



# تأثیر شرایط ریسندگی بر مورفولوژی و خواص الیاف پلی اتیلن ترفتالات (پلی استر) در سرعت‌های بالا

ترجمه: حامد کریمی خرم‌آبادی<sup>۱</sup>

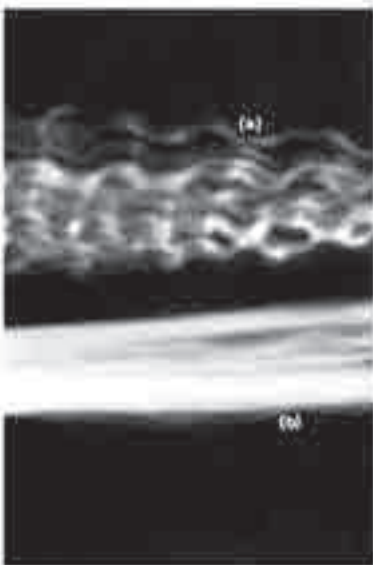
چکیده:

ریسندگی الیاف PET در سرعت‌های با محدوده  $1200 \text{ m/min}$  تا  $7000 \text{ m/min}$  تحت شرایط ریسندگی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر تغییر در متغیرهای فرآیندی بر آرایش مولکولی، کریستالینیتی و خواص الیاف PET ریسیده شده بررسی شده است. در استفاده از سیستم کویینچ با جریان هوای متقاطع، الیاف تولید شده دارای چین نامطلوب و ساختار نامتقارن نسبت به محور الیاف می‌باشند. استفاده از سیستم کویینچ با جریان شعاعی این مشکلات را حذف می‌کند. تغییر در دیگر شرایط ریسندگی از قبیل دما، توروپوت یا دنیبر تیک آپ و وزن مولکولی هم می‌تواند بر بهبود خواص و ساختار الیاف PET تأثیرگذار باشد.

## تأثیر تغییر در نوع جریان هوای کویینچ

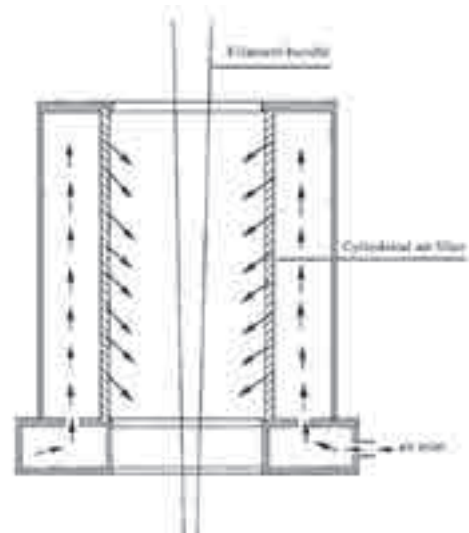
شکل (۲) تصاویر دو نمونه الیاف بدست آمده را در سرعت  $7000 \text{ m/min}$  با جریان هوای متقاطع (a) و نرخ جریان  $0.28 \text{ m/s}$  (میانگین آن در طول خط مرکزی صفحه اندازه‌گیری شده است) و دیگری با جریان هوای شعاعی (b) با نرخ  $1/3 \text{ m/s}$  (اندازه‌گیری در مرکز خروجی پایین انجام شده است) را نشان می‌دهد. همانگونه که می‌توان دید در استفاده از جریان هوای شعاعی چین‌ها کاملاً حذف شده‌اند.

برای چندین سال در صنعت ذوب ریسی الیاف به طور گسترده‌ای از سیستم کویینچ با جریان هوای متقاطع استفاده می‌شود. با این وجود به هنگام استفاده از این نوع کویینچ در ریسندگی با سرعت بالا، در الیاف ریسیده شده چین‌های فراوانی بوجود می‌آید. آزمایش الیاف چین خورده بوسیله میکروسکوپ نشان داد که الگوهای تداخل چین نسبت به محور الیاف به شدت نامتقارن می‌باشند. از آنجایی که سیستم کویینچ با جریان هوای متقاطع هوا را بصورت عمود از یک جهت بر روی الیاف می‌دمد، گمان می‌رود که خنک‌سازی نایک‌نواخت پاسخ ساختار نامتقارن الیاف می‌باشد. برای ثابت کردن این فرضیه یک کویینچ با جریان هوای شعاعی که نمایی از سطح مقطع آن در شکل (۱) نشان داده شده است طراحی گردید و در آن از فیلترهایی به طول  $20$  سانتی متر و قطر داخلی  $8.3$  سانتی متر استفاده شده است تا مطمئن شویم که جریان هوای یکنواخت در اطراف فیلامنت مذاب وجود دارد. در ریسندگی چند فیلامنتی هوای کویینچ از داخل به بیرون دمیده شده و خارج می‌گردد. بنابراین این سیستم مشابه نوع out-in در کویینچ شعاعی صنعتی است.

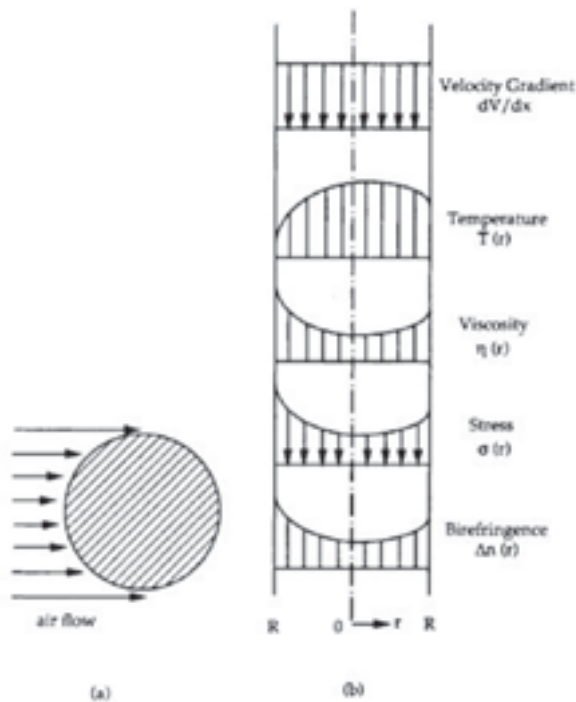


شکل (۲) عکس الیاف PET ریسیده شده در سرعت  $7000 \text{ m/min}$  با استفاده از دو روش خنک‌سازی

از طرفی در شکل (۳) تصاویر دو نمونه نشان داده شده است. شکل a-۳ یک الگوی نامتقارن نسبت به محور الیاف را نشان می‌دهد، در صورتی که شکل b-۳ که الیاف ریسیده شده را در روش خنک‌سازی شعاعی نشان می‌دهد، طرحی متقارن را نسبت به محور الیاف نشان می‌دهد که دلالت بر توزیع آرایش یافتگی مولکولی نسبت به محور الیاف دارد. مکانیزم تشکیل ساختار نامتقارن در الیاف خنک شده با جریان هوای متقاطع در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل a-۴ جریان هوای متقاطع به صورت عمود بر محور الیاف از یک طرف فیلامنت مذاب دمیده می‌شود. سمتی که روبروی کویینچ قرار دارد سریع‌تر از طرف دیگر خنک می‌شود.



شکل (۱) نمایی شماتیک از سطح مقطع کویینچ شعاعی. فلش‌ها جهت جریان هوا را نشان می‌دهند.



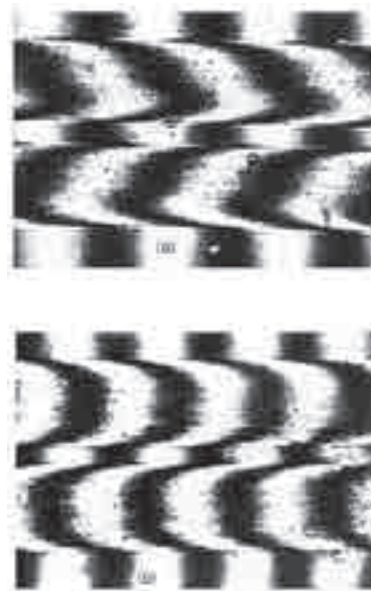
شکل (۴) مکانیزم تشکیل انکسار مضاعف نامتقارن در الیاف PET تحت جریان هوای متقاطع

در ریسندگی با سرعت کم، می‌دانیم که افزایش دمای خروج منجر به کاهش تنش ریسندگی و در نتیجه کاهش انکسار مضاعف و کریستالینیتی الیاف ریسیده شده می‌گردد. دلیل افزایش انکسار مضاعف با افزایش دمای خروج برای ریسندگی در سرعت  $6000 \text{ m/min}$  روشن نمی‌باشد. اما گمان می‌رود که در سرعت  $6000 \text{ m/min}$  یک neck در خط ریسندگی تشکیل می‌شود و افزایش در دمای خروج neck را پایین می‌آورد که باعث افزایش فاصله neck از رشته‌ساز می‌گردد. در نتیجه میزان تنش ریسندگی در نقطه neck به دلیل افزایش تاثیر دراک هوا افزایش می‌یابد. از آنجایی که انکسار مضاعف در الیاف ریسیده شده با میزان تنش در نقطه neck تعیین می‌گردد، افزایش تنش ریسندگی در نقطه neck ممکن است دلیل افزایش انکسار مضاعف در دمای خروج بالا فرض شود. همچنان که سرعت ریسندگی به  $6000 \text{ m/min}$  افزایش می‌یابد، فیلامنت پارگی در دمای خروج کمتر از  $295^\circ\text{C}$  بارها رخ می‌دهد. بالا بردن دمای خروج به نظر می‌رسد به کاهش تعداد فیلامنت پارگی‌ها کمک می‌کند، اما ریسندگی در دمای بالاتر از  $310^\circ\text{C}$  در سرعت‌های بالا باعث ایجاد ناپختگی می‌شود که احتمالاً degrade شدن پلیمر در دمای بالا دلیل آن باشد. به نظر می‌رسد که محدوده دمایی  $295\text{--}305^\circ\text{C}$  برای ریسندگی PET در سرعت بالا مطلوب باشد.

#### تاثیر تغییر در دنیبر تیک-آپ

دنیبر فیلامنت نهایی یا دنیبر تیک آپ بازای هر فیلامنت با نرخ خروج و سرعت تیک آپ قابل کنترل می‌باشد. قطر  $D$  (cm) و دنیبر الیاف (DN) با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$D = 10^{-2} \sqrt{\left(\frac{DN}{90\pi\rho}\right)} \quad (3)$$



شکل (۳) تصویر تداخلی الیاف PET در سرعت  $7000 \text{ m/min}$  در دو روش خنک‌سازی

در نتیجه یک توزیع دمایی نامتقارن نسبت به محور الیاف ایجاد می‌شود. بر اساس رابطه Kase، ویسکوزیته ازدیاد طول  $\eta_e$  با دما از طریق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_e = \eta_e^* \exp\left(\frac{E}{T+273}\right) \quad (1)$$

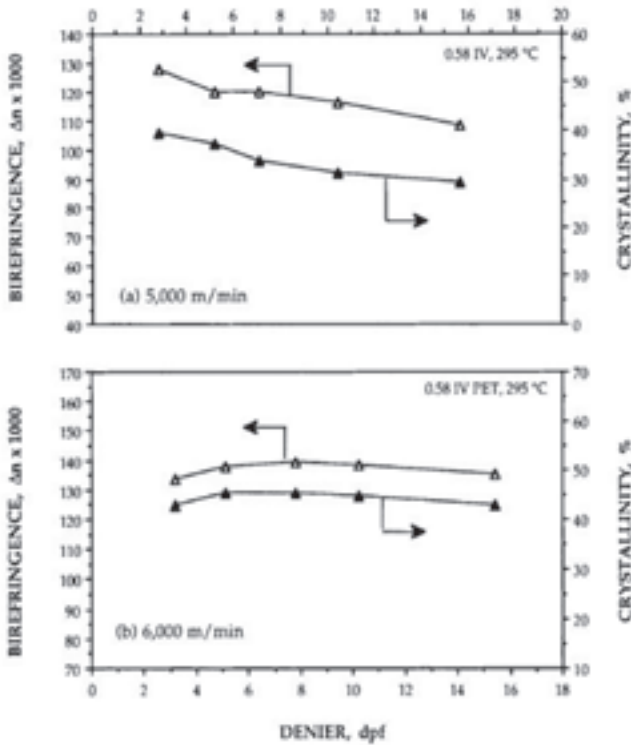
که در آن  $E$ ، پارامترهای مواد پلیمری بکار رفته می‌باشند. بنابراین کاهش دما منجر به افزایش  $\eta_e$  می‌گردد. تنش کششی  $\sigma$  با ویسکوزیته ازدیاد طول و گرادیان سرعت بیان می‌گردد:

$$\sigma = \eta_e \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

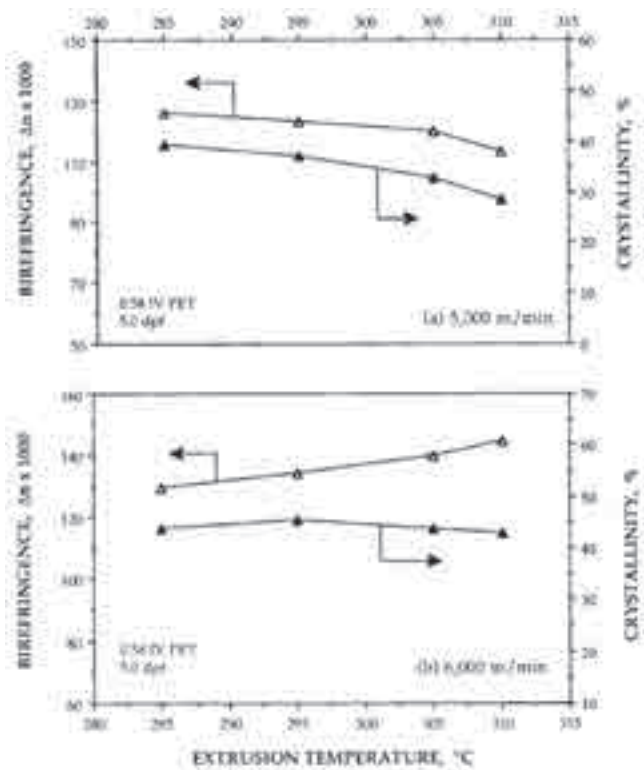
که در آن  $dv/dx$  در سطح مقطع فیلامنت ثابت فرض شده است. توزیع دمایی نامتقارن، توزیع ویسکوزیته ازدیاد طول نامتقارن را فراهم می‌آورد و در نتیجه پروفایل تنشی در سطح مقطع فیلامنت خنک شده نیز نامتقارن خواهد بود. توزیع تنش نامتقارن باعث ناپختگی در آرایش مولکولی و کریستالینیتی مولکولی در سطح مقطع فیلامنت می‌گردد، چونکه میزان نرخ کریستالینیتی و آرایش یافتگی مولکولی در فیلامنت تا حد زیادی تحت تاثیر حضور تنش می‌باشد.

#### تاثیر تغییر در دمای خروج الیاف

شکل 5-a تغییر انکسار مضاعف و کریستالینیتی را با دمای خروج برای الیاف PET با  $IV=0.58$  و سرعت ریسندگی  $5000 \text{ m/min}$  نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که در محدوده دمایی  $285\text{--}310^\circ\text{C}$  با افزایش دما انکسار مضاعف و کریستالینیتی کاهش می‌یابد. با این وجود هنگامی که الیاف با سرعت  $6000 \text{ m/min}$  ریسیده شوند اختلاف رفتار مشاهده می‌گردد که در شکل 5-b نشان داده شده است، در حالی که تبلور تقریباً ثابت باقی می‌ماند، انکسار مضاعف با افزایش دمای خروج اندکی افزایش می‌یابد.



شکل (۶) تاثیر دنیبر Take up بر انکسار مضاعف و کریستالینیتی الیاف PET



شکل (۵) اثر دمای خروج بر انکسار مضاعف و کریستالینیتی الیاف PET

که در آن  $Mv$  متوسط وزن مولکولی است. کریستالینیتی الیاف به عنوان تابعی از سرعت تیک آپ در شکل (۷) برای PET با دو وزن مولکولی ۱۵۷۰۰ ( $IV=0.58$ ) و ۲۸۷۰۰ ( $IV=0.95$ ) نشان داده شده است. کریستالینیتی الیاف رسیده شده از PET با وزن مولکولی کم در محدوده سرعت ۳۰۰۰-۴۰۰۰ m/min سطح پایینی باقی می ماند.

هنگامی که سرعت تیک آپ از ۴۰۰۰ m/min به ۵۰۰۰ m/min افزایش داده می شود، کریستالینیتی به سرعت افزایش می یابد و در ۶۵۰۰ m/min ماکزیمم می شود. کریستالینیتی PET با وزن مولکولی بالا در ۲۰۰۰ m/min کم است. کریستالینیتی با نرخ نسبتاً زیادی در محدوده سرعت ۳۰۰۰-۴۰۰۰ m/min افزایش می یابد و در محدوده ۵۰۰۰-۶۰۰۰ m/min کمتر می شود. کریستالینیتی الیاف PET با  $IV$  بالا به مقدار قابل توجهی بیشتر از PET با  $IV$  کم می باشد. این پدیده ممکن است با این حقیقت که وزن مولکولی بالاتر در دمای داده شده، ویسکوزیته ازدیاد طول و در نتیجه تنش ریسندگی بیشتری را نمایش می دهد توضیح داده شود. تنش ریسندگی بالاتر در PET با وزن مولکولی بالا مقدار آرایش یافتگی و کریستالینیتی بیشتری را در سرعت کم فراهم می آورد.

پدیده کم شدن کریستالینیتی الیاف PET بعد از یک سرعت بحرانی بوسیله Ziabicki توضیح داده شده است که این پدیده در نتیجه دو فرآیند رقابتی یعنی خنک سازی سریع و کریستالینیتی است. درجه کریستالینیتی در الیاف رسیده شده با حاصلضرب زمان کریستالیزاسیون  $\Delta t$  و نرخ کریستالیزاسیون موثر  $K$  تعیین شده است. افزایش سرعت ریسندگی منجر به افزایش نرخ کریستالینیتی می شود، اما زمان کریستالینیتی که زمان صرف شده بوسیله فیلامنت در محدوده دمایی مناسب برای کریستالیزاسیون است، با افزایش سرعت تیک آپ کاهش می یابد.

که در آن  $p$  دانسیته الیاف بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب است. شکل ۶-a و ۶-b تغییر انکسار مضاعف و کریستالینیتی را با دنیبر تیک آپ برای الیاف رسیده شده در سرعت های ۵۰۰۰ m/min و ۶۰۰۰ m/min نشان می دهد. دیده می شود که در هر دو، انکسار مضاعف و کریستالینیتی در ۵۰۰۰ m/min با افزایش دنیبر تیک آپ کاهش می یابد. با این وجود در ۶۰۰۰ m/min شرایط تغییر می کند. کریستالینیتی ابتدا اندکی با افزایش دنیبر تیک آپ افزایش می یابد، در دنیبر ۵ به یک مقدار ماکزیمم می رسد و سپس اندکی کاهش می یابد. با افزایش بیشتر در دنیبر تیک آپ تغییرات ضریب شکست با دنیبر تیک آپ تقریباً مشابه کریستالینیتی است. این تغییرات با این وجود در مقایسه با تغییراتی که در سرعت ۵۰۰۰ m/min مشاهده شد کمتر می باشد. کاهش در دنیبر تیک آپ منجر به افزایش در نسبت کشش و افزایش نرخ خنک سازی می گردد، که بایستی به افزایش میزان آرایش یافتگی مولکولی و نرخ کریستالینیتی کمک کند. این قضیه ممکن است پدیده مشاهده شده در سرعت تیک آپ کم را به طور نسبی توضیح دهد که ۵۰۰۰ m/min و یا کمتر از آن است. همانطور که قبل تر توضیح داده شد، تنش در neck یک فاکتور بحرانی برای تعیین میزان آرایش یافتگی مولکولی می باشد. بنابراین افزایش دنیبر تیک آپ یا قطر الیاف در سرعت های بالای ۵۰۰۰ m/min اثر مشابهی مثل افزایش دمای خروج دارد که در آن موقعیت neck پایین تر بوده و تنش در neck افزایش می یابد.

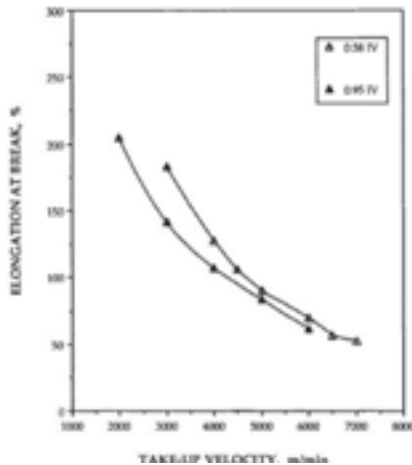
#### تاثیر تغییر در وزن مولکولی

وزن مولکولی PET را می توان به ویسکوزیته ذاتی آن با رابطه تجربی زیر بیان نمود:

$$IV = 2.1 \cdot 10^{-4} M_v^{0.82} \quad (4)$$



بالاتر در محدوده سرعت زیر  $5500 \text{ m/min}$  بیشتر از الیاف با وزن مولکولی پایین تر است. اما استحکام الیاف PET رسیده شده با IV بالا در سرعت  $6000 \text{ m/min}$  کمتر از الیاف رسیده شده از PET با IV کم می باشد. ازدیاد طول در نقطه پارگی PET با IV بالا، کمتر از الیاف PET با IV پایین در محدوده سرعت کم می باشد. این تغییرات با تغییرات بررسی شده در انکسار مضاعف سازگار می باشد.



شکل (۹) ازدیاد طول در نقطه پارگی بر حسب سرعت Take-up برای الیاف رسیده شده از PET با دو IV مختلف

#### نتیجه گیری

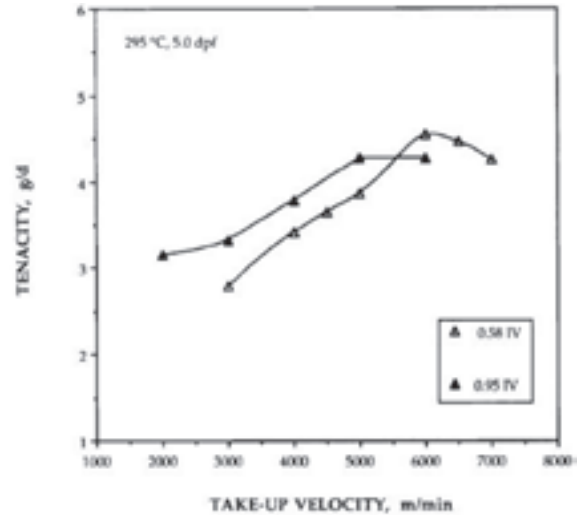
ریسندگی الیاف PET در محدوده سرعت  $7000-2000 \text{ m/min}$  بررسی گردید. چندین متغیر ریسندگی شامل نوع کوبینج، دمای خروج و دیر تیک آپ به علاوه وزن مولکولی پلیمر تغییر داده شد. اثر تغییرات در این متغیرها بر آرایش مولکولی، کریستالینیتی و خواص الیاف PET رسیده شده مورد بررسی قرار گرفت. در سیستم کوبینج با جریان متقاطع در ریسندگی با سرعت بالا، الیاف با چین نامطلوب و ساختار نامتقارن نسبت به محور الیاف بوجود آمد، ولی سیستم کوبینج با جریان شعاعی این مشکلات را حل نمود. تغییر در شرایط ریسندگی از قبیل دمای خروج، تروپوت یا دیر تیک آپ، وزن مولکولی و سرعت تیک آپ بر ساختار الیاف در جهتی تاثیر می گذارد که روند افزایش تنش ریسندگی منجر به افزایش آرایش یافتگی و کریستالینیتی الیاف حاصل شده می گردد. استحکام الیاف PET رسیده شده با افزایش ضریب انکسار متوسط بیشتر می شود. اگرچه انکسار مضاعف، کریستالینیتی و خواص الیاف PET رسیده شده با تغییر متغیرهای توضیح داده شده در بالا تا حدودی تحت تاثیر قرار گرفتند، ساختار و خواص PET رسیده شده در سرعت بالا نمی تواند به مقدار قابل توجهی منحصراً با تغییر متغیرهای ریسندگی بهبود یابد.

#### پی نوشت

بهره برداری واحدهای نساجی پتروشیمی شهید تندگویان

#### مرجع

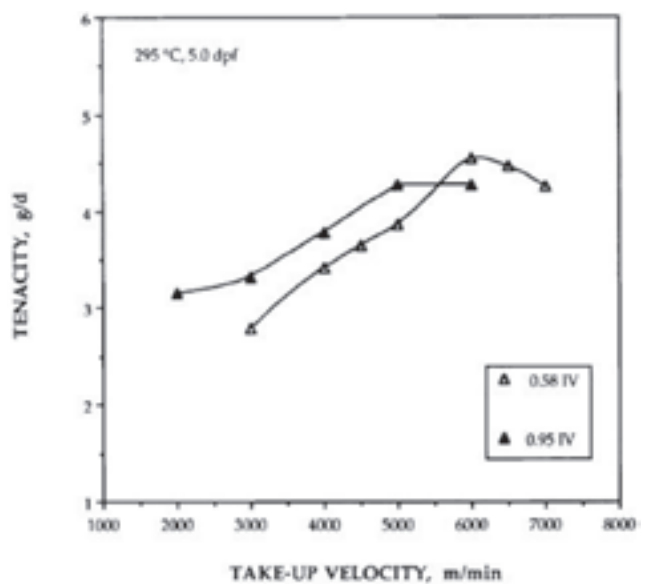
Chen, G.-Y., et al. (1992). "Effects of spinning conditions on morphology and properties of polyethylene terephthalate fibers spun at high speeds." Applied Polymer 44(3): 447-458.



شکل (۷) کریستالینیتی بر حسب سرعت Take-up برای الیاف PET رسیده شده با دو IV مختلف

در یک سرعت بحرانی، حاصلضرب  $\Delta T$  و  $K$  به یک مقدار ماکزیمم می رسد. بنابراین کاهش در کریستالینیتی در سرعت های خیلی بالا نتیجه فیزیکی تبلور آرایش یافته غیرهم دما می باشد.

استحکام و ازدیاد طول در نقطه پارگی الیاف به ترتیب در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است. در خصوص الیاف PET با وزن مولکولی کم، هنگامی که سرعت ریسندگی از  $4000 \text{ m/min}$  به  $6000 \text{ m/min}$  افزایش می یابد استحکام افزایش یافته و ازدیاد طول در نقطه پارگی کاهش می یابد. در سرعت ریسندگی بالاتر، از آنجایی که استحکام اندکی کاهش می یابد، به نظر می رسد که افت ازدیاد طول در نقطه پارگی شروع می شود. استحکام الیاف رسیده شده از PET با IV بالا در محدوده سرعت ریسندگی زیر  $5000 \text{ m/min}$  افزایش می یابد. مقدار آن در  $5000 \text{ m/min}$  ماکزیمم می شود و در  $6000 \text{ m/min}$  اندکی کاهش می یابد. استحکام الیاف PET با وزن مولکولی



شکل (۸) استحکام بر حسب سرعت Take-up برای الیاف رسیده شده از PET با دو IV مختلف