

Tadeusz Lis*, Samoń Zbigniew** Helena Lis*

*Wydział Inżynierii Produkcji
Akademia Rolnicza w Lublinie
**IUNG w Puławach

SPRAWNOŚĆ CIEPLNA PRZEPONOWYCH I BEZPRZEPONOWYCH PODGRZEWACZY POWIETRZA W SUSZARKACH CHMIELU

Streszczenie

Zastosowanie opalanych gazem ziemnym podgrzewaczy bezprzeponowych wpłynęło na zmniejszenie zużycia paliwa o około 30% - w stosunku do podgrzewaczy przeponowych. Sprawność cieplna zasilanych gazem ziemnym podgrzewaczy bezprzeponowych jest znacznie wyższa, niż przeponowych. Statystycznie nieistotne są różnice pomiędzy sprawnością cieplną podgrzewacza przeponowego zasilanego gazem ziemnym lub węglem. Nie było też istotnych różnic pomiędzy sprawnością podgrzewaczy zamontowanych w suszarce chmielu bez recyrkulacji oraz z częściową recyrkulacją.

Słowa kluczowe:

Wykaz oznaczeń

$c_{pg} = 1,0077, c_{pw} = 1,872$ – ciepło wł. powietrza suchego oraz pary wodnej w powietrzu, kJ/(kg·K),

$i_{(1+x)1}, i_{(1+x)2}$ – entalpia powietrza odpowiednio-otoczenia, oraz napływającego do suszarki, kJ/(1 kg +x),

$(I_2 - I_1)$ – przyrost entalpii powietrza w podgrzewaczu suszarki, kW,

x – zawartość wody w powietrzu (stopień zwilżenia), kg H₂O/kg p.s.,

p – ciśnienie atmosferyczne [Pa],

p_w, p_g – ciśnienie składnikowe odpowiednio pary wodnej i powietrza suchego [Pa]

$(p_w'')_{t1}, (p_w'')_{t2}$ – ciśnienie nasycenia pary wodnej w temp. t_1, t_2 , Pa, [Raźniewicz K.1966],

$R_g = 287$ J/(kg·K) – stała gazowa suchego powietrza,

$R_w = 461,5$ J/(kg·K) – stała gazowa pary wodnej,

$r_o = 2501$ kJ/kg – ciepło parowania w punkcie potrójnym wody,

S_{pod} – całkowite straty w podgrzewaczu powietrza, [%],

S_k – strata kominowa, [%],

S_{CO} – strata niezupełnego spalania, [%],

S_n – strata niecałkowitego spalania, [%],

S_{pr} – straty ciepła przez promieniowanie i konwekcję, [%],

$S_{gż}$ – strata w gorącym żużlu, [%],

t_1, t_2 – temperatura powietrza odpowiednio- przy wlocie i wylocie nagrzewnicy, [°C],

W_d – wartość opałowa paliwa, [kJ/kg lub kJ/Nm³],

η_p – sprawność cieplna podgrzewacza powietrza w suszarce,

ρ_{1+x} – gęstość powietrza wilgotnego, kg/m³,

τ – czas suszenia, s, godz.,

$\phi_1 = p_w/p_w''$ – wilgotność względna powietrza zasilającego suszarkę,

v_{sr} – średnia prędkość przepływu powietrza przy wlocie, m/s,

\dot{V} – natężenie przepływu powietrza przez suszarkę, m³/ilość,

\dot{Q}_p - ilość ciepła uzyskanego w wyniku spalania paliwa, [kW],

Wprowadzenie i cel pracy

Owocostany chmielu (*Humulus lupulus* L.), zwane szyszkami, używane są w przemyśle piwowarskim, jak również w niewielkiej ilości w przemyśle farmaceutycznym, kosmetycznym, i spożywczym. Szyszki chmielu zawierają w swoim składzie cenne dla przemysłu piwowarskiego składniki chemiczne - żywice chmielowe, olejki aromatyczne oraz garbniki.

Chmiel w 2000 r. uprawiany był na świecie na powierzchni wynoszącej prawie 56 tys. ha, a średni plon wynosił 1,66 t/ha. Pod względem powierzchni uprawy kraj nasz zajmował szóste miejsce w świecie, po takich krajach, jak: RFN, USA, Czechy, Chiny i Wielka Brytania. W Polsce plon chmielu w ostatnim pięcioleciu wahał się od 1,16 do 1,28 t/ha [Raporty IHGC 1995 - 2000]. Mimo, że spożycie piwa w naszym kraju systematycznie rośnie (o 10% rocznie), to w drugiej połowie lat 90-tych powierzchnia uprawy chmielu zmniejszyła się od 2480 ha do 2080 ha. Było to związane ze znacznym spadkiem cen, spowodowanym importem dotowanego surowca [Dwornikiewicz 1999a]. W przeliczeniu na alfa-kwasy Polska więcej chmielu importuje niż eksportuje [Stasiak i Zaorski 2000].

Główne rejony uprawy chmielu w naszym kraju w latach 90-tych znajdowały się w województwach: lubelskim - 1764 ha (82% powierzchni uprawy tej rośliny), wielkopolskim - 178,5 ha (8,3%) i opolskim 85,3 ha (4%) [Dwornikiewicz 1999b].

Proces suszenia pochłania 25 - 35% całkowitych nakładów energii skumulowanej, zużywanej podczas produkcji chmielu [Cetina i Kohlmann 1980].

Rozwój gazyfikacji przewodowej na wsi [Rocznik stat. 2000] tworzy warunki wykorzystania gazu ziemnego do ogrzewania suszarek chmielu. Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że do momentu rozpoczęcia badań nie podejmowano prac badawczych nad ogrzewaniem suszarek chmielu przy pomocy mieszanki powietrza i spalin powstałych w wyniku spalania gazu ziemnego.

Użycie w suszarkach chmielu podgrzewaczy opalanych gazem ziemnym jest bardziej korzystne dla środowiska naturalnego, niż opalanych węglem, ze względu na mniejszą emisję szkodliwych zanieczyszczeń [Badyda K., 2000; 7-8].

Celem pracy było zbadanie i porównanie sprawności cieplnej podgrzewacza przeponowego opalanego węglem i gazem - z bezprzeponowym, który miał zastosowanie jedynie przy opalaniu suszarki chmielu gazem ziemnym. Zbadano też sprawność podgrzewacza w suszarce bez recyrkulacji- oraz z częściową recyrkulacją powietrza.

Warunki, metodyka i przebieg badań

Do badań wybrano 4 podgrzewacze powietrza w suszarkach chmielu (obiekty w skali technicznej):

obiekt 1 - przeponowy wymiennik ciepła na gaz ziemny,

obiekt 2 - przeponowy wymiennik ciepła na węgiel,

obiekt 3 - bezprzeponowy wymiennik ciepła na gaz ziemny (rys. 1),

obiekt 4 - bezprzeponowy wymiennik ciepła na gaz ziemny - z zastosowaniem częściowej recyrkulacji czynnika suszącego w suszarce.

Sprawność cieplną podgrzewaczy powietrza określono ze wzoru o postaci:

$$\eta_p = (I_2 - I_1) / \dot{Q}_p \quad (1)$$

Przyrost entalpii w podgrzewaczu powietrza określano ze wzoru o postaci

$$(I_2 - I_1) = [\dot{V} \rho_{1+x} (i_{(1+x)_2} - i_{(1+x)_1})] \cdot 1 / (1+x) \quad (2)$$

Objętość powietrza wyliczano na podstawie pomiaru prędkości jego przepływu, wykonywanego za pomocą anemometru skrzydełkowego AR-2 i powierzchni przekroju suszarki. Zakres pomiarowy przyrządu wynosił 0,2 - 19,9 m/s, a dokładność 0,01 m/s.

Gęstość wilgotnego powietrza obliczono ze wzoru o postaci:

$$\rho_{1+x} = \left\{ (p_{ps} / R_{ps}) + (p_{pp} / R_w) \right\} 1 / T \quad (3)$$

Ciśnienie składnikowe pary wodnej wynosiło

$$p_w = \varphi / p_w'' \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

a powietrza suchego

$$p_g = p - \{ \varphi / p_w'' \} \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

Entalpię powietrza wilgotnego nienasyconego obliczano w odniesieniu do 1 kg powietrza suchego ze wzoru o postaci:

$$\rho_{1+x} = t \cdot c_{pg} + x(c_{pw}t + r_0) \quad (6)$$

uwzględniając zawartość wody w powietrzu napływającym do podgrzewacza, którą wyznaczono według znanego równania o postaci:

$$x = 0,622 \left\{ (\varphi \cdot p_w'') / [p_a - \varphi \cdot p_w''] \right\} \quad (7)$$

Względną wilgotność powietrza otoczenia była mierzona, a czynnika suszącego obliczana ze wzoru:

$$\varphi_2 = \varphi_1 \cdot 0,622 \cdot [p'' \cdot t_1 / p'' \cdot t_2] \quad (8)$$

Ciepło uzyskane z opału wynosiło

$$Q_d = m_d \cdot W_u \quad (9)$$

Straty w podgrzewaczu powietrza określa wzór o postaci [Praca zbiorowa 1974]

$$S_{pod} = S_k + S_{CO} + S_n + S_{pr} + S_{gz} \quad (10)$$

Strata kominowa, dotycząca tylko przeponowych wymienników ciepła, została wyznaczona z empirycznego wzoru Siegerta o postaci

$$S_k = \alpha \cdot \frac{t_{sp} - t_o}{CO_2} \quad (11)$$

gdzie: α - bezwymiarowy współczynnik [Praca zbiorowa 1974], t_{sp} - temperatura spalin przy wyjściu z podgrzewacza, [°C], t_o - temperatura otoczenia, [°C], CO_2 - zawartość dwutlenku węgla w spalinach [%].

Ponieważ nie stwierdzono tlenu węgla zarówno w spalinach podgrzewacza opalanego paliwem stałym, jak i w spalinach podgrzewaczy gazowych, stratę niepełnego spalania przyjęto za równą 0. Na stratę niecałkowitego spalania (występującą zwykle w wymiennikach opalanych paliwem stałym) składają się straty części palnych w żużlu, w przesypie oraz w lotnym koksiku i sadzy. Strata w gorącym żużlu występuje tylko w podgrzewaczach, w których żużel występuje w postaci ciekłej. Straty przez promieniowanie i konwekcję są trudne do wyznaczenia. Określa się je zwykle jako uzupełnienie bilansu kotła do 100%. Ze względu na brak możliwości wykonania większości pomiarów potrzebnych do wyznaczenia poszczególnych składników wzoru (10), w badaniach ograniczono się jedynie do określenia strat kominowych. Całkowite straty w podgrzewaczu powietrza są różnicą ciepła uzyskanego ze spalania paliwa i ciepła wykorzystanego na ogrzanie powietrza.

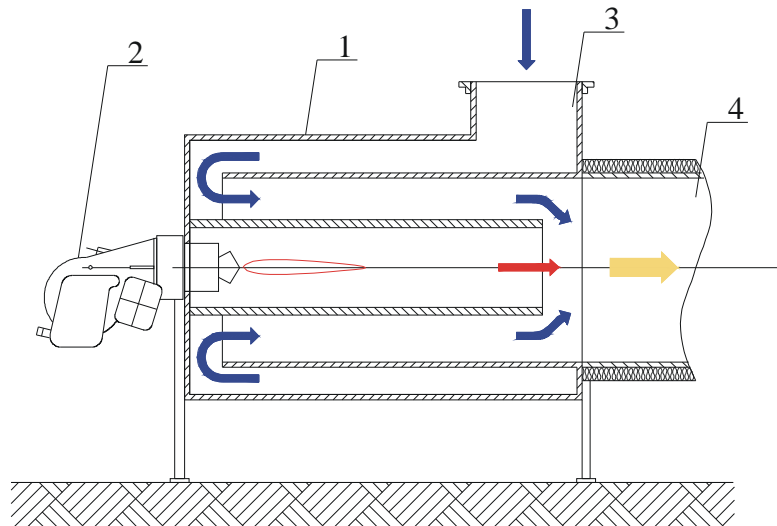
Podczas pomiarów określono następujące cechy powietrza wilgotnego: temperaturę suchego i mokrego termometru, ciśnienie atmosferyczne oraz wilgotność względną powietrza. Zużycie węgla określono poprzez ważenie na wadze szalkowej z dokładnością do 0,1 kg. Wartość opałowa węgla została wyznaczona w laboratorium LPEC w Lublinie. Zużycie gazu określano poprzez codzienny odczyt wskazań gazomierza. Wartość opałową gazu ziemnego przyjęto na podstawie wyników analiz na stacji rozdzielczej w Rozwadowie. Do pomiaru temperatury powietrza według termometru suchego i mokrego w suszarkach użyto wielokanałowego miernika temperatury TA-100, którego dokładność wynosiła 0,1°C. Pomiaru dokonywano w czterech miejscach pod sitem dolnym, rozmieszczonych na przekątnych komory suszenia, w odległości 0,75 m od narożników. Temperaturę średnią z czterech punktów uznano jako temperaturę powietrza wlotowego. W taki sam sposób mierzono temperaturę nad sitem górnym, przy czym miejsca pomiaru znajdowały się na wysokości 0,2 m nad powierzchnią suszonego chmielu. Dla kontroli wskazań miernika obok jego czujników zostały użyte termometry rtęciowe o zakresie 0 - 120°C i dokładności 0,5°C. Temperaturę spalin odlotowych mierzono termometrem zegarowym o zakresie 100 - 600°C i klasie dokładności 1,6. Wilgotność względną powietrza atmosferycznego wyznaczano dodatkowo psychrometrem Assmana. Dokładność wskazań termometru suchego i mokrego wynosiła 0,5°C.

Badania przeprowadzono w 3 powtórzeniach. Dla porównania wartości średnich dla badanych obiektów wykonano analizę wariancji. Najmniejsze istotne różnice obliczono według testu t-Tukeya na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Nomogramy w pracy odnoszą się do wartości średnich.

Wyniki badań i dyskusja

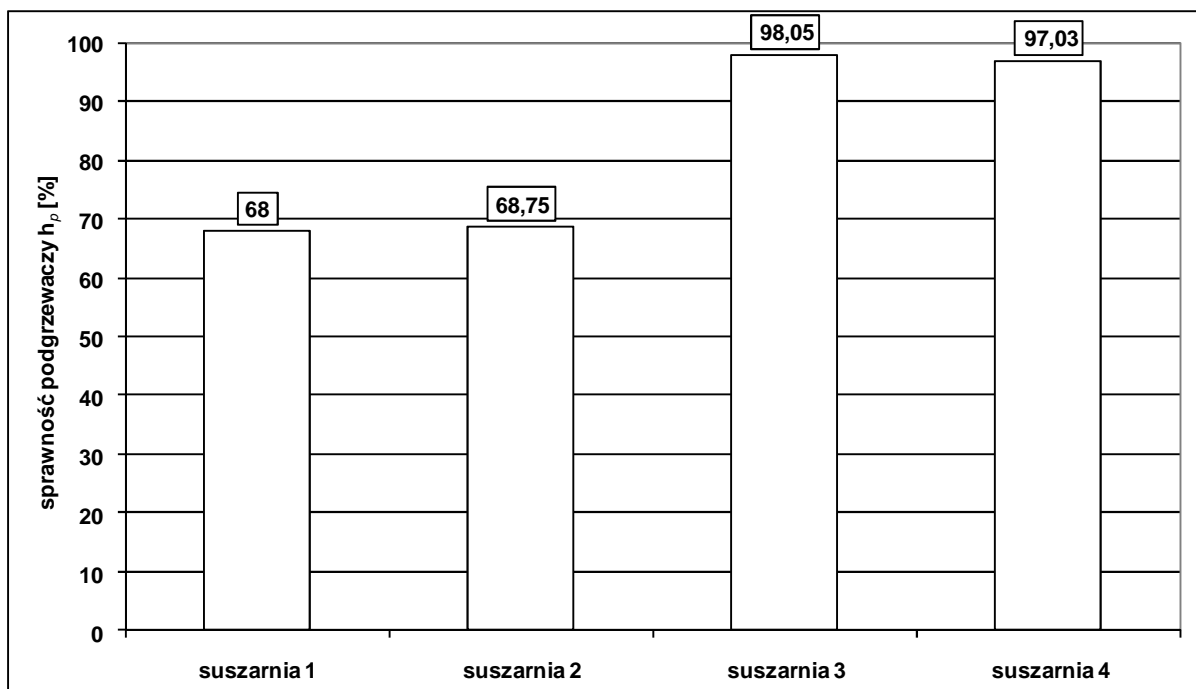
Mieszanka powietrzno-spalinowa z gazowego, bezprzeponowego podgrzewacza powietrza, użyta do suszenia chmielu zawierała 78% objętościowych azotu, 12,12% tlenu, 3,16% dwutlenku węgla, 5,96% pary wodnej i znikomą ilość resztek gazu ziemnego (0,005%), co świadczy o prawidłowym jego spalaniu.

Sprawność cieplna opalanego gazem podgrzewacza bezprzeponowego (rys. 1) wynosi 97-98%, a przeponowego 68%. Zróżnicowanie było spowodowane wyeliminowaniem strat kominowych. Sprawność wynoszącą $\eta_p = 68\%$ należy uznać za zbyt niską wobec obecnie stawianych wymagań. Różnice między sprawnością cieplną podgrzewacza przeponowego zasilanego gazem ziemnym lub węglem były statystycznie nieistotne podobnie, jak dwu podgrzewaczy bezprzeponowych (zasilanych gazem) zamontowanych w suszarce bez recyrkulacji oraz z częściową recyrkulacją powietrza (rys. 2).



Rys. 1. Gazowy, bezprzeponowy podgrzewacz powietrza; 1- mieszalnik powietrza, palnik gazowy, 3- wlot powietrza z wentylatora, 4- kanał doprowadzający powietrze do komory wyrównawczej

Fig. 1. Gas non-membrane air-heater; 1 – air mixer, 2 – gas burner, 3 – air intake from the fan, 4 – channel supplying air to the surge chamber



Rys. 2. Sprawność cieplna podgrzewaczy powietrza;

obiekt 1 - przeponowy wymiennik ciepła- gaz ziemny,

obiekt 2 - przeponowy wymiennik ciepła- węgiel,

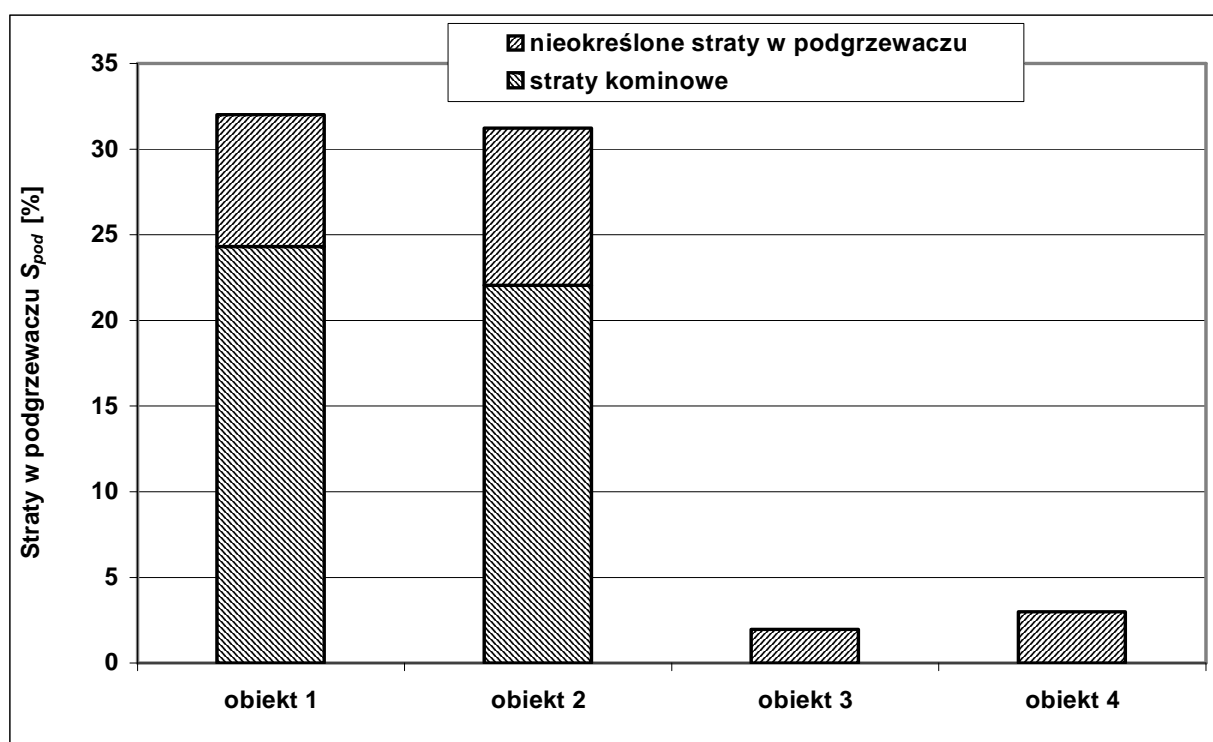
obiekt 3 - bezprzeponowy wymiennik ciepła- gaz ziemny,

obiekt 4- bezprzeponowy wymiennik ciepła z zastosowaniem częściowej recyrkulacji powietrza w suszarce chmielu- gaz ziemny

Fig. 2. Thermal efficiency of air-heaters; object 1 – membrane heat exchanger – natural gas, object 2 – membrane heat exchanger – coal, object 3 – non-membrane heat exchanger – natural gas, object 4 – non-membrane heat exchanger with the use of partial air recirculation in the hop drier – natural gas

W podgrzewaczach przeponowych przy stosowaniu gazu wystąpiły nieco większe straty kominowe, niż przy opalaniu węglem, co było spowodowane wyższym nadmiarem powietrza przy spalaniu gazu. Jednakże, w podgrzewaczu zasilanym gazem nie występowały straty popielnikowe, odgrywające pewną rolę w podgrzewaczu węglowym.

Największe straty ciepła występowały w podgrzewaczach przeponowych opalanych gazem ziemnym oraz węglem (odpowiednio 32% oraz 31% ciepła dostarczonego wraz z opałem w obiektach 1 i 2), a najniższe w bezprzeponowych zasilanych gazem, gdzie wynosiły zaledwie 2-3% (rys. 3).



Rys. 3. Straty ciepła w podgrzewaczach powietrza;

obiekt 1 - przeponowy wymiennik ciepła- gaz ziemny,

obiekt 2 - przeponowy wymiennik ciepła- węgiel,

obiekt 3 - bezprzeponowy wymiennik ciepła- gaz ziemny,

obiekt 4-bezprzeponowy wymiennik ciepła z zastosowaniem częściowej recyrkulacji powietrza w suszarce – gaz ziemny

Fig. 3. Heat losses in air-heaters; object 1 – membrane heat exchanger – natural gas, object 2 – membrane heat exchanger – coal, object 3 – non-membrane heat exchanger – natural gas, object 4 – non-membrane heat exchanger with the use of partial air recirculation in the hop drier – natural gas

Dobre spalanie paliwa gazowego w palniku z nadmuchem powietrza, izolacja cieplna kanału doprowadzającego czynnik suszący do suszarki oraz odpowiednia konstrukcja mieszalnika wpłynęła na dużą sprawność cieplną podgrzewacza bezprzeponowego. Nieco niższa wartość sprawności cieplnej w obiekcie 4 niż w 3 była prawdopodobnie spowodowana gorszymi warunkami atmosferycznymi.

W podgrzewaczu przeponowym opalany gazem ziemnym występowały wyższe straty kominowe, niż w opalany paliwem stałym (odpowiednio ponad 24% i ok. 22%), co było spowodowane wyższym nadmiarem powietrza przy spalaniu gazu. Z kolei w podgrzewaczu tym nie występowały straty popielnikowe.

Na straty w podgrzewaczach bezprzeponowych składały się straty przenikania ciepła przez ścianki i izolację kanału doprowadzającego czynnik suszący do komory wyrównawczej suszarki, straty szczelności połączeń kanału z podgrzewaczem i budynkiem suszarki oraz straty promieniowania ciepła przez palnik i powierzchnię podgrzewacza bezpośrednio sąsiadującą z palnikiem. Ze względu na znikome wartości poszczególnych składników strat w podgrzewaczach bezprzeponowych oraz trudności w dokładnym ich określeniu, wyznaczono je jako różnicę między ciepłem uzyskanym z paliwa a ciepłem wykorzystanym na ogrzanie czynnika suszącego.

Opalenie suszarek chmielu gazem ziemnym będzie bardziej przyjazne środowisku, niż opalenie węglem.

Jeżeli produkcja szyszek chmielu w gospodarstwie wynosi co najmniej 5500 kg, to koszty suszenia przy użyciu gazowego podgrzewacza bezprzeponowego nie przekraczają kosztów suszenia podgrzewaczem opalany węglem.

Wnioski

1. Zastosowanie opalanych gazem ziemnym podgrzewaczy bezprzeponowych wpłynęło na zmniejszenie zużycia paliwa o ok. 30% w stosunku do podgrzewaczy przeponowych.
2. Sprawność cieplna badanych podgrzewaczy bezprzeponowych (przy opalaniu gazem) wynosiła 97-98% - w suszarce bez recyrkulacji, jak i z recyrkulacją.
3. Sprawność cieplna podgrzewaczy przeponowych przy opalaniu węglem i gazem była zbliżona (wnosiła 68 - 69%).
4. W podgrzewaczu przeponowym opalany gazem ziemnym występowały nieco wyższe straty kominowe (24%), niż w opalany węglem (22%), co było spowodowane wyższym nadmiarem powietrza przy spalaniu gazu.

Bibliografia

Badyda K., 2000. Ograniczenie emisji do atmosfery w energetyce - nowelizacja w przepisach o ochronie powietrza. *Gospodarka paliwami i energią*. 2; 2-8.

Cetina A., Kohlmann H. 1980. Energieaufwand im Hopfenbau. *Hopfen Rundschau* 22:412-414.]

Dwornikiewicz J. 1999a. Stan i możliwości krajowej bazy chmielarskiej. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny* 2; 15-16.

Dwornikiewicz J. 1999b. Informacja o stanie sektora chmielarskiego. *Ministerstwo Rolnictwa, maszynopis*.

Praca zbiorowa 1974. *Poradnik Termoenergetyka*. WNT, Warszawa.

Raporty International Hop Growers' Convention: 1995-2001. Hopfen Rundschau International - green pages.

Stasiak M., Zaorski T., 2000. Prognozy produkcji chmielu w latach 2000- 2010. Przemysł Fermentacyjny i Owocowo Warzywny. 10: 18.

THERMAL EFFICIENCY OF MEMBRANE AND NON-MEMBRANE HOP-DRIER AIR-HEATERS

Summary

The use of natural gas-fired non-membrane air heaters had an effect on the reduction of fuel consumption by about 30%, in relation to membrane air-heaters. The thermal efficiency of natural, gas-fired non-membrane air-heaters is significantly higher than that of membrane ones. The differences between thermal efficiency of natural gas or coal-fired membrane air-heaters are statistically insignificant. There were also no significant differences between the thermal efficiency of air-heaters installed in a hop-drier with partial recirculation and without recirculation.

Key words: hop, gas non-membrane air-heater, membrane air-heater, efficiency