط روشهای معمول انجام شود.

جهت تولید الیاف فوق ظریف اکریلیک میتوان از کوپلیمری شامل پلی اکریلونیتریل / وینیل استات / سدیم متاآکریل

- سولفات (% ۵/۰ - ۷-۹۲/۵) استفاده شود و بدین طریق لیف با نمره $0.4-0.6 \text{ den}$ ، استحکام 3 g/den و ازدیاد طول

۲۶٪ تحت شرایط زیر تولید نمود، شکل (۴-۶) [۳۳].

۱- ویسکوزیته مخصوص $0.17-0.19$

۲- حلال: دی متیل استامید یا دی متیل فرم آمید

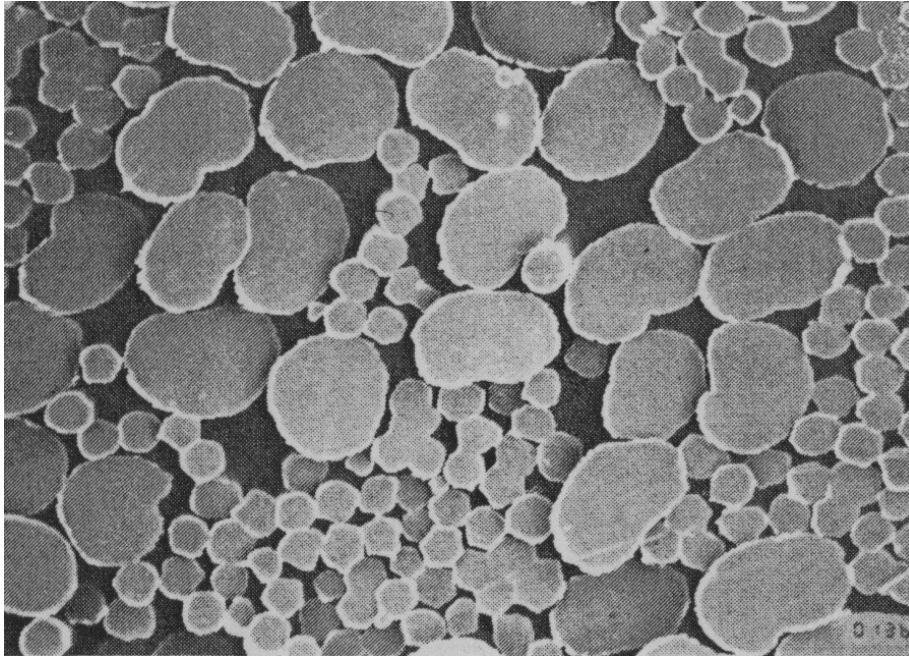
۳- غلظت: $16-19\%$ محلول

۴- فیلتر: فیلتر فلزی Sintered با روزنه های خروجی کمتر از $10 \mu\text{m}$

۵- قطر نازل: $20-30 \mu\text{m}$

۶- تعداد سوراخهای نازل: ۴۰۰۰۰-۸۰۰۰۰

بدین ترتیب لیف فوق ظریف یک جزئی از طریق ریسندگی مستقیم بدست می آید و نیازی به فرآیندهای تکمیلی پیچیده بعدی همچون جدا نمودن دو جزء یا از بین بردن جزء دوم نمی باشد. ولی با وجود این اغلب گسستگی فیلامنت و تشکیل کرک^۱ در ریسندگی مستقیم الیاف فوق ظریف مشاهده می گردد و زیر دستی با کیفیت بالا را نمی توان از آنها انتظار داشت.



شکل ۴-۶- سطح مقطع فرضی الیاف اکریلیک فوق ظریف مخلوط شده (۵ den+۱/۵ d+۱/۵ تولید شرکت Mitsubishi Rayon)

۲-۳-۶- ریسندگی مزدوج با کنار هم قرار دادن متناوب پلیمرها

مشکلات فنی ریسندگی مستقیم را میتوان توسط ریسندگی مزدوج^۲ برطرف کرد و الیاف فوق ظریف همگن را تولید نمود [۲۰، ۲۱-۲۲]. نظریه ریسندگی مزدوج پیش از ریسندگی مستقیم برای تولید الیاف فوق ظریف مطرح شده است. Okamoto و همکارش Toray و Matsui و همکارش Kanebo پیرامون ریسندگی الیاف مزدوج از طریق اصلاح رشته ساز در جهت ایجاد پراکندگی زیاد اجزا جفت شونده در سطح مقطع تحقیق نمودند. Okamoto پیشنهاد نمود که الیاف

-
- Fluff formation
 - Conjugate spinning

مزدوج حاصله را باید عنوان (الیاف حاصله از پلیمرهای به تناوب کنار هم قرار گرفته) معرفی کرد، برای این که بطور صحیح بر هر دو مرفولوژی ساختار جزایره در دریا^۱ در جهت طولی و افقی دلالت دارد [۸، ۲۰، ۲۱-۱].
ریسندگی پلیمر بطور متناوب سازمان یافته (مزدوج) از نقطه نظر فنی به دو نوع تقسیم می گردد:
۱- نوع جزایر در دریا، که جزء دریا در یک حلال حل گشته و بازیابی می گردد.
۲- نوع تقسیم شونده یا جدا شونده، که در شماره ثبت شرکت [13] Du Pont به منظور فیبریله شدن فوق ظریف بکار برده شده است.

در هر دو مورد در عملیات ریسندگی نیازی به کشش نیست، میکرولیف ها (یا الیاف ظریف) بعد از بافت پارچه بوجود می آیند. در اینگونه روشهای تولید الیاف فوق ظریف در مقایسه با روش های ریسندگی معمول در فرآیندهای متعاقب مشکلات فنی بخصوصی مشاهده نمی گردد.

۱-۲-۳-۶- ریسندگی جزایر در دریا یا پلیمر سازمان یافته به صورت متناوب^۲

اصول ریسندگی نوع جزایر در دریا در شکل (۶-۵a) نشان داده شده است. پلیمر دو جزئی جریان یافته گونه مزدوج یا گونه غلاف- مغزی^۳ در یک جریان واحد جمع آوری شده و از رشته سازی که در شکل (۶-۵b) نشان داده شده است، ریسیده می شود. در این روش دو دسته جریان پلیمری از نوع مزدوج یا غلاف مغزی به یک جریان تبدیل میشوند و از رشته ساز خارج میشوند. تعداد جریان های موجود در هر دسته پلیمری ضخامت فیلامنت تولیدی را تعیین می کنند. اگر چه کیفیت الیاف فوق ظریف تولیدی به فرآیند جمع کردن دو جریان پلیمری بستگی دارد ولی در نوع غلاف - مغزی راندمان تولید الیاف فوق ظریف بالاتر است زیرا در فرآیند تولید الیاف فوق ظریف از طریق جدا سازی امکان دارد در برخی مناطق پلیمر با هم طی فرآیند جمع شدن ادغام شوند و دیگر امکان جدا سازی آنها وجود نداشته باشد.

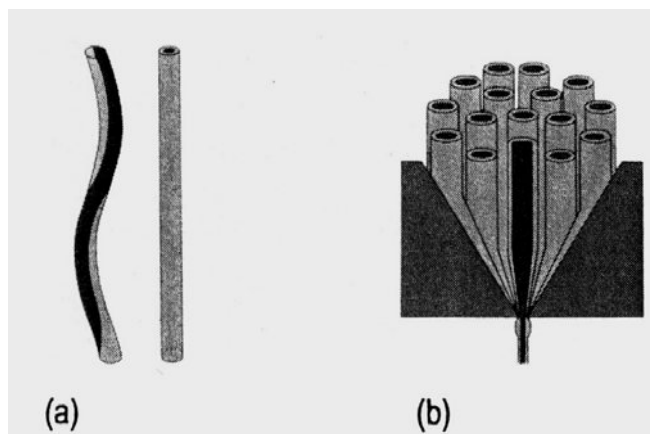
پلیمرهای پلی استر، نایلون، پلی پروپیلن، پلی اتیلن و پلی فنیلین سولفید در مقایسه با سایر پلیمرها بعنوان جزایر به شمار می روند. ترکیبات دریا نیز عبارتند از پلی استیرن، کوپلیمر ۲- اتیل هگزیل اکریلات یا کوپلیمر اتیلن ترفتالات و سدیم سولفو ایزوفتالات، که از طریق حل کردن در یک حلال (که برای جزء جزیره غیر حلال است) بعد از فرآیند هایی در پارچه های تار و پودی، حلقوی یا منسوجات بی بافت بازیابی می گردد. بنابراین تفاوتی اساسی در عملیات ریسندگی و فرآیندهای متعاقب با ذوب ریزی قرار دادی وجود ندارد. بعنوان مثال هنگامی که PET بعنوان جزء جزیره مصرف می شود درجه حرارت ریسندگی °C ۲۷۵-۳۰۰ است. عملیات تولید الیاف ریز^۴ بعد از آنکه فیلامنتهای درشت حاصله در بافت پارچه مورد استفاده قرار گرفتند به مرحله اجرا گذاشته میشود، شکل (۶-۶).

- islands- in- a- sea

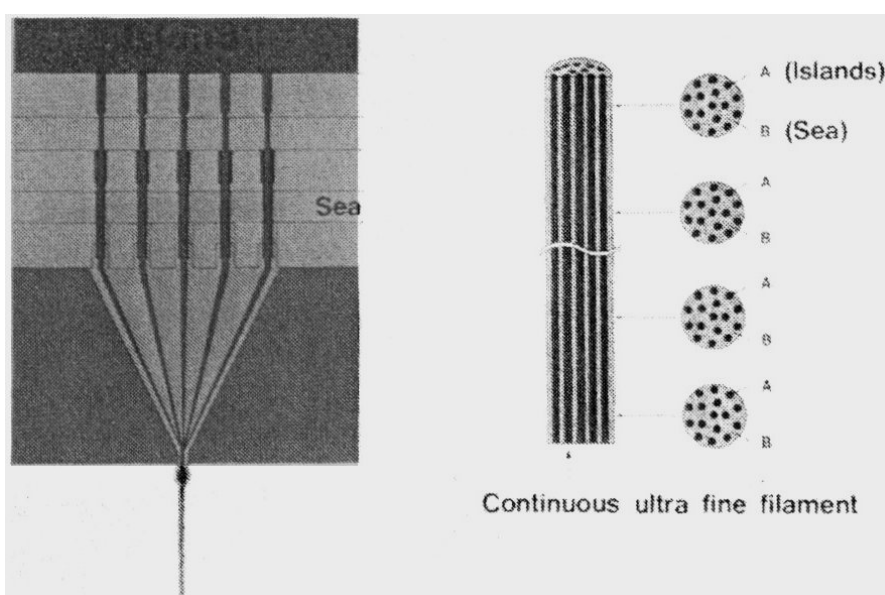
- Islands- in-a-sea or alternately- arranged- polymer Spinning

- Sheath- and - core

- Micro- fiberization



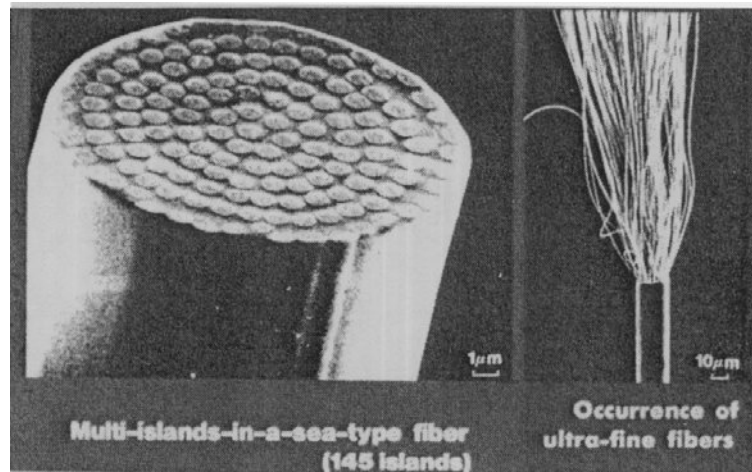
شکل ۵-۶- تصویر عمومی از الیاف جزایر در دریا



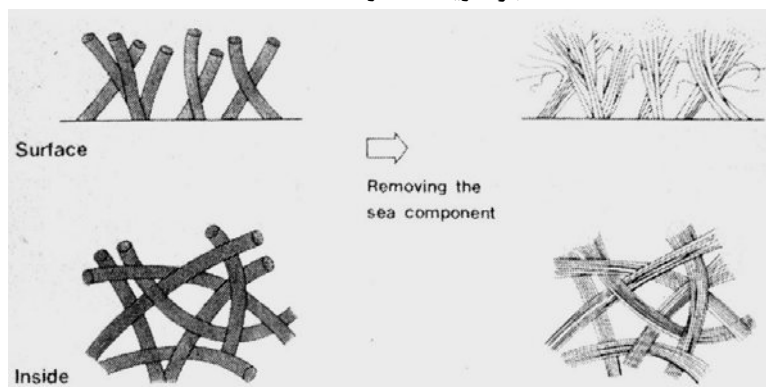
شکل ۶-۶- الیاف جزایر در دریا، تصویر سمت چپ نشان دهنده رشته ساز و چگونگی جمع آوری فیلامنتها و تصویر سمت راست نشان دهنده ساختار الیاف است

این تکنولوژی به منظور تولید صنعتی نوعی جیر شبیه چرم، پارچه های شبه ابریشم، لباسهای کار پارچه های نظافت و فیلترهای ظریف از الیاف فوق ظریف در نظر گرفته شده است. تعداد جزایر در نخ چند فیلامنتی فوق ظریف از طریق طراحی رشته ساز مشخص می گردد. ضمناً نسبت جزء جزیره به جزء دریا توسط سرعت ریسندگی هر جزء تعیین می شود. مثالی از این روش در شکل (۶-۷) نشان داده شده است، که لیف نوع جزایر در دریا با تعداد ۱۴۵ جزیره را معرفی

می‌کند. در اینجا جزء جزیره در جزء دریا پوشانده شده است. الیاف تولید شده و تحت عملیات کشش قرار گرفته بصورت پارچه در آورده میشوند و عمل تولید الیاف ظریف بوسیله بازیابی جزء دریا انجام می‌پذیرد، شکل (۸-۶). ریسندگی سه جزئی را می‌توان از طریق دو جزء جزیره ای (بعنوان مثال جزیره اول PET و جزیره دوم نایلون) و طراحی رشته سازی سه جزئی انجام داد. از نقطه نظر فنی میتوان جزء دریا را به میزان ۲ الی ۱۰ درصد اجزا کلی کاهش داد. اما فاصله بین فیلامنتهای فوق ظریف کاسته شده و این فرآیند شاید سبب ضعف زیر دست محصول گردد. هنگامی که جزء دریا کم بوده و با جزء جزیره مخلوط نگردد، میتوان عملیات شکافتن را بطور مکانیکی انجام داد.



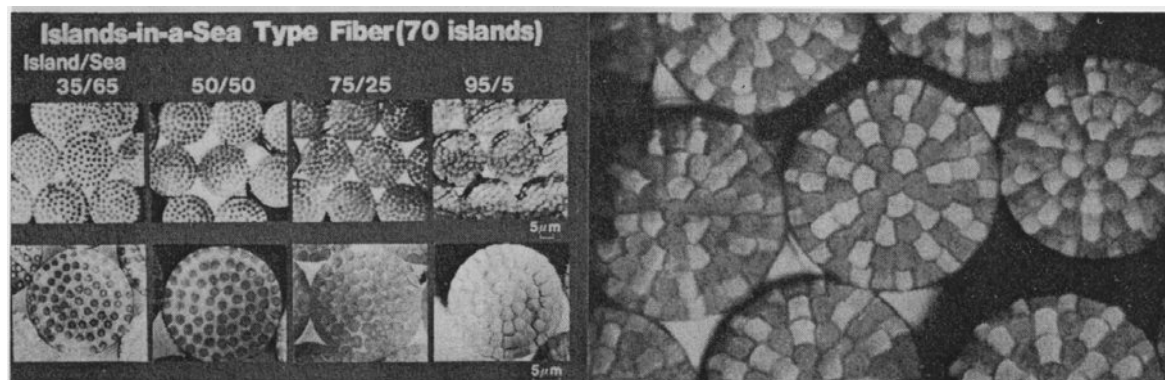
شکل ۷-۶- لیف جزیره در دریا با تعداد ۱۴۵ جزیره (سمت چپ) و نخ شامل فیلامنتهای فوق ظریف حاصله به شیوه حل کردن جزء دریا (سمت راست)



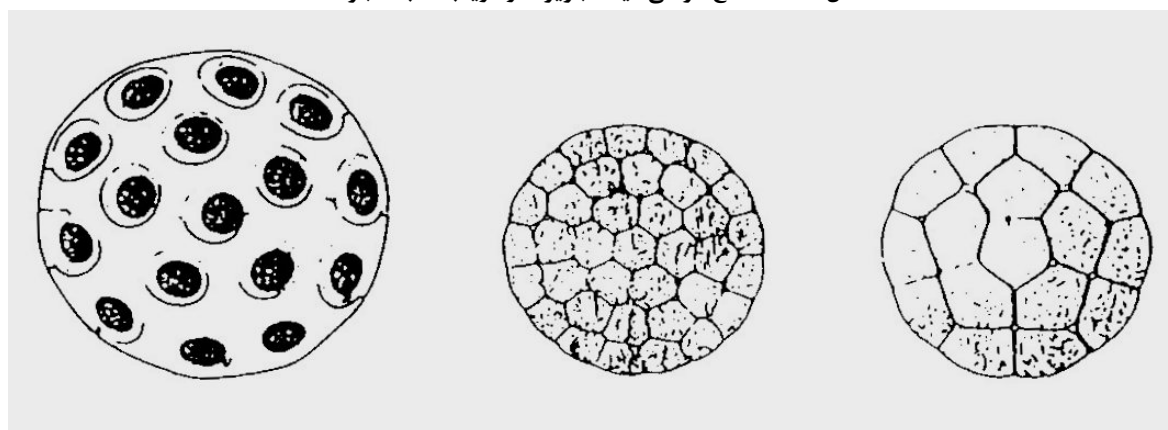
شکل ۸-۶- فرآیند و تکمیل الیاف جزیره در دریا در صفحه منسوجات بی بافت

چون فیلامنتهای فوق ظریف (جزء جزیره) در نوع جزایر در دریا توسط جزء دریا در بر گرفته شده اند، لذا در طول فرآیندهای بعدی از آسیب دیدن در امان می‌مانند، شکل (۹-۹). این تکنولوژی قابلیت تولید فیلامنت PET با ظرافت

(قطر $0.1 \mu\text{m}$) 0.00009 den را دارد. تنها $4/16 \text{ g}$ از چنین فیلامنتی جهت کشیده شدن از زمین تا کره ماه کافی است. بعدها تکنولوژی برای تولید لیف مزدوج چند جزئی توسعه یافت، و نوعی جبر شبیه چرم با قابلیت جذب رنگ زیاد از طریق ریسندگی مزدوج سه جزئی که دو جزء آن الیاف فوق ظریف با ساختار غلاف - مغزی از جنس پلی استر و نایلون ۶ بودند تولید شد. تغییرات زیادی در ریسندگی جزایر در دریا مانند ریسندگی بی نهایت زیاد جزء جزیره به منظور استفاده در پارچه های نظافت، ریسندگی جزء جزیره ای با سطح مقطع غیر دایره ای یا سطح جانبی غیر هموار و ریسندگی جزء جزیره ای مخلوط شده، مشاهده خواهد شد، شکل (۱۰-۶).



شکل ۹-۶- مقطع عرضی الیاف جزیره در دریا با نسبت اجزاء مختلف



شکل ۱۰-۶- الیاف جزیره در دریا که بصورت ساختار دو جزئی غلاف - مغزی (سمت چپ) و با جزء بسیار کم دریا (سمت راست) تولید شده اند

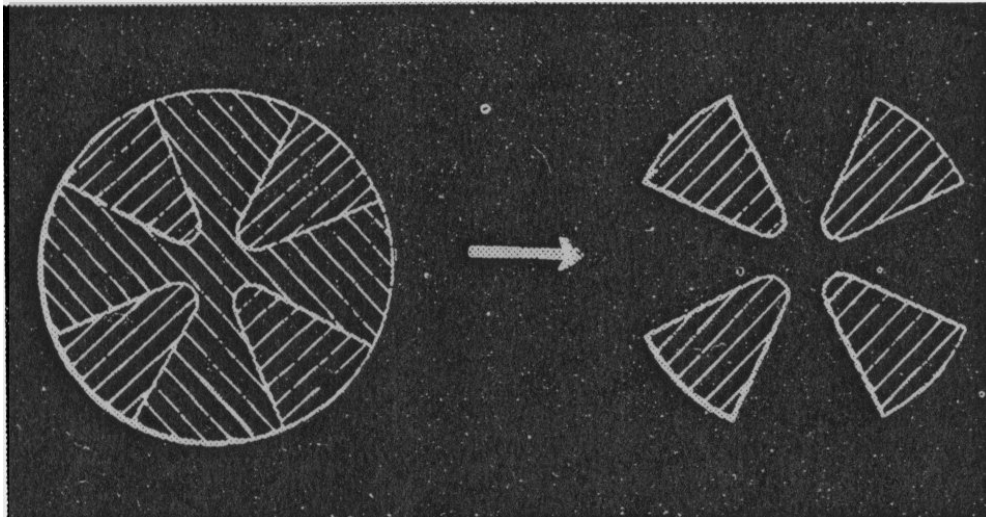
۲-۲-۳-۶- ریسندگی نوع تقسیم شونده یا جدا شده

هدف از این نوع ریسندگی استفاده از جزء دوم موجود در ساختار لیف مانند جزء اول در محصول نهائی است، که توسط جداسازی مکانیکی دو جزء بجای بازیابی کردن جزء دوم از طریق حل کردن به مرحله اجرا گذاشته می شود. اصول

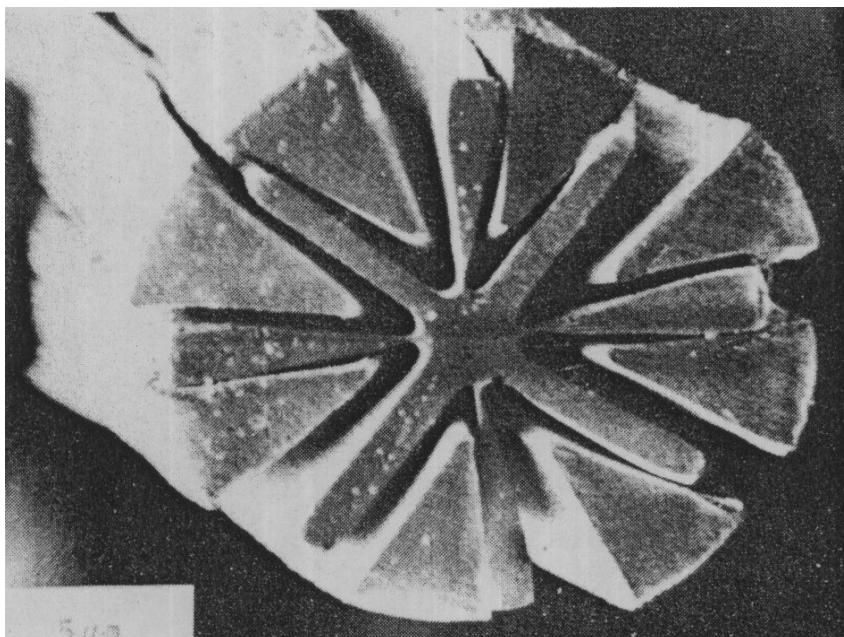
اساسی این تکنولوژی در تحقیقات [13] Breen و [14] Tanner از کمپانی Du Pont مشاهده میشود، اگر چه هدف اصلی این محققین تولید لیاف فوق ظریف نبوده است. نظر به موفقیت‌های تجاری در ساخت چرم مصنوعی از لیف ظریف دو جزئی متناوب سازمان یافته (مزدوج) این تکنولوژی ریسندگی مشابه توسط Kenebo، Teijin و Toray در راستای تولید لیاف فوق ظریف جهت یافت [۳۳،۲۳،۲۲،۱۴،۱۳].

تکنولوژی ریسندگی فوق ظریف آنها شامل ترکیب و جدا سازی نایلون و PET است، بنزیل الکل برای فعال سازی جمع شدگی جزء نایلون مصرف می‌شود و تکنولوژی رنگرزی با ثبات رنگی زیاد برای رنگ کردن PET و نایلون که دارای ویژگیهای رنگی متفاوتی هستند بنیان گذاشته شد. همراه با چرم مصنوعی شبیه جیر، پارچه های شبیه ابریشم و پارچه های نظافت این لیاف فوق ظریف در پارچه های دافع آب ولی رطوبت پذیر توسعه یافت.

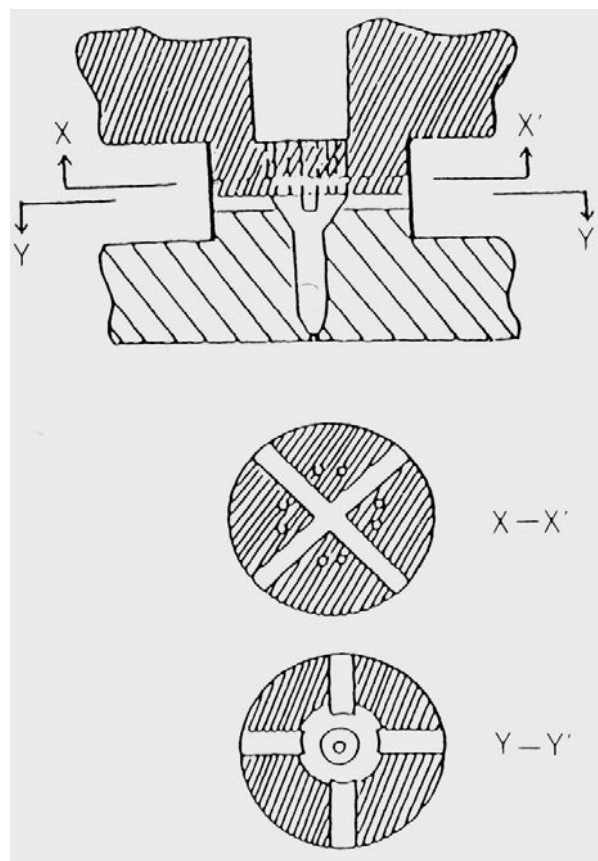
فرآیند تولید لیف فوق ظریف در ریسندگی نوع شکافته شده و جدا شونده توسط فرآیندهای شیمیایی و مکانیکی انجام می پذیرد. نکته قابل توجه این است که چه تعداد تقسیم از دو جزء میتوان بدست آورد. لیاف فوق ظریف تجارتي در حال حاضر از طریق طراحی ویژه رشته سازها تولید می گردند. Toray و Kanebo یک رشته ساز با سطح مقطع عرضی ستاره شکل را به کار بردند که حالت اصلاح شده مدل شرح داده شده در شماره ثبت Breen's است، شکل (۱۱-۶) [۱۳]. لیف با سطح مقطع عرضی + شکل، جزء دوم را به چهار گوه^۱ در فرآیند جداسازی تقسیم می کند. Kanebo اجزا گوه شکل دیگری را به هر یک از چهار جزء گوه ای فوق اضافه کرد، به عبارت دیگر قابلیت شکافته شدن در جریان فرایندهای بعدی را افزایش داد. سطح مقطع فوق شبیه لیف مزدوج ستاره شکل به نظر می آید، (شکل ۱۲-۶ و ۱۳-۶).



شکل ۱۱-۶- لیف مزدوج گلبرگ شکل



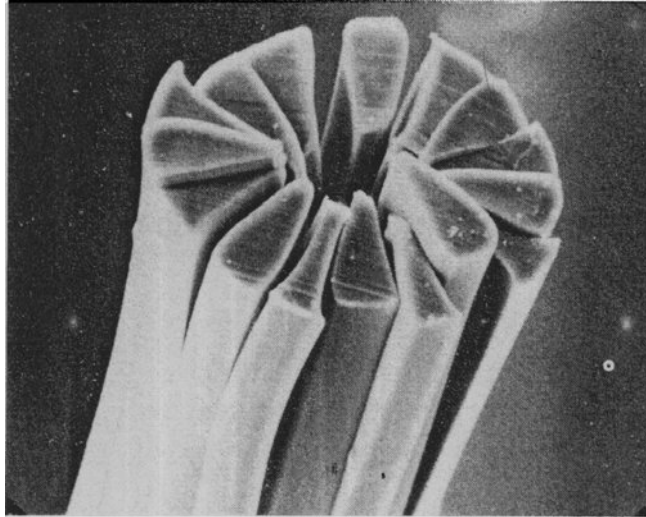
شکل ۱۲-۶- لیف مزدوج گلبرگ شکل با ۸ گلبرگ (Kanebo)



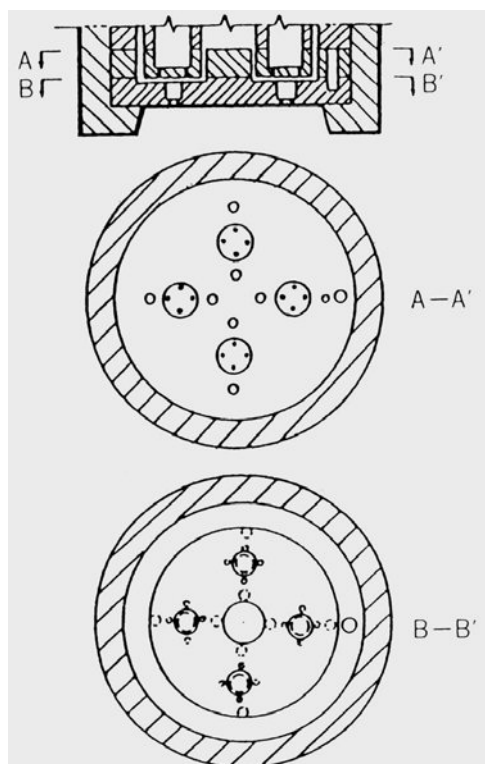
شکل ۱۳-۶- رشته ساز توخالی طراحی شده جهت لیف مزدوج ستاره شکل (Kanebo)

Teijin لیف مزدوج استوانه ای تو خالی، با سطح مقطع گلبرگ شکل^۱ را تولید می کند، (شکل ۱۴-۶) [۱۴]. اصول طراحی این رشته ساز شبیه طراحی شرکت [13] Du Pont و Toray برای تولید لیف مزدوج گلبرگ شکل بود. وجود این استوانه خالی در مرکز از پهن و تیز شدن لبه های فیلامنتهای حاصله هنگامی که تعداد شکافها افزایش می یابد، جلوگیری می کند. هنگامی که فاصله بین فیلامنتهای فوق ظریف در پارچه افزایش مییابد، وجود آن باعث می شود که فضائی خالی بین فیلامنتها پس از جدا شدن از همدگر بوجود آید که میتواند باعث بهبود زیر دست شود البته باید در نظر داشت که بعلت بافت رفتن فیلامنتها و محدودیت مکانی ایجاد شده بواسطه این عمل فیلامنتها تمایل دارند که این فضای خالی را پر نمایند.

رشته سازی در شکل (۱۵-۶) نشان داده شده است. انتخاب مناسب رشته ساز و اجزا پلیمری در تولید لیف فوق ظریف در این روش ضروری است. نظر به اینکه PET و نایلون ۶ هر دو محدوده درجه حرارت یکسانی برای ریسندگی و کشش دارند، جزو مهمترین و معروفترین ترکیبات در تولیدات تجاری محسوب میشوند از طریق افزایش چسبندگی می توان از بوجود آمدن کرک ها و پرزها در طول فرایندهای کشش یا بافت جلوگیری نمود. بعنوان مثال توسط استفاده از کوپلیمر PET و سدیم سولفو ایزوفنالات بجای جزء PET شکافتن در طول فرآیند ریسندگی را میتوان با افزایش سرعت ریسندگی کاهش داد، برای اینکه PET و نایلون خصوصیات جمع شوندگی یکسانی از خود نشان می دهند.



شکل ۱۴-۶- لیف مزدوج توخالی گلبرگی شکل (Teijin)

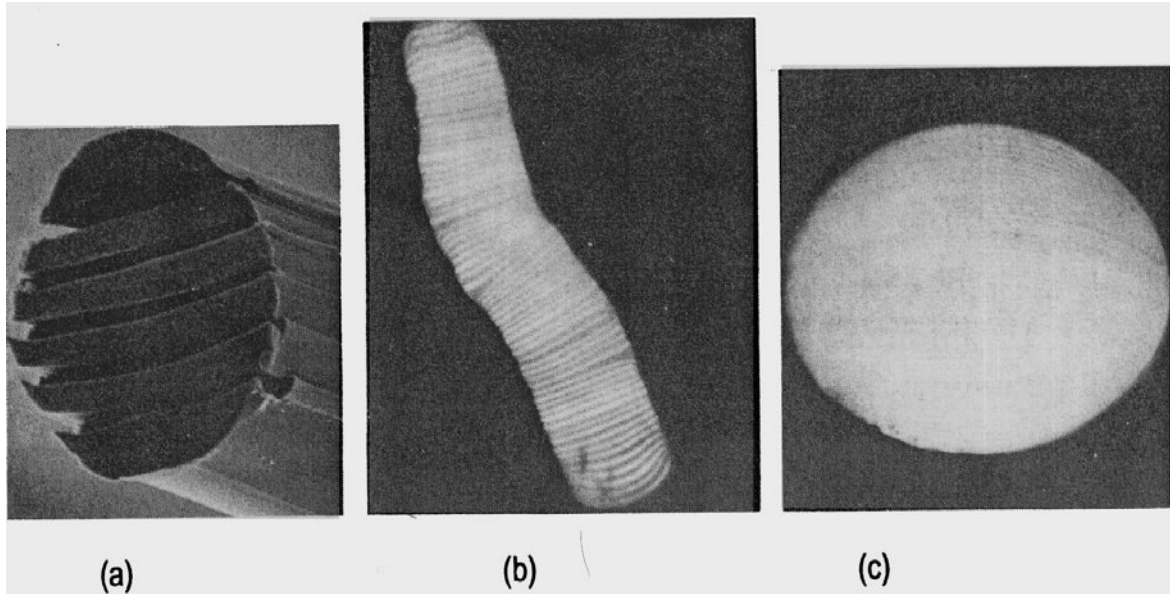


شکل ۱۵-۶- رشته سازی جهت تولید لیف مزدوج گلبرگ شکل (Teigin)

۳-۲-۳-۶- ریسندگی نوع چند لایه

مابعات را می توان بوسیله مخلوط های ساکن چند لایه ای کرد، بگونه ای که به منظور ریسندگی نوع چند لایه مورد استفاده قرار گیرند. Toray, Kuraray و Kanebo تکنولوژی ریسندگی نوع چند لایه را مورد بررسی قرار دادند. Kuraray اولین لیف فوق ظریف نوع چند لایه را بصورت تجارتي تولید کرد (شکل ۱۶-۶). در اینجا دو جزء پلی استر و نایلون به صورت لیفی مزدوج با ساختار چند لایه ای و سطح مقطعی بیضی شکل^۱ ریسیده می شود که در طول مدت فرآیند رنگرزی به فیلامنتهای بسیار ظریف با نمره $0.2-0.3$ den فیبریله می گردد.

در جدول (۲-۶) خصوصیات سه روش فوق شامل ریسندگی مستقیم، نوع جزایر در دریا و چند لایه شامل گونه جدا شونده یا شکافته شده، برای تولید فیلامنت مداوم فوق ظریف و خواص ویژه محصول ارائه شده است.



شکل ۱۶-۶- لیف مزدوج چند لایه با سطح مقطع بیضی شکل (Kuraray & Toray)
جدول ۱-۲- مقایسه ویژگیهای الیاف فوق ظریف جهت نوع فیلامنت بر طبق محصول حاصله

Filament	Direct spinning	Islands-in-a-sea type	Multi-layer type
Limit of the finest denier (after splitting)	> 0.1 d	~0.0001 d Possible also to make non-circular cross-section	0.1d Flat cross-section
Method	Spinning and drawing	Remove a component by solvent	Physico-chemical splitting
Processing	Relatively difficult. Different from conventional fibers. Fluffy.	Relatively easy. Similar to conventional fibers. Less fluffy.	Relatively easy. Similar to conventional fibers. Fluffy.
Inter-filament distance in fabric	Small.	Can be controlled.	Small.
Hand.	Hard.	Soft.	Hard unless chemically treated to shrink.
Single-component fiber	Yes. Also possible to make multi-component fiber.	Yes (by dissolving). Also possible to make multi-component fiber.	No. (Only possible by also dissolving).
Dyeability/Color fastness	Easy dyeing. Poor color development.	Easy dyeing. Poor color development.	Poor color-fastness.

۴-۶- ریسندگی نوع تصادفی

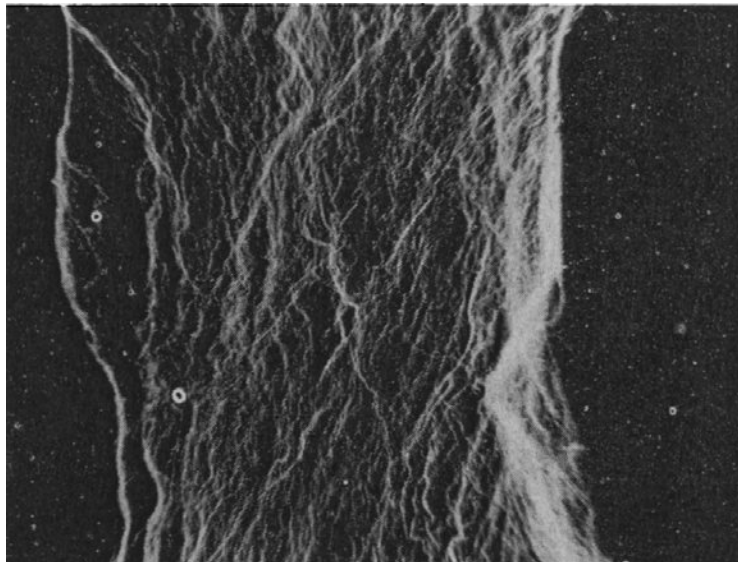
۴-۶-۱- ریسندگی جت یا دمش مذاب

این روش برای تولید الیاف فوق ظریف پلی پروپیلن مصرفی در پارچه های بی بافت بکار برده می شود. در این روش پلیمر مذاب فوراً بعد از ریسیده شدن^۱ توسط یک جریان جت هوا تحت دمش قرار میگیرد. به همین دلیل بعضی مواقع ریسندگی جت نیز نامیده می شود. بنابراین اساس روش فوق بیشتر استفاده از تکنولوژی اسپری کردن تا ریسندگی واقعی می باشد [۱-۲۷]. ویسکوزیته مذاب در این روش کمتر از ویسکوزیته پلی پروپیلن قرار دادی مصرفی در ذوب ریزی است، و محدوده مناسبی از ویسکوزیته مذاب میبایست برای دستیابی به نتیجه لازم انتخاب شود. رشته ساز مجهز به لبه ای تیز بوده و جریان جت به پلیمر مذاب ریسیده شده دمیده می شود و آنرا به الیاف فوق ظریف که بعنوان بی بافتها جمع آوری

میشوند، تبدیل می کند. به منظور نیاز به محیط زیستی تمیز تکنولوژی جدیدی برای تولید Electrets بر این بی بافتهای پلی پروپیلن توسعه یافته است. جزئیات بیشتر در فصل ۴ ارائه شده است.

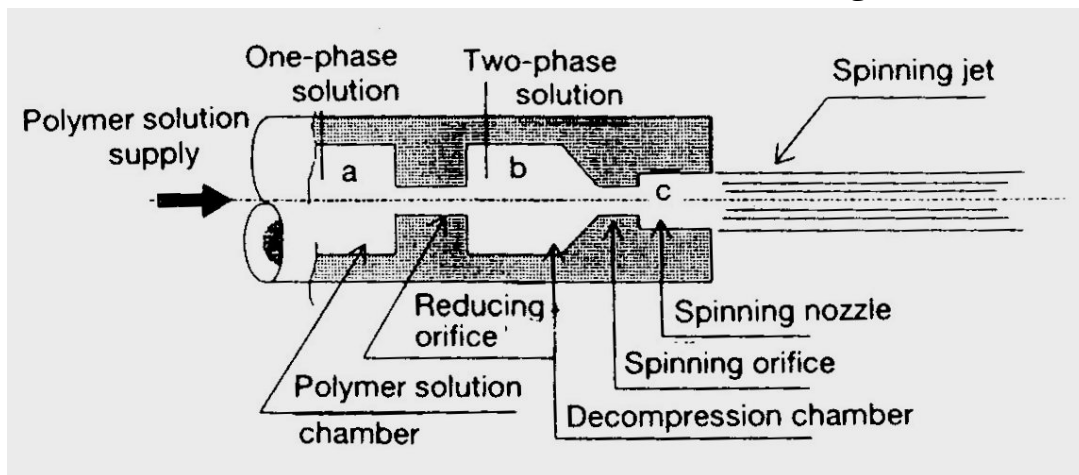
۲-۵-۶- ریسندگی Flash

لیف تولید شده به روش Flash (شکل ۶-۱۷) بعنوان لیف فوق ظریف به شمار می آید [۳۳،۱]. شکل (۶-۱۷) تصویری از یک شبکه لیف است که از طریق پراکندن یک تک جریان لیف ریسیده شد از سوراخ رشته ساز بوجود آمده است. ضخامت فیلامنتها بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ den متغیر بوده و میانگین دنیر در فیلامنت در حدود ۰/۱۵-۰/۱ است. سطح مقطع فیلامنت غیر دایره ای بوده و بعضی از فیلامنتها دارای ریز حبابهایی^۱ هستند. این تکنولوژی توسط کمپانی Du Pont بطور تصادفی هنگام بررسی رفتار انفجاری حلالهای آلی برای تحقیق پیرامون ایمنی آنها کشف شد. بعنوان مثال در این فرآیند پلی اتیلن حل شده در هیدروکربن یا متیلن کلرید، تحت فشار حرارت داده می شود و سپس از یک نازل بصورت لیف ریز شبکه که Plexifilament نامیده میشود، جت می گردد. اتیلن کلرید و فلوئوروکربن بعنوان حلال مصرف میشوند، اما هم اکنون توسط سایر حلالها که سبب تخریب لایه ازون نمی گردند، جایگزین شده اند. (عنوان گردیده است که شرکت Du Pont حلالی جدید را توسعه داده است). این تکنولوژی در آغاز به منظور تولید خمیر کاغذ مصنوعی بکار برده شده اما تبدیل به تولید مواد بسته بندی شامل پوششی برای مصارف خانگی و پاکتها شد. سرعت تولید بیشتر از آن است که محصول به شکل لیف در آید به همین دلیل محصول بصورت یک ورقه تولید می گردد.

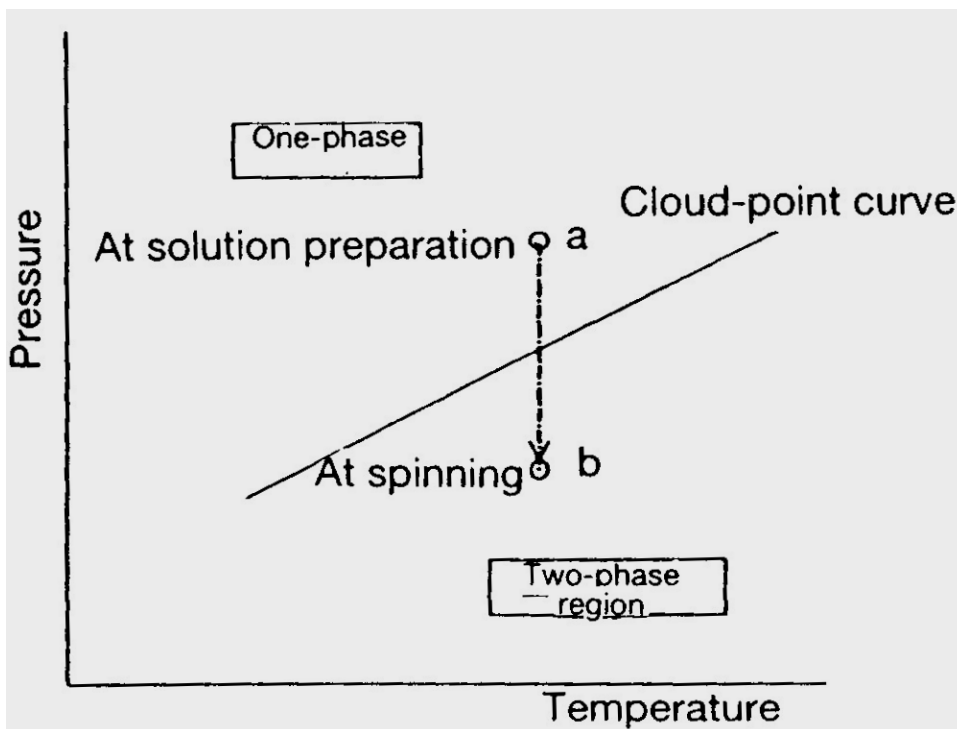


شکل ۶-۱۷- لیف تولید شده به روش Flash (در جدول ۱۰ فیلامنت Asahi kasei)

شکل (۶-۱۸) و شکل (۶-۱۹) رشته سازی جهت ریسندگی Flash و حالت محلول ریزی در هر مرحله را نشان می دهد. پلیمر در گاز مایع حل شده و در درجه حرارت بالا و تحت فشار زیاد به صورت محلولی همگن و شفاف در می آید. محلول ریسندگی سپس تحت پدیده جداسازی فاز مایع به مایع قرار گرفته و محلولی کدر بوجود می آید، که از طریق یک نازل به درون هوا به شکل الیاف شبکه ای تزریق می گردد. محلول همگن پلیمر که از طریق اکستروژن یا نگهداری درون اتوکلاو در دما و فشار بالا آماده سازی شده است، از میان نقطه a و سوراخ محفظه کاهش فشار b ریسیده میشود، (شکل ۶-۱۸). نظر به اینکه فشار نقطه a در محفظه b کاسته می شود، محلول پلیمری به دو فاز تفکیک شده و سپس از یک نازل به درون هوا جهت می شود. در فرآیند b تا c محلول (گاز مایع شده) بطور لحظه ای گاز شده و یک جریان جت تولید می کند. درجه حرارت به درجه حرارت اطاق کاهش یافته، پلیمر محلول به صورت جامد درآمده و تحت عملیات کشش قرار میگیرد تا به صورت لیفی با استحکام بالا تبدیل گردد. نظر به اینکه ریز فازهایی از حلال در پلیمر ژل در هنگام جت شدن بطور انفجاری دیسپرس می گردند، لیف حاصله شبکه ای بی نهایت ظریف از فیبریلهایی شبیه تار عنکبوت^۱ با سطح مقطع غیر مدور را تشکیل می دهد [۳۳].



شکل ۶-۱۸- تصویر عمومی نازل طراحی شده جهت ریسندگی Flash



شکل ۱۹-۶- دیاگرام فازی تشریح کننده اصول ریسندگی Flash

۳-۴-۶- ریسندگی مخلوط پلیمر

در این روش لیف مزدوج از طریق ریسندگی و کشش مخلوط دو جزئی پلیمر تولید می‌شود. آرایش یافتگی اجزا دیسپرس شده و دیسپری نشده (ماتریس) توسط نسبت مخلوط اجزا و ویسکوزیته مذابشان تعیین می‌گردد. UCC و دیگران هنگامی که در مورد ریسندگی Gut تحقیق می‌کردند، دریافتند که الیاف فوق ظریف غیر مداوم را می‌توان از طریق از بین بردن جزء ماتریس بدست آورد. Fukushima و دیگر همکارانش [۳۲] از Kuraray توانستند با موفقیت این روش را برای تولید چرم مصنوعی بکار بردند. براحتی می‌توان تجهیزات خط ریسندگی معمول را از طریق افزودن یک اکسترودر مخلوط کن^۱ به ریسندگی مخلوط پلیمری تبدیل نمود.

در اینجا، ظرافت لیف را نمی‌توان کنترل کرد و در طول مدت ریسندگی لیف پاره میشود، اگر چه ثبات ریسندگی شدیداً به ترکیب پلیمرها بستگی دارد. نظر به اینکه فاز پلیمر دیسپرس شده برای دستیابی به الیاف فوق ظریف کشیده می‌شود تاکنون از طریق ریسندگی مخلوط پلیمر فیلامنت مداوم الیاف فوق ظریف تولید شده است [۱].

۴-۴-۶- سایر ریسندگی های تصادفی

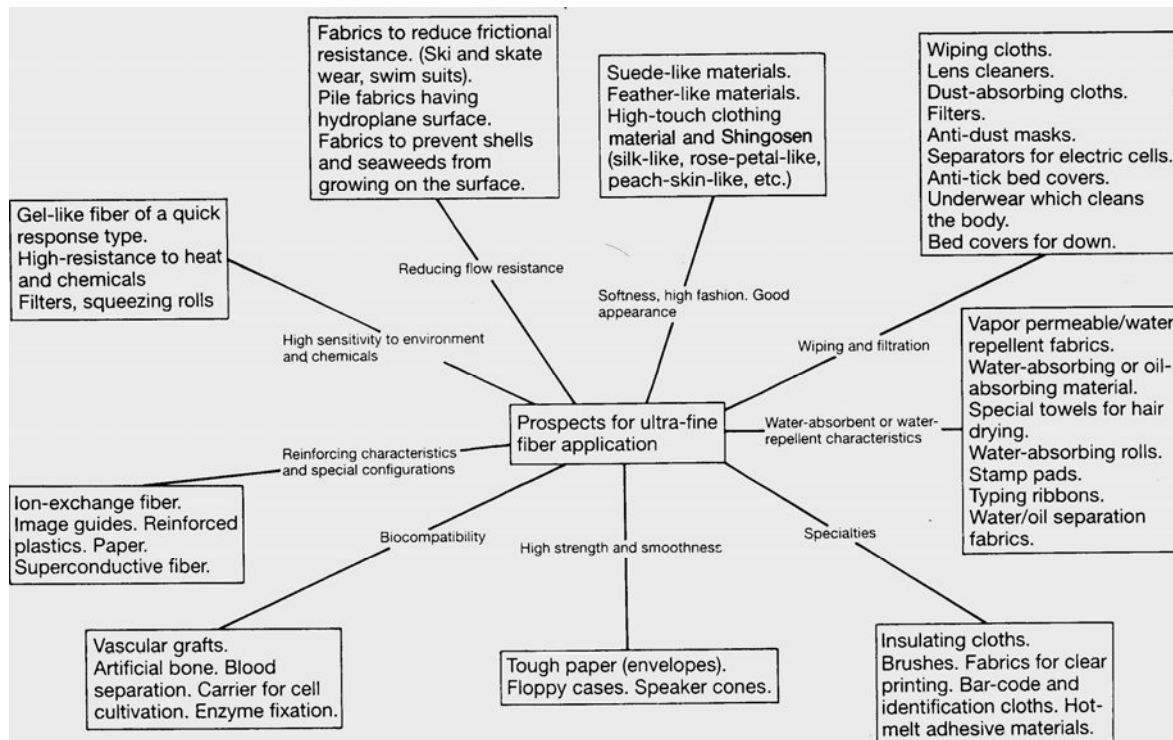
سایر روشهای ریسندگی تصادفی برای تولید الیاف فوق ظریف عبارتند از [۸-۱]:

- ۱- ریسندگی فوق سانتریفیوژی^۱ که لیف فوق ظریفی شبیه پشمک تولید می کند.
 - ۲- فیبریلاسیون توسط عملیات زدن^۲، در این روش لیف یا فیلم برای فیبریله شدن زده می شود.
 - ۳- فیبریلاسیون توسط جریان آشفته^۳ که پلیمر محلول در منطقه جریان آشفته منعقد می گردد.
 - ۴- ریسندگی انفجاری (روش صفحه دمنده)، که گاز یا مواد دمشی به درون پلیمر دمیده می شود تا در آن ایجاد حالت انفجاری کرده و الیاف کوتاه فوق ظریف تولید نماید
 - ۵- روش انحلال سطحی، سطح الیاف PET و غیره در محلولی قلیایی حل شده و بدین ترتیب الیاف ظریفتر می گردند.
 - ۶- شکل گیری الیاف بسیار ظریف همچنین توسط اعمال برس زدن، کاهش وزن از طریق کربونیزه کردن، ریسندگی Tack و فشار زیاد جریان آب امکان پذیر است.
- ۵-۶- نتیجه گیری
- لیف فوق ظریف، لیف ویژه ای نیست، اما می تواند بعنوان یک لیف اساسی مواد امروزی مورد توجه قرار گیرد. همانگونه که در شکل (۲۰-۶) نشان داده شده است زمینه های جدیدی برای استفاده از این الیاف انتظار می رود. تکنولوژی ریسندگی لیف فوق ظریف در آینده به سمت مرزهایش پیش خواهد رفت و اینگونه الیاف در زمینه های دیگر نیز کاربرد پیدا خواهند کرد.

- Ultra- centrifugal spinning

- Beating

- Turbulen flow



شکل (۲۰-۶) کاربردهای قابل انتظار برای الیاف فوق ظریف

ریسندگی الیاف نوری

۱-۷- مقدمه

انتقال سیگنال توسط نور به عنوان عامل مهم در پیشرفت رسانه های گروهی مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل انتقال نوری با استفاده از وسایل ارسال و دریافت نور و به ویژه لیف نوری به عنوان عضو اصلی اهمیت ویژه ای پیدا کرده است.

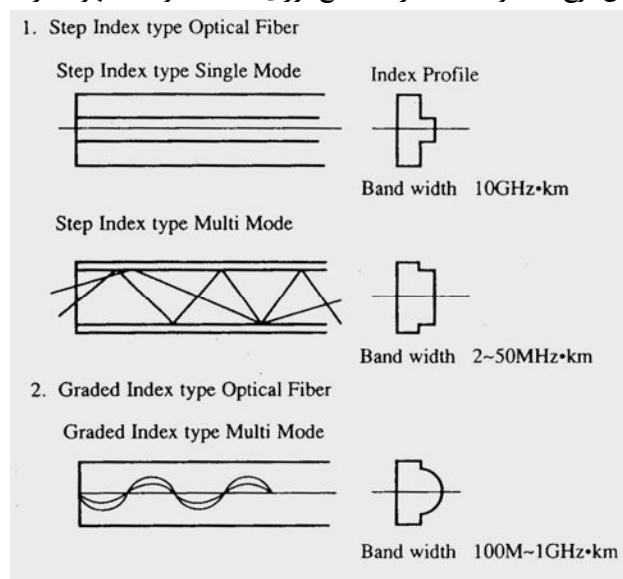
لیف نوری از یک انتقال دهنده نور که یک مغزی شفاف می باشد تشکیل شده که با موادی دارای ضریب شکست پایین تر پوشیده شده است. این الیاف با توجه به جنس مغزی به سه گروه الیاف نوری کوارتز، چند جزئی و پلاستیک (POF) تقسیم میشوند. الیاف کوارتز برای ارتباطات نوری جهت مسافتهای طولانی استفاده میشوند که شامل خطوط کابلی عمومی هستند، زیرا میزان اتلاف انتقال در آنها به کمی 1 dB/km یا حتی پایین تر از آن می باشد. الیاف نوری چند جزئی برای فواصل متوسط ارتباطی بین $1-2 \text{ km}$ استفاده میشوند که شامل شبکه های ناحیه ای محله ای (LAN) در کارخانه ها می باشند. الیاف نوری شیشه ای دارای یک نقیصه کلی می باشند زیرا فرآوری آنها نیاز به مهارت زیادی دارد به دلیل آن که گران و شکننده هستند و سخت فرآیند پذیر می باشند. الیاف نوری پلاستیکی دارای مزایای زیادی منجمله ارزانی، انعطاف، سبکی و راحتی فرآیند پذیری می باشند ولی میزان اتلاف انرژی در آنها بسیار زیاد و به اندازه $130-120 \text{ dB/km}$ می باشد. الیاف بطور گسترده ای برای انتقال امواج در فواصل کوتاه بکار می روند که شامل سنسورهای (حساسهای) نوری، انتقال دهنده نور در دستگاه و سیستمهای نمایش می باشند.

در اوایل دهه ۱۹۶۰ استفاده از پلی استایرن به عنوان ماده مغزی الیاف نوری پلاستیکی رواج داشت که میزان اتلاف انتقال در اینگونه الیاف باندازه 5000 dB/km بود. Du Pont در اواخر دهه ۱۹۶۰ شروع به تولید نوعی از الیاف نوری نمود که در آن از پلی متیل متاکریلات (PMMA) به عنوان مغزی استفاده می شد. کار Du Pont بوسیله Mitsubishi Rayon دنبال شد و الیاف نوری پلاستیکی خود را با مغزی PMMA در سال ۱۹۷۵ تولید کرد. اما این گونه الیاف فقط در چراغهای راهنمایی رانندگی، تابلو اعلانات و سیستم های نمایش کاربرد داشتند، زیرا اتلاف انتقال این نوع الیاف نیز مقدار قابل توجهی معادل 1000 dB/km بود. در نتیجه مطالعات و آنالیزهای تئوریک که در جهت بهینه سازی میزان اتلاف از طرف وزارت پست و تلگراف (اکنون NTT) در سال ۱۹۸۵ انجام شد مشخص گردید، حداقل میزان اتلاف انرژی (انتقال) بطور تئوریکی برای الیاف نوری پلاستیکی که در آنها از PMMA به عنوان ماده مغزی استفاده می شود به مقدار $34/9 \text{ dB/km}$ برای طول موج 568 nm می باشد [۱]. شرکت Mitsubishi Rayon تحقیقات خود را در جهت بهینه سازی اتلاف انتقال در مقیاس صنعتی سوق داد و توانست این مقدار را بترتیب در سالهای ۱۹۷۷، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۹ به 150 ، 300 و 120 dB/km در طول موج 650 nm کاهش دهد. از آنجائیکه امکان ارتباطات نوری فواصل دور ($180-150 \text{ m}$) بدین طریق میسر شد، استفاده از اینگونه الیاف نوری پلاستیکی به سرعت مرسوم و معمول شد. در این

بخش فرآیند تولید الیاف نوری پلاستیکی، روشهای کاهش اتلاف انرژی و جدیدترین الیاف نوری تولیدی از نوع چند جزئی بررسی میشوند.

۷-۲- ساختمان الیاف نوری پلاستیکی

ساختمان لیف نوری را میتوان از جهت روش های انتقال به دو نوع Step Index(SI) و Graded Index(GI) تقسیم نمود. این دو نوع انتقال دارای ویژگیهای خاصی میباشند که در شکل (۷-۱) نشان داده شده است. الیاف پلاستیکی نوری تجاری از نوع SI هستند و نوع GI هنوز بصورت تجاری در نیامده است. مقدار افت انتقال و پهنای باند انتقال الیاف نوری پلاستیکی نوع GI بترتیب 134 dB/km و 360 MHz.Km میباشد [۲]. اخیراً نوعی از الیاف نوری پلاستیکی SI از نوع Single Mode تولید شده و گونه های مختلفی از آن عرضه شده اند [۳]. ابعاد ساختمان لیف نوری پلاستیکی با ماده مغزی PMMA استاندارد است بدین طریق که قطر مغزی و ضخامت غلاف یک لیف نوری پلاستیکی که قطر خارجیش $1000 \mu\text{m}$ است بترتیب باید $980 \mu\text{m}$ و غلافش $10 \mu\text{m}$ باشد، (شکل ۷-۱). نسبت مساحت مغزی چنان بزرگ است که با متصل نمودن این نوع لیف و لیف دیگر به منبع نوری کاملاً تفاوت مشهود خواهد بود.



شکل ۷-۱- توزیع ضریب شکست در الیاف نوری و پهنای باند انتقالی آنها

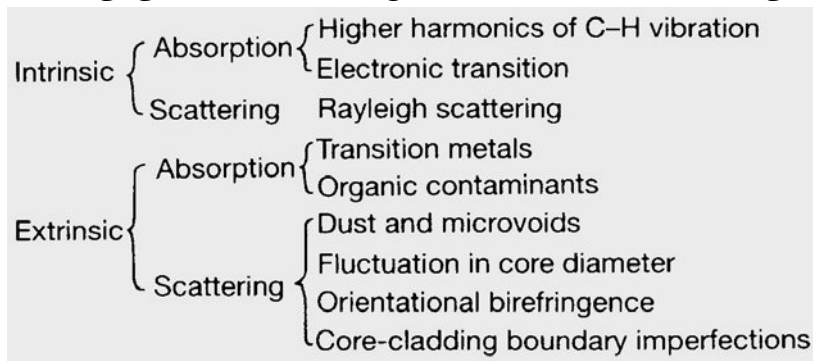
۷-۳- مواد لیف نوری پلاستیکی

مواد تشکیل دهنده لیف نوری پلاستیکی خواه مغزی و خواه غلاف باید از شفافیت بالائی برخوردار باشند اگر چه معمولاً از PMMA و پلی کربنات (PC) بعنوان ماده مغزی استفاده می شود، اما مواد دیگر نیز نظیر رزین های ترموست و

سیلیکونی، کوپلیمر انیدرید MMA- methacrylic، کوپلیمر انیدرید MMA-maleic و کوپلیمر ایزومرهای MMA-methacrylicimide نیز مورد توجه می‌باشند. از آنجا که باید ضریب شکست مواد غلاف پایین تر از ضریب شکست مواد مغزی باشند، بنابراین از مواد fluoroplastics شامل: پلی Teflon AF, vinylidene fluoride، Teflon FEP، fluorinated methacrylate و fluoroinated polycarbonate، بیشتر استفاده می‌شوند. در برخی از الیاف نوری پلاستیکی از پلی کربنات فلورینه شده بعنوان مغزی و از پلی متیلن پنتن با ضریب شکست ۱/۵۹ بعنوان غلاف استفاده شده است.

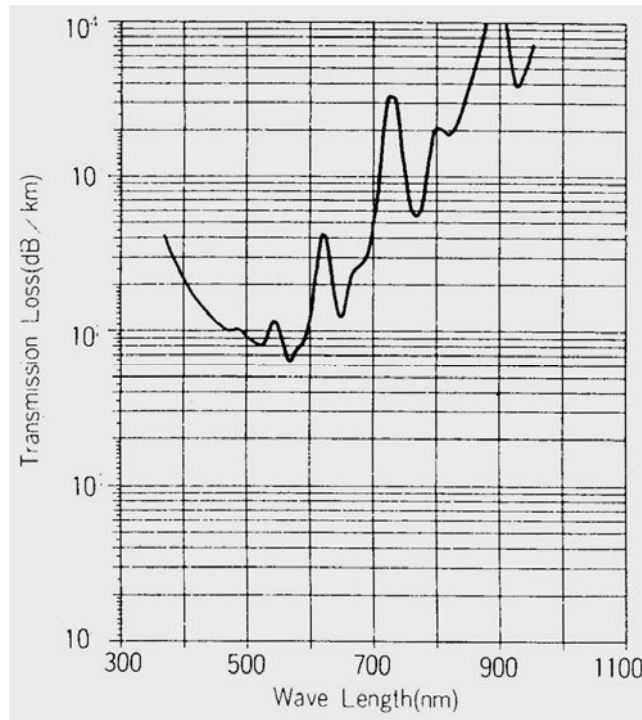
۴-۷- دلائل افت انتقالی لیف نوری پلاستیکی

علل افت انتقالی الیاف نوری پلاستیکی در شکل (۲-۷) لیست شده اند. دلائل افت را میتوان مربوط به دو دسته کلی شامل افت ذاتی ناشی از خود ماده و افت خارجی ناشی از تکنولوژی تولید دانست. Kaino به صورت تئوری در مورد افتهای داخلی شامل افتهای ناشی از جذب و پخش برای لیف پلاستیکی با مغزی PMMA تحقیقاتی انجام داد و حدس زد که اندازه این افت داخلی حدود $106/2 \text{ dB/km}$ برای طول موج 650 nm در LED مرئی می‌باشد [۱].



شکل ۲-۷- عوامل افت انتقالی برای الیاف نوری POF

افتهای انتقالی معمول بر حسب طول موج برای لیف های Eska Extra (تولید کارخانه Mitsubishi-Rayon) که پایین ترین افت انتقال را در بین الیاف نوری پلاستیکی تجاری مرسوم دارد در شکل (۳-۷) آورده شده است. اگر چه افت انتقال در طول موج 568 nm در حدود $60-70 \text{ dB/km}$ میباشد که حدود $30-40 \text{ dB/km}$ از اندازه حد افت کمتر است ولی این افت هنگامیکه الیاف در مقیاس صنعتی تولید شوند به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا خواهد کرد. مقدار این افت انتقالی جهت الیاف صنعتی برابر با 120 dB/km در طول موجی نزدیک 650 nm در LED مرئی می‌باشد. که برای ارتباطات استفاده شده است و نزدیک به مرز حداقل 106 dB/km می باشد که توسط Kaino محاسبه شده است. اکنون فرآیند تولید تجاری لیف نوری پلاستیکی کم افت با استفاده از PMMA بعنوان ماده مغزی شرح داده خواهد شد.



شکل ۳-۷- افت انتقال جهت الیاف Eska Extra بر حسب طول موج

۵-۷- فرآیند تولید لیف پلاستیکی نوری با مغزی PMMA

روندی کلی از فرآیند تولید لیف نوری پلاستیکی با مغزی PMMA در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. اگر چه جهت تولید میتوان هر دو روش پلیمریزاسیون سوسپانسیون^۱ و توده را به کار برد ولی در روش توده میزان افت انتقالی کمتر خواهد بود. علت این موضوع آنست که در این فرآیند پلیمریزاسیون میزان مصرف مواد آغاز کننده پلیمریزاسیون و اصلاح کننده وزن مولکولی به مقدار چشمگیری کمتر می باشد.

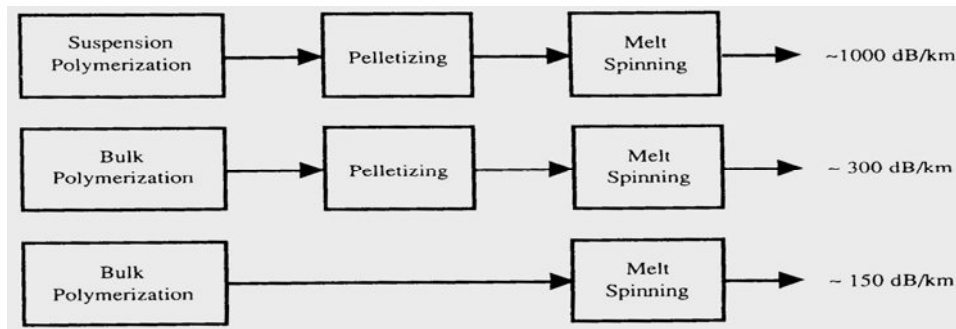
اما از طرف دیگر باید به این نکته نیز توجه شود که بعلاوه فرآیند ساچمه ای^۲ نمودن ماده مغزی در این روش و بواسطه فرآیند ذوب ریزی جهت تولید لیف نوری پلاستیکی میزان افت انتقالی مقداری افزایش پیدا خواهد کرد.

برای اولین بار کارخانه Mitsubishi Rayon در سال ۱۹۷۰ توانست PMMA با درجه خلوص بالا را از روش پلیمریزاسیون توده از MMA تولید نماید. بر پایه نتایج عملی بدست آمده از این عملیات Mitsubishi Rayon در سال ۱۹۸۳ با ادغام فن آوری پلیمریزاسیون مداوم MMA و ذوب ریزی الیاف پلی پروپیلن و پلی استر، Eska Extra را

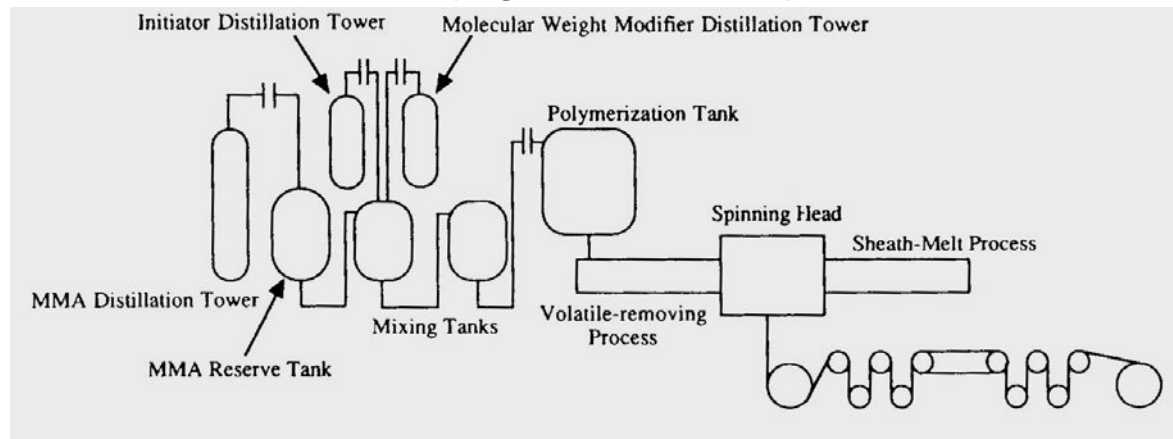
- Suspension polymerization

- Pellet

بعنوان لیف نوری پلاستیکی جهت ارتباط به بازار عرضه کرد. افت انتقالی این لیف نصف الیاف مرسوم بوده و فاصله انتقال به ۱۵۰ m افزایش یافت. فرآیند تولید این لیف در شکل (۷-۵) آورده شده است.



شکل ۷-۴- روش های فرآوری و افت های انتقالی منتج از POF با مغزی PMMA



شکل ۷-۵- فرآیند کلی تولید POF

MMA شامل یک بازدارنده پلیمریزاسیون می باشد که باید به وسیله تقطیر برطرف شود. اگر از مشتقات hydroquinone بعنوان بازدارنده استفاده شود این ماده در محصول نهایی باقی مانده و باعث جذب طول موجهای مرئی می شود.

اکسیژن حل شده در منومر با منومر یا ماده تعدیل کننده وزن مولکولی در روند پلیمریزاسیون ترکیب شده و تشکیل پر اکسید می دهد که PMMA را رنگی می کند. پراکسیدهای MMA موجود در منومر نیز باید برطرف شوند. این پراکسیدها را میتوان با انجام پیش عملیات بوسیله مواد احیا کننده و بدنبال آن تقطیر برطرف نمود. روشهای گوناگون برای از بین بردن مواد اضافی که روی طول موجهای مرئی تأثیر می گذارند شرح داده شده اند [۴].

بعد از زدودن ماده جلوگیری کننده پلیمریزاسیون و ماده تعدیل کننده وزن مولکولی از منومر بوسیله تقطیر و همچنین برطرف کردن کلی ناخالصیها بوسیله فیلترهای فاز مایع و بخار، منومر آماده پلیمریزاسیون خواهد شد. فیلتر فاز

بخاری که از نخهای توخالی با روزه های $700 A^\circ$ تولید شده باشد جهت این منظور مناسب میباشد [۵]. روش های دیگری نیز برای فرآیند خالص سازی منومر پیشنهاد شده است [۶].

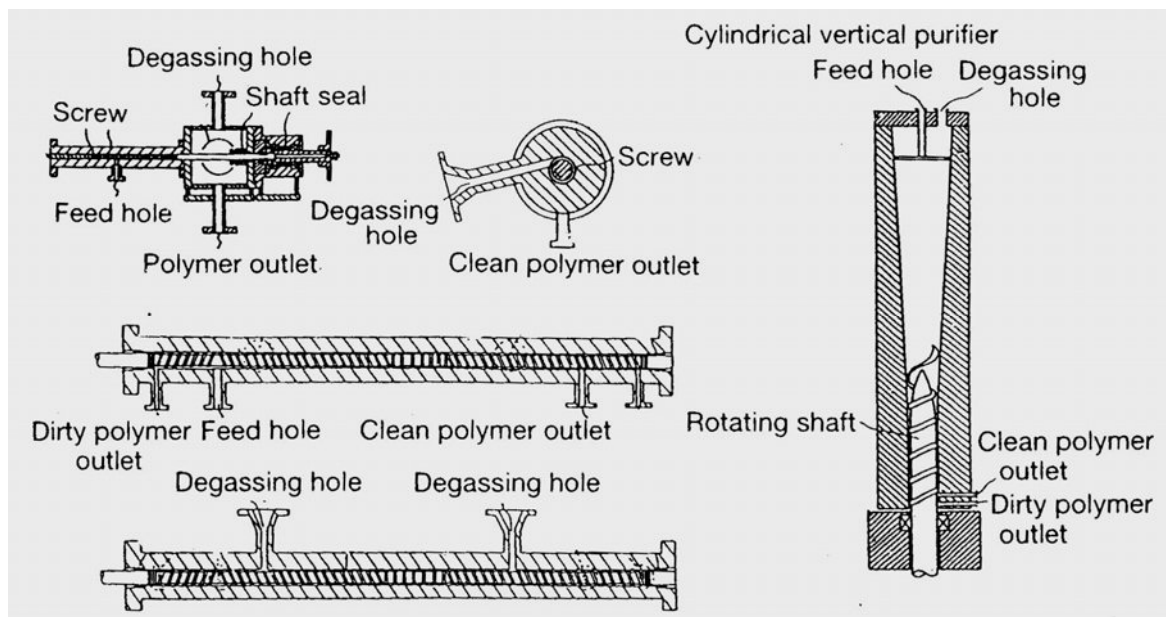
همان طور که ذکر شده پلیمریزاسیون به روش توده جهت تولید الیاف نوری پلاستیکی مناسبتر میباشد، زیرا که در این فرآیند پلیمریزاسیون بجز از ماده جلوگیری کننده پلیمریزاسیون و ماده تعدیل کننده وزن مولکولی آن هم به میزان کم از ماده دیگری استفاده نمی شود.

Mitsubishi Rayon فرایندی را جهت تولید PMMA ارائه کرد. این روش پلیمریزاسیون مداوم MMA به روش بالک بود که بدنبال آن فرایندی جهت زدایش مواد فرار مانند منومرهای عمل نکرده انجام می گیرد. PMMA تولید شده در این فرآیند توسعه یافته جدید بگونه ای است که پلیمریزاسیون MMA با استفاده از دهها ppm از ماده آغاز کننده پلیمریزاسیون و ماده تعدیل کننده وزن مولکولی در دمای $180^\circ C - 130^\circ C$ طی چندین ساعت انجام می شود و $60 wt\%$ وزنی پلیمر تولید می شود و سپس مواد فرار شامل منومرها و ماده تعدیل کننده وزن مولکولی عمل نکرده حذف میشوند. این فرآیند پلیمریزاسیون بخش اساسی و ضروری فرآیند تولید لیف نوری Eska Extra می باشد.

برای اینکه پلیمریزاسیون پایدار باشد حائز اهمیت است که مخلوط یکنواختی از منومر و پلیمر تولید شود. از آنجائیکه پایان واکنش بواسطه بالا رفتن ویسکوزیته در واکنش پلیمریزاسیون به تعویق می افتد. پلیمریزاسیون می تواند بواسطه تأثیر ژل شدن (ناشی از غلظت بالا) منحرف شود و به سمتی نامطلوب حرکت نماید. بنابراین ضروری است که حرارت پلیمریزاسیون را برطرف نمود که این کار با پایین نگه داشتن ویسکوزیته زیر مقدار مشخصی و همزدن یکنواخت محصول پلیمریزاسیون انجام میگردد. از آنجائیکه اختلاف در درجه پلیمریزاسیون و ویسکوزیته مخلوط باعث اختلاف در انتقال مخلوط و فرآیند های برطرف کردن مواد فرار می شود افت انتقال الیاف نوری پلاستیکی میتواند متفاوت باشد.

ترجیحاً باید درجه پلیمریزاسیون پایین نگه داشته شود بطوری که اثر ژل شدن از بین برود. با افزایش درجه حرارت پلیمریزاسیون اولیگومرهای شامل دی مر MMA بعنوان محصولات جانبی تولید میشوند. از آنجائیکه اولیگومرها به شدت در مقابل حرارت ناپایدارند به راحتی رنگی شده و باعث افزایش جذب الیاف نوری پلاستیکی میشوند [۷].

کار اصلی و عمده فرآیند زدایش مواد فرار برطرف نمودن مواد فراری نظیر منومر در حداقل درجه حرارت ممکن جلوگیری از حرارت دیدن موضعی پلیمر بواسطه برشهای شدید، جلوگیری از تشکیل هر گونه فضای مرده در دستگاه و همچنین جلوگیری از تولید ناخالصیها در دستگاه می باشد. دو روش برای اینگونه فرآیندها (برطرف کردن مواد فرار) پیشنهاد شده اند که در شکل (۶-۷) آورده شده است. اکنون به جزئیات این دو فرآیند پرداخته می شود [۸، ۹].



شکل ۶-۷- نمای کلی از فرآیند زدایش مواد فرار

۷-۵-۱- اکسترودرهایی با منفذ گازگیر

در اکسترودرهای معمول مجهز به مجاری گازگیری، یک مجرای گازگیری رو به بالا به سرخط تخلیه مربوط به روزنه تغذیه مخلوط متصل شده و مستقیماً به سیلندر رشته ساز متصل شده است. اما در اکسترودرهای نوین مجرای تخلیه پشت روزنه تغذیه مخلوط ثابت شده بطوریکه قسمتی از مخلوط به واسطه کانالی مارپیچی با گام معکوس رانده می‌شود، بگونه ای که مواد فرار دائماً به‌همراه مخلوط از سیستم تخلیه میشوند بدون آنکه با ناخالصیهای تولید شده منتج از سایش جداره شفت با پلیمر مخلوط شود.

از آنجائیکه جهت مجرای گازگیر افقی است پلیمر به همراه منومری که از آن تخلیه می‌شود به کانال مارپیچ^۱ برنمی‌گردد بنابراین پلیمر بدون ناخالصی از انتهای اکسترودر بیرون می‌آید.

۷-۵-۲- خالص کننده سیلندری عمودی

مخلوط از روزنه کوچکی در انتهای لوله تغذیه مقابل قسمت بالایی دیواره سیلندر وسیله برطرف کننده مواد فرار تغذیه می‌شود. درجه حرارت دیواره داخلی پیشاپیش کنترل می‌شود به طوری که ویسکوزیته محلول در مقدار 5000 poise یا کمتر از آن نگه داشته شود. مواد تغذیه شده به سمت پایین جاری می‌شود و روی دیواره حرارتی به شکل فیلم جریان پیدا می‌کند. از آنجا که سیلندر بواسطه مجاری گازگیر تخلیه می‌شود مواد فرار داخل مخلوط به طور

¹ - Screw channel

موثری تبخیر می‌شود. پلیمر عاری از مواد فرار به مخزن پلیمر واقع شده در منطقه هواگیری تغذیه می‌شود که طی این عمل همواره باید سطح آزادش در ارتفاع ثابتی در قسمتی پایین تر از سیلندر قرار گیرد. بواسطه همزدنهای ملایم مواد فرار محبوس شده به شکل حباب در داخل این ماده مذاب آزاد میشوند. سپس پلیمر تحت فشار به سمت پایین به داخل مارپیچ رانده شده و از خروجی آن تخلیه می‌شود. بواسطه تخلیه آلودگی‌ها از قسمت زیرین مارپیچ و از طریق مجرایی جداگانه پلیمر از آلوده شدن حفظ می‌گردد. از آنجائیکه این روش خالص سازی با شفت دوار عمودی انجام می‌شود، میزان ارتعاش بسیار کم بوده و پلیمر هرگز با مواد ناشی از سایش آلوده نمیشود. مسئله مهم در فرآیند برطرف نمودن مواد فرار و حل شدن فلزات ناشی از لوله های فلزی مارپیچ و سیلندر می‌باشد.

فلزات ناشی از دستگاه باعث افت انتقالی در این لیف نوری پلاستیکی می‌شود. تأثیر این مواد در جدول (۷-۱) نشان داده شده است. در این زمینه تأثیرات کبالت و کروم در ناحیه مرئی قابل توجه می‌باشند [۱۰].

جدول ۷-۱- تأثیر فلزات روی افت انتقالی: مقادیر لازم جهت ایجاد افت ۱۰ dB/km

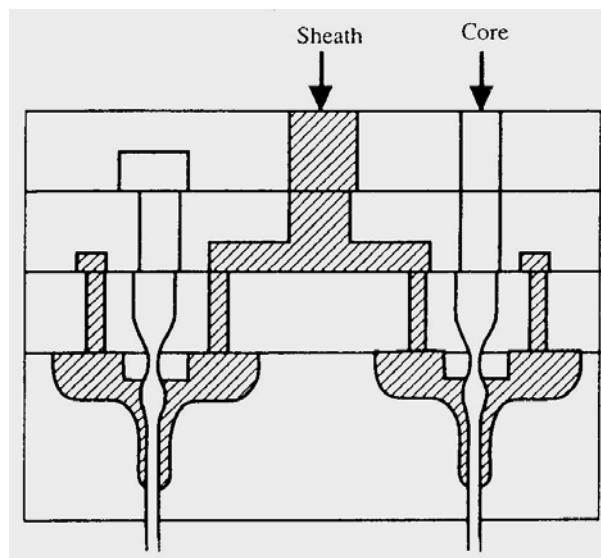
Wavelength	Co	Cr	Mo	Fe	Cu	Ni
630nm	2	10	200	500	30	70
850nm	*	*	*	120	30	30

Units ppb, except * > ppm

۷-۶- روش های ریسندگی الیاف نوری پلاستیکی با مغزی PMMA

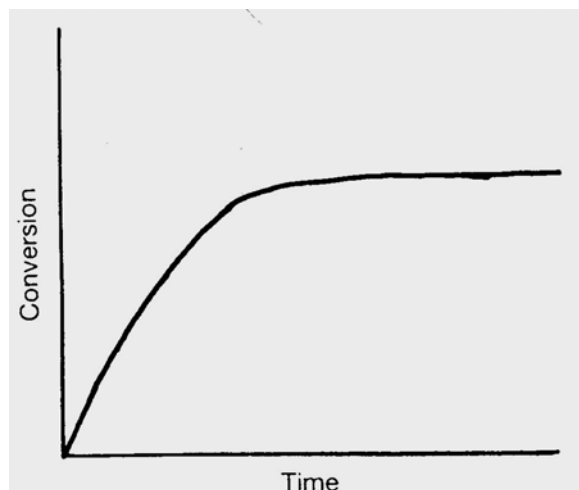
مواد مغزی ذوب شده در فرآیند زدایش مواد فرار از طریق پمپهای چرخ دنده ای به صورت ثابتی به نازل ریسندگی مخصوص غلاف- مغزی تغذیه می‌شود. شکلی کلی از این نازل در شکل (۷-۷) آورده شده است. در ریسندگی لیف نوری پلاستیکی رعایت موارد زیر الزامی است:

- ۱- اجتناب از توقف طولانی پلیمر در لوله ها و دستگاه
- ۲- اجتناب از تولید مواد خارجی توسط دستگاه
- ۳- طراحی نازل ریسندگی مناسب (High-level)
- ۴- بهینه نمودن ویسکوزیته مواد مغزی و غلاف ذوب شده



شکل ۷-۷- نازل ریسندگی جهت ریسندگی غلاف مغزی

ضروری است که طول لوله بعد از فرآیند پلیمریزاسیون حداقل ممکن باشد و با الکترو پولیش کردن سطح داخلی لوله مقاومت سطحی آن را کاهش داد. همچنین ضروری است که شعاع خم لوله را تا حد ممکن بزرگ در نظر گرفت. بعلاوه باید پلیمرهای مرده را خارج نمود تا از اقامتش در ته لوله دستگاه جلوگیری شود. همان طور که در شکل (۷-۸) شرح داده شده است، پلیمرهای مرده پلیمرهایی می‌باشند که بعد از گذشت مدت زمانی پیشرفت نداشته باشد. برای جلوگیری از تولید ناخالصیهای خارجی به واسطه دستگاه، وسایل زدایش مواد فرار مکانیزمی جهت تخلیه پلیمر آلوده شده از قسمت ماردونی دریچه گازگیر دارند. که در بخش (۷-۵) شرح داده شده است. این وسایل همچنین یک پمپ چرخ دنده ای دارند که دائماً آلودگیهای تولید شده از قسمت‌های چرخنده را خارج می‌کنند [۱۱]. افت انتقالی منتج از ساختمان لیفی ناقص یعنی سطح مشترک نامنظم و قطر نایک‌نواخت مغزی عمدتاً ناشی از فرآیند می‌باشند. طراحی بهینه نازل ریسندگی و سازگاری سیالیت پلیمر با شرایط ریسندگی عوامل اساسی جهت کاهش افت می‌باشند.



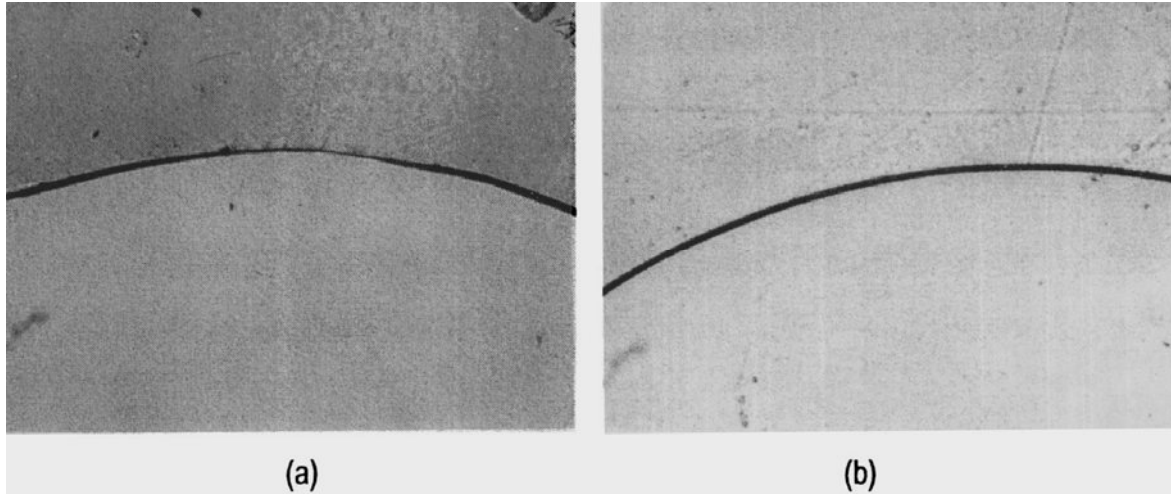
شکل ۸-۷- پلیمرهای مرده: تغییر با زمان

مشخصات مهم بخشهای مختلف نازل‌های ریسندگی در جدول (۷-۲) آورده شده است. از آنجائیکه افت انتقالی الیاف نوری پلاستیکی به واسطه تغییر رنگ ماده مغزی در اثر حرارت افزایش می یابد، باید ریسندگی آن در حداقل دمای ممکن انجام شود. اما از طرفی در دماهای پایین ویسکوزیته ماده مغزی مذاب به دهها هزار پویز افزایش می یابد. با ثابت نگه داشتن میزان تنش برشی به مقدار 10^6 dyn/cm^2 یا کمتر از آن در نازل میتوان شرایط عملیاتی شامل وزن مولکولی، درجه حرارت و قطر داخلی و خارجی نازل را در حالت بهینه نگاه داشت و از گسستگی پلیمر مذاب جلوگیری نمود.

جدول ۲-۷- روشهای بهینه سازی نازل فرآیند

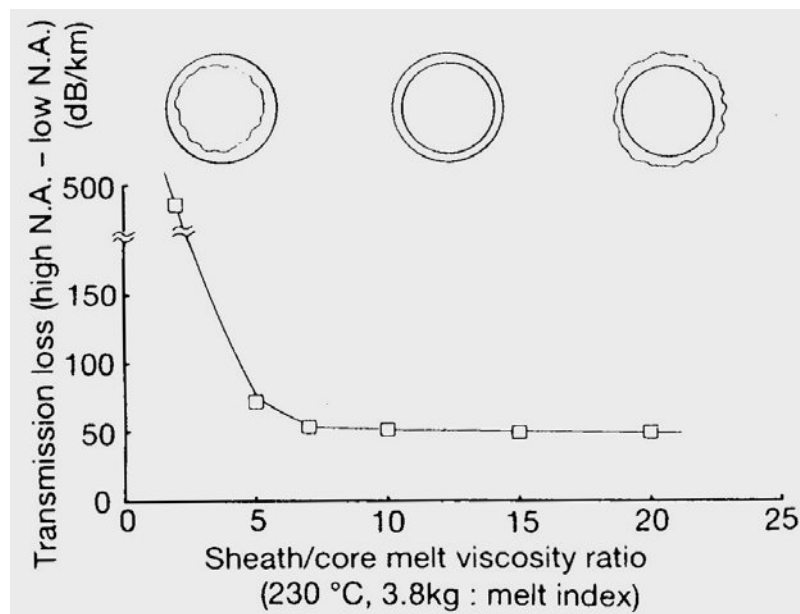
Processing region	Fiber shape	Requirement
Inner wall of nozzle	Imperfections of core-sheath inner surface Fluctuation in outer diameter	Improvement of wall smoothness
Core-sheath junction	Core, sheath concentricity Imperfections of core-sheath surface	Improvement of accuracy of nozzle Improvement of accuracy of nozzle plate setting
Nozzle length	Imperfections of core-sheath inner surface Fluctuation in outer diameter	Longer Shorter

روش ذوب ریسی جهت تولید الیاف کامپوزیتی و فیلم های چند لایه بکار می رود. نکته قابل توجه در این فرآیند آن است که احتمال نایکنواختی در شکل سطح مشترک بین این دو ماده بسیار محتمل است. در این روش طی عبور دو پلیمر از روزنه گرد رشته ساز پلیمر با ویسکوزیته زیادتر در داخل پلیمر با ویسکوزیته کمتر قرار میگیرد به دلیل آنکه موادی که ویسکوزیته کمتر دارند تمایل به حرکت به سمت نواحی با میزان تنش برشی زیادتر در سطح رشته ساز را دارند [۱۳، ۱۲]، و بدین صورت غلاف را تشکیل می دهند. از آنجائیکه همواربودن سطح مشترک بین هسته و غلاف مهم است ویسکوزیته مذاب این دو پلیمر باید بهینه شود. تصاویر سطح مقاطع الیاف نوری پلاستیکی وقتی که نسبت ویسکوزیته پلیمر مغزی به غلاف ۱ و ۲ بوده در شکل (۷-۹) آورده شده است. سطح مشترک بین مواد در نسبت ویسکوزیته ناهموار و ناصاف است در حالیکه وقتی این نسبت به ۲ می رسد، این سطح هموار می شود. شکل (۷-۱۰) رابطه بین نسبت ویسکوزیته مغزی به غلاف و افت انتقالی الیاف نوری پلاستیکی مربوطه را نشان می دهد. اگر چه افت انتقال به واسطه افزایش نسبت ویسکوزیته به ۱۰ یا بالاتر کاهش می یابد، اما باید در نظر داشت که با افزایش این نسبت و یا عبارتی با کاهش ویسکوزیته پلیمر غلاف نایکنواختی قطر خارجی لیف حاصله به شدت افزایش پیدا خواهد کرد. مفهوم رابطه بین ویسکوزیته های مواد مغزی و غلاف و سطح مقطع الیاف نوری پلاستیکی منتج در شکل (۷-۱۰) آورده شده است.



شکل ۹-۷- ارتباط بین مغز و غلاف الیاف نوری POF از نظر ویسکوزیته مذاب و سطح مقطع مغزی: PMMA.

غلاف پلیمر متاکریلات فلورینه شده. شاخص ذوب $3/8 \text{ kg} \cdot \text{c} / 230^\circ$ ، نسبت ویسکوزیته مغز - غلاف (a) ۱، (b) ۲ تحقیقات برای کاهش افت انتقالی الیاف نوری پلاستیکی به شدت ادامه یافت و توانسته اند برای الیاف تجاری از این نوع به مقادیر افتی برابر 120 dB/km در طول موج 650 nm دستیابند. از آنجائیکه امکان کاهش مقادیر افت در الیاف با مغزی PMMA تا میزان 20 dB/km نیز وجود دارد، باید تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه سازی فرآیند و مواد آن انجام گیرد. جهت کاهش بیشتر میزان افت انتقالی ناگزیر باید از پلیمرهای دیگری مانند پلیمرهای فلور استفاده شود، که در صورت امکان استفاده از این مواد میتوان میزان افت را حتی تا 5 dB/km نیز کاهش داد.



شکل ۷-۱۰ - رابطه بین نسبت ویسکوزیته مذاب و افت انتقالی مغزی / غلاف

۷-۷-۷- فرآیند های دیگر تولید الیاف نوری پلاستیکی

۷-۷-۷-۱- فرآیند تولید لیف نوری پلاستیکی با مغزی PC

لیف نوری پلاستیکی با مغزی PC دارای مقاومت حرارتی 120°C یا بالاتر می باشد که حدود 30°C از الیاف مشابه با مغزی PMMA بالاتر است. بعد از تجاری کردن این محصول توسط کارخانه Mitsubishi Rayon در سال ۱۹۸۶ تولید کنندگان دیگری نیز آن را بصورت تجاری تولید کردند. پلیمر PC در حلالی آلی حاوی متیلن کلراید حل می شود و مواد عمل نکرده و محصولات جانبی شستشو برطرف میشوند. پلیمر حاصله را میتوان بوسیله برطرف کردن حلال با روش اسپری خشک بازیابی نمود. این پلیمر بازیابی شده را باید معمولاً با روش ذوب ریسی در دمایی بالاتر از نقطه ذوب کریستالی (245°C) بصورت ساچمه در آورد. اما این پلیمر در دمای بین 280°C تا 320°C مورد تجزیه حرارتی مولکولی قرار میگیرد. اگر چه امکان استفاده از پلت های PC حاوی مواد ناشی از تجزیه حرارتی در ذوب ریسی الیاف نوری پلاستیکی وجود دارد، ولی الیاف حاصله دارای قدرت انتقالی بالائی نخواهد بود [۱۴]. بنابراین لازم است که جهت تولید الیاف با قدرت انتقالی بالا مرحله پلت نمودن پلیمر را حذف نمود و مستقیماً عمل ذوب ریسی را روی پلیمر حاصله از فرآیند پلیمریزاسیون انجام داد. بعلاوه باید از کریستاله شدن پلیمر ضمن ذوب ریسی جلوگیری کرد. با توجه به آنکه نقطه کریستالی شدن PC در دمای 190°C در حد اکثر میزان خود قرار دارد دمای محفظه در ذوب ریسی باید 210°C یا بالاتر باشد.

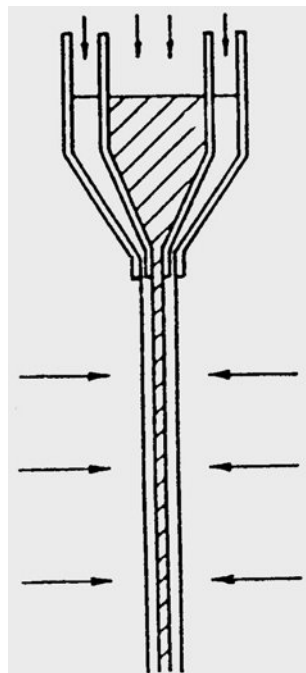
۷-۷-۷-۲- فرآیند تولید لیف نوری پلاستیکی با مغزی از جنس مواد سیلیکونی آلی

مشخصه این الیاف انعطاف و مقاومت نسبت به حرارت و مواد شیمیایی می‌باشد. کارخانه Sunitomo Denko این نوع لیف را با استفاده از لاستیک سیلیکونی بعنوان مغزی و تفلون FEP بعنوان غلاف بصورت تجاری تولید نموده است. سه مرحله تولید این لیف بقرار زیر می‌باشند:

۱- مخلوطی از vinyl alkyl siloxane و کاتالیست پلاتین فیلتر شده به داخل لوله ای توخالی از جنس کوپلیمر tetra fluoroethylene/ hexa flouoropropylene(FEP) تحت خلا تغذیه می گردد و بدنبال آن عملیات پلیمریزاسیون حرارتی انجام میگیرد [۱۵].

۲- مخلوط پلیمر siloxane مایع و hydrogen chloroplatinate بعنوان ماده مغزی و پلیمر siloxane مایع با ضریب شکستی پایین تر از نوع بکار رفته در مغزی بعنوان غلاف استفاده میشوند. این دو ماده همزمان از طریق نازل‌های ۲ mm (مغزی) و ۴ mm (غلاف) (شکل ۱۱-۷) به داخل هیتری جهت برقراری اتصالات جانبی تغذیه میشوند [۱۶].

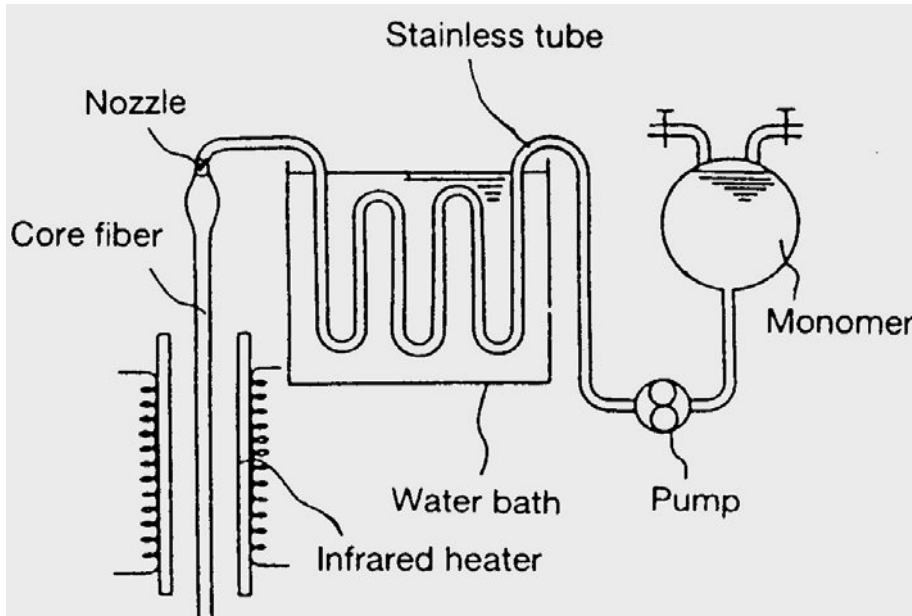
۳- راه دیگر تولید لیف مغزی از طریق شرح داده شده در قسمت دوم سپس پوشش دادن کامل آن با ماده غلاف می‌باشد [۱۷].



شکل ۱۱-۷- فرآیند تولید POF با مغزی سیلیکون آلی

۳-۷-۷- فرآیند تولید لیف نوری پلاستیکی با مغزی از جنس رزین ترموست

از آنجائیکه این الیاف خاصیت ثابت شکل خوبی را در درجه حرارت بالا دارند کارخانه Hitachi Densen این محصول را تولید نموده و آنرا روانه بازار کرد. در لیف تولیدی رزینی ترموست بعنوان ماده مغزی و از Teflon FEP بعنوان ماده غلاف استفاده شده است. منومر از طریق پمپی به داخل یک لوله استیل ضد زنگ که با تفلون پوشانده شده، تغذیه میگردد و در داخل مخزن آب گرمی پلیمریزه می‌شود، تا ویسکوزیته پلیمر به 10^4 Poise برسد. پلیمر حاصله از نازل رسیده شده و به شکل لیف در می‌آید. این لیف رزینی با عبور از داخل هیترمادون قرمز حرارت دیده و ماده مغزی را تشکیل می‌دهد (شکل ۷-۱۲). در نهایت این ماده مغزی با ماده غلاف پوشش داده می‌شود [۱۸].



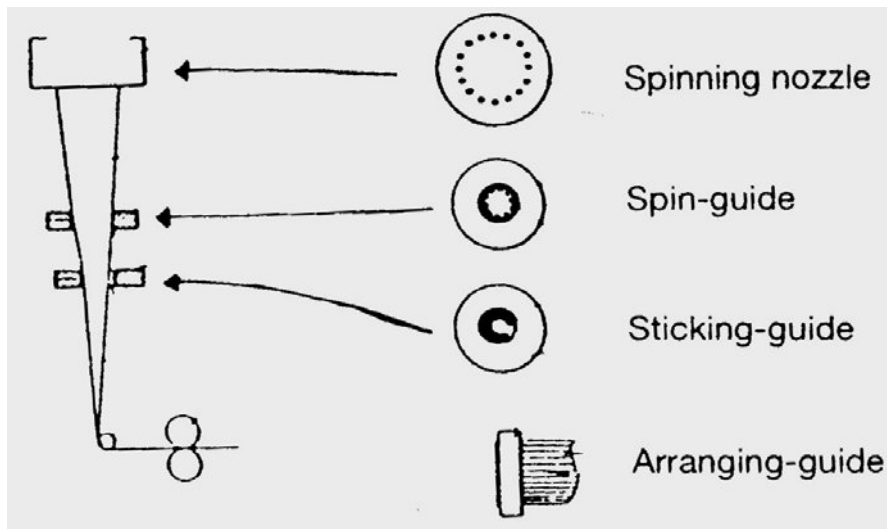
شکل ۷-۱۲- فرآیند جهت تولید POF با مغزی از نوع رزین ترموست

۷-۸- لیف نوری پلاستیکی چندین جزئی جهت انتقال تصویر

انتظار می‌رود که کاربردهای متعدد الیاف نوری نظیر انتقال دهندگان نور، حساسهای نوری، الیاف شاخه دار نوری و راهنماهای تصویری گسترش یابد. در همین راستا الیاف نوری پلاستیکی از نوع: Sheet- Type و Block- Type نیز توسعه یافته‌اند. الیاف مشابه با این نوع الیاف در حال حاضر با آرایش دادن دقیق فیلامنتها کنار هم تولید میشوند که فرآیندی زمان بر است به همین علت فرآیند ذوب ریسی چندین جزء با همدیگر رو به رشد است. حال به توضیح فرآیند و حالت‌های خاص آن پرداخته می‌شود.

۷-۸-۱- الیاف نوری پلاستیکی نوع ورق‌های (Sheet type)

این نوع الیاف بعنوان سنسور نوری و راهنمای تصویری جهت خواندن نقوش و تشخیص عیوب بکار می روند. روش تولید اینگونه الیاف به شرح زیر می باشد. مواد مغزی و غلاف به همان طریق که لیف تک فیلامنت ریسیده میشوند از طریق نازل مغزی - غلاف ریسیده میشوند. تفاوتی که در اینجا وجود دارد آن است که نازل دارای تعداد زیادی منافذ منظم (همانند شکل ۷-۱۳) می باشد و بدین طریق تعداد زیادی فیلامنت تولید می شود. الیاف تولید شده بواسطه عبور از راهنمای ریسندگی^۱ به همدیگر نزدیک میشوند. بواسطه عبور الیاف از راهنمایی دیگر که بصورت جداگانه زیر راهنما قبلی قرار دارد الیاف به هم چسبیده و به شکل قوسی دایره ای در می آیند. سپس از داخل راهنمای سوم (arranging guide) که زیر راهنمای دوم قرار دارد رد شده و منظم میشوند. این الیاف منظم شده که کاملاً مستقیم شده اند توسط غلتکهای (nip) کشش داده میشوند و به شکل ورقه^۲ در می آیند از آنجا که فاصله بین نازل ریسندگی الیاف تا راهنمای اول برابر است میتوان انتقال دهنده های نوری یکنواختی از نوع ورقه ای تولید نمود که ضمن فرآیند تغییر شکل ندهند [۱۹].



شکل ۷-۱۳- فرآیند تولید الیاف نوری POE از نوع ورقه

۷-۸-۲ الیاف نوری پلاستیکی نوع بلاک (Block- Type)

یک لیف تصویری از شمار زیادی الیاف نوری بسیار ظریف تشکیل شده است. اینگونه الیاف جهت آندوسکوپی و یا موارد مشابه مورد استفاده قرار گرفته اند. از آنجائیکه چند جزئیهای شیشه ای و کوارتز شکننده اند انتظار رشد و توسعه الیاف تصویری پلاستیکی در این زمینه میرود. کارخانه Mitsubishi Rayon در سال ۱۹۸۸ لیفی تجاری از این نوع

1- Guide spin

2- Sheet

تولید کرد که شامل ۱۵۰۰ لیف نوری بود. که هر کدام از آنها قطری بین ۱۰-۲۰ μm داشتند. تولید این لیف در نتیجه فرآیند ذوب ریسی غلاف - مغزی بسیار دقیق این کارخانه بود.

در سال ۱۹۹۱ با تحقیقات بیشتر لیفی تولید شد که شامل ۳۰۰۰ لیف نوری فوق العاده ظریف با قطری حدود ۱۰ μm یا کمتر بود. سطح مقطع این لیف در شکل (۷-۱۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که لیف تصویری پلاستیکی دایره ای با قطر تقریبی ۰/۵ mm شامل تقریباً ۳۰۰۰ لیف نوری پلاستیکی کاملاً فشرده در کنار یکدیگر می‌باشد. هر لیف مربوط به یک جز تصویر بوده و بطور تقریبی ۹ μm قطر دارد. که قطر مغزی و ضخامت غلاف بترتیب ۷ μm و ۱ μm می‌باشد. مشخصه لیف تصویری پلاستیکی انعطاف فوق العاده، مقاومت خمشی بالاتر، تصویر واضح تر و دقیق تر نسبت به لیف تصویری شیشه ای است. مدلهای الاستیسیته^۱ لیف تصویری پلاستیکی ۱/۱۰ یا کمتر از آن نسبت به الیاف تصویری کوارتز می‌باشد و میزان انعطاف پذیری بسیاری بالائی دارد. روشنایی تصویر با فرمول (۷-۱) محاسبه می‌شود:

$$E = F.Kc \quad (7-1)$$

این فرمول E روشنایی تصویر^۲، F شاخص اجرای^۳ لیف نوری پلاستیکی متشکل از یک لیف تصویری پلاستیکی و Kc نسبت مساحت مغزی به مساحت مجموع سطح مقطع لیف است. استفاده از الیافی با Kc و E یکسان متناسب با F آنها است. F را میتوان با استفاده از فرمول (۷-۲) محاسبه نمود:

$$F = (NA)^2 10^{(-\alpha L/10)} \quad (7-2)$$

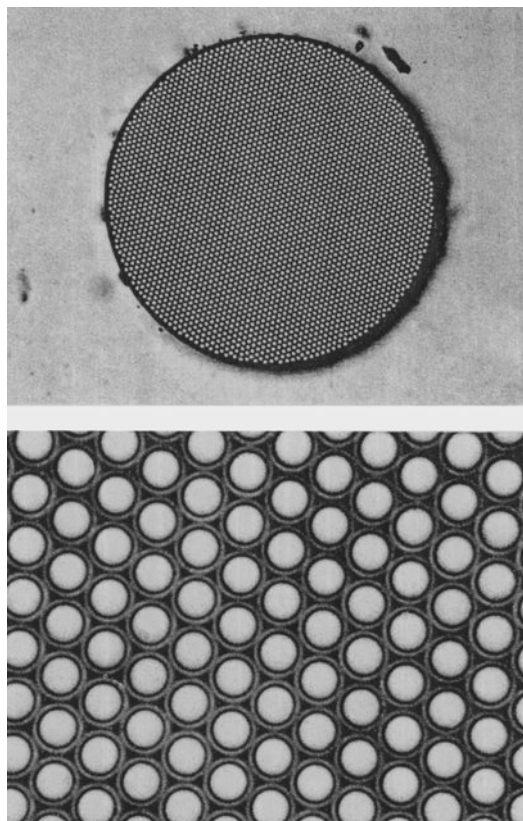
در این فرمول NA تعداد روزنه ها، α افت انتقالی و L طول لیف است.

اگر چه لیف تصویری پلاستیکی منافذی به اندازه ۰/۵ و افت انتقالی به بزرگی ۶۰۰ dB/km دارد، اما الیاف تصویری پلاستیکی با طول کم در حدود چند متر مقادیر F بزرگتری نسبت به الیاف تصویری متشکل از مواد دیگر از خود نشان می دهد که این موضوع در شکل (۷-۱۵) نشان داده شده است [۲۰].

- Modulus of elasticity

- Brightness

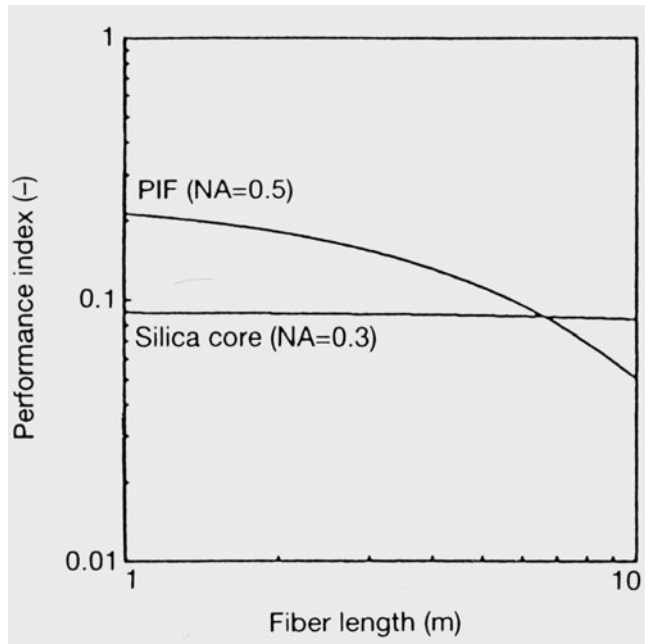
- Performance index



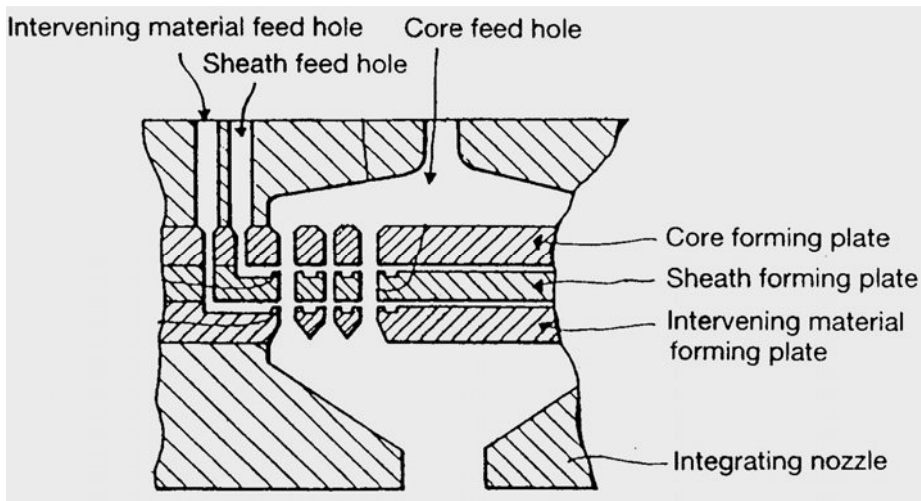
شکل ۱۴-۷- سطح مقطع لیف تصویری پلاستیکی

نازل ریسندگی جهت الیاف تصویری در شکل (۱۶-۷) نشان داده شده است، مواد مغزی مذاب تغذیه شده به نازل توسط صفحات تشکیل دهنده مغزی تقسیم شده و مواد غلافی و بینابینی به محیط نازل مغزی تغذیه میشوند. لیف تشکیل شده شمار زیادی از الیاف دوجزبی غلاف مغزی هم مرکز می باشد که در داخل ماده بینابینی منظم قرار گرفته اند. این مجموعه با خروج از نازل یکپارچه کننده به لیف پلاستیکی تصویری کاملاً منظم شده تبدیل می گردد [۲۱].

از آنجائیکه الیاف نوری آلی دارای خواص خاص جهت انتقال رسانه ای نوری فواصل کوتاه هستند انتظار می رود کاربرد وسیعی پیدا کنند. از این گونه خواص خاص میتوان افت انتقالی پایین و مقاومت حرارتی بالا را نام برد. حائز اهمیت است که محصولاتی با ضریب اطمینان بیشتر و همچنین افت انتقالی کمتر و الیافی با گستره کاری بیشتر جهت توسعه کاربردهای فعلی تولید شوند. همچنین لازم است سیستمهایی شامل شبکه داده ها و سنسورها نیز به همراه خود الیاف گسترش و توسعه پیدا کنند.



شکل ۷-۱۵- رابطه بین طول لیف و شاخص اجرا



شکل ۷-۱۶- نازل ریسندگی جهت لیف پلاستیکی

