

Optymalizacja temperatury suszenia w suszarkach rozpryskowych

Optimisation of the drying temperature in spray dryers

M. STEENSMA



W KILKU SŁOWACH

W artykule przedstawiono propozycję zastosowania zmodyfikowanego testu spalania bezpłomieniowego jako alternatywę, testu wg normy IEC 61241 dla warunków termicznych w suszarce rozpryskowej. Zmiany w teście polegają na zwiększeniu wartości temperatury otoczenia i grubości warstwy pyłu do wartości najmniej korzystnych. Test stosuje się do oceny ryzyka zapłonu pyłów palnych.

Utlenianie się warstwy pyłu organicznego wskutek reakcji z tlenem (z powietrza) i/lub reakcja egzotermicznego rozkładu ogranicza zakres temperatury suszenia w suszarkach rozpryskowych, a dokładniej – temperatury wlotowej powietrza stosowanego w procesie suszenia. Pomiar początkowej temperatury spalania bezpłomieniowego jest zatem niezbędny w celu określenia maksymalnej temperatury suszenia.

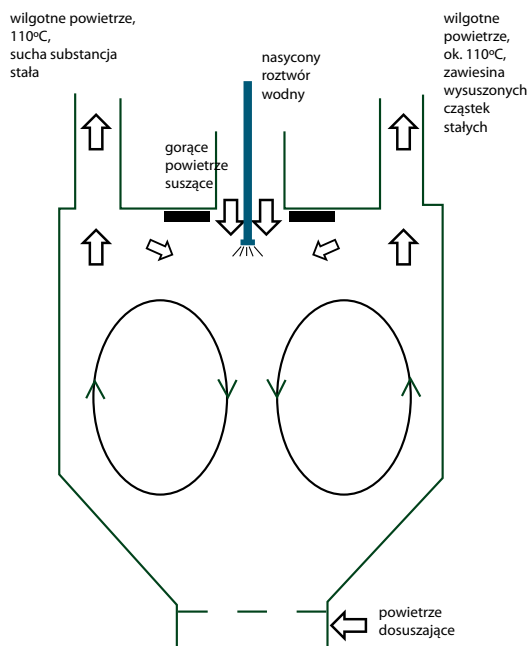
Zazwyczaj stosuje się test spalania bezpłomieniowego według normy IEC 61241 (PN-EN 60079), opracowany w celu ograniczenia tem-



SUMMARY

The article proposes a modified version of the flameless combustion test as an alternative to the method specified in the standard IEC 61241 concerning thermal conditions occurring in the spray dryer. The introduced changes involve increasing the ambient temperature and the dust layer thickness to match the least favourable values. The test is used to evaluate the risk of combustible dust ignition.

peratury powierzchni urządzenia elektrycznego do poziomu uniemożliwiającego zapalenie się warstwy pyłu nagromadzonego na powierzchni tego urządzenia. Test taki można stosować w przypadku suszarek rozpryskowych, ale nie jest on obowiązkowy. Okazuje się, że ten zwykle stosowany test, spalania bezpłomieniowego, jest niereprezentatywny dla warunków termicznych w suszarce rozpryskowej. Można wykazać, że warstwa pyłu na powierzchni urządzenia wydzielającego ciepło (np. silnika) przyjmuje obciążenie cieplne różniące się od tego, które daje powierzchnia suszarki rozpryskowej. Akzo Nobel opracował taki wariant testu spalania bezpłomieniowego, który dokładniej odpowiada sytuacji termicznej panującej w suszarce rozpryskowej. Podstawowa modyfikacja polega na tym, że temperaturę nad warstwą pyłu można ustawić na znacznie wyższym kontrolowanym poziomie, np. na 110°C, zamiast na poziomie temperatury pokojowej. Jednocześnie można przyjąć grubość warstwy pyłu dla „najgorszego przypadku” na poziomie np. 15 mm, a nie 5 mm, jak to ma miejsce w zwykłym teście. Z tego



RYS. 1. Schemat suszarki rozpryskowej i przepływu powietrza wewnątrz. Miejsca zagrożone zaznaczono grubą, ciemną linią

nowego testu otrzymuje się zmodyfikowaną temperaturę spalania bezpłomieniowego. Maksymalną temperaturę suszenia otrzymuje się łatwo przez odjęcie stałej poprawki temperatury – niezależnej od grubości warstwy i poziomu temperatury – od wartości zmodyfikowanej temperatury spalania bezpłomieniowego. Organizacja TNO dla Obronności, Ochrony i Bezpieczeństwa (Rijswijk, NL) oficjalnie zgodziła się na stosowanie testu zmodyfikowanego i stałej poprawki temperaturowej w celu wyznaczenia maksymalnej temperatury suszenia.

Warunki cieplne w suszarce rozpryskowej

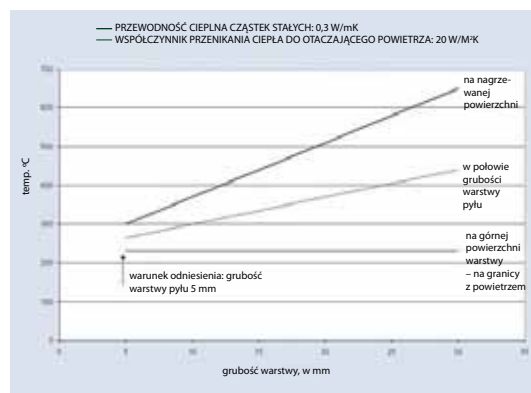
Woda z prawie nasyconego roztworu wodnego jest odparowywana przez gorące powietrze, w rezultacie czego otrzymuje się suchy proszek i wilgotne, znacznie chłodniejsze powietrze wylotowe, które przenosi proszek do następnego etapu. Pomimo optymalizacji charakterystyki przepływu w suszarce rozpryskowej nadal pozostają tam pewne miejsca, gdzie może gromadzić się pył. Takim niebezpiecznym miejscem pod względem spalania bezpłomieniowego jest okolica wlotu gorącego powietrza: warstwa pyłu jest tu wystawiona na działanie z jednej strony temperatury bliskiej temperaturze wlotowego powietrza, a z drugiej strony – na działanie temperatury panującej w suszarce rozpryskowej,

wynoszącej w przybliżeniu 100°C. Miejsca krytyczne zaznaczono grubą kreską na rys. 1.

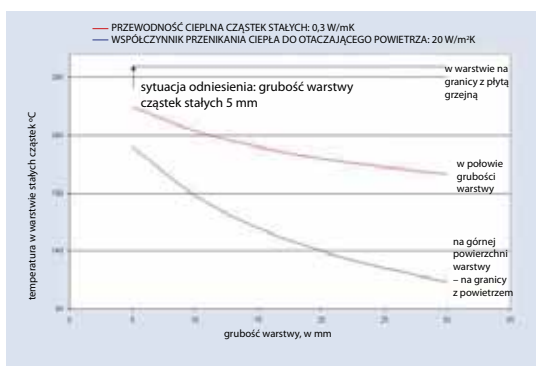
Temperatura powierzchni w urządzeniu elektrycznym w porównaniu z temperaturą w suszarce rozpryskowej

Izolacyjne działanie warstwy pyłu utrudnia chłodzenie urządzenia elektrycznego, wskutek czego temperatura powierzchni urządzenia szybko wzrasta. W suszarce rozpryskowej to się nie zdarza: maksymalna możliwa temperatura powierzchni jest równa temperaturze wlotowej powietrza. Rysunki 2. i 3. porównują, co się dzieje w miarę zwiększania się grubości warstwy. Rysunek 2. odnosi się do płyty nagrzewanej elektrycznie ze stałą mocą, rys. 3. zaś do płyty nagrzewanej elektrycznie, przy utrzymywaniu stałej temperatury powierzchni.

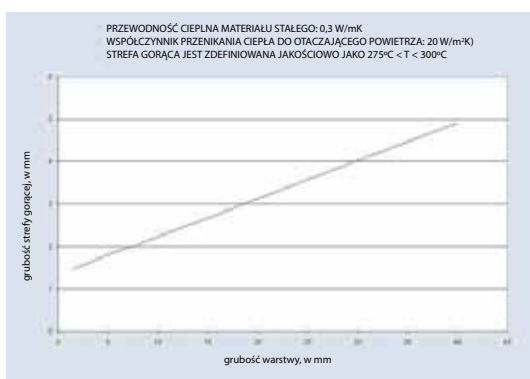
Oba rysunki oparto na obliczeniach modelowych. Sytuacja odniesienia to temperatura powierzchni 300°C przy grubości warstwy 5 mm i temperaturze otoczenia 20°C. Dla uproszczenia przyjmuje się, że warstwa pyłu jest nieruchoma. Sytuacja na rysunku 2. jest podobna do sytuacji pyłu na pracującym (włączonym) urządzeniu elektrycznym, natomiast rys. 3. opisuje faktyczną sytuację w suszarce rozpryskowej. Przy stałej mocy (rys. 2.) temperatura całej warstwy pyłu szybko wzrasta wraz ze zwiększaniem się grubości warstwy, natomiast przy stałej temperaturze powierzchni (rys. 3.) zwiększać się będzie tylko szerokość strefy o temperaturze zbliżonej do 300°C. Rysunek 4. pokazuje, że szerokość tej gorącej strefy zwiększa się prawie liniowo ze wzrostem samej grubości warstwy.



RYS. 2. Temperatury w nieruchomej warstwie pyłu przy stałej mocy grzania



RYS. 3. Temperatury w warstwie pyłu przy stałej temperaturze powierzchni



RYS. 4. Grubość strefy gorącej przy kontrolowanej temperaturze powierzchni

Test spalania bezpłomieniowego według IEC 61241 (nen 50281)

Proszek organiczny osadzony jest na płycie grzejnej, w obszarze pierścienia o średnicy 100 mm (możliwe są też pozastandardowe, większe średnice) i na wysokość 5 mm. Moż-

liwe są grubsze warstwy, ale otrzymanych wyników nie można wtedy wykorzystać bezpośrednio do uzyskania maksymalnej dopuszczalnej temperatury procesu. Pierścień z zawartością i płytą grzejną umieszcza się w dużej komorze bez wentylacji wymuszonej, w temperaturze otoczenia, jak pokazano na rys. 5. Temperatura płyty grzejnej wzrasta o 10°C co 30 minut. Temperatura spalania bezpłomieniowego to najniższa temperatura, przy której proszek się zapala.

Gradient temperatury w warstwie materiału stałego jest bardzo duży, więc tylko niewielka część warstwy („warstwa gorąca”) wyznacza krytyczność całej warstwy. Jak widać na rys. 3., wielkość tej strefy wzrasta stopniowo wraz z grubością warstwy. Gradient temperatury występujący podczas testu jest „ostrzejszy” niż w suszarce rozpryskowej, ponieważ nad warstwą materiału panuje temperatura pokojowa, a nie około 100°C.

Test koszykowy według Bowes-Camerona

Teorie dotyczące krytyczności reaktywnej warstwy pyłu zakładają geometrie, w których materiał reaktywny jest całkowicie otoczony przez gorące powietrze. Tę wyidealizowaną sytuację symuluje test koszykowy według Bowesa i Camerona. Testowany materiał umieszcza się w koszyku w kształcie sześciangu, wykonanym z siatki o bardzo drobnych oczkach, zawieszonym w piecu. Aby zapobiec zbyt silnemu przepływowi powietrza w bezpośrednim otoczeniu koszyka (zazwyczaj 25 mm), wokół niego umieszcza się dodatkowy koszyk 40 mm (wykonany z siatki o większych oczkach), patrz rys. 6. W tym podejściu cała masa znajdująca się w koszyku 25 mm wpływa na stan krytyczny materiału.

Temperatura krytyczna dla zapoczątkowania utleniania się materiału

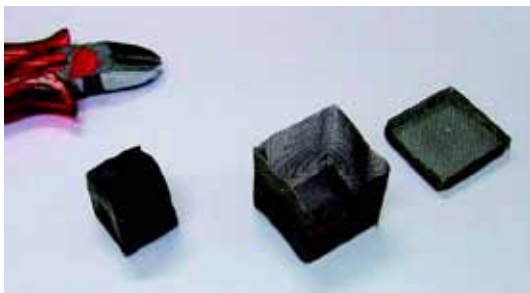
Na początku utleniania się materiału jeszcze niewiele się dzieje, ale szybkość wytwarzania ciepła zaczyna przekraczać szybkość jego odprowadzania, a temperatura warstwy już nie zmierza do wartości równowagi. Po zaobserwowaniu tego zjawiska eksperymentator przestaje zwiększać temperaturę płyty grzejnej. Ostatnia faza, gdy temperatura wzrasta do poziomu 600



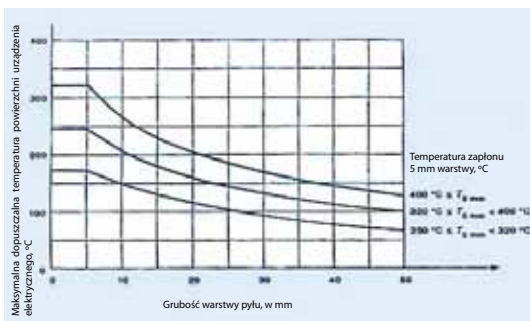
RYS. 5. Pomiar temperatury bezpłomieniowego spalania (dla warstwy 15 mm)



do 800°C, trwa jakiś czas, przy grubych warstwach nawet parę godzin, i dlatego uważa się, że w punkcie początkowym bezpłomieniowego spalania dostęp tlenu do strefy gorącej jeszcze nie jest czynnikiem granicznym. A więc klasyczne modele niestabilności reaktywnych materiałów stałych można stosować w celu wyznaczenia interesujących korelacji, jak np. wpływu grubości warstwy, poziomu temperatury, energii aktywacji, przewodności cieplnej itp. Nie interesuje nas właściwie dokładny przebieg temperatury po przejściu w fazę niestabilności, lecz jedynie temperatura krytyczna warstwy reaktywnej.



RYS. 6. Wyposażenie używane w teście koszykowym Bowes-Cameraona



RYS. 7. Maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni w funkcji grubości warstwy

Obliczanie przydatnych korelacji dla testu spalania bezpłomieniowego

Ze względu na duży gradient temperatury w warstwie pyłu, różny przy każdym pomiarze, prawie niemożliwe jest znalezienie korelacji analitycznych dla wpływu grubości warstwy, poziomu temperatury, energii aktywacji itp. Dodatkowym problemem jest uzyskanie pełnego zestawu stosownych danych fizycznych, takich jak temperatura aktywacji E/R [K], szybkość wydzielania ciepła [W/kg] w funkcji temperatury, przewodności cieplnej materiału stałego i współczynnika przenikania ciepła dla powietrza.

Obliczanie korelacji dla testu Bowes-Cameraona

Test koszykowy Bowes-Cameraona jest bardziej przystępny dla obliczeń. Z analizy regresyjnej formalnego testu Bowes-Cameraona [1] wynika, że wartość „domyślną” K można przypisać temperaturze aktywacji E/R. Można też wykazać, że sytuacja cieplna w przypadku koszyka 25 mm nie jest jeszcze wystarczająco heterogeniczna, by zastosować teorię Frank-Kamenetskiego [2]. Można również wykazać, stosując tę teorię dla zakresu przejściowego między niestabilnością homogeniczną i heterogeniczną [3], że koszyk 25 mm jest w przybliżeniu równoważny warstwie 15 mm „nagrzewanej ze wszystkich stron”.

Poprawki temperatury otrzymane na podstawie zwykłego testu spalania bezpłomieniowego

Rysunek 7. pokazuje, jak w przypadku urządzenia elektrycznego, na podstawie temperatury spalania bezpłomieniowego, należy wyprowadzić maksymalną dopuszczalną temperaturę powierzchni. Przy pomiarze należy przyjąć warstwę 5 mm, nawet jeśli grubość warstwy jest większa w najgorszym przypadku.

Ogólna poprawka 75°C

Poprawka 75°C, wynikająca z rys. 7. dla dowolnej grubości warstwy i temperatury, daje się częściowo wytłumaczyć: w zwykłym teście gradient temperatury jest większy niż w praktyce dla suszarki rozpryskowej, więc „strefa gorąca” jest za mała. Jednakże jego wpływ na temperaturę krytyczną jest niewielki, około 20°C. W rzeczywistości należy do tego dodać normalną poprawkę temperatury, rzędu 20 do 30°C, zależną od charakterystyki regulacji temperatury powietrza wlotowego i od zastosowanych środków bezpieczeństwa. Można także lepiej zacząć od bezpiecznej sytuacji, czyli gdy nie występuje spalanie bezpłomieniowe, co wymaga dodatkowej poprawki 10°C. W sumie te wszystkie poprawki dadzą raczej 50 do 60°C, a nie 75°C.

Wpływ grubości

Jest logiczne, że temperatura spalania bezpłomieniowego jest niższa dla grubszych warstw. „Strefa gorąca” staje się grubsza, co pokazano na rys. 4, stąd więcej materiału reaktywnego przy-

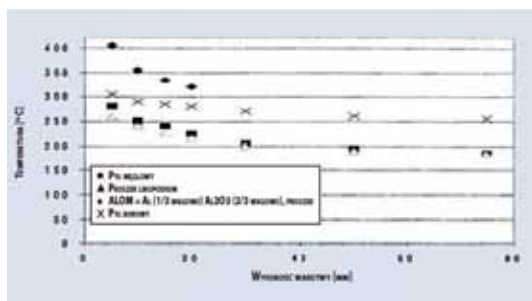




czynia się do stanu krytycznego, a również i odprowadzanie ciepła jest bardziej ograniczone. Jednak z literatury wynika, że wpływ grubości warstwy jest dość umiarkowany. Na rys. 8. widać, że przy zmianie grubości warstwy z 5 mm na 15 mm średnie obniżenie temperatury spalania bezpłomieniowego wynosi 30°C, w przeciwieństwie do rys. 7., który wskazuje na obniżenie od 50 do 90°C.

Obliczenia dla tłużej się warstwy o grubości 15 mm

Rysunek 9. podaje temperatury krytyczne dla reaktywnego stałego materiału o grubości 15 mm, znajdującego się w różnych warunkach cieplnych. Temperatura spalania bezpłomieniowego dla tego materiału wynosi dokładnie 400°C



RYS. 8. Wpływ poziomu temperatury oraz grubości warstwy na temperaturę spalania bezpłomieniowego dla czterech substancji [4]

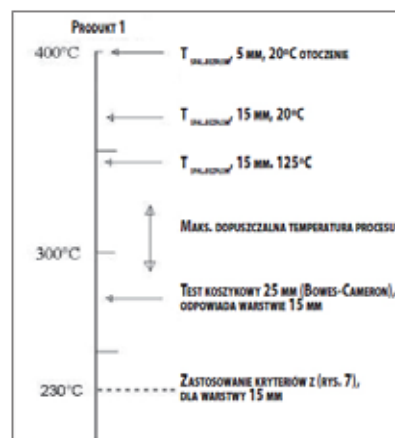
przy temperaturze otoczenia 20°C i grubości warstwy równej 5 mm. Wyniki wyprowadzono, stosując model matematyczny warstwy pyłu, zamodelowanej w postaci stosu 16 jednakowych plastrów, z których każdy charakteryzował się własną temperaturą, szybkością reakcji, konwersją itp. Dokładność wynosi około 1°C, co oznacza, że jeśli temperatura przejścia w fazę niestabilności jest x°C, to w temperaturze (x-1)°C nie będzie przejścia w fazę niestabilności. Jak widać na rys. 9., temperatura spalania bezpłomieniowego spada o około 30°C przy zmianie grubości warstwy z 5 do 15 mm, co jest zgodne z poz. lit. [4]. Jeśli temperatura otaczającego powietrza wzrośnie do 125°C, to dodatkowy spadek temperatury spalania bezpłomieniowego wyniesie około 20°C.

Nieoczekiwany wynik otrzymano w teście z koszykiem 25 mm, odpowiadającym warstwie 15 mm, wystawionym na działanie gorącego powietrza z obu stron: temperatura spalania bezpłomieniowego była niższa o 60°C. Ponowne

obliczenia dla bardziej reaktywnego pyłu, takiego, że $T_{spal.bezplom.} = 300^{\circ}C$ (5 mm, 20°C), wykazują podobną sekwencję poziomu temperatur, ale przy wartościach obniżonych do około 75% wartości z rys. 9. Wynik testu koszykowego – T_{cage} , 25 mm – uznaje się za bardzo ostrożny pod względem wyznaczania maksymalnej dopuszczalnej temperatury procesu. Można by nawet do zmierzonej wartości dodać jakąś poprawkę temperatury. Niestety, niemożliwe okazało się znalezienie prostej korelacji między $T_{spal.bezplom.}$, 15 mm, 125°C a T_{koszyk} , 25 mm. W praktyce można więc lepiej zacząć od wyższej temperatury $T_{spal.bezplom.}$, 15 mm, 125°C i odjąć niewielką poprawkę, by otrzymać maksymalną dopuszczalną temperaturę procesu.

Prototyp zmodyfikowanego testu spalania bezpłomieniowego

Wprowadzono dwie zmiany w zwykłym teście: zwiększenie temperatury otoczenia do poziomu dla najmniej korzystnego przypadku stwierdzonego dla suszarki rozpryskowej i przyjęcie od samego początku najmniej korzystnej grubości warstwy. W naszym przypadku przyjęto temperaturę 125°C i grubość warstwy 15 mm.



RYS. 9. Obliczone temperatury przejścia w fazę niestabilną dla warstwy pyłu reaktywnego. Parametry – patrz tekst.

Rysunek 10. przedstawia prototyp wykorzystujący nadmiar ciepła z płyty grzejnej, której średnica jest znacznie większa niż średnica pierścienia z reaktywnym pyłem. Stąd temperatura nad materiałem reaktywnym jest podwyższona, bez wprowadzania zwiększonego ruchu powietrza. Dla kilku handlowych produktów ustalono, że różnica między $T_{spal.bezplom.}$, 15 mm, 125°C a $T_{spal.bezplom.}$, 5 mm, 20°C wynosi 50 do 60°C i jest do-



statecznie zgodna z danymi zawartymi na rys. 9. Temperatura nad warstwą pyłu jest też homogoniczna w przedziale 1°C. Czas pomiaru przy grubości warstwy 15 mm musi zostać zwiększony do 1 godziny. Największym problemem jest to, że temperatura nad warstwą w niewielkim stopniu jest funkcją temperatury płyty grzejnej, co powoduje odchylenie wyniku testu o około 5°C, jeśli temperatura płyty grzejnej waha się między 225°C a 360°C. Dlatego właśnie prototyp oceniono jako niewystarczająco dokładny, ale dobrze przedstawiający ideę zmodyfikowanej temperatury spalania bezpłomieniowego.

Chłodzony piec

Pomysł umieszczenia płyty grzejnej w dużym piecu, który można chłodzić, był prosty, ale pojawiły się pewne nieoczekiwane problemy:

- Regulacja temperatury pieca jest zakłócona przez doprowadzenie dużej ilości nieoczekiwane ciepła z płyty grzejnej, przy czym ilość ta jeszcze rośnie przy zwiększaniu temperatury płyty grzejnej. Przyczyną jest tu doskonała izolacja cieplna pieca. Można usunąć tę przeszkodę przez chłodzenie pieca. Wtedy regulacja temperatury pieca staje się stabilna, ale wykazuje przesunięcie w porównaniu do sytuacji bez zakłóceń; to jednak może bez trudu skorygować eksperymentator.
- Piec jest dość mały i nie ma dopływu świeżego powietrza, chociaż cechuje go silna cyrkulacja powietrza. Uważamy, że dla warstwy 15 mm dopływ świeżego powietrza jest konieczny. I dlatego świeże, zimne powietrze jest wdmuchiwane za pomocą małego wentylatora umieszczonego z boku. Daje to również efekt chłodzący.

Przykład zmodyfikowanego testu spalania bezpłomieniowego

Rysunek 11. dotyczy produktu zachowującego się praktycznie idealnie: temperatura płyty grzejnej 330°C daje prostą linię temperatury w połowie grubości próbki, natomiast ta temperatura wyraźnie wzrasta przy temperaturze płyty 340°C, więc w tej fazie „oczekiwania i obserwacji” nie jest dopuszczalne dalsze podnoszenie temperatury płyty grzejnej. Później następuje oczywista nie-

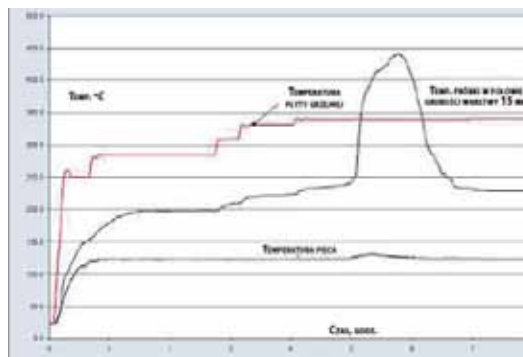
stabilność temperatury. Zmodyfikowaną temperaturę spalania bezpłomieniowego znano już z poprzednich eksperymentów, dlatego też nie stosowano się ściśle do zasady zwiększania jej etapami dokładnie o 10°C co godzinę.



RYS. 10. Prototyp do wykonywania zmodyfikowanego testu spalania bezpłomieniowego

Ustalenia na podstawie pierwszych pomiarów dla różnych produktów

- Pomiar w warstwie 15 mm jest znacznie dokładniejszy niż w warstwie 5 mm, ponieważ zachodzące kurczenie się, pęcznienie czy wietrzenie materiału powodują względnie mniejsze ruchy termopary, a więc sygnał jest znacznie bardziej wiarygodny.
- Różnica między $T_{\text{spal.bezplom.}}'$ 5 mm, 20°C a $T_{\text{spal.bezplom.}}'$ 15 mm, 125°C jest rzędu 50°C, co pozostaje zgodne z obliczeniami.
- Wyraźnie obserwuje się względnie niską temperaturę w środkowej części próbki, co pokazuje rys. 3.



RYS. 11. Zmodyfikowana metoda w zastosowaniu do produktu A