

Czasopismo „Polimery”, INSTYTUT CHEMII PRZEMYSŁOWEJ im. prof. Ignacego Mościckiego.

Zygmunt BOK

Zakłady Tworzyw Sztucznych ‘NITRON’ S.A.

ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn

REOLOGICZNA METODA POMIARU LEPKOŚCI STOPIONYCH POLIMERÓW W WARUNKACH LABORATORYJNYCH PORÓWNYWALNYCH Z WARUNKAMI PRZEMYSŁOWYMI W PROCESIE PRODUKCJI FOLII

Streszczenie - w liniach produkcyjnych, w których centralnym urządzeniem jest wytłaczarka z głowicą szczelinową, na jakość końcowego produktu jakim jest folia wpływ ma szereg czynników występujących w procesie przygotowania granulatu, w procesie produkcyjnym oraz jakość użytego surowca. W tym artykule zaproponowano specjalną metodę umożliwiającą ‘przeniesienie’ warunków przemysłowych do środowiska laboratoryjnego i wykonania pomiarów lepkości surowca w warunkach porównywalnych z warunkami panującymi w procesie produkcyjnym, na podstawie której możliwe jest udzielenie jednoznacznej odpowiedzi co do jakości użytego granulatu i tym samym znaczne skrócenie czasu usuwania awarii.

THE VISCOSITY RHEOLOGY MEASUREMENT METHOD OF THE MELTED POLYMERS IN LABORATORY CONDITIONS COMPARABLE WITH INDUSTRIAL CONDITIONS IN FOIL PRODUCTION PROCESS

Summary - in production lines, where extruder with sheet die is the main central device, a number different factors have an important influence on the final product quality, especially quality of the raw material. In this article, a special method has been proposed, to transfer a real productive terms into experimental terms in order to measure a viscosity of melted polymers in the same conditions. These method can also be used to give a anivocally answer in order to estimate the quality of raw material which can be used in production proces and finally to significantly reduce the bad foil production time.

W liniach produkcyjnych, w których centralnym urządzeniem jest wyciarkarka z głowicą szczelinową, na jakość końcowego produktu jakim jest folia wpływ ma szereg czynników występujących w procesie przygotowania granulatu, w procesie produkcyjnym oraz jakość użytego surowca.

W sytuacjach awaryjnych (zła jakość folii), w których nie wiadomo na jakim etapie procesu produkcyjnego wystąpiły nieprawidłowości, sprawdza się po kolei proces przygotowania granulatu, proces wyciarkania folii a dopiero na samym końcu wysuwa się przypuszczenie o złej jakości surowca. Biorąc to pod uwagę, celowe staje się przeprowadzenie odpowiednich badań surowca przed skierowaniem go do produkcji, które umożliwiłyby udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy sytuacja awaryjna spowodowana była złą jakością użytego surowca, czy też niewłaściwym przebiegiem przygotowania granulatu i produkcji folii. Jakkolwiek istnieją testy sprawdzające surowiec wyjściowy, to często jednak jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o jakość surowca nie można udzielić, ponieważ warunki pomiarowe w których przeprowadza się testy sprawdzające są jakościowo różne od warunków panujących na wyciarkarce w procesie produkcyjnym.

Tak więc w niniejszej pracy do rozwiązania powyższego problemu zastosowano reologiczne metody pomiarowe z wykorzystaniem reometru kapilarnego typu MCR współpracującego z maszyną wytrzymałościową INSTRON, który umożliwia przeprowadzenie pomiarów lepkości surowca w podwyższonych temperaturach.

Celem niniejszej pracy było **opracowanie** metody umożliwiającej ‘*przeniesienie*’ warunków przemysłowych do środowiska laboratoryjnego oraz wykonanie wzorcowej charakterystyki lepkości stopionego dobrze przetwarzającego się surowca w funkcji szybkości ścinania, w warunkach porównywalnych z warunkami panującymi w procesie produkcyjnym, na podstawie której możliwe jest udzielenie jednoznacznej odpowiedzi co do jakości użytego granulatu i tym samym znaczne skrócenie czasu usuwania ewentualnych awarii.

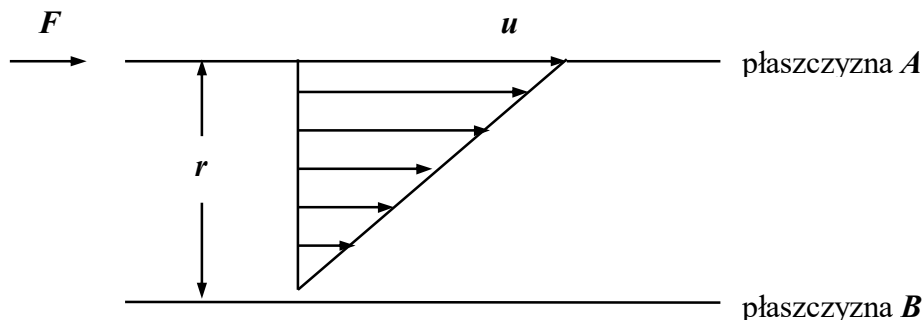
I. TEORETYCZNE PODSTAWY ZASTOSOWANEJ METODY POMIAROWEJ.

Stopy polimerów, będące ściśliwymi nieniu-tonowskimi cieczami, poddane procesom wyciarkania i wtryskiwania wykazują w tych warunkach efektywną lepkość kilkaset razy mniejszą niż lepkość mierzona przy pomocy tradycyjnych lepkościomierzy (wiskozymetrów). Dlatego też w celu otrzymania wiarygodnej informacji o zachowaniu się polimerów w trakcie tych procesów przetwarzania stosuje się specjalne lepkościomierze zdolne do pomiaru lepkości w szerokim zakresie prędkości ścinania.

1. PODSTAWY TEORII PŁYNIĘCIA

Rozważmy dobrze znany przypadek ścinania warstw lepkiego płynu pod wpływem działania siły F przedstawiony na rys 1. Między dwoma równoległymi płaszczyznami A i B oddalonymi od siebie na odległość r znajduje się lepka ciecz. Stała siła F przyłożona jest do płaszczyzny A , podczas gdy płaszczyzna B jest unieruchomiona. Pod wpływem działania siły F płaszczyzna A porusza się ze stałą prędkością u , w wyniku czego warstwa płynu znajdująca się tuż pod płaszczyzną A porusza się z prędkością u , natomiast warstwa płynu nad płaszczyzną B posiada zerową prędkość.

Płyn pomiędzy płaszczyznami *A* i *B* porusza się z prędkością zależną od jego położenia, która zawarta jest w granicach od zera do *u*.



Rys. 1. Ścinanie warstw płynu pod wpływem działania siły *F*.
Fig. 1. Liquid layers sharing under a steady force applied

Szybkość zmian prędkości płynu w kierunku prostopadłym do kierunku prędkości jest określona nachyleniem linii du/dr i jest zwana **szybkością ścinania** płynu ν .

$$\nu = \frac{du}{dr} \quad \left[\frac{1}{s} \right]$$

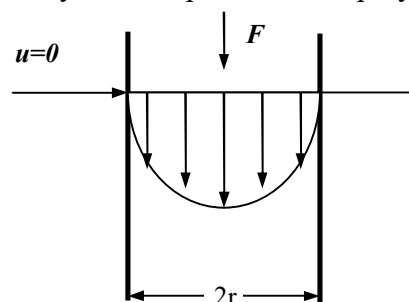
Siła *F* rozważana na jednostkę powierzchni *S* jest zwana **naprężeniem ścinania** τ .

$$\tau = \frac{F}{S} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Lepkość płynu η w przypadku ruchu laminarnego dana jest wzorem:

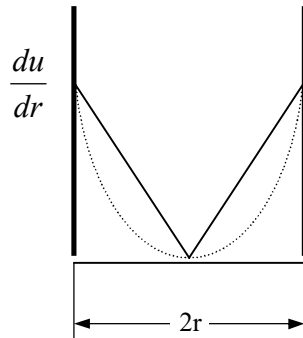
$$\eta = \frac{\tau}{\nu} \quad \left[\frac{Ns}{m^2} \right]$$

Rozważmy płynięcie płynu zawartego w reometrze kapilarnym, który przedstawiono na rys. 2. W tym układzie rozkład prędkości jest bardziej skomplikowany. Prędkość płynu w centrum rurki jest maksymalna i spada do zera przy ściankach kapilary.



Rys. 2. Rozkład prędkości płynu zawartego w kapilarze reometru
Fig. 2. Fluid velocity profile in rheometr capilary

Natomiast szybkość ścinania du/dr przedstawiona na rys. 3 dana jest nachyleniem wykresu rozkładu prędkości i zmienia się wraz ze zmianą nachylenia od zera w centrum do maksimum przy ściankach kapilary.



Rys. 3. Szybkość ścinania płynu w kapilarze reometru.

Fig. 3. Liquid shear rate in rheometr capillary

Naprężenie ścinania także zmienia się od zera w centrum kapilary do maksimum przy ściankach kapilary.

W związku z charakterystyką lepkości materiału płynącego przez kapilarę, naprężenie ścinania τ oraz szybkość ścinania v musi być porównana w tym samym punkcie płynu. Punkt ten zwykle wybierany jest przy ściance kapilary, gdzie zarówno naprężenie ścinania jak i szybkość ścinania osiągają maksimum.

W przypadku użytego do badań reometru kapilarnego, według E.C.Bernthardt'a [1] **szybkość ścinania** v_w przy ściankach kapilary dana jest wzorem:

$$v_w = \frac{2}{15} \frac{d_1^2}{d_2^3} V_1 \quad (1)$$

gdzie : d_1 - jest średnicą tłoka nurnikowego

d_2 - jest średnicą kapilary

V_1 - jest prędkością poprzeczki poziomej maszyny wytrzymałościowej 'INSTRON' poruszającej tłok nurnikowy reometru kapilarnego.

Naprężenie ścinania przy ściankach kapilary dane jest wzorem:

$$\tau_w = \frac{F d_2}{\pi L_2 d_1^2} \quad (2)$$

gdzie: F - jest siłą przeciskającą materiał przez kapilarę

L_2 - jest długością kapilary

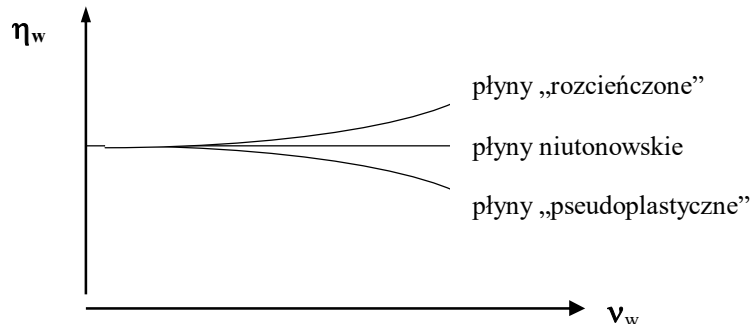
d_1 - jest średnicą tłoka nurnikowego

d_2 - jest średnicą kapilary

Przeciętną, rzeczywistą lepkość η_v płynu przedstawioną na rys. 4 określa wzór,

$$\eta_v = \frac{\tau_w}{V_w} \quad (3)$$

który jest słuszny tylko do płynów niutonowskich. Dla pozostałych płynów lepkość zależna jest od v_w .



Rys. 4. Rzeczywista lepkość płynów w funkcji szybkości ścinania dla różnych typów płynów.
Fig. 4. Virtual viscosity liquids in share rate function for different types of liquids.

W przypadku płynięcia cieczy niutonowskich, lepkość $\eta = \tau/v$ jest tzw. lepkością pozorną. Najrozsze typy krzywych płynięcia uzyskiwane są wtedy, kiedy τ jest funkcją v . Lepkość w tym przypadku jest stała i opisuje własności lepkością ciecchy niutonowskich.

Dla cieczy nieniuonowskich, relacja $\tau=f(v)$ może mieć złożoną postać matematyczną. Okazuje się jednak, że relacja $\tau=k(v)^n$, która całkiem dobrze opisuje krzywe płynięcia wielu materiałów może być użyta także do klasyfikacji płynów.

Gdy $n<1$, wówczas płyny nazywamy „pseudoplastycznymi” (stopy polimerów zachowują się jak pseudoplastyki). W przypadku gdy $n>1$, wówczas płyny nazywamy „rozcieńczonymi” posiadające według [2] własności nieznacznie różniące się od czystych rozpuszczalników. Dla $n=1$ mamy do czynienia z płynami niutonowskimi.

Dla prostoty, wykresy lepkość = $f(\text{szybkość ścinania})$ aproksymowane są często do linii prostej na wykresie logarytmicznym. Jest to równoważne założeniu „wykładniczego prawa” zależności pomiędzy naprężeniem ścinania a szybkością ścinania.

$$\tau = \left(\frac{du}{dr} \right)^n \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } n = \frac{d(\log \tau_w)}{d(\log v_w)} \quad (5)$$

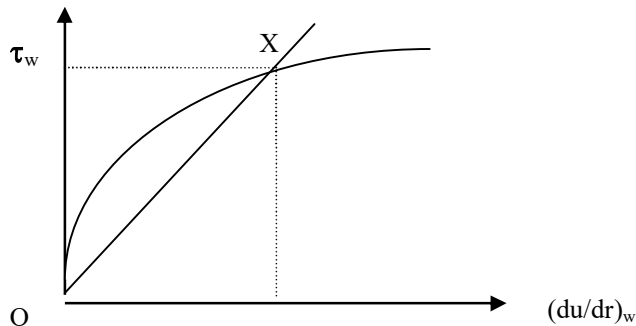
jest nachyleniem wykresu logarytmicznego naprężenia ścinania w funkcji szybkości ścinania.

Należy zaznaczyć, że dla tego prawa szybkość ścinania przy ściankach kapilary musi być skorygowana przez tzw. czynnik korekcyjny Rabinowitscha $y = (3n+1)/4n$

$$\text{zatem } \tau_w = \left(\frac{du}{dr} \right)_w = \frac{3n+1}{4n} \frac{2V_1 d_1^2}{15d_2^3} \quad (6)$$

Równocześnie trzeba dodać, że dla nieniutonowskich cieczy lepkość $\eta_v = \frac{\tau_w}{\left(\frac{du}{dr} \right)_w}$ zwana

jest **lepkością przeciętną** (przedstawioną na rys. 5), która określana jest nachyleniem odcinka OX na wykresie zależności naprężenia ścinania w funkcji szybkości ścinania dla cieczy nieniutonowskich, ponieważ traktuje punkt X jakby był punktem $\tau_w = f(v_w)$ cieczy niutonowskich.



Rys. 5. Lepkość przeciętna jako wielkość nachylenia odcinka OX na wykresie naprężenia ścinania w funkcji szybkości ścinania dla cieczy nieniutonowskich.

Fig. 5. Apparent viscosity as a slope of the OX line on the share stress rate-share rate plot for non-Newtonian liquids.

W innych przypadkach lepkość powinna być określana nachyleniem krzywej w interesującym nas punkcie. Zdefiniowana została w ten sposób rzeczywista **lepkość różnicowa** η_d

$$\eta_d = \frac{d\tau_w}{d\left(\frac{du}{dr}\right)_w} \quad (7)$$

Dla płynów niutonowskich zachodzi równość $\eta_d = \eta_v$.

2. WPŁYW TEMPERATURY NA LEPKOŚĆ

Dla wszystkich typów płynów temperatura posiada poważny wpływ na lepkość. Bardzo często relacja pomiędzy lepkością a temperaturą może być wyrażona przy pomocy równania Arrheniusa.

$$\eta = A e^{\Delta E / RT} \quad (8)$$

gdzie: ΔE - jest energią aktywacji lepkiego płynięcia
 R - jest stałą gazową

Przez wykreślenie wykresu $\log \eta = f(1/T)$, często otrzymuje się linię prostą aproksymującą wyniki pomiarowe, której nachylenie ΔE można obliczyć. Wysoka energia aktywacji wskazuje, że lepkość w dużym stopniu zależy od temperatury.

III. METODYKA BADAŃ

W niniejszej pracy zdefiniowano krzywe płynięcia, tj. zależność lepkości w funkcji szybkości ścinania w różnych temperaturach dla poszczególnych partii granulatu politereftalanu etylenu, który przetwarzano w procesie produkcyjnym.

Wyniki następnie uśredniano i wykreślano wzorcową krzywą płynięcia dla granulatu o wątpliwej jakości i porównując je z krzywą wzorcową określano, czy własności płynięcia tych granulatu porównywalne są z własnościami płynięcia normalnie przetwarzających się partii granulatu.

W przypadku niezbyt znacznych odchyłeń można określić niezbędne zmiany parametrów na maszynie produkcyjnej tj. zmiany temperatury wytłaczania lub wydajności tak, aby parametry wyrobu utrzymać w dopuszczalnych granicach.

W celu osiągnięcia wyznaczonego sobie celu, niezbędnym staje się dobór takich parametrów na urządzeniu laboratoryjnym (wymiary kapilary, prędkość ruchu tłoka reometru oraz temperatura cylindra reometru), przy których warunki pomiarowe porównywalne będą z warunkami panującymi na głowicy szczelinowej wytłaczarki produkcyjnej.

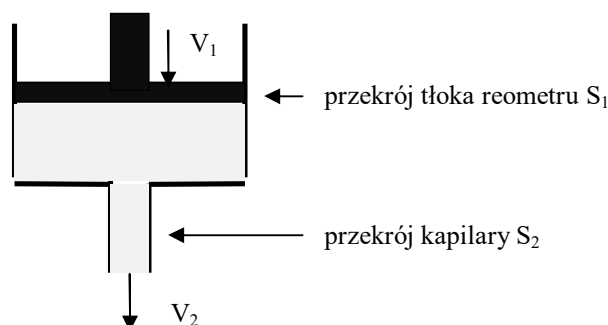
Spośród wielu parametrów mierzonych w układzie wytłaczania folii na maszynie produkcyjnej, realizację celu pracy umożliwiają następujące:

1. temperatura wytłaczania
2. wymiary szczeliny głowicy wytłaczającej
3. prędkość liniowa na obwodzie walca odbierającego folię
4. grubość folii na walcu odbierającym

Wykorzystując te informacje, można przy zastosowaniu odpowiedniej procedury opisanej w dalszej części tego rozdziału określić niezbędne parametry urządzenia pomiarowego.

Jak się okazuje, wielkością która umożliwia „przeniesienie” warunków panujących w procesie produkcyjnym na urządzenie pomiarowe jest prędkość wytłaczania folii w temperaturze T na maszynie produkcyjnej.

Należy więc tak dobrać wymiary kapilary i prędkości liniowe ruchu tłoka reometru kapilarnego, aby prędkość wypływu stopionego polimeru przez kapilarę reometru w temperaturze T , porównywalna była z prędkością wytłaczania folii na maszynie produkcyjnej. Dla osiągnięcia tego celu konieczne staje się wzajemne powiązanie ze sobą zależnością funkcyjną prędkości ścinania v z prędkością V_2 wypływu stopionego polimeru przez kapilarę reometru (patrz rys. 6).



Rys. 6. Przepływ stopionego polimeru przez kapilarę reometru
Fig. 6. Melted polymer flow through rheometer capillary.

Na podstawie cytowanej wcześniej relacji (1) rozwiązanie tego problemu staje się możliwe. Rozważmy w tym celu, przedstawiony na rys. 6 wypływ cieczy ze zbiornika przez kapilarę, pod wpływem poruszającego się tłoka reometru, przy założeniu doskonałej szczelności tłoka. Dla takiego układu mamy spełnioną zależność $V_1 S_1 = V_2 S_2$, czyli:

$$V_2 = V_1 \frac{S_1}{S_2} = V_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{d_1^2 V_1}{4 r_2^2} \quad (9)$$

gdzie: r_2 - jest promieniem kapilary.

$$\text{Prędkość ścinania w kapilarze } v_2 = \left| \frac{dV_2}{dr_2} \right| = \frac{V_1 d_1^2}{2 r_2^3} = 4 \frac{V_1 d_1^2}{d_2^3} = 4 \frac{V_2}{d_2} \quad (10)$$

$$\text{Zatem mamy: } \frac{v_2}{v} = \frac{4 \frac{V_1 d_1^2}{d_2^3}}{\frac{2}{15} \frac{V_1 d_1^2}{d_2^3}} = 30$$

$$\text{czyli } v_2 = 30 v \quad (11)$$

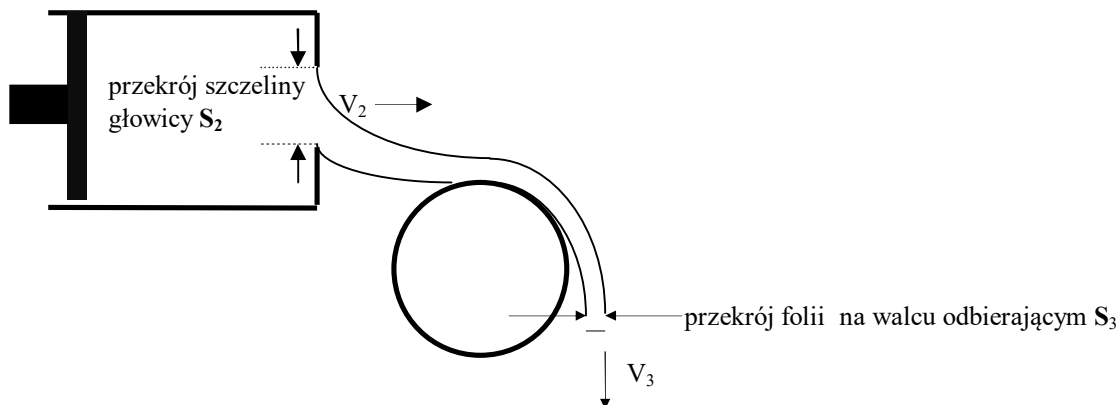
Wynika stąd, że prędkość ścinania stopionego polimeru w reometrze kapilarnym jest 30 razy większa niż w warunkach idealnych. Ostatecznie otrzymujemy:

$$v = \frac{1}{30} v_2 = \frac{1}{30} \left(4 \frac{V_2}{d_2} \right) = \frac{2}{15} \frac{V_2}{d_2} = \frac{2}{15} \frac{V_1 d_1^2}{d_2^3} \quad (12)$$

Tak więc, jeśli tylko znana jest prędkość wytłaczania folii na maszynie produkcyjnej V_2 , wówczas na podstawie wzoru (12) można określić wartość prędkości tłoka reometru kapilarnego, przy której warunki wypływu polimeru będą porównywalne z warunkami przemysłowymi.

Zależność (12) umożliwi również wyznaczenie średnicy kapilary d_2 , jeśli tylko znana jest prędkość wytłaczania folii na maszynie produkcyjnej V_2 .

Ponieważ prędkość wytłaczania folii bezpośrednio nie jest znana (znana jest tylko prędkość liniowa na obwodzie walca odbierającego oraz geometria przemysłowego układu wytłaczającego przedstawiona na rys. 7), zatem prędkość V_2 można wyznaczyć z prostego przeliczenia wykorzystując zależność $V_2 S_2 = V_3 S_3$.



Rys. 7. Głowica wytłaczająca i walec odbierający na maszynie produkcyjnej.

Fig. 7. Sheet die shema and take-up rolle on production machine.

Poniżej w tabeli 1, zestawiono stosowane wartości prędkości wytłaczania V_2 dla różnych grubości gotowych folii, przy zastosowaniu głowicy wytłaczającej, której długość szczeliny wynosi 600 mm (dla innej głowicy parametry są inne).

Grubość gotowej folii [μm]	grubość folii (na walcach odbierających) [μm]	prędkość liniowa na obwodzie walców odbierających V_3 m/min]	przekrój folii na walcach S_3 [mm^2]	przekrój szczeliny głowicy S_2 [mm^2]	prędkość wypływu folii z głowicy V_2 [m/min]
12	120 -140	13,2	72 - 84	120	7,9 - 9,2
36	ok. 400	8,8	240	240 -360	6,2 - 8,8

TABELA 1. Prędkości wytłaczania dla różnych grubości folii
TABLE 1. Extruding velocity rate for various sheet thickness

Tak więc przybliżone prędkości wytłaczania folii V_2 dla różnych grubości nominalnych folii, zawarte są w przedziale od 600 do 900 cm/min. Stosując wzory (9) oraz (12) otrzymujemy:

$$V_1 = \frac{d_2^2}{d_1^2} V_2 = (670 - 1010) d_2^2 \quad \text{gdzie } d_1 = 0,945 \text{ cm}$$

$$v = \frac{2}{15} \frac{1}{d_2} V_2 = (80 - 120) \frac{1}{d_2}$$

Średnicę kapilary d_2 dobieramy w taki sposób, aby przedział szybkości ścinania v porównywalny był z przedziałem prędkości występujących w procesie przemysłowym. Odpowiednie przedziały liczbowe dla odpowiednich procesów cytowane za [3] wynoszą:

1. prasowanie $v = 1 - 10 \text{ 1/s}$
2. walcowanie $v = 10 - 100 \text{ 1/s}$
3. wytłaczanie $v = 100 - 1000 \text{ 1/s}$
4. wtryskiwanie $v = 1000 - 10000 \text{ 1/s}$

Średnica kapilary d_2 [cm]	Prędkość tłoka reometru [cm/min]	Prędkość ścinania [1/s]
0,2	27 - 40	400 - 600
0,1	7 - 10	800 - 1200
0,09	5 - 8	900 - 1300
0,08	4 - 6	1000 - 1500

TABELA 2. Wartości dobranych średnic kapilar oraz odpowiadające im prędkości tłoka reometru kapilarnego

TABLE 2. Capillary diameter selected value and their corresponding rheometer capillary plunger velocity.

Po zastosowaniu powyższych prędkości tłoka reometru V_1 dla danych średnic kapilar uzyskano warunki wytłaczania podobne do warunków jakie panują na maszynie produkcyjnej, tzn. porównywalną prędkość wypływu polimeru.

Należy tutaj zaznaczyć, że obliczone prędkości tłoka reometru V_1 i odpowiadające im szybkości ścinania dla danych średnic kapilar dobrze zgadzają się z nomogramem I zamieszczonym w [4] i na podstawie tego można wnioskować, że zastosowana procedura określania tych parametrów jest poprawna.

W badaniach ostatecznie zastosowano kapilarę o średnicy 0,1 cm, gdyż odpowiadające tej wartości prędkości ruchu tłoka reometru umożliwiają uzyskanie porównywalnych laboratoryjnych warunków wytłaczania z warunkami przemysłowymi. Zawarte są one w środkowej części zakresu prędkości możliwych do uzyskania na maszynie wytrzymałościowej 'INSTRON' współpracującej z reometrem kapilarnym i przez to staje się możliwe przeprowadzenie badań porównawczych w innych zakresach prędkości ścinania.

IV. POMIARY

W niniejszej pracy dokonano pomiarów siły F działającej na tłok nurnikowy w funkcji jego prędkości, tzn. $F=f(V_1)$ dla różnych stałych temperatur cylindra reometru kapilarnego. Wyniki przedstawiono w tabeli 3. Próbkę granulatu, które pobierano w sposób losowy oznaczono numerami od 1-4 i przyjęto jako 'dobre', tzn. partia surowca z którego pobrano te próbki przetwarzała się dobrze w procesie produkcyjnym i stanowiły podstawę do zdjęcia „wzorcowej” charakterystyki płynięcia.

W przypadku próbki nr 5 podejrzewano wątpliwą jakość odpowiadającego jej surowca i zachodziło przypuszczenie, że ta partia surowca może się źle przetwarzać (surowiec ten cechował się innym odcieniem koloru od normalnie przetwarzających się partii granulatu) a otrzymane wyniki z przeprowadzenia badań tej próbki stanowiły podstawę do wykreślenia charakterystyki płynięcia, którą następnie porównywano z krzywą wzorcową.

V. WYKRESY I OBLICZENIA

Ponieważ rozbieżność wyników pomiarowych zawartych w tabeli 3 jest dość znaczna, zatem w celu lepszego zobrazowania działających sił podczas wytłaczania stopionego granulatu różnych próbek sporządzono diagram przedstawiony na rys. 8.

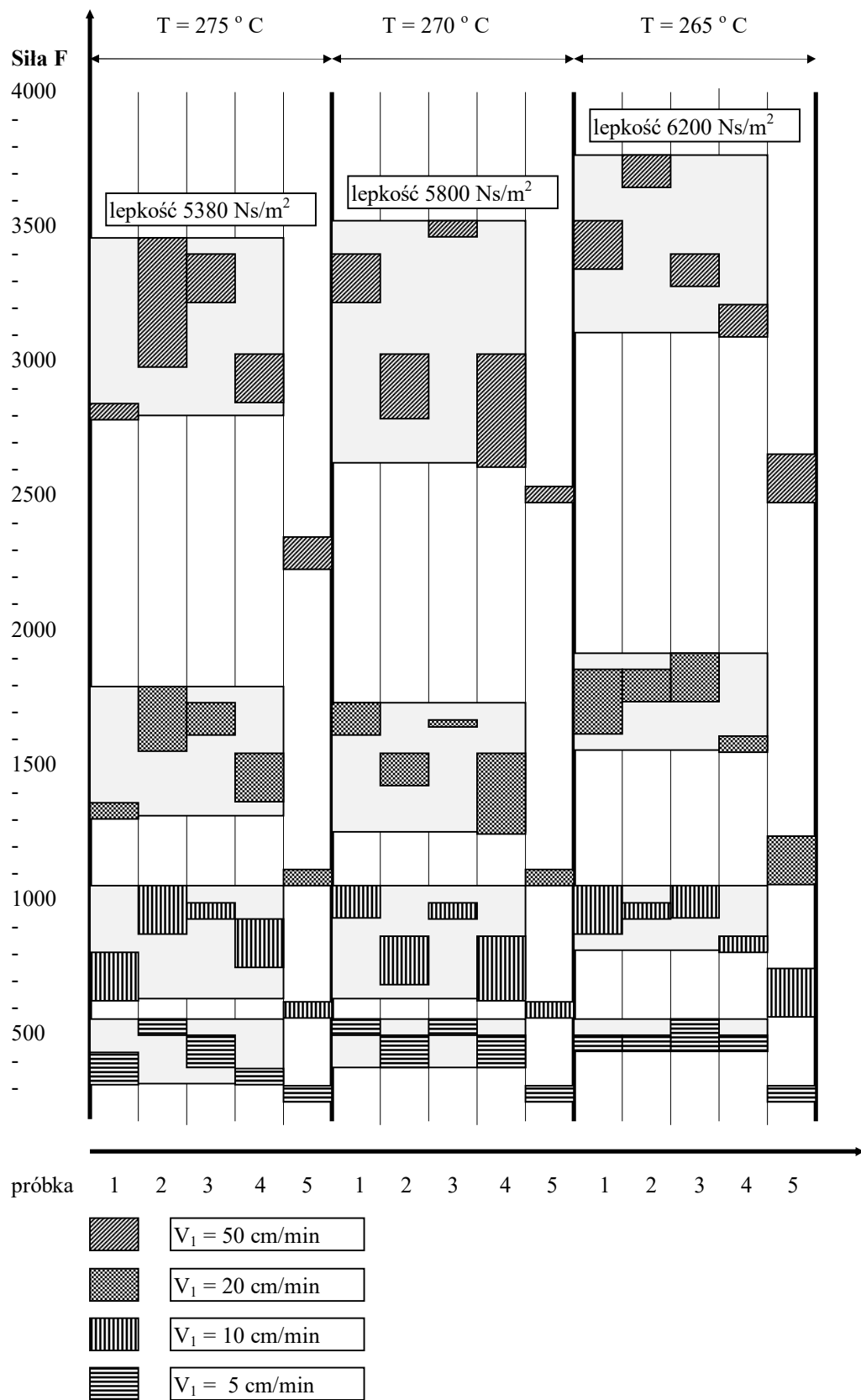
Ostatecznie, na podstawie uzyskanych danych (tabela 3) dokonano obliczenia lepkości przeciętnej, wykorzystując w tym celu wzory (1), (2) oraz (3). Uzyskane tą drogą dane były podstawą do wykreślenia zależności $\log \eta_v = \log v$, tj. charakterystyki płynięcia, którą przedstawiono na rys. 9.

W tabeli 4 zebrano zaś wartości lepkości dla granulatów normalnie przetwarzających się w różnych temperaturach.

Symbol próbki	Prędkość tłoka	Szybkość ścinania $\dot{\nu}$	Zarejestrowana siła F [N] w temp. T= 265 °C				Zarejestrowana siła F [N] w temp. T= 270 °C				Zarejestrowana siła F [N] w temp. T= 275 °C			
			[N]			Wart. średn.	[N]			Wart. średn.	[N]			Wart. średn.
	[cm/m in]	[1/s]												
1 63/2 Nr. poj. 986	2	126	180	180	180	180	170	200	220	200	120	150	140	140
	5	315	450	480	420	450	450	480	480	470	270	380	360	340
	10	631	950	940	800	900	860	950	900	900	550	720	700	650
	20	1263	1800	1720	1150	1700	1650	1730	1650	1700	1280	1340	1600	1400
	50	3158	3700	3400	3200	3400	3270	3350	3200	3300	2700	2750	2650	2700
2 64/1 Nr. poj. 47	2	126	180	180	180	180	100	120	180	130	200	240	150	200
	5	315	420	420	430	425	350	300	450	370	500	500	400	500
	10	631	840	850	850	850	750	650	860	750	960	900	780	780
	20	1263	1640	1640	1650	1645	1450	1800	1560	1600	1250	1700	1500	1500
	50	3158	3200	3300	3300	3250	2950	2800	3050	2900	3350	3250	3000	3200
3 73/3 Nr. poj. 5	2	126	180	200	160	180	250	200	250	230	150	50	160	120
	5	315	420	425	450	425	500	450	480	480	400	140	470	340
	10	631	900	920	850	935	930	900	900	900	830	400	920	720
	20	1263	1800	1800	1700	1750	1660	1650	1650	1650	1570	1600	1700	1600
	50	3158	3400	3400	3500	3450	3200	3300	3300	3300	3200	3250	3300	3250
4 73/3 Nr. poj. 225	2	126	180	160	220	186	150	200	250	200	160	150	160	160
	5	315	380	400	430	400	310	400	470	400	370	370	420	350
	10	631	750	800	800	780	600	780	850	740	680	720	820	740
	20	1263	1660	1460	1500	1540	1200	1460	1550	1400	1330	1370	1500	1500
	50	3158	3400	2900	3200	3160	2600	2900	3050	2850	2860	2850	3000	2900
5 68/1 Nr. poj. 1561	2	126	100	100	80	90	100	100	80	90	70	60	120	80
	5	315	250	250	200	230	220	250	200	230	250	200	250	230
	10	631	520	550	470	510	470	500	450	470	500	450	510	490
	20	1263	1050	1170	1000	1070	950	1000	950	980	1000	950	1040	1000
	50	3158	2300	2600	2400	2430	2250	2300	2300	2300	2300	2200	2250	2250

TABELA 3. Siły działające na tłok nurnikowy reometru kapilarnego w różnych temperaturach dla różnych szybkości ścinania.

TABLE 3. Applied forces to the rheometry capillary plunger in various temperatures for different share rate.



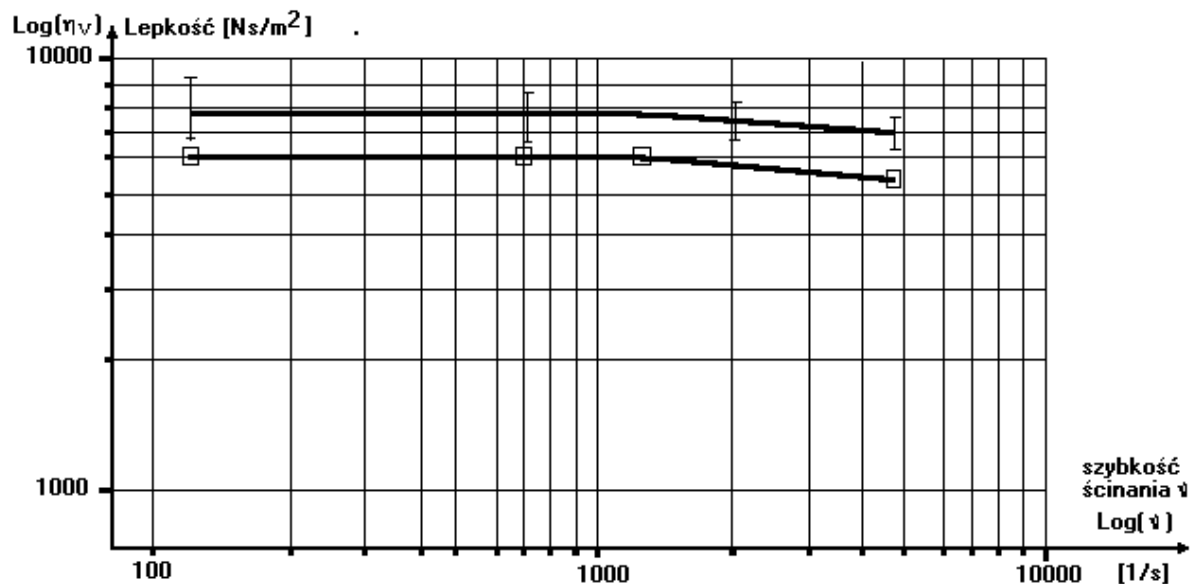
Rys. 8. Zakresy zarejestrowanych sił dla różnych temperatur oraz prędkości ruchu tłoka nurnikowego reometru kapilarnego.

Fig. 8. Ranges of registered forces for various temperatures and rheometer's capillary plunger velocity.

Prędkość liniowa tłoka reometru V_1 [cm/min]	Lepkość przeciętna w temperaturze $T=275\text{ }^\circ\text{C}$ η_v [Ns/m ²]	Lepkość przeciętna w temperaturze $T=265\text{ }^\circ\text{C}$ η_v [Ns/m ²]
5	4200-8160	4900-8160
10	4490-7750	6120-7750
20	5100-7140	6120-7340
50	4470-5380	5060-6200

TABELA 4. Wartości zakresów przeciętnej lepkości dla próbek granulatu, które przetwarzały się dobrze.

TABLE 4. Apparent viscosity value range for good processing samples.



PRZEDZIAŁY LEPKOŚCI PRZY RÓŻNYCH SZYBKOŚCI ŚCINANIA (dla $T=275\text{ }^\circ\text{C}$)

- | - dla próbek normalnie przetwarzających się (charakterystyka 'wzorcowa')
- - dla próbki wątpliwej jakości

Rys. 9 Lepkość stopionych próbek w zależności od szybkości ścinania.

Fig. 9. Viscosity of the melted samples in share rate relationship.

VI. WNIOSKI

1. Jak widać ze schematu przedstawionego na rys.8, niewielki spadek temperatury o 10 °C powoduje niewielki wzrost lepkości przeciętnej (szczególnie dla dużych wartości siły F). Zmiana temperatury o 5 °C praktycznie lepkości nie zmienia.
2. Wraz ze wzrostem szybkości ścinania lepkość przeciętna wykazuje tendencję spadkową.
3. Jak się okazuje, 25% spadek lepkości próbki wątpliwej jakości nie powodował istotnych problemów w procesie produkcji folii. Wyprodukowaną folię z tego surowca uznano jako dobrą.

L I T E R A T U R A

1. BERNHARDT E.C., „*Processing of Thermoplastic Materials, Plastic Engineering Series*”, Reinhold Publishing Co., 1959
2. FERRY J.D. „*Viscoelastic Properties of Polymers*”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1961
3. PEZZIN G., „*Rheology of Molten Polymers*”
4. BALLMAN R.L., BROWN J.J., „*Capillary Rheometry*”, Research Department Monsanto Chemical Company Plastic Division, Springfield, Massachusetts, INSTRON CORPORATION 2500, Washington Street, Canton, Massachusetts 02021