



POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. TADEUSZA KOŚCIUSZKI
Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej
Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej

ROZPRAWA DOKTORSKA

Analiza egzergetyczna wybranych procesów suszenia

Opracowała: mgr inż. **Joanna Skoneczna-Łuczków**

Promotor: **dr hab. inż. Włodzimierz Janusz Ciesielczyk, prof. PK**

KRAKÓW 2015



1. Wstęp	8
1.1. Wprowadzenie.....	8
1.2. Przedmiot cel i zakres pracy	10
2. Podstawowe pojęcia analizy egzergetycznej	12
2.1. Definicja i właściwości egzergii	12
2.2. Generacja entropii i straty egzergii – Prawo Gouya-Stodoli	19
2.3. Straty egzergii w typowych przemianach nieodwracalnych.....	23
2.3.1. Nieodwracany przepływ ciepła.....	23
2.3.2. Tarcie.....	26
2.3.3. Dławienie izentalpowe	27
2.3.4. Mieszanie substancji o niejednakowych temperaturach	27
2.3.5. Mieszanie substancji o niejednakowym składzie chemicznym	28
2.4. Praktyczne reguły zmniejszania niedoskonałości termodynamicznej	28
2.5. Ekonomiczne zastosowanie egzergii.....	35
3. Bilans egzergetyczny	41
3.1. Równanie bilansu egzergetycznego	41
3.2. Sprawność egzergetyczna	43
3.3. Egzergia wilgotnego powietrza.....	44
3.4. Bilans egzergetyczny suszarki	46
4. Egzergochłonność skumulowana.....	53
4.1. Obliczanie wskaźnika skumulowanej egzergochłonności	53
4.2. Skumulowana sprawność egzergetyczna i systemowe straty egzergii	56
4.3. Podział współczynników zużycia półwyrobów w procesach skojarzonych.....	58
5. Sztuczne sieci neuronowe SSN.....	60
5.1. Funkcje aktywacji	61
5.2. Topologia sieci neuronowej (architektura)	62
5.3. Charakterystyka procesu uczenia sieci.....	64
6. Analiza literatury dotyczącej wykorzystania egzergii do oceny procesów suszenia..	67
6.1. Suszenie w złożu fluidalnym	67
6.2. Suszenie próżniowe.....	74

6.3. Sztuczne sieci neuronowe	76
6.4. Inne rodzaje procesu suszenia	77
7. Analiza egzergetyczna suszenia w złożu fluidalnym	84
7.1. Stanowisko badawcze suszenia fluidalnego	84
7.2. Wpływ zmiany prędkości powietrza suszącego.....	87
7.2.1. Wyniki badań dla komory suszenia	89
7.2.2. Wyniki badań dla węzła suszenia	99
7.3. Wpływ temperatury powietrza suszącego.....	107
7.4. Wpływ wysokości złoża.....	116
7.5. Wpływ zmiany charakteru suszenia.....	120
7.6. Recyrkulacja powietrza.....	126
8. Analiza egzergetyczna suszenia próżniowego.....	130
8.1. Stanowisko badawcze suszenia próżniowego.....	130
8.2. Wpływ wymiany powietrza	132
8.3. Wpływ wartości ciśnienia w komorze suszenia.....	136
8.4. Wpływ masy próbki	139
8.5. Wpływ temperatury powietrza w komorze suszenia	142
8.6. Wpływ wysokości złoża.....	145
9. Zastosowanie SSN do optymalizacji węzła suszenia w złożu fluidalnym	149
9.1. Tworzenie sztucznych sieci neuronowych.....	149
9.2. Optymalizacja warunków.....	160
10. Analiza energetyczna i egzergetyczna suszarniczych instalacji przemysłowych...	163
10.1. Siarczan amonu	163
10.1.1. Opis węzła suszenia	164
10.1.2. Metody i punkty pomiarowe	165
10.1.3. Wyniki bilansu energetycznego i egzergetycznego	168
10.2. Politrioksan	178
10.2.1. Opis węzła suszenia	178
10.2.2. Metody i punkty pomiarowe	180
10.2.3. Wyniki bilansu energetycznego i egzergetycznego	183
11. Podsumowanie i wnioski	203

12. Streszczenia	207
13. Literatura.....	210

Oznaczenia

A	– energia	kJ
C	– pojemność cieplna,	kJ/K
c	– ciepło właściwe,	kJ/kg·K
cov	– współczynnik zmienności,	–
D	– średnica,	m
d	– średnica,	m
E	– energia,	kJ
Ex	– egzergia,	kJ
ex	– egzergia właściwa,	kJ/kg
Ex _d	– egzergia doprowadzona do układu przez osłonę bilansową,	kJ
Ex _w	– egzergia odprowadzona z układu przez osłonę bilansową,	kJ
Ex _{wen}	– egzergia doprowadzona do wentylatora,	kJ
G	– strumień masowy czynnika,	kg/s
H	– wysokość złoza,	m
h	– wysokość warstwy suszonego materiału,	m
I	– natężenie prądu,	A
i	– entalpia właściwa,	kJ/kg
K _L	– koszt wykonanej pracy w procesie,	PLN
k	– koszt jednostkowy egzergii,	PLN
L	– praca wykonana,	kJ
m	– masa,	kg
N	– moc urządzenia	kW
MSE	– błąd średniokwadratowy	–
n	– liczba moli,	kmol
P	– ciśnienie,	Pa
p	– ciśnienie cząstkowe,	Pa
p _{nas} (T)	– ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze T,	Pa
Q	– ciepło,	kJ
r	– ciepło właściwe parowania wody w średniej temperaturze materiału wilgotnego i pod ciśnieniem atmosferycznym,	kJ/kg
R	– opór przepływu ciepła,	K/W
R _i	– indywidualna stała gazowa,	kJ/kg·K
R ²	– współczynnik determinacji,	–
S	– entropia,	kJ/K
S _{gen}	– entropia wygenerowana podczas procesu,	kJ/K
T	– temperatura,	K
t	– temperatura,	°C
U	– napięcie w sieci,	V
u	– prędkość,	m/s
V	– natężenie objętościowe,	m ³ /h
X	– zawartość wilgoci w materiale,	kg H ₂ O/kg sm, %
x	– udziały masowe,	kg x/kg
Y	– wilgotność bezwzględna powietrza,	kg H ₂ O/kg sp
y	– zawartość formaldehydu w powietrzu	g/m ³
z	– udziały molowe,	kmol z/kmol

Greckie

δ	– strata związana z nieodwracalnością procesu,	kJ
ε	– porowatość złoża	–
φ	– wilgotność względna powietrza,	%
η	– sprawność	%
μ	– współczynnik jednostkowego zużycia	kJ/kg
ν	– objętość właściwa czynnika,	m ³ /kg
τ	– czas,	s
Φ	– sferyczność,	–

Indeksy

0	– dotyczy stanu odniesienia, otoczenia,
1	– dotyczy parametrów na wejściu,
2	– dotyczy parametrów na wyjściu,
I	– dotyczy strumienia pierwszego,
II	– dotyczy strumienia drugiego,
c	– dotyczy wartości całkowitych,
ch	– dotyczy egzergii chemicznej,
e	– dotyczy energii,
ex	– dotyczy egzergii,
el	– dotyczy energii elektrycznej,
deg	– dotyczy degradacji egzergii,
f	– dotyczy tarcia,
k	– dotyczy komory,
kat	– dotyczy katalitycznego spalania,
kon	– dotyczy kondensatu,
kr	– dotyczy wartości krytycznych,
m	– dotyczy materiału,
max	– dotyczy wartości maksymalnych,
me	– dotyczy egzergii mechanicznej,
mf	– dotyczy minimum fluidyzacji,
mix	– dotyczy mieszaniny,
N	– dotyczy wartości napędowych,
r	– dotyczy wartości równowagowych,
re	– dotyczy wartości odwracalnych,
p	– dotyczy powietrza,
pod	– dotyczy podciśnienia powietrza,
par	– dotyczy parowania,
pch	– dotyczy powietrza chłodzącego,
ps	– dotyczy powietrza suszącego,
pt	– dotyczy powietrza transportującego,
sm	– dotyczy suchego materiału,
sil	– dotyczy silników,
sp	– dotyczy suchego powietrza,
str	– dotyczy strat,

u	– dotyczy układu,
śr	– dotyczy wartości średniej,
th	– dotyczy egzergii termicznej,
tr	– dotyczy temperatury termodynamicznej,
uż	– dotyczy wartości użytecznych,
v	– dotyczy pary,
W	– dotyczy wody,
w	– dotyczy wymiany powietrza,
wym	– dotyczy wymiennika ciepła,
z	– dotyczy strat zewnętrznych,
zr	– dotyczy źródła.

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Termin suszenie odnosi się najczęściej do czynności usuwania wilgoci z materiału przez jej odparowanie przy regulowanych parametrach procesu [1]. Suszenie jest najpopularniejszą metodą utrwalania żywności stosowaną przez ludzkość od wieków. Proces ten zapewnia stabilność mikrobiologiczną i gwarantuje osiągnięcie oczekiwanego okresu przydatności produktu do spożycia; jak również zapewnia łatwiejszą dalszą obróbkę produktu [2, 3]. Suszenie nie ogranicza się do branży spożywczej. Suszenie jest niezbędnym działaniem w przemysłach: chemicznym, rolniczym, ceramicznym, polimerowym, farmaceutycznym, papierniczym, drzewnym i tekstylnym [4, 5].

Proces suszenia zużywa duże ilości energii oraz emituje zanieczyszczenia do środowiska [2, 5]. Jednym z głównych problemów technologii suszenia jest zmniejszenie kosztów energii poprzez zwiększenie sprawności instalacji suszenia produktów o dobrej jakości. Budowa energochłonnych systemów o niższych kosztach i wyższej wydajności jest jednocześnie jednym z podstawowych rozwiązań w zakresie zrównoważonego rozwoju [2]. Ze względu na wysokie koszty energii, ochronę środowiska oraz obniżenie zasobów paliw kopalnych, optymalne wykorzystanie energii i metody zarządzania zużycia energii są niezbędne. Postępowanie takie ściśle koreluje z aktualnymi zaleceniami Unii Europejskiej w zakresie odnawialnych źródeł energii [6]. Analiza energetyczna jest podstawowym podejściem do oceny różnych procesów konwersji energii [7-9].

Analiza energetyczna opiera się na pierwszej zasadzie termodynamiki, która wynika z zasady zachowania energii. Metoda ta nie zawiera informacji na temat aspektów nieodwracalności procesów termodynamicznych. Analiza energetyczna nie jest w stanie odróżnić różnych cech energii takich jak jakość ciepła, która jest zależna od temperatury źródła ciepła.

Dlatego też analizę egzergetyczną przedstawia się jako bardziej zaawansowane narzędzie do oceny technicznej, zapewniające bardziej realistyczny pogląd na systemy i procesy.

Analiza egzergetyczna może zapewnić kompleksowy wgląd w istotę procesu, a także przedstawić nowe pomysły na problemy nieprzewidziane wcześniej [2]. Egzergetyczna ocena wydajności odróżnia wielkość, lokalizację i przyczyny nieodwracalności w instalacji. Głównym celem analizy egzergetycznej systemów suszenia jest zapewnienie kompleksowego obrazu procesu, określenie źródła nieefektywności, rozróżnienie jakości zużycia energii, wybranie optymalnych warunków suszenia i zmniejszenie oddziaływania procesu suszenia na środowisko [2, 10].

Obowiązujące wytyczne Unii Europejskiej zobowiązują Polskę do zmniejszenia zużycia energii do roku 2020 o 20%, a w dalszej perspektywie redukcję emisji gazów cieplarnianych o 40% oraz zwiększenie udziału źródeł odnawialnych do 27% do roku 2030 [6]. Konieczne jest zatem podjęcie kompleksowych działań ukierunkowanych na zagospodarowanie surowców energetycznych i zwiększenie wydajności procesów o największej energochłonności.

Przemysłowe suszarki zużywają dużą część całkowitej energii (średnio 12%) wykorzystywanej w procesach produkcyjnych [3, 5]. Tak więc, systemy suszenia mają przeważający udział w emisji gazów cieplarnianych, których konsekwencją są między innymi kwaśne deszcze i dziura ozonowa.

Znaczna energochłonność procesu suszenia spowodowana jest niską sprawnością cieplną suszarek przemysłowych, których przeciętne wartości wynoszą 40÷60% [3]. Usprawnienie tych urządzeń oraz zwiększenie efektywności procesów suszenia może okazać się kluczem do rozwiązania problemu pogodzenia zwiększającego się zapotrzebowania na energię z koniecznością zmniejszenia jej zużycia.

1.2. Przedmiot cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy jest eksperymentalna i teoretyczna analiza egzergetyczna wybranych metod suszenia pod kątem określenia efektywności procesów.

Celem rozprawy jest opracowanie ilościowych metod opisu, badania i analizy egzergetycznej suszenia fluidalnego i próżniowego ciał stałych.

Praca obejmuje swym zakresem:

- analizę literatury dotyczącej zastosowania egzergii do opisu procesów i układów suszenia,
- wytypowanie materiałów do badań,
- określenie zakresów zmienności parametrów procesowych,
- przystosowanie stanowisk eksperymentalnych,
- badania wpływu metody suszenia na efektywność procesów,
- zastosowanie wyników suszenia fluidalnego do analizy procesu z wykorzystaniem SSN,
- wykonanie analizy egzergetycznej na przemysłowych instalacjach suszarniczych (Grupa Azoty S.A. w Tarnowie – Mościcach; instalacja produkcji politrioksanu oraz siarczanu amonu).

CZEŚĆ TEORETYCZNA

2. Podstawowe pojęcia analizy egzergetycznej

2.1. Definicja i właściwości egzergii

Do realizacji dowolnego procesu technologicznego zwykle niezbędna jest energia. Ta energia może być dostarczana w różnych formach (postaciach): pracy mechanicznej, energii elektrycznej, strumienia ciepłego, promieniowania elektromagnetycznego itp. W zależności od tego w jakim stopniu (ilości) wykorzystuje się dostarczoną energię, zależy intensywność i skuteczność przebiegu procesu [11, 12]. Wszystkie rodzaje energii można rozdzielić na dwie grupy. Pierwsza kategoria obejmuje takie rodzaje energii, które mogą całkowicie przekształcać się w inne formy energii. Zazwyczaj tego typu energie związane są z kierunkiem ruchu całego ciała lub jego poszczególnych cząsteczek, takich jak energia kinetyczna ciała poruszającego się w polu grawitacyjnym, energia elektronów poruszających się w przewodniku, energia naładowanych cząstek poruszających się w polu elektromagnetycznym itd. Do drugiej grupy należy energia wewnętrzna substancji związana z chaotycznym ruchem cieplnym cząsteczek, energia wiązań chemicznych oraz energia przekazywana w postaci strumienia ciepła. Te rodzaje energii nie mogą całkowicie zamienić się w inne typy [11-13].

W procesach przemysłowych wykorzystuje się różne postacie energii charakteryzujące się niejednakową jakością. Niejednakowa wartość ekonomiczna oraz przydatność przemysłowa różnych postaci energii wymaga do opisu zastosowania drugiej zasady termodynamiki, która głosi, że procesy makroskopowe są nieodwracalne [14]. Każda nieodwracalność wiąże się z obniżeniem wartości energii (w sensie ekonomicznym), a nie jej utratą. Nie można zniszczyć energii – obowiązuje prawo jej zachowania [14, 15]. Energia zostaje przekształcona do innej postaci, mniej nadającej się do podtrzymywania procesów. Pojawia się więc potrzeba wprowadzenia nowej wielkości fizycznej w celu scharakteryzowania jakości rozpatrywanych przemian energii.

Wykorzystując drugą zasadę termodynamiki, można zbadać miejsce występowania nieodwracalności oraz ich stopień, a także ocenić spowodowane przez

nie straty. W tym celu stosuje się tzw. miernik wartości czynnika termodynamicznego, który powinien spełniać następujące warunki [7, 16]:

- powinien być określony wielkością wspólną dla różnych sposobów przekazywania energii oraz różnych jej rodzajów;
- powinien być obliczany od określonego poziomu odniesienia, zerowego pod względem przydatności energetycznej, poziom ten powinien wynikać z warunków równowagi termodynamicznej z powszechnymi składnikami otoczenia.

Tak sformułowany miernik jakości energii (początkowo potencjał energetyczny) nazwano egzergią [16]. Po raz pierwszy termin ten zaproponował i użył słoweński profesor Z. Rant na początku lat 50 XX wieku [7, 17, 18]. Nazwa ta wywodzi się z języka greckiego, gdzie przedrostek „*ex*” oznacza „na zewnątrz”, a dalsza część „*erg*”, występująca również w słowie energia, od greckiego słowa „*ergon*” oznacza pracę. Czyli egzergia (ang. *exergy*) oznacza ułamek energii całkowitej, który można wydobyć w celu dostarczenia go w postaci pracy [7, 9, 17-21].

Jedna z istotnych definicji egzergii sformułowania przez J. Szarguta przedstawia się następująco [7, 9, 17, 22]:

„Egzergia materii jest to maksymalna praca, jaką ta materia może wykonać w procesie odwracalnym, w którym wykorzystuje się otoczenie jako źródło bezwartościowego ciepła i bezwartościowych substancji, jeżeli przy końcu tego procesu wszystkie uczestniczące w nim postacie materii osiągają stan równowagi termodynamicznej z powszechnymi składnikami otoczenia.”

W tym sformułowaniu należy zwrócić uwagę na dwa aspekty. Po pierwsze, maksymalna praca może być otrzymana tylko w odwracalnym procesie. Teoretycznie taki proces można realizować przy nieskończone małym spadku temperatur pomiędzy źródłem ciepła i odbiornikiem. Wszystkie realne procesy odbywają się przy skończonej różnicy temperatur, a więc są nieodwracalnymi. Dlatego otrzymana w nich praca będzie mniejsza niż maksymalnie możliwa. Dla oceny otrzymanej pracy należy ją porównywać z maksymalną możliwą wartością w danym procesie, czyli z egzergią.

Po drugie, proces prowadzi się z wykorzystaniem otoczenia jako źródła darmowego ciepła i substancji. Oznacza to, że maksymalna praca może być otrzymana tylko przy współdziałaniu materii z otoczeniem. Stąd dla otrzymania egzergii paliwa, trzeba wykorzystać określoną ilość tlenu z otoczenia.

Jeżeli dla spalania wykorzystuje się czysty tlen, to chociaż otrzymana ilość ciepła będzie większa, sumaryczna egzergia będzie mniejsza, ponieważ dla otrzymania czystego tlenu z powietrza trzeba wykonać pewną pracę, a więc egzergię. Analogicznie jest z ciepłem. Przy nagrzewaniu jakiegokolwiek ciała ciepło trzeba doprowadzać tylko dla podwyższenia jego temperatury powyżej temperatury otoczenia, a do temperatury otoczenia nagrzewanie odbywa się kosztem ciepła pobieranego z samego otoczenia.

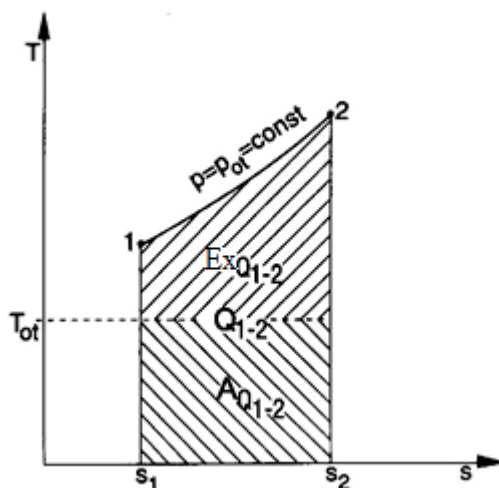
Definicja egzergii może wydawać się zbieżna z definicją energii, która w fizyce definiowana jest jako zdolność do wykonania pracy. Definicja ta różni się jednak od definicji energii tym, że egzergia jest to zdolność do wykonania maksymalnej pracy wyznaczonej względem otoczenia [17, 23].

Oprócz przedstawionej definicji egzergii Rant [11] wyznaczył egzergię jako część energii cieplnej, którą można przekształcić na jakikolwiek inny rodzaj energii. Wg Z. Ranta, każda energia składa się z dwóch części: egzergii E_x dającej się nieograniczenie zmieniać na inny rodzaj energii oraz anergii A będącej nieużyteczną, niemożliwą do przekształcenia częścią energii [13, 24]:

$$E = E_x + A \quad (2.1)$$

Taki podział energii na egzergię i anergię jest bardzo prostym i dopuszczalnym dla tych przypadków, kiedy początkowa temperatura ciała jest wyższa od temperatury otoczenia (rys. 2.1).

Otoczenie jest stanem odniesienia narzuconym przez naturę [14, 23]. Oprócz substancji bezwartościowych występują w nim również, w ograniczonej ilości, substancje wartościowe mające przydatność energetyczną. Są to substancje, których skład chemiczny lub parametry stanu odbiegają od przeciętnych i przez to stanowią one *bogactwo naturalne* [7, 15]. Należą do nich paliwa, substancje rozszczepialne, strumienie wody o znacznej energii, strumień promieniowania słonecznego itp. [12].



Rys. 2.1 Egzergia i anergia na wykresie T-s [24]

Za stan odniesienia przy obliczaniu egzergii przyjmuje się stan *równowagi termodynamicznej z powszechnymi składnikami otoczenia* [7, 9, 12, 18, 25] np. z powietrzem atmosferycznym, tlenem z powietrza, wodą w oceanie.

Układ zawiera egzergię wtedy – i tylko wtedy – gdy nie jest w stanie równowagi ze swoim otoczeniem. Ilość egzergii zależy od tego jak bardzo układ jest oddalony od stanu równowagi z otoczeniem. Aby wyznaczyć ile egzergii jest w układzie należy znać nie tylko właściwości układu; trzeba również znać właściwości jego otoczenia. Egzergia jest więc funkcją stanu drugiego rzędu [7, 9]. Jest jedną z wielu kalorycznych funkcji stanu materii wprowadzonych w termodynamice. Funkcje takie ułatwiają rozważania i interpretację zjawisk, a przede wszystkim mają zastosowanie praktyczne przy obliczeniach cieplnych. Na przykład entalpia służy do określania energii czynnika doprowadzonego lub wyprowadzonego z rozważanego układu. Energia wewnętrzna wyraża energię czynnika pozostającego w układzie w czasie objętym rozważaniami. Entropia określa prawdopodobieństwo termodynamiczne występowania danego stanu czynnika. Egzergia natomiast określa praktyczną wartość energetyczną materii w naturalnym otoczeniu narzuconym przez otaczającą przyrodę [7, 22, 26].

Układ może zawierać egzergię, nie będąc w równowadze z otoczeniem z powodu [18]:

- braku równowagi mechanicznej,
- braku równowagi termicznej,
- braku równowagi chemicznej.

Brak równowagi mechanicznej, wynikać może z różnic energii kinetycznej, potencjalnej lub różnic ciśnienia, brak równowagi termicznej zawsze jest skutkiem różnicy temperatur.

W układzie tłok-cylinder, przy założeniach, że jest on idealnie izolowany termicznie, a jedynym źródłem egzergii jest nierównowaga ciśnieniowa, rozpatrzeć można trzy sytuacje:

- ciśnienie wewnątrz cylindra jest równe ciśnieniu atmosferycznemu,
- ciśnienie wewnątrz cylindra jest większe od ciśnienia atmosferycznego,
- ciśnienie wewnątrz cylindra jest niższe od ciśnienia atmosferycznego.

W pierwszym przypadku układ pomimo posiadania energii nie wykonuje żadnej pracy (tłok pozostaje nieruchomy). Wynika to z zerowej wartości egzergii [12, 18].

W przypadku drugim, ciśnienie gazu wewnątrz jest większe od ciśnienia zewnętrznego, w związku z tym różnica ciśnienia spowoduje wypchnięcie tłoka na zewnątrz. Wykonanie pracy będzie możliwe do czasu, aż ciśnienia się wyrównają. Pokazuje to, że układ oddalony od stanu równowagi posiada egzergię. Bardzo ważne jest również zwrócenie uwagi, że po wyczerpaniu egzergii, gaz wewnątrz cylindra wciąż może posiadać energię [12, 18].

W sytuacji trzeciej układ nie posiada żadnej energii, a mimo to tłok wykona ruch do środka cylindra. Do tego ruchu przyczyni się występująca różnica ciśnienia gazu pomiędzy wnętrzem a otoczeniem. Tłok będzie się poruszał, aż do zetknięcia ze ścianką czołową cylindra. Pokazuje to, że pomimo zerowej energii wewnątrz cylindra układ może wykonać pracę. Z powodu tego, że próżnia nie występuje na Ziemi, układ pozyskał egzergię. Dodatkowo jakość energii była nieskończenie duża [18].

Tak jak egzergia mechaniczna jest rezultatem braku równowagi mechanicznej, tak egzergia cieplna wynika z braku równowagi termicznej. Układ lub nośnik energii zawiera egzergię cieplną jeśli jego temperatura różni się od temperatury otoczenia [18].

Całkowita energia cieplna materiału jest proporcjonalna do jego temperatury T . Egzergia cieplna proporcjonalna jest do różnicy pomiędzy temperaturą materiału T a

temperaturą otoczenia T_0 . Ponieważ różnica $(T - T_0)$ jest proporcjonalna do tego „ile” egzergii zawarte jest w energii cieplnej i T jest proporcjonalne do tego „ile” energii zawiera materiał, jakość energii (stosunek egzergii do energii) pozwala na określenie stopnia wartości ciepła (2.2) [16, 18]:

$$\text{Stopień wartości ciepła} = \left| \frac{T - T_0}{T} \right| \quad (2.2)$$

Wartość bezwzględna jest konieczna z uwagi na sytuację, w której T jest niższe od T_0 , ponieważ jakość energii nigdy nie może być ujemna.

Egzergię cieplną otrzymuje się ze źródeł ciepła przez umieszczenie silników cieplnych pomiędzy źródłem ciepła, a otoczeniem. Silnik cieplny czerpie ciepło ze spalania (lub rozszczepienia) paliwa, zamieniając mniej niż $|(T - T_0)/T|$ tego ciepła na pracę, a resztę wyprowadzając do otoczenia w postaci ciepła odpadowego [7, 16, 18].

Rozpatrując egzergię chemiczną, np.: paliwo takie jak metan, zawiera on egzergię, ponieważ nie znajduje się w stanie równowagi chemicznej ze swoim otoczeniem. Aby określić egzergię chemiczną należy znać skład chemiczny zarówno materiału jak i jego otoczenia. Zdefiniowanie otoczenia chemicznego wymaga zidentyfikowania szeregu związków, które razem wzięte zawierają wszystkie możliwe pierwiastki chemiczne, jak również występują w środowisku na swoich najniższych możliwych poziomach energetycznych. Samo zidentyfikowanie związków nie wystarczy, konieczna jest także znajomość ich stężeń. Na przykład tlen wchodzi w skład ziemskiego środowiska odniesienia, ale czysty tlen nie jest w równowadze ze środowiskiem atmosferycznym i w związku z tym zawiera egzergię [18].

Egzergia chemiczna prowadzi do pewnego rodzaju odwrotnego rozumowania. Z definicji egzergii [7, 9, 17, 22] wynika, że jest to maksymalna praca, która może być uzyskana kiedy sprowadzamy układ do stanu równowagi z otoczeniem. Odwrotnością jest następujące stwierdzenie [18]: Jeśli rozważania rozpocznie się od układu, który jest w stanie równowagi z otoczeniem, egzergia określa minimalną pracę wymaganą do wydzielenia materiału ze środowiska tak, aby otrzymać jego skoncentrowaną, czystą formę. Np.: biorąc pod uwagę tlen, który często otrzymywany jest przez wydzielenie z

powietrza. Egzergia czystego tlenu reprezentuje minimalną pracę, którą należy włożyć podczas działania urządzenia oddzielającego tlen [22].

Otoczenie ma bardzo istotne znaczenie w rozważaniach dotyczących egzergii i dlatego wymaga bliższego sprecyzowania. Przez otoczenie w dalszych rozważaniach określono tę część otaczającej przyrody, która występując w bezpośredniej bliskości rozpatrywanego urządzenia przemysłowego i wywiera wskutek tego duży wpływ na działanie tego urządzenia. W wielu procesach energetycznych uczestniczy tylko część otoczenia, a mianowicie otaczająca atmosfera.

Procesy energetyczne realizowane przez człowieka w zasadzie wywierają wpływ na skład chemiczny i parametry stanu otoczenia. Z reguły jednak wpływ ten jest niewielki i może być pominięty [7, 9]. W dalszych rozważaniach przyjęto, że wszelkie zmiany składu chemicznego i parametrów stanu otoczenia są następstwem zjawisk przyrody niezależnych od człowieka nie są więc spowodowane przez rozpatrywany przemysłowy proces energetyczny.

Zmienność parametrów otoczenia np. temperatury, ciśnienia, składu, bierze się pod uwagę tylko wówczas, gdy wpływa ona wyraźnie na przebieg procesu. Zwykle przeprowadza się analizę egzergetyczną przy stałej temperaturze otoczenia, jednak np. przy rozpatrywaniu procesów ogrzewania pomieszczeń, klimatyzacji i chłodnictwa należy uwzględnić zmiany temperatury otoczenia [9, 27].

Egzergia może być magazynowana na różny sposób, zaczynając od potencjału chemicznego wiązań węglowodorów, na energii kinetycznej wiatru kończąc [18]. Człowiek uzyskuje dostęp do tych źródeł i przetwarza ich egzergię, w celu dostarczenia usług energetycznych. Egzergia nie opisuje zdolności ludzkości do eksploataowania zasobów, ale jest niezależną właściwością, będącą modelem teoretycznie możliwej do wykorzystania pracy, zawartej w zasobach niezależnie od geometrii, technologii, ekonomii. Ta niezależność czyni egzergię użytecznym narzędziem oszacowania sprawności zamiany energii danych zasobów. Ponadto pozwala na określenie znaczenia tych zasobów, przy uwzględnieniu zarówno obecnych, jak i przyszłych technicznych możliwości i doświadczeń [25, 27].

Tabela 2.1 Porównanie właściwości egzergii i energii [9, 17, 20, 28]

<i>Energia</i>	<i>Egzergia</i>
Podlega prawu zachowania	Nie podlega prawu zachowania
Funkcja stanu rozpatrywanej materii	Funkcja stanu rozpatrywanej materii oraz funkcja stanu materii w otoczeniu
Może być obliczona od umownego stanu odniesienia	Stan odniesienia jest narzucony przez parametry otoczenia
Wzrasta wraz z podwyższeniem temperatury	Dla temperatur wyższych od temperatury otoczenia wzrasta ze wzrostem temperatury, dla temperatur niższych od temperatury otoczenia maleje ze wzrostem temperatury. Osiąga minimum dla temperatury równej temperaturze otoczenia
W przypadku gazów doskonałych nie zależy od ciśnienia, a w przypadku gazów rzeczywistych w niewielkim stopniu zależy od ciśnienia	Silnie zależy od ciśnienia. Wzrasta ze wzrostem ciśnienia powyżej ciśnienia otoczenia oraz z obniżeniem ciśnienia poniżej ciśnienia otoczenia. Osiąga minimum przy ciśnieniu równym ciśnieniu otoczenia
Nie zależy od względnego stężenia danej substancji w otoczeniu	Zależy od względnego stężenia danej substancji w otoczeniu
Jest taka sama lub prawie taka sama dla jednorodnych substancji, jak i ich mieszanin	Jest zawsze mniejsza w przypadku mieszanin

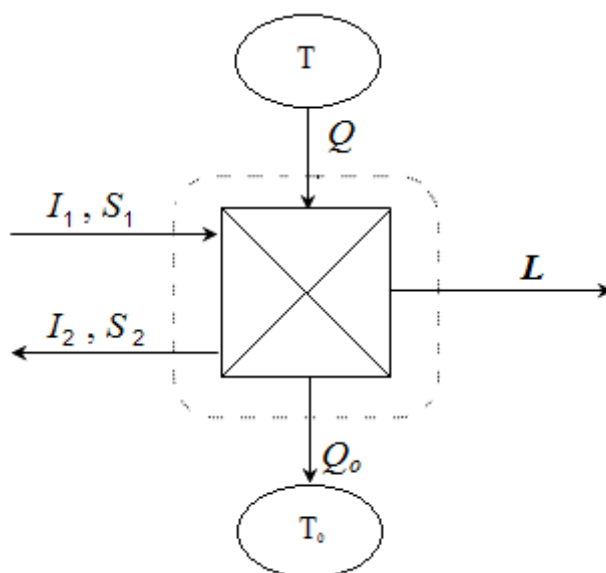
Z termodynamicznego punktu widzenia najistotniejsza różnica między energią a egzergią polega na tym, że energia podlega prawu zachowania, natomiast prawo zachowania egzergii nie istnieje. Straty egzergii są nieuniknione, a ich wielkość może być obiektywną miarą niedoskonałości procesów. Pozostałe różnice pomiędzy energią a egzergią zostały zebrane w tabeli 2.1.

2.2. Generacja entropii i straty egzergii – Prawo Gouya-Stodoli

Procesy energetyczne realizowane w technice przebiegają zawsze nieodwracalnie. Każda nieodwracalność przyczynia się do strat egzergii [7, 16, 29]. Straty te można wyznaczyć przez porównanie urządzenia rzeczywistego, pracującego

nieodwracalnie z urządzeniem pracującym odwracalnie, w którym stan początkowy i końcowy czynnika napędowego nie został zmieniony.

Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat przemysłowego urządzenia cieplnego, którego zadaniem jest wykonanie pracy mechanicznej L [7]. Urządzenie to pracuje w sposób ciągły i ustalony. Do urządzenia dopływa czynnik termodynamiczny mający entalpię I_1 i entropię S_1 , zaś odpływa czynnik mający odpowiednio I_2 , S_2 . Ponadto maszyna pobiera ze źródła o temperaturze T ciepło napędowe Q i oddaje do otoczenia o temperaturze T_0 bezwartościowe ciepło odpadowe Q_0 . Przyjęto, że energia potencjalna i kinetyczna czynnika dopływającego oraz odpływającego z urządzenia jest w tym procesie znikoma.



Rys. 2.2 Schemat urządzenia cieplnego [7]

Uzyskaną pracę wyznaczoną z pierwszej zasady termodynamiki i wygenerowaną entropię wyznaczoną z drugiej zasady termodynamiki dla urządzenia rzeczywistego można zapisać równaniami (2.3) i (2.4). Generowana entropia jest zawsze dodatnia w urządzeniach pracujących nieodwracalnie [7].

$$L = Q + I_1 - Q_0 - I_2 \quad (2.3)$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 - \frac{Q}{T} + \frac{Q_0}{T_0} > 0 \quad (2.4)$$

Odwracalne urządzenie porównawcze powinno działać przy takim samym zużyciu środków napędowych co urządzenie rzeczywiste, a więc wielkości I_1 , S_1 , I_2 , S_2 i Q powinny pozostać bez zmiany. Zmieni się natomiast użyteczny efekt działania urządzenia (L_{max}). Może również ulec zmianie ilość ciepła odpadowego oddawanego do otoczenia (Q_{ore}). Dla urządzenia porównawczego równania wynikające z pierwszej i drugiej zasady termodynamiki przyjmą postać:

$$L_{max} = Q + I_1 - Q_{ore} - I_2 \quad (2.5)$$

$$0 = S_2 - S_1 - \frac{Q}{T} + \frac{Q_{ore}}{T_0} \quad (2.6)$$

Różnica między maksymalną pracą L_{max} i rzeczywistą pracą L ma znaczenie inżynierskie [7]. Wielkość tą związaną ze stopniem nieodwracalności układu określono jako *utraconą dostępną pracę*, lub *zniszczonej egzergię*, a z uwzględnieniem jednostki czasu jako *utraconą dostępną moc* lub *szybkość destrukcji egzergii*:

$$\delta Ex = L_{max} - L \quad (2.7)$$

Z definicji [7] destrukcja egzergii wynosi zero, gdy układ działa w sposób odwracalny, podczas gdy w przypadku układu nieodwracalnego jest zawsze wielkością dodatnią.

Równanie (2.8) przedstawia ważny związek między utraconą dostępną pracą i generacją entropii.

$$L_{max} - L = Q_0 - Q_{ore} = T_0 \Delta S \quad (2.8)$$

Z porównania równań (2.7) i (2.8) wynika (2.9):

$$\delta Ex = T_0 \Delta S \quad (2.9)$$

Prawo wyrażone równaniem (2.9) znane jest jako prawo Gouya-Stodoli, od nazwisk dwóch uczonych, którzy jako pierwsi dostrzegli tę zależność (L. G. Gouy 1889, A. Stodola 1898) [7, 19, 21, 30]. Określa ono bezzwrotną stratę egzergii spowodowaną przez nieodwracalność procesu rzeczywistego, dlatego też nazywane

bywa również prawem znikania egzergii podkreślając różnicę z prawem zachowania energii [16]. Twierdzenie to, mówi że stracona dostępna praca czyli strata egzergii, spowodowana nieodwracalnością procesów jest równa iloczynowi produkcji entropii oraz temperatury bezwzględnej otoczenia [7, 19, 21, 30-40].

Straty egzergii można podzielić na wewnętrzne i zewnętrzne. Przyczyną wewnętrznych strat egzergii są wszelkie procesy nieodwracalne zachodzące wewnątrz rozpatrywanego układu (w obrębie badanego urządzenia), a więc przede wszystkim [7, 9, 23, 41, 42]:

- mieszania substancji o różnych składach,
- transportu ciepła przy skończonej różnicy temperatur,
- spadku ciśnienia płynu podczas przepływu, spowodowanego lepkością (tzw. dławienie).

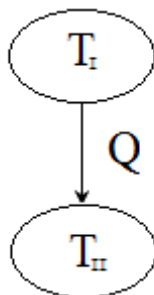
Zewnętrzne straty egzergii, mają miejsce wtedy, gdy z układu do otoczenia odpływa czynnik termodynamiczny o dodatniej egzergii (np. spaliny z kotła, powietrze z suszarki), czyli nie będący w równowadze termodynamicznej z otoczeniem [7, 9, 42]. Wzór (2.9) nie nadaje się do obliczania strat zewnętrznych. Straty te najlepiej jest wyrazić bezpośrednio za pomocą egzergii produktów odpadowych [42].

Określenie strat egzergii jest głównym zadaniem analizy egzergetycznej, każda bowiem strata egzergii wywołuje zmniejszenie efektów użytecznych procesu lub zwiększenie zużycia środków napędowych. Każda strata egzergii powinna jednak mieć uzasadnienie ekonomiczne. Dopuszczenie do wystąpienia strat egzergii jest konieczne w celu ograniczenia nakładów inwestycyjnych. Na przykład przepływ ciepła bez strat egzergii wymagałby zastosowania nieskończenie wielkiej powierzchni przepływu ciepła [43]. Jeżeli jednak strata egzergii nie ma uzasadnienia ekonomicznego, to należy ją uznać za wynik błędu w sztuce inżynierskiej [41, 42].

2.3. Straty egzergii w typowych przemianach nieodwracalnych

2.3.1. Nieodwracany przepływ ciepła

Przepływ ciepła przy skończonym spadku temperatury jest jednym z najważniejszych zjawisk nieodwracalnych w technice cieplnej [7].



Rys. 2.3 Nieodwracalny przepływ ciepła pomiędzy dwoma układami

Rozważmy dwa zbiorniki energii cieplnej w temperaturze T_I i T_{II} , zależność między temperaturami jest taka że $T_I > T_{II}$. Zbiorniki te doprowadzono do kontaktu termicznego przez przewodnik cieplny o skończonej rezystancji na transfer ciepła i nieznaczej pojemności cieplnej (rys. 2.3). Po tym jak transfer ciepła Q miał miejsce pomiędzy zbiornikami, przewodnik został usunięty. Całkowity wzrost entropii dla dwóch zbiorników traktowanych jako układ zamknięty wynosi:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_{II}} - \frac{Q}{T_I} > 0 \quad (2.10)$$

Jeśli $T_I < T_{II}$, to rzeczywisty kierunek Q jest przeciwny do kierunku wskazywanego na rysunku 2.3, i należy wartości tej przypisać znak ujemny. W związku z tym generacja entropii ΔS jest zawsze dodatnia, zgodnie z drugim prawem termodynamiki [7, 12, 19, 30]. Generacja entropii jest dodatnia tak długo jak istnieje różnica temperatur.

Spadek egzergii źródła ciepła o temperaturze T_I spowodowany przez oddanie ciepła Q równy jest pracy mechanicznej jaką kosztem tej ilości ciepła wykonałaby odwracalna maszyna Carnota wykorzystująca otoczenie o temperaturze T_0 jako drugie źródło ciepła [7, 9, 27, 30]. Spadek ten można zapisać stosując wyrażenie (2.11):

$$\Delta Ex_1 = Q \left(\frac{T_1 - T_0}{T_1} \right) \quad (2.11)$$

Natomiast przyrost egzergii źródła ciepła o temperaturze T_2 , spowodowany przez pobranie ciepła Q wynosi (2.12):

$$\Delta Ex_2 = Q \left(\frac{T_2 - T_0}{T_2} \right) \quad (2.12)$$

Strata egzergii w wyniku przepływu ciepła Q pomiędzy zbiornikami przyjmie postać wyrażenia (2.13):

$$\delta Ex = \Delta Ex_1 - \Delta Ex_2 = T_0 \left(\frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \right) \quad (2.13)$$

Porównując równanie (2.13) z (2.10) można stwierdzić że strata egzergii w przepływie ciepła Q od ciała o temperaturze T_1 do ciała o temperaturze T_2 jest równa iloczynowi temperatury otoczenia i zmianie entropii układu, co jest zgodnie twierdzeniem Gouya – Stodoli [7, 9, 30] i może być zapisane w postaci (2.14):

$$\delta Ex = \Delta Ex_1 - \Delta Ex_2 = T_0 \left(\frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \right) = T_0 \Delta S \quad (2.14)$$

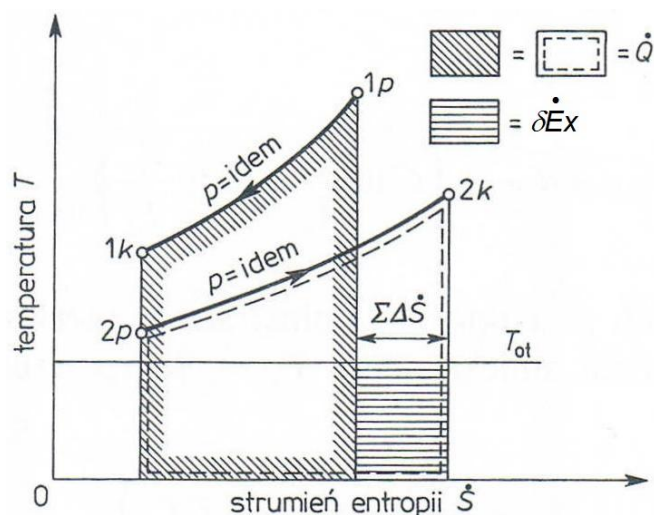
Stratę egzergii spowodowaną nieodwracalnym przepływem ciepła po przekształceniach [7, 30] można zapisać w postaci (2.15):

$$\delta Ex = T_0 \left(\frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \right) = T_0 Q \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} = \frac{T_0}{R} \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_1 T_2} \tau \quad (2.15)$$

Strata egzergii jest odwrotnie proporcjonalna do iloczynu temperatur bezwzględnych ciał biorących udział w wymianie ciepła [7, 9, 27, 30, 43]. Nieodwracalność przepływu ciepła jest więc tym większa, im niższe są temperatury rozpatrywanych ciał [41, 43]. Dlatego przy przepływie ciepła dopuszcza się tym większe różnice temperatury, im wyższy jest poziom temperatur. Przy danej ilości

ciepła straty egzergii są proporcjonalne do różnicy temperatur, zaś przy danym oporze przepływu ciepła są proporcjonalne do kwadratu tej różnicy [43].

Na rysunku 2.4 przedstawiono stratę strumienia egzergii powstającą w wymienniku ciepła na skutek różnicy temperatur między płynami wymieniającymi ciepło.



Rys. 2.4 Strumień strat egzergii w wymienniku ciepła [43]

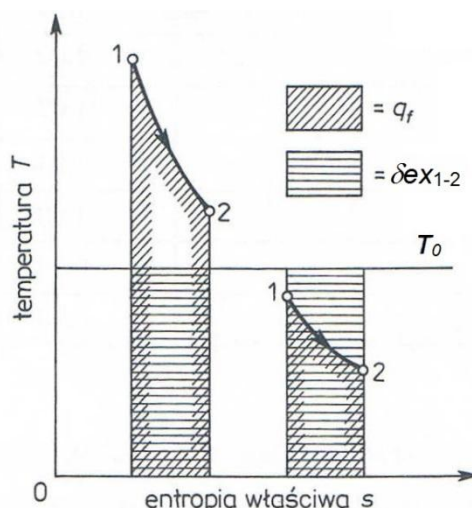
Jeżeli straty ciepła do otoczenia są małe, to spadek strumienia czynnika grzejącego jest równy przyrostowi strumienia entalpii czynnika podgrzewanego. Spadek temperatury czynnika grzejącego jest mniejszy niż przyrost temperatury czynnika podgrzewanego, jeżeli strumień pojemności cieplnej pierwszego z nich jest większy niż drugiego [12, 43]. Nawet gdyby pole powierzchni przepływu ciepła byłoby nieskończenie duże można tylko na jednym końcu wymiennika ciepła osiągnąć zrównanie temperatur czynnika grzejącego z podgrzewanym. Nawet więc w nieskończenie dużym wymienniku ciepła nie można uniknąć strat egzergii, jeżeli strumienie pojemnościowe płynów nie są jednakowe. Dlatego strumienie pojemności cieplnej powinny być zbliżone. W razie dużej różnicy, można część strumienia o większej pojemności cieplnej skierować do innego wymiennika ciepła [43].

2.3.2. Tarcie

Strata egzergii spowodowana przez tarcie mechaniczne lub hydrauliczne wynika z wyrażenia (2.9) [41, 43] i można ją zapisać równaniem (2.16).

$$\delta Ex = \frac{T_0}{T} Q_f = T_0 \int_1^2 \frac{dQ_f}{T} \quad (2.16)$$

Gdzie T jest temperaturą ciała pochłaniającego ciepło tarcia. Inną postać wzoru (2.16) należy stosować, jeżeli temperatura ciała zmienia się w trakcie przemiany. Na rysunku 2.5 przedstawiono straty egzergii właściwej spowodowane przez tarcie podczas nieodwracalnego adiabatycznego rozprężania gazu.



Rys. 2.5 Strata egzergii właściwej spowodowana przez tarcie podczas adiabatycznego rozprężania gazu [43]

Jeżeli przemiana przebiega w temperaturze wyższej od temperatury otoczenia to strata egzergii jest mniejsza od ciepła tarcia. Jednak w zakresie temperatury niższej od temperatury otoczenia strata egzergii jest większa od ciepła tarcia, gdyż na skutek tarcia nie tylko zmniejsza się ilość uzyskanej pracy, lecz także ulega zmniejszeniu egzergia ciała pochłaniającego ciepło tarcia. Tarcie jest więc tym bardziej szkodliwe, im niższa jest temperatura ciała pochłaniającego ciepło [43].

2.3.3. Dławienie izentalpowe

Dławienie jest szczególnym przypadkiem tarcia hydraulicznego przy którym następuje spadek ciśnienia bez wykonania pracy użytecznej. Dławienie przebiega zwykle adiabatycznie, tj. bez wymiany ciepła z zewnętrznymi źródłami [7, 9]. Skoro dławienie ma miejsce w zaizolowanym przewodzie, to jedynym ciałem uczestniczącym w zjawisku jest czynnik termodynamiczny. Dławienie przepływającego czynnika może być technicznie uzasadnione tylko w nielicznych przypadkach [43]. Strumień straty egzergii spowodowany przez dławienie izentalpowe można wyrazić wzorem (2.17).

$$\delta \dot{E}x = -GT_0 \int_{P_1}^{P_2} \frac{V}{T} dP \quad (2.17)$$

Przy dławieniu cieczy strata egzergii jest tym mniejsza im wyższa jest temperatura, gdyż objętość właściwa cieczy mało zależy od temperatury. Natomiast przy dławieniu gazów doskonałych i półdoskonałych strata egzergii nie zależy od temperatury gazu.

$$\delta \dot{E}x = GT_0 R_i \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (2.18)$$

Pierwsza zasada termodynamiki nie pozwala na wykrycie straty spowodowanej przez dławienie. Energia przenoszona przez strumień czynnika nie ulega bowiem zmianie, zmienia się tylko „jakość” tej energii [43].

2.3.4. Mieszanie substancji o niejednakowych temperaturach

Strumień strat egzergii w tym przypadku można wyrazić wzorem (2.19), jeżeli strumienie pojemności cieplnej są stałe [43].

$$\delta \dot{E}x = T_0 \left(\dot{C}_I \ln \frac{T_{mix}}{T_I} + \dot{C}_{II} \ln \frac{T_{mix}}{T_{II}} \right) \quad (2.19)$$

gdzie temperatura mieszaniny T_{mix} może być wyznaczona z zależności (2.20):

$$T_{mix} = \frac{1}{\dot{C}_I + \dot{C}_{II}} (\dot{C}_I T_I + \dot{C}_{II} T_{II}) \quad (2.20)$$

2.3.5. Mieszanie substancji o niejednakowym składzie chemicznym

Przy mieszaniu dwu strumieni płynu różniących się składem chemicznym, gdy obydwa strumienie mają jednakowe temperatury i ciśnienia, a roztwory można traktować jako doskonałe lub półdoskonałe, strumień strat egzergii można zapisać wzorem (2.21) [7, 43]:

$$\delta \dot{E}x = RT_0 \left(\dot{n}_I \sum_i z_{Ii} \ln \frac{z_{Ii}}{z_{mix}} + \dot{n}_{II} \sum_i z_{IIi} \ln \frac{z_{IIi}}{z_{mix}} \right) \quad (2.21)$$

gdzie skład mieszaniny z_{mix} może być wyznaczony z zależności (2.22):

$$z_{mix} = \frac{1}{\dot{n}_I + \dot{n}_{II}} (\dot{n}_I z_{Ii} + \dot{n}_{II} z_{IIi}) \quad (2.22)$$

2.4. Praktyczne reguły zmniejszania niedoskonałości termodynamicznej

Podstawowym zadaniem analizy egzergetycznej jest wykrywanie i ocena ilościowa przyczyn zwiększających niedoskonałość termodynamiczną procesów cieplnych. Analiza egzergetyczna dostarcza więc informacji o możliwościach udoskonalania procesów cieplnych, nie rozstrzyga jednak problemu opłacalności tych udoskonaleń.

W powiązaniu z analizą egzergetyczną Szargut i Sama [9, 41, 43] opracowali 20 reguł zmniejszania niedoskonałości termodynamicznej procesów cieplnych;

1. Straty egzergii są tylko wówczas uzasadnione, gdy są niezbędne do zmniejszania nakładów inwestycyjnych.

Np. nie można uniknąć strat egzergii w wymienniku ciepła, gdyż skończona różnica temperatur między płynami wymieniającymi ciepło pozwala ograniczyć pole powierzchni wymiany ciepła.

2. Wielkość bodźców termodynamicznych powinna wynikać z optymalizacji.

Zbyt małe bodźce wymagają zbyt dużych nakładów inwestycyjnych, zbyt duże zaś prowadzą do zmniejszenia sprawności. Bodźce termodynamiczne powinno się optymalizować za pomocą analizy ekonomicznej. W dziedzinie techniki cieplnej optima ekonomiczne są zazwyczaj dość płaskie. Należy też pamiętać o dość dużej niepewności obliczania funkcji celu, choćby ze względu na trudności przewidywania zmian cen w okresie działania rozpatrywanego urządzenia. Jeżeli więc planuje się zwiększenie nakładów inwestycyjnych, to warto zbadać czy proponowane udoskonalenie może zapewnić wyraźny zysk ekonomiczny.

3. Unikanie mieszania substancji różniących się temperaturą, ciśnieniem bądź składem chemicznym.

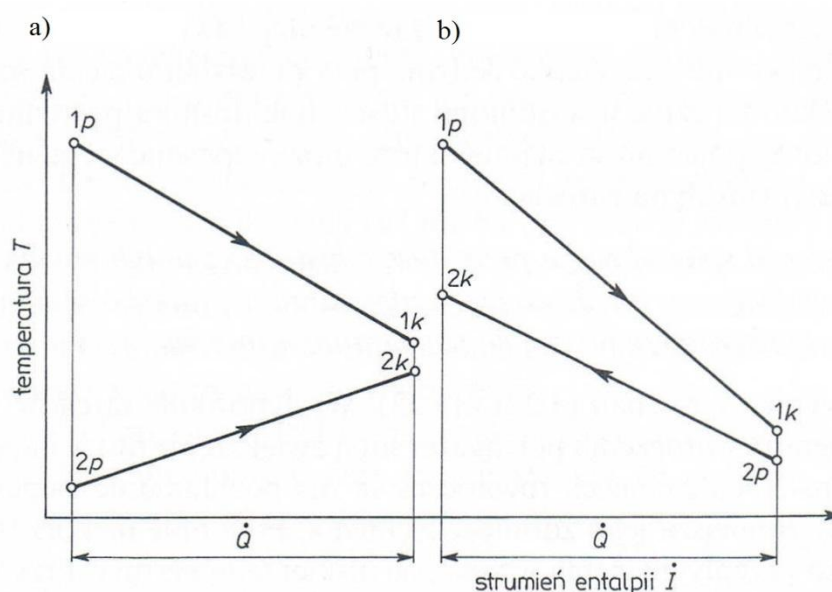
Mieszanie płynów różniących się temperaturą jest równoważne bezprzeponowemu przepływowi ciepła między płynami. Różnica temperatur nie służy w tym przypadku zmniejszeniu nakładów inwestycyjnych. Mieszanie płynów różniących się ciśnieniem następuje zwykle po zdławieniu płynu mającego wyższe ciśnienie, a więc towarzyszy mu strata egzergii spowodowana przez dławienie. Jeżeli mieszanie płynów różniących się ciśnieniem jest konieczne, to powinno się w miarę możliwości zastosować maszynę przeplywową rozprężającą płyn o wyższym ciśnieniu lub sprężającą płyn o niższym ciśnieniu. Mieszanie płynów różniących się składem wywołuje również straty egzergii, ale ich uniknięcie jest zwykle trudne.

4. Należy unikać ochładzania gorącej substancji powietrzem atmosferycznym lub wodą chłodzącą oraz podgrzewania powietrzem atmosferycznym lub wodą czynnika mającego temperaturę niższą od temperatury otoczenia.

Zarówno czynniki gorące jak i czynniki o temperaturze niższej od temperatury otoczenia mają dodatnią egzergię. Wymiana ciepła z otoczeniem oznacza niszczenie egzergii czynnika podgrzewanego lub chłodzonego.

5. Procesy przeciwprądowe są termodynamicznie bardziej sprawne niż współprądowe.

Na rysunku 2.6 porównano rozkład temperatury gazów lub cieczy we współprądowym i przeciwprądowym wymienniku ciepła.



Rys. 2.6 Rozkład temperatury we a) współprądowym i b) przeciwprądowym wymienniku ciepła (przy stałej pojemności cieplnej płynów) [43]

Największa różnica temperatur między płynem grzejącym a podgrzewanym występuje we współprądowym wymienniku ciepła w miejscu dopływu strumieni, z czym wiążą się nadmierne straty egzergii. Dlatego w procesie przeciwprądowym można uzyskać mniejsze straty egzergii przy jednakowym nakładzie inwestycyjnym lub przy założeniu jednakowej straty egzergii można zmniejszyć nakłady inwestycyjne w porównaniu z procesem współprądowym. Podobne uwagi dotyczą wymienników masy.

6. Należy starać się, by w sieciach wymienników ciepła w każdym wymienniku temperatura końcowa jednego ze strumieni była bliska temperaturze początkowej drugiego.

Reguła ta umożliwia maksymalne wykorzystanie egzergii nośników ciepła. W układach złożonych z wielu wymienników ciepła, szczególnie w przemyśle chemicznym, występuje pewna swoboda doboru konfiguracji układu. Właściwy dobór strumieni wymieniających między sobą ciepło może zmniejszyć zużycie ciepła napędowego i ilość ciepła odprowadzanego do otoczenia w chłodnicach i skraplaczach.

7. Pojemności cieplne strumieni wymieniających ciepło powinny być do siebie zbliżone. Jeżeli występują duże różnice, należy spróbować rozdzielić strumień o większej pojemności cieplnej na części wykorzystywane w różnych wymiennikach ciepła.

Jeżeli strumienie płynów wymieniających ciepło różnią się pojemnością cieplną, to nawet w nieskończenie wielkim wymienniku ciepła nie byłoby możliwe uniknięcie strat egzergii, gdyż tylko w jednym z przekrojów końcowych różnica temperatur zmierzałaby do zera. Stratę egzergii spowodowaną przez niejednakową pojemność cieplną strumieni wymieniających ciepło nazwano stratą strukturalną. Można ją zmniejszyć tylko przez zmianę struktury sieci wymienników ciepła.

8. Czynniki pośrednie przyczyniają się do strat egzergii.

Łączna powierzchnia przepływu ciepła zawsze ulega zwiększeniu na skutek zastosowania pośredniego nośnika ciepła. Jedynie przy przesyłaniu ciepła na dużą odległość może być ekonomicznie uzasadnione stosowanie nośnika pośredniego o zwiększonej objętościowej pojemności cieplnej, która może zapewnić wyraźne zmniejszenie nakładów inwestycyjnych na rurociągi.

9. Należy minimalizować straty egzergii spowodowane tarciem hydraulicznym i nieodwracalnym przepływem ciepła, które są większe im niższa jest temperatura w procesie, szczególnie zaś gdy temperatura procesu jest poniżej temperatury otoczenia.

Występowanie tarcia w temperaturze niższej od temperatury otoczenia pociąga za sobą zwiększenie mocy napędowej pomp lub sprężarek instalacji ziębiącej, równocześnie zaś pochłanianie ciepła tarcia przez czynnik ziębiący zmniejsza jego zdolność ziębienia. Podobnie niekorzystne są skutki nieodwracalnego przepływu ciepła

w zakresie niskiej temperatury. Przy stałej różnicy temperatur płynów wymieniających ciepło strata egzergii jest tym większa, im niższa jest temperatura

10. Należy ograniczać stosowanie przemiany dławienia.

Dławienie jest typowym przykładem nieodwracalności nie służącej zmniejszeniu nakładów inwestycyjnych. Straty egzergii spowodowane przez dławienie są tym większe, im większa jest objętość dławionego czynnika i dlatego są szczególnie dotkliwe w przypadku par i gazów. W ziębiarkach parowych sprężarkowych dławienie występuje jako obligatoryjna część obiegu, przyczynia się ono jednak do zmniejszenia wydajności ziębienia i zwiększenia mocy napędowej sprężarki. Opracowano już propozycje obiegu bezdławieniowego, na razie jednak występują trudności w jego praktycznej realizacji.

11. Im niższa temperatura na ssaniu, tym mniejsza praca sprężania.

Praca napędowa sprężania jest proporcjonalna do objętości sprężanego czynnika, objętość zaś gazu wyraźnie zmniejsza się z obniżeniem temperatury.

12. Należy zmniejszyć nieszczelności rurociągów, zaworów i komór spalania.

Odływ czynnika roboczego do otoczenia przez nieszczelności oznacza bezpośrednią stratę egzergii tego czynnika. Straty powietrza sprężonego podczas przepływu w sieci rozprowadzającej dochodzą często do 30%. Wnikanie powietrza przez nieszczelności do przestrzeni o obniżonym ciśnieniu oznacza mieszanie powietrza z czynnikiem różniącym się temperaturą i składem. Skutki takiego mieszania są zawsze niekorzystne (np. wnikanie powietrza do kanałów spalin wywołuje zmniejszenie efektów rekuperacji, zwiększenie oporów przepływu, zmniejszenie ciągu kominowego itp.).

13. Straty ciepła do otoczenia w skraplaczach turbin, oziębiarek są wynikiem wcześniejszych przemian nieodwracalnych.

W układach napędzanych energią chemiczną, jądrową lub mechaniczną egzergia napędowa jest równa energii napędowej lub większa od niej. Jeżeli więc efektem

działania urządzenia jest produkcja pracy lub podtrzymywanie obniżonej temperatury w przestrzeni ziębionej, to ciepło odprowadzane do otoczenia w skraplaczu powstaje tylko na skutek nieodwracalnych przemian wewnątrz układu.

Ciepło oddawane w skraplaczach jest już bardzo zdewaluowane i możliwości jego wykorzystania są bardzo ograniczone. Ilość tego ciepła można natomiast zmniejszyć przez zmniejszenie nieodwracalności wcześniejszych przemian. Na przykład zmniejszenie strat hydraulicznych w rurociągach pary prowadzi do zmniejszenia ilości ciepła oddawanego w skraplaczu siłowni parowej.

14. Unikać należy powtórnego sprężania pary.

Straty egzergii powstają zarówno w procesie rozprężania jak i w procesie sprężania. Przez sprężanie pary uprzednio rozprężonej wprowadza się więc nowe straty egzergii towarzyszące sprężeniu i zwiększa się straty egzergii przy rozprężaniu (na skutek zwiększenia ilości rozprężonej pary). Sprężenie pary uprzednio rozprężonej może mieć jednak uzasadnienie ekonomiczne jeżeli zapewnia oszczędności inwestycyjne.

15. Zmniejszenie jednej straty egzergii nie powinno powodować zwiększenia innej straty występującej równolegle.

Na przykład podgrzewanie substratów spalania zmniejsza stratę egzergii przy spalaniu, ale równocześnie zwiększa się strata egzergii przy oddawaniu ciepła przez spaliny. Wprowadzając więc podgrzewanie substratów spalania należy wprowadzić równocześnie inne zmiany w procesie w celu uniknięcia zwiększenia tej drugiej straty.

16. Nie należy wydłużać łańcucha przemian termodynamicznych.

Każde nowe ogniwo łańcucha przemian termodynamicznych jest źródłem dodatkowych strat egzergii. Takim nowym ogniwem może być np. pompa grzejna zasilana energią elektryczną z elektrowni ciepłej. Oprócz strat egzergii związanych z produkcją energii elektrycznej pojawiają się dodatkowe straty egzergii w częściach

składowych pompy grzejnej. Należy starannie skontrolować, czy suma tych strat jest mniejsza niż przy innych, mniej skomplikowanych metodach ogrzewania.

17. Należy starać się realizować procesy skojarzone wytwarzające więcej niż jeden efekt użyteczny.

Równoczesne wytwarzanie dwóch lub więcej produktów użytecznych skraca łańcuch przemian termodynamicznych i dlatego może zapewnić znaczne zmniejszenie strat egzergii. Znaczne efekty energetyczne skojarzonej gospodarki ciepłno-elektrycznej są właśnie następstwem skrócenia łańcucha przemian w porównaniu z gospodarką rozdzieloną. Aby to zauważyć, wystarczy porównać schematy układu skojarzonego i rozdzielonego.

18. Należy rozważać zawsze wpływ proponowanych zmian na straty egzergii w innych ogniwach procesu.

Np. podwyższenie temperatury spalania w kotle zmniejsza straty egzergii przy spalaniu, jednak zwiększa straty egzergii przy przepływie ciepła między spalinami a czynnikiem ogrzewanym.

19. Koszt jednostki egzergii zwiększa się w miarę postępu przemian termodynamicznych.

Na przykład w elektrowni ciepłej koszt jednostki egzergii paliwa jest mniejszy niż koszt jednostki egzergii pary, ten zaś jest mniejszy niż koszt jednostki egzergii (energii) elektrycznej. Straty egzergii są więc tym bardziej dotkliwe, im dalej znajdują się w łańcuchu przemian termodynamicznych.

20. Należy dążyć do zmniejszenia strat egzergii w miejscach, gdzie są one największe lub tam, gdzie koszt jednostki egzergii jest największy.

Na przykład w systemie elektroenergetycznym największe straty egzergii występują w kotle parowym, najbardziej zaś dotkliwe pod względem ekonomicznym są straty egzergii w generatorach elektrycznych i w sieci elektroenergetycznej. Straty egzergii w kotle można zmniejszać przez podwyższenie temperatury początkowej

czynnika roboczego, tj. np. przez wprowadzenie obiegów parowo-gazowych. Straty egzergii w sieci elektroenergetycznej zasługują również na pilną uwagę, gdyż w Polsce są one nadmierne i bardzo kosztowne.

Należy podkreślić, że łamanie cytowanych reguł jest dopuszczalne, jeżeli przynosi korzyści ekonomiczne [41].

2.5. Ekonomiczne zastosowanie egzergii

Straty egzergii powodują zmniejszenie efektu użyteczności danego procesu, albo zwiększenie zużycia elementów napędzających proces. W związku z tym Bosnjakovic [15] wystąpił z propozycją o podjęciu badań zmierzających do ograniczenia tej nieodwracalności. Zmniejszenie strat energii wymaga zazwyczaj znacznych wydatków inwestycyjnych. Należy więc uzupełnić apel Bosnjakovica: warto ograniczać nieodwracalność, ale w granicach opłacalności ekonomicznej [9, 15, 29, 31].

Jednoznaczne obliczenie strat ekonomicznych wywołanych przez straty egzergii jest bardzo trudne, a właściwie niemożliwe. Straty ekonomiczne wyznacza się tylko przez porównanie rozpatrywanego procesu z procesem przebiegającym bez strat. W rozpatrywanym przypadku musiałby być to proces odwracalny. Dobranie takiego procesu wymaga przyjęcia umownych założeń, a do jego realizacji potrzeba nieskończenie dużego nakładu inwestycyjnego [44]. Założenie, że bez zmiany wkładu finansowego przeprowadza się proces odwracalny, w którym straty egzergii nie występują, jest zupełnie nierealne [9].

Rozwój technik analitycznych opartych na drugiej zasadzie termodynamiki pozwala na zlokalizowanie i oszacowanie nieodwracalności w procesach produkcyjnych oraz na zidentyfikowanie, które części układu wpływają na ogólną niedoskonałość procesu [7, 9, 45]. Analiza egzergetyczna umożliwia usprawnienie operacji jednostkowej lub technologii, jednak to analiza ekonomiczna decyduje o zasadności tego działania [12, 42].

Opracowano kompletne, teoretyczne narzędzie, spełniające standardy przemysłowe, oparte na kombinacji metody ekonomicznej oraz termodynamicznej i nazwano „termoekonomią”, „egzergonomią” lub „egzergoekonomią” [9, 44-47].

Egzergoekonomia jest dziedziną badań, która łączy odpowiednio, na poziomie każdego ogniwa złożonego układu, obliczenia termodynamiczne opierające się na analizie egzergetycznej z zasadami ekonomicznymi [23, 48]. Celem egzergoekonomii jest dostarczenie użytkownikowi lub konstruktorowi informacji, które są użyteczne przy projektowaniu i eksploatacji układu przeznaczonego do generowania zysków, ale nie można ich uzyskać za pomocą analizy energetycznej lub egzergetycznej oraz analizy ekonomicznej [23, 29]. Egzergoekonomia opiera się na poglądzie mówiącym, iż *„egzergia jest jedyną racjonalną podstawą przydzielania kosztów pieniężnych do oddziaływań pomiędzy układem a otoczeniem oraz do źródeł termodynamicznej niedoskonałości w układzie”*. Takie podejście nazywane jest *egzergetycznym szacunkiem kosztów* [23].

Punktem wyjścia analizy termoekonomicznej jest zazwyczaj określenie jednostkowej wartości ekonomicznej egzergii w poszczególnych punktach rozpatrywanego układu. Można sformułować następujące zastrzeżenia dotyczące metod termoekonomii [42, 43]:

1. Wynik optymalizacji termoekonomicznej nie powinien różnić się od wyniku uzyskanego metodą czysto ekonomiczną. W przeciwnym razie należałoby uznać jedną z tych metod za błędną.

2. Nie jest możliwe – bez dodatkowych założeń – obliczenie wartości ekonomicznej egzergii w poszczególnych punktach układu zawierającego obieg (pętlę), gdyż liczba równań bilansowych jest w tym przypadku mniejsza od liczby niewiadomych.

3. Dodatkowe założenia umożliwiające obliczenie wartości ekonomicznej egzergii w poszczególnych punktach układu zazwyczaj są przyjmowane milcząco, bez ich wyraźnego sformułowania. Zazwyczaj przyjmuje się, że produkty wytwarzane w skojarzeniu (np. ciepło i energia elektryczna w elektrociepłowni) mają jednakową

jednostkową wartość ekonomiczną egzergii. Założenie to nie jest uzasadnione, gdyż wartość ekonomiczna jednostki egzergii zwiększa się w miarę postępu przemian. Np. wartość ekonomiczna jednostki energii elektrycznej jest większa niż wartość ekonomiczna jednostki egzergii pary w dowolnym punkcie elektrowni. Prawidłowa ocena wartości ekonomicznej produktu ubocznego może być wykonana tylko przez porównanie z procesem wyspecjalizowanym, którego produkt został zastąpiony przez rozpatrywany produkt uboczny (metoda kosztów unikniętych).

Określenie kosztu strat egzergii

Analizując procesy energetyczne wiadomo, że koszt jednostkowy egzergii zwiększa się w miarę postępu przemian termodynamicznych [9]. Jest to spowodowane tym, iż w każdym kolejnym ogniwie danego procesu pojawią się niemożliwe do uniknięcia straty egzergii, a więc strumień egzergii użytecznej maleje [23, 46]. Oprócz tego strumień kosztów stałych zwiększa się o koszty stałe kolejnych ogniw procesu [23, 44].

Jednocześnie koszt jednostkowy strat egzergii powinien zwiększać się w miarę postępu przemian. Są one coraz bardziej uciążliwe. Np. w elektrowni straty egzergii wytwarzanego prądu elektrycznego są bardziej uciążliwe niż straty egzergii w kotle.

Zagadnienie określenia kosztu jednostkowego strat egzergii rozpatrzono na przykładzie turbiny parowej przeciwprężnej [44].

Bilans egzergii dotyczący turbiny rzeczywistej i odwracalnej ma postać:

$$Ex_1 = Ex_2 + L + \delta Ex \quad (2.23)$$

$$Ex_{1r} = Ex_{2r} + L \quad (2.24)$$

Różnica bilansów pozwala określić stratę egzergii. Przyjmuje się stały efekt użyteczny L .

Strumień pary świeżej w procesie odwracalnym jest inny niż w rzeczywistym, jednak jego parametry nie zmieniają się:

$$\delta Ex = (Ex_1 + Ex_{1r}) - (Ex_2 - Ex_{2r}) \quad (2.25)$$

Bilans kosztów prowadzi do równania:

$$K_L = Ex_1 k_1 - Ex_2 k_2 + D \quad (2.26)$$

$$K_{Lr} = Ex_{1r} k_1 - Ex_{2r} k_{2r} + D_r \quad (2.27)$$

Straty ekonomiczne wynikają z nieodwracalności są określone różnicą kosztów wytwarzania efektu użytecznego:

$$K_{str} = K_L - K_{Lr} = (Ex_1 + Ex_{1r})k_1 - (Ex_2 k_2 - Ex_{2r} k_{2r}) + D - D_r \quad (2.28)$$

W celu uzyskania wyniku zgodnego z teorią Tsatsaronisa [44] przyjmuje się założenia:

$$k_2 = k_{2r} = k_1 \quad (2.29)$$

$$D = D_r \quad (2.30)$$

Co w konsekwencji daje wynik następujący:

$$K_{str} = [(Ex_1 + Ex_{1r}) - (Ex_2 - Ex_{2r})]k_1 = \delta Ex k_1 \quad (2.31)$$

czyli:

$$k_{str} = \frac{K_{str}}{\delta Ex} = k_1 \quad (2.32)$$

Koszt jednostkowy strat egzergii występujących w rozpatrywanym ogniwie procesu jest więc określony kosztem jednostkowym doprowadzonej egzergii napędowej.

Równanie (2.31) może służyć do przybliżonej oceny strat ekonomicznych spowodowanych przez nieodwracalność oraz do przybliżonej optymalizacji ekonomicznej procesu, prowadzi do minimalizacji sumy kosztów strat egzergii

obciążających kolejne ogniwa procesu [23, 44]. Należy podkreślić, że wyrażenie (2.31) może dostarczyć cennych informacji, nie powinno jednak pretendować do ścisłości naukowej [44].

Określenie ekonomicznej grubości izolacji

Ekonomiczne stosowanie egzergii jest również uzasadnione przy obliczaniu ekonomicznej grubości izolacji. Zwiększenie grubości izolacji przyczynia się do zwiększenia kosztu inwestycyjnego i do zmniejszenia kosztu traconego ciepła. Istnieje więc pewna grubość ekonomiczna przy której suma strat ekonomicznych jest najmniejsza [7, 16, 29].

Przy obliczaniu ekonomicznej grubości izolacji obliczenie kosztu traconego ciepła według średniej arytmetycznej wartości jednostki ciepła dostarczonego do czynnika termodynamicznego jest metodą błędną [7, 16, 29]. Ciepło tracone w czasie przepływu gorącego czynnika wewnątrz rurociągu odznacza się wysoką jakością, gdyż temperatura czynnika podczas oddawania tego ciepła jest wyższa niż we wszystkich innych stanach tego czynnika. Wartość kosztu ciepła można w przybliżeniu ocenić za pomocą wzoru (2.33) [41, 43]:

$$k_c = k_{sr} \frac{T - T_0}{T} \frac{T_{tr}}{T_{tr} - T_0} \quad (2.33)$$

gdzie:

k_c, k_{sr} – lokalny i średni jednostkowy koszt ciepła;

T, T_{tr} – rzeczywista i średnia termodynamiczna temperatura czynnika tracącego ciepło.

Średnia termodynamiczna temperatura wynika ze wzoru (2.34):

$$T_{tr} = \frac{\Delta i_p \Big|_{T_0}^T}{\Delta s_p \Big|_{T_0}^T} \quad (2.34)$$

Dokładna metoda oceny lokalnego kosztu ciepła polega na analizowaniu kosztów kompensacji strat spowodowanych poprzez straty ciepła. Koszt lokalny ciepła oceniony metodą kompensacji strat jest nieco mniejszy od kosztu określonego wzorem (2.33) [43].

3. Bilans egzergetyczny

3.1. Równanie bilansu egzergetycznego

W analizie termodynamicznej procesów technicznych podstawowymi obliczeniami są bilanse: substancjalne i energetyczne. Wynikają one z praw zachowania masy i energii. Mimo, że egzergia nie podlega prawu zachowania, wyniki analizy egzergetycznej dogodnie jest ująć w formę bilansu. Pozycją sztucznie zamykającą bilans egzergetyczny jest strata egzergii spowodowana przez nieodwracalność rozpatrywanych zjawisk. Stratę tę wyraża prawo Gouya-Stodoli (2.9) [32, 39, 40, 49-62].

Ogólne równanie bilansu egzergetycznego można zapisać w postaci (3.1) [7, 9, 41, 42]:

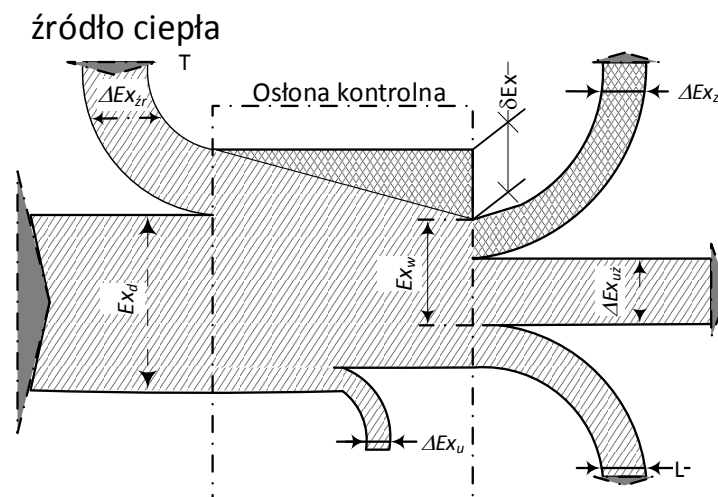
$$Ex_d = \Delta Ex_u + Ex_w + \sum \Delta Ex_{zr} + L + \delta Ex \quad (3.1)$$

Przy rozpatrywaniu układu przepływowego, znajdującego się w stanie ustalonym, przyrost egzergii układu jest równy zero. Równanie bilansu egzergetycznego w odniesieniu do jednostki czasu przyjmuje wówczas postać:

$$\dot{Ex}_d = \Delta \dot{Ex}_u + \dot{Ex}_w + \sum \Delta \dot{Ex}_{zr} + \dot{L} + \delta \dot{Ex} \quad (3.2)$$

gdzie kropką oznaczono wielkości odniesione do jednostki czasu.

Przy sporządzaniu bilansu egzergetycznego powinno się dążyć do możliwie szczegółowego podziału strat egzergii, aby uzyskać jak najdokładniejsze informacje o możliwościach polepszenia doskonałości procesu. Na przykład przy badaniu maszyny przepływowej można wewnętrzną stratę egzergii podzielić na składniki wynikające z tarcia mechanicznego, nieodwracalności przemian termodynamicznych, nieodwracalności wymiany ciepła w elementach chłodzonych, nieodwracalnej wymiany ciepła z otoczeniem itp.



Rys. 3.1 Wykres pasmowy Grassmanna [7]

Bilans egzergiczny można przedstawić graficznie za pomocą wykresu pasmowego (rys. 3.1). Na III Międzynarodowej Konferencji Energetyki Przemysłowej, we wrześniu 1963 roku w Warszawie, profesor N. Elsner z Drezna zaproponował, by wykres pasmowy bilansu egzergicznego nazwać wykresem Grassmanna [7, 9, 41].

Układ bilansowany oddziela się za pomocą osłony kontrolnej. Szerokość poszczególnych pasm jest wprost proporcjonalna do reprezentowanych przez nie wartości. Wewnętrzna strata egzergii δEx przedstawiana jest jako pasmo, którego szerokość zwiększa się w miarę przebiegu procesu od wartości równej zero do wartości określonej przez prawo Gouya-Stodoli. Jest ona ponadto wyróżniana odmiennym sposobem kreskowania, co służy zaakcentowaniu, że jest to wielkość jedynie sztucznie domykająca bilans i mająca odmienny sens fizyczny od innych wielkości bilansowych. Także w przypadku pasma odpowiadającego zewnętrznej stracie egzergii ΔEx_z stosuje się odmienne kreskowanie [7, 63].

Jeżeli badane urządzenie energetyczne składa się z kilku ogniw, bilans egzergiczny sporządza się zwykle oddzielnie dla każdego ogniwa. Wówczas dla każdego ogniwa należy nakreślić na wykresie Grassmanna odrębną osłonę bilansową. Dla większej przejrzystości osłony bilansowe można od siebie odsunąć.

3.2. Sprawność egzergetyczna

Składniki bilansu egzergetyki mogą służyć do obliczania sprawności egzergetycznej charakteryzującej odchylenie procesu od przebiegu odwracalnego. Podstawą do obliczania sprawności egzergetycznej są wielkości występujące w bilansie egzergetycznym, tak jak podstawą obliczania sprawności energetycznej jest bilans energetyczny [7, 9].

Bilans energetyczny nie uwzględnia niejednakowej jakości różnych postaci energii i różnych sposobów jej przekazywania. W związku z tym obliczana za pomocą składników tego bilansu sprawność termiczna (energetyczna) pozwala jedynie na porównanie ze sobą procesów tego samego typu, nie może być natomiast uważana za wskaźnik stopnia doskonałości danego procesu [7, 12]. Na przykład sprawność energetyczna silnika cieplnego (stosunek wykonanej pracy do ciepła pobranego z cieplejszego źródła) jest zawsze mniejsza od jedności, nawet w silniku najdoskonalszym, działającym odwracalnie. Sprawność energetyczna (wydajność energetyczna) pompy ciepła (stosunek ciepła grzejnego oddanego przez tę pompę do pracy napędowej) jest większa od jedności, nawet jeżeli działanie pompy ciepła jest dalekie od doskonałości. Czasami sprawność energetyczna równa jest zeru mimo, że w procesie występują wyraźne efekty użyteczne (np. w procesie produkcji tlenu z powietrza atmosferycznego) [12, 13].

W przypadku obliczania sprawności egzergetycznej bierze się pod uwagę fakt, że różne postacie i różne sposoby przekazywania energii mają niejednakową jakość. Wobec tego sprawność ta pozwala na lepszą ocenę energetyczną danego urządzenia niż sprawność energetyczna. Określa stopień oddalenia procesu od procesu idealnego przebiegającego odwracalnie i może być uznana za miarę doskonałości biegnących w nim procesów [7, 9, 12].

Ogólna zasada liczenia sprawności jest jednakowa. Tworzy się ułamek, w którego liczniku podstawia się składniki bilansu wyrażające efekt procesu, w mianowniku zaś umieszcza się składniki określające nakłady związane z podtrzymywaniem biegu procesu. W literaturze [7, 9, 12, 16, 23] najczęściej definiuje

się ją po prostu jako stosunek egzergii stanowiącej użyteczny efekt procesu $Ex_{uż}$, do egzergii napędowej Ex_N .

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{uż}}{Ex_N} \quad (3.3)$$

Sprawność egzergetyczna jest zawsze mniejsza od jedności. Może być większa lub mniejsza od sprawności termicznej. Aby lepiej zilustrować różnicę pomiędzy sprawnością energetyczną, a sprawnością egzergetyczną, można analizować silnik Carnota. Przy obliczaniu sprawności energetycznej tego silnika dzieli się wykonaną pracę przez ciepło napędowe. Sprawność tak obliczona jest zawsze mniejsza od jedności, mimo że silnik Carnota jest najdoskonalszym możliwym silnikiem. Sprawność egzergetyczna takiego silnika jest zawsze równa jedności. Sprawność energetyczna powinna być uważana za wskaźnik działania urządzeń podobnego typu. Sprawność egzergetyczna natomiast stanowi miarę doskonałości procesu, mówi o odwracalności badanych przemian, a przy odpowiedniej definicji mówi także o stopniu wykorzystania odpadowych produktów procesu [63].

Zdaniem Szarguta i Peteli [7] sprawność egzergetyczną należy obliczać dla całości badanego procesu, nie zaś dla poszczególnych jego ogniw. Sprawności egzergetyczne poszczególnych ogniw procesu byłyby nieporównywalne, gdyż w każdym ogniwie efekt użyteczny byłby odniesiony do innej egzergii napędowej.

3.3. Egzergia wilgotnego powietrza

Powietrze atmosferyczne zawsze zawiera parę wodną, której ilość zmienia się w zależności od warunków meteorologicznych. Na wiele procesów technologicznych wilgoć w powietrzu nie wywiera wpływu i powietrze atmosferyczne traktowane jest jako suche. Jednakże przy obliczaniu procesów suszenia, klimatyzacji i w niektórych innych przypadkach konieczne jest wzięcie pod uwagę obecność pary wodnej w powietrzu [7, 11].

Wilgotne powietrze może być traktowane jako mieszanina składająca się z 1 kg absolutnie suchego powietrza i Y kg pary wodnej. W związku z powyższym, egzergia

takiej mieszaniny, stosunek egzergii ex_p do 1 kg całkowicie suchego powietrza, będzie równy sumie egzergii właściwej suchego powietrza ex_{sp} i pary ex_v , tj.

$$ex_p = ex_{ps} + Yex_v \quad (3.4)$$

Egzergia powietrza wilgotnego jest funkcją 6 zmiennych niezależnych: temperatury, wilgotności, i ciśnienia powietrza rozpatrywanego oraz: temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza w otoczeniu. Egzergia wilgotnego powietrza wg. Besa może być określona z wyrażenia (3.15) [64]:

$$ex_p = c_{sp}(T - T_0) - T_0 \left[c_{sp} \ln \frac{T}{T_0} - R_{ip} \ln \frac{P - \varphi p(t)}{P_0 - \varphi_0 p(t_0)} \right] + Y \left[c_v(T - T_0) - T_0 \left(c_v \ln \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (3.5)$$

Przy niskich ciśnieniach cząstkowych pary wodnej jej właściwości są zbliżone do właściwości gazu doskonałego. W tym przypadku, wilgotne powietrze może być traktowane jako mieszanina dwóch gazów idealnych, a jego egzergię można obliczać wg wzoru (3.6):

$$ex_p = c_p(T - T_0) - T_0 \left[c_p \ln \frac{T}{T_0} - x_p R_{ip} \ln \frac{p_p}{p_{p_0}} - x_v R_{iv} \ln \frac{p_v}{p_{v_0}} \right] \quad (3.6)$$

Gdzie pojemność cieplna (ciepło właściwe) wilgotnego powietrza:

$$c_p = c_{sp} + Yc_v \quad (3.7)$$

Udziały masowe powietrza i pary wodnej:

$$x_p = \frac{1}{1 + Y} \quad (3.8)$$

$$x_v = \frac{Y}{1 + Y} \quad (3.9)$$

Ciśnienia cząstkowe powietrza i pary wodnej:

$$p_p = \frac{0,622P}{0,622 + Y} \quad (3.10)$$

$$p_v = \frac{YP}{0,622 + Y} \quad (3.11)$$

Egzergia powietrza obliczana jest jako iloczyn egzergii właściwej i masy przepływającego suchego powietrza:

$$Ex_p = m_{sp} ex_p \quad (3.12)$$

Wygodnie jest rozdzielić egzergię właściwą na składowe. W skład egzergii właściwej wchodzi:

- egzergia termiczna:

$$ex_{th} = (c_{sp} + Yc_v) \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \quad (3.13)$$

- egzergia mechaniczna:

$$ex_{me} = (1 + 1,6078Y) R_{ip} T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (3.14)$$

- egzergia chemiczna:

$$ex_{ch} = R_{ip} T_0 \left[(1 + 1,6078Y) \ln \frac{1 + 1,6078Y_0}{1 + 1,6078Y} + 1,6078Y \ln \frac{Y}{Y_0} \right] \quad (3.15)$$

Egzergia właściwa powietrza wilgotnego (3.16), jest sumą poszczególnych składowych [34, 39, 53, 55, 58, 65-72].

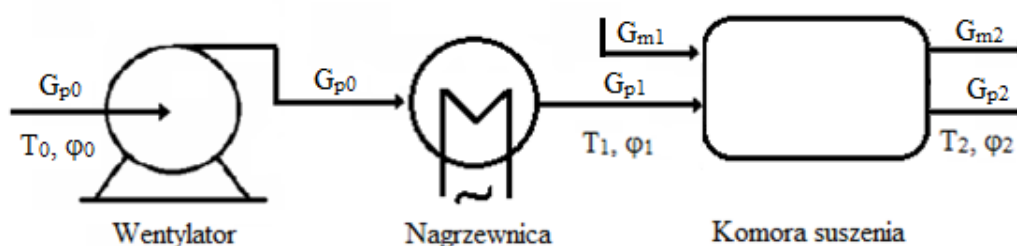
$$ex_p = ex_{th} + ex_{me} + ex_{ch} \quad (3.16)$$

3.4. Bilans egzergetyczny suszarki

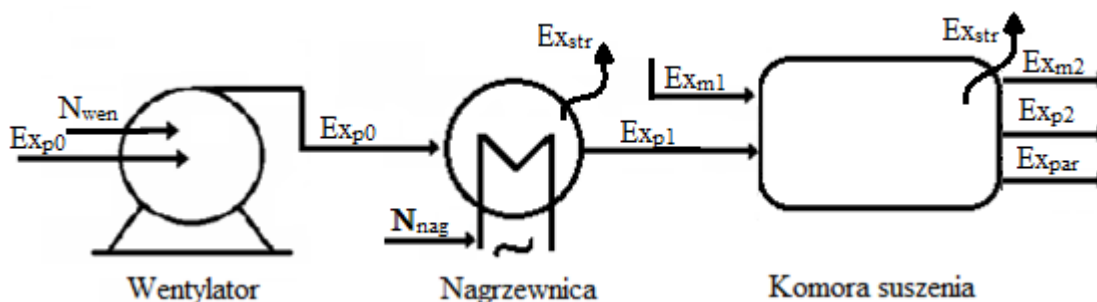
Proces suszenia jak już podkreślono jest jednym z najbardziej energochłonnych procesów prowadzonych w przemyśle, a analiza egzergetyczna może być narzędziem wspomagającym udoskonalanie tego procesu. Analiza egzergetyczna pozwala wskazać te etapy, gdzie energia jest degradowana podczas przebiegu procesu, co umożliwia jego usprawnienia. Głównym celem analizy egzergetycznej jest identyfikacja przyczyn oraz obliczenia strat egzergii [41, 43].

Jako czynnik suszący zazwyczaj wykorzystywane jest powietrze nagrzewane w grzejnikach lub spaliny ze spalania paliwa w specjalnych paleniskach; w niektórych przypadkach, powietrze nagrzewa się za pomocą spalin w specjalnych wymiennikach ciepła. Znajduje zastosowanie również ogrzewanie elektryczne (zwykle w połączeniu z nagrzewaniem parowym) [4, 11, 73].

Schemat strumieni materiałowych i strumieni egzergii dla suszarki o działaniu ciągłym przedstawiono na rysunkach 3.2 oraz 3.3.



Rys. 3.2 Schemat strumieni materiałowych dla procesu suszenia



Rys. 3.3 Schemat strumieni egzergii dla procesu suszenia

Bilans egzergetyczny dla węzła suszenia można zapisać w postaci (3.17):

$$\dot{E}x_{p0} + \dot{E}x_{m1} + \dot{E}x_{wen} + \dot{E}x_{nag} = \dot{E}x_{p2} + \dot{E}x_{m2} + \dot{E}x_{par} + \sum \dot{E}x_{str} + \delta \dot{E}x \quad (3.17)$$

Wentylator. Egzergia powietrza wchodzącego do wentylatora z otoczenia jest równa zero ($E_{xp0}=0$). Część mocy wentylatora N_{wen} , równa ηN_{wen} , (gdzie η współczynnik sprawności wentylatora), przeznaczona jest do podnoszenia ciśnienia powietrza i w konsekwencji, do zwiększenia egzergii. Strumień egzergii powietrza za wentylatorem [11]:

$$\dot{E}x_p = \eta N_{wen} \quad (3.18a)$$

Ten sam strumień egzergii można obliczyć z równania (3.18b), ponieważ jest równy pracy, którą wykonałoby sprężone powietrze przy rozszerzeniu izotermicznym:

$$\dot{E}x_p = G_{p0} T_0 R_p \ln \frac{P_1}{P_0} \quad (3.18b)$$

Podczas instalowania wentylatora za suszarką energia będzie zużywana na rozprężanie powietrza przy wejściu do urządzenia. Ale objętość pompowanego przez wentylator gazu będzie większa, ponieważ do objętości powietrza jest dodawana objętość pary wodnej, wydzielonej z materiału podczas suszenia. W związku z tym zużycie energii, a odpowiednio i egzergii wzrośnie. Tak więc, pod względem termodynamicznym korzystniej jest zainstalować wentylator na początku instalacji [11].

Egzergia dostarczona do wentylatora jest tożsama z energią elektryczną, w związku z czym strumień egzergii wentylatora dla sieci jednofazowej można zapisać równaniem:

$$\dot{E}x_{wen} = N_{wen} = UI \quad (3.19a)$$

Natomiast dla sieci trójfazowej równaniem (3.19b), gdzie $\cos \varphi$ – współczynnik mocy – dla skompensowanych urządzeń równy 1:

$$\dot{E}x_{wen} = N_{wen} = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (3.19b)$$

Wymienniki ciepła. W razie wykorzystania nagrzewnic elektrycznych wytwarzany przez nich strumień energii oblicza się według wzoru:

$$\dot{E}x_{nag} = N_{nag} \quad (3.20)$$

Komora suszenia. Z połączenia równania zmiany wilgoci w badanym materiale z bilansem wody zawartej w powietrzu można napisać równanie na strumień odparowanej masy wody:

$$G_w = m_{sm} \frac{dX}{d\tau} = G_{sp} (Y_2 - Y_1) \quad (3.21)$$

W procesie suszenia równanie bilansu energii dla komory suszenia może zostać zapisane za pomocą pierwszej zasady termodynamiki lub prawa zachowania energii. Znaczna wymiana ciepła jest spowodowana ciepłem parowania pomiędzy ciałem stałym i powietrzem suszącym, jak również wymianą ciepła z otoczeniem.

$$G_{sp}(i_{p1} - i_{p2}) = G_{sm}(i_{m2} - i_{m1}) + \dot{Q}_{par} + \dot{Q}_{str} \quad (3.22)$$

Masa i energia są wielkościami niezmiennymi w czasie, ale entropia nigdy nie jest niezmienna w czasie. Aby wyliczyć zmianę entropii należy przeprowadzić bilans entropii. Bilans entropii może być wyrażony następująco:

$$G_{sp}(s_{p1} - s_{p2}) = G_{sm}(s_{m2} - s_{m1}) + \dot{S}_{par} + \dot{S}_{str} + \dot{S}_{gen} \quad (3.23)$$

$$\dot{S}_{str} = \frac{\dot{Q}_{par}}{T_k} \quad (3.24)$$

W pierwszym etapie strumień ciepła na odparowanie dostarczany jest z powietrza o temperaturze T_p do materiału o temperaturze T_m , w związku z tym zmianę entropii można zapisać:

$$\Delta \dot{S}_{par1} = \frac{\dot{Q}_{par}}{T_m} - \frac{\dot{Q}_{par}}{T_p} \quad (3.25)$$

Następnie ciepło to zostaje odprowadzone z materiału o temperaturze T_m do otoczenia, zmianę entropii materiału można zapisać jako:

$$\Delta \dot{S}_{par2} = -\frac{\dot{Q}_{par}}{T_m} \quad (3.26)$$

Natomiast suma zmian entropii da równanie (3.27).

$$\dot{S}_{par} = \frac{\dot{Q}_{par}}{T_m} - \frac{\dot{Q}_{par}}{T_p} - \frac{\dot{Q}_{par}}{T_m} = -\frac{\dot{Q}_{par}}{T_p} \quad (3.27)$$

Bilans egzergii dla komory suszarniczej powstaje z połączenia równania bilansu energii (3.22) i równania bilansu entropii (3.23), poprzez pomnożenie bilansu entropii przez temperaturę otoczenia i odjęcie otrzymanego równania od bilansu energii:

$$G_{sp}(i_{p1} - i_{p2}) - T_0 G_{sp}(s_{p1} - s_{p2}) = G_{sm}(i_{m2} - i_{m1}) - T_0 G_{ms}(s_{m2} - s_{m1}) + \dot{Q}_{par} - T_0 \frac{\dot{Q}_{par}}{T_p} + \dot{Q}_{str} + T_0 \frac{\dot{Q}_{str}}{T_k} + T_0 \dot{S}_{gen} \quad (3.28)$$

Po przekształceniu równanie (3.28) można zapisać w postaci:

$$G_{sp}(ex_{p1} - ex_{p2}) = G_{sm}(ex_{m2} - ex_{m1}) + \left(1 - \frac{T_0}{T_p}\right) \dot{Q}_{par} + \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_{str} + T_0 \dot{S}_{gen} \quad (3.29)$$

lub:

$$\dot{E}x_{p1} - \dot{E}x_{p2} = \dot{E}x_{m2} - \dot{E}x_{m1} + \dot{E}x_{par} + \dot{E}x_{str} + \delta \dot{E}x \quad (3.30)$$

Wchodzące do tego bilansu wartości obliczane są w następujący sposób. Strumień egzergii czynnika suszącego na wejściu, wilgotnego powietrza, oblicza się ze wzorów (3.5), (3.6) lub (3.13)÷(3.16). Egzergię czynnika suszącego na wyjściu oznacza się tak, jak i na wejściu.

Strumień egzergii materiału oblicza się ze wzoru (3.31) [32, 39, 40, 49-53, 56, 57, 61, 62, 74-77]:

$$\dot{E}x_m = G_{sm} c_m \left(T_m - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \right) \quad (3.31)$$

Korzystny efekt suszenia, który jest równy zużyciu egzergii na odparowanie wilgoci z materiału, oblicza się z uwzględnieniem wzoru (3.32). Strumień ciepła \dot{Q}_{par} jaki musi zostać dostarczony można obliczyć z równania (3.33).

$$\dot{E}x_{par} = \left(1 - \frac{T_0}{T_p}\right) \dot{Q}_{par} \quad (3.32)$$

$$\dot{Q}_{par} = G_W r \quad (3.33)$$

Strumień strat egzergii spowodowany stratami ciepła do otoczenia, zarówno dla komory suszenia jak i dla pozostałych urządzeń, mogą być wyznaczone z zależności (3.34) [32-35, 38, 40, 67, 71, 72, 74, 78-81]:

$$\dot{E}x_{str} = \dot{Q}_{str} \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \quad (3.34)$$

Straty egzergii spowodowane oporem hydraulicznym suszarki, nieodwracalnością procesu zmieszania pary wilgoci z czynnikiem suszącym oraz nieodwracalnością procesów zewnętrznej wymiany ciepła i wewnętrznego przeniesienia ciepła i masy określane są razem jako końcowy składnik bilansu egzergetycznego.

Obliczając sprawność komory suszenia wykorzystuje się zależność (3.3) z uwzględnieniem, że użytecznym efektem procesu suszenia jest egzergia odparowania (3.32), a nakładem egzergia powietrza suszącego wchodzącego do komory suszarniczej. Stąd wyrażenie (3.35) [32, 34, 36, 38, 68, 79-84]:

$$\eta_{ex,k} = \frac{\dot{E}x_{par}}{\dot{E}x_{p1}} \quad (3.35)$$

Z punktu widzenia definicji (3.35) sprawności egzegetycznej wynika, że z każdego materiału można usunąć wilgoć w wystarczającym stopniu pozostawiając go przez odpowiednio długi czas w otoczeniu. Wynika stąd, że egzegetyczną ocenę doskonałości procesu suszenia można przeprowadzić nie przez obliczenie sprawności, lecz za pomocą odpowiednio ustalonego wskaźnika zużycia egzergii.

Zgodnie z propozycją Szarguta [7, 64] do oceny doskonałości procesu suszenia może posłużyć jednostkowe zużycie egzergii, które definiuje się jako ilość egzergii potrzebnej do usunięcia 1 kg wody:

$$\mu_{ex,k} = \frac{\dot{E}x_{p1}}{G_w} \quad (3.36)$$

Analogicznie obliczyć można sprawność całego procesu. Efektem użytecznym w dalszym ciągu jest egzergia odparowania wody, zmieniają się nakłady. W przypadku całego układu nakładami jest egzergia dostarczona do wentylatora i nagrzewnicy, w związku z tym sprawność egzergetyczną można zapisać wzorem (3.37):

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{par}}{\dot{E}x_{wen} + \dot{E}x_{nag}} \quad (3.37)$$

Natomiast jednostkowe zużycie egzergii:

$$\mu_{ex} = \frac{\dot{E}x_{wen} + \dot{E}x_{nag}}{G_w} \quad (3.38)$$

gdzie egzergia dostarczona do wentylatora $\dot{E}x_{wen}$ jest tożsama z energią elektryczną dostarczoną do napędu urządzenia N_{wen} .

4. Egzergochłonność skumulowana

4.1. Obliczanie wskaźnika skumulowanej egzergochłonności

Procesy produkcyjne są ze sobą wzajemnie powiązane dostawami półwyrobów i nośników energii, tworząc skomplikowaną sieć technologiczną. Zużycie egzergii, podobnie jak energii, obciążające dany wyrób występuje więc nie tylko w ostatnim ogniwie tej sieci lecz również w ogniwach poprzedzających. Sumaryczne zużycie czerpanej z przyrody egzergii pierwotnej obciążające rozpatrywany produkt, nazwano wskaźnikiem *skumulowanej egzergochłonności*. Wskaźnik ten można obliczać oddzielnie dla każdej postaci egzergii pierwotnej lub przetworzonej [9, 41, 42].

Ostatnio dużo uwagi poświęca się analizie cyklu życia (Life Cycle Assessment – LCA). Uwzględnia ona nie tylko skumulowane zużycie egzergii pierwotnej na budowę urządzeń wytwórczych w rozpatrywanym ciągu technologicznym, ale również możliwości wykorzystania surowców wtórnych, otrzymywanych przy demontażu urządzeń wytwórczych po zakończeniu cyklu życiowego [9, 85-89].

W obliczeniach nie uwzględnia się składników inwestycyjnych, gdyż można je wyznaczyć tylko szacunkowo. Nie należy również brać pod uwagę pracy ludzkiej zużytej w procesach produkcyjnych, ponieważ prowadzi to do podwójnego liczenia zużycia egzergii pierwotnej [9, 41, 42, 90].

Badanie skumulowanego zużycia egzergii pierwotnej może być przeprowadzane w skali globalnej lub regionalnej. Prowadząc pomiar w skali regionalnej niezbędne jest opracowanie metody obciążania skumulowanym zużyciem egzergii również surowców i półwyrobów importowanych do rozpatrywanego miejsca [9, 41]. Obliczenie to wykonuje się założywszy, że egzergochłonność skumulowana produktów importowanych jest proporcjonalna do ich ceny importowej, a środki finansowe na import zdobywa się przez eksport. Egzergochłonność jednostki monetarnej, która jest jednakowa dla importu i eksportu, wyznacza się za pomocą krajowego skumulowanego zużycia egzergii, obciążającego eksport i wartości monetarne eksportu. W ten sposób

dochodzi się do wzoru (4.1) na obliczeniową egzergochłonność jednostkową towaru importowanego w którym obliczenia należy wykonywać metodą iteracji [41, 43, 91].

$$ex_r^* = D_r \frac{\sum_e S_e ex_e^*}{\sum_e S_e D_e} \quad (4.1)$$

gdzie:

D_r, D_e – jednostkowa wartość monetarna towarów importowanego i eksportowanego;

S_e, ex_e^* – roczny eksport e-tego towaru i jego skumulowana egzergochłonność.

Posługując się metodą sekwencyjną lub metodą równań bilansowych można obliczyć wskaźnik skumulowanego zużycia egzergii Ex^* [9, 41, 42].

Metoda sekwencyjna jest przybliżona, ale pozwala prowadzić prawie niezależne obliczenia dla poszczególnych wyrobów. Polega na analizie kolejnych ogniw łańcucha technologicznego nie zawierającego sprzężeń zwrotnych. Zaczyna się od ogniwa ostatniego i przechodzi do ogniw coraz wcześniejszych. Konieczna jest przy tym znajomość wskaźników egzergochłonności skumulowanej podstawowych nośników energii i półwyrobów, takich jak: węgiel, gaz ziemny, koks, elektryczność, surówka żelaza [9, 41].

Jeżeli w rozpatrywanym procesie wytwarza się więcej niż jeden produkt, przy czym nie wyróżnia się produktu głównego i produktów ubocznych, to obliczenia przeprowadza się dla zespołu produktów użytecznych, a podziału obliczonego wskaźnika dokonuje się metodą umowną [9].

Gdy badany proces jest skojarzony, to analizę przeprowadza się tylko dla produktu głównego. Stosując zasadę nakładów unikniętych, od sumarycznego zużycia surowców i nośników energii, odejmuje się tę część, która obciąża produkty uboczne. Rozpatrując np. elektrociepłownię parową, od całkowitego zużycia węgla odejmuje się tę część, która obciąża produkcję uboczną elektryczności.

W przypadku różnej jakości produktów: ubocznego i zastąpionego egzergochłonność produktu ubocznego [9] oblicza się z zależności (4.2):

$$ex_u^* = ex_z^* z_{zu} \quad (4.2)$$

gdzie:

ex_u^*, ex_z^* – egzergochłonność produktu ubocznego i produktu zastąpionego;

z_{zu} – stosunek zastępowania, tj. stosunek liczby jednostek produktu zastąpionego do liczby jednostek produktu ubocznego, jedn. p. zast./jedn. p. u.

W analogiczny sposób można wyrazić współczynnik wytwarzania ubocznego na jednostkę produktu głównego (4.3). Współczynnik ten wyrażony jest w jednostkach produktu zastąpionego przez produkt uboczny.

$$f_{zj} = f_{uj} z_{zu} \quad (4.3)$$

Metoda układu równań bilansowych jest bardziej uniwersalna niż metoda sekwencyjna. Jej minusem jest jednak żmudność obliczeń dlatego stosuje się ją przeważnie przy wyznaczaniu wskaźnika skumulowanej egzergochłonności podstawowych nośników energii i półwyrobów.

Metoda układu równań bilansowych opiera się na stwierdzeniu, że skumulowane zużycie egzerгии obciążające produkty użyteczne procesu wynika z sumowania wartości obciążających doprowadzone surowce i półwyroby, łącznie ze zużyciem maszyn i urządzeń [9, 42]. Równanie bilansowe można zapisać dla każdego z procesów produkcyjnych. Odniesione do jednostki produktu głównego wraz z wytworzonymi produktami ubocznymi przyjmuje ono postać wyrażenia (4.4) [9, 41, 43]:

$$ex_j^* = \sum_i a_{ij} ex_i^* + \sum_u (a_{uj} - f_{uj}) ex_u^* + \sum_r a_{rj} ex_r^* + \sum_\beta a_{\beta j} ex_\beta \quad (4.4)$$

gdzie:

f_{uj}, a_{uj} – współczynnik wytwarzania i zużywania u-tego produktu ubocznego na jednostkę j-tego produktu głównego;

a_{ij}, a_{rj} – współczynnik zużywania i-tego półwyrobu krajowego i r-tego półwyrobu importowanego na jednostkę j-tego produktu głównego;

$a_{\square j}, ex_{\square}$ – wskaźniki bezpośredniego zużycia i egzerгии właściwa \square -tej egzerгии pierwotnej na jednostkę j-tego produktu głównego;

$ex_j^*, ex_i^*, ex_u^*, ex_r^*$ – wskaźniki skumulowanego zużycia egzerгии na jednostkę produktu j-tego, i-tego, u-tego i r-tego.

Ostatni człon wzoru (4.4) występuje tylko w procesach pozyskiwania pierwotnej energii z natury.

Zużycie półwyrobów powinno uwzględniać też zużywanie energii i materiałów na remonty i konserwacje urządzeń produkcyjnych. Współczynnik zużycia, dotyczący maszyn i urządzeń [9, 43, 82], można wyznaczyć korzystając ze wzoru (4.5):

$$a_{ij} = \frac{m_{ij}}{\tau_i G_j} u_{ij} \quad (4.5)$$

gdzie:

m_{ij} – liczba i-tych maszyn i urządzeń stosowanych w j-tym procesie;

τ_i – trwałość i-tej maszyny działającej z nominalną wydajnością;

G_j – roczna produkcja j-tego wyrobu;

u_{ij} – średni roczny stopień wykorzystania i-tej maszyny w j-tym procesie.

4.2. Skumulowana sprawność egzergetyczna i systemowe straty energii

Skumulowaną sprawność egzergetyczną wyraża wzór (4.6); jest to stosunek energii ex rozpatrywanego produktu do jego wskaźnika skumulowanej energochłonności ex^* [9, 41, 43]:

$$\eta_{ex}^* = \frac{ex}{ex^*} \quad (4.6)$$

Sprawność skumulowaną procesu można obliczyć poprzez iloczyn sprawności poszczególnych ogniw łańcucha technologicznego, prowadzących do rozpatrywanego produktu pod warunkiem, że nie ma w nim sprzężeń zwrotnych. Uzyskana wartość skumulowanej sprawności egzergetycznej jest tym mniejsza im większa jest liczba ogniw w analizowanym łańcuchu. Przeważnie w obliczeniach pomija się sprawność inwestycyjną.

Analiza skumulowanej energochłonności w przeciwieństwie do analizy skumulowanej energochłonności pozwala dodatkowo wyznaczać straty energii

występujące w poszczególnych ogniwach sieci technologicznej w związku z wytwarzaniem rozpatrywanego wyrobu [41, 43]. W ten sposób uzyskuje się systemową informację o możliwościach udoskonalenia sieci technologicznej zaangażowanej w wytwarzanie rozpatrywanego wyrobu. Udoskonalenie to może polegać na zmniejszeniu niedoskonałości termodynamicznej ogni w sieci, na zmianie doboru półwyrobów lub na zmianie technologii. Analizę skumulowanej egzergochłonności coraz powszechniej stosuje się do porównywania różnych technologii wytwarzania tego samego wyrobu [42].

Na przykład sprawność egzergetyczna wytwarzania szkła z surowca czerpanego z natury wynosi 0,8%, gazu ziemnego krajowego 97%, a gazu ziemnego importowanego 130%. Sprawności egzergetyczne wytwarzania materiałów zależą od technologii wytwarzania i stosowanych surowców, a także od skumulowanej sprawności dostawy elektryczności używanej w procesach wytwarzania. Jeżeli dzięki korzystnym cenom importu egzergochłonność skumulowana półwyrobu importowanego jest mniejsza od jego egzerгии chemicznej, to skumulowana sprawność egzergetyczna dostawy tego półwyrobu jest większa od 100% [9].

Różnica wskaźnika skumulowanej egzergochłonności ex^* i egzerгии ex rozpatrywanego produktu, wyraża skumulowaną stratę egzerгии obciążającą wszystkie ogniwa łańcucha przemian, które prowadzą od egzerгии pierwotnej do rozpatrywanego produktu [9, 43]:

$$\delta ex_j^* = ex_j^* - ex_j = ex_j^* (1 - \eta_{exj}^*) = \sum_p \delta ex_{pj} + \sum_s \delta ex_{sj}^* \quad (4.7)$$

gdzie:

δex_{pj} , δex_{sj} – p-ta strata lokalna oraz s-ta strata systemowa odniesiona do jednostki j-tego produktu.

Straty lokalne są następstwem nieodwracalnych przemian w ogniwach rozpatrywanego procesu i wynikają z bilansu egzerгии [41, 43]. Straty systemowe powstają przy wytwarzaniu półwyrobów dostarczanych do tego procesu i wynikają ze wzoru (4.4) [9]:

$$\delta ex_{sj}^* = a_{sj} (ex_{sj}^* - ex_{sj}), \quad s = i, r \quad (4.8)$$

$$\delta ex_{uj}^* = (a_{uj} - f_{uj}) (ex_{uj}^* - ex_{uj}), \quad s = u \quad (4.9)$$

Według wzorów (4.8) i (4.9) straty lokalne i systemowe w procesach skojarzonych odnoszą się do całości procesu i nie wyjaśniają jaka część tych strat obciąża wyłącznie produkt główny jaka zaś produkty uboczne.

Konsekwencją znaku „minus” przy współczynniku f_{uj} wytwarzania u-tego produktu ubocznego na jednostkę j-tego produktu głównego, jest zazwyczaj ujemna strata systemowa. Oznacza to zmniejszenie skumulowanej straty egzergii i zwiększenie sprawności egzergetycznej. Jeżeli jednak produkt zastąpiony produktem ubocznym pochodzi z importu i ma skumulowaną egzergochłonność mniejszą od egzergii, to strata systemowa charakteryzująca produkt uboczny staje się dodatnia. Efekt pozytywny niskiej egzergochłonności produktu ubocznego pojawia się dopiero w procesie zużywającym ten produkt [9].

4.3. Podział współczynników zużycia półwyrobów w procesach skojarzonych

Jeżeli półwyroby zużywane w procesie skojarzonym są takie same jak w procesie zastąpionym przez użytkowanie produktów ubocznych, to można dokonać podziału współczynników zużycia półwyrobów. Bierze się wówczas pod uwagę produkt główny i wyodrębnia tylko tę część, która go obciąża [9, 41, 43]. Współczynnik zużycia netto i-tego półwyrobu można obliczyć korzystając ze wzoru (4.10):

$$a_{ijN} = a_{ij} + (a_{uj} - f_{uj}) z_{iu} \quad (4.10)$$

Tej metody nie można zastosować, gdy w procesie występują półwyroby importowane. Import obciążony jest stratami egzergii we wszystkich procesach wytwarzania produktów eksportowych, egzergochłonność eksportu i importu są ze sobą w ścisłej korelacji. Nie jest możliwe obliczenie, jaka część surowców i półwyrobów w badanym procesie skojarzonym oraz, jaka część lokalnych strat egzergii obciążają produkt główny. Można tylko obliczyć skumulowane zużycie egzergii, obciążające

produkt główny [9]. Taka sytuacja ma miejsce np. w metalurgii, gdy wytwarzany ubocznie gaz palny (np. gaz wielkopiecowy lub konwertorowy) służy do zastępowania importowanego gazu ziemnego.

Brak półwyrobów importowanych sprowadza równanie (4.4) do postaci (4.11):

$$ex_j^* = \sum_i a_{ijN} ex_i^* + \sum_{\beta} a_{\beta j} ex_{\beta} \quad (4.11)$$

Po zastosowaniu wzoru (4.11) możliwe jest określenie wartości zarówno strat lokalnych, jak i strat systemowych obciążających tylko produkt główny procesu skojarzonego.

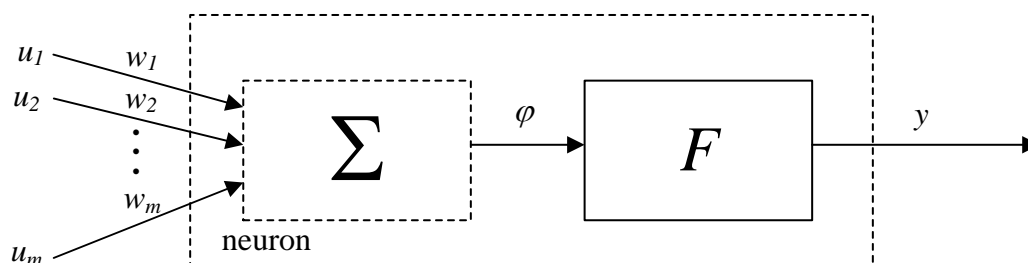
5. Sztuczne sieci neuronowe SSN

Sztuczna sieć neuronowa SSN (Ang. Artificial Neural Network, ANN) z definicji to wysoce równoległy rozproszony procesor złożony z prostych elementów obliczeniowych mający naturalną skłonność zapamiętywania podawanych informacji [92, 93].

Przypomina mózg w dwóch aspektach [94]:

- wiedza jest zdobywana przez sieć ze środowiska w toku procesu nauczania,
- wagi połączeń między neuronami używane są do zapamiętywania uzyskanej wiedzy.

Fundamentalną cechą różniącą SSN od programów realizujących algorytmiczne przetwarzanie informacji jest umiejętność generalizacji czyli uogólniania wiedzy dla nowych danych nieznanymi wcześniej, czyli nie prezentowanych w trakcie nauki. Definiuje się to również jako zdolność SSN do aproksymacji wartości funkcji wielu zmiennych w przeciwieństwie do interpolacji możliwej do otrzymania przy przetwarzaniu algorytmicznym. Np. systemy ekspertowe z zasady wymagają zgromadzenia i bieżącego dostępu do całej wiedzy na temat zagadnień, o których będą rozstrzygały. SSN wymagają zaś jednorazowego nauczania, przy czym wykazują one tolerancję na nieciągłości, przypadkowe zaburzenia lub wręcz braki w zbiorze uczącym. Pozwala to na zastosowanie SSN tam, gdzie nie da się rozwiązać danego problemu w żaden inny, wydajny sposób [95, 96].



Rys. 5.1 Model sztucznego neuronu [97]

Podstawowym elementem każdej sieci neuronowej są neurony, czyli elementy przetwarzające sygnały, nazywane również węzłami sieci. Neurony łączone są ze sobą tworząc bardziej skomplikowane struktury zwane siecią neuronową. Każdy neuron ma wiele wejść i jedno wyjście [57, 92, 97-100].

Ogólnie sztuczny neuron można rozpatrywać jako specyficzny przetwornik sygnałów (rys. 5.1). Współczynniki wag w biologicznym neuronie odpowiadają „sile” łączy synaptycznych. „Ważone” sygnały wejściowe są następnie sumowane i na tej podstawie wyznacza się aktywność neuronu. Model sztucznego neuronu składa się z dwóch bloków: bloku sumowania Σ i bloku aktywacji F . Na wejście podawane są sygnały wejściowe, które następnie są mnożone przez odpowiednie współczynniki wag i sumowane [97]. Potencjał φ można zapisać wg. wzoru [94, 97]:

$$\varphi = \sum_{i=1}^m w_i u_i = \vec{w}^T \vec{u} \quad (5.1)$$

W którym \vec{w} – jest wektorem współczynników wag, \vec{u} – wektorem sygnałów wejściowych, T – operatorem transponowania wektora lub macierzy, m – liczbą wejść neuronu.

5.1. Funkcje aktywacji

Sygnał φ jest poddawany przetwarzaniu przez blok aktywacji F , który w zależności od potrzeb może być opisany różnymi funkcjami. Podstawowe typy funkcji [31, 93, 97-100].

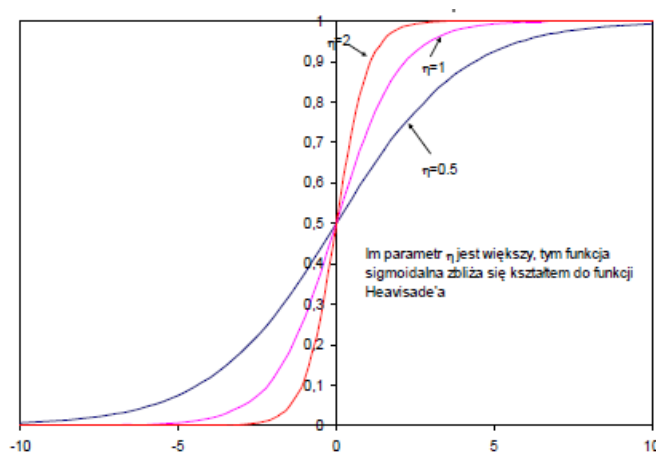
- liniowa $y = k \cdot \varphi$
- nieliniowe (ciągłe i nieciągłe, unipolarne i bipolarne)
 - funkcja skoku jednostkowego, progowa (McCulloch i Pitts):

$$f(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \varphi > \varphi_h \\ 0 & \text{dla } \varphi \leq \varphi_h \end{cases} \quad (5.2)$$

- funkcja sigmoidalna:

$$f(\varphi) = \frac{1}{1 + e^{(-\eta\varphi)}} \quad (5.3)$$

Gdzie: η – współczynnik stromości

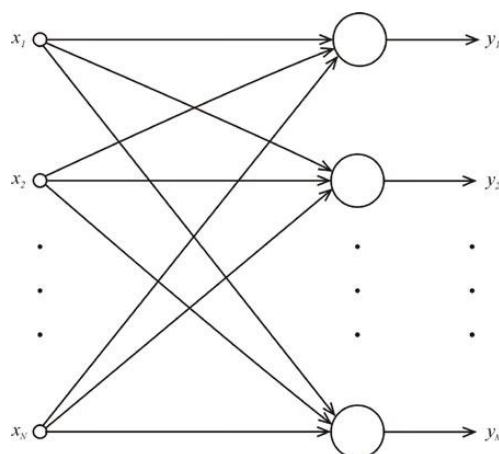


Rys. 5.2 Wykresy funkcji sigmoidalnych [94]

- o funkcja tangens hiperboliczny:

$$f(\varphi) = \operatorname{tgh}\left(\frac{\alpha\varphi}{2}\right) = \frac{1 + e^{(-\alpha\varphi)}}{1 + e^{(\alpha\varphi)}} \quad (5.4)$$

5.2. Topologia sieci neuronowej (architektura)

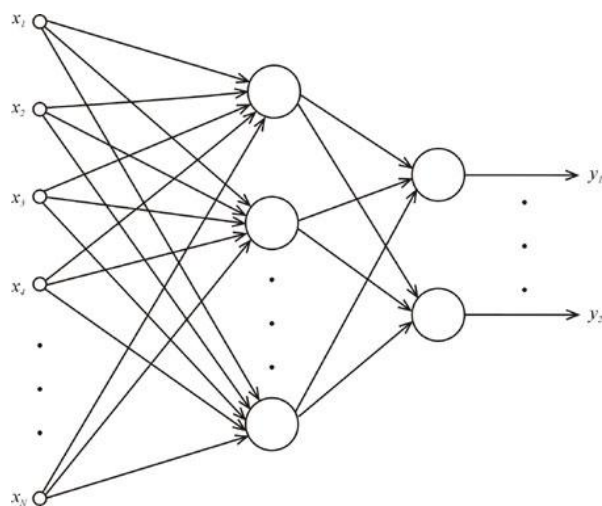


Rys. 5.3 Sieć jednokierunkowa jednowarstwowa (perceptron prosty) [101]

Ogólnie wyróżnia się dwa typy architektury SSN, sieci jednokierunkowe (ang. feed-forwarded) tj. sieci o jednym kierunku przepływu sygnałów. W sieciach

jednokierunkowych jedno i wielowarstwowe. W sieci jednowarstwowej (rys. 5.3) neurony są ułożone w jednej warstwie, zasilanej z węzłów wejściowych. Połączenie węzłów wejściowych z neuronami warstwy wyjściowej jest zwykle typu każdy z każdym tzn. każdy węzeł z każdym neuronem [93, 101].

Szczególnym przypadkiem architektury jednokierunkowej jest sieć warstwowa, reprezentująca zdecydowanie najpopularniejszą topologię. Cechą charakterystyczną sieci jednokierunkowych wielowarstwowych jest występowanie, co najmniej jednej warstwy ukrytej neuronów, która pośredniczy w przekazywaniu sygnałów między węzłami wejściowymi, a warstwą wyjściową (rys. 5.4).



Rys. 5.4 Sieć jednokierunkowa dwuwarstwowa [101]

Sygnaly wejściowe są podawane na pierwszą warstwę ukrytą neuronów, a te z kolei stanowią sygnały źródłowe dla kolejnej warstwy. W sieci tej występują połączenia pełne między warstwami. W szczególności w niektórych zastosowaniach pewne połączenia między-neuronowe mogą nie wystąpić i mówi się wówczas o połączeniu częściowym, lokalnym [93, 101].

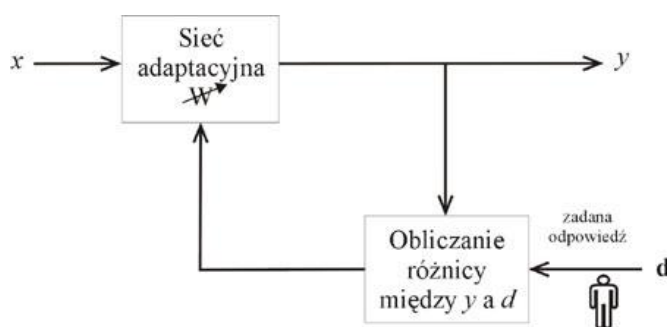
Inne, np. sieci rekurencyjne (feedback, bidirectional) tj. sieci ze sprzężeniami zwrotnymi (sieć Hopfielda) albo sieci uczenia się przez współzawodnictwo (Kohonena). Sieci rekurencyjne różnią się od sieci jednokierunkowych występowaniem sprzężenia zwrotnego między warstwami wyjściowymi i wejściowymi. Można tu wyróżnić sieci jednowarstwowe mające jedynie jedną warstwę neuronów wyjściowych oraz sieci mające dodatkową warstwę ukrytą – sieci wielowarstwowe rekurencyjne.

5.3. Charakterystyka procesu uczenia sieci

Pod pojęciem uczenia sieci pojmujemy się wymuszenie na niej określonej reakcji na zadane sygnały wejściowe. Uczenie niezbędne jest tam, gdzie brak jest informacji doświadczalnych o powiązaniu wejścia z wyjściem lub jest ona niepełna, co uniemożliwia szczegółowe zaprojektowanie sieci. Celem tego procesu jest taki adaptacyjny wybór wag, który umożliwi dopasowanie działania sieci do wymagań dotyczących odwzorowania danych wejściowych na wyjściowe [96].

Wyróżnia się dwa podstawowe sposoby uczenia sieci:

- uczenie nadzorowane (ang. supervised learning),
 - z nauczycielem
 - z krytykiem
- uczenie nienadzorowane (ang. unsupervised learning).



Rys. 5.5 Uczenie z nauczycielem [101]

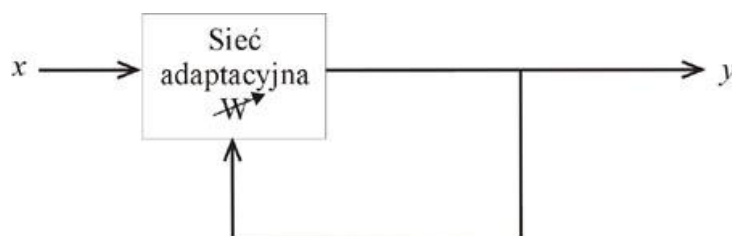
W procedurze uczenia z nauczycielem oprócz danych wejściowych posiadane są również sygnały wyjściowe, jakie należy uzyskać. Dobór wag musi być przeprowadzony w taki sposób, aby aktualny sygnał wyjściowy y był najbliższy wartości zadanej d [95, 96, 101].

Celem uczenia pod nadzorem jest minimalizacja odpowiednio zdefiniowanej funkcji celu, która umożliwi dopasowanie wartości aktualnych odpowiedzi neuronów wyjściowych do wartości żądanych [101].

Uczenie z krytykiem jest uczeniem pod nadzorem, w którym nie występuje informacja o wartościach pożądanых na wyjściu systemu, a jedynie informacja czy

podjęta przez system akcja (zmiana wartości wag) daje wyniki pozytywne w sensie pożądanego zachowania systemu, czy negatywne. Jeśli działania podjęte przez układ uczący dają wyniki pozytywne, to następuje wzmocnienie tendencji do właściwego zachowania się systemu w podobnych sytuacjach w przyszłości. W przeciwnym wypadku, jeśli wynik jest negatywny, następuje osłabienie tendencji takiego działania systemu.

Podczas uczenia bez nadzoru pożądana odpowiedź nie jest znana. Ze względu na brak informacji o poprawności, czy niepoprawności odpowiedzi sieć musi się uczyć poprzez analizę reakcji na pobudzenia, o których naturze wie mało lub nic. W trakcie analizy parametry sieci podlegają zmianom, co nazywamy samoorganizacją [96, 101].



Rys. 5.6 Uczenie bez nadzoru [101]

SSN oferują idealne rozwiązania dla dużego zakresu klasyfikowanych zagadnień (jak np.: mowa, rozpoznawanie znaków i sygnałów) równie dobrze jak predykcja i modelowanie systemów, gdzie zjawiska (fizyczne, ekonomiczne,...) są niezrozumiałe bądź bardzo skomplikowane. SSN mogą być stosowane do nadzoru nad procesami przebiegającymi w czasie realnym, gdzie zmienne wejściowe są odczytami pomiarów używanymi do sterowania *on-line*, a sieć uczy się funkcji kontroli [102].

Ze względu na opisane powyżej specyficzne cechy i niepodważalne zalety, obszar zastosowań sieci neuronowych jest rozległy [102]:

- Rozpoznawanie wzorców (znaków, liter, kształtów, sygnałów mowy, sygnałów sonarowych);
- Klasyfikowanie obiektów;
- Prognozowanie i ocena ryzyka ekonomicznego;
- Prognozowanie zmian cen rynkowych (giełdy, waluty);
- Ocena zdolności kredytowej;
- Ocena wniosków ubezpieczeniowych;

- Rozpoznawanie wzorów podpisów;
- Prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną;
- Diagnostyka medyczna;
- Dobór pracowników;
- Prognozowanie sprzedaży;
- Analizowanie zachowań klienta w supermarketach;
- Aproksymowanie wartości funkcji;

6. Analiza literatury dotyczącej wykorzystania egzergii do oceny procesów suszenia

W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęcano analizie egzergetycznej procesów i systemów suszarniczych oraz optymalizacji procesów suszenia z wykorzystaniem pojęcia egzergii [2, 32, 34-36, 38-40, 49-56, 58, 59, 61, 62, 65-68, 70-72, 74-76, 79-81, 83, 103-121]. To zainteresowanie motywowane jest rosnącymi cenami energii, kwestiami ochrony środowiska, wzrostem światowej populacji, malejącymi złożami paliw kopalnych oraz zapotrzebowaniem na wysoką jakość produktów suszenia. Analiza egzergetyczna stanowi narzędzie do lepszego zobrazowania strat energii do otoczenia oraz wewnętrznych nieodwracalności w procesie suszenia.

Analiza egzergetyczna procesu i systemów suszenia może być kategoryzowana bazując na różnych aspektach. Można korzystać z klasyfikacji suszarek według kryteriów takich jak: tryb pracy, sposób dostarczania ciepła, stan materiału w suszarce, ciśnienie robocze, medium suszące, temperatura procesu, względny ruch pomiędzy medium suszącym a substancjami suszonymi, liczba etapów oraz czas przebywania w aparacie [2, 5].

Badania doświadczalne w tej rozprawie dotyczą suszarek: fluidyzacyjnej, mikrofalowej oraz próżniowej oraz przeprowadza się optymalizację przy pomocy SSN. Dlatego też skupiono się na opisie dostępnej literatury dotyczącej analizy egzergetycznej dla tych typów suszarek jak i zastosowaniem SSN w analizie egzergetycznej.

6.1. Suszenie w złożu fluidalnym

Suszenie fluidalne zaliczane jest do metod konwekcyjnych [4, 5]. Polega na przepuszczaniu gorącego gazu (np. powietrza, spalin) przez złożę wilgotnego materiału. Prędkość przepływu gazu utrzymuje się na poziomie zapewniającym równomierną fluidyzację cząstek bez istotnych zakłóceń. W wyniku przepływu gazu następuje intensywne mieszanie i spulchnianie suszonego produktu. Efektywne mieszanie cząstek

ciała stałego w złożu zapewnia dobre rozwinięcie powierzchni kontaktu międzyfazowego między ciałem stałym i czynnikiem suszącym, co sprzyja osiągnięciu wysokich wartości współczynników wnikania ciepła i masy. W rezultacie następuje szybkie i równomierne odparowanie wilgoci z materiału poddawanego suszeniu [4, 5].

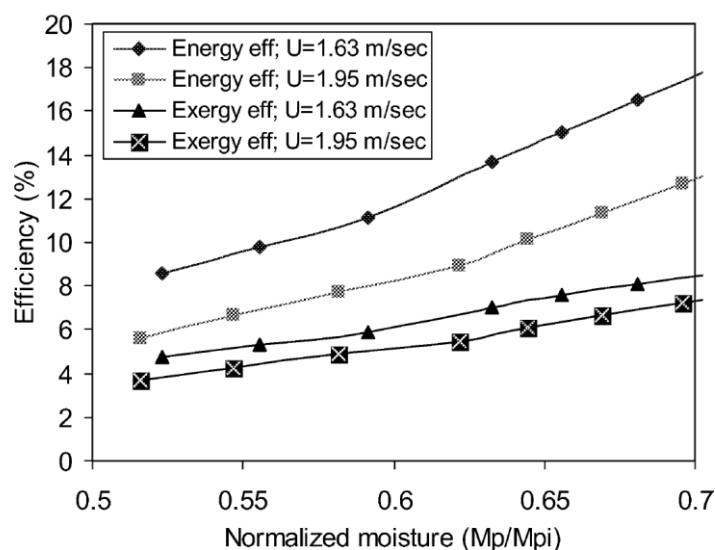
Metoda suszenia fluidalnego zajmuje istotną pozycję wśród ekonomicznych i nowoczesnych metod suszarniczych. Stosowana jest głównie do materiałów ziarnistych, ale również do past i zawiesin [4]. Stanowi konkurencję dla metod klasycznych (np. suszarek komorowych czy bębnowych) ze względu na lepszy stosunek intensywności suszenia do kosztów przetłaczania czynnika suszącego [5]. Do głównych zalet suszenia w układzie fluidalnym należą [4, 5]:

- doskonałe warunki wnikania ciepła i masy pozwalające na skrócenie czasu suszenia, a zatem zmniejszenie zapotrzebowania na energię,
- dobre wymieszanie materiału zapewniające jednakowe warunki obróbki cieplnej wszystkich cząstek produktu, a wskutek tego uzyskanie równomiernie wysuszonego produktu o odpowiedniej jakości,
- możliwość suszenia materiałów nieodpornych termicznie,
- wysoka sprawność cieplna,
- łatwa obsługa i konserwacja dzięki upłynnieniu złoża i braku ruchomych części.

Suszenie w złożu fluidalnym jest częstym tematem prac dotyczących analizy egzergetycznej procesu suszenia. Badany jest wpływ szeregu parametrów procesowych na wydajność egzergetyczną.

Syahrul i współautorzy [81] przeprowadzili analizę energetyczną i egzergetyczną suszenia pszenicy w złożu fluidalnym. Analiza miała na celu określenie wpływu temperatury powietrza wlotowego (40,2 °C i 65 °C), prędkości fluidyzacji (1,95 m/s i 1,63 m/s) i początkowej zawartości wilgoci (0,307 i 0,409) na efektywność energetyczną i egzergetyczną. Wydajność egzergetyczna była niższa od wydajności energetycznej ze względu na nieodwracalności, które nie są brane pod uwagę w analizie energetycznej. Energetyczna i egzergetyczna wydajność procesu suszenia zmniejszała się wraz ze spadkiem wilgotności produktu (czasem trwania procesu) i ze wzrostem

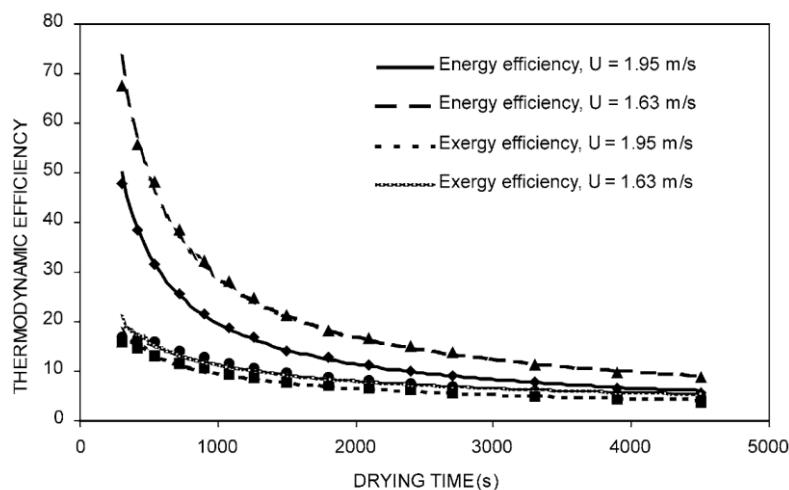
prędkości przepływu powietrza (rys. 6.1). Przy wzroście temperatury wlotowej powietrza o blisko 25 °C, autorzy zanotowali wzrost wydajności egzergetycznej. Egzergia opuszczająca komorę suszenia, destrukcja egzergii podczas procesu oraz strata egzergii spowodowana przepływem ciepła przez kolumnę do otoczenia są wymieniane jako główne powody spadku efektywności termodynamicznej. Według autorów straty te mogą być zmniejszone przez zawracanie czynnika suszącego, ograniczenie zniszczenia egzergii wewnątrz komory suszenia oraz unikanie przenoszenia ciepła przez obudowę.



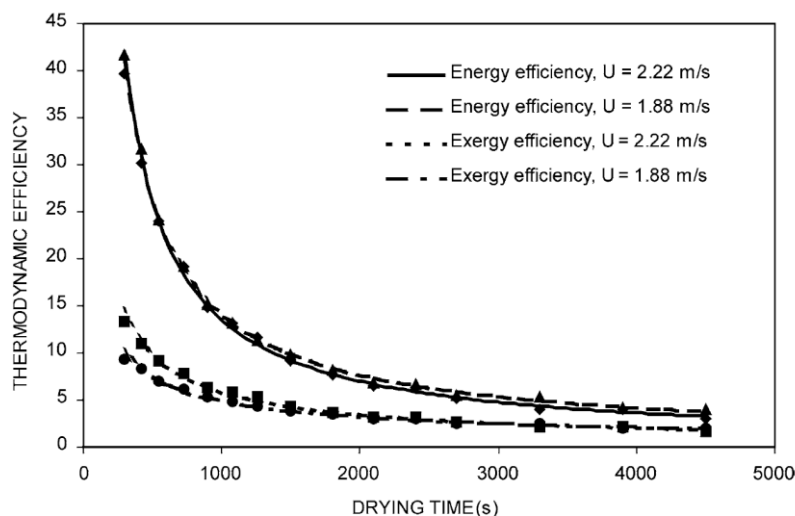
Rys. 6.1 Zależność wydajności energetycznej i egzergetycznej od znormalizowanej wilgotności dla różnych prędkości [81]

W kolejnym eksperymencie, ci sami autorzy [79] analizowali proces suszenia kukurydzy i pszenicy w złożu fluidalnym, pod kątem zwiększenia wydajności przy zmianie warunków początkowych i końcowych. Zbadali wpływ warunków hydrodynamicznych i termodynamicznych na energetyczną i egzergetyczną wydajność suszenia. Badania suszenia pszenicy wykonano dla temperatur 40 i 65 °C, prędkości przepływu powietrza 1,63 i 1,95 m/s oraz przy różnej początkowej zawartości wilgoci w materiale 0,409 i 0,307 dla suszenia pszenicy. Natomiast badania suszenia kukurydzy wykonano dla temperatur 50 i 63 °C, prędkości przepływu powietrza 1,88 i 2,22 m/s oraz przy różnej początkowej zawartości wilgoci w materiale 0,256 i 0,324. Dla obydwu materiałów termodynamiczna sprawność suszenia w złożu fluidalnym malała wraz ze spadkiem wydajności usuwania wilgoci i ze wzrostem prędkości przepływu powietrza. Temperatura powietrza suszącego miała silny wpływ na sprawność termodynamiczną procesu suszenia kukurydzy, ze wzrostem temperatury sprawność malała, natomiast nie wykazała znaczącego wpływu na sprawność suszenia pszenicy,

najprawdopodobniej z powodu zależności współczynnika dyfuzji od temperatury i zawartości wilgoci w cząstkach. Większą wydajność energetyczną i egzergetyczną uzyskano dla cząstek o wyższej wilgotności początkowej.



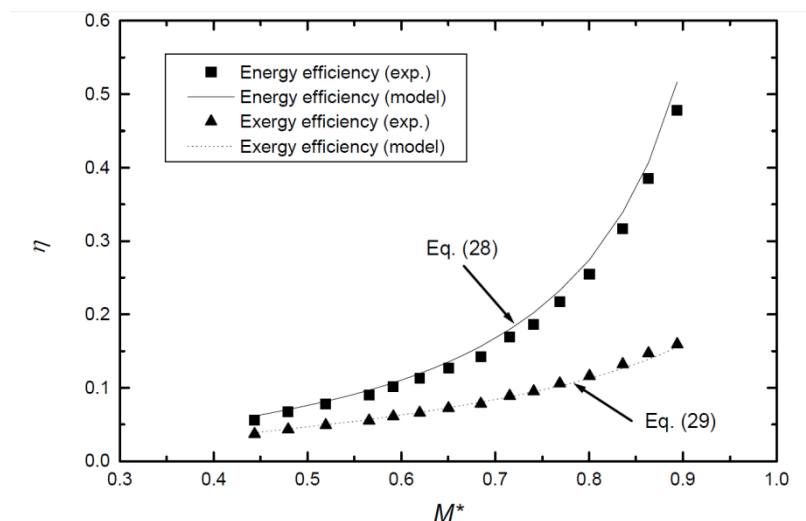
Rys. 6.2 Zmiana wydajności energetycznej i egzergetycznej w czasie suszenia pszenicy dla różnych prędkości [79]



Rys. 6.3 Zmiana wydajności energetycznej i egzergetycznej w czasie suszenia kukurydzy dla różnych prędkości [79]

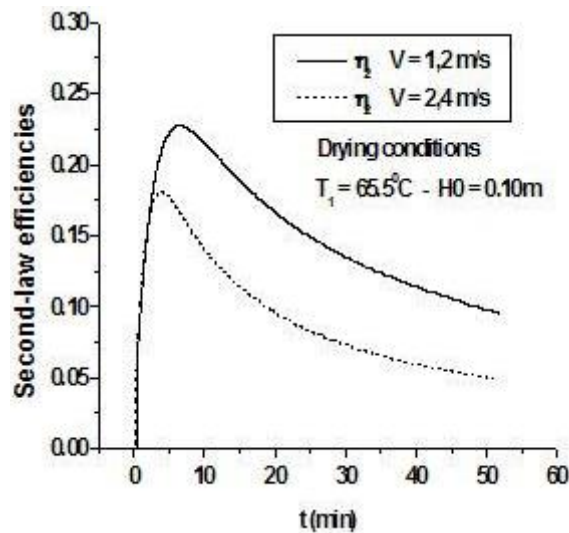
Inaba i współautorzy w pracy [80] zaproponowali kilka ujednoczonych bezwymiarowych eksperymentalnych korelacji do prognozowania sprawności energetycznej i egzergetycznej procesu suszenia w złożu fluidalnym za pomocą hydrodynamiki i termodynamicznych parametrów, takich jak temperatura powietrza wlotowego, wilgotność początkowa oraz liczba Reynoldsa i Fouriera. Autorzy wykazali dobrą zgodność pomiędzy przewidywaniami modelu, bezwymiarowymi korelacjami i dostępnymi wynikami eksperymentalnymi. Stosowanie minimalnej prędkości

fluidyzacji w pierwszym etapie suszenia i redukowanie temperatury powietrza suszącego wraz ze zmniejszaniem się zawartości wody w produkcie, zostało zaproponowane jako sposób do zwiększenia wydajności suszenia fluidalnego.



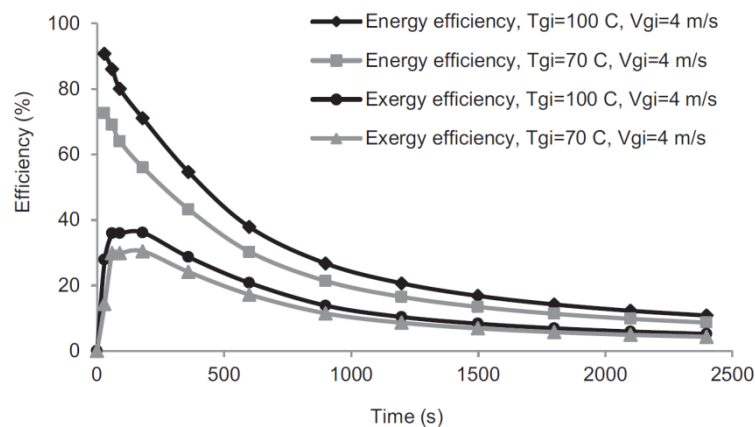
Rys. 6.4 Wpływ zawartości wilgoci bezwymiarowej na sprawność energetyczną i egzergetyczną [80]

Fortes [105] oraz Fortes i Ferreira [106] w swoich badaniach rozwiązywali numerycznie równania bilansu: pędu, ciepła, masy, entropii i egzergii, w celu znalezienia wpływu wybranych parametrów na energetyczną i egzergetyczną wydajność suszenia pszenicy w złożu fluidalnym. Badali wpływ zmiany: wilgotności powietrza $0,047 \div 0,85$, recyrkulacji powietrza $0 \div 50\%$, wysokości złoża $0,1$ i $0,2$ m, temperatury powietrza suszącego $45, 60$ i 75 °C oraz prędkości fluidyzacji $1,2$ i $2,4$ m/s. Ustalono, że wzrost wilgotności powietrza wpływa znacznej na sprawność egzergetyczną niż na energetyczną. Recyrkulacja zwiększyła czas suszenia, miała niewielki pozytywny wpływ na wydajność energetyczną, ale spowodowała spadek sprawności egzergetycznej. Wydajność egzergetyczna gwałtownie rosła z czasem w początkowym etapie suszenia, ze względu na nagrzewanie produktu, a po osiągnięciu maksymalnej wartości z czasem spadała. Wzrost wysokości złoża w przeciwieństwie do prędkości miał pozytywny wpływ na obydwie wydajności. Natomiast wzrost temperatury powietrza spowodował nieznaczny spadek sprawność egzergetycznej.



Rys. 6.5 Zmiana wydajności energetycznej i egzergetycznej w czasie suszenia dla różnych prędkości [106]

Xiang i współautorzy [107] badali egzergetyczną wydajność otwartego, zamkniętego i częściowo zamkniętego obiegu wmontowanych pomp ciepła, wspomagających suszenie fluidalne, napędzanych silnikiem diesla. Sprawność egzergetyczna przy częściowo zamkniętym obiegu wyniosła 29,2% i była wyższa niż w obydwu pozostałych podejściach. Jednakże, suszarka napędzana silnikiem diesla w porównaniu z zasilaniem elektrycznym nie była bardziej ekonomiczna. Nie zostały przedstawione w pracy szczegółowe matematyczne sformułowania egzergetyczne dotyczące silnika diesla i całego systemu suszenia.



Rys. 6.6 Zmiana wydajności energetycznej i egzergetycznej w czasie suszenia dla różnych prędkości [108]

Assari i współautorzy [108] przeprowadzili analizę energetyczną i egzergetyczną suszenia pszenicy w złożu fluidalnym na podstawie opracowanego modelu. Autorzy badali wpływ temperatury powietrza suszenia dla wartości $70 \text{ }^\circ\text{C}$ i

100 °C, prędkości przepływu powietrza 4 m/s i 5 m/s oraz rozmiaru cząstek materiału 3 mm i 5 mm. Rozwiązali równania rządzące energetyczną i egzergetyczną symulacją suszenia fluidalnego, w tym ciągłości przepływu ciepła i masy oraz generacji entropii przy użyciu metody objętości skończonych. Sprawność egzergetyczna w początkowym okresie suszenia wzrasta, następnie po osiągnięciu maksimum spada z czasem trwania procesu. Wydajność egzergetyczna maleje ze zwiększeniem rozmiaru cząstek materiału, nieznacznie rośnie ze wzrostem temperatury i ze spadkiem prędkości.

Khanali i współautorzy [122] przeprowadzili analizę egzergetyczną procesu suszenia surowego ryżu w suszarce ze złożem fluidalnym o przepływie tłokowym w skali laboratoryjnej. Badano wpływ zmiany temperatury w zakresie 50, 60 i 70 °C, wpływ zmiany przepływu materiału suszonego w granicach 46, 96 i 135 g/min oraz wpływ zmiany wysokości przegrody spiętrzającej 0,05 oraz 0,1 m. Autorzy stwierdzili, że wydajność egzergetyczna procesu suszenia fluidalnego z przepływem tłokowym ryżu rosła wraz ze spadkiem temperatury powietrza suszącego, zwiększeniem szybkości strumienia masy o raz ze zwiększeniem wysokości przegrody. Wydajność energetyczna była znacznie wyższa niż wydajność egzergetyczna procesu suszenia, wydajności te mieściły się odpowiednio w zakresach $7,97 \div 31,32\%$ oraz $4,18 \div 12,00\%$.

Nazghelichi i współautorzy [76] przeprowadzili analizę energetyczną i egzergetyczną suszenia kostki marchwi w złożu fluidalnym. Proces prowadzony był w różnych temperaturach powietrza suszącego 55 °C, 65 °C oraz 75 °C, wysokościach złoża oraz z różnymi rozmiarami kostek marchwi. Wydajność egzergetyczna komory suszenia zmieniała się w zakresie $10,3 \div 70,7\%$. Wydajność egzergetyczna suszarki osiągnęła wartość maksymalną, kiedy była stosowana wyższa temperatura powietrza suszącego, większy rozmiar kostki i niższe wysokości złoża podczas eksperymentu suszenia. Wydajność egzergetyczna suszarki rosła z czasem trwania procesu suszenia. Autorzy podają, że egzergetyczną wydajność suszenia w złożu fluidalnym można poprawić poprzez przesuwanie złoża fluidalnego w trybie wsadowym oraz zastosowanie mikrofal i układu podczerwieni jako źródła ogrzewania.

W przytoczonych pracach skupiono się na analizie egzergetycznej samej kolumny suszarniczej w prezentowanej rozprawie rozszerzono analizę na kompletny

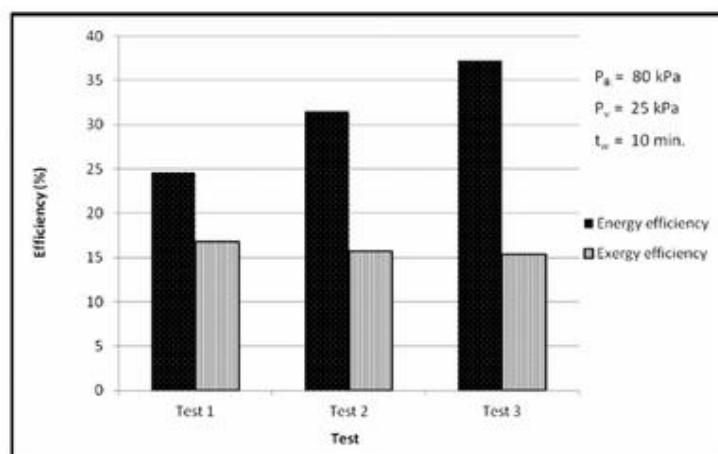
węzeł suszenia, jak również przeprowadzono analizę dla prędkości przepływającego powietrza poniżej prędkości krytycznej (złóże stacjonarne).

6.2. Suszenie próżniowe

Suszenie próżniowe jest procesem usuwania wilgoci z materiału w środowisku o zmniejszonym ciśnieniu, a więc przy zmniejszonej temperaturze wrzenia usuwanej cieczy [5]. Zaletą suszarek próżniowych w porównaniu z suszarkami atmosferycznymi jest intensywne suszenie w niskich temperaturach, co jest ważne dla materiałów nie wytrzymujących działania wysokiej temperatury. Przy suszeniu pod próżnią istnieje możliwość bardziej dokładnego wychwycenia cennych lub szkodliwych par wydzielanych przy suszeniu. Dodatkowo przy suszeniu próżniowym straty produktu w postaci pyłu są mniejsze, mniejsze jest także niebezpieczeństwo powstania pożaru. Wadą suszenia próżniowego jest wysoka cena urządzenia ze względu na skomplikowaną konstrukcję oraz kłopoty napotymane przy kontroli przebiegu procesu [73].

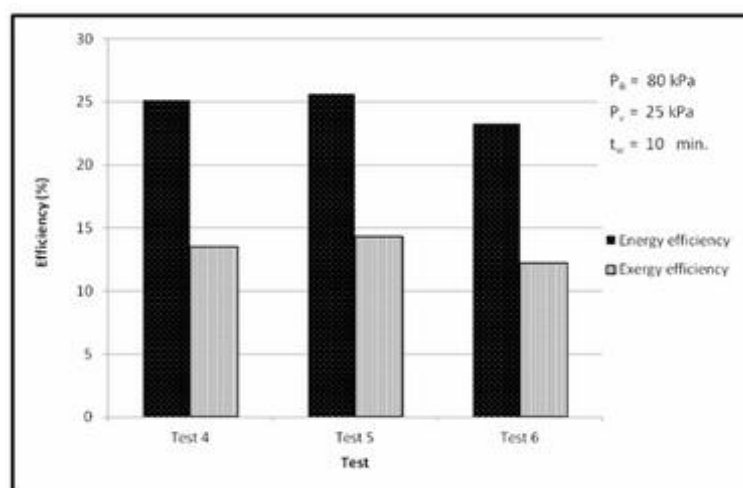
Istotne parametry wpływające na wydajność suszarki próżniowej to: temperatura suszenia, ciśnienie w komorze, źródło ciepła.

W literaturze dotyczącej analizy egzergetycznej procesów suszenia można znaleźć niewiele artykułów dotyczących suszenia próżniowego.

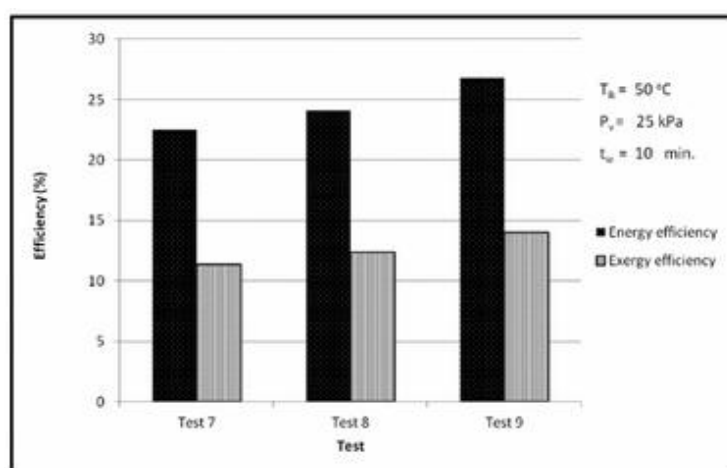


Rys. 6.7 Sprawność energetyczna i egzergetyczna suszenia próżniowego dla różnych temperatur: test 1 – 40 °C, test 2 – 50 °C, test 3 – 60 °C [123]

Dikmen i współpracownicy [123] wykonali analizę egzergetyczną suszenia drewna sosnowego w komorze próżniowej. Temperatura powietrza suszącego ulegała zmianie w zakresie $40\div 60$ °C, ciśnienie w komorze zmieniano w przedziale $60\div 80$ kPa i czas przebywania powietrza $5\div 15$ min. Efektywność egzergetyczna systemu miała wysoką wartość w niższej temperaturze suszenia, przy wyższym ciśnieniu w komorze i przy czasie przebywania równym 10 minut (rys. 6.7÷6.9).



Rys. 6.8 Sprawność energetyczna i egzergetyczna suszenia próżniowego dla różnego czasu przebywania powietrza: test 4 – 5 min, test 5 – 10 min, test 6 – 15 min [123]



Rys. 6.9 Sprawność energetyczna i egzergetyczna suszenia próżniowego dla różnych ciśnień: test 7 – 60 kPa, test 8 – 70 kPa, test 9 – 80 kPa [123]

Suszenie próżniowe ma wiele zalet w stosunku do innych metod suszenia w tym mniejsze zużycie energii, szybsze suszenie, mniejsze uszkodzenia produktów, możliwość suszenia toksycznych materiałów i odzysk odparowanego płynu. Jednak koszt inwestycyjny suszarki próżniowej jest stosunkowo wysoki. Dlatego porównawcze

badania egzergoekonomiczne są potrzebne, aby ocenić ogólną egzergetyczną wydajność różnych systemów suszenia i zastosować świadomą strategię oszczędzania energii i środowiska naturalnego podczas suszenia próżniowego.

Niewielka ilość dostępnej literatury dotyczącej analizy egzergetycznej suszenia próżniowego spowodowała podjęcie analizy tego zagadnienia w niniejszym opracowaniu.

6.3. Sztuczne sieci neuronowe

Nazghelichi i współautorzy zaprezentowali modelowanie parametrów energetycznych i egzergetycznych z wykorzystaniem sieci neuronowych, statycznych i rekurencyjnych [118]. Badania dotyczyły suszenia kostek marchwi w złożu fluidalnym. Do modelowania sieci autorzy zastosowali cztery wejścia: temperatura powietrza, wysokość złoża, wielkość kostki oraz czas suszenia. W celu znalezienia optymalnych modeli SSN badano różne liczby neuronów w warstwie ukrytej. Wyższy współczynnik determinacji R^2 osiągnięto dla rekurencyjnej sieci neuronowej.

W innym artykule Nazghelichi i współautorzy badali metodę odpowiedzi powierzchniowej (RSM) i algorytm genetyczny (GA) optymalizacji parametrów SSN do energetycznego i egzergetycznego modelowania suszenia fluidalnego [117]. Wykorzystano Wielowarstwowe jednokierunkowe SSN do skorelowania czterech wyjść sieci (parametry energetyczne i egzergetyczne) z czterema wejściami sieci (czas suszenia, temperatura powietrza suszącego, rozmiar kostki marchwi i wysokość złoża). RSM został zastosowany w celu ustalenia związku między parametrami wejść sieci neuronowej, a modelem szacowania mocy, a następnie dla ostatecznej optymalizacji stosowano GA. Wybrana topologia SSN miała dopuszczalną dokładność dla całkowitych strat energetycznych i egzergetycznych suszenia w złożu fluidalnym. Jednak wykorzystanie SSN do systemu suszenia w celu maksymalizacji efektywności egzergetycznej procesu suszenia, biorąc pod uwagę jakość suszu zasługuje na dalsze badania.

Aghbashlo i in. [121] stosują wstępne sterowanie SSN do przewidywania egzergetycznej wydajności procesu mikro-kapsułkowania oleju rybnego poprzez

suszenie rozpryskowe. Jednokierunkowa wielowarstwowa sieć neuronowa została zastosowana do korelacji parametrów wyjściowych (egzergia wlotowa, egzergia wylotowa, strata egzergii, degradacja egzergii, entropia generowana, efektywność egzergetyczna i egzergetyczny potencjał poprawy) do czterech parametrów wejściowych. Różne algorytmy minimalizacji błędów, funkcje transferu, liczba neuronów w warstwie ukrytej i epok szkoleniowe zostały przebadane w celu znalezienia optymalnego modelu. Wybrana topologia SSN dokładnie przewiduje egzergetyczne parametry procesu suszenia rozpyłowego i może być stosowana w celu określenia efektywnych egzergetycznie warunków suszenia celem osiągnięcia zrównoważonego procesu suszenia rozpyłowego.

Karimi i Rafiee [119] badali możliwości sztucznych sieci neuronowych do szacowania i optymalizacji metodą RSM dla procesu suszenia liści lawendy na podstawie zawartości wilgoci, szybkość suszenia, wydajności energetycznej i egzergetycznej. Autorzy użyli algorytmu z propagacją wsteczną dla sieci neuronowej z trzema wejściami i czterema wyjściami. Optymalne warunki suszenia oparte na sztucznej sieci neuronowej wyniosły: temperatura powietrza suszącego 46,8 °C, prędkość przepływu powietrza 0,726 m/s i czas suszenia 9,72 h, wyniki z metody odpowiedzi powierzchniowej wyniosły: zawartość wilgoci 0,32 g/g, szybkość suszenia 0,29 g wody/g·h, sprawność energetyczna 67% i sprawność egzergetyczna 80%.

6.4. Inne rodzaje procesu suszenia

Dla pełniejszej charakterystyki opracowywanego zagadnienia warto także zacytować badania dotyczące w zasadzie suszenia innymi metodami.

Akpinar przeprowadził analizę procesu suszenia plastrów bakłażana w suszarce cyklonowej [49] oraz plasterków truskawek w eksperymentalnej suszarce półkowej [54]. Badał wpływ zmiany temperatury i prędkości powietrza suszącego (55÷75 °C i 1,0 i 1,5 m/s [49] oraz 60÷85 °C i 0,5÷1,5 m/s [54]) na sprawność energetyczną i egzergetyczną. Autor stwierdza, że wydajność egzergetyczna suszarki zwiększa się z czasem trwania procesu oraz ze zwiększeniem temperatury i prędkości powietrza suszącego. Wydajność egzergetyczna komory suszenia jest odwrotnie proporcjonalna do zawartości wody w produkcie. W związku z tym wykorzystanie egzergii do

odparowywania wilgoci z produktu zmniejsza się wykładniczo w kierunku zakończenia procesu suszenia z tendencją podobną jak kinetyka suszenia. Ogólnie rzecz biorąc, można wywnioskować, że większa część dostarczonej egzergii do komory suszenia tracona jest z usuwanym powietrzem. W związku z tym świadoma strategia wymaga ponownie użycia tej dużej ilości usuwanej egzergii.

Akpinar i współautorzy zbadali wpływ zmiany temperatury i prędkości przepływu powietrza suszącego oraz wpływ kolejności półek na sprawność energetyczną i egzergetyczną suszenia plasterów ziemniaka [75] oraz plasterów dyni [59] w dwu półkowej suszarce cyklonowej. Temperatura i prędkość zmieniały się w zakresie $60\div 80$ °C, 1,0 i 1,5 m/s. Autorzy stwierdzili, że wydajność egzergetyczna w kanale suszenia zwiększa się z czasem suszenia i jest wysoka dla wyższych wartości temperatur i prędkości powietrza suszącego. A także, wydajność egzergetyczna dla pierwszej półki jest znacznie wyższa niż dla drugiej. Wartości egzergii dopływającej do pierwszej półki są takie same jak w komorze suszącej, podczas gdy, wartości egzergii napływającej do drugiej półki są takie same jak wartości egzergii odpływu z pierwszej półki. Nie tylko wartości strat egzergii pierwszej półki są wyższe niż dla drugiej półki, ale również wartości napływu egzergii do pierwszej półki są wyższe niż do drugiej półki. To z kolei doprowadziło do wyższej wydajności egzergetycznej pierwszej półki w porównaniu z drugą półką. Podczas suszenia gorącym powietrzem plasterów ziemniaczanych zaobserwowano także, że wydajność egzergetyczna suszarki ma charakterystykę malejącą w początkowym okresie czasu suszenia z powodu wstępnego podgrzewania produktów, a następnie rośnie do zakończenia procesu suszenia z powodu malejącej prędkości suszenia w drugim etapie suszenia.

Corzo i in. [112] wykorzystując pojęcie energii i egzergii przeprowadzili optymalizację warunków suszenia plasterów owoców palmy Coroba w eksperymentalnej suszarce półkowej. Modelowano i optymalizowano parametry suszenia gorącym powietrzem za pomocą Metody Odpowiedzi Powierzchniowej (RSM ang. response surface methodology). Temperatura powietrza zmieniała się w zakresie $71\div 93$ °C, a prędkość $0,82\div 1,18$ m/s. Optymalne warunki według autorów to: temperatura 90,6 °C, czas suszenia 69 min, a prędkość 1,08 m/s, w odpowiedzi uzyskali wilgotność końcową 0,3815 g/g, szybkość suszenia 0,000103 g wody/g's oraz wydajność egzergetyczną równą 90,9%. Należy jednak zauważyć, że zwiększenie stabilności procesu przy użyciu

analizy egzergetycznej może negatywnie wpłynąć na jakość suszu, a nawet doprowadzić do jego pogorszenia. W przypadku suszenia artykułów spożywczych, znaczenie jakości staje się jeszcze bardziej wyraźne ze względu na zdrowie człowieka. W związku z tym fizykochemiczne cechy żywności należy rozważyć przy wyborze optymalnych warunków suszenia [2].

Prommas i in. badali wpływ wielkości cząstek [114] oraz konfiguracji złoża [113] na analizę energetyczną i egzergetyczną w procesie suszenia konwekcyjnego wielowarstwowych ośrodków porowatych w laboratoryjnej suszarce konwekcyjnej. Zmianie ulegała średnica cząstek 0,15 i 0,4 mm (odpowiednio drobna i gruba frakcja) oraz konfiguracja złoża: drobna (wysokość złoża 40 mm), gruba (wysokość złoża 40 mm), drobna – gruba (wysokość złoża po 20 mm na frakcję) i gruba – drobna (wysokość złoża po 20 mm na frakcję). Autorzy stwierdzili, że efektywność egzergetyczna suszarki zwiększa się z czasem suszenia. Efektywność egzergetyczna komory suszenia silnie zależy od wielkości cząstek i konfiguracji wielowarstwowych. Wydajność egzergetyczna komory suszenia przy suszeniu drobnych cząstek była wyższa niż przy suszeniu grubych cząstek oraz najwyższą wydajność egzergetyczną suszarni otrzymano przy konfiguracji suszenia frakcja gruba – drobna.

Motevali i Minaei [50] zbadali wpływ wstępnej obróbki mikrofalowej na współczynnik wykorzystania energii i efektywność egzergetyczną komory suszenia. Zmianie ulegała temperatura powietrza w zakresie 50÷70 °C, prędkość od 0,5 do 1,5 m/s oraz wstępna obróbka: materiał był traktowany mikrofalami o mocy 100 W przez 20 minut lub mikrofalami o mocy 200 W przez 10 minut. Autorzy wykazali, że zwiększenie temperatury i prędkości powietrza suszenia zwiększyło efektywność egzergetyczną komory suszenia zarówno dla próbek kontrolnych jak i uprzednio traktowanych mikrofalami. Efektywność egzergetyczna komory suszenia zwiększyła się z czasem suszenia i była niezwykle wysoka dla próbek uprzednio traktowanych mikrofalami niż tych kontrolnie suszonych. Wydajność egzergetyczna komory suszenia oscylowała między 44,85÷100% dla suszenia kontrolnego, 62,54÷100% dla próbek uprzednio traktowanych mikrofalami o mocy 100 W przez 20 minut i 73,68÷100% dla próbek uprzednio traktowanych mikrofalami o mocy 200 W przez 10 min. W obliczeniach sprawności egzergetycznej jednak nie ma odpowiedniego równania uwzględniającego egzergię mikrofal.

Prommas i współautorzy [52] przeprowadzili analizę energetyczną i egzergetyczną suszarki taśmowej z zasilaniem mikrofalowo-konwekcyjnym. Zmianie ulegała temperatura powietrza w zakresie 30÷70 °C, rozmiar cząstek złoża, położenie układu magnetronowego. Autorzy wykazali, że na sprawność egzergetyczną miały wpływ temperatura i rozmiar cząstek złoża, natomiast położenie układu magnetronowego nie doprowadziło do znaczącej różnicy w egzergetycznej efektywności. Według autorów efektywność egzergetyczna suszarki podczas suszenia gorącym powietrzem była znacząco wyższa niż suszenia mikrofalowego. Należy zauważyć, że autorzy nie przedstawiają żadnej teoretycznej korelacji między energią mikrofalową i odpowiednią wartością egzergii. Ponadto porównania tego dokonują na podstawie czasu trwania procesu a nie końcowej zawartości wilgoci materiału [2].

Ranjbaran i Zare [83] przeprowadzili symulację fluidalnego suszenia soi, wspomaganego mikrofalami oraz wykonali analizę w oparciu o pierwsze i drugie prawo termodynamiki. Analizę przeprowadzono dla kilku warunków suszenia. Badano wpływ temperatury powietrza wlotowego (30÷60 °C), gęstości mocy mikrofal (0÷5,3 W/g), grubości warstwy (3 cm, 4,5 cm i 6 cm) i prędkości przepływu powietrza na wlocie (1,2 m/s, 1,7 m/s i 2,2 m/s) na efektywność procesu suszenia. Model przewiduje parametry wydajności suszenia ze średnim względnym odchyleniem mniejszym niż 14%. Wyniki wykazały, że zastosowanie energii mikrofalowej w pierwszym etapie procesu suszenia jest mniej skuteczne. Wykazano, że moc mikrofal może zwiększyć sprawność termodynamiczną suszarek fluidalnych. Autorzy proponują stosowanie wyższych wartości temperatury powietrza w celu zwiększenia wydajności suszenia i zmniejszenia skali niszczenia egzergii, podczas suszenia fluidalnego wspomaganego mikrofalami. Wzrost grubości warstwy doprowadził do wyższej wydajności suszenia, jednakże jej wielkość musi być zoptymalizowana. Autorzy stwierdzają, że korzystniejsze jest zastosowanie niższych wartości prędkości wlotowych powietrza z uwzględnieniem minimalnej prędkości fluidyzacji oraz stanu pełnej fluidyzacji.

Colak i Hepbasli [111] przeprowadzili analizę egzergetyczną suszenia zielonych oliwek w laboratoryjnej suszarce półkowej. Zmianie ulegała temperatura powietrza w zakresie 40÷70 °C, masowe natężenie przepływu powietrza w zakresie 0,01÷0,015 kg/s oraz masowe natężenie przepływu surowca $1,5 \cdot 10^{-4}$ ÷ $9,0 \cdot 10^{-4}$ kg/s. Autorzy wykazują, że efektywność egzergetyczna suszarki wzrastała liniowo wraz ze wzrostem temperatury

powietrza suszącego, ze wzrostem masowego natężenia przepływu powietrza i surowca. Wg autorów egzergetyczna wydajność komory suszenia jest znacząco wysoka co wskazuje, że odpływające powietrze suszące ma dobry potencjał do dalszego procesu suszenia. Straty egzergii przez komorę suszenia znacząco rosną wraz ze wzrostem temperatury ściany komory suszenia. Autorzy stwierdzają, że w celu zwiększenia wydajności egzergetycznej procesu suszenia i zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych są możliwe proste i tanie termodynamiczne modyfikacje, takie jak zwiększenie równomierności prędkości i temperatury powietrza w całej masie.

Colak i in. [32] wykonali analizę egzergetyczną suszenia makaronu. Analiza ta została przeprowadzona z wykorzystaniem rzeczywistych danych z przemysłowej czterosekcyjnej suszarki z zakładu znajdującego się w Turcji. Dla każdej z sekcji oznaczano straty egzergii, egzergię na odparowanie, sprawność egzergetyczną. Wartości sprawności egzergetycznej zmieniała się od 0,25% do 5,27% w stosunku do podsuszania na końcowym odcinku suszenia. Wartość efektywności egzergetycznej dla całego systemu suszenia wyniosła 2,96%.

Coskun i wsp. [67] bazując na analizie energetycznej i egzergetycznej przeprowadzili ocenę skuteczności przemysłowego procesu suszenia zrębek drewna. Efektywność energetyczna procesu suszenia zrębek była znacząco wyższa niż wydajność egzergetyczna (wyniosła odpowiednio 34,07 i 4,39%), odzwierciedlając, że większa ilość dostarczonej egzergii do bębna suszenia ulega zniszczeniu w procesie suszenia. Wydajność egzergetyczna również malała ze spadkiem temperatury otoczenia, podczas gdy efektywność energetyczna rosła. Autorzy w celu poprawy warunków pracy i efektywności proponują system suszenia wyposażony w wymiennik ciepła. Sprawność energetyczna i egzergetyczna wzrosłyby odpowiednio do wartości 93,16% i 43,08%. Odzyskana energia, mogłaby być wykorzystana do ogrzewania pomieszczeń biurowych fabryki w okresie zimowym, bądź w innych wymaganiach grzewczych firmy w okresie letnim.

W literaturze dotyczącej analizy egzergetycznej procesu suszenia można znaleźć wyniki dotyczące badań wpływu szeregu parametrów na wydajność egzergetyczną i różne sposoby wyznaczania sprawności egzergetycznej;

- W jednym z nich za egzergię użyteczną stosuje się wzór na zużytą egzergię odparowania cieczy z materiału [32, 36, 79-81, 83, 105, 106, 108, 122].
- W innym podejściu sprawność jest to stosunek egzergii wyjściowej do egzergii wejściowej [35, 36, 38, 40, 49-52, 54-62, 65, 66, 68, 74-78, 110-114, 123].
- Jeszcze innym podejściem jest zaproponowany przez Dincera i Sahina (2004) [72] sposób. Autorzy wzięli pod uwagę w bilansie masy trzy elementy: sam produkt, powietrze i wodę, która wychodzi z powietrzem suszącym i zawartą w produkcie. Efektywność egzergetyczna wyprowadzona jest jako funkcja parametrów wymiany ciepła i masy [34, 39, 53, 67, 68]

Ostatnio, Dincer [109] zmodyfikował definicję sprawności egzergetycznej procesu suszenia, biorąc pod uwagę egzergię wylotową z komory suszenia i egzergię użytą do ogrzewania materiału suszonego. Należy jednak zauważyć, że przydatność nowej definicji dla procesu suszenia nie została jeszcze potwierdzona przez badania eksperymentalne [2].

W dostępnej literaturze najczęściej badany jest wpływ zmiany temperatury powietrza suszącego na wydajność egzergetyczną dla różnych typów suszarek [38, 49, 50, 59, 61, 62, 74-76, 81, 103, 109]. Wyróżnić także można badania wpływu poniższych parametrów na wydajność egzergetyczną:

- początkowa zawartość wilgoci w materiale [81];
- wielkość strumienia przepływającego powietrza [32, 72, 74, 109];
- prędkość przepływu powietrza [38, 49, 50, 59, 61, 75, 79, 81, 106, 108];
- wysokość złoża [76, 83, 106];
- wielkość cząstek materiału suszonego [52, 108];
- masa materiału suszonego [32, 72];
- recyrkulacja powietrza [105, 106];
- temperatura otoczenia [32];
- aspekty hydrodynamiczne tj. zatrzymanie złoża [81].

CZEŚĆ EKSPERYMENTALNA

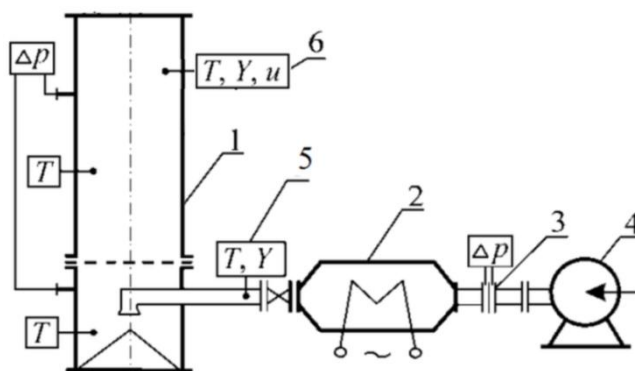
7. Analiza egzergetyczna suszenia w złożu fluidalnym

Analiza egzergetyczna procesu suszenia w układach fluidalnych jest przedmiotem szeregu publikacji omówionych w podrozdziale 6.1. Analiza tych publikacji pozwala na stwierdzenie, że dotychczas nie zajmowano się zagadnieniem wpływu liczby fluidyzacji na przebieg suszenia biomateriałów. Materiały takie stanowią obecnie znaczną część materiałów suszonych.

W niniejszej pracy przeprowadzono ocenę egzergetyczną suszenia fluidalnego biomateriału na przykładzie maku z uwzględnieniem wpływu liczby fluidyzacji.

Z analizy literaturowej dotyczącej badania wpływu wybranych parametrów procesowych na egzergetyczną wydajność procesu wynika, że autorzy większości publikacji ograniczają analizę egzergetyczną do kolumny suszarniczej [67, 68, 81]. Dla kompleksowego zobrazowania procesu suszenia postanowiono zbilansować nie tylko suszarkę, ale również cały węzeł suszenia (rys. 3.2) w skład którego wchodzi wentylator, suszarka i nagrzewnica elektryczna.

7.1. Stanowisko badawcze suszenia fluidalnego



Rys. 7.1 Schemat stanowiska: 1 – suszarka fluidyzacyjna, 2 – nagrzewnica, 3 – przepływomierz (przyrząd TESTO 452 z odpowiednią przystawką), 4 – wentylator, 5, 6 – przyrządy: TESTO 452 i TESTO 112 (firmy Testoterm GmbH & Co. Hamburg, Germany)

Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem stanowiska badawczego, którego schemat przedstawiono na rysunku 7.1. Powietrze tłoczone jest wentylatorem (4) poprzez przepływomierz (3) do nagrzewnicy elektrycznej (2), a następnie do kolumny fluidyzacyjnej (1). Średnica wewnętrzna kolumny wynosi $D=74$ mm.

Wyposażenie stanowiska w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową umożliwia uzyskanie danych do sporządzenia charakterystyk procesowych i wykonania bilansu egzegetycznego.

Wykonano stosowne działania w celu przystosowania stanowiska badawczego do pełnej realizacji celów pracy. Udało się wyposażyć instalację badawczą w aparaturę kontrolno-pomiarową wysokiej jakości.

Większość stosowanych przyrządów pomiarowych pochodziło z Firmy TESTO GmbH&Co., co zapewniało wysoką dokładność pomiarów badanych wielkości procesowych. Przyrząd TESTO 452 umożliwiał jednoczesny (w miejscu zainstalowania) pomiar temperatury prędkości przepływu oraz wilgotności względnej. Dodatkowa sonda umożliwiała także pomiar spadków ciśnienia

Dokładność pomiarów wynosiła:

- temperatury $\pm 0,1$ °C,
- prędkości $\pm 0,05$ m/s,
- wilgotności względnej $\pm 2\%$,
- ciśnienia $\pm 0,1$ hPa.

Przyrząd wyposażony jest w drukarkę termiczną, co ułatwia akwizycję i archiwizację danych pomiarowych.

W badaniach wykorzystano także:

- Przyrząd TESTO 112 z odpowiednią sondą do pomiaru temperatury o dokładności $\pm 0,2$ °C.
- Przyrząd TESTO 416 (kompaktowy anemometr wiatraczkowy ze zintegrowaną sondą przepływu) charakteryzujący się dokładnością $\pm 0,2$ m/s.
- Wagosuszarkę WPS 30S firmy Radwag o dokładności 0,01%.
- Miernik energii elektrycznej firmy Pafal typ A52 o dokładności 0,01 kWh.

Do badań testowych wybrano ziarna maku z powodu łatwej możliwości uzyskania pożądanej zawartości wilgoci oraz łatwości uzyskania stanu fluidalnego. Mak jest materiałem ziarnistym, pochodzenia naturalnego zaliczanego do grupy B klasyfikacji Geldarta [124].

Właściwości materiału badawczego zebrano w tabeli 7.1.

Tabela 7.1 Właściwości suszonego materiału [125]

<i>Parametr</i>			<i>Wartość</i>
Średnia średnica ziaren	d_m	m	$0,7 \cdot 10^{-3}$
Gęstość materiału	ρ_m	kg/m ³	1040÷1080
Porowatość złoża	ε_0	–	0,41÷0,45
Krytyczna zawartość wilgoci	X_{kr}	kg/kg	0,12
Równowagowa zawartość wilgoci	X_{kr}	kg/kg	0,04

Przed przystąpieniem do badań przygotowano materiał badawczy, poprzez nawilżenie go, do początkowej zawartości wilgoci ok. 30%. Do określenia stopnia nawilżenia oraz oznaczenia zawartości wilgoci w próbkach pobieranych dla określenia krzywej suszenia stosowano termowagę (RADWAG WPS 303, Polska). Wyniki sprawdzano w klasycznej suszarce komorowej susząc pobrane próbki do stałej masy.

W trakcie prowadzenia badań jak i w przedstawieniu wyników posługiwano się liczbą fluidyzacji, którą zgodnie z definicją można zapisać równaniem (7.1):

$$N = \frac{u}{u_{mf}} \quad (7.1)$$

Prędkość krytyczna została wyznaczona doświadczalnie poprzez sporządzenie krzywych fluidyzacji ziaren maku.

W początkowym etapie badań określano kinetykę suszenia analizując wpływ parametrów procesowych na przebieg krzywych suszenia.

7.2. Wpływ zmiany prędkości powietrza suszącego

Doświadczenie przeprowadzono dla trzech różnych temperatur powietrza suszącego 50 i 60 °C oraz dla porównania bez dodatkowego ogrzewania powietrza w nagrzewnicy czyli w temperaturze minimalnej t_{\min} . Zastosowano wysokość statyczną złoza równą średnicy kolumny fluidyzacyjnej. Proces był prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym. W tabeli 7.2 zebrane zostały parametry przy których realizowane były eksperymenty.

Tabela 7.2a Parametry doświadczenia

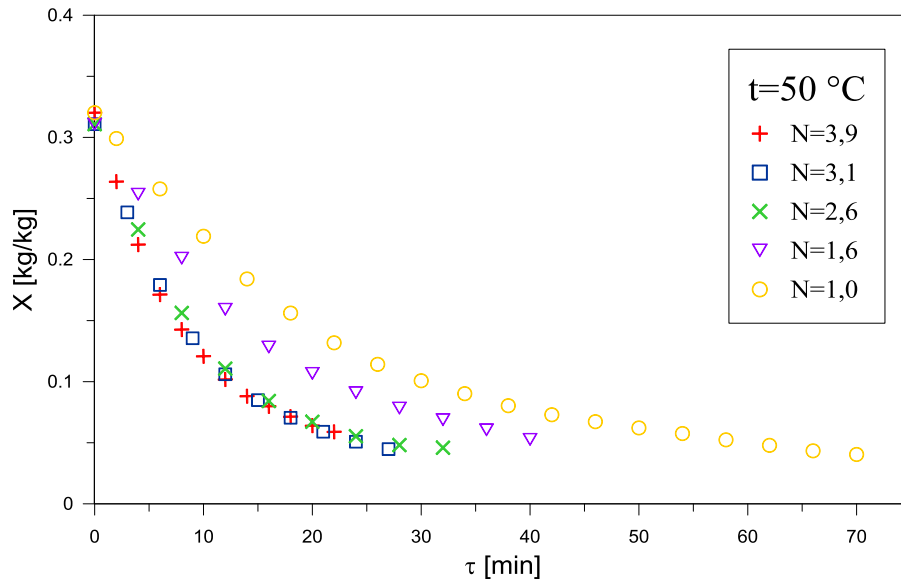
<i>Parametr</i>			<i>Wartość</i>
Początkowa zawartość wilgoci w materiale	X_m	kg/kg	0,30
Masa mokrego materiału	m_m	kg	0,215
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	%	45÷50
Temperatura powietrza otoczenia	t_0	°C	25

Tabela 7.2b Parametry doświadczenia

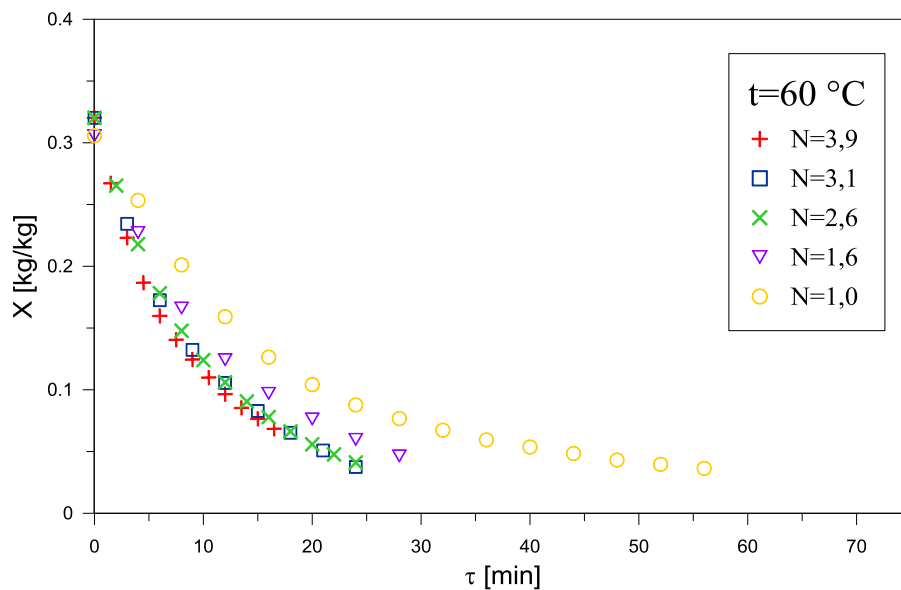
<i>Pomiar</i>	<i>Wysokość złoza</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Liczba fluidyzacji</i>
1			3,9
2			3,1
3	H=D	50 °C	2,6
4			1,6
5			1,0
6			3,9
7			3,1
8	H=D	60 °C	2,6
9			1,6
10			1,0
11			3,9
12			3,1
13	H=D	t_{\min}	2,6
14			1,6
15			1,0

W oparciu o wyniki zebrane w trakcie eksperymentu, przeprowadzono ocenę przebiegu procesu suszenia ziaren maku dla różnych wartości liczb fluidyzacji, przy różnych temperaturach powietrza suszącego. Na rysunku 7.2÷7.4 zaprezentowano krzywe suszenia maku dla badanych liczb fluidyzacji przy danych temperaturach powietrza.

Krzywe suszenia wykonano w tradycyjny sposób. Pobierane próbki w odpowiednich odstępach czasu suszono do stałej masy w suszarce komorowej oraz poprzez ciągły pomiar zawartości wilgotności w przepływającym powietrzu przy pomocy przyrządu TESTO 452.

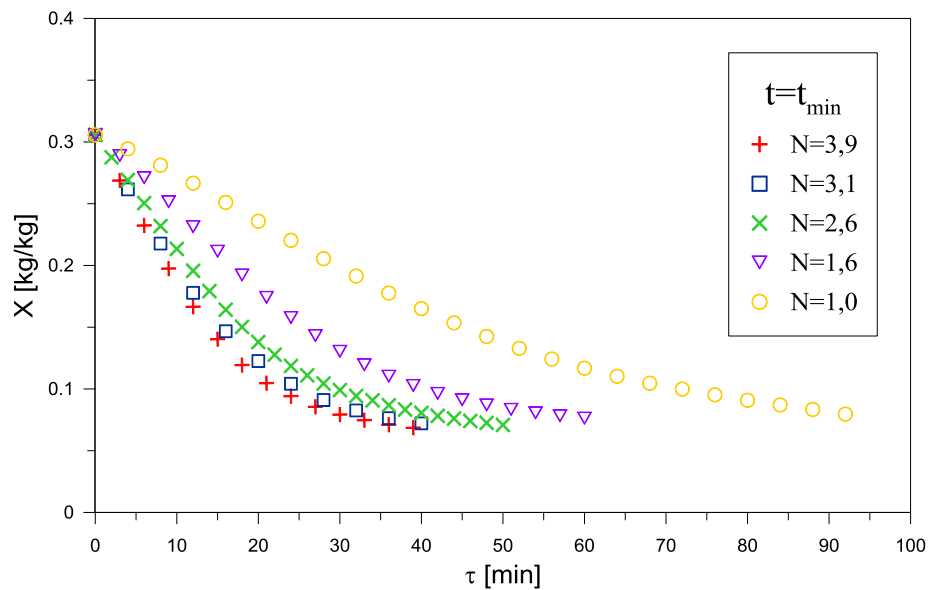


Rys. 7.2 Krzywe suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 50 °C



Rys. 7.3 Krzywe suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 60 °C

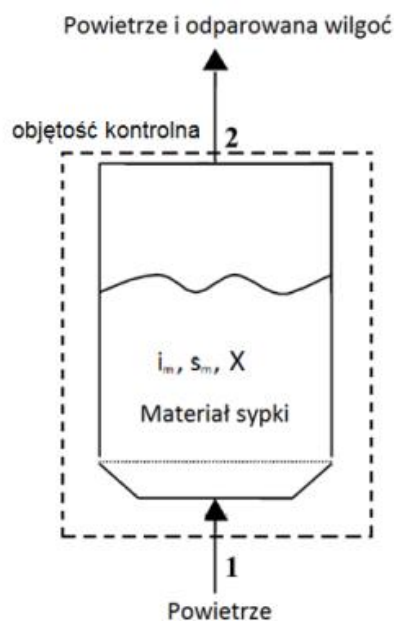
Dla wszystkich temperatur najdłużej proces prowadzony jest przy liczbie fluidyzacji $N=1,0$. Wraz ze wzrostem prędkości suszenia maleje czas wysuszenia do danej zawartości wilgotności. Dla liczb fluidyzacji 2,6÷3,9 podczas suszenia przy temperaturze 50 i 60 °C wpływ ten jest jednak niewielki.



Rys. 7.4 Krzywe suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{\min}

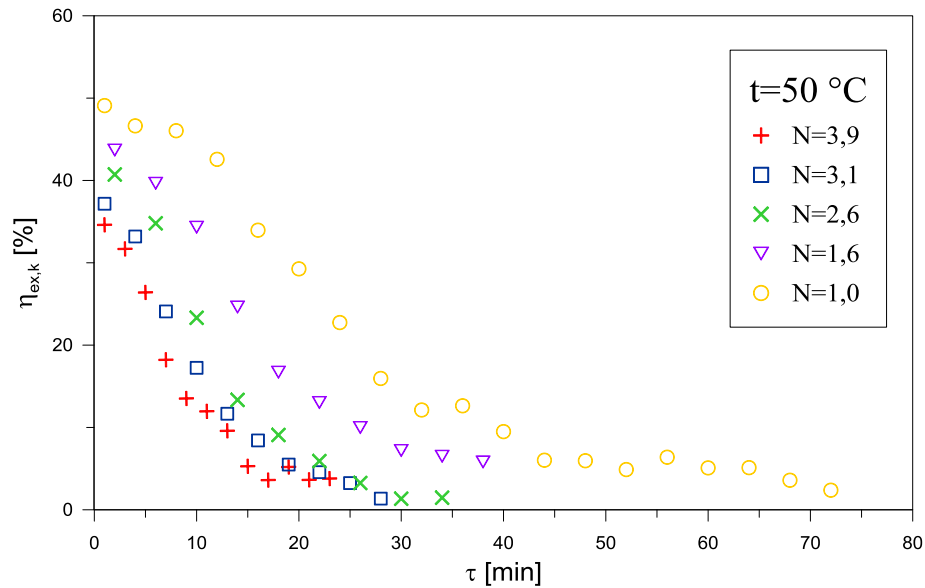
7.2.1. Wyniki badań dla komory suszenia

W procesie suszenia straty egzergii w analizowanej objętości kontrolnej (komora suszenia – rys. 7.5) wynikają głównie z nieodwracalnego przepływu ciepła w komorze suszenia oraz z dodatniej wartości egzergii czynnika odpływającego z komory suszenia do otoczenia. W związku z tym ważne jest maksymalne wykorzystanie egzergii termicznej powietrza przepływającego przez kolumnę suszarniczą.

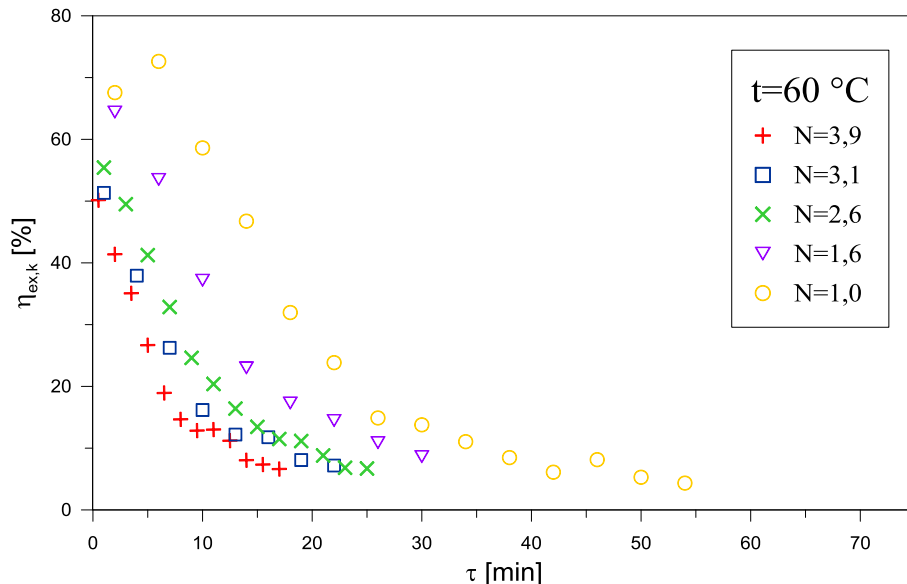


Rys. 7.5 Schemat komory suszenia

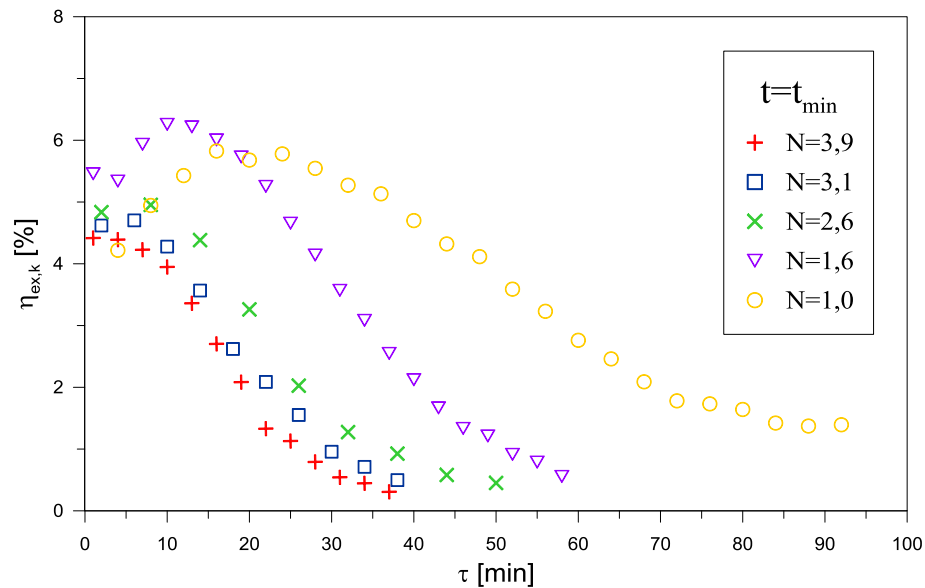
Istotnym wskaźnikiem do oceny egzergetycznej procesu suszenia jest sprawność egzegetyczna. Przy ograniczeniu się do samej kolumny suszarniczej wzór na sprawność egzergetyczną przyjmuje postać (3.35). Sprawność egzergetyczna określa stopień oddalenia procesu rzeczywistego od procesu idealnego przebiegającego odwracalnie. Na rysunkach 7.6÷7.8 przedstawiono zmiany wartości chwilowej sprawności egzergetycznej w trakcie trwania procesu suszenia.



Rys. 7.6 Chwilowa egzergetyczna sprawność kolumny w czasie trwania procesu dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 50 °C – komora suszenia

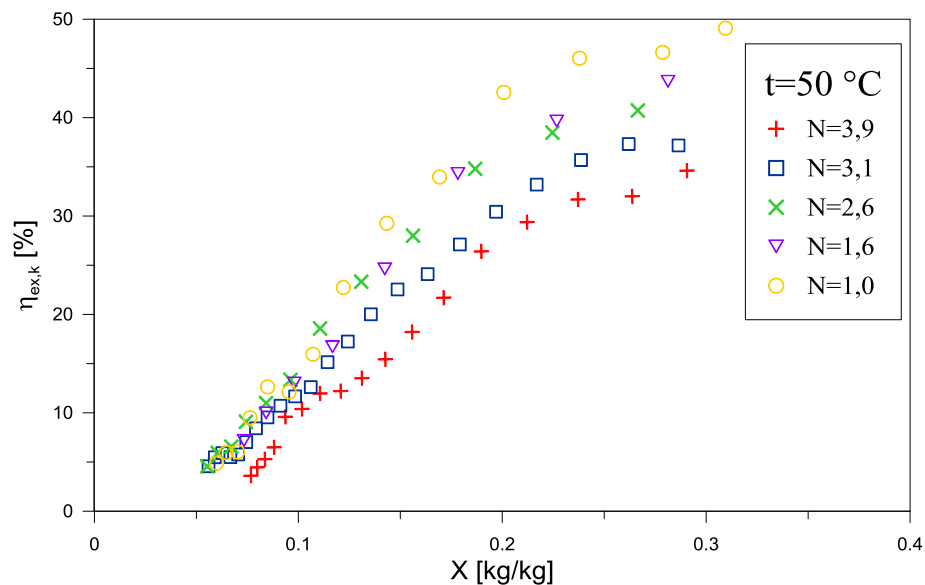


Rys. 7.7 Chwilowa egzergetyczna sprawność kolumny w czasie trwania procesu dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 60 °C – komora suszenia



Rys. 7.8 Chwilowa egzergetyczna sprawność kolumny w czasie trwania procesu dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia – komora suszenia

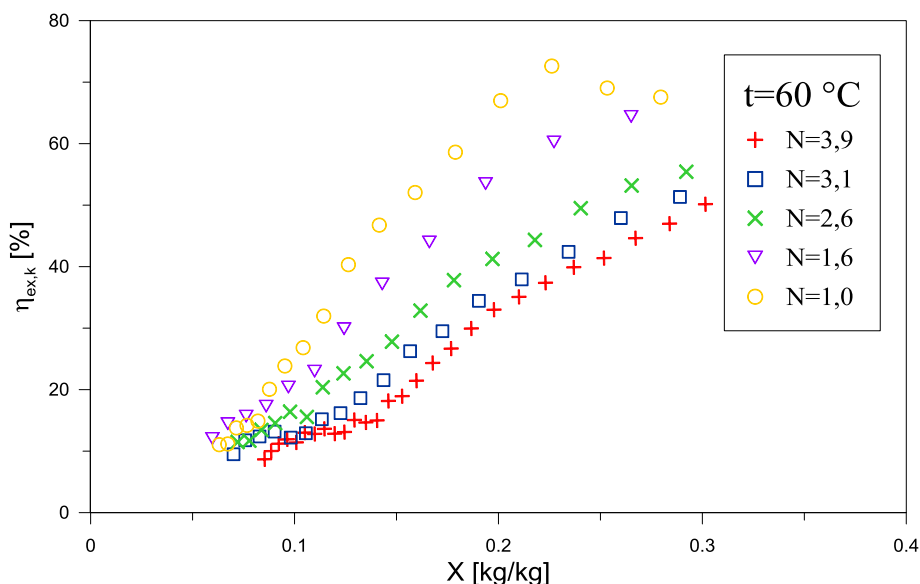
Sprawność egzergetyczna podczas suszenia w temperaturze 50 i 60 °C maleje z czasem trwania procesu, zaś przy suszeniu w temperaturze otoczenia najpierw osiąga maksimum po czym maleje.



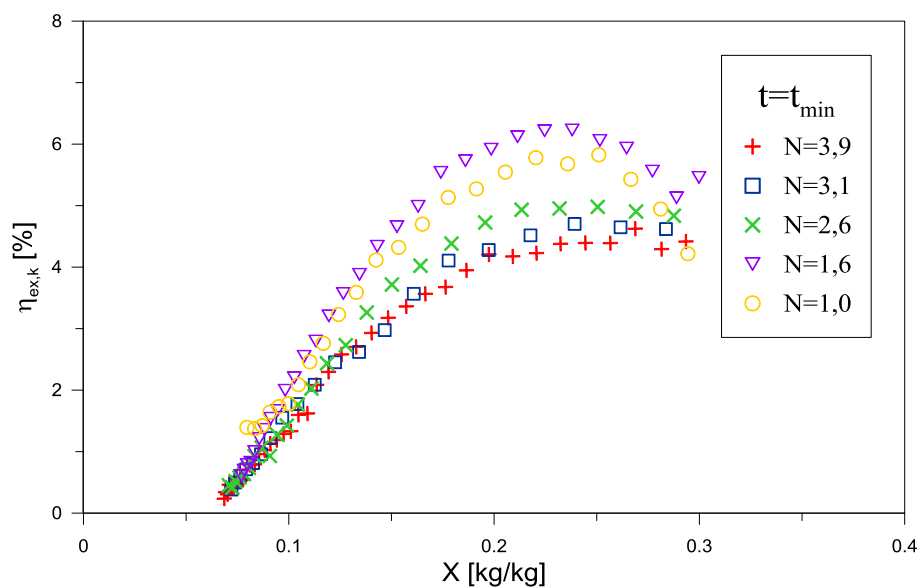
Rys. 7.9 Chwilowa egzergetyczna sprawność kolumny w zależności zmiany zawartości wilgoci w materiale suszonym dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 50 °C – komora suszenia

Na rysunkach 7.9÷7.11 przedstawiono chwilowe sprawności egzergetyczne w zależności od zawartości wilgotności w materiale. Natomiast na rysunkach 7.12÷7.14 przedstawione są wartości całkowite do danego momentu trwania procesu. Dla wszystkich liczb fluidyzacji sprawność egzergetyczna przyjmuje tym wyższe wartości

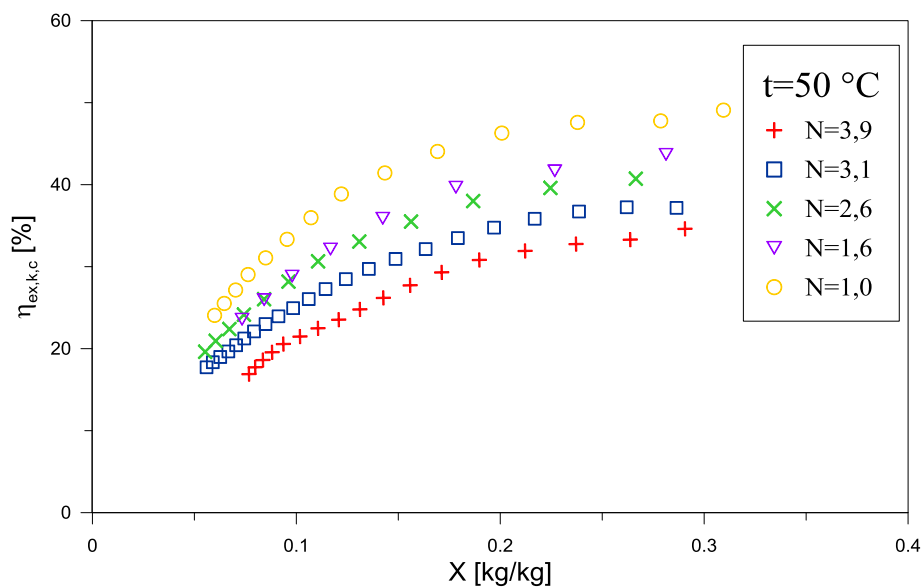
im niższa jest liczba fluidyzacji. Związane jest to z większym wykorzystaniem energii powietrza suszącego. Wyjątkiem jest proces suszenia w najniższej temperaturze dla którego maksymalne wartości sprawności nie osiągnięto dla liczby fluidyzacji $N=1,0$, a dla $N=1,6$. Związane to może być z tym, że dla liczby fluidyzacji $N=1,0$ znacznie wzrósł czas procesu suszenia.



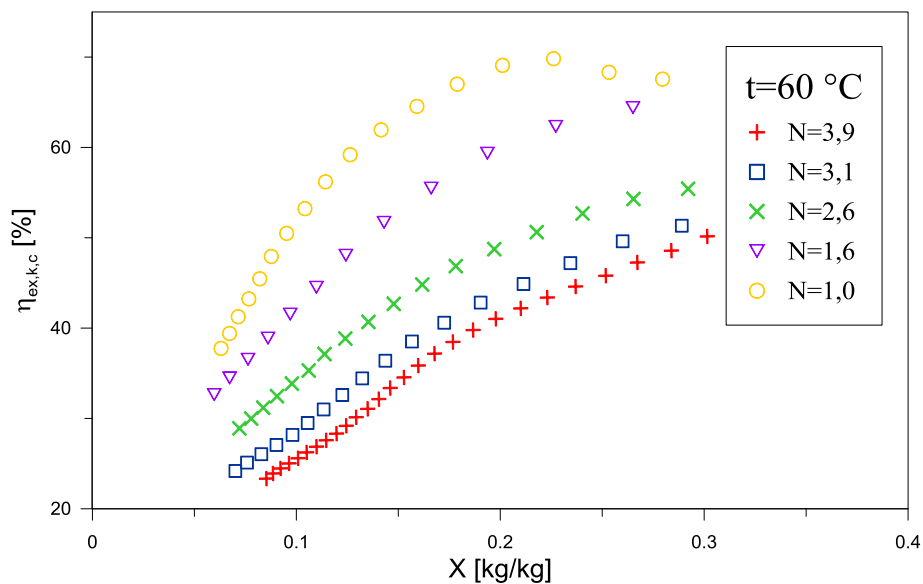
Rys. 7.10 Chwilowa egzergetyczna sprawność kolumny w zależności zmiany zawartości wilgoci w materiale suszonym dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 60 °C – komora suszenia



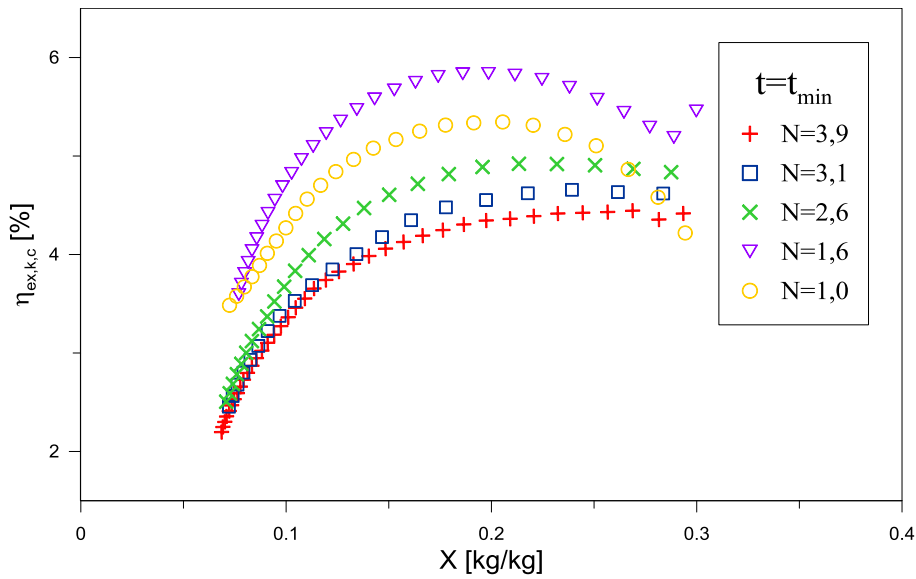
Rys. 7.11 Chwilowa egzergetyczna sprawność kolumny w zależności zmiany zawartości wilgoci w materiale suszonym dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia t_{\min} – komora suszenia



Rys. 7.12 Zależność egzergetycznej sprawności od zawartości wilgoci w suszonym materiale dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 50 °C – komora suszenia

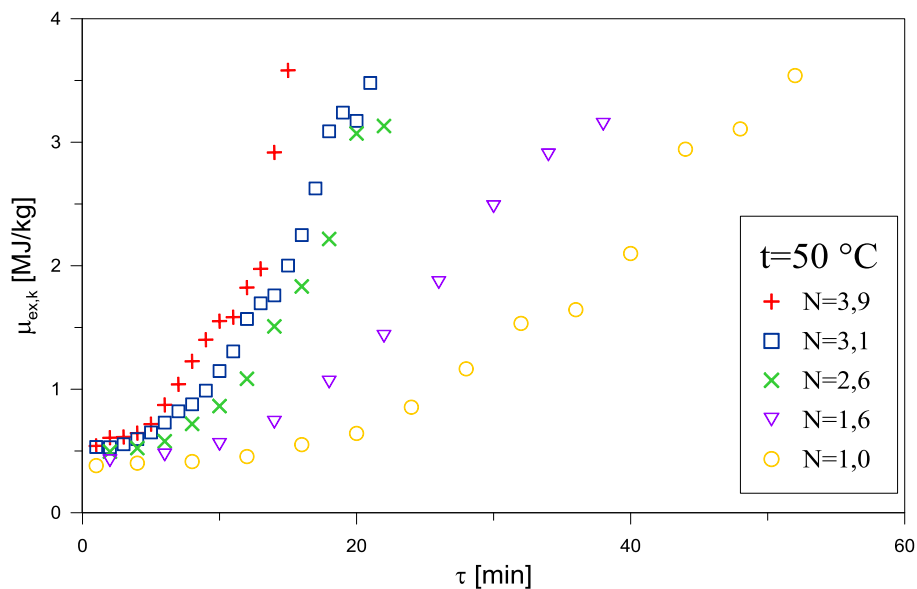


Rys. 7.13 Zależność egzergetycznej sprawności od zawartości wilgoci w suszonym materiale – komora suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 60 °C

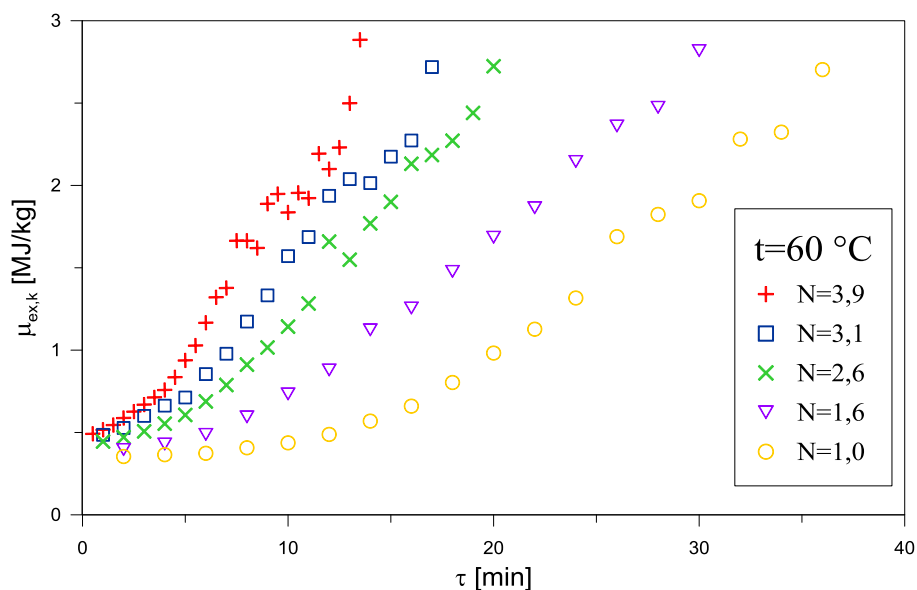


Rys. 7.14 Zależność egzergetycznej sprawności od zawartości wilgoci w suszonym materiale – komora suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia t_{\min}

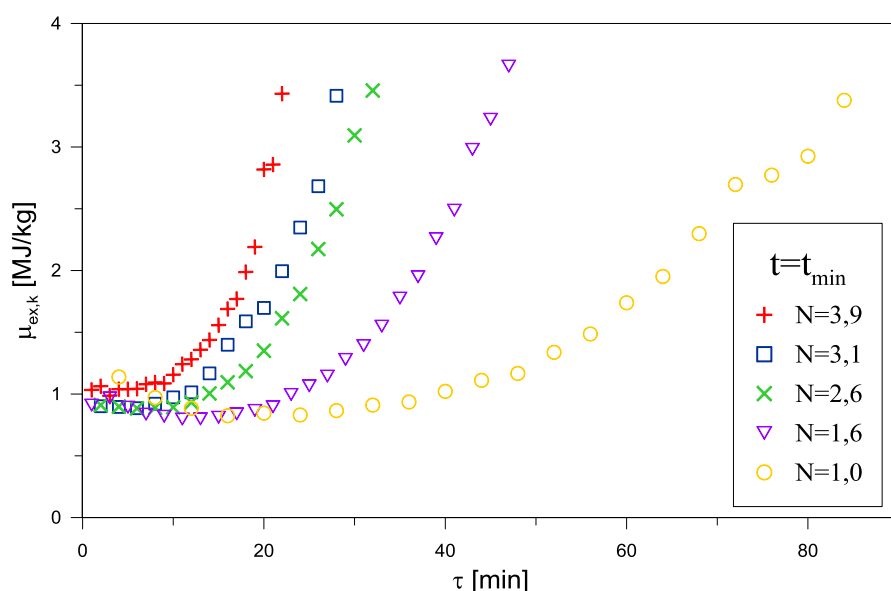
Wskaźnikiem służącym do oceny egzergetycznej może być także współczynnik jednostkowego zużycia egzergii dla kolumny. Wartość tę można określić z wyrażenia (3.36). Zależność tego współczynnika od czasu trwania procesu suszenia przedstawiono na rysunkach 7.15÷7.17. Jednostkowe zużycie egzergii rośnie z czasem trwania procesu. Przyrost ten jest tym intensywniejszy im wyższa jest prędkość przepływu powietrza suszącego.



Rys. 7.15 Wykres wartości chwilowych jednostkowego zużycia egzergii w trakcie trwania procesu suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 50 °C – komora suszenia

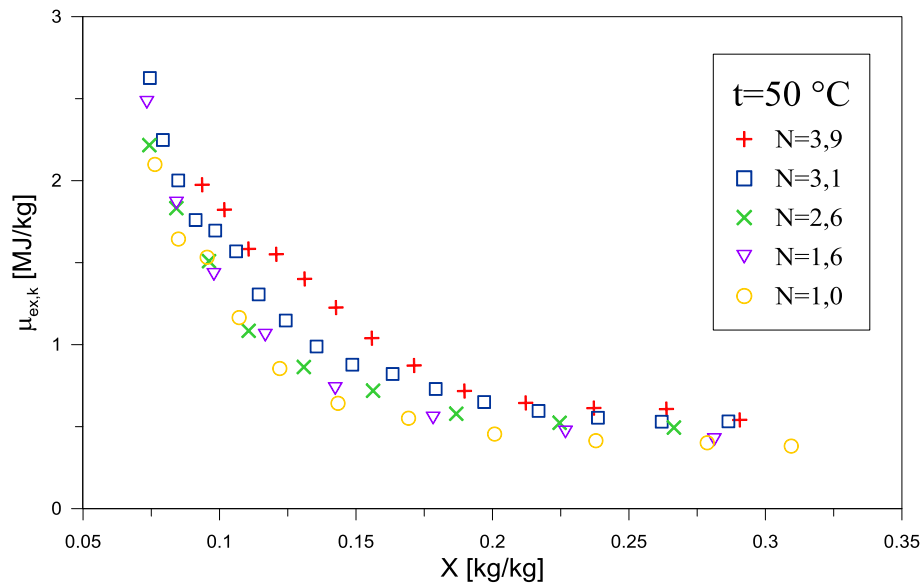


Rys. 7.16 Wykres wartości chwilowych jednostkowego zużycia energii w trakcie trwania procesu suszenia w temperaturze suszenia 60 °C – komora suszenia



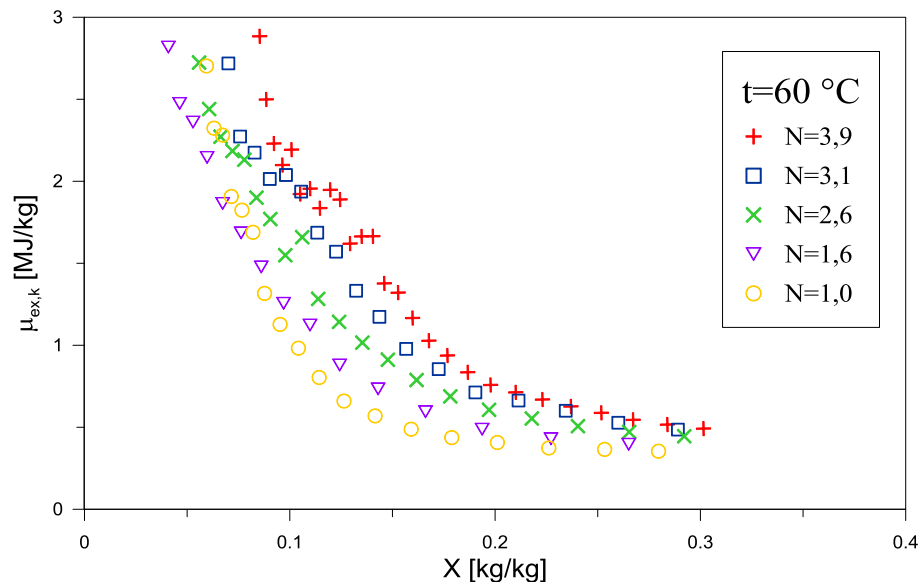
Rys. 7.17 Wykres wartości chwilowych jednostkowego zużycia energii w trakcie trwania procesu suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia – komora suszenia

Na rysunkach 7.19÷7.20 przedstawiono zależność współczynnika jednostkowego zużycia energii od zawartości wilgotności suszonego materiału. Zaś na rysunkach 7.21÷7.24 pokazano wartości całkowite tego współczynnika w zależności od zawartości wilgotności.

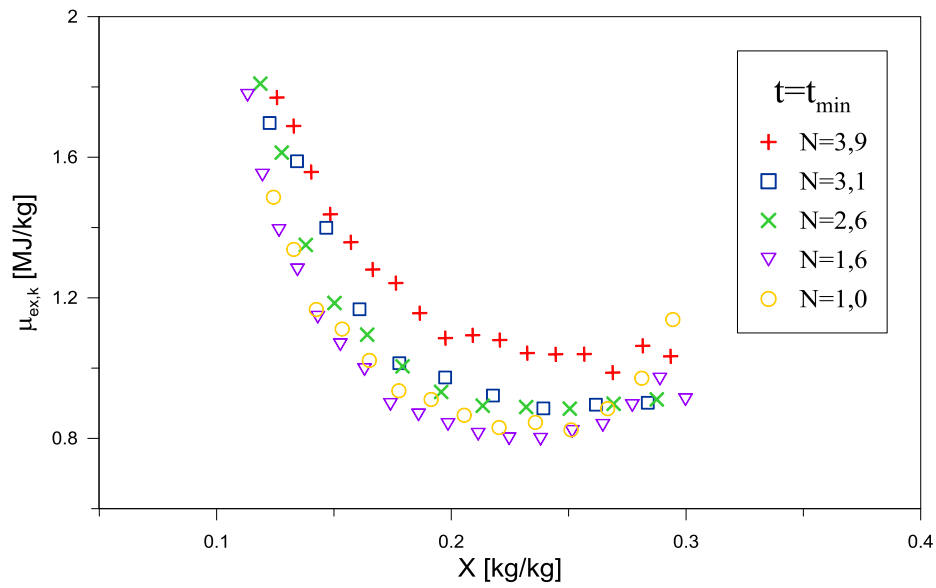


Rys. 7.18 Wykres wartości chwilowych jednostkowego zużycia energii przy zmianie zawartości wilgoci w materiale suszonym dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 50 °C – komora suszenia

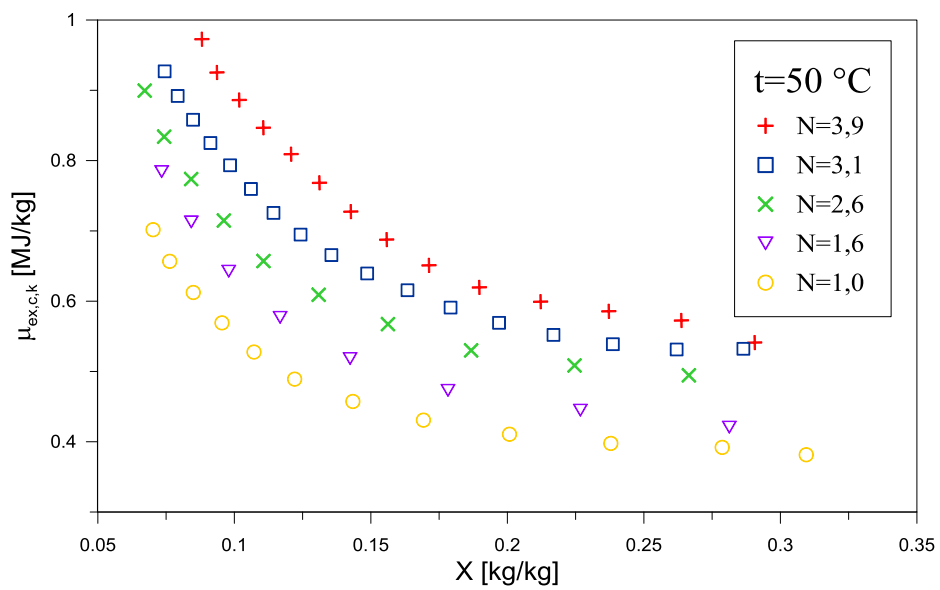
Największe zużycie energii osiągnięto dla liczby fluidyzacji równej 3,9. Zużycie energii maleje ze spadkiem liczby fluidyzacji, podobnie jak dla sprawności egzergetycznej wyjątkiem jest tutaj proces suszenia powietrzem w temperaturze minimalnej przy liczbie fluidyzacji $N=1,0$ dla którego zaobserwować można wyższe wartości zużycia energii niż dla liczby fluidyzacji $N=1,6$.



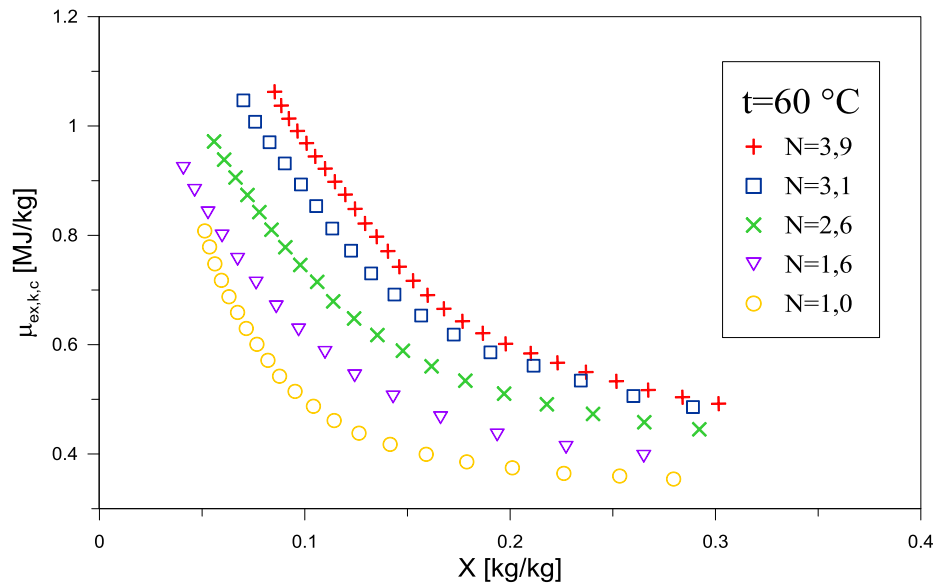
Rys. 7.19 Wykres wartości chwilowych jednostkowego zużycia energii przy zmianie zawartości wilgoci w materiale suszonym dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 60 °C – komora suszenia



Rys. 7.20 Wykres wartości chwilowych jednostkowego zużycia egzergii przy zmianie zawartości wilgoci w materiale suszonym dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia t_{min} – komora suszenia

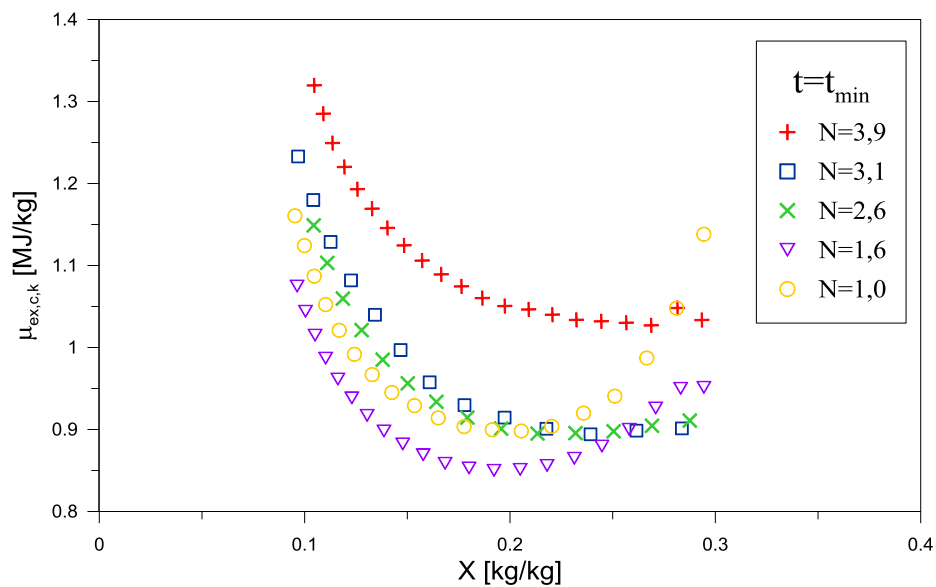


Rys. 7.21 Wykres całkowitego jednostkowego zużycia egzergii w funkcji zawartości wilgoci w materiale dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 50 °C – komora suszenia



Rys. 7.22 Wykres całkowitego jednostkowego zużycia energii w funkcji zawartości wilgoci w materiale dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze suszenia 60 °C – komora suszenia

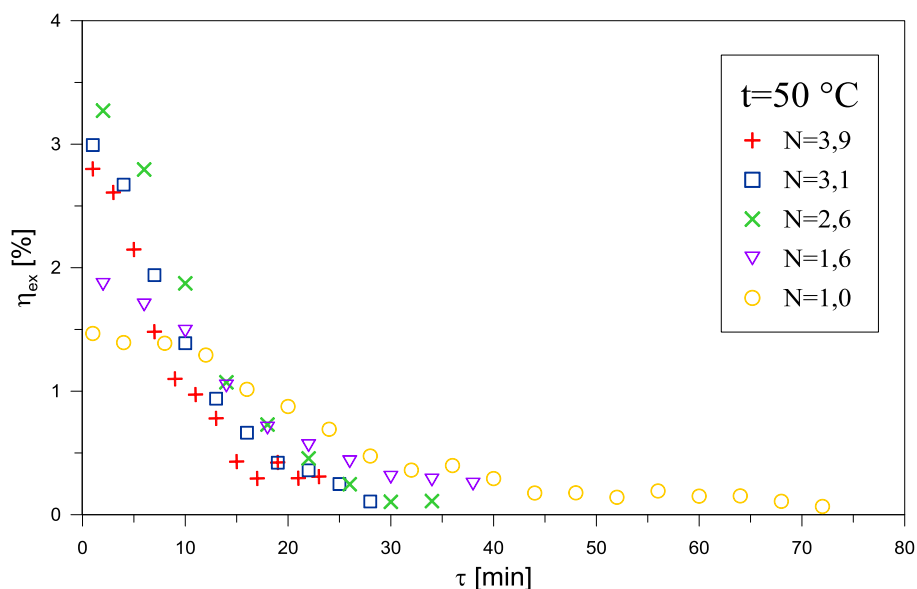
Należy podkreślić, że analiza wyników świadczy o poprawności zastosowanych zależności współczynnika jednostkowego zużycia energii i sprawności egzergetycznej oraz o możliwości wymienności stosowania tych wskaźników do oceny egzergetycznej procesu suszenia.



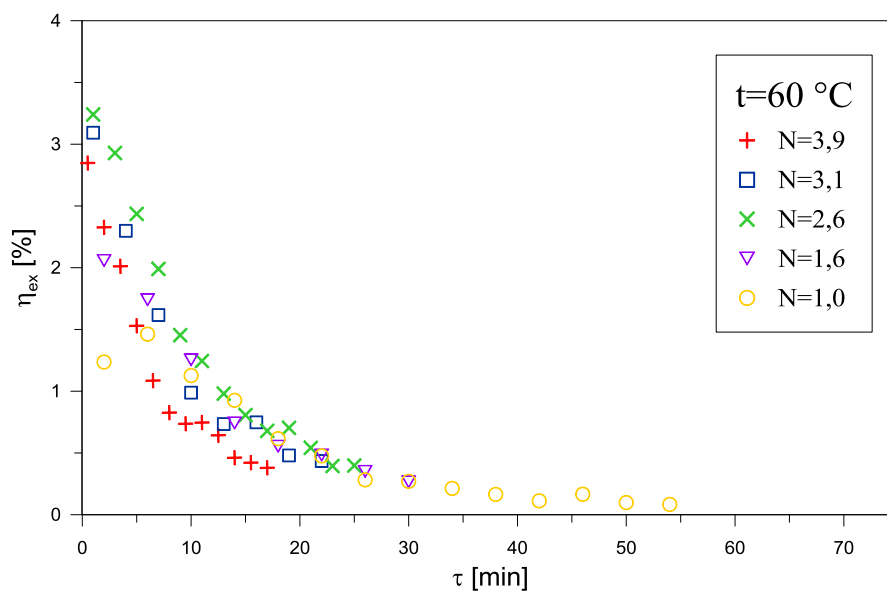
Rys. 7.23 Wykres całkowitego jednostkowego zużycia energii w funkcji zawartości wilgoci w materiale podczas suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{min} – komora suszenia

7.2.2. Wyniki badań dla węzła suszenia

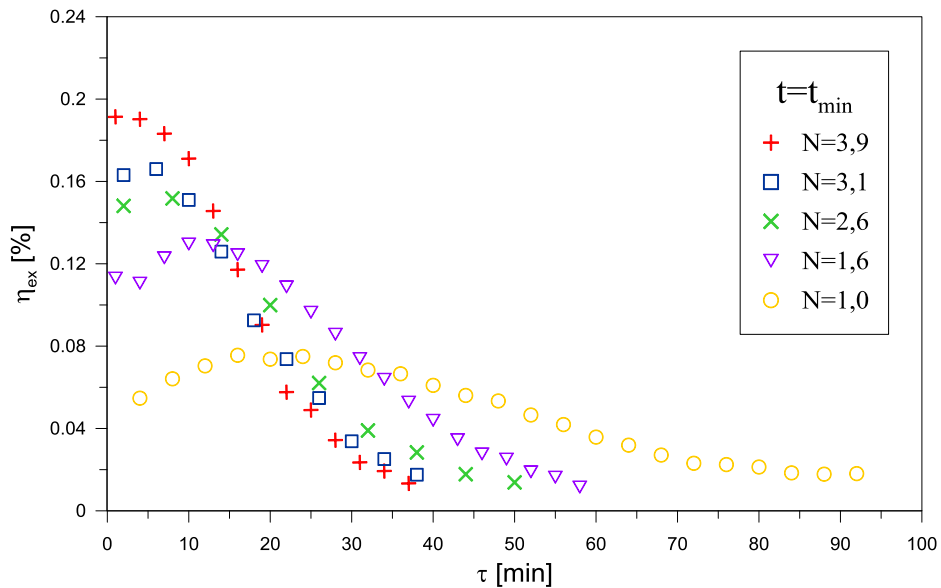
W podrozdziale 7.2.1 skupiono się na analizie egzergetycznej wyłącznie kolumny suszarniczej. Interesującym zagadnieniem techniczno-ekonomicznym jest przeprowadzenie rozważań egzergetycznych dotyczących kompletnego węzła suszenia.



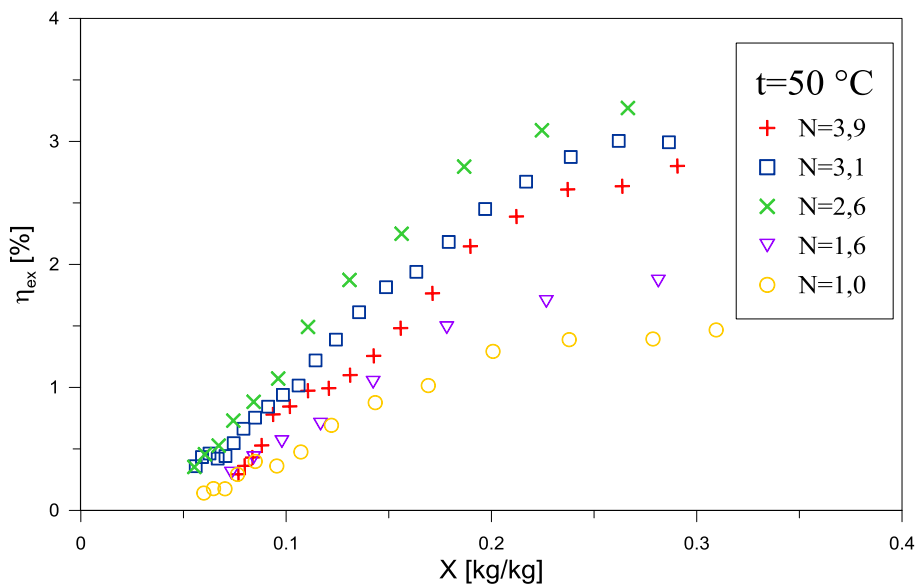
Rys. 7.24 Chwilowa sprawność egzergetyczna od czasu trwania procesu dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – węzeł suszenia



Rys. 7.25 Chwilowa sprawność egzergetyczna od czasu trwania procesu dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – węzeł suszenia



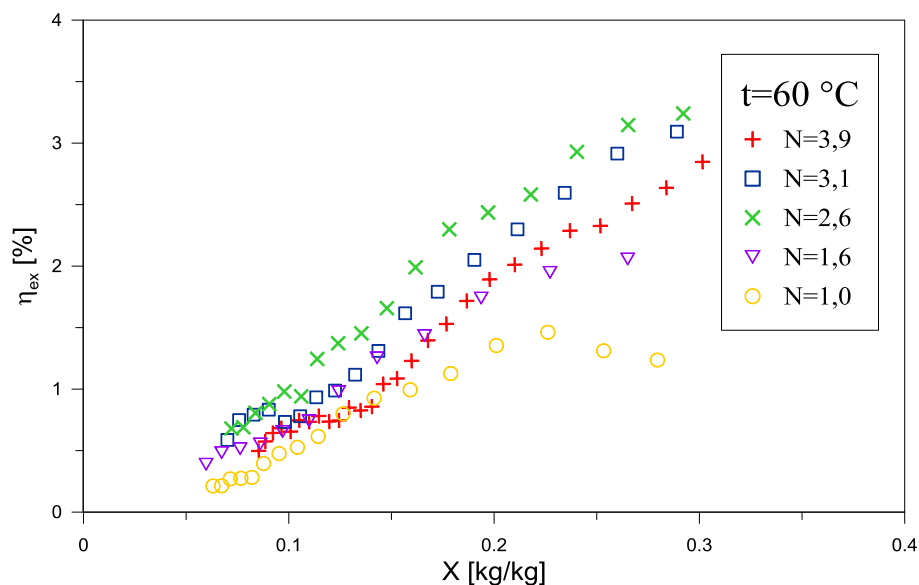
Rys. 7.26 Chwilowa sprawność egzergetyczna od czasu trwania procesu dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{\min} – węzeł suszenia



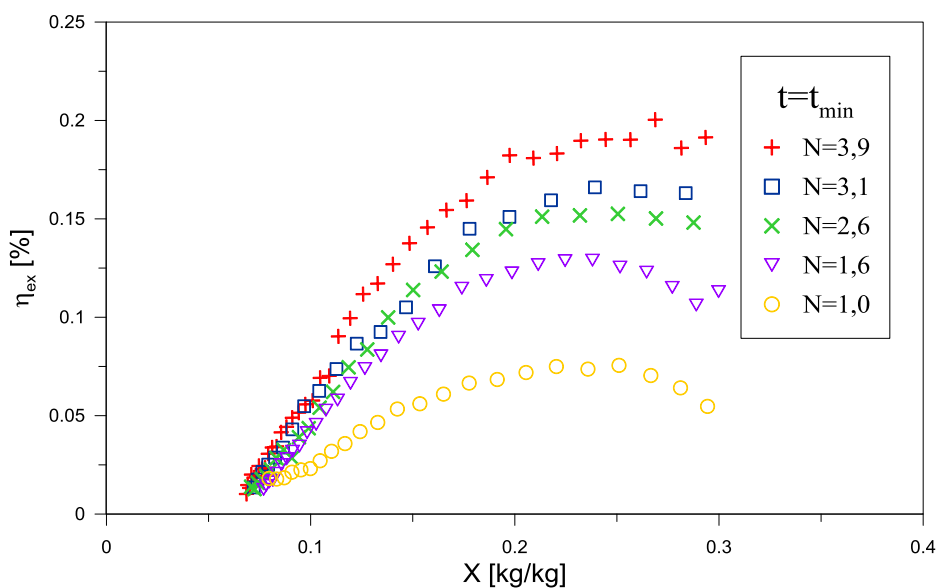
Rys. 7.27 Chwilowa sprawność egzergetyczna węzła suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – węzeł suszenia

Wzór na sprawność egzergetyczną dla całego węzła suszenia, uwzględniającego egzergie napędową wentylatora i nagrzewnicy powietrza przyjmuje postać (3.37), które w pozycji nakładów uwzględnia egzergie zużyte przez wentylator oraz egzergie dostarczona w nagrzewnicy elektrycznej. Na rysunkach 7.24÷7.29 przedstawiono wartości chwilowe sprawności egzergetycznej dla każdej z przyjętych do analizy liczb fluidyzacji. Dla procesu suszenia w temperaturze powietrza $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, sprawność egzergetyczna maleje z czasem trwania procesu i zawartością wilgoci w materiale suszonym. Natomiast dla procesu suszenia przy minimalnej temperaturze powietrza

wartości sprawności najpierw osiągają swoje maksimum po czym maleją z czasem trwania procesu czy zawartością wilgoci w materiale.

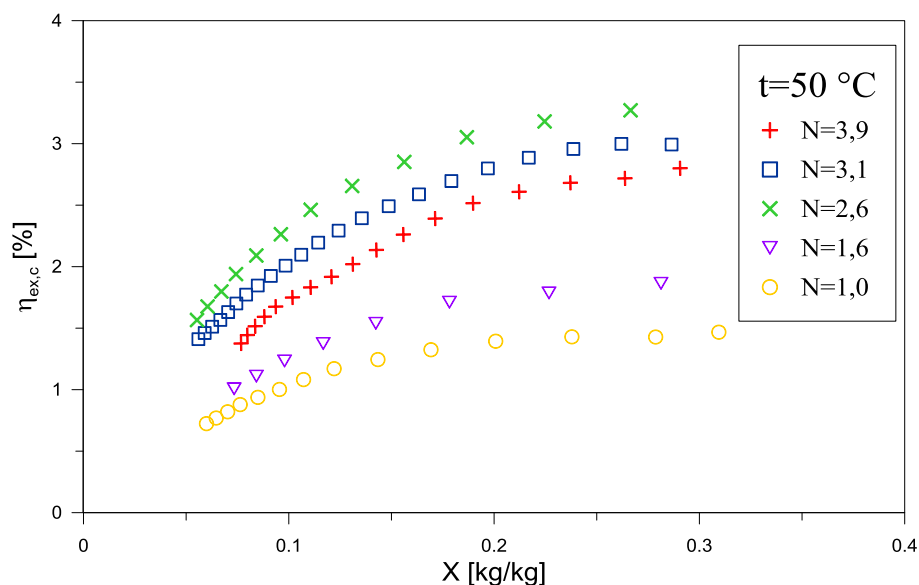


Rys. 7.28 Chwilowa sprawność egzergetyczna węzła suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 60 °C – węzeł suszenia

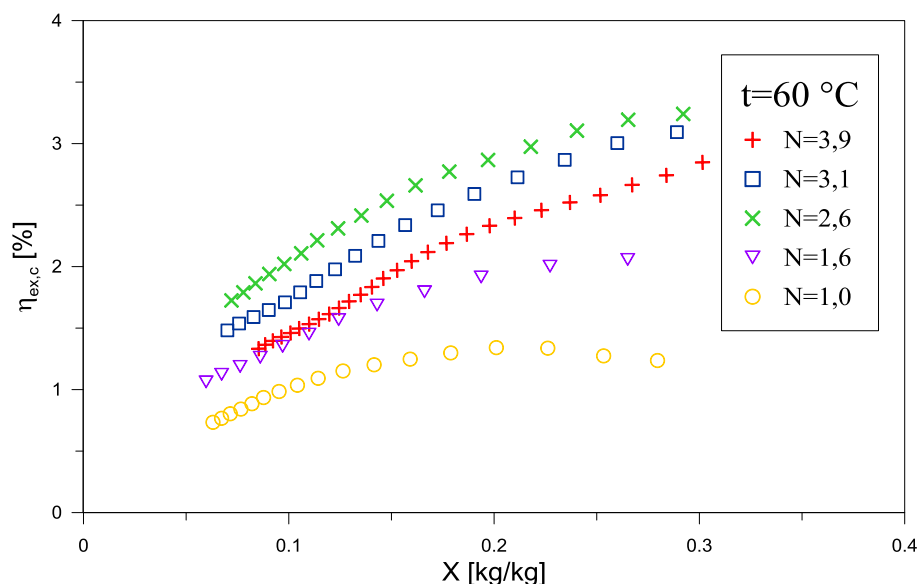


Rys. 7.29 Chwilowa sprawność egzergetyczna węzła suszenia dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{\min} – węzeł suszenia

Na rysunkach 7.30÷7.32 przedstawiono wpływ wartości sprawności egzergetycznej suszenia materiału w zależności od początkowej zawartości wilgoci do uzyskania danej wartości zawartości wilgoci.



Rys. 7.30 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 50 °C – węzeł suszenia

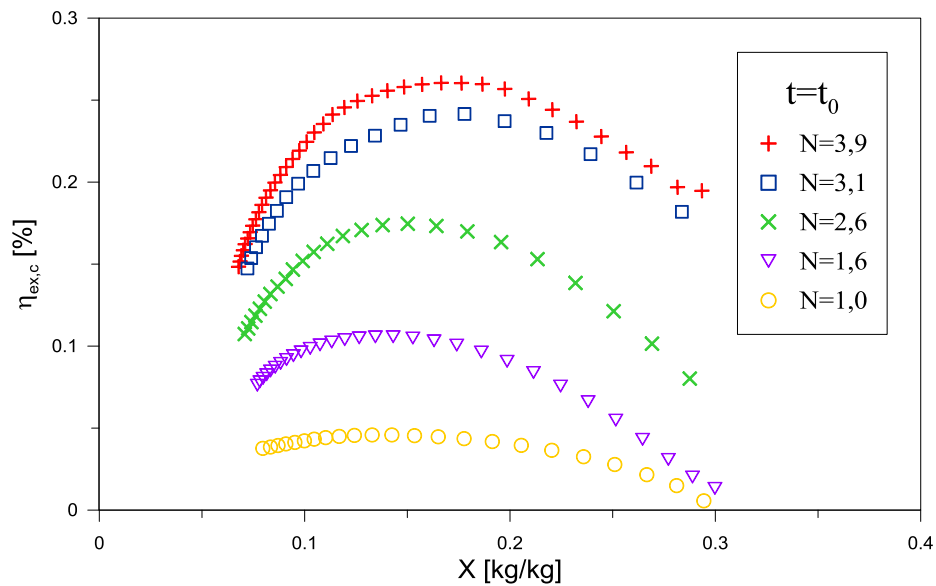


Rys. 7.31 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 60 °C – węzeł suszenia

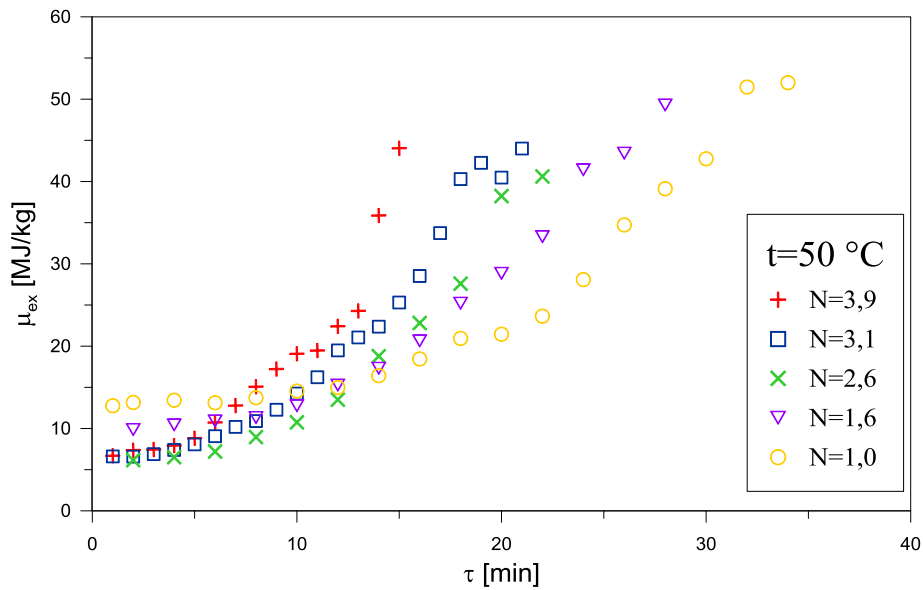
Na rysunkach 7.27÷7.28 oraz 7.30÷7.31 dotyczących suszenia powietrzem w temperaturze 50 i 60 °C obserwuje się wzrost wartości sprawności egzergetycznej wraz ze wzrostem liczby fluidyzacji, aż do osiągnięcia maksymalnych wartości dla liczby fluidyzacji 2,6. Po czym dla liczb fluidyzacji 3,1 i 3,9 obserwować można pogłębiający się spadek analizowanej wartości.

Natomiast na rysunkach 7.29 i 7.32 dotyczących suszenia z minimalną temperaturą powietrza nie odnotowano spadku sprawności dla najwyższych liczb

fluidyzacji może to mieć związek z szybkością dostarczanej wilgoci na zewnątrz cząstek, a także możliwościami usuwania wilgoci przez dostarczone powietrze.

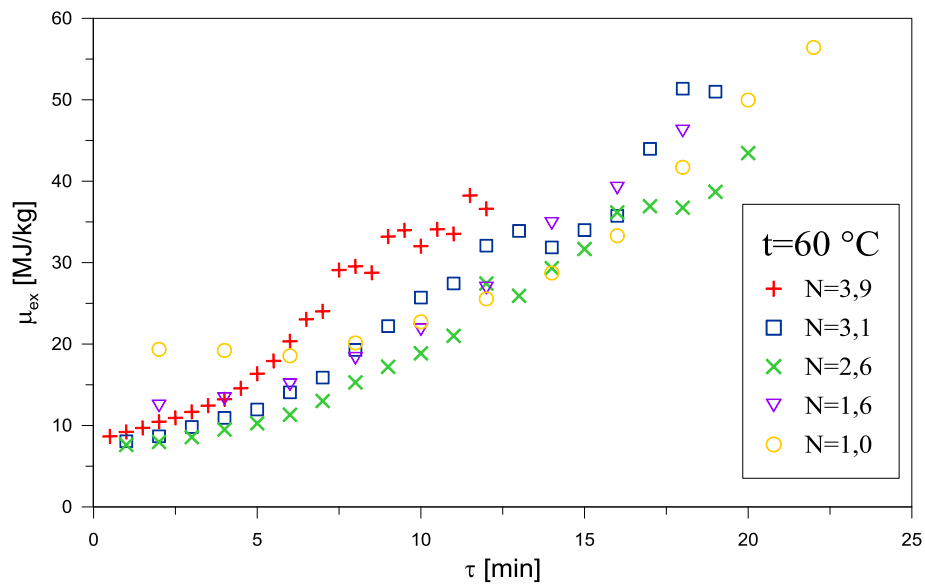


Rys. 7.32 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{\min} – węzeł suszenia

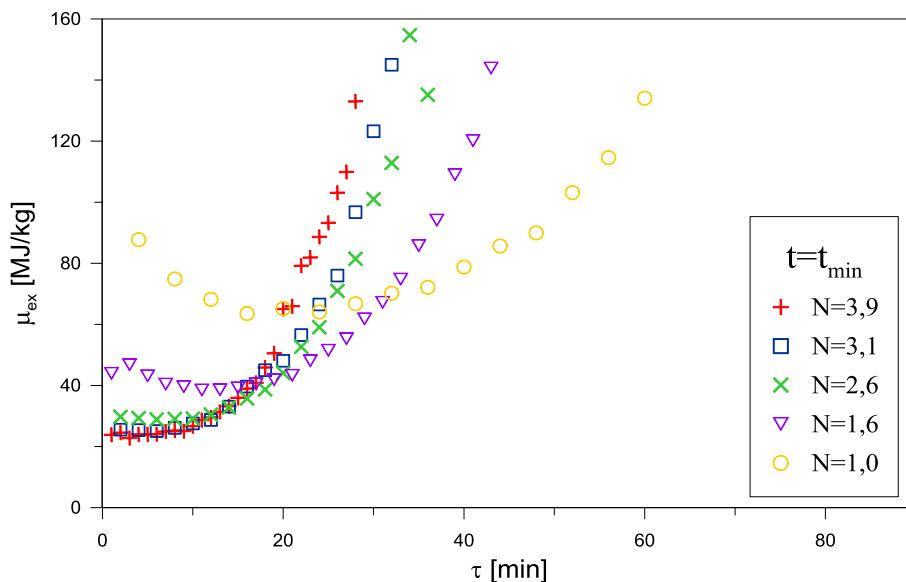


Rys. 7.33 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – węzeł suszenia

Stosowany wzór na współczynnik jednostkowego zużycia energii po uwzględnieniu nakładów energii na wentylator i nagrzewnicę przyjmuje postać (3.38). Zależność tego współczynnika w zależności od czasu trwania procesu pokazano na rysunkach 7.33÷7.35, a od zawartości wilgoci suszonego materiału przedstawiono na rysunkach 7.36÷7.38.

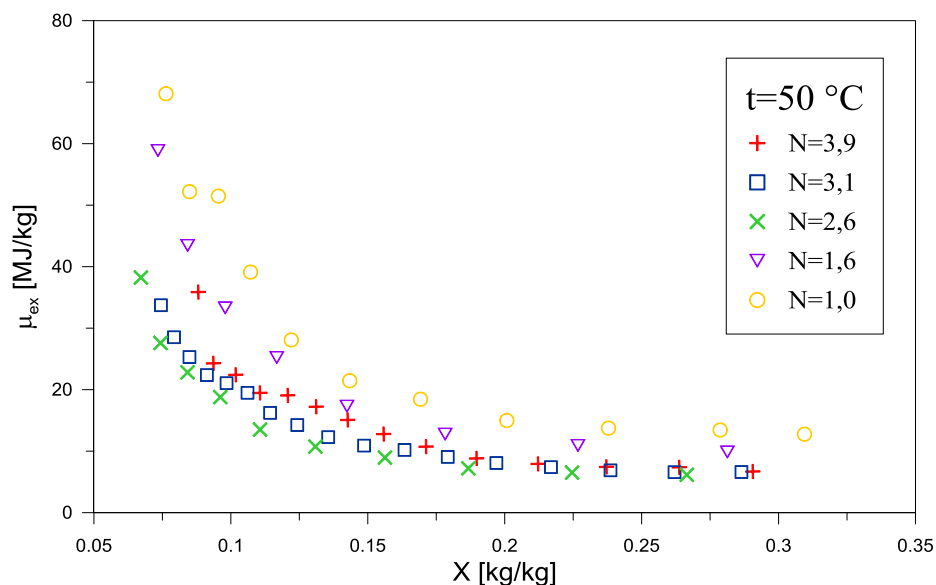


Rys. 7.34 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 60 °C – węzeł suszenia

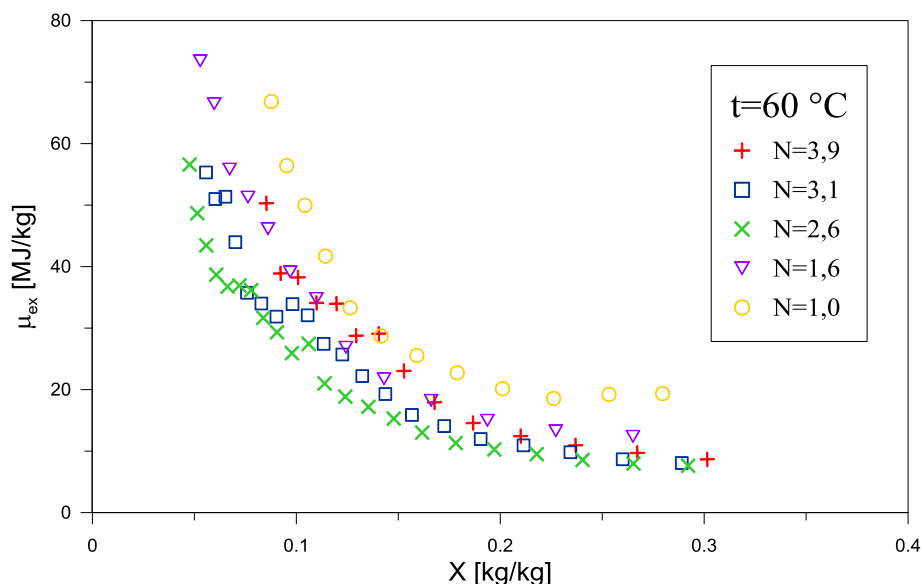


Rys. 7.35 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{\min} – węzeł suszenia

Zużycie energii niezbędne do odparowania 1 kg wody rośnie z czasem trwania procesu jak również ze spadkiem zawartości wilgotności w materiale suszonym, jedynie dla liczb fluidyzacji 1,0 oraz 1,6 dla procesów suszenia przy minimalnej temperaturze odnotować można, poprzedzający ten wzrost, spadek wartości jednostkowego zużycia energii.



Rys. 7.36 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 50 °C – węzeł suszenia

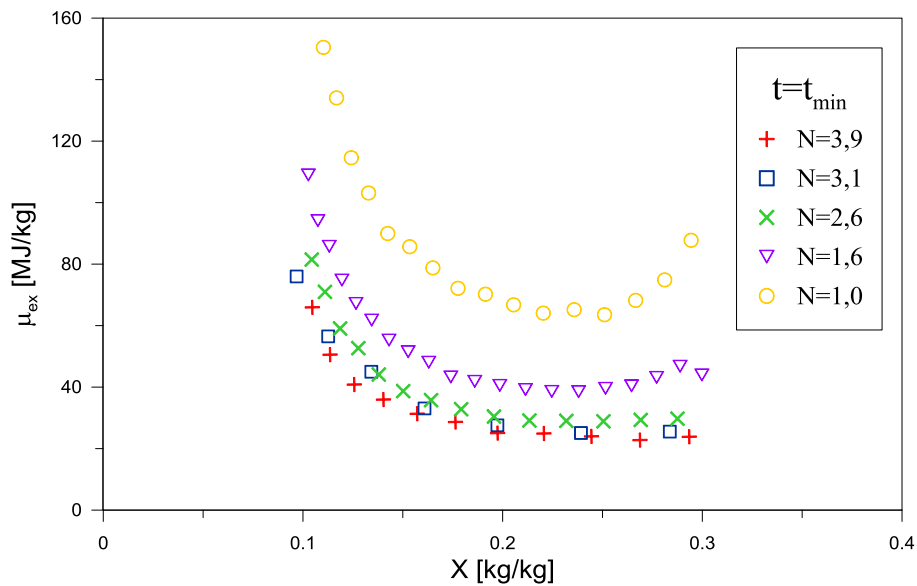


Rys. 7.37 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 60 °C – węzeł suszenia

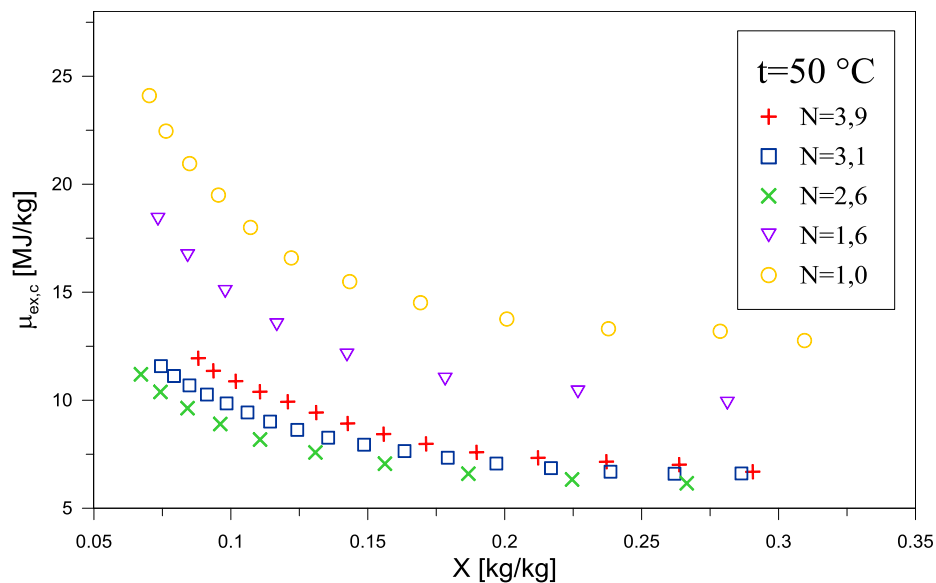
Na rysunkach 7.39÷7.41 przedstawiono ile energii jest potrzebne do odparowanie 1 kg wody z danego materiału aby wysuszyć go do danej zawartości wilgoci.

Na rysunkach 7.36÷7.37 oraz 7.39÷7.40 dotyczących suszenia powietrzem w temperaturze 50 i 60 °C obserwuje się spadek jednostkowego zużycia energii wraz ze wzrostem liczby fluidyzacji, aż do osiągnięcia minimalnych wartości dla liczby

fluidyzacji 2,6. Po czym dla liczb fluidyzacji 3,1 i 3,9 zaobserwować można wzrost zużycia energii do odparowania 1 kg wody z materiału suszonego.

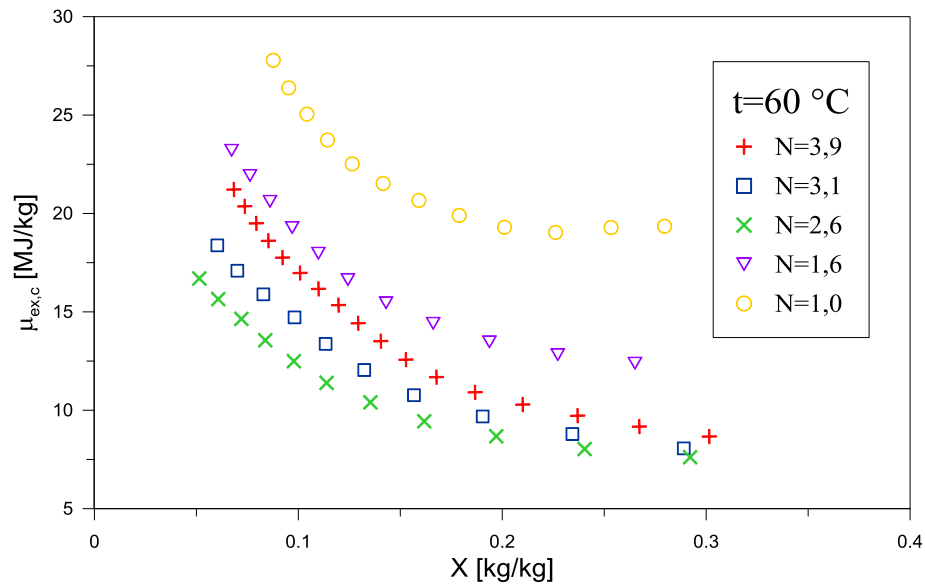


Rys. 7.38 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{\min} – węzeł suszenia

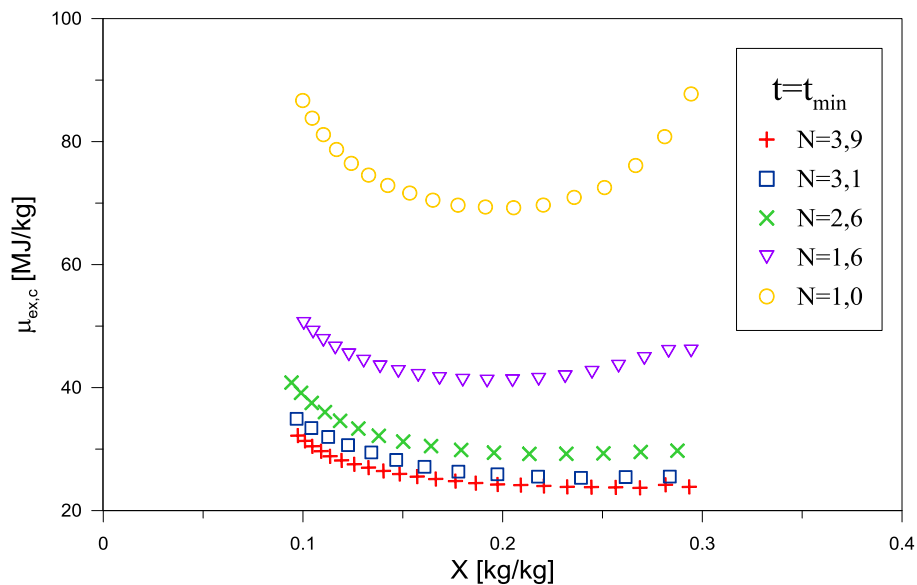


Rys. 7.39 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 50 °C – węzeł suszenia

Natomiast na rysunkach 7.38 i 7.41 dotyczących suszenia z minimalną temperaturą powietrza, analogicznie jak dla wartości sprawności, nie odnotowujemy wzrostu jednostkowego zużycia energii dla najwyższych wartości liczb fluidyzacji.



Rys. 7.40 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze 60 °C – węzeł suszenia



Rys. 7.41 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych liczb fluidyzacji w temperaturze t_{min} – węzeł suszenia

7.3. Wpływ temperatury powietrza suszącego

Doświadczenie przeprowadzono dla trzech wybranych liczb fluidyzacji (1,0, 2,6 oraz 3,9) przy różnych temperaturach powietrza suszącego 50 i 60 °C oraz w temperaturze minimalnej t_{min} . Zbadano wpływ tych parametrów na kinetykę procesu suszenia oraz na wydajność egzergetyczną. Zastosowano wysokość statyczną złoża równą średnicy kolumny fluidyzacyjnej. Proces był prowadzony pod ciśnieniem

atmosferycznym. W tabeli 7.3a i 7.3b zebrane zostały parametry przy których realizowany był pomiar.

Tabela 7.3a Parametry doświadczenia

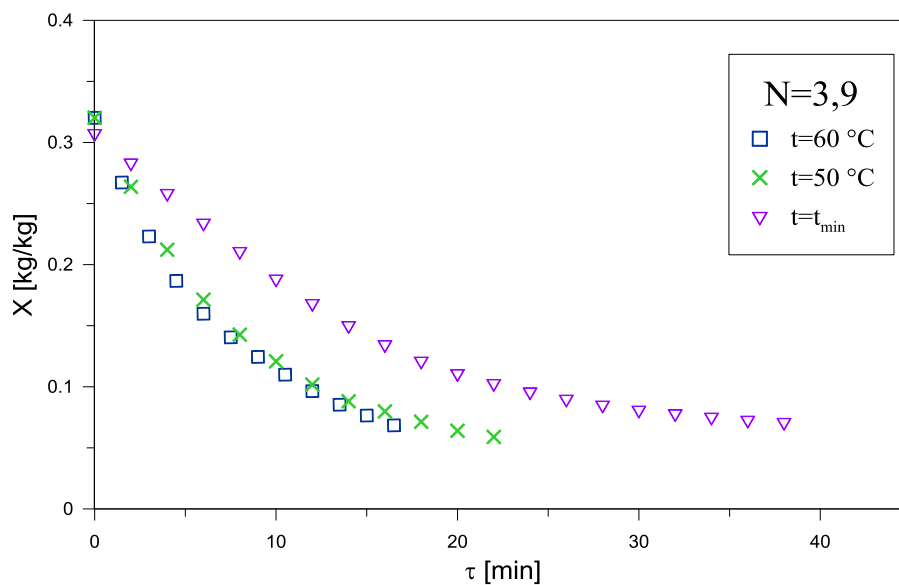
<i>Parametr</i>	<i>Wartość</i>		
Początkowa zawartość wilgoci w materiale	X_m	kg/kg	0,30
Masa mokrego materiału	m_m	kg	0,215
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	%	45÷50
Temperatura powietrza otoczenia	t_0	°C	25

Tabela 7.3b Parametry doświadczenia

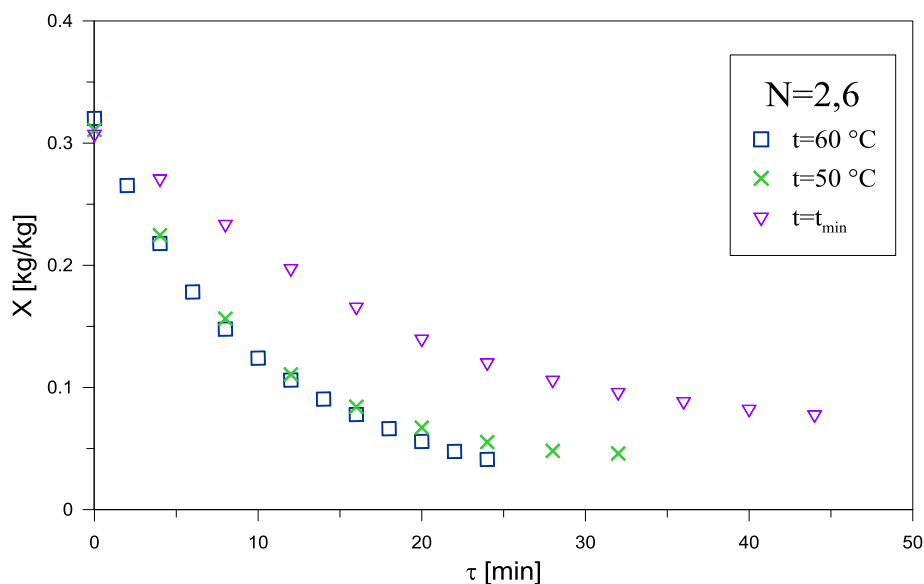
<i>Pomiar</i>	<i>Wysokość złoza</i>	<i>Liczba fluidyzacji</i>	<i>Temperatura</i>
1			50 °C
2	H=D	3,9	60 °C
3			t_{min}
4			50 °C
5	H=D	2,6	60 °C
6			t_{min}
7			50 °C
8	H=D	1,0	60 °C
9			t_{min}

Na rysunkach 7.42÷7.44 przedstawiono krzywe suszenia odpowiednio dla wybranych liczb suszenia. Dla suszenia w temperaturze minimalnej można zaobserwować znaczne oddalenie punktów krzywej suszenia od krzywych wyznaczonych dla pozostałych dwóch temperatur co wiąże się ze znaczącym wydłużeniem czasu suszenia materiału.

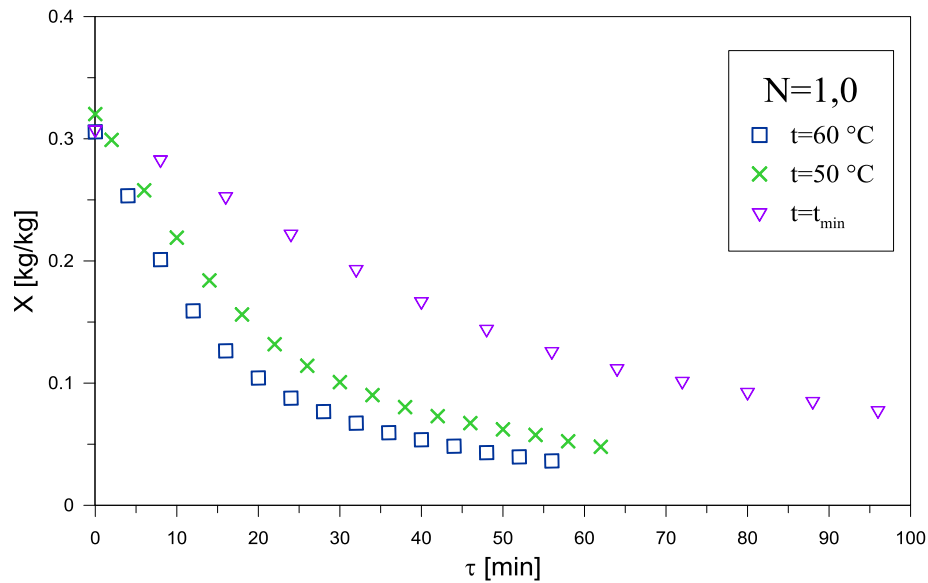
Ponadto zauważyć można że punkty odpowiadające krzywom suszenia przy suszeniu w temperaturze 50 i 60 °C dla wyższych liczb fluidyzacji praktycznie się nakładają, czyli czas suszenia przy tych temperaturach jest praktycznie ten sam co ma wpływ na czas pracy wentylatora. Jedynie przy najniższej liczbie fluidyzacji zauważyć można wpływ suszenia powietrzem o wyższej temperaturze na czas suszenia – krzywe nieznacznie się od siebie oddalają.



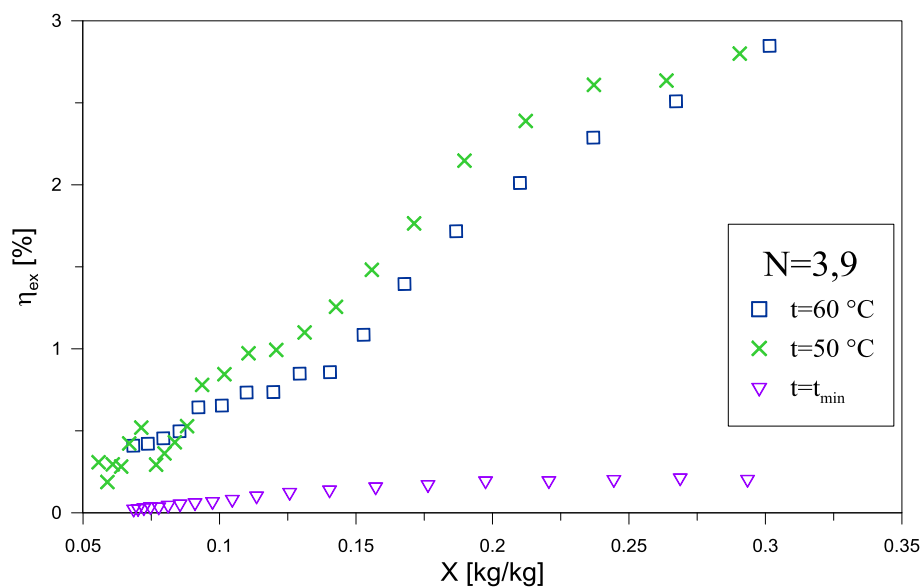
Rys. 7.42 Krzywe suszenia maku dla różnych temperatur powietrza suszącego dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=3,9$ – węzeł suszenia



Rys. 7.43 Krzywe suszenia maku dla różnych temperatur powietrza suszącego dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=2,6$ – węzeł suszenia



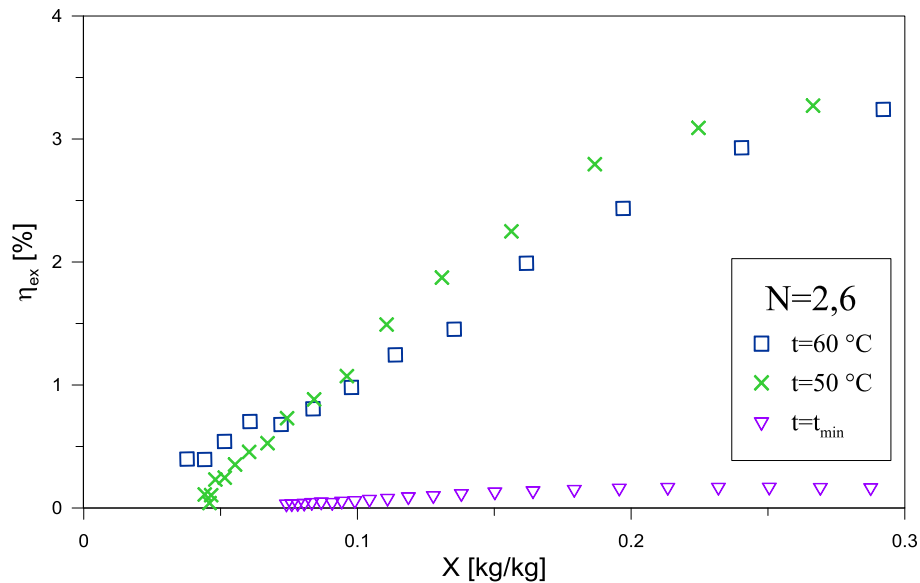
Rys. 7.44 Krzywe suszenia maku dla różnych temperatur powietrza suszącego dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=1,0$ – węzeł suszenia



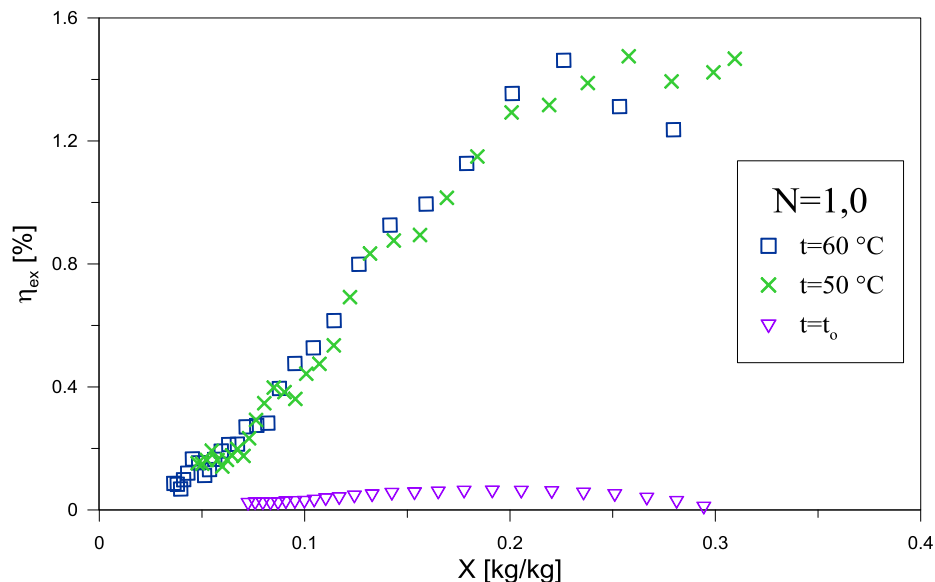
Rys. 7.45 Chwilowa sprawność egzergetyczna dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=3,9$ – węzeł suszenia

Na rysunkach 7.45÷7.50 przedstawiono wpływ temperatury suszenia na wartości sprawności egzergetycznej dla wybranych liczb fluidyzacji. Dla wszystkich tych wykresów, niezależnie od liczby fluidyzacji przy której realizowany jest proces, sprawność egzergetyczna osiąga znacząco niższe wartości dla procesu suszenia z temperaturą minimalną. Pomimo braku zużycia energii przez nagrzewnicę znacząco wydłuża się czas trwania procesu, który ma duży wpływ na zużycie energii przez wentylator. Dużo wyższe wartości sprawności egzergetycznej można zanotować dla

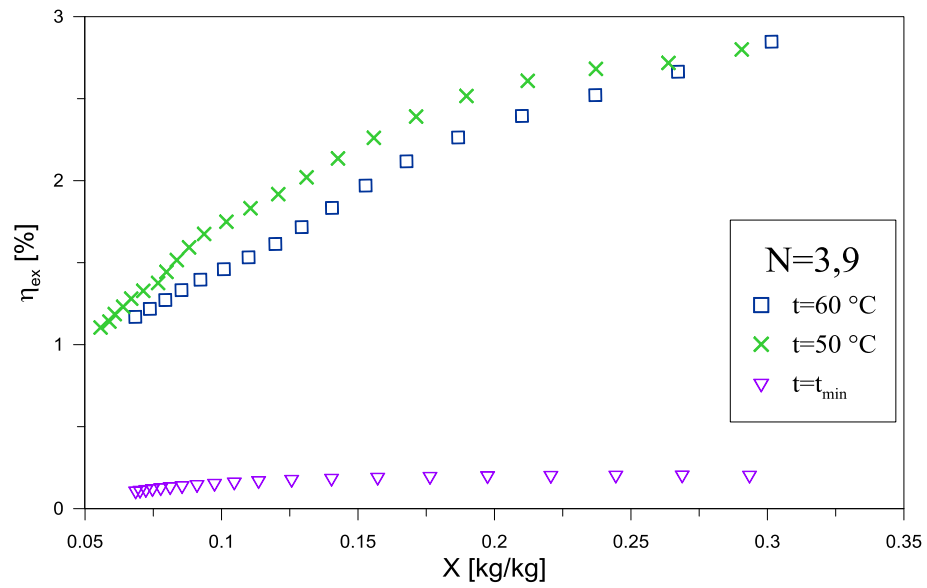
procesu suszenia powietrzem w temperaturze 60 °C, także wyższe wartości sprawności, choć nieznacznie, można zanotować dla procesu suszenia przy 50 °C. Wpływ wyższej temperatury na sprawność jest tym silniejszy im wyższa jest wartość liczby fluidyzacji. Dla liczby $N=1,0$ wpływ ten jest praktycznie znikomy. Związane jest to ze zniwelowaniem zwiększonego zużycia energii przez nagrzewnice przez skrócony czas trwania procesu- mniejsze zużycie energii przez wentylator.



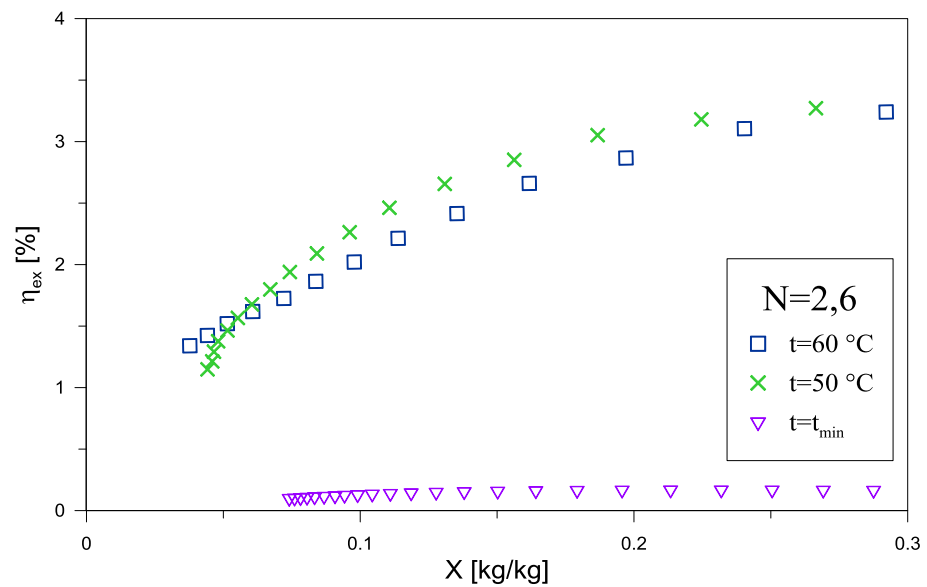
Rys. 7.46 Chwilowa sprawność egzergetyczna dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=2,6$ – węzeł suszenia



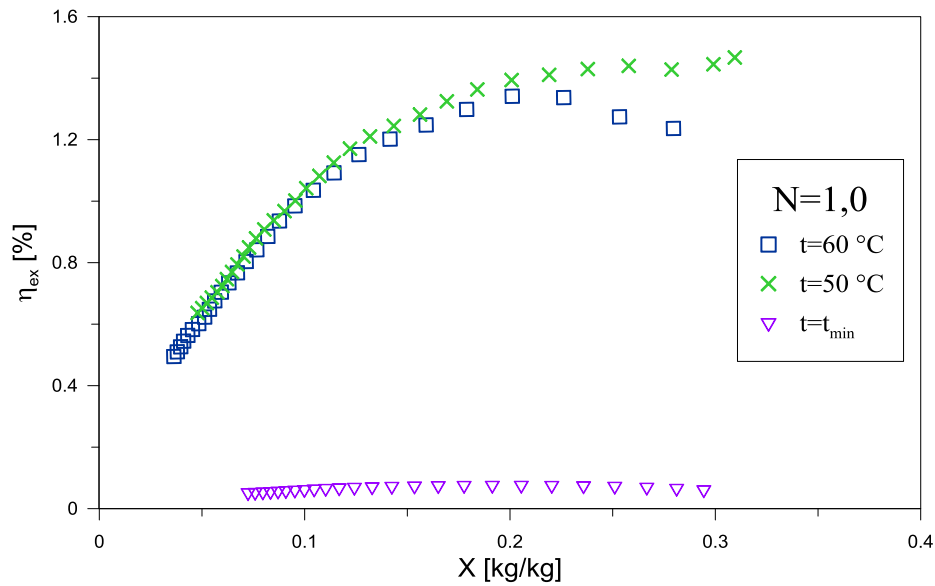
Rys. 7.47 Chwilowa sprawność egzergetyczna dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=1,0$ – węzeł suszenia



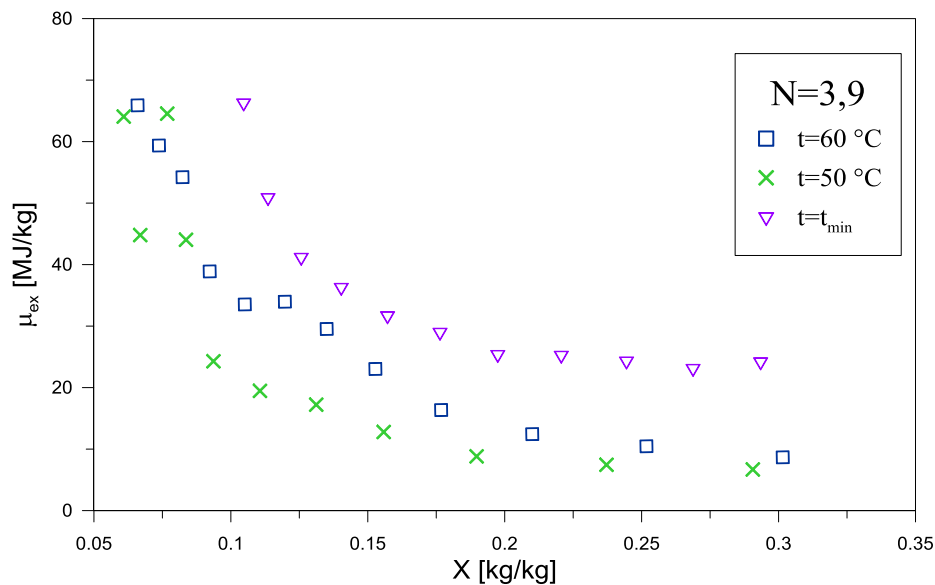
Rys. 7.48 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=3,9$ – węzeł suszenia



Rys. 7.49 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=2,6$ – węzeł suszenia

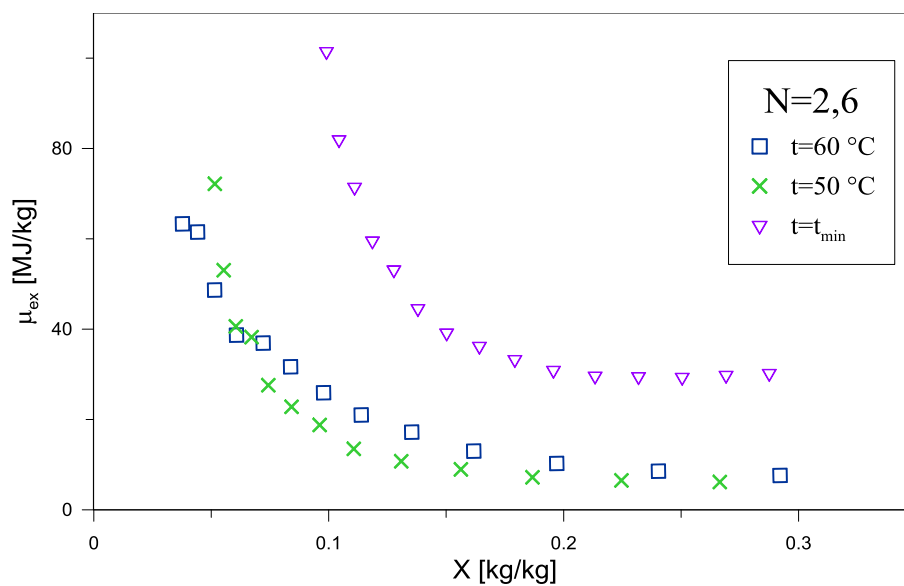


Rys. 7.50 Sprawność energetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=1,0$ – węzeł suszenia

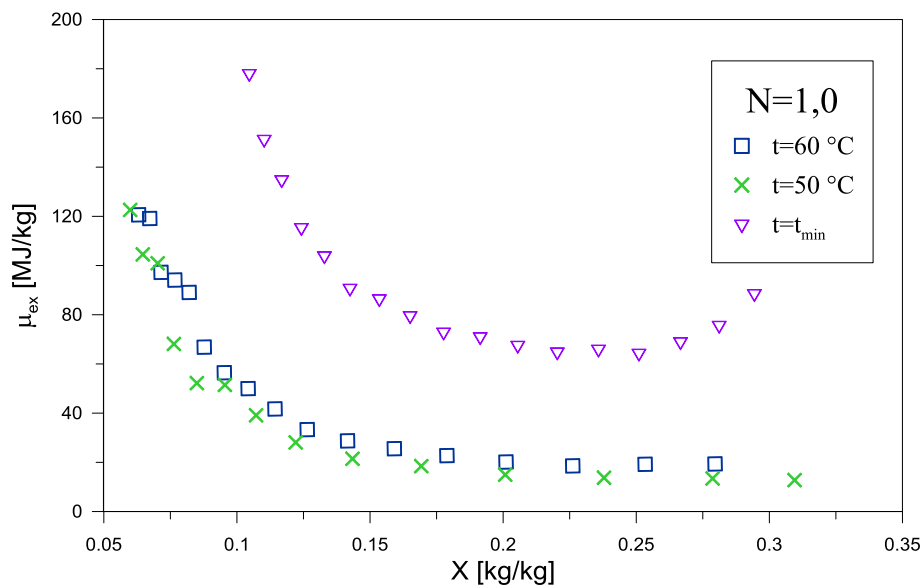


Rys. 7.51 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=3,9$ – węzeł suszenia

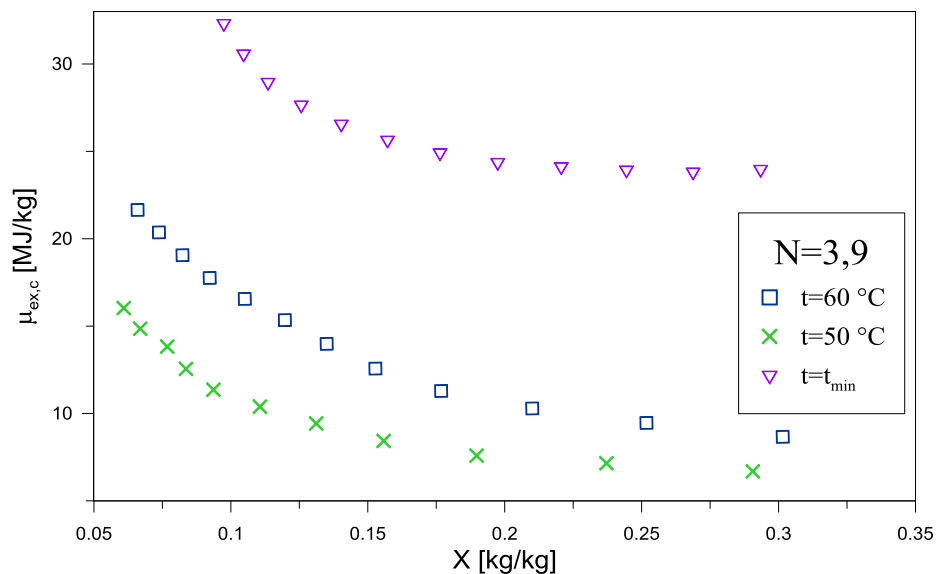
Na rysunkach 7.51÷7.56 zobrazowano zależności współczynnika jednostkowego zużycia energii od zawartości wilgoci. Analogicznie jak dla sprawności dużo wyższe wartości odnotować można dla suszenia przy najniższej temperaturze. Najniższe zużycie energii na 1 kg odparowanej wody występuje dla procesu suszenia przy temperaturze $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, nieznacznie wyższe wartości odnotować można dla $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ i podobnie jak dla sprawności różnice te są mniejsze dla suszenia przy minimalnej liczbie fluidyzacji.



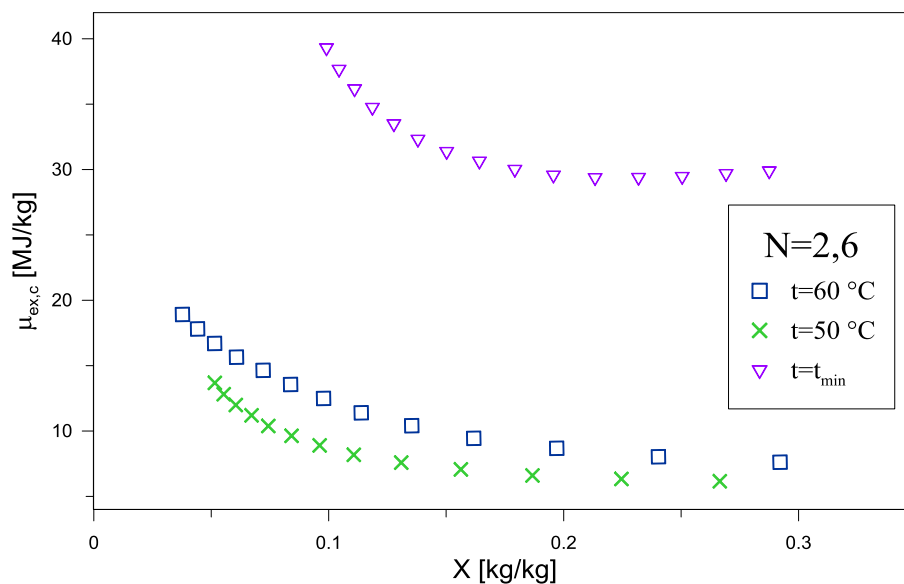
Rys. 7.52 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=2,6$ – węzeł suszenia



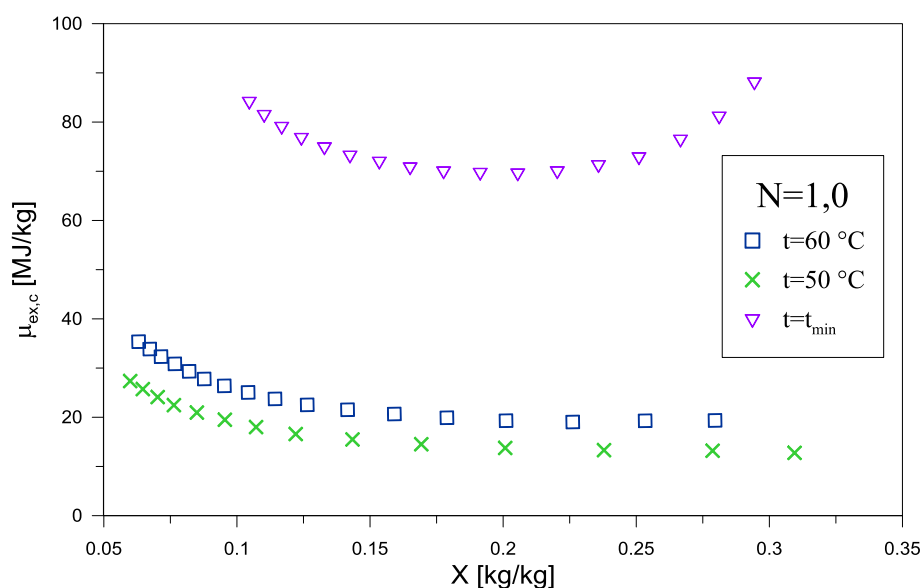
Rys. 7.53 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji $N=1,0$ – węzeł suszenia



Rys. 7.54 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji N=3,9 – węzeł suszenia



Rys. 7.55 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji N=2,6 – węzeł suszenia



Rys. 7.56 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych temperatur powietrza suszącego przy liczbie fluidyzacji N=1,0 – węzeł suszenia

7.4. Wpływ wysokości złoża

Badanie wpływu wysokości złoża przeprowadzono przy temperaturach powietrza suszącego 50 i 60 °C, dla trzech wybranych wysokości statycznych złoża, przy prędkości przepływającego powietrza odpowiadającej liczbie fluidyzacji 2,6. Zastosowano wysokość statyczną złoża równą średnicy kolumny fluidyzacyjnej, połowie tej wartości oraz półtoej wartości średnicy (0,5 D, 1,0 D, 1,5 D). Badano jaki wpływ ma wysokość złoża na kinetykę procesu oraz wydajność egzergetyczną. Proces był prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym. W tabelach 7.4a i 7.4b zebrane zostały parametry przy których realizowany był pomiar.

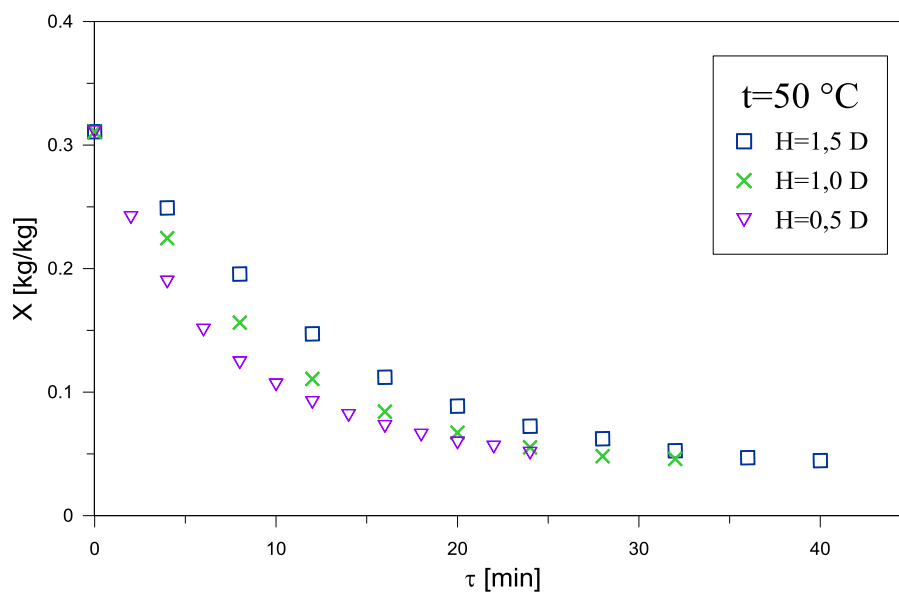
Na rysunkach 7.57÷7.59 przedstawiono krzywe suszenia odpowiednio dla wybranych liczb suszenia. Wyższa wysokość złoża czyli większa ilość materiału wywiera wpływ na czas suszenia wydłużając go. Wpływ ten jest wyraźniejszy dla niższej temperatury suszenia.

Tabela 7.4a Parametry doświadczenia

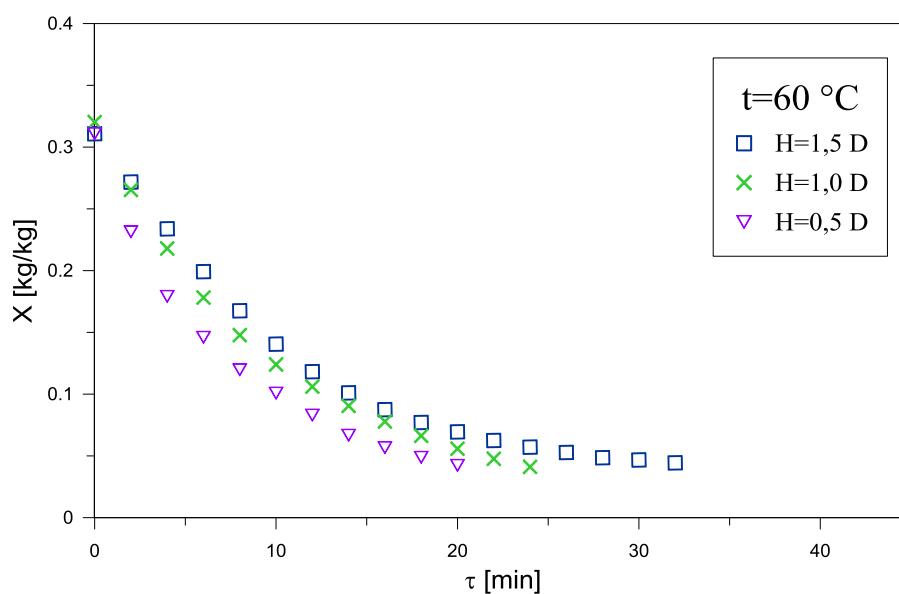
Parametr	Wartość		
Początkowa zawartość wilgoci w materiale	X _m	kg/kg	0,30
Masa mokrego materiału	m _m	kg	0,215
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ ₀	%	45÷50
Temperatura powietrza otoczenia	t ₀	°C	25

Tabela 7.4b Parametry doświadczenia

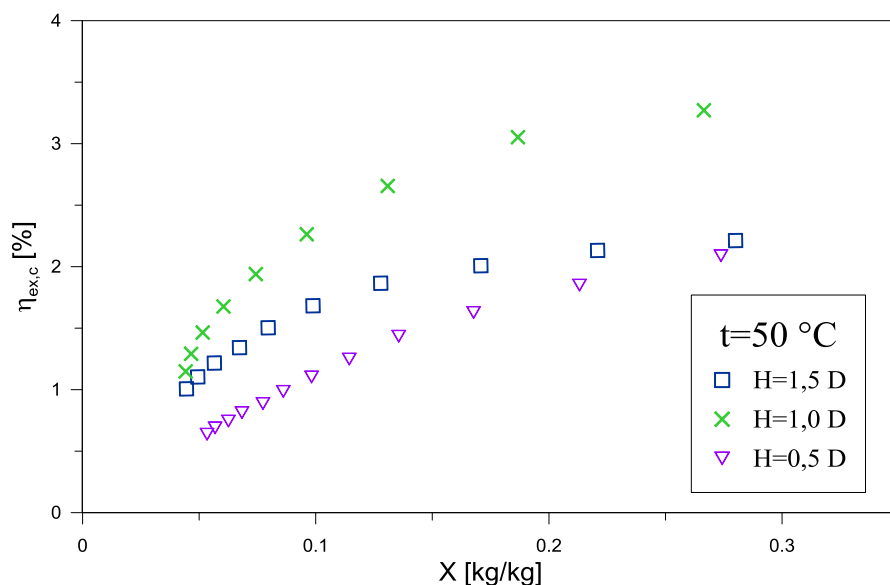
Pomiar	Temperatura	Liczba fluidyzacji	Wysokość złoża
1	50 °C	2,6	H=0,5 D
2			H=1,0 D
3			H=1,5 D
4	60 °C	2,6	H=0,5 D
5			H=1,0 D
6			H=1,5 D



Rys. 7.57 Krzywe suszenia maku dla różnych wysokości złoża przy temperaturze powietrza 50 °C – węzeł suszenia

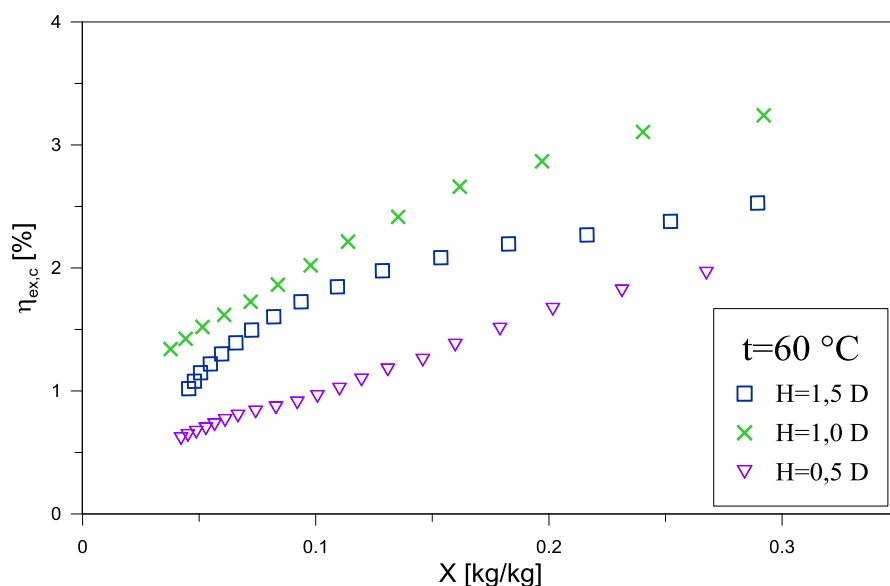


Rys. 7.58 Krzywe suszenia maku dla różnych wysokości złoża przy temperaturze powietrza 60 °C – węzeł suszenia



Rys. 7.59 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych wysokości złożeń przy temperaturze powietrza $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – węzeł suszenia

Na rysunkach 7.59÷7.60 pokazano wpływ wysokości złożeń na wartości sprawności egzergetycznej. Dla wykresów tych, niezależnie od temperatury przy której realizowany jest proces, sprawność egzergetyczna osiąga maksymalne wartości przy suszeniu z wysokością statyczną złożeń równą średnicy kolumny. Niższe wartości osiągnięto dla suszenia z wysokością równą 1,5 średnicy kolumny, a najmniejsze dla suszenia z wysokością równą połowie wartości średnicy kolumny suszenia.

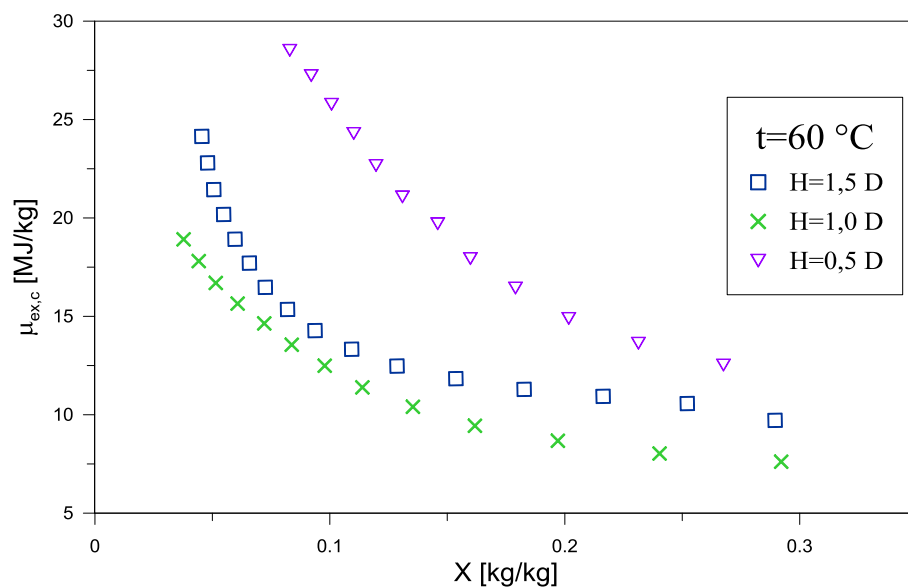


Rys. 7.60 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych wysokości złożeń przy temperaturze powietrza $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – węzeł suszenia



Rys. 7.61 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych wysokości złoza przy temperaturze powietrza 50 °C – węzeł suszenia

Potwierdzeniem wyników uzyskanych dla sprawności egzergetycznej są wyniki uzyskane dla jednostkowego zużycia energii zobrazowanego na rysunkach 7.61 i 7.62 odpowiednio dla temperatur 50 °C i 60 °C.



Rys. 7.62 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych wysokości złoza przy temperaturze powietrza 60 °C – węzeł suszenia

7.5. Wpływ zmiany charakteru suszenia

Doświadczenie przeprowadzono dla dwóch typów suszenia: suszenia fluidalnego oraz suszenia w złożu stacjonarnym. Zastosowano wysokość statyczną złoża równą średnicy kolumny fluidyzacyjnej. Proces był prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym oraz w temperaturze 50 °C. W tabeli 7.5a i 7.5b zestawiono parametry przy których przeprowadzone zostały badania.

Tabela 7.5a Parametry doświadczenia

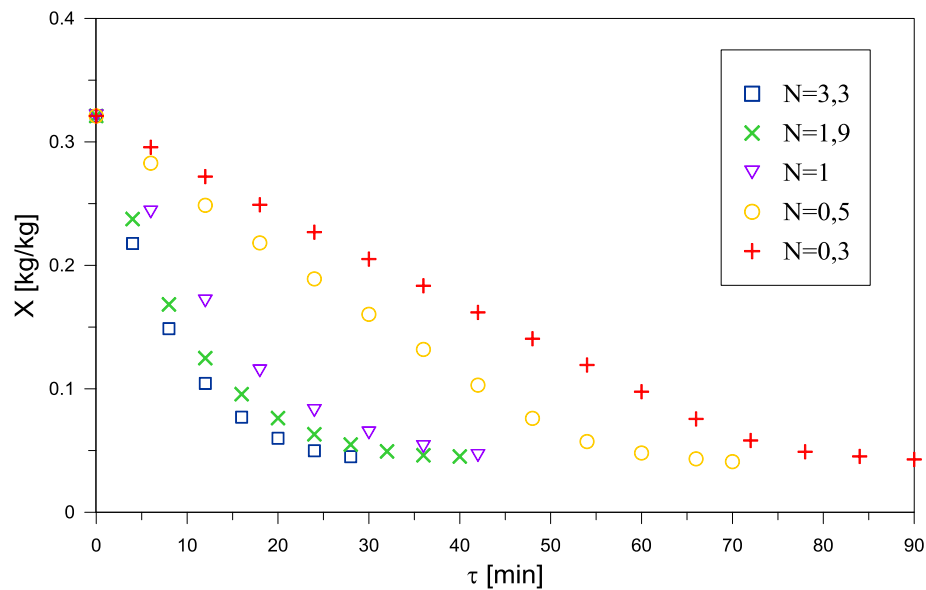
<i>Parametr</i>			<i>Wartość</i>
Początkowa zawartość wilgoci w materiale	X_m	kg/kg	0,33
Masa mokrego materiału	m_m	kg	0,225
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	%	0,3÷0,4
Temperatura powietrza otoczenia	t_0	°C	21
Temperatura powietrza po nagrzewnicy	T_1	°C	55
Wysokość złoża	H	m	0,07

Tabela 7.5b Parametry doświadczenia

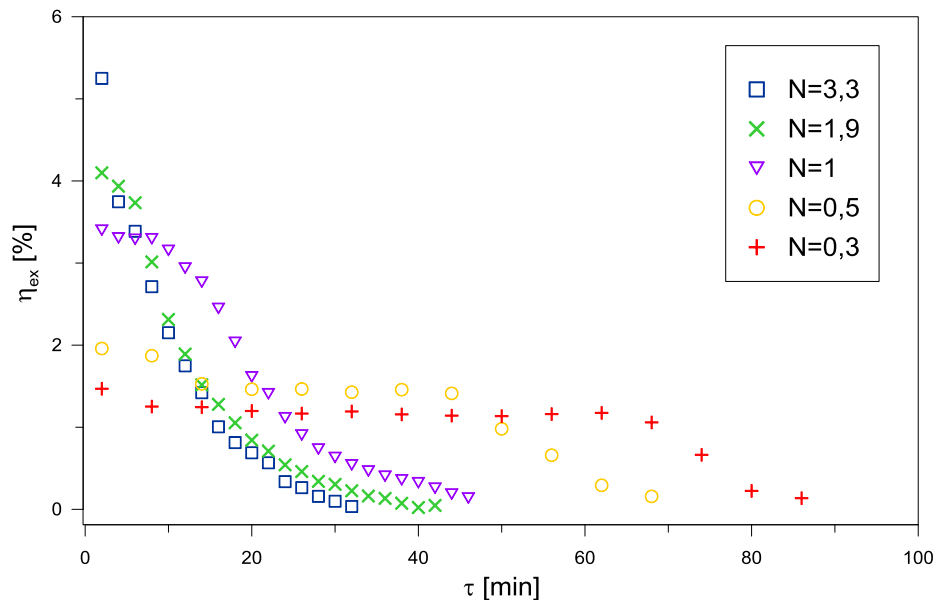
<i>Pomiar</i>	<i>Typ suszenia</i>	<i>Liczba fluidyzacji N</i>
1		3,3
2	w złożu	1,9
3	fluidalnym	1,0
4	w złożu	0,5
5	stacjonarnym	0,3

W oparciu o wyniki zebrane w trakcie eksperymentu, przeprowadzono ocenę egzergetyczną procesu suszenia ziaren maku dla różnych wartości liczb fluidyzacji: dla złoża fluidalnego $N=1\div 3,3$ i dla złoża stacjonarnego $N=0,3\div 0,5$. Na rysunku 7.63 zaprezentowano krzywe suszenia maku dla badanych wartości liczb fluidyzacji.

Jak już podkreślano wzór na sprawność egzergetyczną dla całego wężła suszenia, uwzględniającego egzergię napędową wentylatora i nagrzewnicy powietrza przyjmuje postać równania (3.37). Dla zobrazowania zmiany sprawności w trakcie trwania procesu sporządzono rysunki 7.64÷7.65 przedstawiające chwilowe wartości sprawności egzergetycznej dla każdej z przyjętych do analizy liczb fluidyzacji.



Rys. 7.63 Krzywe suszenia maku dla różnych metod suszenia – węzeł suszenia

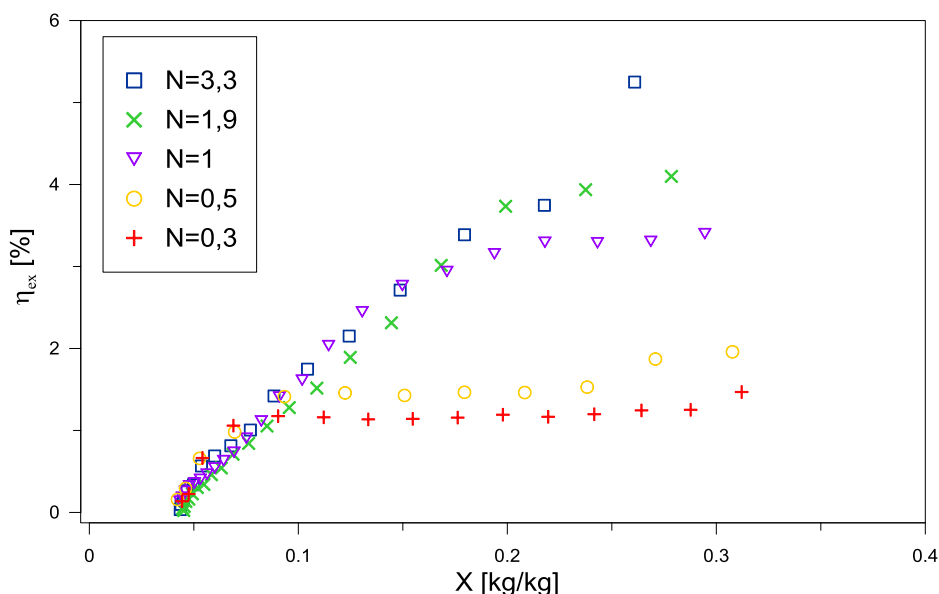


Rys. 7.64 Chwilowa sprawność energetyczna od czasu trwania procesu dla różnych typów suszenia – węzeł suszenia

Na podstawie wyników zobrazowanych na rysunku 7.65 można sformułować następujące spostrzeżenia. Dla liczby 3.3 widać w przybliżeniu liniowy spadek sprawności z ubytkiem wilgoci w próbce. Dla liczb 1.9 i 1 można zaobserwować utrzymanie zbliżonych wartości sprawności w początkowym okresie suszenia, a następnie w przybliżeniu liniowy spadek. Natomiast dla liczb 0.5 i 0.3 zakres zawartości wilgoci dla których sprawność utrzymuje się na jednym poziomie jest jeszcze większy, tj. aż do wartości ok. 0.1. Po przekroczeniu tej wartości zależność $\eta(X)$ linowo maleje.

Wynikać to może ze stosunku szybkości dostarczania wilgoci na powierzchnię materiału do szybkości możliwości ewakuacji wilgoci do czynnika suszącego.

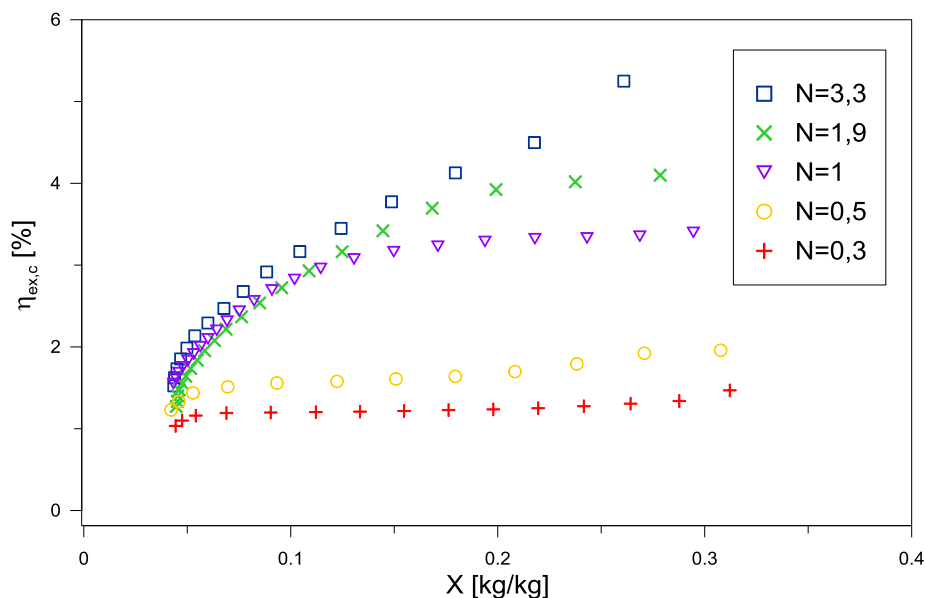
W początkowym okresie suszenia zauważyć można znaczne rozdzielanie punktów odpowiadających sprawnościom egzergetycznym suszenia przy danych liczbach fluidyzacji. Maksymalne wartości sprawności egzergetycznej osiągnane są dla liczby fluidyzacji równej 3,3. Zaobserwować można znaczny wzrost wartości sprawności po przekroczeniu krytycznej prędkości fluidyzacji. W końcowym etapie suszenia, nie ma już takich różnic pomiędzy suszeniem w złożu stacjonarnym a suszeniem w układzie fluidalnym, a nawet dla liczby fluidyzacji 0,5 odnotować można najwyższe wartości sprawności. Związane jest to z wolnym transportem wilgoci na zewnątrz cząstek, a dość dużymi stratami energii przepływającego gorącego powietrza, zależnymi od prędkości. W związku z tym należy dokładnie przeanalizować zmianę charakteru suszenia z fluidalnego na suszenie w złożu stacjonarnym w razie potrzeby suszenia do niskich wartości zawartości wilgoci.



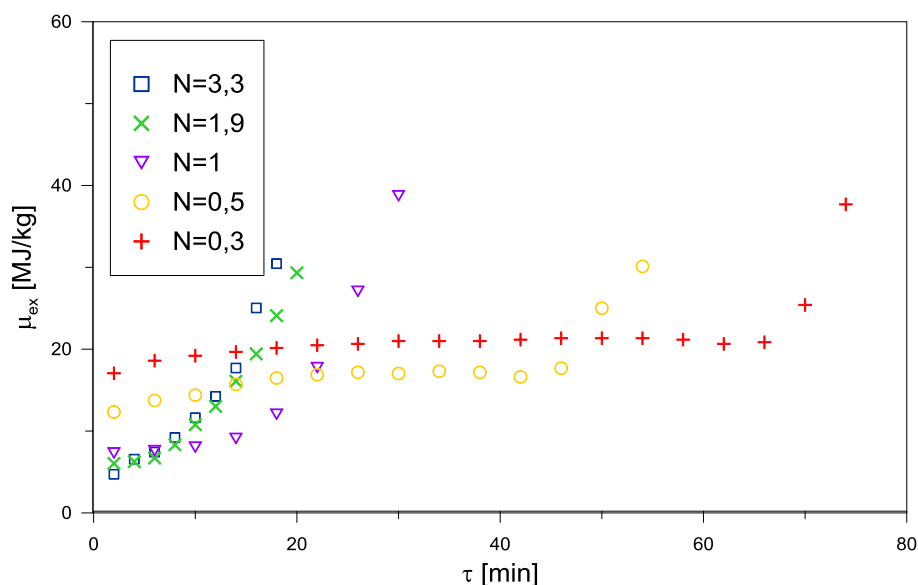
Rys. 7.65 Chwilowa sprawność egzergetyczna od zawartości wilgotności dla różnych typów suszenia – węzeł suszenia

Na rysunku 7.66 pokazano wpływ wartości sprawności egzergetycznej suszenia materiału od początkowej zawartości wilgoci do uzyskania danej wartości zawartości wilgoci. Sprawność egzergetyczna dla wszystkich liczb z zakresu suszenia fluidalnego znacząco maleje wraz z ubytkiem masy wody w materiale czyli z czasem trwania procesu suszenia. Natomiast dla suszenia w złożu stacjonarnym można zaobserwować

niemalże stałe wartości sprawności dla całego zakresu zawartości wilgoci. Na rysunku 4.66 można także zauważyć, że wraz ze zwiększaniem się liczby fluidyzacji od wartości 0,3 do 0,5 nieznacznie wzrasta sprawność. Następnie po przekroczeniu prędkości krytycznej, czyli przy zmianie procesu suszenia w złożu stacjonarnym na suszenie w złożu fluidalnym, obserwuje się znaczny wzrost wartości sprawności egzergetycznej, aż do osiągnięcia maksymalnych wartości dla liczby fluidyzacji 3,3.

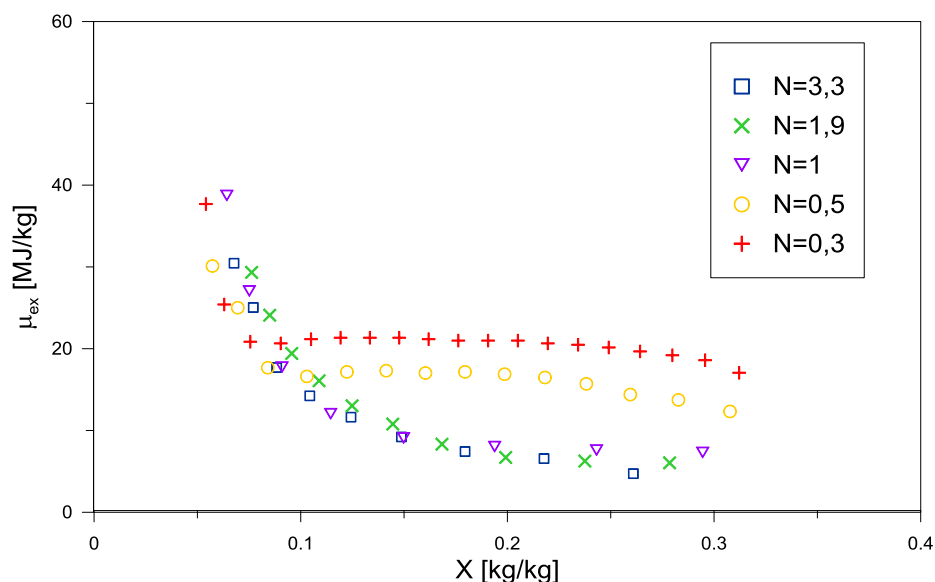


Rys. 7.66 Sprawność egzergetyczna od zawartości wilgoci w materiale dla różnych wartości prędkości powietrza wlotowego dla różnych typów suszenia – węzeł suszenia

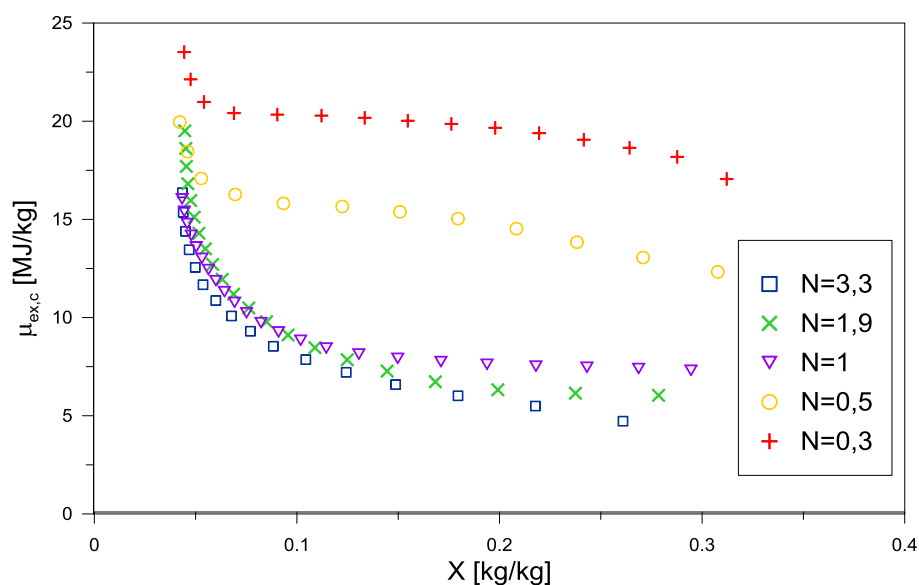


Rys. 7.67 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku dla różnych typów suszenia – węzeł suszenia

Na rysunku 7.67 przedstawiono wartości chwilowe współczynnika jednostkowego zużycia energii od czasu trwania procesu, a na rysunku 7.68 od zawartości wilgoci suszonego materiału, zaś zależność całkowitego jednostkowego zużycia energii od zawartości wilgoci pokazano na rysunku 7.69.



Rys. 7.68 Chwilowe jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych typów suszenia – węzeł suszenia



Rys. 7.69 Jednostkowe zużycie energii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci dla różnych typów suszenia – węzeł suszenia

Podobnie jak dla sprawności egzergetycznej zaobserwować można wyraźne rozdzielanie punktów dotyczących suszenia w złożu stacjonarnym. Najmniejsze zużycie energii na odparowanie 1 kg wody osiągnięto dla liczby fluidyzacji 3,3. Podobnie jak dla sprawności egzergetycznej można zaobserwować skok wartości jednostkowego

zużycia energii przy zmianie charakteru suszenia z fluidalnego na suszenie w złożu stacjonarnym.

Podsumowując rozdział należy stwierdzić, że wykonano analizę egzergetyczną suszenia fluidalnego ziaren maku. Badano wpływ liczby fluidyzacji, temperatury powietrza suszącego, wysokości złoża jak również charakteru suszenia na wydajność egzergetyczną całego węzła suszenia. Badania wpływu liczby fluidyzacji wykonano również dla samej komory suszenia. Do opisu użyto dwóch wskaźników: sprawność egzergetyczna i jednostkowe zużycie energii.

Dla każdego procesu sprawność egzergetyczna zmniejsza się, zaś wskaźnik jednostkowego zużycia energii rośnie wraz z czasem trwania procesu czyli z ubytkiem wilgoci w materiale.

Z danych literaturowych [79, 106, 108] i z danych doświadczalnych przedstawionych dla komory wynika, że wartość sprawności egzergetycznej wzrasta (wartość jednostkowego zużycia energii maleje) wraz ze spadkiem prędkości przepływu powietrza. Optymalną prędkością w takim przypadku jest minimalna prędkość fluidyzacji.

W analizie egzergetycznej całego węzła suszenia otrzymano odwrotne zależności. Ze wzrostem prędkości od minimalnej można zaobserwować wzrost wydajności egzergetycznej, aż do osiągnięcia maksymalnych wartości, po czym przy dalszym wzroście prędkości następuje niewielki spadek wydajności.

Różnice te wynikają z podejścia do zdefiniowania nakładów dla komory i dla całego węzła. Przy obliczeniu sprawności egzergetycznej dla samej komory suszenia nakłady sprowadzają się do energii powietrza suszącego [38, 80, 81], przy takim podejściu sprawność rośnie im niższa jest energia powietrza suszenia mimo, że zmniejszenie prędkości przepływu powietrza znacząco wydłuża czas suszenia. Natomiast dla węzła suszenia, gdzie nakładami są energie związane z zasilaniem wentylatora i nagrzewnicy zmniejszenie prędkości wydłużające czas suszenia powoduje zwiększenie zużycia energii napędowej.

Należy jednak podkreślić, że najlepsza efektywność realizacji procesu suszenia w układach fluidalnych zachodzi przy wartości liczby fluidyzacji N w zakresie pomiędzy 2 a 3 [4, 126].

Z analizy wpływu temperatury suszenia wynika, że nieuzasadnione jest suszenie przy minimalnej temperaturze. Wraz ze wzrostem temperatury następuje intensyfikacja procesu, ale po przekroczeniu pewnego progu wartości korzyści z szybszego suszenia są przewyższane przez nakłady potrzebne do uzyskania wymaganej temperatury powietrza suszącego.

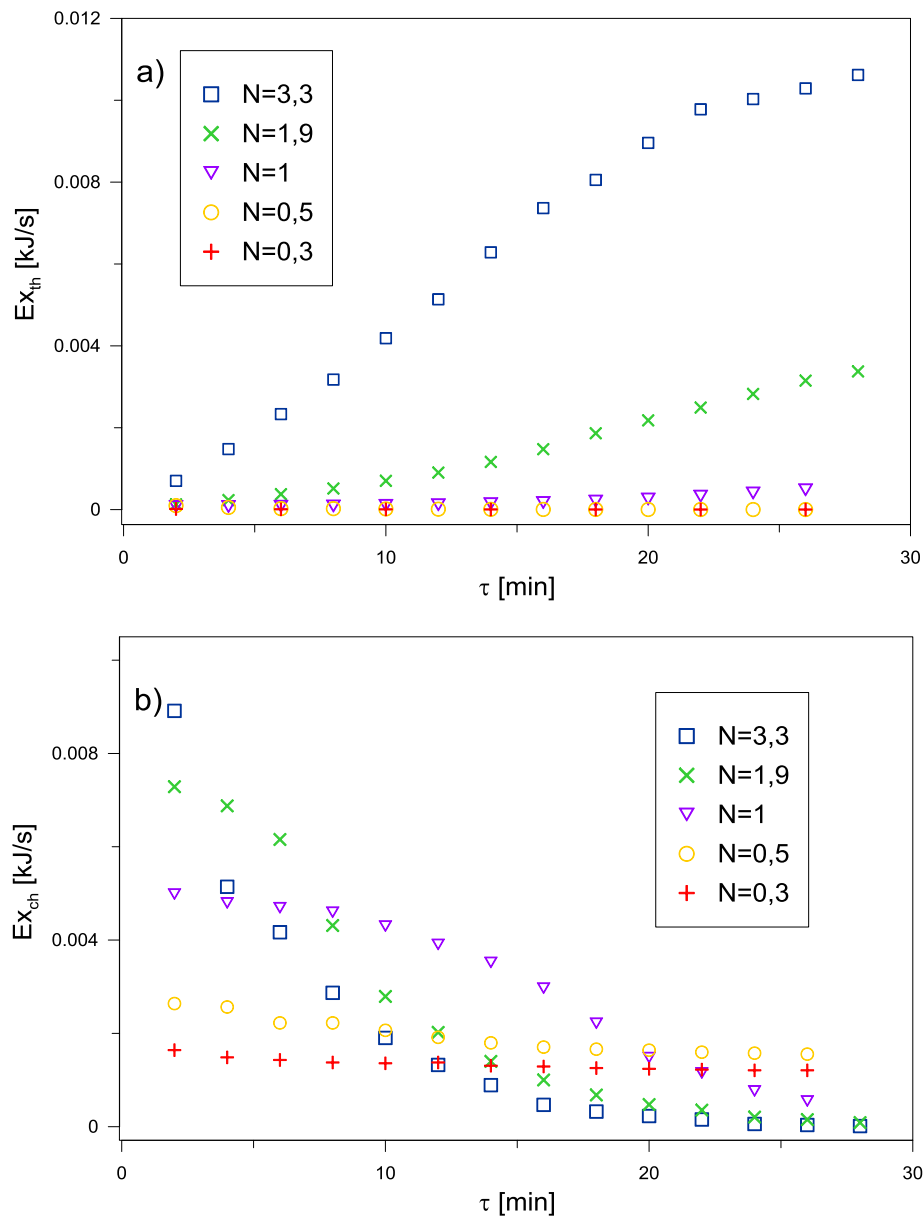
Podczas analizy wpływu wysokości złoża, badano trzy wysokości uzależnione od wartości średnicy kolumny suszarniczej: $0,5 D$, D , $1,5D$. Z analizy wynika, że istnieje optymalna wartość wysokości złoża równa średnicy kolumny.

Przy suszeniu materiału do zawartości wilgoci powyżej wartości krytycznej bardziej ekonomiczne jest suszenie w złożu fluidalnym, natomiast jeżeli zawartość wilgoci w materiale suszonym jest poniżej wartości krytycznej należy się zastosować suszenie w złożu stacjonarnym.

7.6. Recyrkulacja powietrza

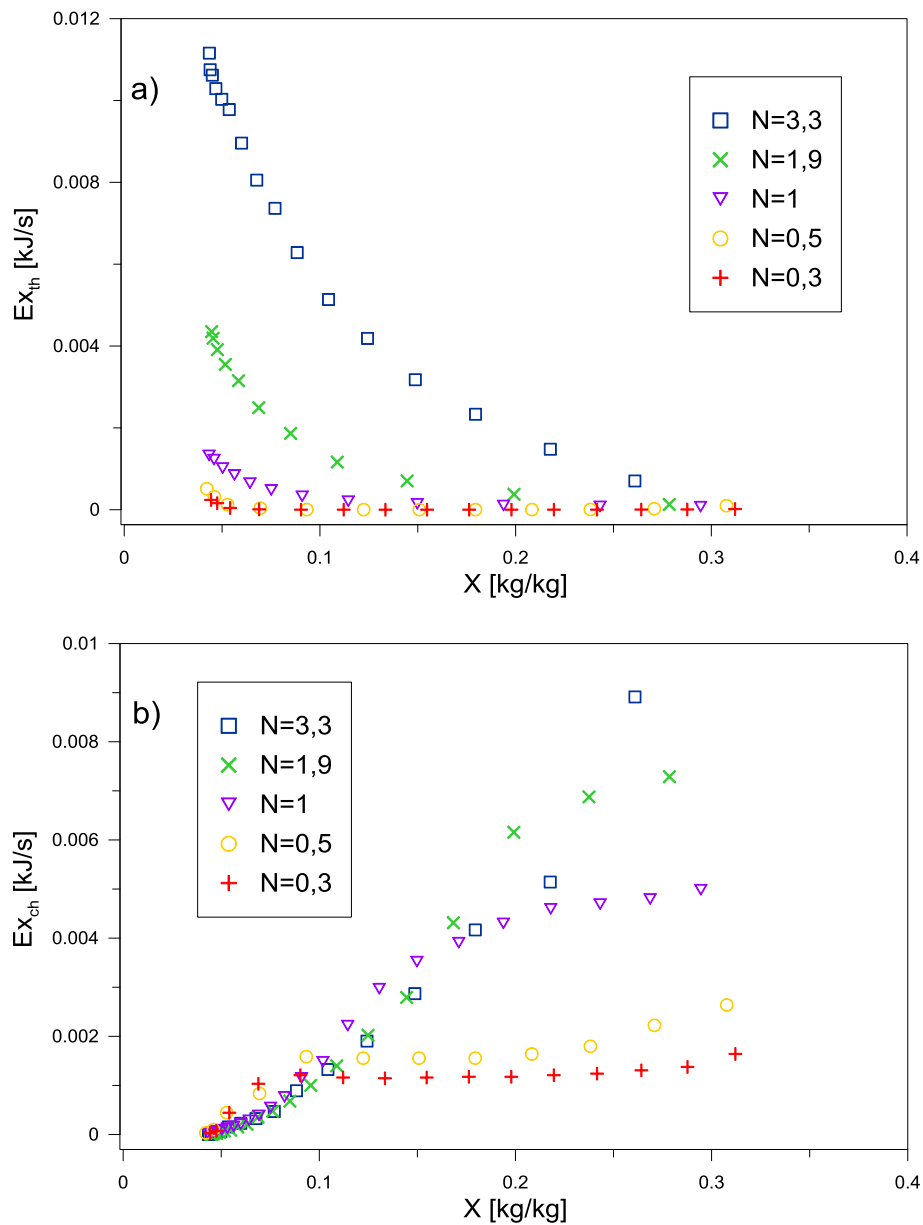
Jedną z wad suszenia są znaczące straty energii (egzergii) usuwanej z powietrzem wylotowym. Egzergia powietrza składa się z sumy egzergii termicznej, mechanicznej i chemicznej. Ciśnienie powietrza opuszczającego kolumnę równe jest ciśnieniu otoczenia w związku z tym wyrażenie pod logarytmem we wzorze (3.15) jest równe 1, czyli składowa mechaniczna egzergii powietrza jest równa zero. Pozostaje egzergia termiczna i chemiczna.

Strumienie egzergii termicznej i chemicznej pokazane są na rysunku 7.70 w zależności od czasu trwania procesu i na rysunku 7.71 w zależności od zmiany zawartości wilgoci w suszonym materiale. Wartość egzergii chemicznej zależy od ilości odparowanej wilgoci z materiału suszonego, czyli egzergia termiczna jest składową, którą należy rozpatrywać jako straty egzergii usuwanej z powietrzem wylotowym.



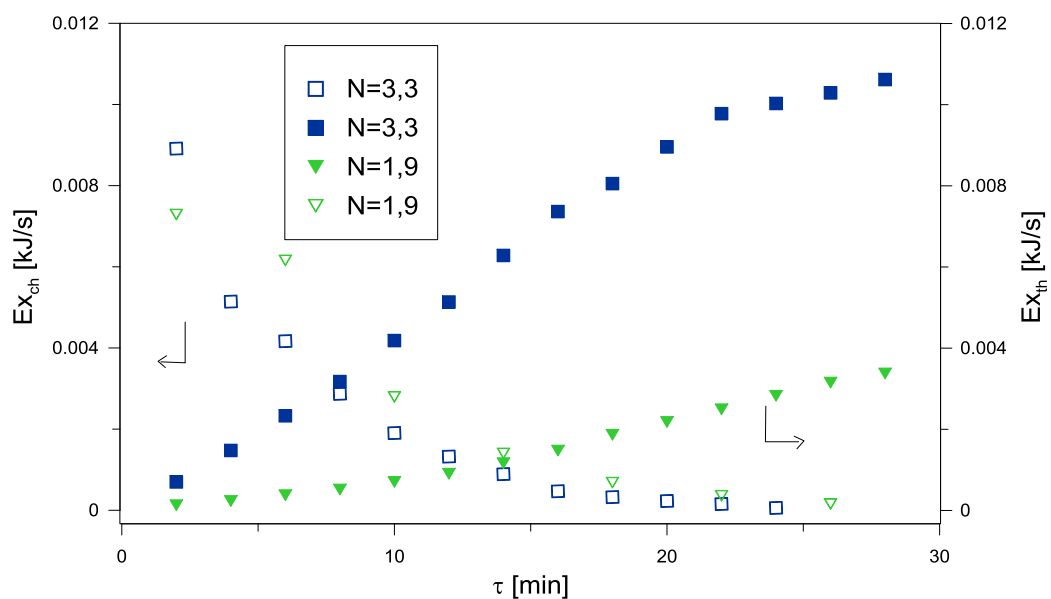
Rys. 7.70 Zależność strumienia: a) egzergii termicznej, b) egzergii chemicznej

Zużycie egzergii czynnika grzejącego można znacznie zmniejszyć przez zastosowanie procesu z recyrkulacją, co oczywiście związane jest z niższymi kosztami eksploatacyjnymi. Dla wyjaśnienia tego problemu w oparciu o analizę egzergetyczną postanowiono zbadać zachowanie się strumienia egzergii powietrza wylotowego w trakcie trwania procesu suszenia. Analizując recyrkulację powietrza należy zauważyć, że w początkowym etapie suszenia powietrze wylotowe ma niską egzergię termiczną (rys. 7.70 a i 7.71 a), a dużą egzergię chemiczną (rys. 7.70 b i 7.71 b).



Rys. 7.71 Zależność strumienia: a) egzergii termicznej, b) egzergii chemicznej

Powietrze, którego znaczącą część egzergii stanowi egzergia chemiczna (o dużej zawartości wilgoci) nie powinno być zwracane do procesu, ponieważ pomimo znacznej egzergii całkowitej nie posiada zbyt dużego potencjału do procesu suszenia. Dopiero po pewnym czasie trwania procesu, udział egzergii termicznej przewyższa udział egzergii chemicznej, co przedstawiono na rysunku 7.72 dla analizowanych liczb fluidyzacji. Powietrze, którego egzergia termiczna znacznie przewyższa egzergię chemiczną może być użyte ponownie do procesu suszenia.



Rys. 7.72 Strumień egzergii termicznej i chemicznej powietrza wylotowego dla liczby fluidyzacji 1,9 i 3,3

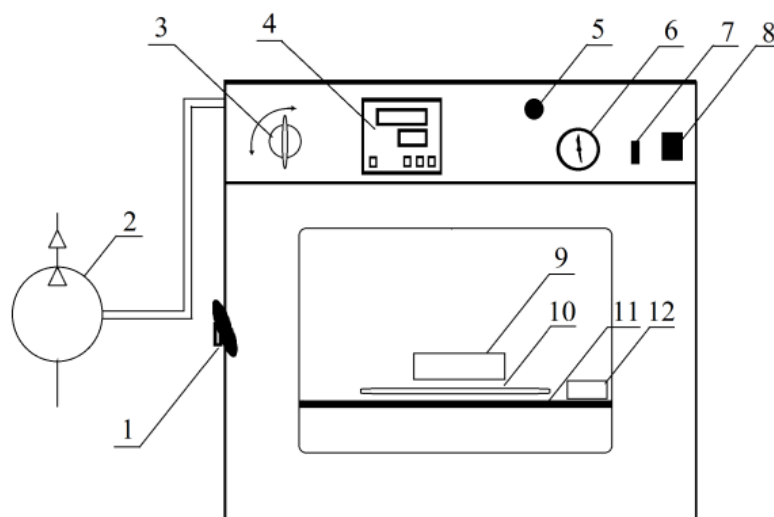
8. Analiza egzergetyczna suszenia próżniowego

W pracy przeprowadzono także ocenę suszenia próżniowego zrębek leszczyny pospolitej z uwzględnieniem wpływu: wymiany powietrza, wartości ciśnienia w komorze, wielkości badanej próbki, temperatury powietrza w komorze suszenia jak również wysokości warstwy na czas suszenia. Obliczono sprawność egzergetyczną oraz jednostkowe zużycie energii.

Należy podkreślić, że w literaturze dotyczącej zagadnienia liczba artykułów związanych z analizą egzergetyczną suszenia próżniowego jest znikoma.

8.1. Stanowisko badawcze suszenia próżniowego

Badania zostały przeprowadzone w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej z wykorzystaniem stanowiska badawczego, którego schemat przedstawiono na rysunkach 8.1. Instalacja badawcza została przystosowana do realizacji zaplanowanego zakresu eksperymentu. Bilansowano kompletny układ suszenia próżniowego. Wyposażenie stanowiska w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową umożliwia uzyskanie danych niezbędnych do sporządzenia charakterystyk procesowych i wykonania bilansu egzergetycznego.



Rys. 8.1 Schemat stanowiska badawczego wyposażonego w suszarkę próżniową DZ – 2BC firmy Chem Land: 1 – uchwyty zamykające, 2 – pompa próżniowa Rocker 410, 3 – zawór próżniowy, 4 – programator, 5 – zawór wlotowy, 6 – próżniomierz, 7 – regulator szybkości nagrzewania komory, 8 – włącznik, 9 – waga elektroniczna, 10 – termometr alkoholowy, 11 – półka, 12 – TESTO 452

Wykonano niezbędne działania w celu przystosowania stanowiska badawczego do pełnej realizacji celów pracy. Wyposażono instalację badawczą w aparaturę kontrolno-pomiarową wysokiej jakości:

- Wagę AJ-1200CE firmy VIBRA, z przetwornikiem kamertonowym, o dokładności 0,01 g, zakresie 1200 g.
- Przyrząd Testo 452 firmy Testoterm GmbH & Co. Hamburg, Germany, umożliwiający jednoczesny pomiar temperatury z dokładnością 0,1 °C oraz wilgotności względnej z dokładnością 2%.
- Wagosuszkarkę MAC 50/1/NH firmy Radwag o dokładności 0,01%.
- Miernik energii elektrycznej firmy Pafal typ A52 o dokładności 0,01 kWh.



Rys. 8.2 Materiał suszony – zrębki leszczyny pospolitej (*Corylus avellana*)

Tabela 8.1 Właściwości suszonego materiału

<i>Parametr</i>			<i>Wartość</i>
Średnia średnica	d_m	m	$20,2 \cdot 10^{-3}$
Gęstość materiału	ρ_m	kg/m ³	560
Porowatość złoża	ϵ_0	–	0,57
Sferyczność	Φ	–	0,79
Krytyczna zawartość wilgoci	X_{kr}	kg/kg	0,23
Równowagowa zawartość wilgoci	X_r	kg/kg	0,10

Badania testowe realizowano stosując zrębki leszczyny pospolitej (rys. 8.2.) – materiał naturalny uzyskany z przycinki pielęgnacyjnej. Wykorzystanie tego materiału związane jest z badaniami prowadzonymi w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej w kierunku zagospodarowania energetycznego biomasy drzewnej. Testowany materiał rozdzielono na równej długości kształtki oraz podsuszono do żądanej zawartości wilgoci. W tabeli 8.1. przedstawiono podstawowe właściwości

fizykochemiczne badanego materiału: średnicę zastępczą, gęstość, porowatość warstwy w stanie stacjonarnym, sferyczność oraz krytyczną i równowagową zawartość wilgoci. Średnicę zastępczą materiału wyznaczano w oparciu o definicję średnicy objętościowej jako średnicę kuli o objętości badanej cząstki. Porowatość złoza w stanie stacjonarnym określano z gęstości ciała stałego i gęstości usypowej [5]. Sferyczność określono z definicji stosunku powierzchni kuli o średnicy zastępczej do powierzchni cząstki. Krytyczną i równowagową zawartość wilgoci określono z krzywych suszenia wyznaczonych za pomocą termowagi.

Krzywe suszenia wyznaczono w oparciu o zmianę wskazań wagi elektronicznej w trakcie prowadzenia eksperymentu.

8.2. Wpływ wymiany powietrza

W ramach badań wstępnych ustalono, że po pewnym czasie dochodzi do znacznego nasycenia powietrza wilgocią w komorze suszarki, co powoduje spadek intensywności usuwania wilgoci z materiału suszonego. W związku z tym zdecydowano się na przeprowadzenie badań dotyczących wpływu częstości wymiany powietrza w komorze suszenia na przebieg procesu suszenia próżniowego. Każdy cykl pomiarowy powtarzano 3-krotnie.

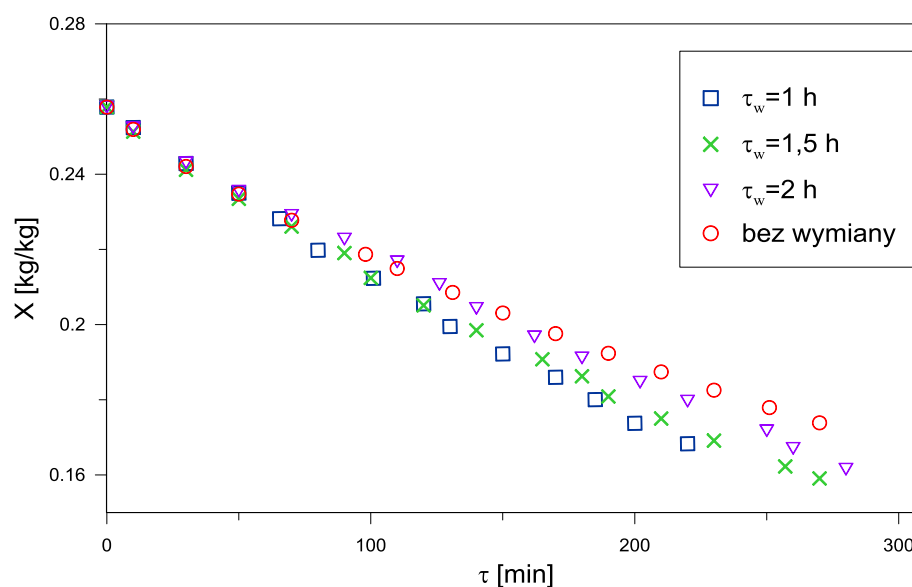
Wymiana powietrza w komorze suszenia polegała na otwarciu zaworu wlotowego, następnie po napełnieniu komory suszenia powietrzem otoczenia zamykano zawór i za pomocą pompy próżniowej powracano do stanu pierwotnej wartości podciśnienia w komorze suszenia. Czynność powtarzano w określonych odstępach czasu.

W tabeli 8.2. zebrano charakterystyczne parametry przeprowadzonego doświadczenia. Zawartość wilgoci X_m w materiale wyznaczano metodą bezpośrednią, susząc próbki do stałej masy w suszarce laboratoryjnej.

Tabela 8.2 Parametry doświadczenia

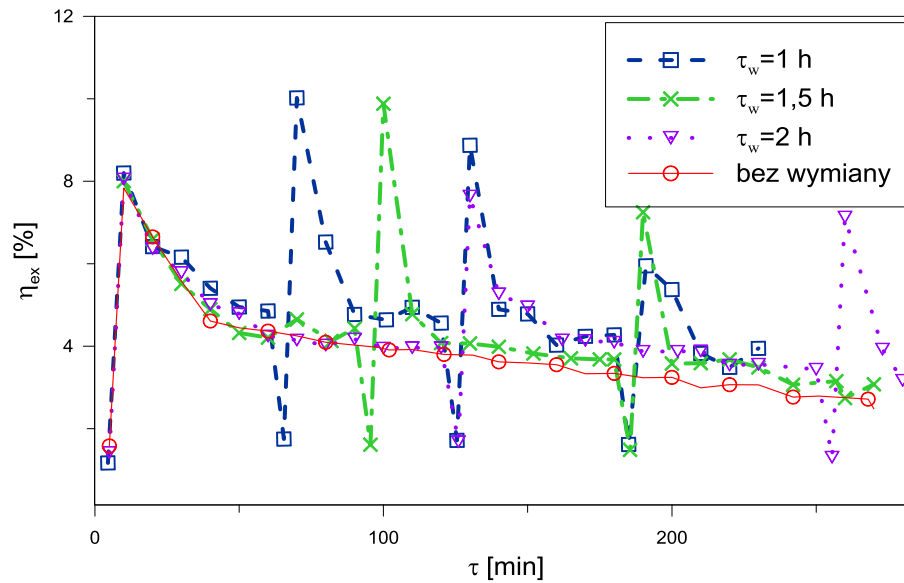
Parametr	Wartość		
Początkowa zawartość wilgoci	X_1	kg/kg	0,26
Masa materiału w przeliczeniu na suchą masę	m_{sm}	g	120
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	–	0,21
Temperatura powietrza otoczenia	T_0	°C	20
Temperatura powietrza w komorze	T_{p1}	°C	50
Wysokość warstwy złoża	h	cm	5
Podciśnienie w komorze	P_{pod}	MPa	0,07
Czas po którym następuje wymiana powietrza	τ_w	h	1; 1,5; 2

Wyniki eksperymentu zaprezentowano graficznie sporządzając krzywe suszenia (rys. 8.3.) oraz wykresy zależności chwilowej (rys. 8.4.) i całkowitej sprawności (rys. 8.5.) energetycznej od czasu trwania procesu.



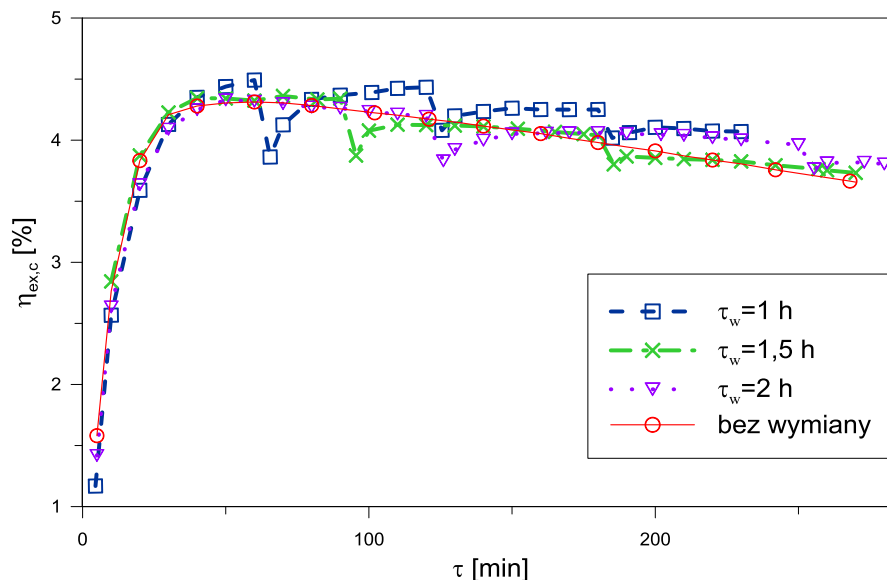
Rys. 8.3 Krzywe suszenia zrzębków leszczyny przy różnych czasach wymiany powietrza w komorze suszenia

Wymiana powietrza korzystnie wpływa na czas trwania procesu suszenia (rys. 8.3). Ze skróceniem czasu po którym następuje wymiana powietrza zmniejsza się czas suszenia. Najkrótszy czas suszenia osiągnięto dla wymiany powietrza co 1 h. Proces bez wymiany powietrza charakteryzuje się najdłuższym czasem suszenia.

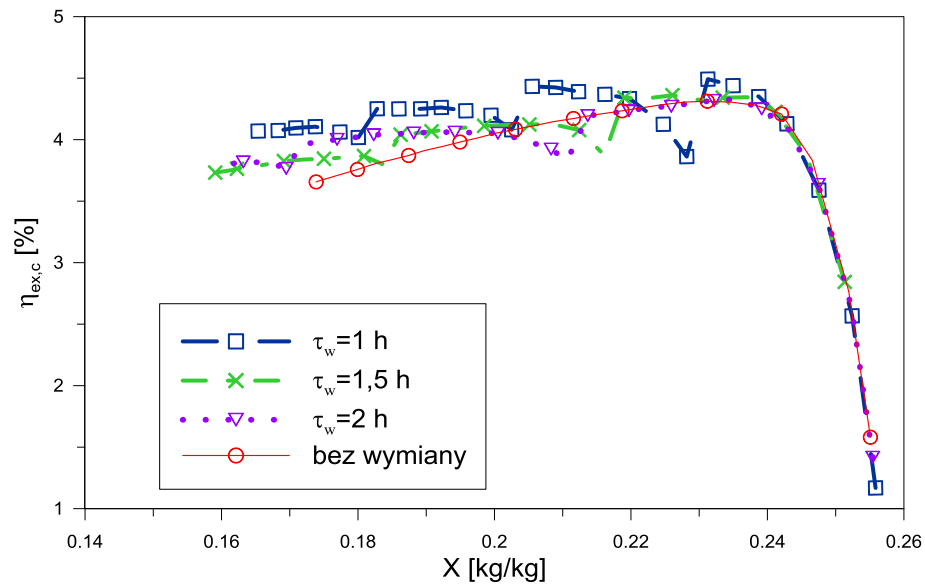


Rys. 8.4 Chwilowa sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych czasach wymiany powietrza w komorze suszenia

Na rysunku 8.4. przedstawiającym chwilowe wartości sprawności oraz na rysunku 8.5 przedstawiającym całkowite wartości sprawności, dla procesów suszenia z wymianą powietrza, zauważyć można okresowy spadek sprawności związany ze zużyciem energii przez sprężarkę oraz towarzyszący wzrost sprawności związany z wymianą powietrza w komorze. Dla procesu bez wymiany powietrza sprawność egzergetyczna po osiągnięciu maksimum maleje z czasem trwania procesu.

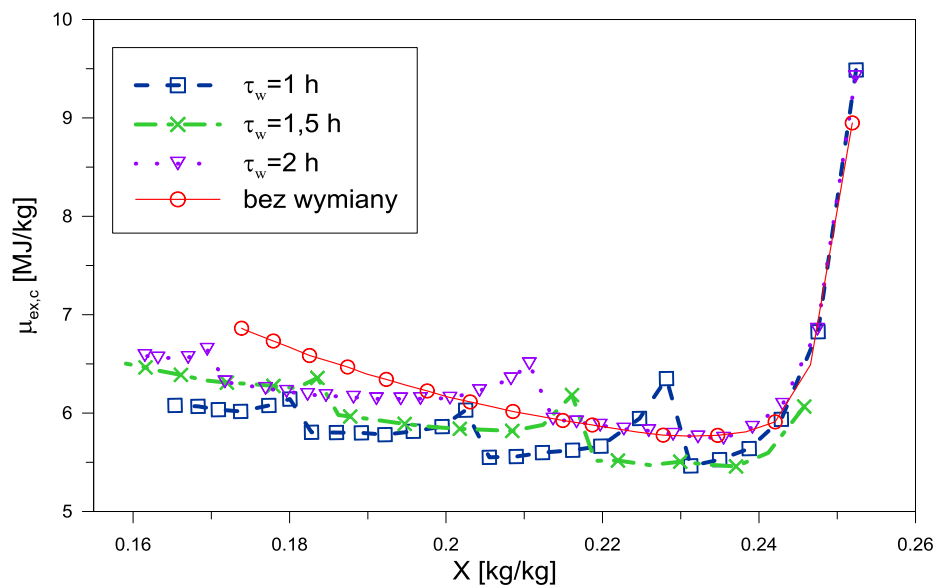


Rys. 8.5 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych czasach wymiany powietrza w komorze suszenia



Rys. 8.6 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych czasach wymiany powietrza w komorze suszenia

Na rysunku 8.6. zobrazowano całkowitą sprawność egzergetyczną w zależności od zawartości wilgoci w materiale suszonym. Na podstawie analizy wyników, można stwierdzić, że wymiana powietrza korzystnie wpływa na wartości egzergetycznej sprawności procesu suszenia.



Rys. 8.7 Jednostkowe zużycie energii procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych czasach wymiany powietrza w komorze suszenia

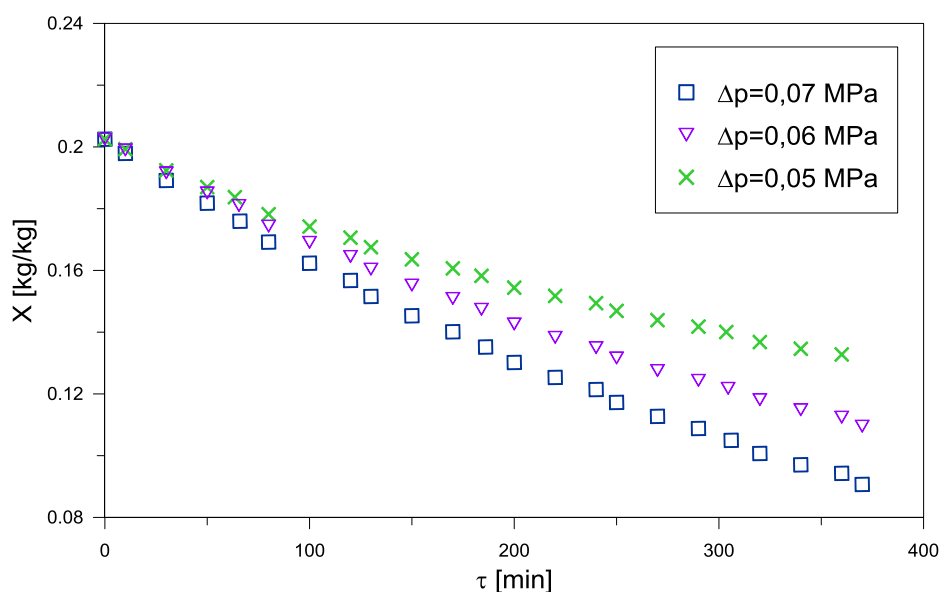
Wartość jednostkowego zużycia energii potwierdza wyniki sprawności egzergetycznej, najmniejsze zużycie energii osiągnięto dla procesu z wymianą powietrza co 1 h.

8.3. Wpływ wartości ciśnienia w komorze suszenia

W kolejnym etapie eksperymentu sprawdzono jak wpływa wartość ciśnienia w komorze na wydajność procesu. W tym celu przeprowadzono doświadczenia dla trzech różnych wartości podciśnień. Parametry doświadczenia zebrano w tabeli 8.3.

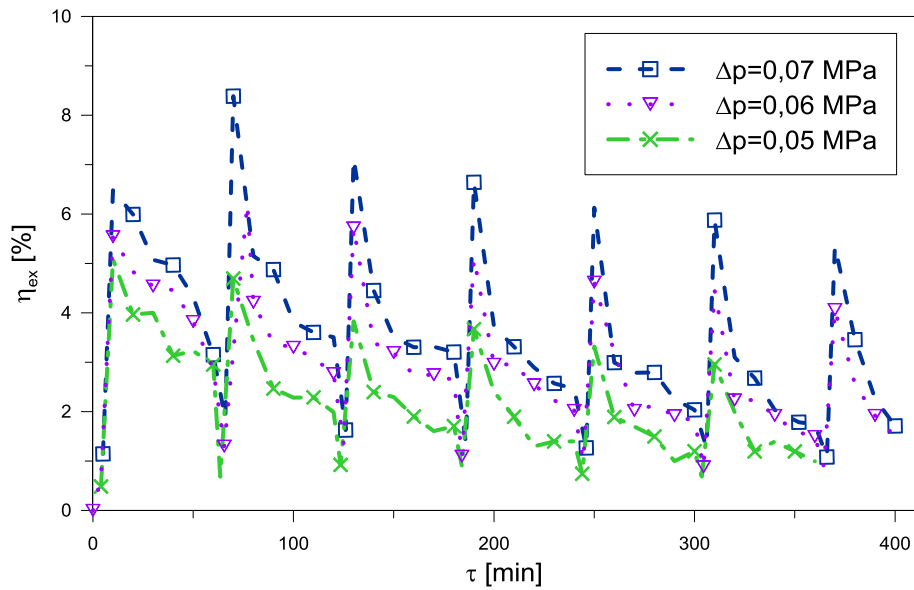
Tabela 8.3 Parametry doświadczenia

Parametr	Wartość		
Początkowa zawartość wilgoci	X_1	kg/kg	0,20
Masa materiału w przeliczeniu na suchą masę	m_{sm}	g	120
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	–	0,35
Temperatura powietrza otoczenia	T_0	°C	20
Wysokość warstwy złoża	h	cm	5
Temperatura powietrza w komorze	T_{pl}	°C	50
Czas po którym następuje wymiana powietrza	τ_w	h	1
Podciśnienie w komorze	P_{pod}	MPa	0,05; 0,06; 0,07

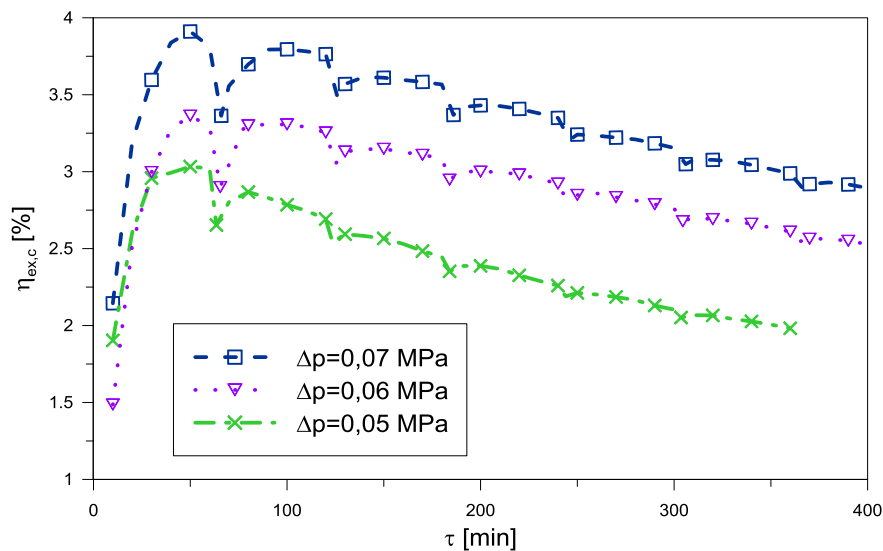


Rys. 8.8 Krzywe suszenia dla procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych wartościach podciśnienia w komorze

Na rysunku 8.8 przedstawiono krzywe suszenia dla różnych wartości podciśnienia w komorze suszenia. Dla wartości 0,07 MPa zaobserwować można najintensywniejszy spadek zawartości wilgoci. Związane jest to z większym obniżeniem temperatury wrzenia wody jak również ze zwiększeniem różnicy ciśnienia pomiędzy wodą i parą wilgoci obecną w strukturze drewna a otoczeniem.



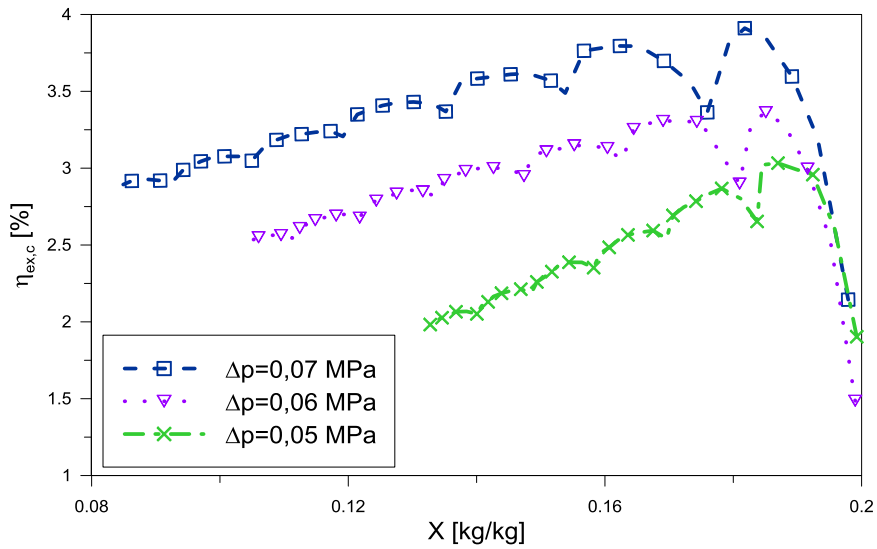
Rys. 8.9 Chwilowa sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych wartościach podciśnienia w komorze



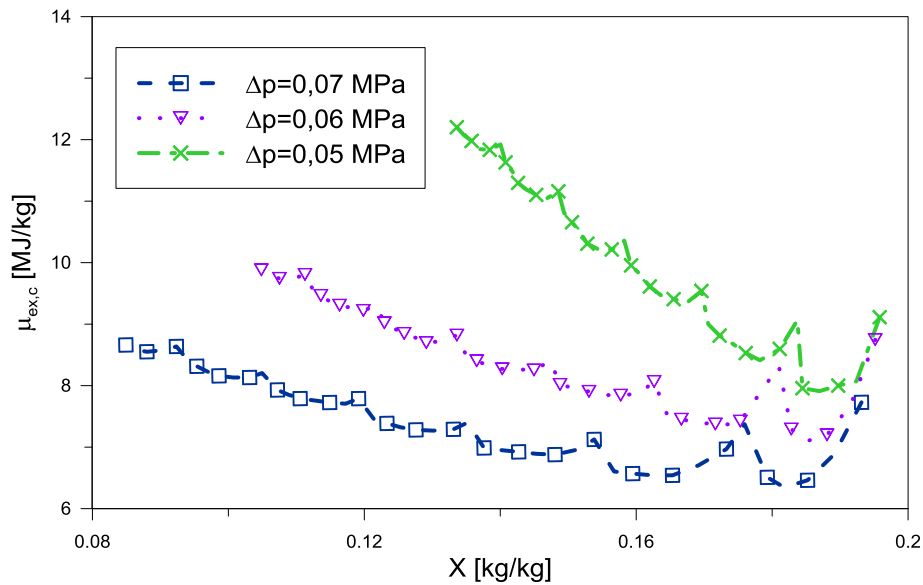
Rys. 8.10 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia przy różnych wartościach podciśnienia w komorze

Chwilowe wartości sprawności egzergetycznej zobrazowano na rysunku 8.9, natomiast na rysunku 8.10 i 8.11 przedstawiono całkowite wartości sprawności egzergetycznej procesu suszenia dla różnych wartości podciśnienia w komorze suszenia. Analiza wyników pozwala stwierdzić, że ze wzrostem wartości podciśnienia rośnie także wartość sprawności egzergetycznej. Najniższe wartości sprawności osiągnięto dla procesu suszenia przy podciśnieniu w komorze 0,05 MPa. Wyższe wartości sprawności osiągnięto przy zwiększeniu podciśnienia do wartości 0,06 MPa.

Po zwiększeniu podciśnienia do 0,07 MPa zaobserwować można dalszy wzrost sprawności.



Rys. 8.11 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny przy różnych wartościach podciśnienia w komorze



Rys. 8.12 Jednostkowe zużycie egzergii procesu suszenia przy różnych wartościach podciśnienia w komorze

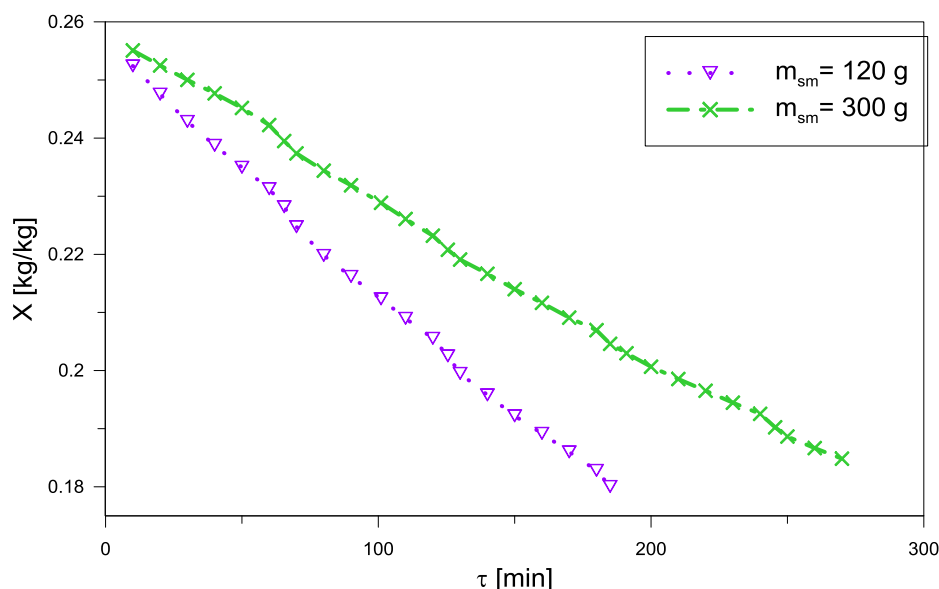
Na rysunku 8.12 zobrazowano zmiany jednostkowego zużycia egzergii. Zwiększenie podciśnienia w komorze z 0,05 MPa do 0,06 MPa skutkuje znaczącym obniżeniem jednostkowego zużycia egzergii, natomiast dalsze zwiększanie podciśnienia w komorze obniża zużycie egzergii o ok 1 MJ na kg odparowanej wody.

8.4. Wpływ masy próbki

W kolejnym etapie eksperymentu sprawdzono jak wpływa wielkość próbki poddawanej suszeniu na efektywność procesu. W tym celu przeprowadzono doświadczenie dla dwóch różnych mas: 120 i 300 g w przeliczeniu na suchą masę z zachowaniem tej samej wysokości złoza. Parametry doświadczenia zebrano w tabeli 8.4.

Tabela 8.4 Parametry doświadczenia

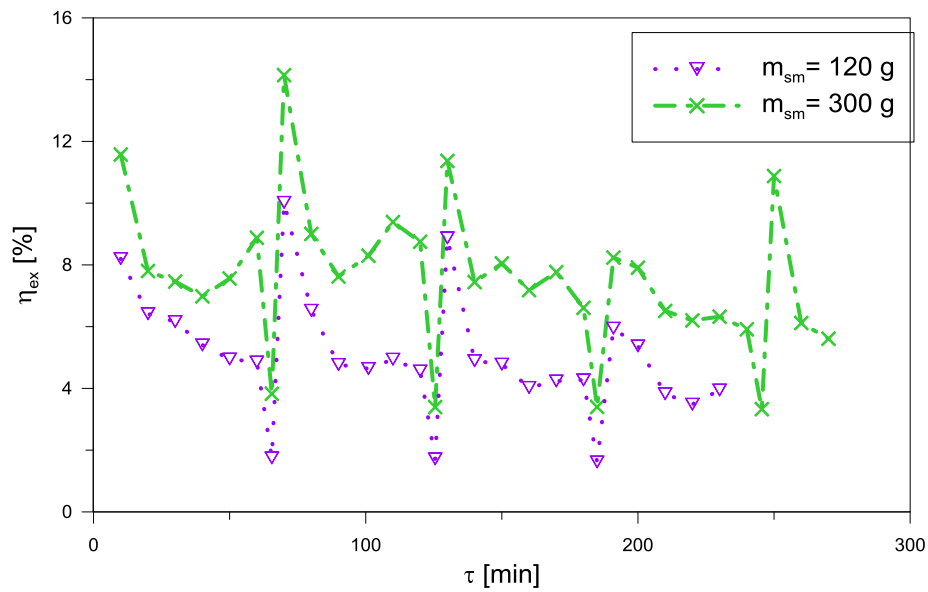
Parametr			Wartość
Początkowa zawartość wilgoci	X_1	kg/kg	0,26
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	–	0,21
Temperatura powietrza otoczenia	T_0	°C	20
Wysokość warstwy złoza	h	cm	5
Temperatura powietrza w komorze	T_{p1}	°C	50
Podciśnienie w komorze	P_{pod}	MPa	0,07
Czas po którym następuje wymiana powietrza	τ_w	h	1
Masa materiału w przeliczeniu na suchą masę	m_{sm}	g	120; 300



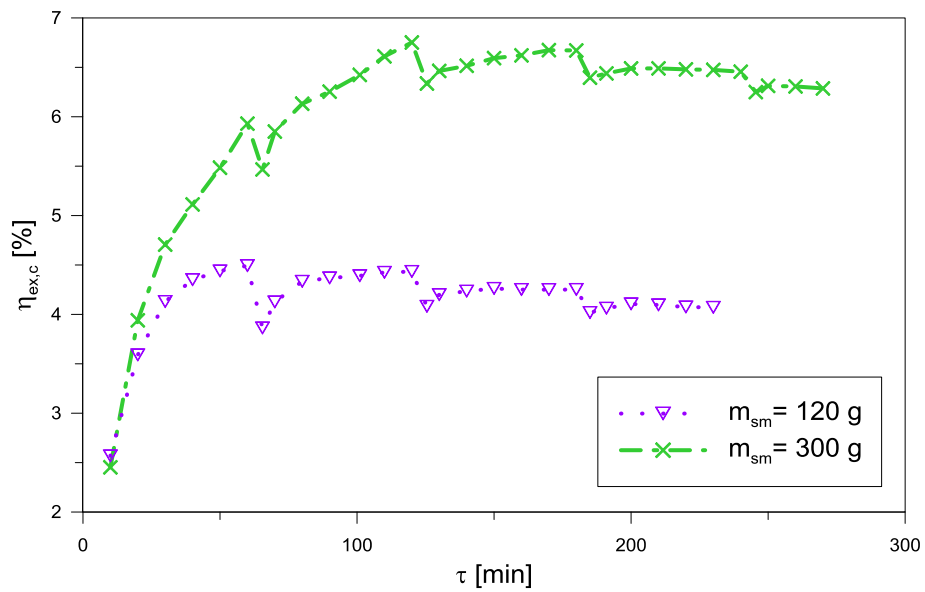
Rys. 8.13 Krzywe suszenia zrębków leszczyny dla różnych mas próbek

Krzywe suszenia dla różnych mas materiału przedstawiono na rysunku 8.13, lżejsza próbka osiąga daną zawartość wilgoci dużo wcześniej. Na rysunku 8.14 przedstawiającym sprawność chwilową dla tego eksperymentu, zaobserwować można charakterystyczne piki związane z wymianą powietrza po 1 h. Z wykresów dotyczących

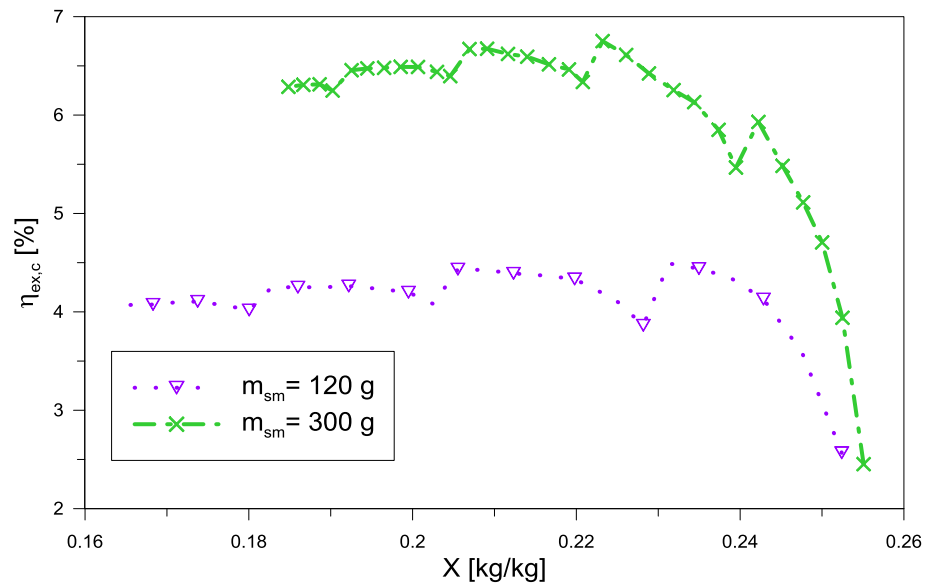
sprawności egzergetycznej (rys. 8.14÷8.16) wynika, że sprawność egzergetyczna osiąga dużo wyższe wartości przy procesie suszenia większej masy.



Rys. 8.14 Chwilowe sprawności egzergetyczne procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych wielkości próbek

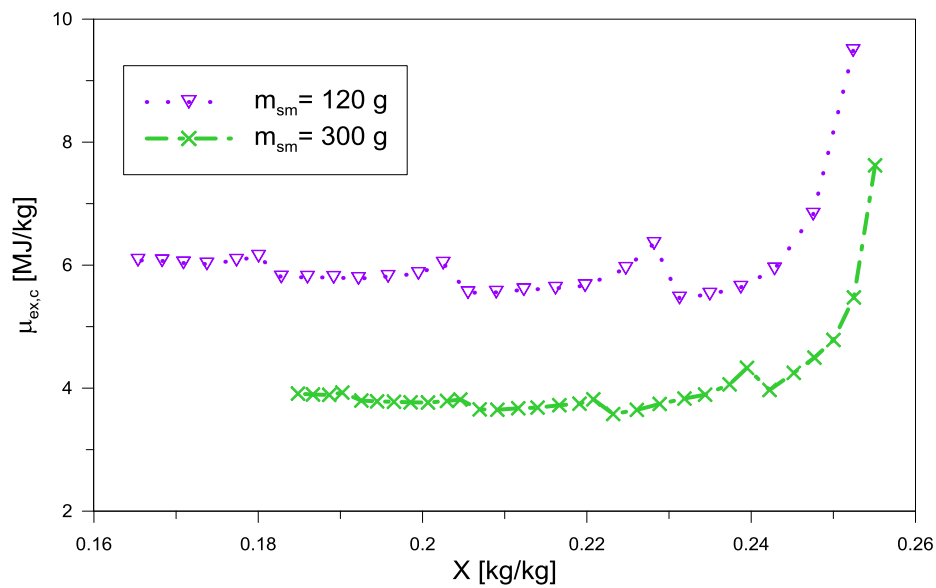


Rys. 8.15 Całkowita sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych wielkości próbek



Rys. 8.16 Całkowita sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych wielkości próbek

Z rysunku dotyczącego jednostkowego zużycia egzergii (rys. 8.17) wynika, że przy zwiększeniu masy materiału ze 120 do 300 g, jednostkowe zużycie egzergii zmniejsza się o 2 MJ na każdy odparowany kg wilgoci.



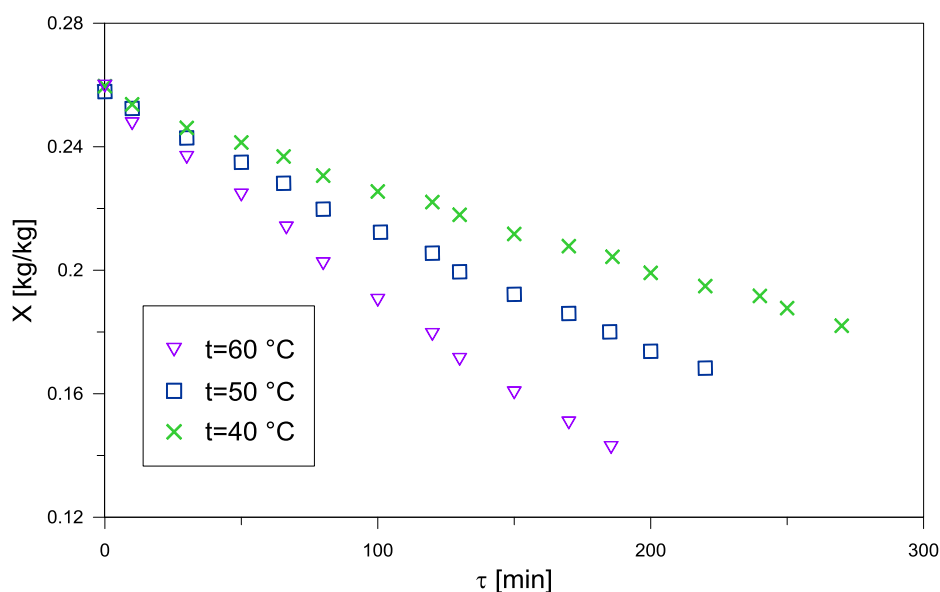
Rys. 8.17 Jednostkowe zużycie egzergii procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych wielkości próbek

8.5. Wpływ temperatury powietrza w komorze suszenia

Istotnym zagadnieniem jest określenie wpływu temperatury w komorze suszenia na sprawność egzergetyczną. W tym celu przeprowadzono doświadczenie dla trzech temperatur. Parametry doświadczenia zebrano w tabeli 8.5.

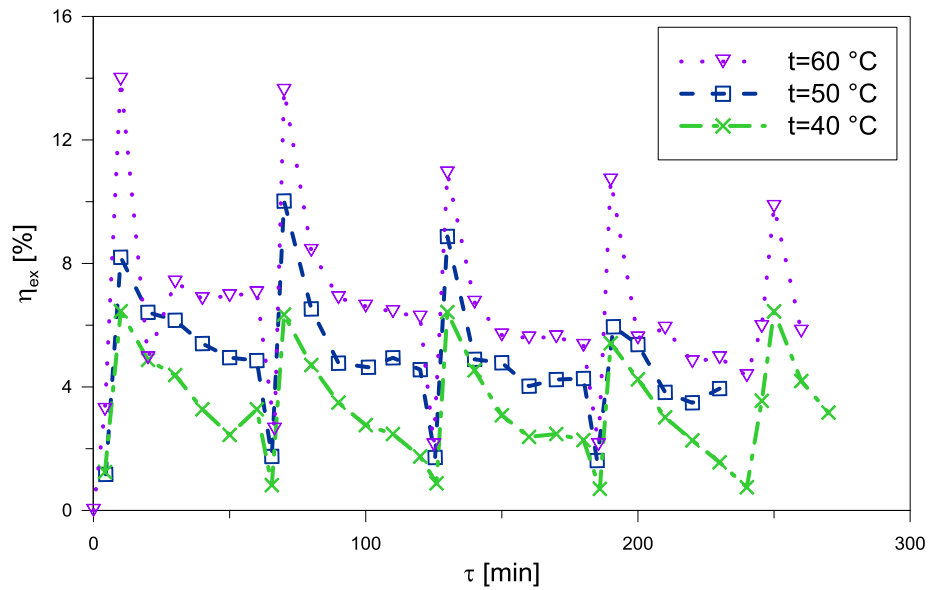
Tabela 8.5 Parametry doświadczenia

Parametr	Wartość		
Początkowa zawartość wilgoci	X_1	kg/kg	0,26
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	–	0,25
Temperatura powietrza otoczenia	T_0	°C	22
Masa materiału w przeliczeniu na suchą masę	m_{sm}	g	120
Wysokość warstwy złoża	h	cm	5
Podciśnienie w komorze	P_{pod}	MPa	0,07
Czas po którym następuje wymiana powietrza	τ_w	h	1
Temperatura powietrza w komorze	T_{p1}	°C	40; 50; 60

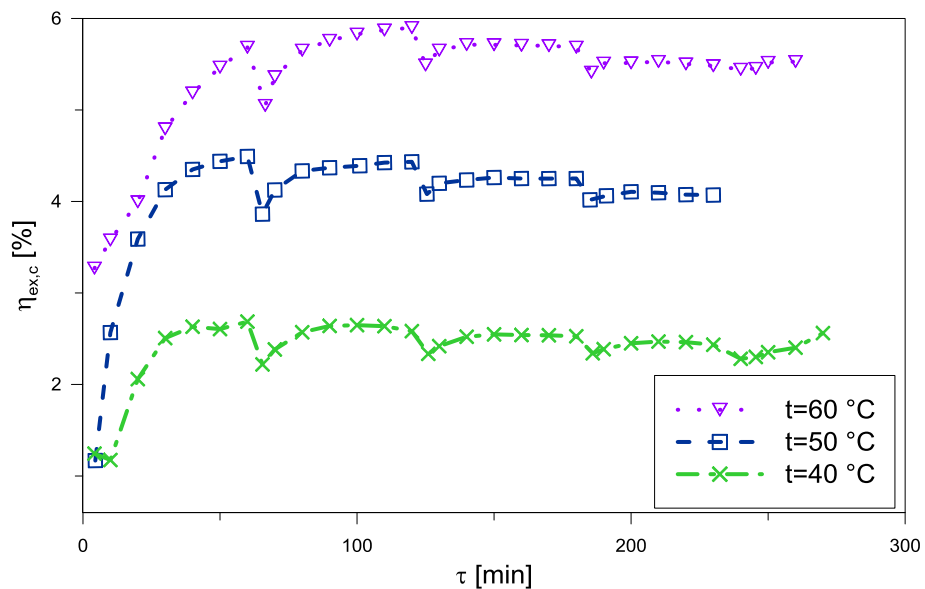


Rys. 8.18 Krzywe suszenia zrębków leszczyny dla różnych temperatur powietrza w komorze suszenia

Krzywe suszenia zrębków leszczyny przedstawiono na rysunku 8.18. Jak można było przypuszczać dla wyższej temperatury uzyskano intensywniejszy ubytek wilgoci.

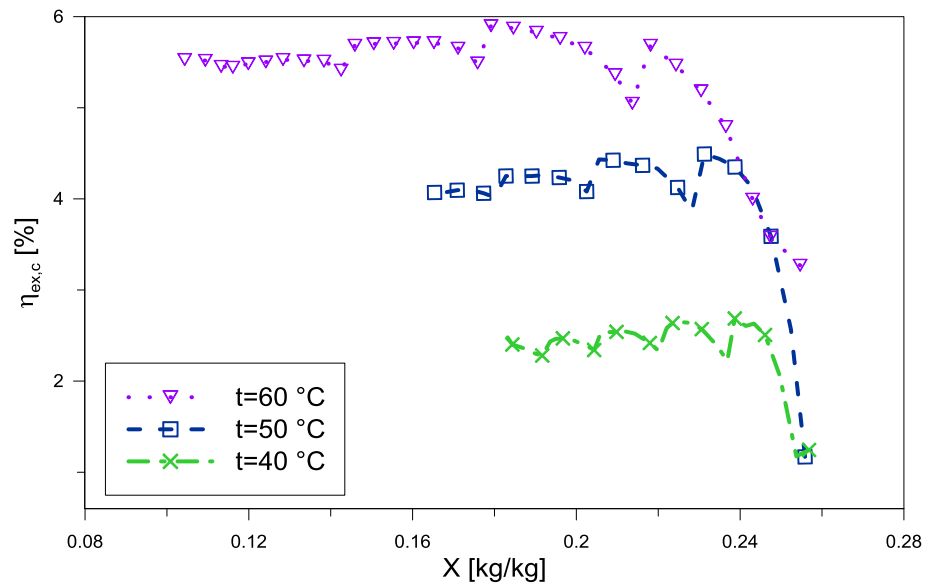


Rys. 8.19 Chwilowe sprawności egzergetyczne procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych temperatur powietrza

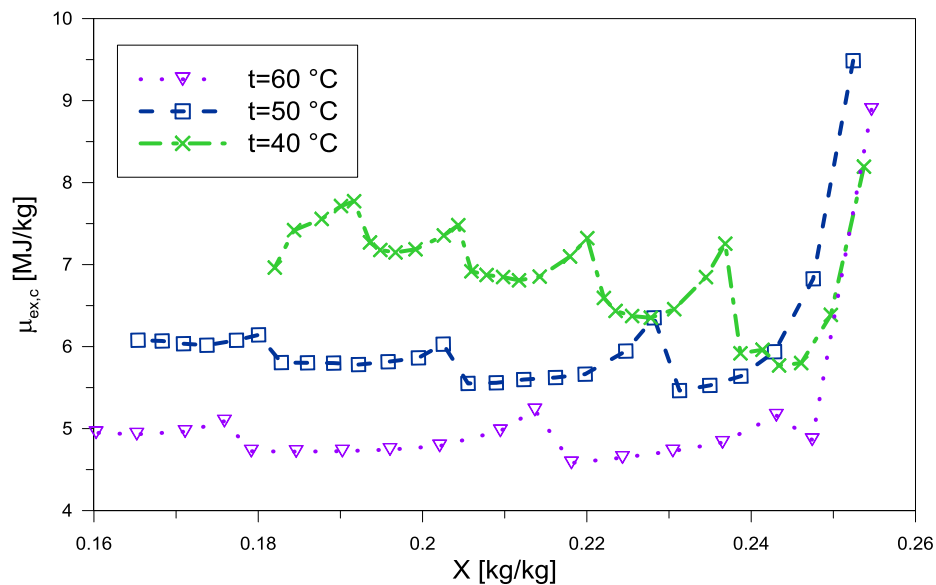


Rys. 8.20 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych temperatur powietrza

Sprawność egzergetyczna przedstawiona na rysunkach 8.19÷8.21 rośnie ze wzrostem temperatury w komorze suszenia. Podniesienie temperatury w komorze suszenia o 10 °C podwyższa sprawność egzergetyczna o ok. 1,5%.



Rys. 8.21 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych temperatur powietrza



Rys. 8.22 Jednostkowe zużycie energii procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych temperatur powietrza

Jednostkowe zużycie energii (rys. 8.22) podobnie jak sprawność egzergetyczna najlepsze wartości osiąga dla procesu suszenia przy temperaturze powietrza w komorze $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, najgorsze zaś przy $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podniesienie temperatury w komorze suszenia o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ obniża jednostkowe zużycie energii średnio o 2 MJ/kg .

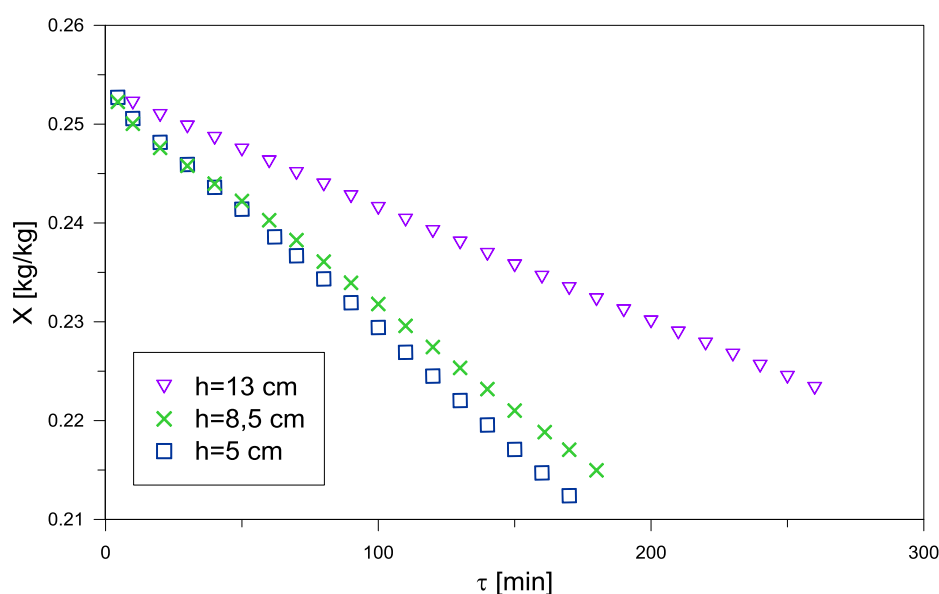
8.6. Wpływ wysokości złoża

Kolejnym ważnym zagadnieniem podczas procesu suszenia jest wpływ wysokości złoża na efektywność suszenia. W tym celu przeprowadzono doświadczenie dla trzech różnych wartości wysokości z zachowaniem tej samej masy materiału suszonego. Parametry doświadczenia zebrano w tabeli 8.6.

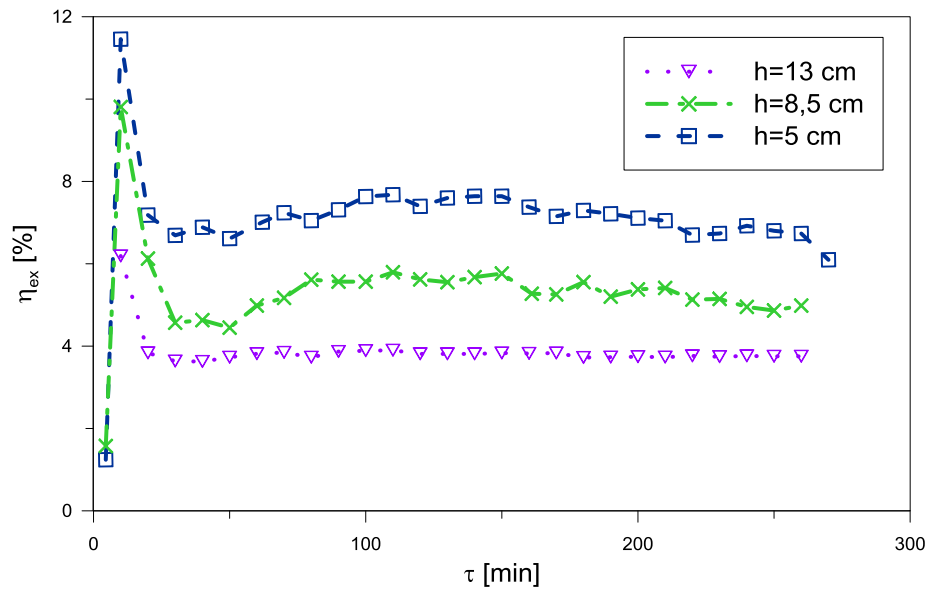
Tabela 8.6 Parametry doświadczenia

Parametr			Wartość
Początkowa zawartość wilgoci	X_1	kg/kg	0,25
Masa materiału w przeliczeniu na suchą masę	m_{sm}	g	300
Wilgotność względna powietrza otoczenia	φ_0	–	0,21
Temperatura powietrza otoczenia	T_0	°C	20
Temperatura powietrza w komorze	T_{p1}	°C	50
Wysokość warstwy złoża	h	cm	5; 8,5; 13
Podciśnienie w komorze	P_{pod}	MPa	0,07

Na rysunku 8.23 przedstawiono krzywe suszenia zrębek leszczyny dla zastosowanych wysokości złoża: 5, 8,5 i 13 cm. Zwiększenie wysokości z 5 do 8,5 cm nieznacznie wydłuża czas suszenia, natomiast zwiększenie wysokości do 13 cm powoduje znaczące wydłużenie czasu suszenia.

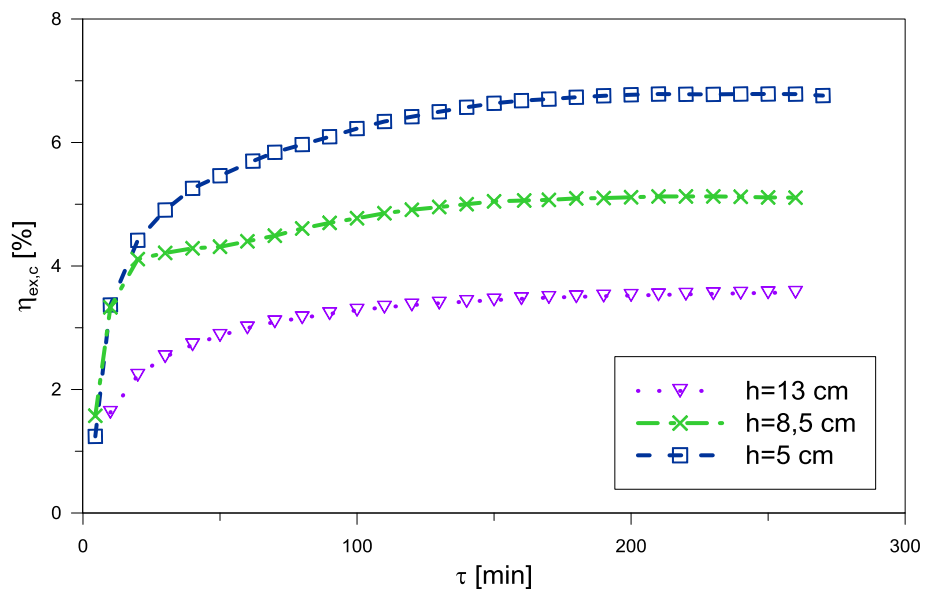


Rys. 8.23 Krzywe suszenia zrębków leszczyny dla różnych wysokości złoża

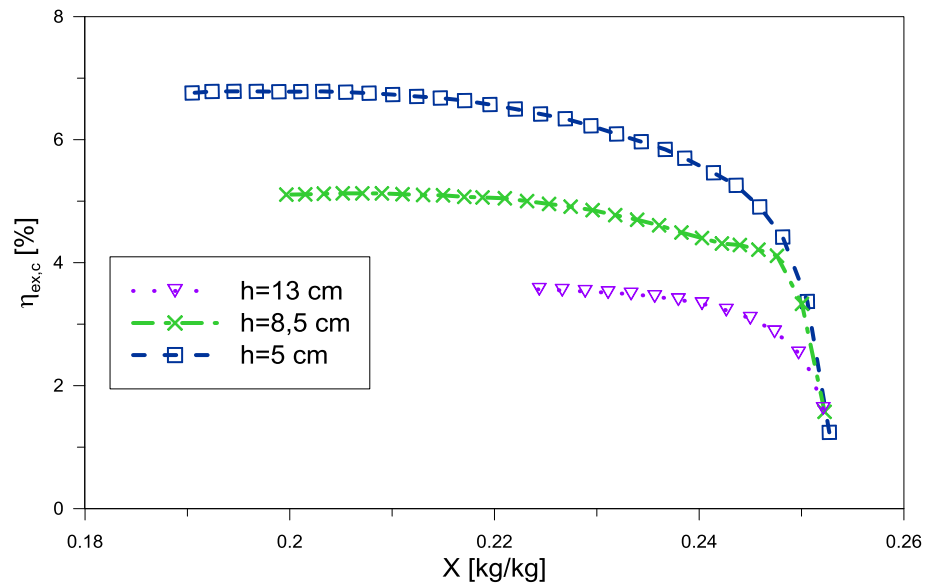


Rys. 8.24 Chwilowa sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyzny dla różnych wysokości złoża

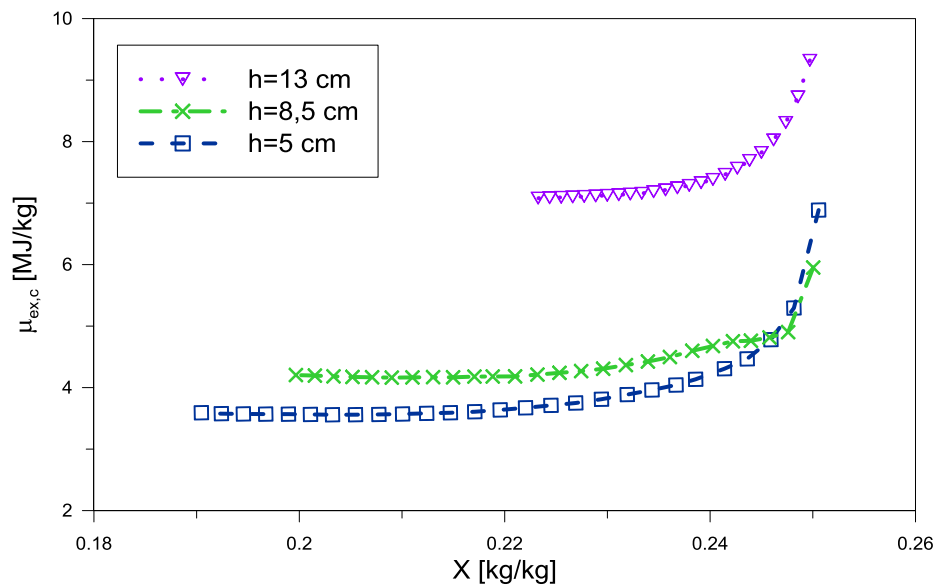
Na rysunku 8.24 przedstawiającą chwilową wartość sprawności egzergetycznej na początku trwania procesu zaobserwować można wzrost sprawności związany z utworzeniem podciśnienia w komorze suszenia.



Rys. 8.25 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyzny dla różnych wysokości złoża



Rys. 8.26 Jednostkowe zużycie energii procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych wysokości złoża



Rys. 8.27 Sprawność egzergetyczna procesu suszenia zrębków leszczyny dla różnych wysokości złoża

Zwiększanie wysokości złoża wpływa negatywnie na wartości sprawności egzergetycznej, jak również na wartości jednostkowego zużycia energii co można zauważyć na rysunkach 8.25÷8.29. Powodem może być utrudniony dostęp powietrza suszącego do niższych partii złoża. Zwiększenie wysokości z 8,5 cm do 13 cm skutkuje wzrostem zużycia energii aż o 3 MJ na każdy kg odparowanej wody.

Podsumowując w rozdziale 8 wykonano analizę egzergetyczną procesu suszenia próżniowego leszczyny pospolitej. Sprawność egzergetyczna oraz jednostkowe zużycie

egzergii suszenia próżniowego jak i kinetyka suszenia zależy od szeregu parametrów. Podczas badania suszenia próżniowego analizowano: parametry powietrza suszącego (ciśnienie i temperaturę), parametry złoża (masa i wysokość) oraz wymianę powietrza w komorze.

W eksperymencie sprawdzano wpływ wymiany powietrza znajdującego się w komorze. Stwierdzono, że wymiana korzystnie wpływa na wydajność egzergetyczną jak i na szybkość suszenia. Najniższe zużycie egzergii i najwyższe sprawności przy danych parametrach realizowanego procesu uzyskano dla wymiany powietrza co 1 h.

Z badań wpływu ciśnienia panującego w komorze wynika, że najkorzystniejsze jest prowadzenie procesu z jak największym podciśnieniem w komorze. Prawdopodobnie optymalna wartość ciśnienia jest większa niż wartości z przyjętego zakresu. Niestety zweryfikowanie tej tezy nie było możliwe z przyczyn technicznych. To zagadnienie będzie przedmiotem dalszych badań.

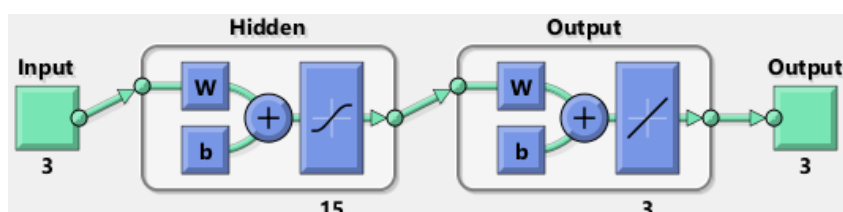
Stwierdzono, że wydajność egzergetyczna rośnie ze wzrostem temperatury i dla badanego zakresu temperatur, najlepsze warunki suszenia uzyskano dla najwyższej temperatury.

Sprawność egzergetyczna zmniejsza się znacznie, zaś wskaźnik jednostkowego zużycia egzergii rośnie, wraz ze zmniejszaniem się zawartości wilgoci w materiale. Przy procesach z wymianą powietrza w komorze występują piki związane ze spadkiem wilgotności powietrza oraz zużyciem prądu zasilającego pompę próżniową.

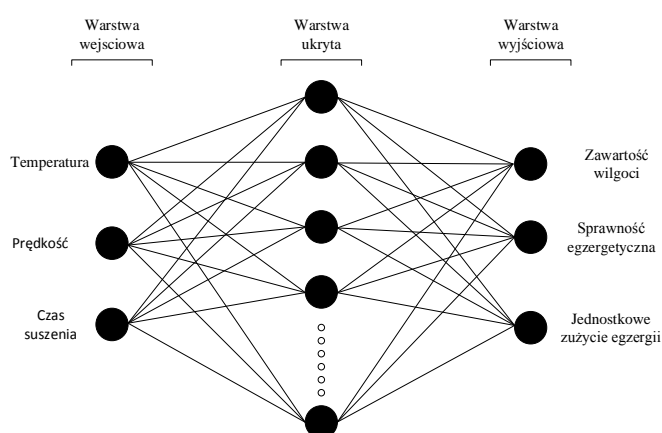
9. Zastosowanie SSN do optymalizacji węzła suszenia w złożu fluidalnym

9.1. Tworzenie sztucznych sieci neuronowych

W celu przeprowadzenia optymalizacji procesu suszenia zastosowano jednokierunkowe wielowarstwowe SSN. Sieci neuronowe zostały zaimplementowane w programie MATLAB (wersja R2015a) z wykorzystaniem dodatku Neural Network Toolbox. Jako algorytmu uczenia dla warstw ukrytych w jednokierunkowej wielowarstwowej sieci neuronowej użyto algorytmu propagacji wstecznej – BP (ang. Back Propagation). Do uczenia warstwy ukrytej sieci neuronowych użyto dostępnych w programie MATLAB algorytmów: Levenberg-Marquardt (LM), Levenberg-Marquardt z regularyzacją Bayes’owską (LMBR), Scaled Conjugate Gradient (SCG). W warstwie ukrytej stosowaną funkcją transferu był tangens hiperboliczny (rys. 9.1).



Rys. 9.1 Schemat sieci neuronowej wygenerowany przez program MATLAB (wersja R2015a)



Rys. 9.2 Model sieci neuronowej 3 wejścia – 3 wyjścia

W pierwszym podejściu dla warstwy wejściowej w modelowaniu użyto trzech parametrów wejściowych (rys. 9.2): temperatury powietrza suszącego, prędkości przepływu powietrza oraz czasu suszenia. W warstwie wyjściowej użyto trzech

parametrów: zawartość wilgoci, sprawność egzergetyczna oraz jednostkowe zużycie energii. Do uczenia i testowania wybranej sieci użyto danych doświadczalnych przedstawionych w podrozdziale 7.2.2.

W celu uzyskania jak najlepszego rezultatu zastosowano trzy algorytmy i różne liczby neuronów w warstwie ukrytej. Do oceny jakości stworzonej sieci użyto dwóch parametrów statystycznych: współczynnika determinacji R^2 oraz błędu średniokwadratowego MSE (ang. Mean Square Error), które definiuje się wyrażeniami (9.1) i (9.2) [127, 128]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9.1)$$

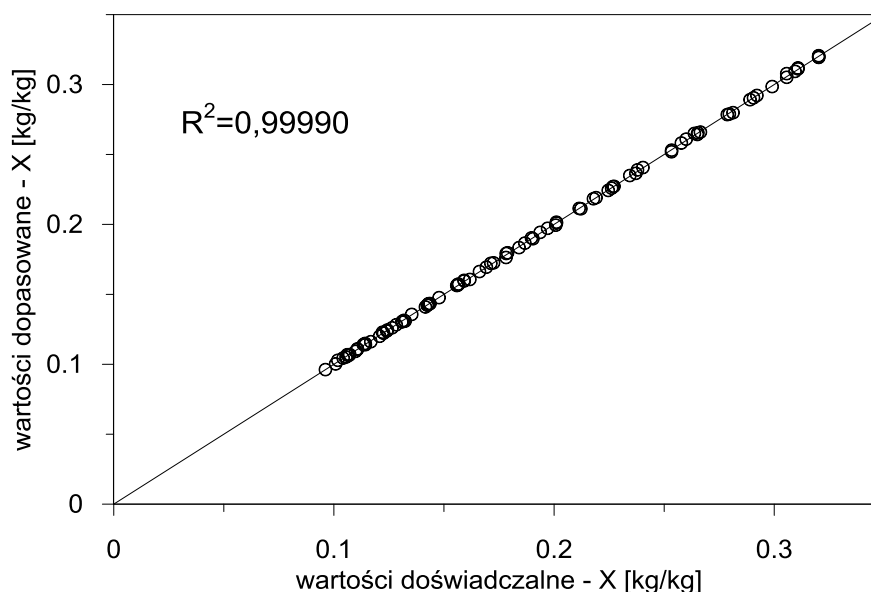
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n} \quad (9.2)$$

gdzie: \hat{x}_i – wartości wyznaczone przez model sieci neuronowych,

x_i – dane doświadczalne,

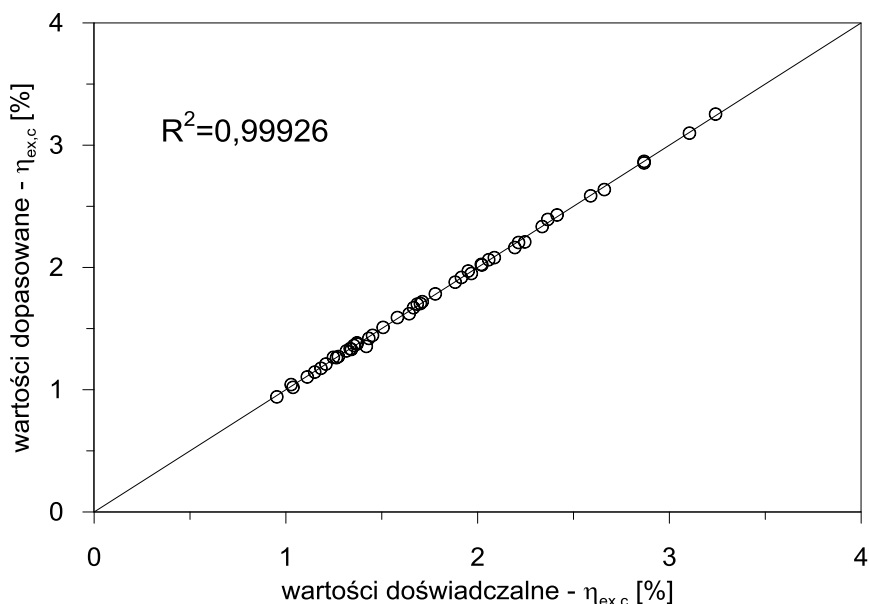
\bar{x} – wartość średnia z danych pomiarowych,

n – ilość pomiarów.

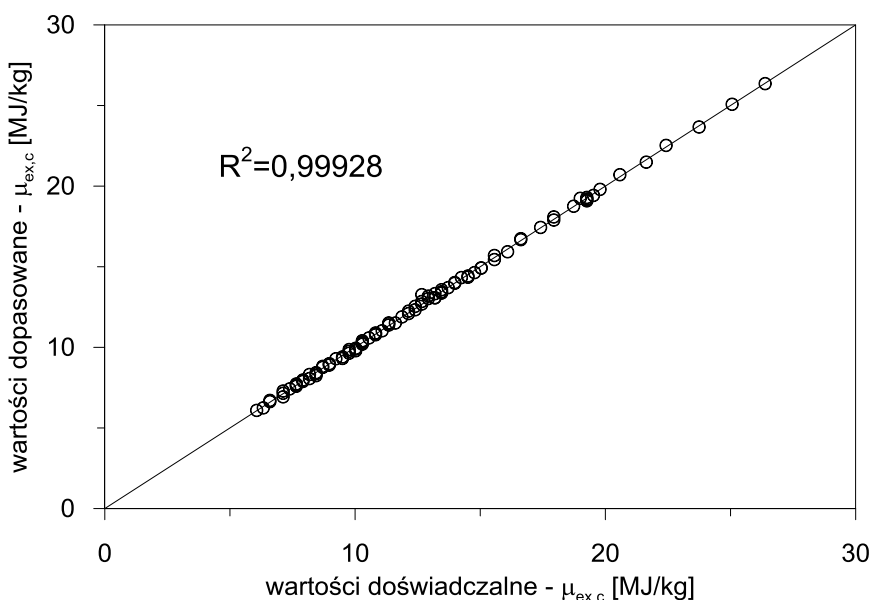


Rys. 9.3 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla zawartości wilgoci

Najlepsze wartości uzyskano dla algorytmu LMBR przy 15 neuronach. Dla tych warunków sporządzono wykresy (rys. 9.3÷9.5) zależności doświadczalnych i przewidywanych przez model SSN. Wykresy te są sporządzone z danych dostarczonych do programu MATLAB, danych na których program uczył się podczas tworzenia sieci. Dla wszystkich parametrów modelowanych wartości R^2 są bliskie jedności.



Rys. 9.4 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla sprawności egzergetycznej



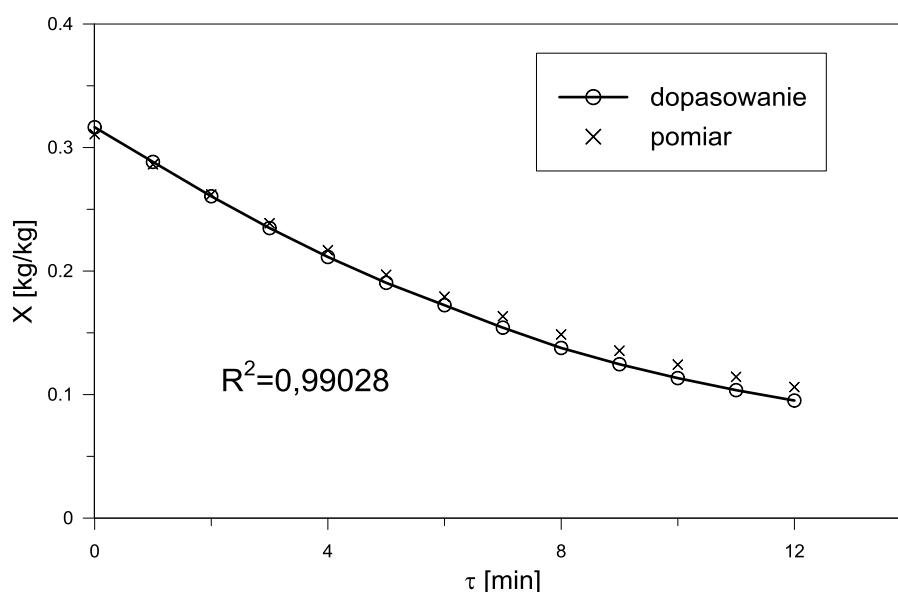
Rys. 9.5 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla jednostkowego zużycia energii

Sporządzone sieci neuronowe przetestowano dla danych, które nie były dostarczane do tworzenia SSN. W tabeli 9.1 zebrano wartości błęd

średniokwadratowego oraz współczynnika determinacji R^2 . Następnie korzystając z tych danych dla LMBR 15 sporządzono wykresy przedstawiające zależności przewidywanych przez sieć z nałożonymi punktami doświadczalnymi kolejno dla: zawartości wilgotności, sprawności egzergetycznej oraz jednostkowego zużycia energii (rys. 9.6÷9.8).

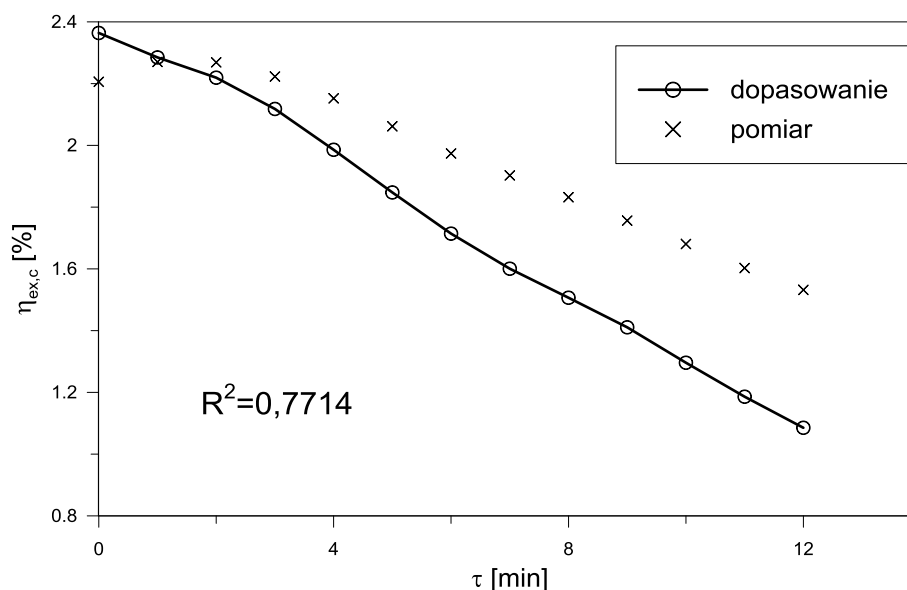
Tabela 9.1 Wartości statystyczne modelu SSN

Pomiar	Algorytm	Liczba neuronów	MSE	R^2
1	LM	5	0,0008	0,9475
2		10	0,0008	0,9508
3		15	0,0025	0,9249
4		20	0,0029	0,7726
5		25	0,0056	0,2598
6	LMBR	5	0,0067	0,9787
7		10	0,0017	0,9162
8		15	0,0035	0,9968
9		20	0,0006	0,9888
10		25	0,0003	0,9938
11	SCG	5	0,5529	0,9289
12		10	0,6350	0,9413
13		15	0,0137	0,9781
14		20	0,0194	0,9206
15		25	0,0010	0,9624

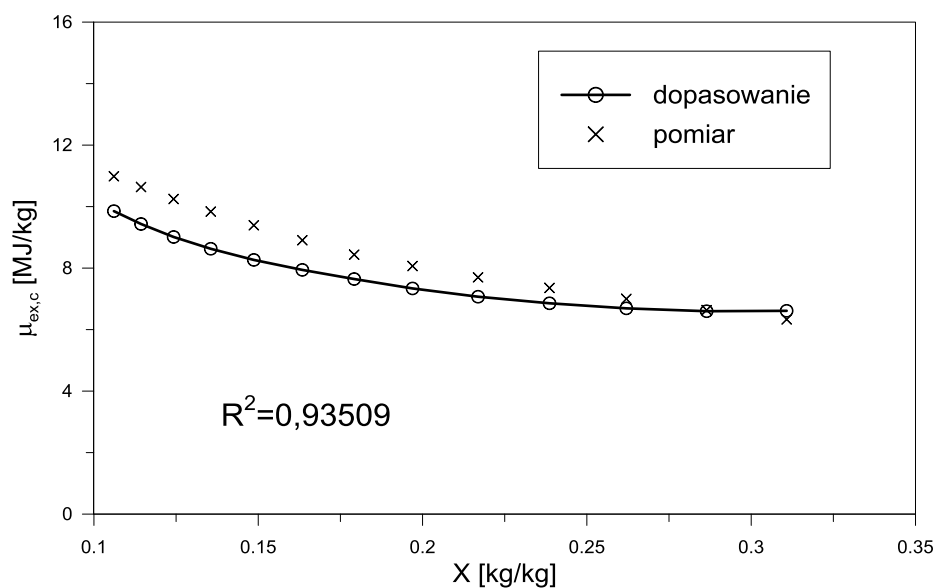


Rys. 9.6 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla zawartości wilgotności w materiale suszonym

Dla zawartości wilgoci (rys. 9.6) uzyskano bardzo dobre wyniki dopasowania, o czym świadczy wysoka wartość współczynnika determinacji. Dla jednostkowego zużycia energii (rys. 9.7) uzyskano wyniki zadowalające, otrzymane punkty nieznacznie różnią się od punktów doświadczalnych oraz zachowany jest charakter zmiany badanego parametru. Natomiast dla sprawności egzergetycznej (rys. 9.8) punkty otrzymane z modelowania odbiegają znacząco od pomiaru, w dodatku charakter zmiany krzywej nie jest zgodny z danymi doświadczalnymi.

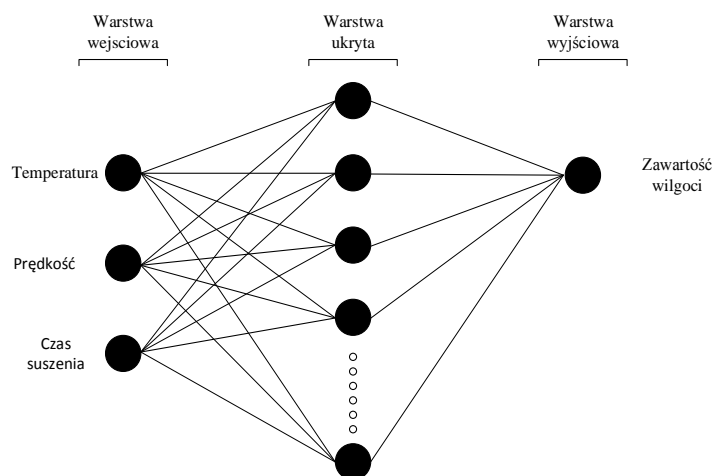


Rys. 9.7 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla sprawności egzergetycznej



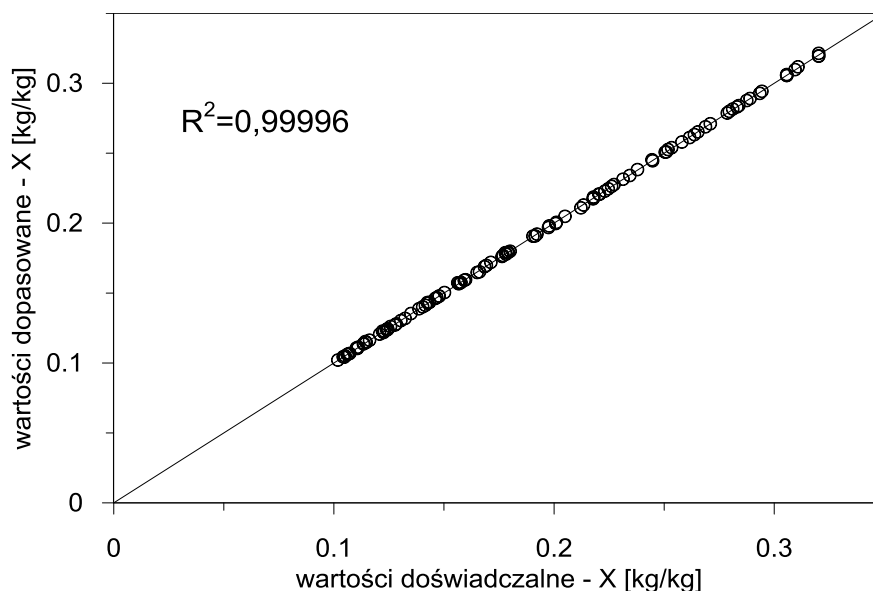
Rys. 9.8 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla jednostkowego zużycia energii

W związku z wynikami dotyczącymi sprawności zdecydowano się na stworzenie trzech sieci z pojedynczymi wyjściami odpowiednio dla zawartości wilgoci (rys. 9.9), sprawności egzergetycznej (rys. 9.12) i jednostkowego zużycia egzergii (rys. 9.15).



Rys. 9.9 Model sieci neuronowej 3 wejścia – 1 wyjście

Analogicznie postępując jak z siecią z trzema wyjściami w celu dobrania jak najkorzystniejszych parametrów sprawdzono trzy algorytmy oraz zakres liczby neuronów od 5 do 25.



Rys. 9.10 Porównanie wartości doświadczone i dopasowane przez model SSN LMBR 15 dla zawartości wilgoci

Dla zawartości wilgoci najwyższy współczynnik determinacji oraz najmniejszy błąd średniokwadratowy uzyskano dla algorytmu LMBR, dla 15 neuronów w warstwie ukrytej. Dla danych dostarczonych jako wejściowe sporządzono wykres zależności

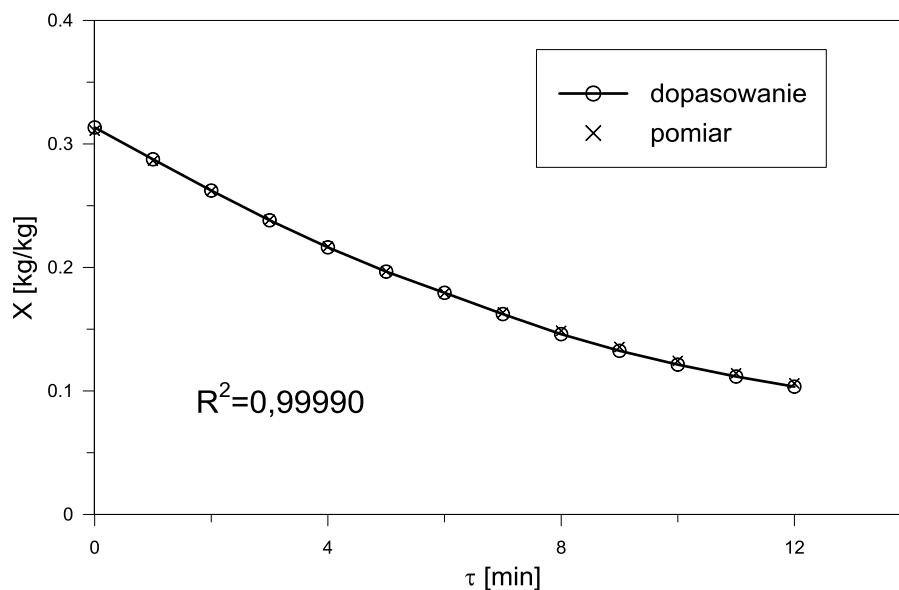
wartości dopasowanych od wartości doświadczalnych. Pomimo, że dla podejścia z trzema wyjściami, sieć dla wartości zawartości wilgoci była bardzo dobrze dopasowana to dla tego podejścia uzyskano podwyższenie wskaźnika R^2 .

Tabela 9.2 Wartości statystyczne modelu SSN

<i>Pomiar</i>	<i>Algorytm</i>	<i>Liczba neuronów</i>	<i>MSE · 10³</i>	<i>R²</i>
1	LM	5	0,0299	0,9990
2		10	0,0306	0,9994
3		15	0,0117	0,9993
4		20	0,0758	0,9963
5		25	0,6405	0,9952
6	LMBR	5	0,1116	0,9878
7		10	0,0083	0,9995
8		15	0,0038	0,9999
9		20	0,0203	0,9998
10		25	0,0282	0,9998
11	SCG	5	0,2114	0,9976
12		10	0,2447	0,9797
13		15	0,0908	0,9856
14		20	1,0974	0,8817
15		25	0,1006	0,9843

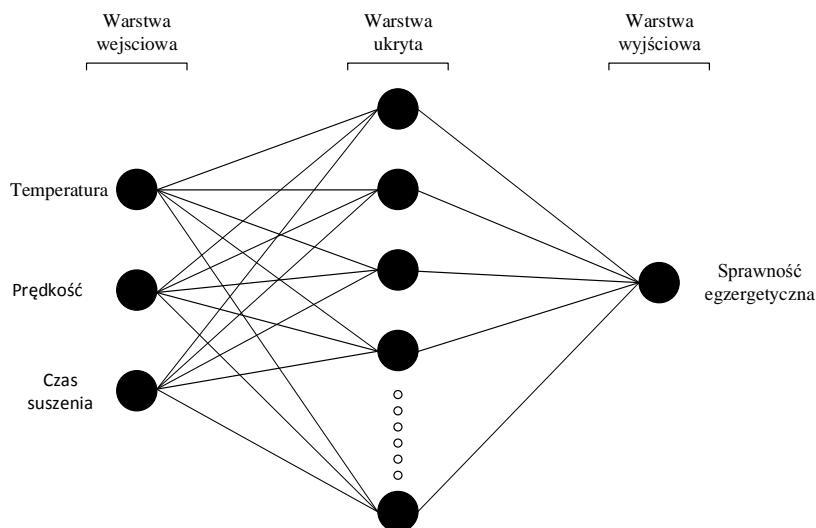
W tabeli 9.2 zebrano dane współczynnika determinacji oraz błędu średniokwadratowego, jak zmieniały się w zależności od wyboru algorytmu i ilości neuronów w warstwie ukrytej. Wyniki te jak i wykres przedstawiony na rysunku 9.11, na którym przedstawiono zależności doświadczalne z naniesionymi danymi wygenerowanymi ze stworzonej SSN, są sporządzone z danych nie biorących udział w tworzeniu sieci. Dla zawartości wilgoci uzyskano niemal 100% zgodność dopasowania wyników uzyskanych ze stworzonej sieci z danymi doświadczalnymi. Dodatkowo policzono współczynnik zmienności *cov* dany wzorem (9.3) [127], który dla danej sieci neuronowej wynosi 1,02%.

$$cov = \frac{\sqrt{MSE}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (9.3)$$



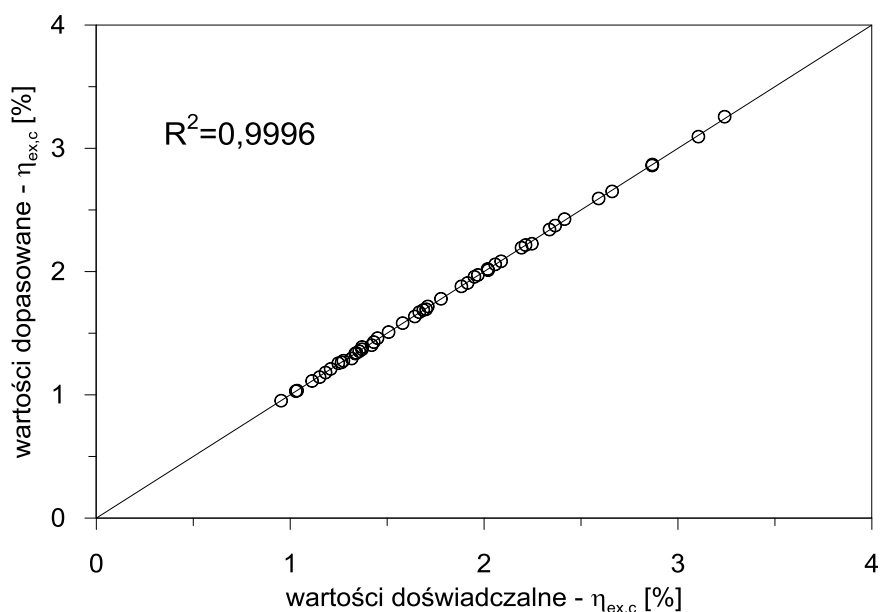
Rys. 9.11 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 15 dla zawartości wilgoci

W drugim kroku stworzono sieć z jednym wyjściem, tym razem dla sprawności egzergetycznej (rys. 9.12). Tym razem dla sprawności uzyskano bardzo dobre wyniki współczynnika determinacji dla danych tworzących sieć, dla algorytmu Levenberg-Marquardt z regularyzacją Bayes’owską dla 13 neuronów w warstwie ukrytej.



Rys. 9.12 Model sieci neuronowej 3 wejścia – 1 wyjście

Analogicznie jak poprzednio sporządzona została tabela 9.3, przedstawiająca wartości współczynnika determinacji i błędu średniokwadratowego, które uzyskano dla wszystkich algorytmów ze zmieniającą się liczbą neuronów.

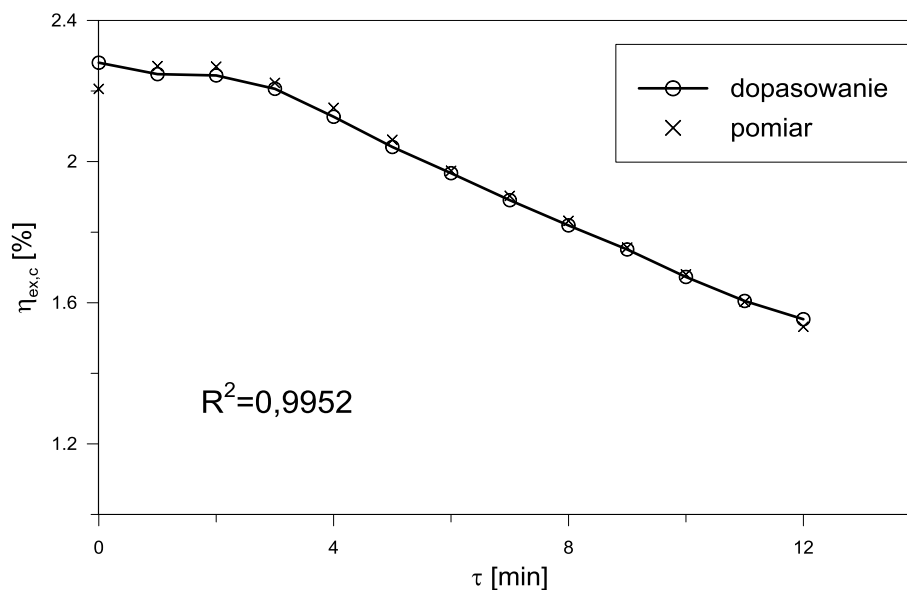


Rys. 9.13 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 13 dla zawartości wilgoci

Tabela 9.3 Wartości statystyczne modelu SSN

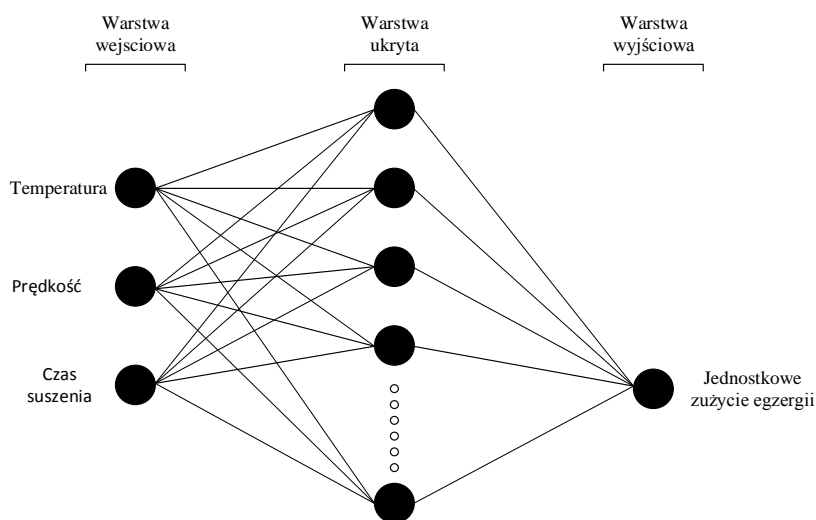
Pomiar	Algorytm	Liczba neuronów	MSE	R^2
1	LM	5	0,0687	0,9763
2		10	0,2840	0,9643
3		15	0,0050	0,9815
4		20	0,0998	0,9732
5		25	0,0185	0,9199
6	LMBR	5	0,5371	0,9859
7		10	0,0037	0,9698
8		13	0,0007	0,9952
9		15	0,0025	0,9900
10		20	0,0059	0,9894
11	25	0,0050	0,9769	
12	SCG	5	0,0497	0,9010
13		10	0,1316	0,9748
14		15	0,0324	0,9293
15		20	0,0838	0,9038
16		25	0,1832	0,1176

Dla sprawności egzergetycznej (rys. 9.14) uzyskano bardzo dobre dopasowanie danych doświadczalnych z danymi wygenerowanymi dzięki stworzonej sieci neuronowej. Współczynnik zmienności wynosi 1,33%.



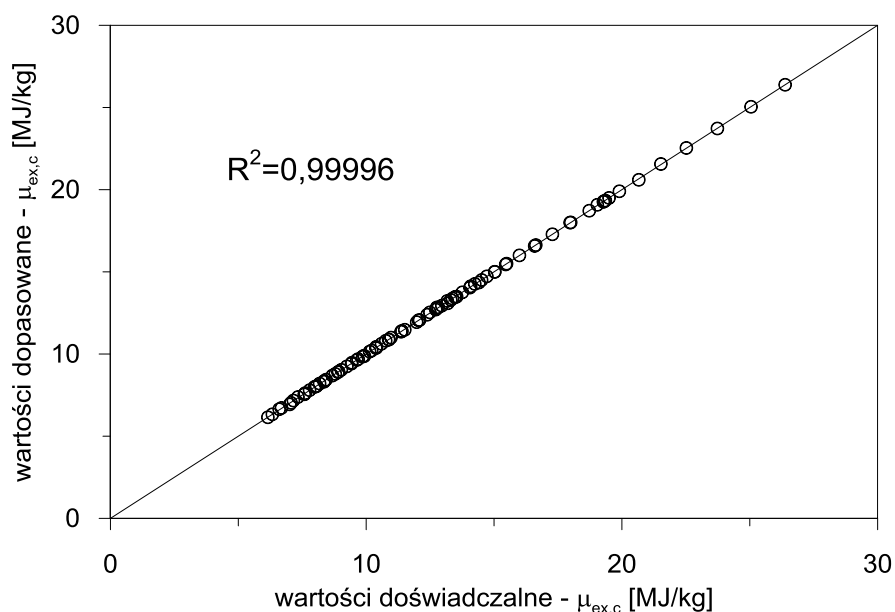
Rys. 9.14 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 13 dla sprawności egzergetycznej

W kolejnym kroku stworzono sieć neuronową z jednym wyjściem, reprezentowanym przez jednostkowe zużycie egzergii (rys. 9.15).



Rys. 9.15 Model sieci neuronowej 3 wejścia – 1 wyjście

Najlepsze warunki uzyskano tym razem dla 17 neuronów z zastosowaniem algorytmu LMBR (tab. 9.4).

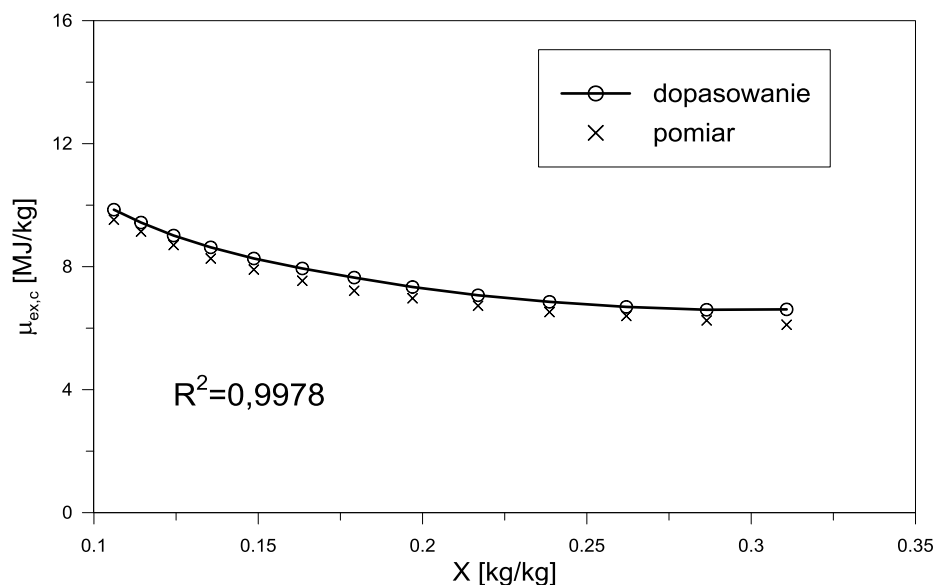


Rys. 9.16 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 17 dla jednostkowego zużycia egzergii

Na rysunku 9.17 przedstawiającym dopasowanie danych z modelu do doświadczalnych dla jednostkowego zużycia egzergii zauważyć można, że zachowany został charakter zmiany przebiegu funkcji, natomiast występuje praktycznie stałe dla całego zakresu odchylenie tych wartości. Współczynnik zmienności dla tej sieci neuronowej wynosi 4,64%.

Tabela 9.4 Wartości statystyczne modelu SSN

Pomiar	Algorytm	Liczba neuronów	MSE · 10 ⁻³	R ²
1	LM	5	814	0,9500
2		10	570	0,9448
3		15	575	0,8366
4		20	1745	0,9375
5		25	695	0,9478
6	LMBR	5	715	0,9742
7		10	291	0,9934
8		15	481	0,9972
9		17	133	0,9978
10		20	418	0,9892
11	25	348	0,9954	
12	SCG	5	876	0,8828
13		10	337	0,7200
14		15	10577	0,9438
15		20	3865	0,0181
16		25	5833	0,0625



Rys. 9.17 Porównanie wartości doświadczalnych i dopasowanych przez model SSN LMBR 17 dla jednostkowego zużycia energii

Najlepszym algorytmem okazał się Levenberg-Marquardt z regularyzacją Bayes’owską ze średnią liczbą neutronów w warstwie ukrytej równą 15.

O korzyściach z zastosowania pojedynczych wyjść świadczy wykres dopasowania danych dla sprawności egzergetycznej (rys. 9.14) oraz wartości współczynników determinacji dla wszystkich parametrów wyjściowych.

9.2. Optymalizacja warunków

Dla przygotowanych sieci neuronowych scharakteryzowanych w rozdziale 9.1, przygotowano skrypty korzystające z tych sieci w celu znalezienia optymalnych warunków suszenia. Przyjęto następującą procedurę postępowania:

- Założono wilgotność docelową 15%.
Wykorzystując stworzoną sieć neuronową do przewidywania zawartości wilgoci wyznaczono parametry wejściowe dla których zawartość wilgoci osiąga wartość $15\% \pm 1\%$. W tym celu napisano i wykorzystano poniższy skrypt. Skrypt iterował dane wejściowe:
 - Prędkość powietrza w zakresie $0,5 \div 2$ m/s z krokiem 0,02 m/s.
 - Czas suszenia w zakresie $5 \div 40$ min z krokiem 0,2 min.
 - Temperatura powietrza w zakresie $45 \div 65$ °C z krokiem 0,2 °C.


```
function [y1] = find_wil_15()
x1 = zeros(100000, 3);
    x1_idx = 1;
    for air_v = 0.5:0.02:2
        for time = 5:0.2:40
            for temp = 45:0.2:65
                test_wilg = wil_15n_br([air_v;time;temp]);
                if (test_wilg(1) > 0.149) &&(test_wilg(1)
                    < 0.151) && x1_idx < 100000
                    x1(x1_idx, :) = [air_v time temp];
                    x1_idx = x1_idx + 1;
                end
            end
        end
    end
    if x1_idx > 99999
        break
    end
end
y1 = x1(1:x1_idx,:);
end
```

- Wykorzystując sieć neuronową do przewidywania zużycia energii z zabranych danych parametrów wejściowych w poprzednim kroku wyznaczono wartości jednostkowego zużycia energii.
- Zabranych danych z wykorzystaniem poniższego skryptu znaleziono minimalne jednostkowe zużycie energii oraz zestaw danych wejściowych dla których to zachodzi.

```
function [y1, best_zuz] = best_zuz(x1)
best_zuz = 1e6;
ret_candidate = x1(1,:);
[num_rows, ~] = size(x1);
    for row_idx = 1:num_rows
        current_zuz = zuz_17n_br(x1(row_idx, :).');
        if current_zuz < best_zuz
            ret_candidate = x1(row_idx, :);
            best_zuz = current_zuz;
        end
    end
y1 = ret_candidate;
end
```

- Następnie wykorzystując sieć neuronową do przewidywania sprawności egzergetycznej wyznaczono wartość sprawności dla zoptymalizowanych warunków.

Można stwierdzić, że najlepsze warunki do suszenia w złożu fluidalnym przy założeniu docelowej zawartości wilgoci na poziomie 15% przy danych warunkach otoczenia to:

- Temperatura powietrza suszącego 55,2 °C.
- Prędkość powietrza 1,36 m/s, co odpowiada liczbie fluidyzacji 2,72.

Dla tych warunków suszenia czas trwania procesu suszenia wynosi 8 min, jednostkowe zużycie energii 7,07 MJ/kg, sprawność egzergetyczna 2,88%. Wyniki te są zgodne z przeprowadzonymi badaniami przedstawionymi w podrozdziale 7.2.2 i potwierdzają możliwość wykorzystania sieci neuronowych do optymalizacji wydajności egzergetycznej procesu suszenia.

Do optymalizacji użyto trzech sieci neuronowych, każda posiadała trzy wejścia i jedno wyjście. Jako wartości wejściowe użyto: temperatura suszenia, prędkość suszenia, czas trwania procesu, zaś na wyjściu znajdowały się: zawartość wilgoci, sprawność egzergetyczna oraz jednostkowe zużycie energii. Dla znalezienia optymalnego modelu SSN sprawdzano trzy różne algorytmy uczenia ukrytych warstw wewnętrznych, dla których sprawdzano różne liczby neuronów. Najlepsze wyniki uzyskano dla algorytmu Levenberg-Marquardt z regularyzacją Bayes'owską z liczbą neuronów 13÷17.

Zaprezentowana weryfikacja z zastosowaniem SSN wykazała poprawność zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym.

Podsumowując można stwierdzić, że jeżeli dysponujemy odpowiednią ilością właściwych danych to jesteśmy w stanie poprawnie nauczyć sieć i wykorzystać tak stworzoną procedurę do przewidywania danych i optymalizacji procesu.

10. Analiza energetyczna i egzergetyczna suszarniczych instalacji przemysłowych

Pomiary przeprowadzono w odniesieniu do węzła suszenia siarczanu amonu z zastosowaniem suszarki wibro-fluidalnej oraz węzła suszenia politrioksanu z wykorzystaniem suszarki kontaktowej. Obydwie instalacje znajdują się na terenie Zakładów Azotowych w Tarnowie – Mościcach wchodzących aktualnie w skład Grupy Azoty S.A. Węzeł suszenia siarczanu amonu jest częścią instalacji do otrzymywania siarczanu amonu, natomiast węzeł suszenia granulatu politrioksanu jest częścią składową produkcji poliformaldehydu, który sprzedawany jest pod nazwą handlową Tarnoform[®].

10.1. Siarczan amonu

W celu zabrania danych niezbędnych do sporządzenia bilansów energetycznego i egzergetycznego wykonano szereg pomiarów na instalacji przemysłowej suszenia siarczanu amonu. Pomiary przeprowadzono w okresie letnim w dniach od 21–23 sierpnia 2012 r. oraz dla porównania wpływu warunków zimowych na pracę instalacji, wykonano pomiary także w dniach od 6–7 grudnia 2012 r.

Siarczan amonu stosowany jest głównie jako kwaśny nawóz, zalecany na glebach o odczynie obojętnym lub zasadowym. Przydatność wynika z obecności azotu amonowego i siarki siarczanowej. Składniki mineralne w takiej postaci są łatwiej przyswajalne dla roślin [129].

Siarczan amonu $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ jest białym krystalicznym ciałem bez zapachu. Jest substancją niepalną, a także wykazuje brak właściwości wybuchowych i utleniających. W warunkach normalnych całkowicie stabilny. Może wchodzić w reakcje z utleniaczami i alkaliami. W temperaturze powyżej 280 °C następuje rozkład z wydzieleniem amoniaku, trójtlenku siarki oraz gazów trujących i żrących. Wilgotny produkt powoduje korozję metali [130]. W tabeli 10.1 przedstawiono dane fizykochemiczne siarczanu amonu.

Tabela 10.1 Właściwości fizykochemiczne siarczanu amonu [130, 131]

<i>Parametr</i>		<i>Wartość</i>
Masa molowa	kg/kmol	132,22
Gęstość	kg/m ³	1,769
Rozpuszczalność w 20 °C	g/l	760
Temperatura topnienia	°C	280
Temperatura rozkładu	°C	280
Gęstość usypowa	kg/dm ³	0,86÷0,98
pH (50 g/l H ₂ O, 20 °C)	–	5÷6
Temperatura wrzenia	°C	brak
Ciepło rozpuszczania w 18 °C	kJ/mol	9,96
Ciepło krystalizacji	kcal/mol	2,6
Ciepło właściwe	kJ/kg·K	0,0021t+1,3697

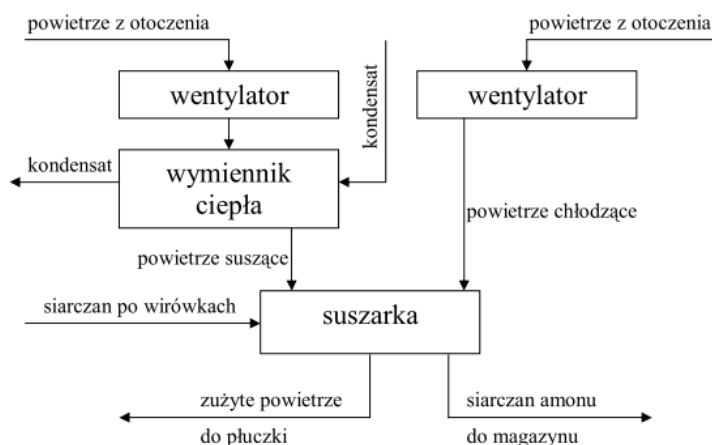
10.1.1. Opis węzła suszenia

Węzeł suszenia siarczanu amonu składa się z dwóch równoległych linii technologicznych A i B z wibro-fluidalnymi suszarko-schładzarkami. Wszystkie urządzenia wchodzące w skład węzła suszenia znajdują się w krytej hali.

W skład węzła suszenia zarówno linia A i B wchodzi według kolejności pracy (rys. 10.1):

- wentylator nadmuchowy powietrza suszącego,
- nagrzewnica powietrza,
- suszarko-schładzarka,
- wentylator nadmuchowy powietrza chłodzącego.

Suszenie zaczyna się od zrzutu odwirowanych kryształów z wirówki. Do suszenia oraz zapewnienia warstwy fluidalnej dostarczane jest pod sito gorące powietrze. W pierwszej komorze zasilanej gorącym powietrzem, wilgotność siarczanu amonu osiąga około 0,3% (mas.). Produkt o temperaturze około 50 °C przechodzi do komory z chłodnym powietrzem, gdzie osiąga temperaturę około 35 °C. Wyszuszony i schłodzony produkt zsypuje się na przenośnik ślimakowy, a następnie przenośnik taśmowy. Transport materiału zapewniany jest wibracjami wywoływanych przez niewyważone silniki [131].



Rys. 10.1 Schemat blokowy dla pojedynczej linii suszenia siarczanu amonu [131]

10.1.2. Metody i punkty pomiarowe

Instalację badawczą udało się wyposażyć dodatkowo w aparaturę kontrolno-pomiarową wysokiej jakości, analogiczną do urządzeń stosowanych w badaniach laboratoryjnych.

Większość stosowanych przyrządów pomiarowych pochodziło z Firmy TESTO GmbH&Co., co zapewniało wysoką dokładność pomiarów badanych wielkości procesowych. Przyrząd TESTO 452 umożliwiał jednoczesny pomiar temperatury prędkości przepływu oraz wilgotności względnej.

Dokładność pomiarów wynosiła:

- temperatury $\pm 0,1$ °C,
- prędkości $\pm 0,05$ m/s,
- wilgotności względnej $\pm 2\%$.

Przyrząd wyposażony jest w drukarkę termiczną, co ułatwia akwizycję i archiwizację danych pomiarowych.

W badaniach wykorzystano także przyrząd TESTO 112 z odpowiednią sondą do pomiaru temperatury powierzchni płaskich oraz z sondą do pomiaru temperatury materiałów sypkich o dokładności $\pm 0,2$ °C.

Do wyznaczenia średniej prędkości przepływu powietrza wyznaczono punkty pomiarowe dla dyfuzorów wentylatorów nadmuchowych powietrza suszącego oraz chłodzącego. Rozmieszczenie tych punktów wyznaczono metodą Log-Czebyszewa, polegającej na podzieleniu przekroju kanału na pierścienie o równej powierzchni [132].

Wilgotność siarczanu amonu przed i po suszeniu określano w zakładowym laboratorium. Natężenie przepływu odczytano z wykresów sporządzonych w sterowni.

W sterowni również odczytano natężenie objętościowe oraz temperatury kondensatu, a także natężenie prądu niewyważonych silników oraz wentylatorów powietrza suszącego oraz chłodzącego.

W tabeli 10.2 przedstawiono zebrane dane pomiarowe.

Ze względu na rozmieszczenie urządzeń nie istnieje możliwość pomiaru natężenia masowego siarczanu przed wlotem do każdej suszarki. Pomiar przepływu kryształu wykonywany jest w miejscu gdzie łączą się strumienie z obydwu suszarek. Dlatego do stworzenia bilansu przyjęto tu założenia opierające się na wieloletnich obserwacjach prowadzonych przez pracowników obsługujących instalację. W instalacji pracują trzy wirówki oraz dwie suszarki, 1/3 całkowitego strumienia siarczanu amonu przepływa przez suszarkę A, a 2/3 przez suszarkę B. W wyjątkowych sytuacjach (większe obciążenie instalacji bądź awaria wirówki) proporcje mogą być inne.

Problemem okazał się także brak spadku temperatury kondensatu po opuszczeniu wymiennika. Kondensat ten wykorzystywany jest ponownie w procesie krystalizacji. W związku z tym do poprawnego sterowania całą instalacją, temperaturę kondensatu mierzy się przed wykorzystaniem go do procesu krystalizacji.

Tabela 10.2 Zestawienie zebranych danych pomiarowych

Parametr			21.08.2012		22.08.2012		23.08.2012		06.12.2012		07.12.2012	
			A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Wilgotność powietrza na wlocie do wentylatora	φ_0	%	61,0	60,5	53,2	53,0	67,2	73,6	36,0	33,6	38,2	36,9
Temperatura (powietrza) otoczenia w hali	t_0	°C	26,9	27,2	28,4	28,2	25,4	23,3	10,7	11,9	10,4	10,5
Temperatura powietrza suszącego na wlocie do suszarki	t_{ps1}	°C	53,9	56,7	58,9	56,8	57,2	54,2	36,9	46,7	37,2	46,7
Temperatura powietrza chłodzącego na wlocie do suszarki	t_{pch1}	°C	33,1	38,0	37,1	40,3	32,6	39,2	16,2	26,2	15,1	27,8
Zawartość wilgoci w siarczanie na wlocie	X_1	%	0,58	0,54	0,70	0,78	0,68	0,65	0,85	1,11	0,85	0,98
Temperatura siarczanu amonu na wlocie do suszarki	t_{m1}	°C	67,0	64,0	71,9	67,6	66,7	69,2	71,5	63,8	76,2	75,5
Zawartość wilgoci w siarczanie na wylocie	X_2	%	0,22	0,20	0,23	0,20	0,18	0,16	0,28	0,29	0,23	0,25
Temperatura siarczanu amonu na wylocie z suszarki	t_{m2}	°C	31,9	44,8	34,5	43,2	31,4	37,3	14,1	16,5	17,1	29,1
Wilgotność powietrza na wylocie z suszarki	φ_2	%	28,7	23,3	30,7	25,8	30,4	29,2	20,0	36,8	25,0	19,7
Temperatura powietrza na wylocie z suszarki	t_{p2}	°C	44,2	50,7	42,8	49,5	43,5	46,1	34,0	30,5	30,3	42,2
Prędkość powietrza suszącego przed wentylatorem	u_{ps}	m/s	5,30	5,50	5,40	7,44	5,0	7,0	6,5	6,0	5,0	6,0
Prędkość powietrza chłodzącego przed wentylatorem	u_{pch}	m/s	11,0	13,2	11,5	14,0	11,0	12,0	11,0	14,0	11,0	13,0
Natężenie prądu wentylatora powietrza suszącego	$I_{siln,ps}$	A	35,3	37,0	34,9	37,7	34,3	36,5	41,2	33,5	41,2	32,7
Temperatura kondensatu na wejściu do wymiennika ciepła	t_{kon0}	°C	79,8	79,8	80,2	80,2	80,2	80,2	76,5	76,5	74,9	74,9
Temperatura kondensatu na wyjściu z wymiennika ciepła	t_{kon1}	°C	72,0	72,0	71,5	71,5	70,7	70,7	67,1	67,1	67,3	67,3
Natężenie objętościowe kondensatu	V_{kon}	m ³ /h	27,2	27,2	25,2	25,2	24,2	24,2	28,2	28,2	29,5	29,5
Temperatura zewnętrzna suszarki	t_k	°C	38,2	35,9	36,9	37,7	35,6	36,1	21,9	27,6	23,1	27,6
Natężenie prądu niewyważonych silników	I_{siln}	A	10,1	14,8	10,2	14,8	10,3	14,8	9,8	14,7	9,9	14,7
Natężenie prądu wentylatora powietrza chłodzącego	$I_{siln,pch}$	A	58,4	60,8	57,3	60,9	57,6	61,0	59,5	63,2	60,2	63,6
Masowe natężenie siarczanu amonu na wlocie do suszarki	G_{m1}	t/h	20,0	40,0	18,3	36,7	15,7	31,3	18,0	27,0	15,0	30,0
Średnica kanału powietrza suszącego	D_{ps}	m					0,74					
Średnica kanału powietrza chłodzącego	D_{pch}	m					0,61					

10.1.3. Wyniki bilansu energetycznego i egzergetycznego

Zebrane dane pozwoliły na sporządzenie bilansów energetycznych i egzergetycznych procesu suszenia siarczanu amonu. Wyniki bilansu energii zebrano w tabelach 10.3 i 10.4, w tabelach 10.5 i 10.6 zebrano wyniki bilansu egzergetycznego suszarki A i B, natomiast w tabelach 10.7 i 10.8 zebrano wyniki bilansu egzergetycznego węzła suszenia A i B.

Sprawności energetyczne, są niższe niż sprawności egzergetyczne dla komory suszenia. Niska sprawność energetyczna suszarki wynika z rozwiązania konstrukcyjnego, tj. suszenia z jednoczesnym chłodzeniem. Uwzględnienie energii powietrza chłodzącego w obliczeniach wpływa znacząco na wartości sprawności. Parametry powietrza chłodzącego nie różnią się znacząco od powietrza otoczenia, więc egzergia tego powietrza jest stosunkowo niska w związku z tym, w obliczaniu sprawności egzergetycznej wpływ ten nie jest aż tak znaczący. Stąd sprawność egzergetyczna jest większa. Sprawności egzergetyczne całego węzła uwzględniającego egzergię zużytą przez wentylatory, silniki oraz dostarczoną w wymienniku ciepła są niższe.

Dla bilansu energetycznego komór suszenia, w okresie zimowym, zaobserwować można – mimo wyższych strat ciepła do otoczenia – znacząco wyższe sprawności i znacząco niższe zużycie energii na odparowanie kg wody. Związane jest to z niską zawartością wilgoci w powietrzu susząco-chłodzącym. Taką samą zależność, choć już nie tak znaczące różnice, można zauważyć dla bilansu egzergetycznego komór suszenia. Natomiast po sporządzeniu bilansu egzergetycznego dla całego węzła suszenia sprawności i jednostkowe zużycie egzergii osiągają zbliżone wartości. Związane jest to ze zwiększonymi stratami egzergii podczas wymiany ciepła. Bilansowanie całego węzła suszenia w porównaniu do zbilansowania samej komory daje dokładniejszy obraz zużycia egzergii w procesie.

Tabela 10.3 Wyniki bilansu energetycznego dla suszarki A

<i>Pozycja bilansu</i>			21.08	22.08	23.08	6.12	7.12
Strumień ciepła materiału na wlocie	Q_{m1}	kW	569,6	566,1	467,6	554,4	495,7
Strumień ciepła powietrza suszącego na wlocie	Q_{ps1}	kW	215,5	227,0	212,6	140,6	109,6
Strumień ciepła powietrza chłodzącego na wlocie	Q_{pch1}	kW	270,6	288,6	269,4	103,6	100,2
Strumień ciepła materiału na wylocie	Q_{m2}	kW	255,7	254,5	196,3	99,2	100,6
Strumień ciepła powietrza na wylocie	Q_{p2}	kW	558,6	560,8	549,4	387,3	326,3
Strumień ciepła zużyty na odparowanie	Q_{par}	kW	49,9	59,7	54,3	71,1	64,4
Strumień ciepła strat do otoczenia	$Q_{str,k}$	kW	191,5	206,7	190,2	241,0	214,2
Sprawność energetyczna	η_e	%	10,3	11,6	11,6	29,1	30,7
Jednostkowe zużycie energii	μ_e	MJ/kg	24,4	21,6	22,2	8,6	8,1

Tabela 10.4 Wyniki bilansu energetycznego dla suszarki B

<i>Pozycja bilansu</i>			21.08	22.08	23.08	6.12	7.12
Strumień ciepła materiału na wlocie	Q_{m1}	kW	1083	1061	873,2	736,5	984,7
Strumień ciepła powietrza suszącego na wlocie	Q_{ps0}	kW	231,6	303,7	285,5	158,3	159,1
Strumień ciepła powietrza chłodzącego na wlocie	Q_{pch1}	kW	349,1	364,8	315,8	188,2	184,4
Strumień ciepła materiału na wylocie	Q_{m2}	kW	731,2	644,9	537,2	176,4	348,6
Strumień ciepła powietrza na wylocie	Q_{p2}	kW	723,9	842,4	715,3	480,9	561,2
Strumień ciepła zużyty na odparowanie	Q_{par}	kW	94,3	147,4	106,5	153,3	151,7
Strumień ciepła strat do otoczenia	$Q_{str,k}$	kW	114,3	94,8	115,7	272,4	266,7
Sprawność energetyczna	η_e	%	16,2	22,0	17,7	44,2	44,2
Jednostkowe zużycie energii	μ_e	MJ/kg	15,4	11,3	14,1	5,7	5,7

Tabela 10.5 Wyniki bilansu egzergetycznego dla suszarki A

<i>Pozycja bilansu</i>			21.08	22.08	23.08	6.12	7.12
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex _{m1}	kW	20,9	22,6	20,1	44,2	43,2
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex _{ps1}	kW	7,00	7,86	7,62	8,72	6,86
Strumień egzergii powietrza chłodzącego na wlocie	Ex _{pch1}	kW	7,12	7,61	7,16	7,31	7,28
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex _{m2}	kW	0,35	0,47	0,39	0,15	0,51
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex _{p2}	kW	3,45	2,75	2,81	8,78	6,26
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex _{par}	kW	4,13	5,49	5,22	5,99	5,57
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	Ex _{str,k}	kW	6,95	5,67	6,27	9,10	9,20
Strumień egzergii degradowanej	Ex _{deg}	kW	20,2	23,7	20,2	36,2	35,8
Sprawność egzergetyczna	η _{ex,k}	%	29,2	35,5	35,3	37,4	39,4
Jednostkowe zużycie egzergii	μ _{ex,k}	MJ/kg	0,35	0,33	0,35	0,31	0,27

Tabela 10.6 Wyniki bilansu egzergetycznego dla suszarki B

<i>Pozycja bilansu</i>			21.08	22.08	23.08	6.12	7.12
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex _{m1}	kW	35,3	37,2	36,7	48,9	84,5
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex _{ps1}	kW	9,96	13,1	13,2	12,8	13,3
Strumień egzergii powietrza chłodzącego na wlocie	Ex _{pch1}	kW	13,2	14,1	12,8	15,5	19,9
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex _{m2}	kW	8,33	5,59	7,64	0,45	7,49
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex _{p2}	kW	7,56	8,35	7,78	11,2	19,9
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex _{par}	kW	8,48	12,8	10,1	16,7	17,2
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	Ex _{str,k}	kW	3,21	2,91	4,80	14,4	15,2
Strumień egzergii degradowanej	Ex _{deg}	kW	30,9	34,8	32,4	34,4	53,3
Sprawność egzergetyczna	η _{ex,k}	%	36,6	47,0	38,7	59,1	60,2
Jednostkowe zużycie egzergii	μ _{ex,k}	MJ/kg	0,26	0,22	0,31	0,21	0,22

Tabela 10.7 Wyniki bilansu egzergetycznego dla węzła suszenia A

<i>Pozycja bilansu</i>			21.08	22.08	23.08	6.12	7.12
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex _{m1}	kW	20,9	22,6	20,1	44,2	43,2
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex _{ps0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii powietrza chłodzącego na wlocie	Ex _{pch0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii zużywany przez niewyważone silniki	Ex _{sil}	kW	4,02	4,06	4,11	3,90	3,96
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza suszącego	Ex _{sil,ps}	kW	14,1	13,9	13,7	16,4	16,4
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza chłodzącego	Ex _{sil,pch}	kW	23,3	22,8	22,9	23,7	24,0
Strumień egzergii kondensatu na wejściu	Ex _{kon1}	kW	67,4	59,7	64,3	110	112
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex _{m2}	kW	0,35	0,47	0,39	0,15	0,51
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex _{p2}	kW	3,45	2,75	3,81	8,78	6,26
Strumień egzergii kondensatu na wyjściu	Ex _{kon2}	kW	49,7	42,0	44,8	82,6	88,1
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex _{par}	kW	4,13	5,49	5,22	5,99	5,57
Strumień strat egzergii do otoczenia przez obudowę	Ex _{str,k}	kW	6,95	5,67	6,27	9,10	9,20
Strumień egzergii degradowanej	Ex _{deg}	kW	65,1	66,7	55,7	92,0	89,4
Sprawność egzergetyczna	η _{ex}	%	6,99	9,88	8,66	8,34	8,23
Jednostkowe zużycie egzergii	μ _{ex}	MJ/kg	2,96	2,45	2,78	2,53	2,63
Sprawność egzergetyczna wymiennika ciepła	η _{ex,wym}	%	19,3	21,4	20,7	15,9	18,6

Tabela 10.8 Wyniki bilansu egzergetycznego dla węzła suszenia B

<i>Pozycja bilansu</i>			21.08	22.08	23.08	6.12	7.12
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	35,3	37,2	36,7	48,9	84,5
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex_{ps0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii powietrza chłodzącego na wlocie	Ex_{pch0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii zużywany przez niewyważone silniki	Ex_{sil}	kW	5,90	5,88	5,88	5,86	5,87
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza suszącego	$Ex_{sil,ps}$	kW	14,7	15,0	14,5	13,3	13,0
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza chłodzącego	$Ex_{sil,pch}$	kW	24,2	24,3	24,3	25,2	25,3
Strumień egzergii kondensatu na wejściu	Ex_{kon1}	kW	66,6	60,2	69,7	106	111
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	8,33	5,59	7,64	0,45	7,49
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex_{p2}	kW	7,56	8,35	7,78	11,2	19,9
Strumień egzergii kondensatu na wyjściu	Ex_{kon2}	kW	49,1	42,4	49,3	79,2	88,3
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	8,48	12,8	10,1	16,7	17,2
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	3,21	2,91	4,80	14,4	15,2
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	70,2	60,6	71,6	77,7	91,8
Sprawność egzergetyczna	η_{ex}	%	13,6	20,3	15,4	23,3	25,7
Jednostkowe zużycie egzergii	μ_{ex}	MJ/kg	1,66	1,07	1,53	1,14	1,10
Sprawność egzergetyczna wymiennika ciepła	$\eta_{ex,wym}$	%	19,3	21,4	20,7	15,9	18,6

Dodatkowo należy zauważyć wpływ stopnia obciążenia suszarki na sprawności oraz wskaźniki jednostkowego zużycia energii lub egzergii. Suszarka B zarówno dla okresu letniego jak i zimowego wykazuje wyższe sprawności oraz niższe zużycie energii i egzergii. Obrazuje to jak ważne jest maksymalne wykorzystanie możliwości zainstalowanych urządzeń. Praca urządzenia poniżej swoich możliwości zwiększa końcowy jednostkowy koszt wytwarzania produktu

W przypadku analizowanego węzła suszenia siarczanu amonu podczas modernizacji zamontowano obecne suszarki z dodatkową rezerwą na wypadek zwiększenia produkcji. Przed modernizacją węzeł składał się z sześciu suszarek bębnowych, gdzie czynnikiem suszącym były spaliny gazu ziemnego [133]. Ważne jest dobieranie urządzeń nie tylko do obecnych warunków produkcji, ale należy także przewidzieć jej zmiany w przyszłości. Pozwoli to uniknąć bardzo dużych kosztów inwestycyjnych związanych z ponowną modernizacją instalacji dla potrzeb zwiększonej produkcji.

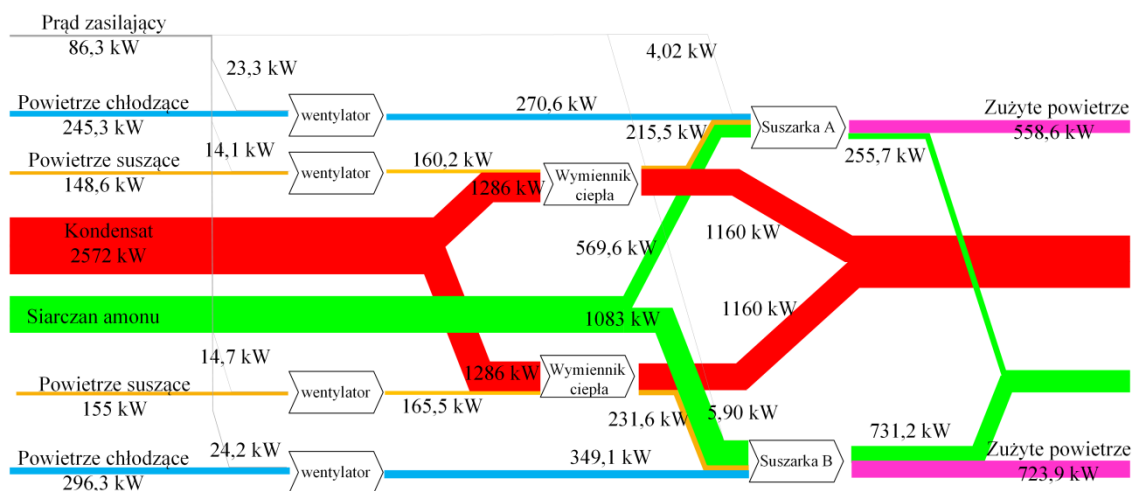
Wyniki przedstawione w tabelach dotyczących pozycji bilansu egzergetycznego samej komory suszenia (tab. 10.5, 10.6) wskazują, że zużywana egzergia na odparowanie będąca efektem użytecznym procesu suszenia wynosi średnio 12,2% dla suszarki A, zaś 17,3% dla suszarki B w stosunku do całkowitej egzergii dostarczonej do komory suszenia. Największe straty egzergii związane są z nieodwracalnością procesu i wynoszą średnio aż 60,1% A, zaś 49,7% dla suszarki B.

W odniesieniu do wyników przedstawionych w tabelach 10.7 oraz 10.8 dotyczących pozycji bilansu egzergetycznego całego węzła suszenia zużywana egzergia na odparowanie wynosi średnio 3,5% dla suszarki A, zaś 7,4% dla suszarki B w stosunku do całkowitej egzergii dostarczonej do komory suszenia. Straty egzergii związane są z nieodwracalnością procesu i wynoszą średnio aż 48,0% dla A, zaś 43,0% dla suszarki B.

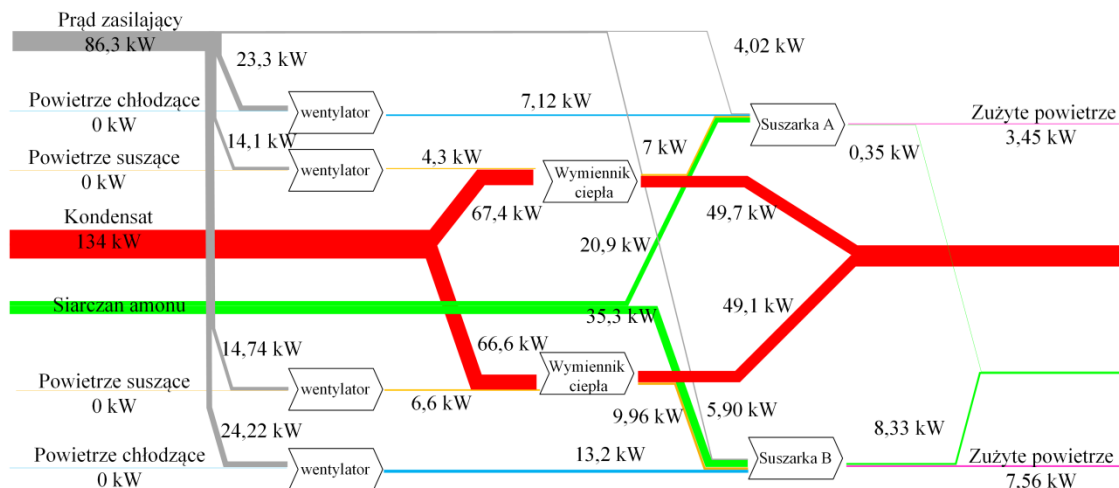
Przepływ masy, energii i egzergii dla pracującej instalacji najlepiej przedstawić za pomocą wykresów pasmowych. Ten sposób prezentacji wyników wykonanych obliczeń pozwala na zauważenie strat oraz ich wielkości podczas realizacji danego

procesu. W tym podrozdziale zaprezentowano (rys. 10.2÷10.11) przepływy energii i egzergii dla węzła suszenia siarczanu amonu dla dni, w których wykonywane były pomiary.

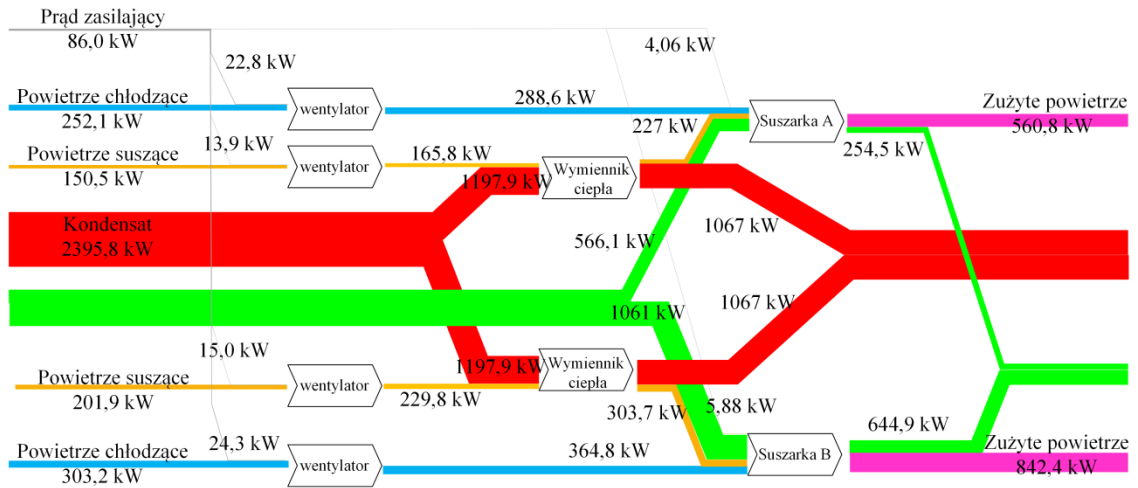
Na zamieszczonych wykresach szerokość pasm przepływającej energii jest równa 1/10 szerokości pasm przepływającej egzergii.



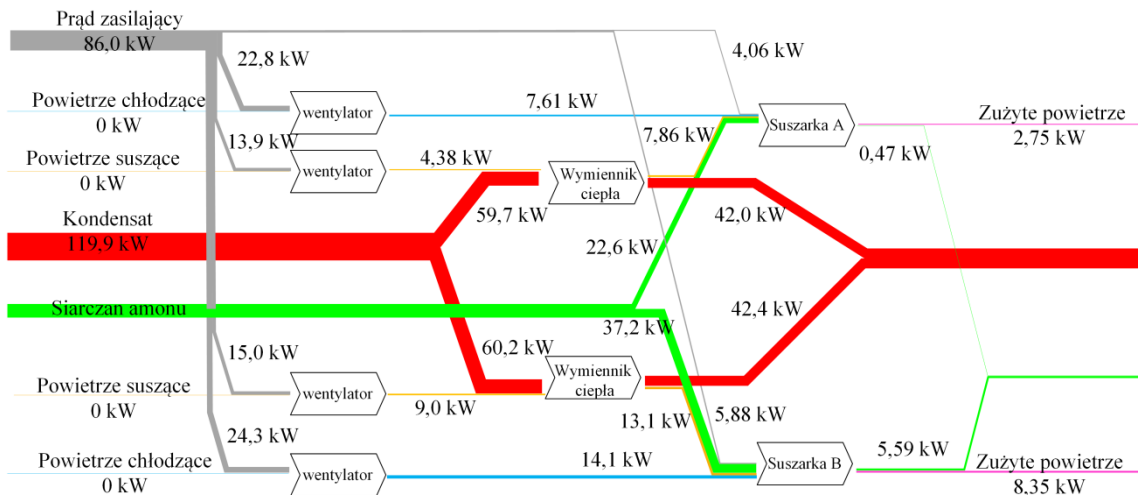
Rys. 10.2 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 21.08.2012



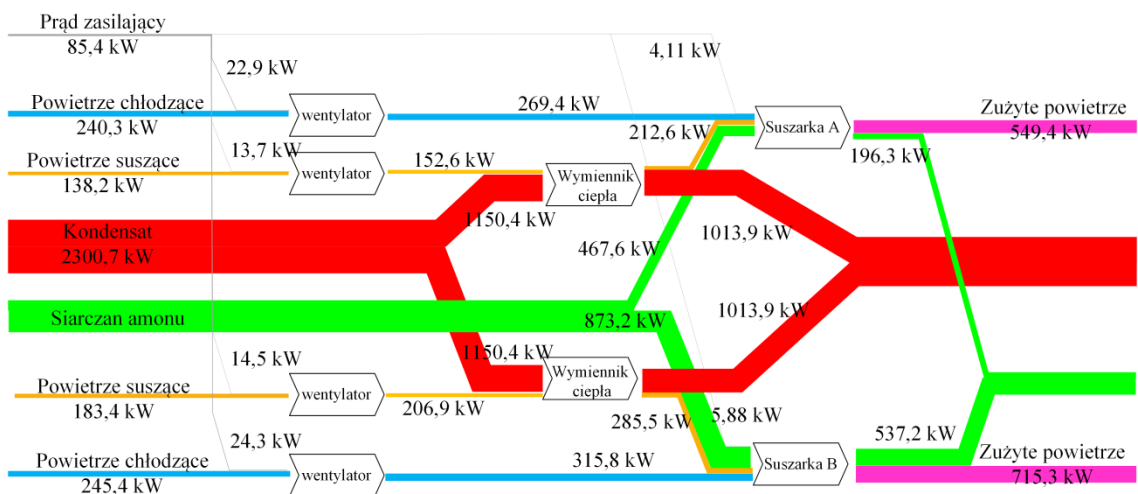
Rys. 10.3 Przepływ egzergii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 21.08.2012



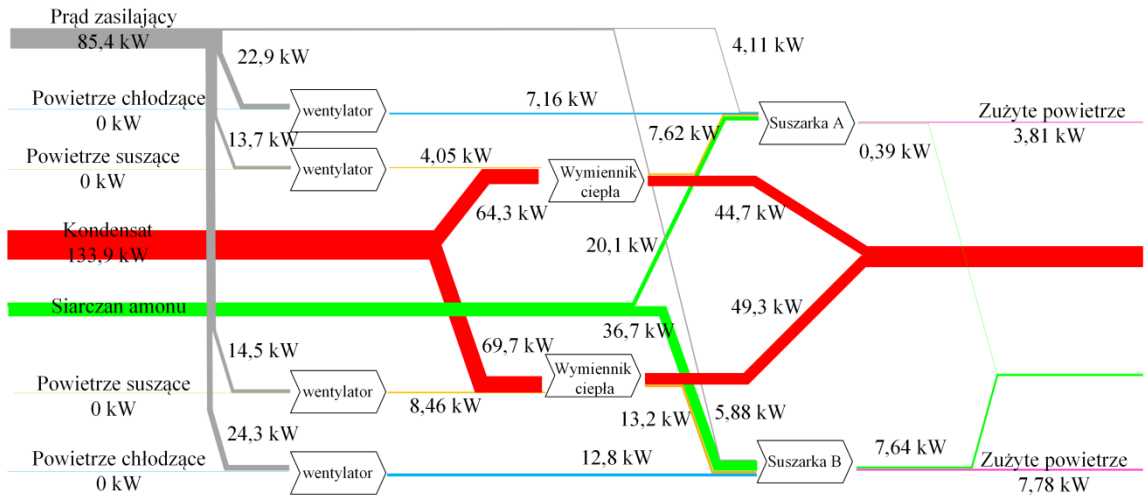
Rys. 10.4 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 22.08.2012



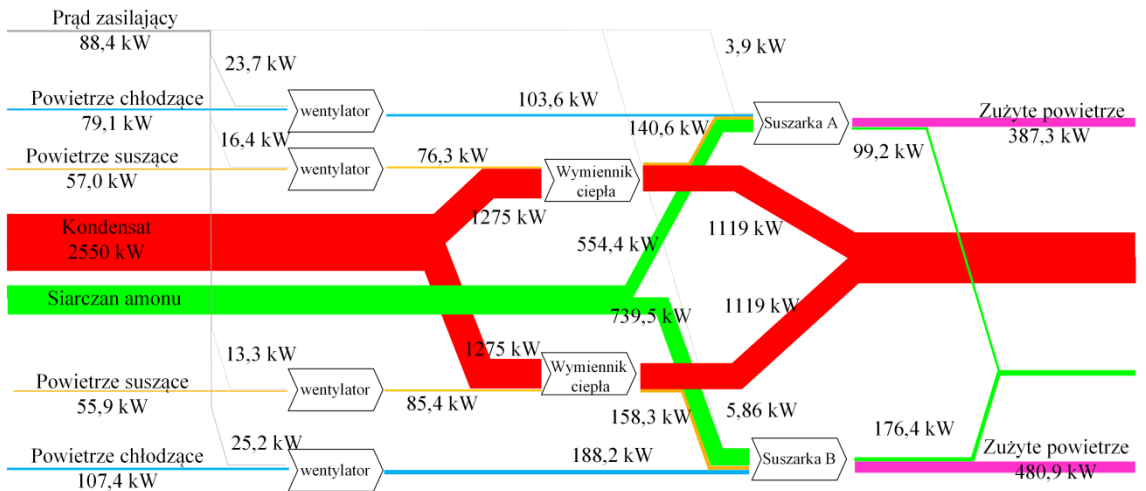
Rys. 10.5 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 22.08.2012



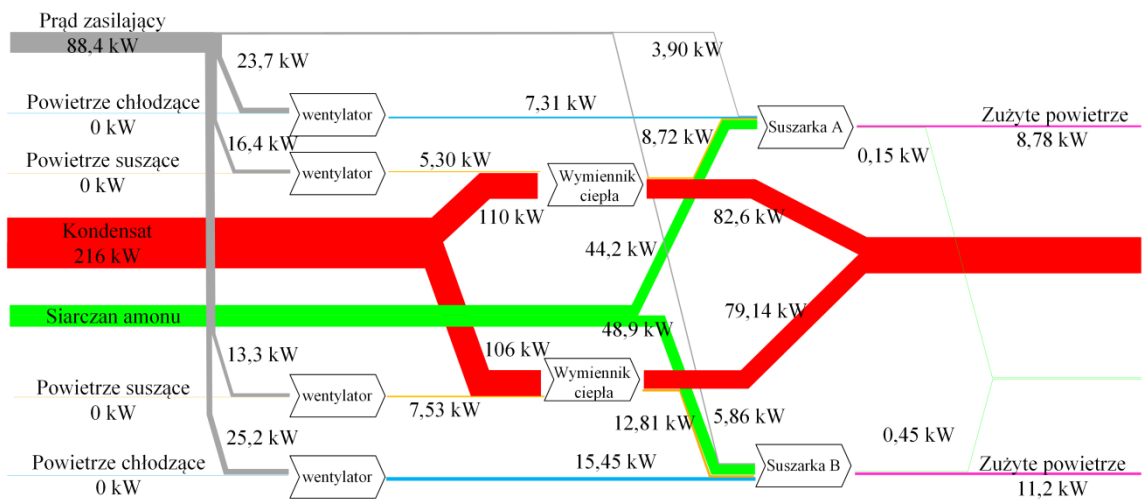
Rys. 10.6 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 23.08.2012



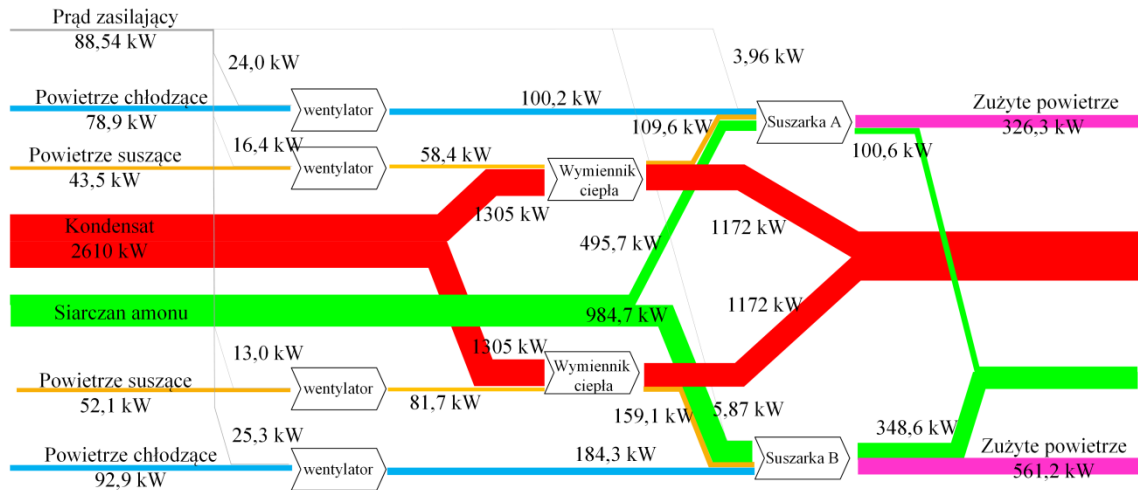
Rys. 10.7 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 23.08.2012



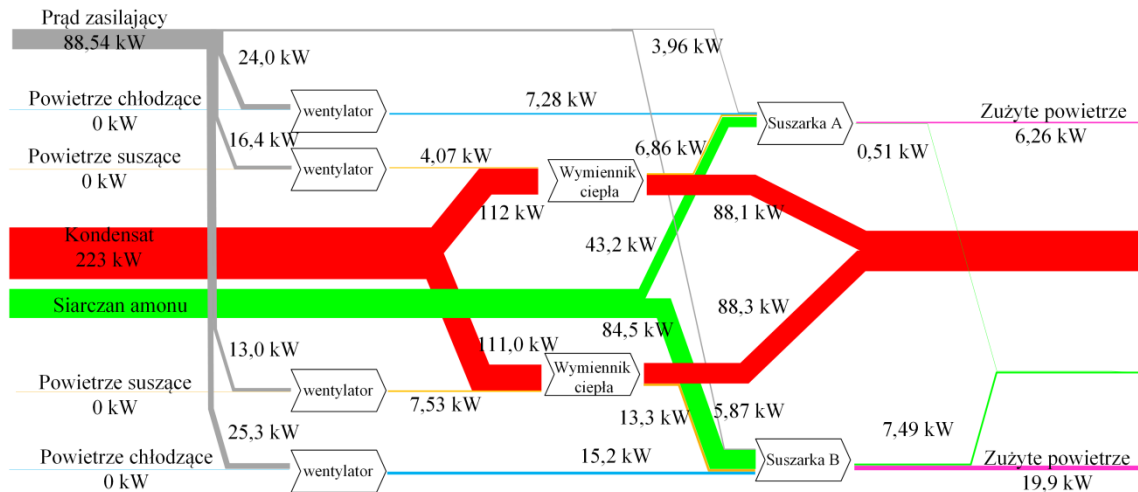
Rys. 10.8 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 06.12.2012



Rys. 10.9 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 06.12.2012



Rys. 10.10 Przepływ energii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 07.12.2012



Rys. 10.11 Przepływ egzergii dla węzła suszenia siarczanu amonu w dniu 07.12.2012

Za pomocą szerokości pasm zostały przedstawione poszczególne wartości składników bilansu. Na rysunkach 10.2, 10.4, 10.6, 10.8, 10.10 przedstawione zostały składniki klasycznego bilansu energetycznego, który uznaje wszystkie rodzaje energii za równoważne. Natomiast na rysunkach 10.3, 10.5, 10.7, 10.9, 10.11 zobrazowane zostały składniki bilansu egzergetycznego.

Porównując wykresy pasmowe można zauważyć różnicę pomiędzy podejściem do definicji energii i egzergii, która skutkuje zmianą proporcji szerokości poszczególnych pasm. Najwyraźniej zmianę tą widać na przykładzie szerokości pasma odpowiadającego za zużycie prądu.

Wykres sporządzony dla strumieni egzergii pozwala zauważyć spore znaczenie prądu zasilającego silniki wentylatorów, co za tym idzie stratę egzergii związaną z nieodwracalnością nadawania odpowiedniej prędkości powietrzu suszącemu i chłodzącemu.

Przy takim rozwiązaniu konstrukcyjnym suszarko-schładzarki niskie wartości egzergii powietrza sugerują, że dyskusyjna jest recyrkulacja powietrza, pomimo dość wysokich wartości energii.

Największą egzergią jak i energię wylotową zaobserwować można dla kondensatu, który w rozwiązaniu konstrukcyjnym zawracany jest do procesu

10.2. Politrioksan

W celu wyznaczenia składników bilansów energetycznego i egzergetycznego wykonano pomiaru na pracującej instalacji przemysłowej suszenia politrioksanu. Pomiary przeprowadzono w dniach 18–24 września 2012 r.

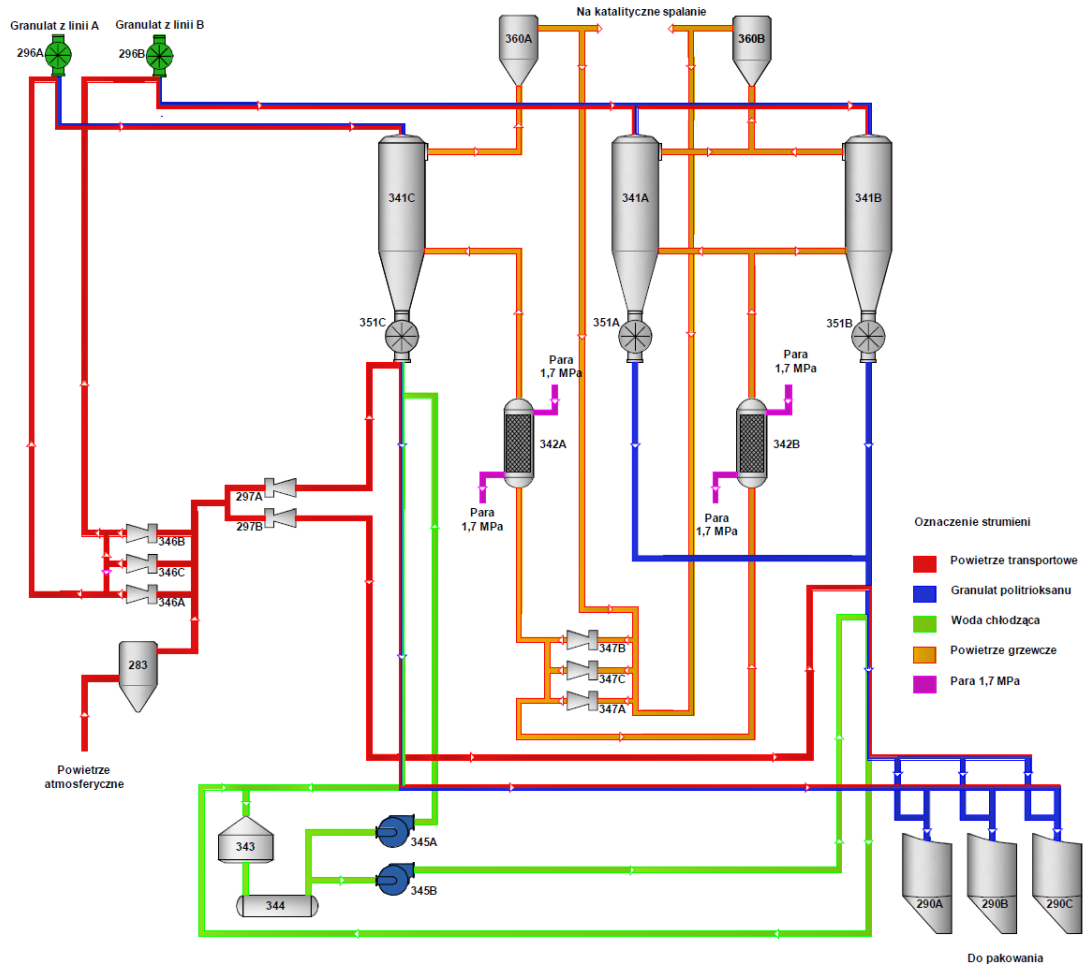
10.2.1. Opis węzła suszenia

W węźle zastosowano układ trzech pionowych suszarek silosowych o budowie cylindrycznej (rys. 10.12). Dwie z nich (A i B) w linii B, mają objętość $4,45 \text{ m}^3$ i wysokość blisko 4,3 m, są one zdolne przyjąć ładunek rzędu 3,5 tony (gęstość usypowa 830 kg/m^3). Trzecia suszarka (C) w linii A, ma objętość blisko 9 m^3 i zdolna jest przyjąć 7 tonowy załadunek. Wszystkie aparaty pracują w cyklu ciągłym. Jednakże w linii B czasowy czujnik przełącza co około 30 minut dopływ surowca pomiędzy aparatami A i B [134].

Granulat jest suszony poprzez przepływ przez złożę materiału czynnika grzejjego, którym jest podgrzane do około $140 \text{ }^\circ\text{C}$ powietrze. Gaz wprowadzany jest w dolnej części silosu, odbiera z granulatu substancje lotne, u góry miesza się z powietrzem transportującym i kierowany jest do filtro-cyklonu. Złożę materiału, którego minimalna wysokość w celu zapewnienia odpowiednich warunków powinna wynosić około 40% wysokości suszarki, spoczywa na odpowiednich siatkach ochraniających

przed zgrzaniem produktu pod wpływem gorących ścian aparatu. Wilgotny Tarnoform rozprawdany jest za pomocą dystrybutora znajdującego się w górnej części aparatu. Wszystkie suszarki wyposażone są w odpowiednie oprzyrządowanie kontrolne, pozwalające na bieżące monitorowanie parametrów procesu [134].

Podstawowym urządzeniem linii suszenia granulatu jest suszarka. Granulat politriksanu z klasyfikatora transportowany jest pneumatycznie do suszarki. Powietrze świeże do transportu granulatu w ilości ok. 250 m³/h dla każdej linii, zasysane jest z atmosfery poprzez filtr i tłoczone jedną z dmuchaw do podawacza komorowego, z którego zsypany się granulat transportowany jest w strumieniu powietrza do suszarki. W suszarce następuje końcowe suszenie i wygrzewanie, umożliwiające usunięcie z granulatu resztkowego formaldehydu. Czas suszenia wynosi w zależności od obciążenia ok. 5÷7 h. Granulat z dołu suszarki odbierany jest za pomocą podajnika celkowego sterowanego przez regulację poziomu [134].



Rys. 10.12 Schemat węzła suszenia granulatu politriksanu [134]

Obieg powietrza suszącego przez suszarki w ilości łącznej ok. 3300 m³/h wymuszany jest przez dmuchawy. Powietrze ogrzane w podgrzewaczu (ogrzewanie parą wodną 1,7 MPa) podawane jest do suszarki poprzez króciec w dolnej części aparatu. Temperatura powietrza gorącego wynosi 145 °C i jest utrzymywana przez układ regulacji. Zabezpieczenie przed przegrzaniem granulatu stanowi układ blokady wyłączający dopływ pary do podgrzewacza w przypadku wzrostu temperatury powietrza po podgrzewaczu powyżej 150 °C. Po przejściu przez złożę granulatu powietrze wilgotne miesza się w górnej części suszarek ze strumieniem powietrza transportującego granulaty do suszarki. Część strumienia powietrza zmieszanego w ilości ok. 400 Nm³/h i temperaturze ok. 90 °C odprowadzana jest poprzez układ pomiarowy do układu katalitycznego spalania zanieczyszczeń, reszta zawracana jest na ssanie dmuchawy powietrza obiegowego [134].

10.2.2. Metody i punkty pomiarowe

Pomiary temperatury otoczenia oraz granulatu na wlocie i wylocie z suszarek dokonano za pomocą termometru APPA 55II. Próbki do pomiaru temperatury zostały pobrane na sicie przed podajnikiem granulatu do suszarki oraz na króćcu wylotowym z suszarki.

Powietrze suszące będące w obiegu zamkniętym jest mierzone w trzech punktach dla każdej linii, przed wymiennikiem ciepła, przed i za suszarką. Temperatura powietrza transportującego granulaty politrioksanu mierzona jest za wentylatorem.

Temperatury suszarek są to średnie z dwóch wyników mierzona za pomocą termometrów zamontowanych w różnych punktach suszarki.

Wszystkie pomiary temperatur powietrza suszącego, transportującego jak i również temperatury suszarek zostały odczytane w sterowni.

Para technologiczna przepływająca przez wymienniki dostarczana jest z elektrociepłowni rurociągami zakładowymi o ciśnieniu równym 1,7 MPa, o stopniu suchości 90%. Zamontowane wymienniki są identyczne w związku z tym dostarczony strumień dzielony jest po połowie na każdą linię.

Tabela 10.9 Zestawienie zebranych danych pomiarowych dla linii A

<i>Parametr</i>			<i>18.09.2012</i>	<i>20.09.2012</i>	<i>21.09.2012</i>	<i>23.09.2012</i>	<i>24.09.2012</i>
Suszarka					C		
Temperatura granulatu na wlocie	t_{m1}	°C	40,4	36,5	30,5	38,0	40,5
Temperatura granulatu na wylocie	t_{m2}	°C	136	138	141	138	139
Temperatura powietrza przed wymiennikiem	$t_{p,wym1}$	°C	87	97	99	96	108
Temperatura powietrza za wymiennikiem	t_{ps1}	°C	145	145	145	146	146
Temperatura powietrza za suszarką	t_{ps2}	°C	65	65	68	63	75
Temperatura powietrza transportującego	t_{pt}	°C	60	50	53	48	66
Temperatura komory suszarki	t_k	°C	60	60	61,5	59,5	65,5
Temperatura otoczenia	t_0	°C	27	16	21,5	24	29
Zawartość formaldehydu w materiale na wlocie	X_1	%	0,140	0,2194	0,1797	0,2642	0,2438
Zawartość formaldehydu w materiale na wylocie	X_2	%	0,010	0,0136	0,0154	0,0055	0,0049
Zawartość formaldehydu w powietrzu	y	g/m ³	4,2	4,5	4,1	4,2	4,3
Natężenie powietrza suszącego	V_s	Nm ³ /h	1919	2008	1969	1945	1911
Natężenie powietrza na spalanie katalityczne	V_{kat}	Nm ³ /h	322	320	292	303	284
Natężenie granulatu po wysuszeniu	G_{m2}	kg/s	0,1962	0,197	0,194	0,204	0,2014
Natężenie prądu wentylatora powietrza suszącego	I_{ps}	A	45	50	51	53	50
Natężenie prądu wentylatora powietrza transportującego	I_{pt}	A	9,3	10,5	9,7	10,1	9,3
Strumień powietrza transportującego	G_{pt}	kg/h	322	320	292	303	284
Ciśnienie pary	P	MPa			1,7		
Stopień suchości pary na wlocie wymiennika	x_1	%			90		

Tabela 10.10 Zestawienie zebranych danych pomiarowych dla linii B

<i>Parametr</i>			<i>18.09.2012</i>	<i>20.09.2012</i>	<i>21.09.2012</i>	<i>23.09.2012</i>	<i>24.09.2012</i>					
			A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Suszarka												
Temperatura granulatu na wlocie	t_{m1}	°C	55,3	55,5	55,5	55,5	63,6	63,6	56	56	57	57
Temperatura granulatu na wylocie	t_{m2}	°C	130	127	132	133	138,	138	131	133	135	137
Temperatura powietrza przed wymiennikiem	$t_{p,wym1}$	°C	108	108	133	133	110	110	108	108	120	120
Temperatura powietrza na wlocie do suszarki	t_{ps1}	°C	142	142	142	142	144	144	145	145	145	145
Temperatura powietrza za suszarką	t_{ps2}	°C	91	98	92	99	78	80	85	84	91	95
Temperatura powietrza transportującego	t_{pt}	°C	51	51	36	36	41	41	40	40	65	65
Temperatura komory suszarki	t_k	°C	71,5	75	72	75,5	66	67	70	69,5	73	75
Temperatura otoczenia	t_0	°C	28	28	19	19	19	19	22,5	22,5	30	30
Zawartość formaldehydu w materiale na wlocie	X_1	%	0,23	0,23	0,29	0,29	0,29	0,29	0,22	0,22	0,19	0,19
Zawartość formaldehydu w materiale na wylocie	X_2	%	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Zawartość formaldehydu w powietrzu	y	g/m ³	4,2	4,2	4,5	4,5	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,3
Natężenie powietrza suszącego	V_s	Nm ³ /h	1455	1449	1464	1445	1452	1447	1433	1448	1420	1454
Natężenie powietrza na spalanie katalityczne	V_{kat}	Nm ³ /h	322	322	320	320	292	292	303	303	284	284
Natężenie granulatu po wysuszeniu	G_{m2}	kg/s	0,10	0,10	0,07	0,07	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
Natężenie prądu wentylatora powietrza suszącego	I_{ps}	A	42	42	48	48	48	48	48	48	46,5	46,5
Natężenie prądu wentylatora powietrza transportującego	I_{pt}	A	9,3	9,3	10,5	10,5	9,7	9,7	10,1	10,1	9,3	9,3
Strumień powietrza transportującego	G_{pt}	kg/h	322	322	320	320	292	292	303	303	284	284
Ciśnienie pary	P	MPa					1,7					
Stopień suchości pary na wlocie wymiennika	x_1	%					90					

Natężenie granulatu na dla poszczególnych suszarek oszacowano na podstawie dobowych raportów produkcji dla każdego zbiornika w magazynie.

Natężenie powietrza suszącego oraz powietrza kierowanego na katalityczne spalanie mierzono za pomocą rotametrów zamontowanych na instalacji i odczytywano w sterowni.

Natężenie prądu pobieranego przez silniki wentylatorów pracujących w obiegu powietrza suszącego, mierzone jest za pomocą zainstalowanego w układzie amperomierza analogowego o dokładności ± 2 A.

Zawartość formaldehydu w granulacie jest mierzona każdego dnia przez laboratorium zakładowe. Próbki pobierane są podczas każdej zmiany przed wysuszeniem na sicie przed podajnikiem oraz po wysuszeniu przy użyciu króćców zamontowanych na każdej suszarce.

Zawartość formaldehydu w powietrzu wyznaczano w laboratorium zakładowym.

W tabeli 10.9 i 10.10 przedstawiono zebrane dane pomiarowe odpowiednio dla linii A i B.

10.2.3. Wyniki bilansu energetycznego i egzergetycznego

Zebrane dane pozwoliły na sporządzenie bilansów energetycznych i egzergetycznych procesu suszenia politriksanu. Wyniki bilansu energii zebrano w tabelach 10.11÷10.13, w tabelach 10.14÷10.16 zebrano wyniki bilansu egzergetycznego suszarki C, A i B. Do wyznaczenia wydajności energetycznej i egzergetycznej użyto sprawności i wskaźnika jednostkowego zużycia energii i egzergii.

Tabela 10.11 Wyniki bilansu energetycznego dla suszarki C

<i>Pozycja bilansu</i>			<i>18.09</i>	<i>20.09</i>	<i>21.09</i>	<i>23.09</i>	<i>24.09</i>
Strumień ciepła materiału na wlocie	Q_{m1}	kW	95,6	92,5	85,8	97,2	98,3
Strumień ciepła powietrza suszącego na wlocie	Q_{ps1}	kW	102,9	107,5	105,2	104,5	102,8
Strumień ciepła powietrza transportującego	Q_{pt}	kW	1,51	1,45	1,34	1,37	1,35
Strumień ciepła materiału na wylocie	Q_{m2}	kW	124,6	122,4	116,5	127,9	128,7
Strumień ciepła powietrza na wylocie	Q_{p2}	kW	50,1	52,5	53,2	49,1	56,9
Strumień ciepła zużyty na odparowanie	Q_{par}	kW	0,198	0,314	0,247	0,409	0,373
Strumień ciepła strat do otoczenia	$Q_{str,k}$	kW	25,7	26,6	22,7	26,1	17,2
Sprawność energetyczna	η_e	%	0,47	0,85	0,71	1,11	1,32
Jednostkowe zużycie energii	μ_e	MJ/kg	166,9	90,9	108,7	70,1	59,1

Tabela 10.12 Wyniki bilansu energetycznego dla suszarki A

<i>Pozycja bilansu</i>			<i>18.09</i>	<i>20.09</i>	<i>21.09</i>	<i>23.09</i>	<i>24.09</i>
Strumień ciepła materiału na wlocie	Q_{m1}	kW	58,2	40,9	67,7	59,7	58,2
Strumień ciepła powietrza suszącego na wlocie	Q_{ps1}	kW	76,2	76,8	77,0	76,6	76,0
Strumień ciepła powietrza transportującego	Q_{pt}	kW	0,74	0,70	0,65	0,67	0,67
Strumień ciepła materiału na wylocie	Q_{m2}	kW	71,2	50,2	82,5	73,1	71,7
Strumień ciepła powietrza na wylocie	Q_{p2}	kW	52,6	53,5	44,9	48,3	51,0
Strumień ciepła zużyty na odparowanie	Q_{par}	kW	0,183	0,162	0,248	0,179	0,146
Strumień ciepła strat do otoczenia	$Q_{str,k}$	kW	12,1	15,1	18,5	16,1	13,2
Sprawność energetyczna	η_e	%	0,93	2,73	1,29	0,87	0,99
Jednostkowe zużycie energii	μ_e	MJ/kg	83,2	28,5	60,1	89,2	78,8

Tabela 10.13 Wyniki bilansu energetycznego dla suszarki B

<i>Pozycja bilansu</i>			<i>18.09</i>	<i>20.09</i>	<i>21.09</i>	<i>23.09</i>	<i>24.09</i>
Strumień ciepła materiału na wlocie	Q_{m1}	kW	58,3	40,9	67,7	59,7	58,2
Strumień ciepła powietrza suszącego na wlocie	Q_{ps1}	kW	75,9	75,8	76,7	77,4	77,9
Strumień ciepła powietrza transportującego	Q_{pt}	kW	0,74	0,70	0,65	0,67	0,67
Strumień ciepła materiału na wylocie	Q_{m2}	kW	70,9	50,3	82,4	73,4	72,1
Strumień ciepła powietrza na wylocie	Q_{p2}	kW	56,3	56,8	45,8	48,2	54,5
Strumień ciepła zużyty na odparowanie	Q_{par}	kW	0,182	0,161	0,248	0,179	0,146
Strumień ciepła strat do otoczenia	$Q_{str,k}$	kW	8,5	10,7	17,4	16,6	11,2
Sprawność energetyczna	η_e	%	0,93	2,73	1,29	0,86	0,96
Jednostkowe zużycie energii	μ_e	MJ/kg	83,7	28,4	60,0	90,0	80,5

Tabela 10.14 Wyniki bilansu egzergetycznego dla suszarki C

<i>Pozycja bilansu</i>			<i>18.09</i>	<i>20.09</i>	<i>21.09</i>	<i>23.09</i>	<i>24.09</i>
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	0,088	0,207	0,038	0,100	0,067
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex_{ps1}	kW	13,7	17,1	15,3	14,6	13,3
Strumień egzergii powietrza transportującego	Ex_{pt}	kW	1,51	1,45	1,34	1,37	1,35
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	7,89	10,06	9,43	9,02	8,27
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex_{p2}	kW	2,60	3,94	3,44	2,71	3,31
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	0,056	0,097	0,073	0,119	0,104
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	2,54	3,52	2,71	2,78	1,86
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	1,75	0,68	0,58	1,02	0,71
Sprawność egzergetyczna	$\eta_{ex,k}$	%	0,55	0,94	0,79	1,24	1,41
Jednostkowe zużycie egzergii	$\mu_{ex,k}$	MJ/kg	40,1	25,5	29,1	18,2	15,3

Tabela 10.15 Wyniki bilansu egzergetycznego dla suszarki A

<i>Pozycja bilansu</i>			18.09	20.09	21.09	23.09	24.09
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	0,21	0,26	0,62	0,32	0,20
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex_{ps1}	kW	9,73	11,5	11,5	11,0	9,64
Strumień egzergii powietrza transportującego	Ex_{pt}	kW	0,98	0,94	0,86	0,90	0,90
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	3,61	3,14	5,50	4,18	3,79
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex_{p2}	kW	3,98	5,20	3,61	3,90	3,68
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	0,050	0,048	0,074	0,052	0,040
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	1,53	2,32	2,56	2,23	1,64
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	1,75	1,96	1,28	1,83	1,58
Sprawność egzergetyczna	$\eta_{ex,k}$	%	0,94	2,06	1,30	0,89	0,96
Jednostkowe zużycie egzergii	$\mu_{ex,k}$	MJ/kg	22,7	11,2	17,9	25,7	22,2

Tabela 10.16 Wyniki bilansu egzergetycznego dla suszarki B

<i>Pozycja bilansu</i>			18.09	20.09	21.09	23.09	24.09
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	0,21	0,26	0,62	0,32	0,20
Strumień egzergii powietrza suszącego na wlocie	Ex_{ps1}	kW	9,69	11,3	11,5	11,1	9,87
Strumień egzergii powietrza transportującego	Ex_{pt}	kW	0,98	0,94	0,86	0,90	0,90
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	3,41	3,20	5,44	4,36	3,96
Strumień egzergii powietrza na wylocie	Ex_{p2}	kW	4,68	5,94	3,79	3,84	4,16
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	0,050	0,048	0,074	0,053	0,040
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	1,15	1,74	2,45	2,28	1,45
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	1,59	1,58	1,23	1,78	1,37
Sprawność egzergetyczna	$\eta_{ex,k}$	%	0,93	2,06	1,30	0,88	0,94
Jednostkowe zużycie egzergii	$\mu_{ex,k}$	MJ/kg	22,9	11,2	17,9	25,9	22,7

Niskie wartości sprawności oraz wysokie ilości zużycia energii związane są z niewielkimi ilościami odparowywanego formaldehydu, również niewielkie wahania odparowanego formaldehydu powodują spore wahania w wartościach sprawności i wskaźnika jednostkowego zużycia. Spora rozbieżność wyników dla linii B (suszarka A i B) dotycząca pomiaru w dniu 20.09 wynika ze znacząco wyższej temperatury powietrza suszącego przed wymiennikiem ciepła co przy utrzymaniu temperatury powietrza za wymiennikiem skutkuje niskim zużyciem ciepła w wymienniku oraz niską sprawnością samego wymiennika.

Sprawności energetyczne i egzergetyczne dotyczące komory suszenia są porównywalne, natomiast w związku z różnymi definicjami energii i egzergii występują znaczące różnice we wskaźnikach jednostkowych zużyć, zużycie egzergii na kilogram odparowanej wilgoci jest dużo niższe, niż zużycie energii.

W tabelach 10.17÷10.19 zebrano wyniki bilansu egzergetycznego węzła suszenia C, A i B, z wyznaczeniem sprawności egzergetycznej i jednostkowego zużycia egzergii dla całego węzła suszenia. Dodatkowo zestawiono sprawności wymienników ciepła.

Obydwie linie pracują na porównywalnej wydajności, powstające wahania w wartościach pomiędzy liniami w poszczególne dni związane są głównie z początkową zawartością formaldehydu w materiale, dla niższych wartości uzyskuje się mniejszą ilość odparowanego formaldehydu, w rezultacie zaobserwować można większe wartości jednostkowego zużycia egzergii.

Sprawności wymienników ciepła pomiędzy poszczególnymi liniami są zbliżone, wartości pomiędzy poszczególnymi dniami są obarczone błędem z powodu braku możliwości dokładnego pomiaru parametrów pary grzewczej.

Wyniki przedstawione w tabelach dotyczących pozycji bilansu egzergetycznego samej komory suszenia (tabele 10.14÷10.16) wskazują, że zużywana egzergia na odparowanie będąca efektem użytecznym procesu suszenia wynosi średnio 0,6% dla suszarki C zaś 0,4% dla suszarki A i B w stosunku do całkowitej egzergii dostarczonej do komory suszenia. Największe straty egzergii związane są ze przepływem egzergii do otoczenia przez obudowę i wynoszą średnio 16,3% dla suszarki C, 17,1% dla suszarki A

oraz 15,0% dla suszarki B. Straty związane z degradacją egzergii wynoszą odpowiednio 5,9%, 14,2%, 12,7% dla suszarki C, A, B.

Natomiast z wyników przedstawionych w tabelach 10.17÷10.19 dotyczących pozycji bilansu egzergetycznego całego wężła suszenia wyliczyć można, że zużywana egzergia na odparowanie spada do poziomu 0,1% dla wszystkich trzech suszarek. Straty przez obudowę komory suszenia spadają do 3,4% dla suszarki C, 5,7% dla suszarki A oraz 5,0% dla suszarki B. Straty egzergii związane są z nieodwracalnością dla całego procesu wzrastają aż do 64,1% dla suszarki C, 66,4% dla suszarki A oraz 66,3% dla suszarki B.

Tabela 10.17 Wyniki bilansu egzergetycznego dla węzła z suszarką C

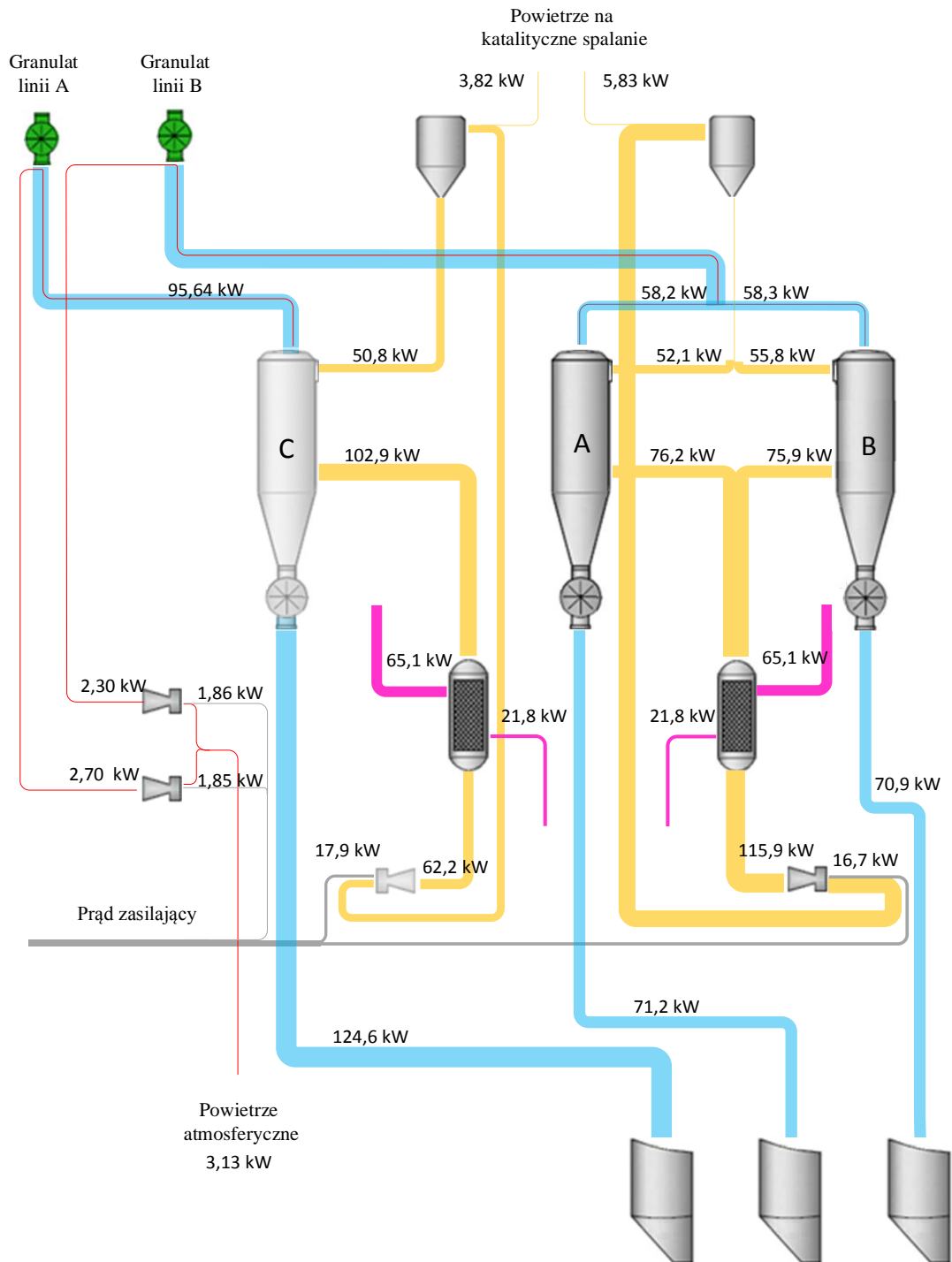
<i>Pozycja bilansu</i>			18.09	20.09	21.09	23.09	24.09
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	0,088	0,207	0,038	0,100	0,067
Strumień egzergii powietrza transportującego pobranego z otoczenia	Ex_{t0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza suszącego	$Ex_{sil,ps}$	kW	17,9	19,9	20,3	21,1	19,9
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza tłoczącego	$Ex_{sil,pt}$	kW	1,85	2,09	1,93	2,01	1,85
Strumień egzergii pary technologicznej na wlocie	Ex_{par1}	kW	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	7,89	10,06	9,43	9,02	8,27
Strumień egzergii powietrza usuniętego na katalityczne spalanie	Ex_{kat}	kW	0,198	0,338	0,223	0,195	0,230
Strumień egzergii kondensatu na wyjściu	Ex_{kon2}	kW	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	0,056	0,097	0,073	0,119	0,104
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	2,48	3,35	2,66	2,72	1,78
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	47,4	47,4	48,3	49,6	49,0
Sprawność egzergetyczna	η_{ex}	%	0,101	0,168	0,126	0,203	0,181
Jednostkowe zużycie egzergii	μ_{ex}	MJ/kg	218	142	182	112	120
Sprawność egzergetyczna wymiennika ciepła	$\eta_{ex,wym}$	%	25,4	25,7	23,1	23,9	17,8

Tabela 10.18 Wyniki bilansu egzergetycznego dla węzła z suszarką A

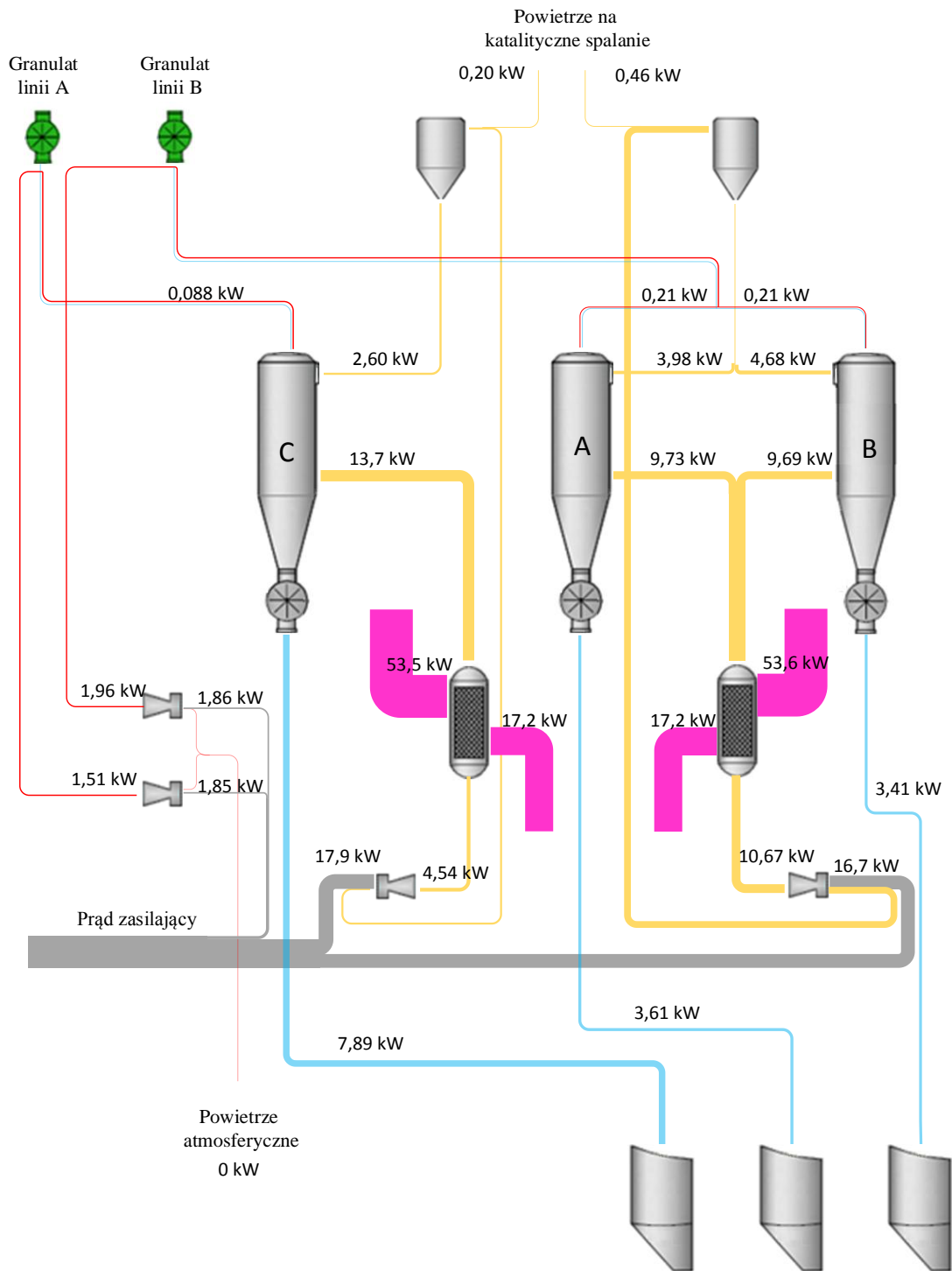
Pozycja bilansu			18.09	20.09	21.09	23.09	24.09
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	0,21	0,26	0,62	0,32	0,20
Strumień egzergii powietrza transportującego pobranego z otoczenia	Ex_{pt0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza suszącego	$Ex_{sil,ps}$	kW	8,38	9,62	9,58	9,51	9,15
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza tłoczącego	$Ex_{sil,pt}$	kW	0,93	1,05	0,97	1,01	0,93
Strumień egzergii pary technologicznej na wlocie	Ex_{par1}	kW	26,8	26,9	26,8	26,6	26,4
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	3,61	3,14	5,50	4,18	3,79
Strumień egzergii powietrza usuniętego na katalityczne spalanie	Ex_{kat}	kW	0,213	0,227	0,184	0,198	0,175
Strumień egzergii kondensatu na wyjściu	Ex_{kon2}	kW	8,63	8,67	8,63	8,57	8,51
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	0,050	0,048	0,074	0,052	0,040
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	1,59	2,46	2,60	2,28	1,69
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	24,2	26,2	24,0	24,8	24,5
Sprawność egzergetyczna	η_{ex}	%	0,181	0,164	0,256	0,182	0,142
Jednostkowe zużycie egzergii	μ_{ex}	MJ/kg	118	140	91,0	125	151
Sprawność egzergetyczna wymiennika ciepła	$\eta_{ex,wym}$	%	24,1	7,6	26,7	27,8	18,3

Tabela 10.19 Wyniki bilansu egzergetycznego dla węzła z suszarką B

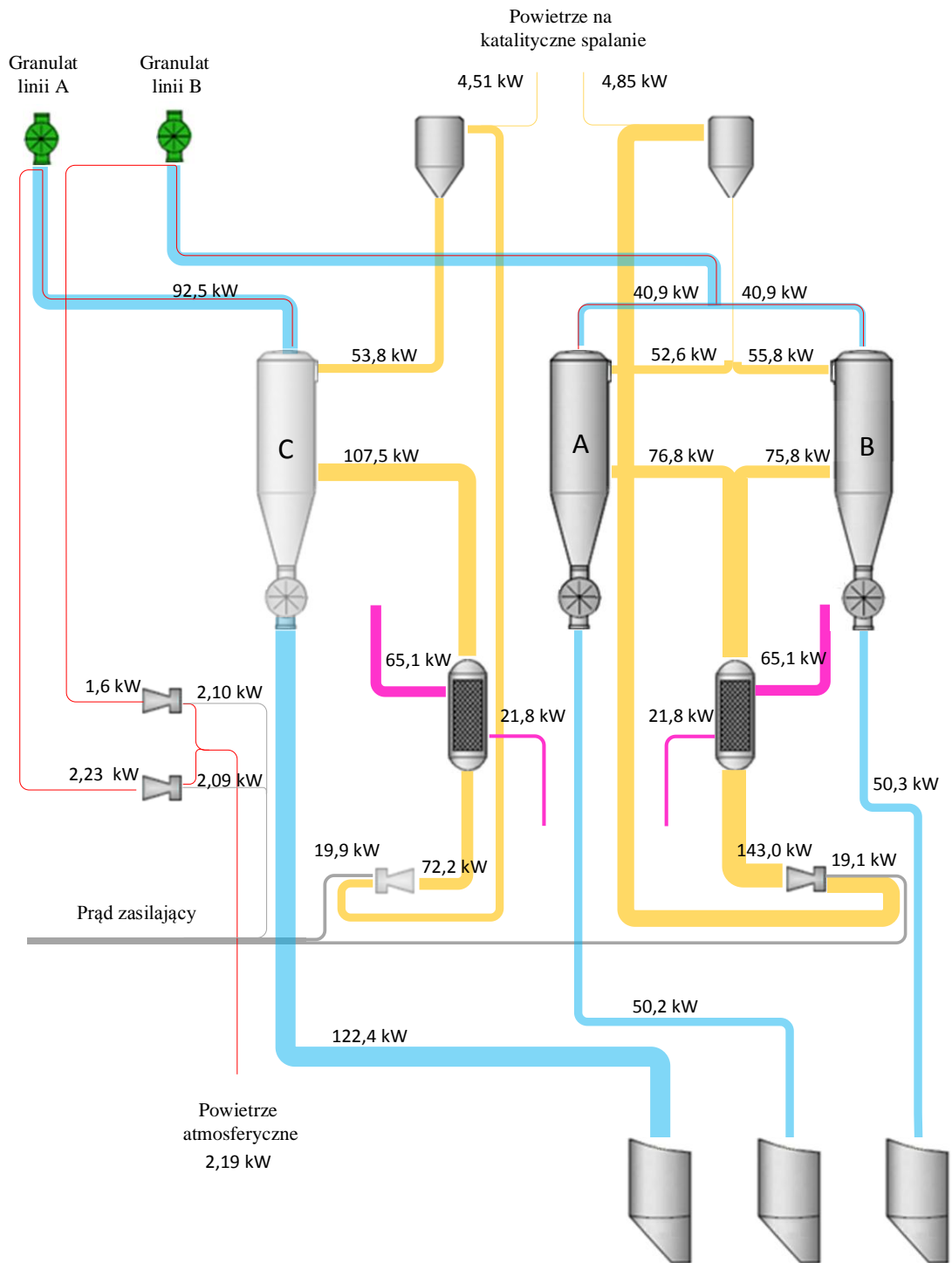
<i>Pozycja bilansu</i>			<i>18.09</i>	<i>20.09</i>	<i>21.09</i>	<i>23.09</i>	<i>24.09</i>
Strumień egzergii materiału na wlocie	Ex_{m1}	kW	0,21	0,26	0,62	0,32	0,20
Strumień egzergii powietrza transportującego pobranego z otoczenia	Ex_{pt0}	kW	0	0	0	0	0
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza suszącego	$Ex_{sil,ps}$	kW	8,35	9,50	9,54	9,61	9,37
Strumień egzergii zużywany przez wentylator powietrza tłoczącego	$Ex_{sil,pt}$	kW	0,93	1,05	0,97	1,01	0,93
Strumień egzergii pary technologicznej na wlocie	Ex_{par1}	kW	26,7	26,6	26,7	26,9	27,1
Strumień egzergii materiału na wylocie	Ex_{m2}	kW	3,41	3,20	5,44	4,36	3,96
Strumień egzergii powietrza usuniętego na katalityczne spalanie	Ex_{kat}	kW	0,251	0,263	0,194	0,193	0,193
Strumień egzergii kondensatu na wyjściu	Ex_{kon2}	kW	8,59	8,56	8,60	8,66	8,71
Strumień egzergii na odparowanie wilgoci	Ex_{par}	kW	0,050	0,048	0,074	0,053	0,040
Strumień start egzergii do otoczenia przez obudowę	$Ex_{str,k}$	kW	1,22	1,89	2,49	2,34	1,51
Strumień egzergii degradowanej	Ex_{deg}	kW	24,2	25,7	23,9	25,0	25,0
Sprawność egzergetyczna	η_{ex}	%	0,180	0,165	0,256	0,180	0,138
Jednostkowe zużycie egzergii	μ_{ex}	MJ/kg	118	140	90,8	126	155
Sprawność egzergetyczna wymiennika ciepła	$\eta_{ex,wym}$	%	24,1	7,6	26,7	27,8	18,3



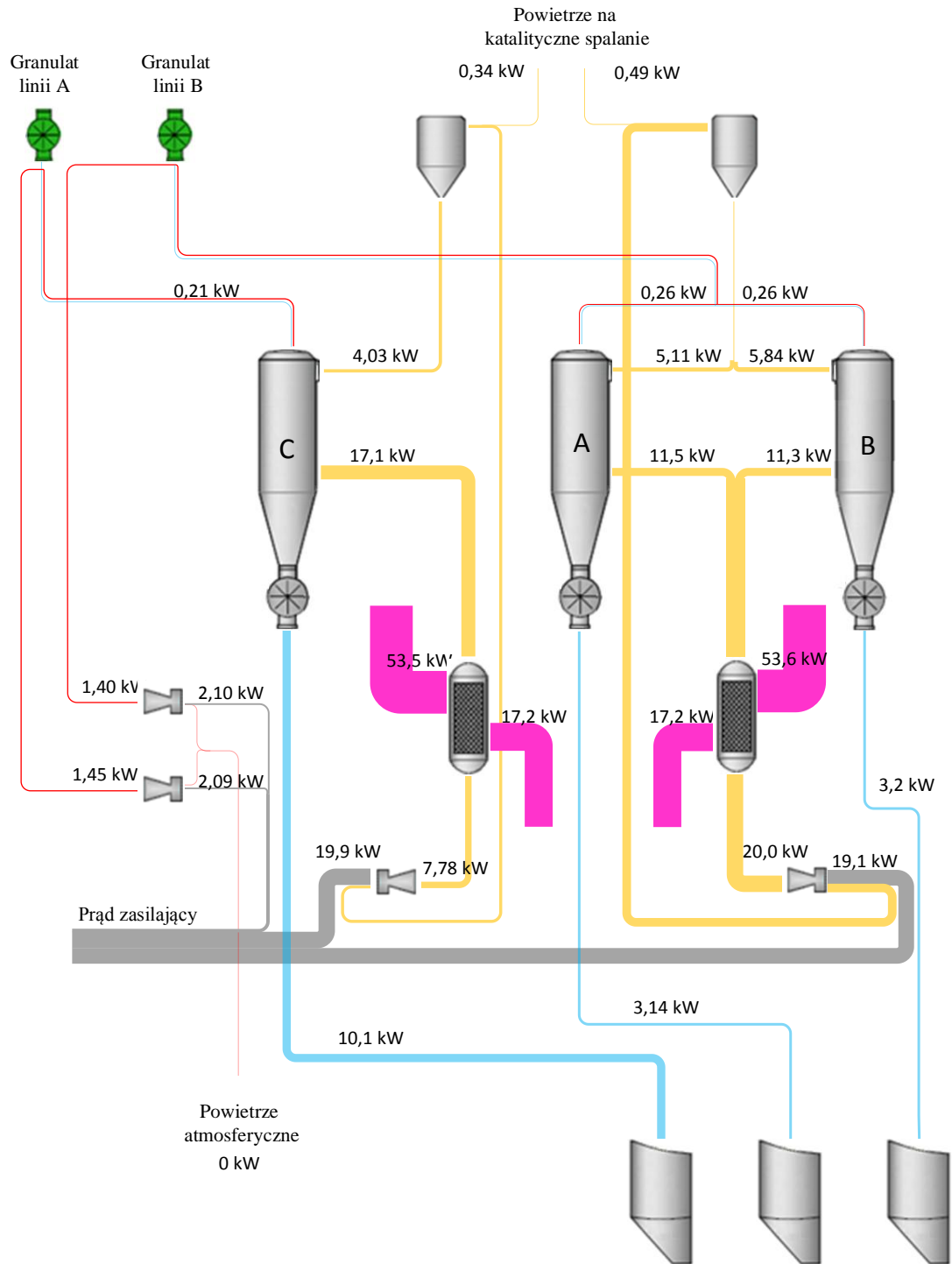
Rys. 10.13 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 18.09.2012



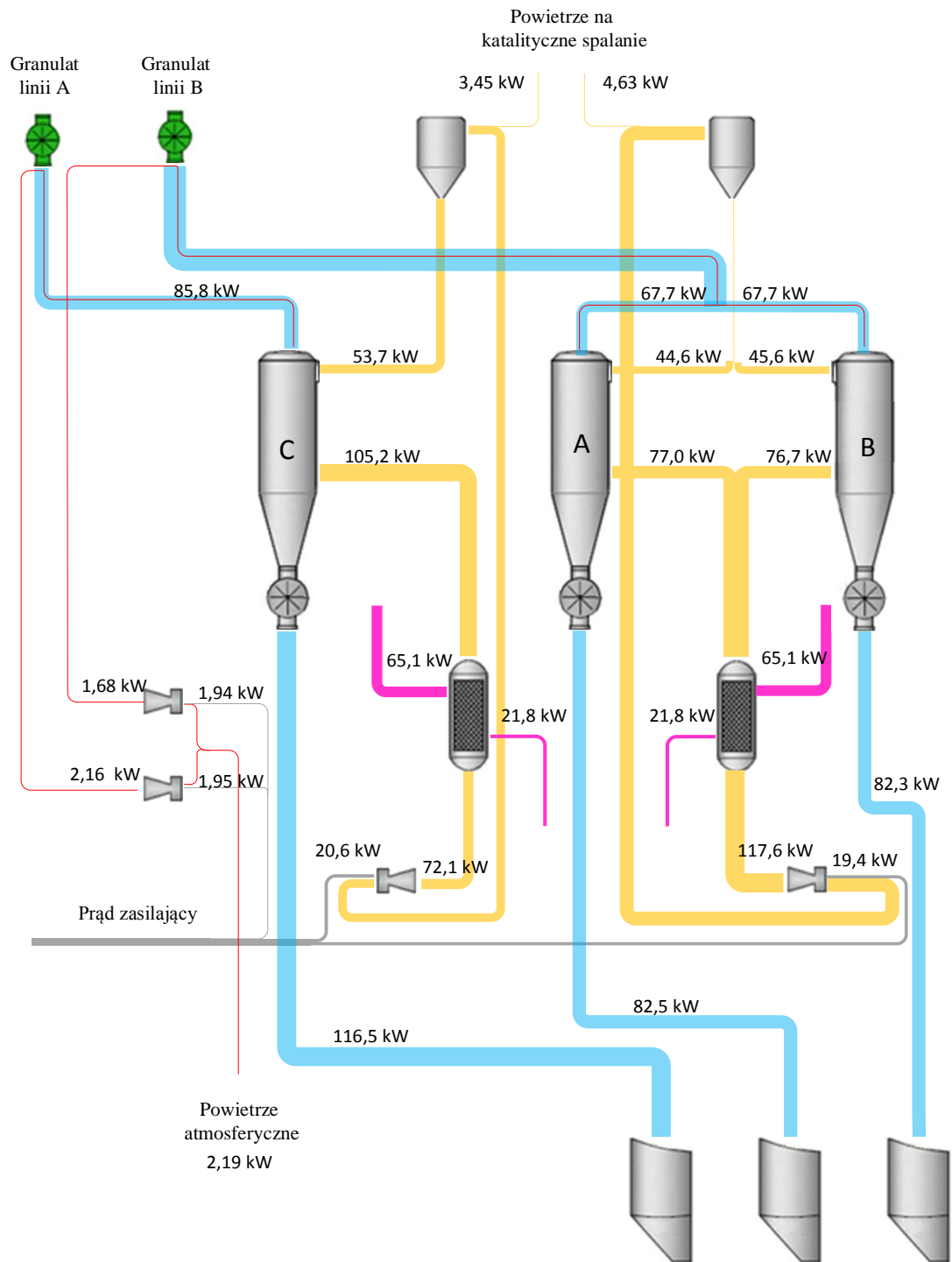
Rys. 10.14 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 18.09.2012



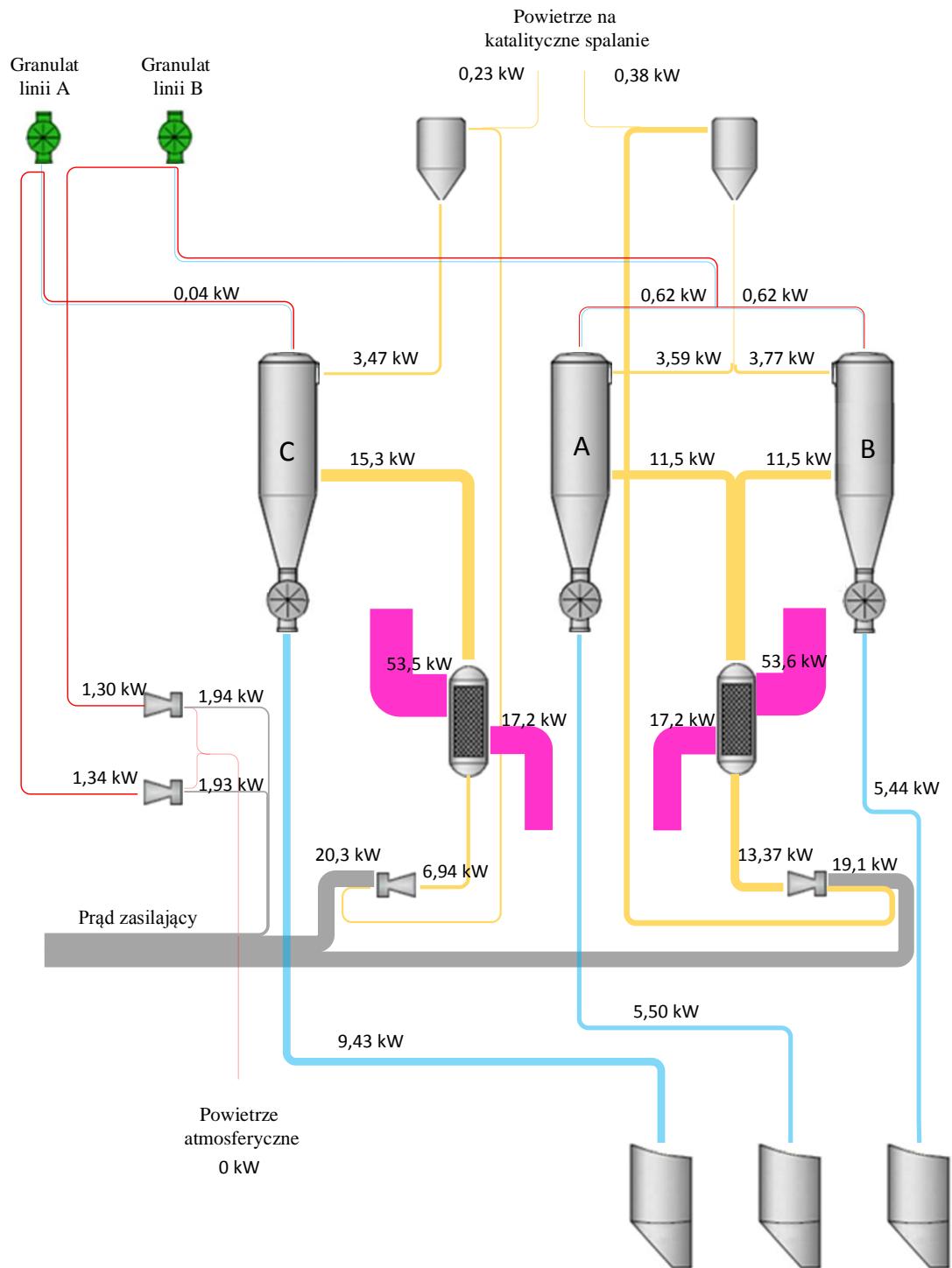
Rys. 10.15 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 20.09.2012



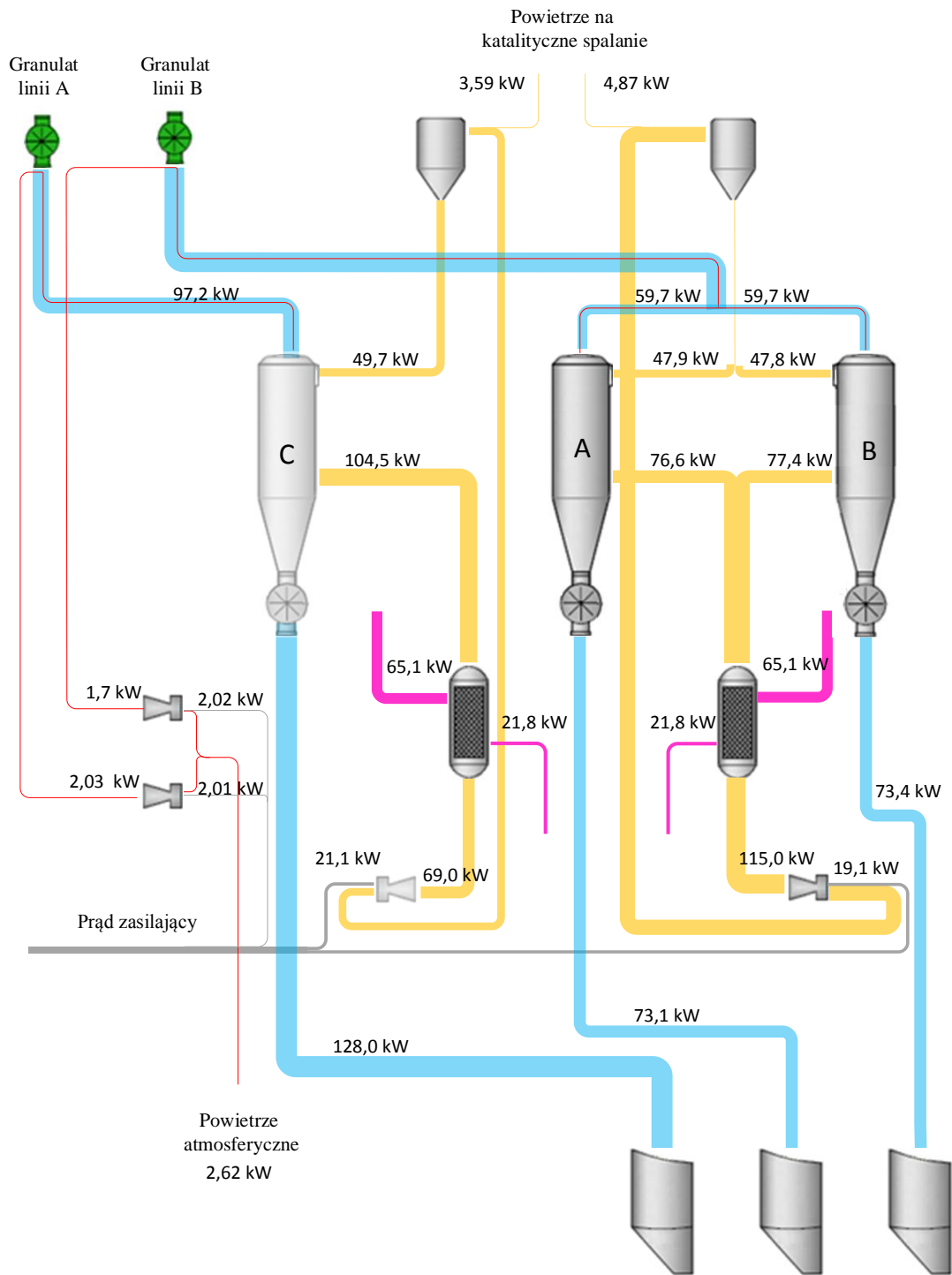
Rys. 10.16 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 20.09.2012



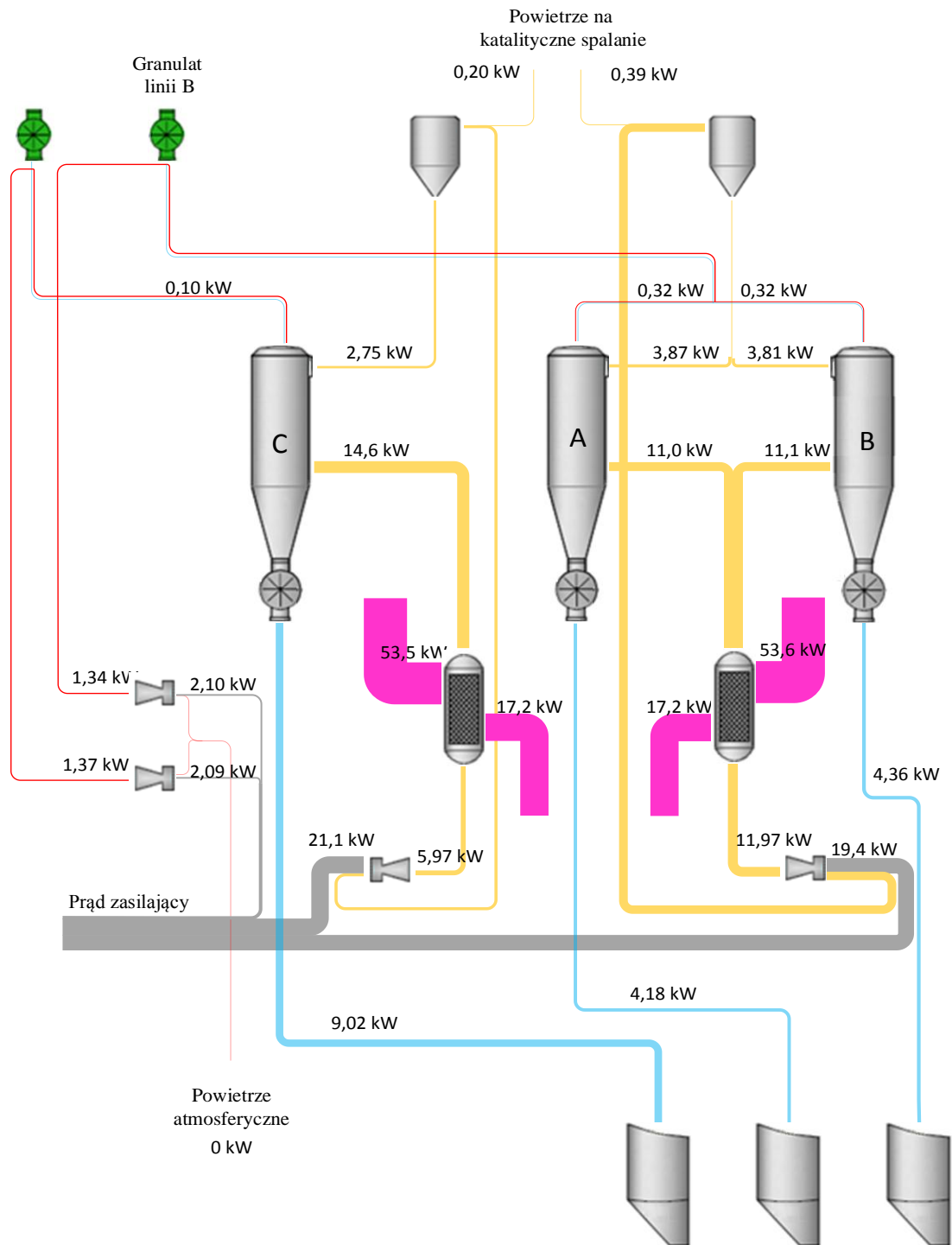
Rys. 10.17 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 21.09.2012



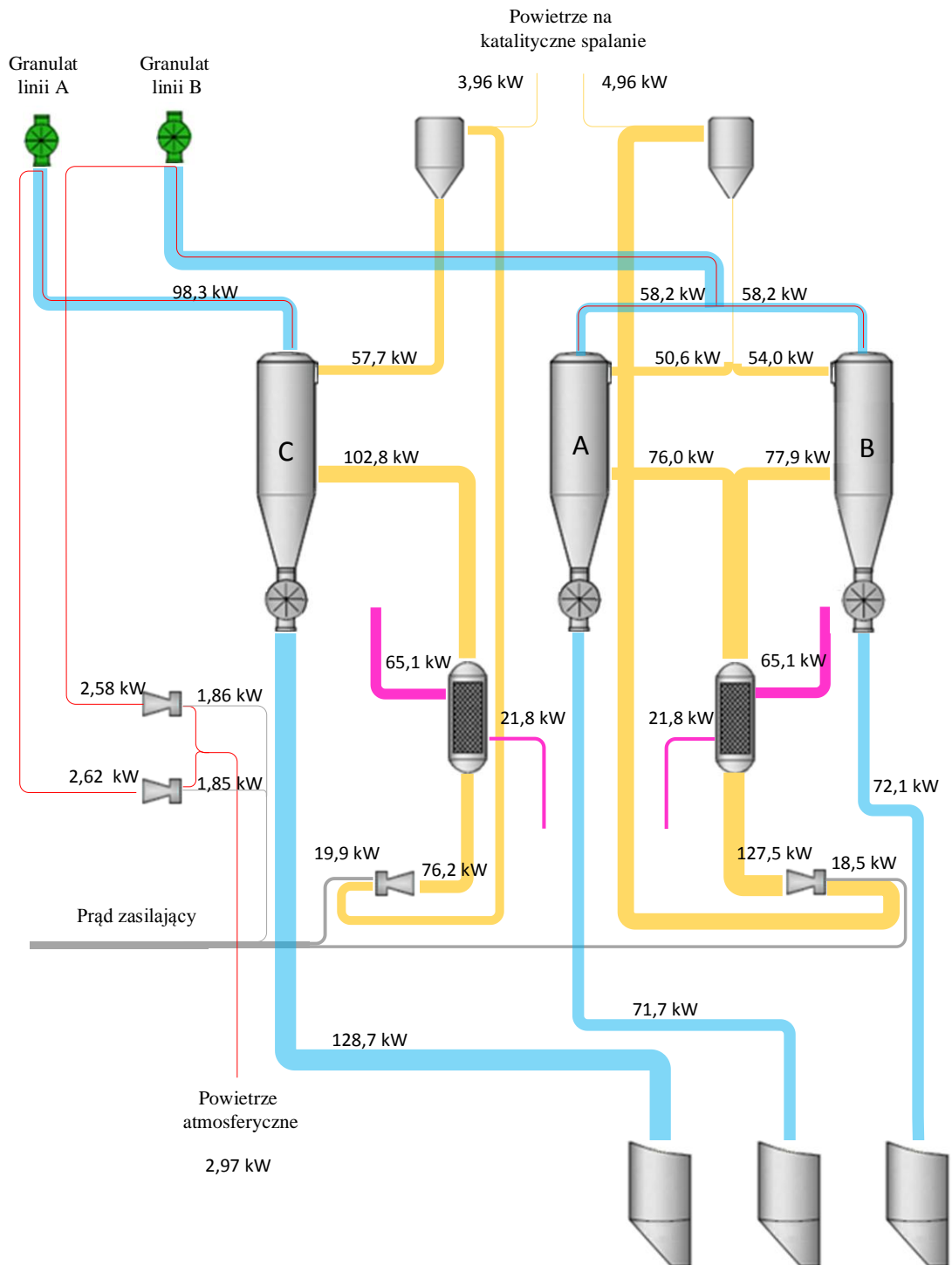
Rys. 10.18 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 21.09.2012



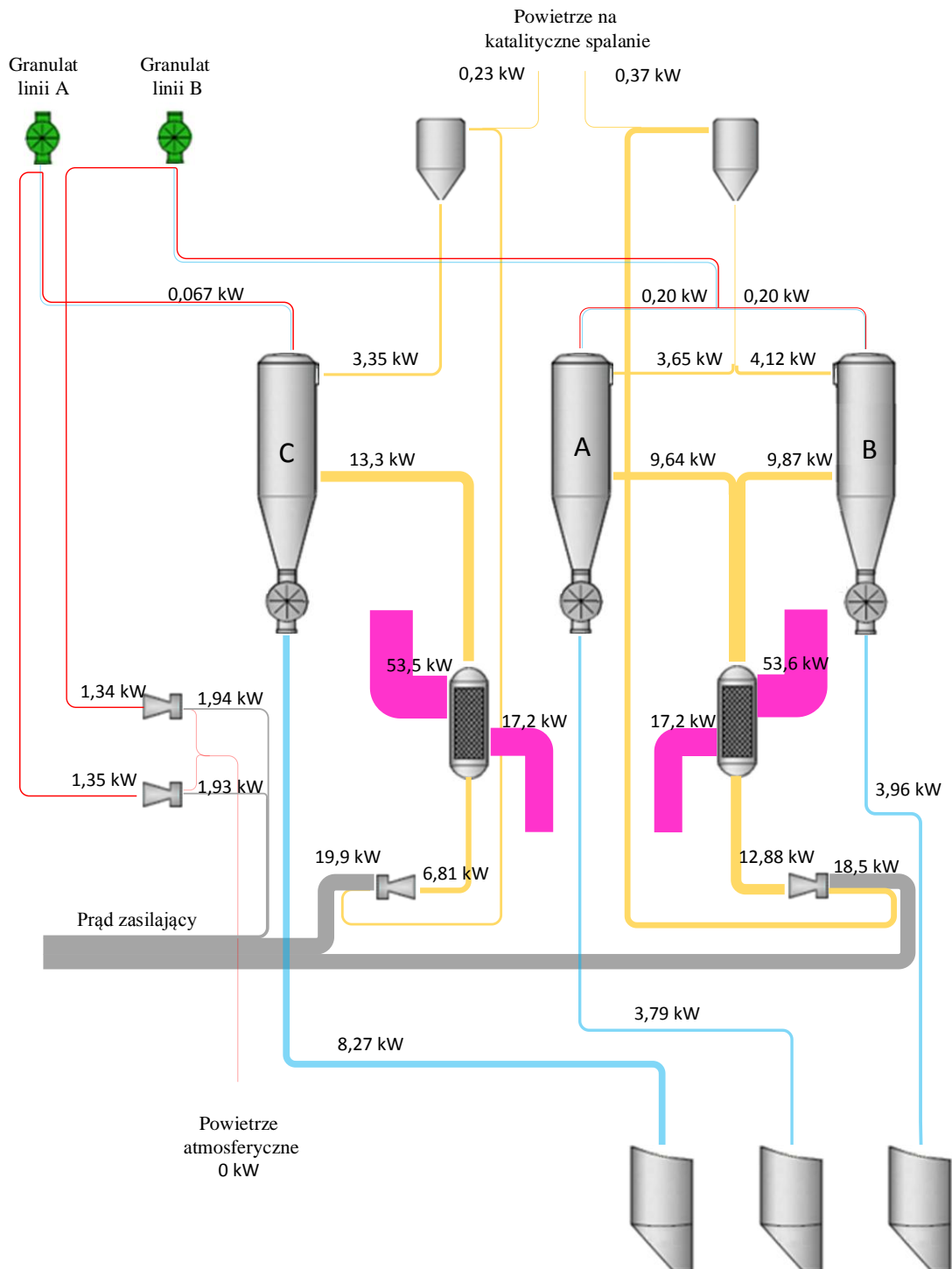
Rys. 10.19 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 23.09.2012



Rys. 10.20 Przepływ energii dla węzła suszenia politriksanu w dniu 23.09.2012



Rys. 10.21 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 24.09.2012



Rys. 10.22 Przepływ energii dla węzła suszenia politrioksanu w dniu 24.09.2012

Na rysunkach 10.13÷10.22 zaprezentowano jak zmieniają się poszczególne strumienie odpowiednio energii i egzergii. Na zamieszczonych wykresach szerokość pasm przepływającej energii jest równa 1/5 szerokości pasm przepływającej egzergii. Największą zmianę w proporcjach pomiędzy poszczególnymi strumieniami, zauważyć można dla strumieni oznaczonych kolorem szarym odpowiadającym prądowi

zasilającemu oraz strumieni zaznaczonych kolorem różowym, który to kolor reprezentuje strumienie pary ogrzewającej powietrze suszące w wymienniku ciepła.

Z obliczeń wynika, że z powietrzem odbieranym na katalityczne spalanie odbierane jest średnio 5% (mas.) formaldehydu zawartego w powietrzu, natomiast z materiału usuwane jest średnio 0,4 g formaldehydu na kg such. powietrza. W związku z tym w celu poprawy wydajności suszenia można zaproponować zwiększenie ilości odbieranego powietrza na katalityczne spalanie, a tym samym zwiększenie świeżego powietrza dopływającego z otoczenia. Natomiast zwracając uwagę na to jak duży udział w stratach egzergetycznych ma ogrzewanie powietrza w wymienniku ciepła, w celu zmniejszenia tych strat, można zaproponować obniżenie temperatury powietrza za wymiennikiem.

Podobnie jak dla siarczanu amonu również w przypadku politrioksanu wykresy sporządzone dla strumieni egzergetycznych pozwalają zauważyć spore znaczenie prądu zasilającego silniki wentylatorów, co za tym idzie stratę egzergetyczną związaną z nieodwracalnością nadawania odpowiedniej prędkości powietrzu suszającemu.

Nie ograniczanie się z analizą egzergetyczną do samej komory suszenia, a rozszerzenie jej na cały węzeł suszenia pozwala zobrazować proporcje pomiędzy stratami powstałymi w komorze a w całej instalacji co pozwala na oszacowanie opłacalności ewentualnej likwidacji niedoskonałości. Przykładem są tu straty do otoczenia przez odbudowę, których udział znacznie spadł dla całego węzła.

Przedstawiona w rozdziale 10 dyskusja pozwala na stwierdzenie, że analiza egzergetyczna instalacji przemysłowych umożliwia uzyskanie danych pozwalających na podjęcie skutecznych działań w kierunku zwiększenia wartości wskaźników techniczno-ekonomicznych węzłów suszenia.

11. Podsumowanie i wnioski

1. Przeprowadzono kompleksowe rozeznanie literaturowe dotyczące zagadnień związanych z analizą egzergetyczną procesów suszenia.

2. Przystosowano stanowiska badawcze do realizacji eksperymentów suszenia fluidalnego i próżniowego wybranych bioproduktów pod kątem analizy egzergetycznej.

3. Przeprowadzono eksperymenty dotyczące suszenia fluidalnego ziaren maku oraz suszenia próżniowego zrębków leszczyny pospolitej w szerokim zakresie zmienności parametrów procesowych pod kątem określenia kinetyki procesów i bilansu egzergetycznego.

4. Zrealizowano eksperymenty dotyczące suszenia fluidalnego w zakresie bilansowania egzergetycznego w odniesieniu do komory suszenia oraz wężła suszenia do oceny wykorzystano dwa komplementarne wskaźniki: sprawność egzergetyczną i współczynnik jednostkowego zużycia egzergii.

Stwierdzono, że:

- Sprawność egzergetyczna jest większa na początku procesu suszenia niż w jego późniejszym etapie, co wynika ze zmniejszenia się szybkości usuwania wilgoci z czasem trwania procesu.
- Przy zawężeniu analizy do samej komory suszenia podczas badania wpływu liczby fluidyzacji otrzymuje się sprzeczne wyniki w porównaniu z uwzględnieniem całego wężła suszenia.
- Rozszerzenie analizy do całego wężła suszenia daje szerszy obraz zachodzących nieodwracalności podczas procesu suszenia w związku z tym jest to podejście wskazane.
- Prędkość fluidyzacji, temperatura oraz wysokość złoża, wywiera wpływ na sprawność egzergetyczną i jednostkowe zużycie egzergii.
- Istnieje wartość liczby fluidyzacji, temperatury oraz wysokości złoża dla których sprawność osiąga maksimum, a jednostkowe zużycie egzergii minimum.

- Zmiana charakteru suszenia ma znaczący wpływ na wydajność procesu suszenia. Przy usuwaniu dużych ilości wilgoci wydajniejsze jest suszenie w złożu fluidalnym, natomiast podczas suszenia w zakresie niskich zawartości wilgoci przewagę zyskuje suszenie w złożu stacjonarnym.
- Stosując egzergię termiczną powietrza wylotowego określono straty związane z niewykorzystaniem egzergii powietrza dostarczonego do procesu.
- Przez rozdzielenie egzergii powietrza wylotowego na egzergię chemiczną i termiczną można określić warunki stosowania recyrkulacji.
- Otrzymane wyniki są zgodne z oczekiwaniami i poglądami dotyczącymi aktualnych osiągnięć teorii i techniki suszenia fluidalnego.

5. W kolejnym etapie przeprowadzono analizę egzergetyczną procesu suszenia próżniowego w celu określenia wpływu: wymiany powietrza, wartości ciśnienia w komorze, masy i wysokości badanego złoża, jak również wartości temperatury powietrza suszącego na sprawność egzergetyczną.

Stwierdzono, że:

- Wyższe wartości sprawności egzergetycznej uzyskano dla procesu, w którym następowała wymiana powietrza w komorze.
- Dla wszystkich badanych przypadków całkowita sprawność egzergetyczna rośnie w początkowym okresie do momentu uzyskania maksymalnej wartości po czym maleje z czasem trwania procesu.
- Sprawność egzergetyczna rośnie: z wartością podciśnienia w komorze, ze wzrostem masy materiału suszonego, ze spadkiem wysokości złoża oraz z wartością temperatury w komorze suszenia
- Uzyskane wyniki świadczą, że zastosowanie analizy egzergetycznej analizowanego procesu pozwala określić najkorzystniejsze parametry procesu.

6. Wyniki z przeprowadzonych badań suszenia fluidalnego wykorzystano do opracowania modelu sieci neuronowych. Użyto trzy wejścia: temperatura suszenia, prędkość suszenia, czas trwania procesu. Dla znalezienia optymalnego modelu SSN

badano różne liczby neuronów. Za pomocą wybranego modelu dokonano optymalizacji parametrów suszenia. Otrzymane wyniki są zgodne z danymi eksperymentalnymi.

7. W warunkach przemysłowych dokonano analizy egzergetycznej suszenia siarczanu amonu z wykorzystaniem suszarek wibro-fluidalnych oraz suszenia politriksanu w suszarkach silosowych. Do oceny egzergetycznej w analizie wykorzystano: sprawność egzergetyczną i współczynnik jednostkowego zużycia energii. Wykonano bilans egzergetyczny dla całego węzła oraz komory suszenia, dla której wykonano również bilans energetyczny. Dla węzłów suszenia wykonano wykresy pasmowe przepływu energii i energii w procesie suszenia. Przeprowadzona analiza pozwala wskazać te etapy procesu w których występują straty związane w znacznym stopniu z nieodwracalnością zachodzących przemian.

Reasumując:

- Zasadniczym zadaniem współczesnego suszarnictwa jest zminimalizowanie zużycia energii przy usunięciu wilgoci do oczekiwanej wartości. Ocena procesu suszenia oparta na pojęciu energii może być skutecznym narzędziem obrazującym zużycie energii podczas praktycznej realizacji procesu suszenia. Energia będąca miarą użyteczności energii w sposób efektywny pozwala określić źródła strat energii i po ich eliminacji zredukować cenę wyrobu.
- Analiza egzergetyczna w warunkach laboratoryjnych pozwala zapoznać się z wpływem poszczególnych parametrów na wydajność procesu oraz na wyznaczenie optymalnych warunków prowadzenie procesu suszenia.
- Analiza egzergetyczna przemysłowej instalacji pozwala wskazać te etapy prowadzenia procesu, gdzie występują największe straty energii oraz możliwe miejsca do modernizacji w celu zmniejszenia strat. W porównaniu do analizy energetycznej umożliwia również łatwiejsze określenie kosztów prowadzenia poszczególnych etapów procesu.
- Należy podkreślić, że analiza egzergetyczna procesów suszenia znajduje obecnie duże znaczenie w określaniu efektywności zjawiska. Jak wykazano wyniki analizy egzergetycznej są podstawą do działań

skutkujących zwiększeniem wskaźników techniczno-ekonomicznych pracy węzła technologicznego, a także instalacji produkcyjnej.

- Istotne znaczenie analizy egzergetycznej wiąże się z jej dużą rolą przy realizacji działań związanych z ochroną środowiska naturalnego oraz wytycznych dotyczących zrównoważonego rozwoju.

12. Streszczenia

Analiza egzergetyczna wybranych procesów suszenia

Opracowanie dotyczy eksperymentalnej i teoretycznej analizy egzergetycznej wybranych metod suszenia pod kątem opracowania ilościowych metod opisu, badania i analizy egzergetycznej wybranych procesów suszenia.

Wykonano analizę egzergetyczną suszenia fluidalnego w skali laboratoryjnej rozpatrując komorę suszenia oraz cały węzeł, w skład którego wchodzi komora suszenia, wentylator i nagrzewnica. Do oceny egzergetycznej wykorzystano dwa komplementarne wskaźniki: sprawność egzergetyczną i współczynnik jednostkowego zużycia energii, dla których badano wpływ: temperatury, liczby fluidyzacji, wysokości złoża, charakteru suszenia.

Stosując energię termiczną powietrza wylotowego określono straty związane z niewykorzystaniem energii powietrza dostarczonego do procesu. Przez rozdzielenie energii powietrza wylotowego na energię chemiczną i termiczną określono przydatność zastosowania recyrkulacji.

Przeprowadzono także analizę egzergetyczną procesu suszenia próżniowego w celu określenia wpływu: wymiany powietrza, wartości ciśnienia w komorze, wielkości badanej próbki, wysokości złoża, jak również wartości temperatury powietrza suszącego. Do oceny egzergetycznej w analizie wykorzystano także dwa wskaźniki: sprawność egzergetyczną i współczynnik jednostkowego zużycia energii.

Przy pomocy sieci neuronowych dla przeprowadzonych badań suszenia fluidalnego wyznaczono optymalne warunki prowadzenia procesu suszenia.

Dokonano także analizy egzergetycznej w odniesieniu do przemysłowych instalacji suszarniczych (Grupa Azoty S.A. w Tarnowie – Mościcach instalacje produkcji siarczanu amonu oraz politrioksanu). Do oceny egzergetycznej w analizie wykorzystano: sprawność egzergetyczną i współczynnik jednostkowego zużycia energii. Analizy dokonano dla całego węzła oraz komory suszenia dla której dokonano

również analizy energetycznej. Dla węzłów suszenia wykonano wykresy pasmowe przepływu energii i egzergii w procesie suszenia.

Podejście do analizy egzergetycznej uwzględniającej cały węzeł suszenia daje lepszy obraz zużywanej egzergii, jak również ukazuje wpływ poszczególnych ogniw na wydajność całego procesu.

Istotnym zagadnieniem współczesnego suszarnictwa jest zminimalizowanie zużycia energii przy usunięciu wilgoci do oczekiwanej wartości. Ocena procesu suszenia oparta na pojęciu egzergii może być skutecznym narzędziem obrazującym zużycie energii podczas praktycznej realizacji procesu. Można przypuszczać, że analiza egzergetyczna procesów suszenia będzie w najbliższej przyszłości skutecznym narzędziem pozwalającym na określenie źródeł strat energii i po ich eliminacji powinna zredukować cenę wyrobu końcowego.

Należy także podkreślić znaczenie analizy egzergetycznej w rozwiązywaniu problemów związanych z ochroną środowiska naturalnego.

Exergy analysis of selected drying processes

The study concerns experimental and theoretical exergy analysis of selected drying methods in order to develop quantitative methods of description, research and exergy analysis of selected drying processes.

Exergy analysis of fluidized-bed drying in a laboratory scale was performed considering a drying chamber and a whole node comprising a drying chamber, a fan and a heater. For exergy evaluation, two complementary indices were used: exergy efficiency and unit exergy consumption for which the effect of temperature, the fluidization number, the bed height and the character of drying were investigated.

Using thermal exergy of exhaust air, losses were determined related to the not-utilized exergy of air supplied to the process. By dividing the exhaust air exergy on chemical exergy and thermal exergy, suitability of recirculation was determined.

Exergy analysis was also conducted for vacuum drying process in order to determine the effect of: the exchange of air, pressure in the chamber, the size of the sample, the bed height, as well as the drying air temperature. For exergy evaluation, in the analysis two indicators were also used: exergy efficiency and the unit exergy consumption coefficient.

Using neural networks for the realized studies of fluidized bed drying, the optimal conditions for carrying out the drying process were determined.

Exergy analysis was also made with regard to the installation of industrial drying (Grupa Azoty S.A. in Tarnow – Mościce – installations for the production of ammonium sulphate and polytrioxane). For exergy evaluation in the analysis the following were used: exergy efficiency and unit exergy consumption coefficient. The analysis was done for the entire node and for the drying chamber for which energy analysis was also realized. For drying nodes, band graphs of energy and exergy flow in the drying process were prepared.

Exergy analysis approach taking into account the entire drying node gives a better picture of consumed exergy, as well as shows the influence of individual elements on the efficiency of the whole process.

A major issue of modern drying is to minimize energy consumption with removing moisture to the expected value. Evaluation of drying process based on the concept of exergy can be an effective tool for illustrating the energy consumption during the practical implementation of the process. It can be supposed that the exergy analysis of drying processes in the near future will be an effective tool to identify the sources of energy losses and after their elimination should reduce the price of the final product.

The importance of exergy analysis should also be emphasized in solving problems related to environmental protection.

13. Literatura

- [1] Aghbashlo M., Kianmehr M.H., Samimi-Akhijahani H., *Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae)*, Energy Conversion and Management, 2008, **49**(10), 2865-2871.
- [2] Aghbashlo M., Mobli H., Rafiee S., Madadlou A., *A review on exergy analysis of drying processes and systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, **22**, 1-22.
- [3] Witrowa-Rajchert D., *Nowe trendy w suszeniu żywności*, Ekspertyza Agengpol, 2012.
- [4] Strumiłło C., *Podstawy teorii i techniki suszenia*, Warszawa, 1983, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [5] Mujumdar A.S., *Handbook of industrial drying*, Boca Raton, Floryda, 2006, CRC Press.
- [6] Gawlikowska-Fyk A., *Nowy pakiet klimatyczno-energetyczny do 2030 r*, Polski Instytut Spraw Międzynarodowych. Biuletyn, 2014, **1120**(8), 1-2.
- [7] Szargut J., Petela R., *Egzergia* Warszawa, 1965, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [8] Koroneos C., Spachos T., Moussiopoulos N., *Exergy analysis of renewable energy sources*, Renewable Energy, 2003, **28**(2), 295-310.
- [9] Szargut J., *Egzergia: poradnik obliczania i stosowania*, Gliwice, 2007, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [10] Wall G., *Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society*, Energy Conversion and Management, 2002, **43**(9–12), 1235-1248.
- [11] Sażyn B.S., *Osnowy techniki suszki*, Moskwa, 1984, Chemija.
- [12] Szargut J., *Termodynamika techniczna*, Gliwice, 2000, Politechnika Śląska.
- [13] Kozaczka J., *Analiza termodynamiczna*, Kraków, 1988, Wydaw. AGH.
- [14] Yantovski E., *What is exergy?*, in *Proceeding International Conference ECOS*. 2004: Mexico. 801-817.
- [15] Szargut J., *Egzergia wokół nas*, Academia. Magazyn Polskiej Akademii Nauk, 2005, **3**, 31-33.

- [16] Szargut J., *Pojęcie egzergii w odróżnieniu od energii i możliwości praktycznego stosowania egzergii*, Energetyka Przemysłowa, 1962, **11**, 374-378.
- [17] Kramarz J., Wyczesany A., *Egzergetyczna ocena procesów przetwórstwa węgla w kierunku paliw ciekłych*, Kraków, 1991, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej
- [18] Scott D.S., *EXERGY*, International Journal of Hydrogen Energy, 2003, **28**(4), 369-375.
- [19] Kotas T.J., *The exergy method of thermal plant analysis*, Malabar, Florida, 1995, Krieger Publishing Company.
- [20] Dincer I., Rosen M.A., *Exergy: energy, environment and sustainable development*, Boston 2007, Elsevier.
- [21] Sciubba E., Wall G., *A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004*, International Journal of Thermodynamics, 2007, **10**(1), 1-26.
- [22] Szargut J., *Klasyfikacja pojęć egzergii*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Energetyka, 1964, **104**(14), 5-12.
- [23] Tsatsaronis G., *Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics*, Energy, 2007, **32**(4), 249-253.
- [24] Zalewski W., *Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne: podstawy teoretyczne: przykłady obliczeniowe*, Gdańsk, 2001, IPPU MASTA
- [25] Hermann W.A., *Quantifying global exergy resources*, Energy, 2006, **31**(12), 1685-1702.
- [26] Dincer I., Cengel Y.A., *Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering*, Entropy, 2001, **3**(3), 116-149.
- [27] Wall G., *Exergy – a useful concept*, Göteborg 1986, Physical Resource Theory Group.
- [28] Wall G., Gong M., *On exergy and sustainable development—Part 1: Conditions and concepts*, Exergy, An International Journal, 2001, **1**(3), 128-145.
- [29] Szargut J., *Zastosowanie egzergii przy rozwiązywaniu zagadnień techniczno-ekonomicznych energetyki cieplnej*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Energetyka, 1965, **129**(18), 101-115.
- [30] Bejan A., *Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes*, Boca Raton, Floryda, 1996, CRC press.
- [31] Szargut J., *Energia czy egzergia*, Rynek Energii, 2010, **5**(90), 3-5.

- [32] Colak N., Erbay Z., Hepbasli A., *Performance assessment and optimization of industrial pasta drying*, International Journal of Energy Research, 2013, **37**(8), 913-922.
- [33] Dincer I., Rosen M.A., *Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005, **9**(2), 169-189.
- [34] Cay A., Tarakçioğlu I., Hepbasli A., *Exergetic analysis of textile convective drying with stenters by subsystem models: Part 2—Parametric study on exergy analysis*, Drying Technology, 2010, **28**(12), 1368-1376.
- [35] Utlu Z., Hepbasli A., Turan M., *Performance analysis and assessment of an industrial dryer in ceramic production*, Drying Technology, 2011, **29**(15), 1792-1813.
- [36] Kuzgunkaya E.H., Hepbasli A., *Exergetic evaluation of drying of laurel leaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet*, International Journal of Energy Research, 2007, **31**(3), 245-258.
- [37] Rivero R., Rendón C., Gallegos S., *Exergy and exergoeconomic analysis of a crude oil combined distillation unit*, Energy, 2004, **29**, 1909-1927.
- [38] Icier F., Colak N., Erbay Z., Kuzgunkaya E.H., Hepbasli A., *A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoli florets in three different drying systems*, Drying Technology, 2010, **28**(2), 193-204.
- [39] Ozgener L., Ozgener O., *Exergy analysis of drying process: An experimental study in solar greenhouse*, Drying Technology, 2009, **27**(4), 580-586.
- [40] Ozgener L., Ozgener O., *Exergy analysis of industrial pasta drying process*, International Journal of Energy Research, 2006, **30**(15), 1323-1335.
- [41] Mikielewicz J., Bilicki Z., Badur J., Bzowski J., Sieniutycz S., Szargut J., Tomicki B., Bartoszkiewicz M., *Współczesne kierunki w termodynamice*, Warszawa, 2001, Polska Akademia Nauk.
- [42] Szargut J., *Analiza egzergetyczna procesów cieplnych*, ITC Politechniki Śląskiej, 1996.
- [43] Szargut J., Ziębik A., *Podstawy energetyki cieplnej* Warszawa, 2000, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [44] Szargut J., *Egzergonomiczna ocena strat egzergii*, Gospodarka Paliwami i Energią, 2004, **5**, 27-28.
- [45] Rosen M.A., Dincer I., *Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes*, Energy Conversion and Management, 2003, **44**(10), 1633-1651.

- [46] Rosen M.A., *Exergy and economics: Is exergy profitable?*, Exergy, An International Journal, 2002, **2**(4), 218-220.
- [47] Sciubba E., *Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems*, Exergy, An International Journal, 2001, **1**(2), 68-84.
- [48] Chang H., Li J.-w., *A new exergy method for process analysis and optimization*, Chemical Engineering Science, 2005, **60**(10), 2771-2784.
- [49] Akpinar E.K., *Energy and exergy analyses of drying of eggplant slices in a cyclone type dryer*, Journal of Mechanical Science and Technology, 2005, **19**(2), 692-703.
- [50] Motevali A., Minaei S., *Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils*, Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 2012, **18**(1), 63-72.
- [51] Midilli A., Kucuk H., *Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio*, Energy, 2003, **28**(6), 539-556.
- [52] Prommas R., Rattanadecho P., Jindarat W., *Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB)*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, **39**(2), 242-250.
- [53] Bennamoun L., *An overview on application of exergy and energy for determination of solar drying efficiency*, International Journal of Energy Engineering, 2012, **2**(5), 184-194.
- [54] Akpinar E.K., *Thermodynamic analyses of strawberry drying process in a cyclone type dryer*, Journal of Scientific and Industrial Research, 2007, **66**(2), 152.
- [55] Hepbasli A., Erbay Z., Colak N., Hancioglu E., Icier F., *An exergetic performance assessment of three different food driers*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, **224**(1), 1-12.
- [56] Peinado D., de Vega M., García-Hernando N., Marugán-Cruz C., *Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer*, Applied Thermal Engineering, 2011, **31**, 1039-1049.
- [57] Kong L., Liu H., Li J., Tao J., *Waste heat integration of coating paper machine drying process*, Drying Technology, 2011, **29**(4), 442-450.

- [58] Erbay Z., Hepbasli A., *Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying*, Energy Conversion and Management, 2014, **78**, 499-507.
- [59] Akpınar E.K., Midilli A., Bicer Y., *The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process*, Journal of Food Engineering, 2006, **72**(4), 320-331.
- [60] Li H., Yang H., *Energy and exergy analysis of multi-functional solar-assisted heat pump system*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 2010, **5**(3), 130-136.
- [61] Corzo O., Bracho N., Vásquez A., Pereira A., *Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices*, Journal of Food Engineering, 2008, **86**(2), 151-161.
- [62] Akpınar E.K., *Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2004, **31**(8), 1165-1176.
- [63] Szargut J., *Bilans eksergetyczny procesów cieplnych*, Energetyka Przemysłowa, 1961, **3**, 73-79.
- [64] Bes T., *Egzergia w procesach ogrzewania, klimatyzacji i suszenia*, Energetyka Przemysłowa. 1962, **10**(11), 388-392.
- [65] Erbay Z., Icier F., *Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology*, Journal of Food Engineering, 2009, **91**(4), 533-541.
- [66] Erbay Z., Icier F., *energy and exergy analyses on drying of olive leaves (olea europaea l.) in tray drier*, Journal of Food Process Engineering, 2011, **34**(6), 2105-2123.
- [67] Coskun C., Bayraktar M., Oktay Z., Dincer I., *Energy and exergy analyses of an industrial wood chips drying process*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 2009, **4**, 224-229.
- [68] Cay A., Tarakçioğlu I., Hepbasli A., *Exergetic analysis of textile convective drying with stenters by subsystem models: Part 1—Exergetic modeling and evaluation*, Drying Technology, 2010, **28**(12), 1359-1367.
- [69] Ren C., Tang G., Li N., Zhang G., Yang J., *Analysis of exergy of moist air and energy saving potential in HVAC by evaporative cooling or energy recovery*, International Journal on Architectural Science, 2001, **2**(4), 113-117.

- [70] Erbay Z., Icier F., *Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer*, Drying Technology, 2009, **27**(3), 416-427.
- [71] Cay A., Tarakçioğlu I., Hepbasli A., *Exergetic performance assessment of a stenter system in a textile finishing mill*, International Journal of Energy Research, 2007, **31**(13), 1251-1265.
- [72] Dincer I., Sahin A.Z., *A new model for thermodynamic analysis of a drying process*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, **47**(4), 645-652.
- [73] Filonienko G., Lebediew P.D., *Urządzenia suszarnicze*, Warszawa, 1956, Państwowe Wydawnictwa Techniczne.
- [74] Aghbashlo M., Kianmehr M.H., Arabhosseini A., *Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer*, Drying Technology, 2008, **26**(12), 1501-1508.
- [75] Akpınar K.E., Midilli A., Bicer Y., *Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer*, Energy Conversion and Management, 2005, **46**, 2530-2552.
- [76] Nazghelichi T., Kianmehr M.H., Aghbashlo M., *Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes*, Energy, 2010, **35**(12), 4679-4684.
- [77] Pandey A., Tyagi V., Park S., Tyagi S., *Comparative experimental study of solar cookers using exergy analysis*, Journal of thermal analysis and calorimetry, 2011, **109**(1), 425-431.
- [78] Shukuya M., Hammache A., *Introduction to the concept of exergy-for a better understanding of low-temperature-heating and high-temperature-cooling systems*, VTT TIEDOTTEITA, 2002.
- [79] Syahrul S., Dincer I., Hamdullahpur F., *Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles*, International Journal of Thermal Sciences, 2003, **42**(7), 691-701.
- [80] Inaba H., Husain S., Horibe A., Haruki N., *Heat and mass transfer analysis of fluidized bed grain drying*, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 2007, **41**(1), 52-62.
- [81] Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I., *Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles*, Exergy, An International Journal, 2002, **2**(2), 87-98.
- [82] Szargut J., *Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes*, Energy, 2002, **27**(4), 379-389.

- [83] Ranjbaran M., Zare D., *Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans*, Energy, 2013, **59**, 484-493.
- [84] Hepbasli A., *A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, **12**(3), 593-661.
- [85] Szargut J., *Exergy analysis*, The Magazine of Polish Academy of Sciences, 2005, **3**(7), 31-33.
- [86] Wall G. *Exergy, ecology and democracy—Concepts of a vital society or a proposal for an exergy tax*, in *Proc. International Conference on Energy Systems and Ecology, Krakow, Poland*. 1993.
- [87] Connelly L., Koshland C.P., *Exergy and industrial ecology—Part 1: An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution*, Exergy, An International Journal, 2001, **1**(3), 146-165.
- [88] Gong M., Wall G., *On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods*, Exergy, An International Journal, 2001, **1**(4), 217-233.
- [89] Szargut J., Stanek W., *Influence of the pro-ecological tax on the market prices of fuels and electricity*, Energy, 2008, **33**(2), 137-143.
- [90] Ziębik A., Szargut J., *Podstawy gospodarki energetycznej*, Gliwice, 1995, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [91] Stanek W., *Iterative method to evaluate the ecological cost of imported goods*, International Journal of Thermodynamics, 2001, **4**(4), 191-198.
- [92] Fahey C. *Neural network with learning by backward error propagation*, Dostępny w Internecie: http://colinfahey.com/neural_network_with_back_propagation_learning/neural_network_with_back_propagation_learning.html [Dostęp: 20.07.2015].
- [93] Stefanowski J., *Sztuczne sieci Neuronowe*, Dostępny w Internecie: www.cs.put.poznan.pl/jstefanowski/aed/TPDANN.pdf [Dostęp: 20.07.2015].
- [94] Urbanek P., *Sztuczne Sieci Neuronowe*, Dostępny w internecie: ftp://ftp.kis.p.lodz.pl/pub/people/P.UrbaneK/PSI_2013/SZTUCZNE%20SIECI%20NEURONOWE-wyklad_2007.pdf [Dostęp: 20.07.2015].
- [95] Chyliński E., Chyliński J. *Sieci Neuronowe*, Dostępny w Internecie: <http://www.ai.c-labtech.net/sn/sneuro.html> [Dostęp: 20.07.2015].

- [96] *Sztuczne Sieci Neuronowe*, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Dostępny w Internecie: http://fatcat.ftj.agh.edu.pl/~linux1/referaty/sieci_neuronowe.pdf [Dostęp: 20.07.2015].
- [97] Żurada J., Barski M., Jędruch W., *Sztuczne sieci neuronowe: podstawy teorii i zastosowania*, Warszawa, 1996, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [98] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Warszawa, 1993, Akademicka Oficyna Wydawnicza.
- [99] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D., *Sztuczne sieci neuronowe: podstawy i zastosowania*, Warszawa, 1994, Akademicka Oficyna Wydawnicza
- [100] Osowski S., Warszawska P., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Warszawa, 2006, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [101] *Sieci Neuronowe*, Katedra Inżynierii Komputerowej Politechniki Częstochowskiej, Dostępny w Internecie: <http://iisi.pcz.pl/nn/zastosowanie.php> [Dostęp: 20.07.2015].
- [102] Chyliński E., Chyliński J. *Sztuczne sieci neuronowe rozpoznawanie wzorców – podejście praktyczne*, Dostępny w Internecie: http://www.ai.clabtech.net/sn/pod_prakt.html [Dostęp: 20.07.2015].
- [103] Holmberg H., Ahtila P., *Evaluation of energy efficiency in biofuel drying by means of energy and exergy analyses*, Applied Thermal Engineering, 2005, **25**(17–18), 3115-3128.
- [104] Dincer I., *On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems*, International Journal of Energy Research, 2002, **26**(8), 717-727.
- [105] Fortes M., *Second-law modeling of deep bed drying processes with a simulation study of wheat air-recirculated fluidized-bed drying*, in *Proceedings of the 14th international drying symposium*,. 2004: São Paulo, Brazil. 22-25.
- [106] Fortes M., Ferreira W., *Second law analysis of drying: modeling and simulation of fluidized bed grain*, in *International Drying Symposium 14th*. 2004: São Paulo, Brazil. 301-308.
- [107] Xiang F., Wang L., Yue X.-f., *Exergy analysis and experimental study of a vehicle-mounted heat pump–assisted fluidization drying system driven by a diesel generator*, Drying Technology, 2011, **29**(11), 1313-1324.
- [108] Assari M.R., Basirat Tabrizi H., Najafpour E., *Energy and exergy analysis of fluidized bed dryer based on two-fluid modeling*, International Journal of Thermal Sciences, 2013, **64**, 213-219.

- [109] Dincer I., *Exergy as a potential tool for sustainable drying systems*, Sustainable Cities and Society, 2011, **1**(2), 91-96.
- [110] Akbulut A., Durmuş A., *Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer*, Energy, 2010, **35**(4), 1754-1763.
- [111] Colak N., Hepbasli A., *Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer*, Journal of Food Engineering, 2007, **80**(4), 1188-1193.
- [112] Corzo O., Bracho N., Vásquez A., Pereira A., *Optimization of a thin layer drying process for coroba slices*, Journal of Food Engineering, 2008, **85**(3), 372-380.
- [113] Prommas R., Keangin P., Rattanadecho P., *Energy and exergy analyses in convective drying process of multi-layered porous packed bed*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, **37**(8), 1106-1114.
- [114] Prommas R., Rattanadecho P., Cholaseuk D., *Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, **37**(4), 372-378.
- [115] Reyes A., Mahn A., Guzmán C., Antoniz D., *Analysis of the drying of broccoli florets in a fluidized pulsed bed*, Drying Technology, 2012, **30**, 1368-1376.
- [116] Liu Y., Aziz M., Fushimi C., Kansha Y., Mochidzuki K., Kaneko S., Tsutsumi A., Yokohama K., Myoyo K., Oura K., *Exergy analysis of biomass drying based on self-heat recuperation technology and its application to industry: A simulation and experimental study*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, **51**(30), 9997-10007.
- [117] Nazghelichi T., Aghbashlo M., Kianmehr M.H., *Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying*, Computers and Electronics in Agriculture, 2011, **75**(1), 84-91.
- [118] Nazghelichi T., Aghbashlo M., Kianmehr M.H., Omid M., *Prediction of energy and exergy of carrot cubes in a fluidized bed dryer by artificial neural networks*, Drying Technology, 2011, **29**(3), 295-307.
- [119] Karimi F., Rafiee S., *Optimization of air drying process for lavender leaves*, Int. Agrophys, 2011, **25**, 229-239.
- [120] Karimi F., Rafiee S., Taheri-Garavand A., Karimi M., *Optimization of an air drying process for Artemisia absinthium leaves using response surface and artificial neural network models*, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012, **43**(1), 29-39.

- [121] Aghbashlo M., Mobli H., Rafiee S., Madadlou A., *The use of artificial neural network to predict exergetic performance of spray drying process: A preliminary study*, Computers and Electronics in Agriculture, 2012, **88**, 32-43.
- [122] Khanali M., Aghbashlo M., Rafiee S., Jafari A., *Exergetic performance assessment of plug flow fluidised bed drying process of rough rice*, International Journal of Exergy, 2013, **13**(3), 387-408.
- [123] Dikmen E., Yakut A.K., Şahin A.Ş., *Energy and exergy analyses of vacuum drying process of pine timbers*, International Journal of Exergy, 2012, **11**(2), 137-151.
- [124] Geldart D., *Types of gas fluidization*, Powder Technology, 1973, **7**(5), 285-292.
- [125] Skoneczna-Łuczaków J., Ciesielczyk W., Kamińska-Pękala A., *Wpływ liczby fluidyzacji na egzergetyczną ocenę procesu suszenia biomasy*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2014, **53**(2), 119-121.
- [126] Ciesielczyk W., *Novel gas distributor for fluidized bed drying of biomass*, Drying Technology, 2009, **27**(12), 1309-1315.
- [127] Balbay A., Şahin Ö., Karabatak M., *An investigation of drying process of shelled pistachios in a newly designed fixed bed dryer system by using artificial neural network*, Drying Technology, 2011, **29**(14), 1685-1696.
- [128] Tatarzycki P., *Statystyka po ludzku*, Gliwice 2008, Wydawnictwo Złote Myśli.
- [129] Walawska B., Musioł M., Bunikowska B., S. F., *Siarczan amonu – odpad czy nawóz?*, Polish Journal of Chemical. Technology, 2005, **7** (1), 70-73.
- [130] Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościcach S.A., *Karta charakterystyki substancji – siarczan amonu AS21*, Tarnów 2010.
- [131] Żmuda M., *Instrukcja technologiczna procesu otrzymywania siarczanu amonu*, Tarnów 2010, Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościcach S.A.
- [132] Taler D., *Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu płynu*, Kraków, 2006, Wydawnictwo AGH.
- [133] Ciesielczyk W., Szymczak J., Wais J., Wolff A., *Efekty zmiany metody suszenia na instalacji produkcyjnej siarczanu amonu*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2005, **6**, 3-6.
- [134] *Materiały niepublikowane Zakładów Azotowych w Tarnowie – Mościcach S.A.*, 2012.