

- Robert Matysko, Weronika Wiśniewska,
Ośrodek Energetyki Ciepłej, Zakład Turbin, Instytut Maszyn Przepływowych - Polska Akademia Nauk
- Mariusz Schab,
Strabag Budownictwo Infrastruktury / Dyrektor Oddziału / Dyrekcja PC Centrum / Oddz.DD

Możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji WMA

Rosnące koszty oraz braki w dostawach paliw kopalnych wymuszają modernizację instalacji procesowych zasilanych tymi paliwami. Do takich instalacji można zaliczyć systemy wytwarzania podłoża bitumicznego WMA (ang. *Warm Mix Asphalt*). Wytwarzanie mieszanek asfaltowych wiąże się z zużyciem paliw kopalnych. Paliwa kopalne stosowane są w procesie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej (MMA) w instalacji WMA w celu osuszania oraz podtrzymania temperatury już przygotowanej mieszaniny asfaltu oraz kruszywa. Obecnie eksploatowane instalacje WMA bazują na technologiach, które nie są efektywne energetycznie.

Instalacja WMA składa się z kilku kluczowych z punktu widzenia efektywności energetycznej elementów. Do tych elementów można zaliczyć suszarnię bębnową z systemem palnika wielopaliwowego, systemy elementów wykonawczych (np. wentylatory, czy też zawory typu on/off) pracujących bez układów regulacji ciągłej (np. falowniki silników wentylatorów, silniki krokowe do zaworów, itp.) oraz kolumnę podgrzewającą mieszaninę mineralno-asfaltową w instalacji WMA, która w dalszym etapie procesu wyprowadzana jest już do transportu samochodowego. Schemat instalacji

WMA, która jest poddana analizie przedstawiono na rys. 1.

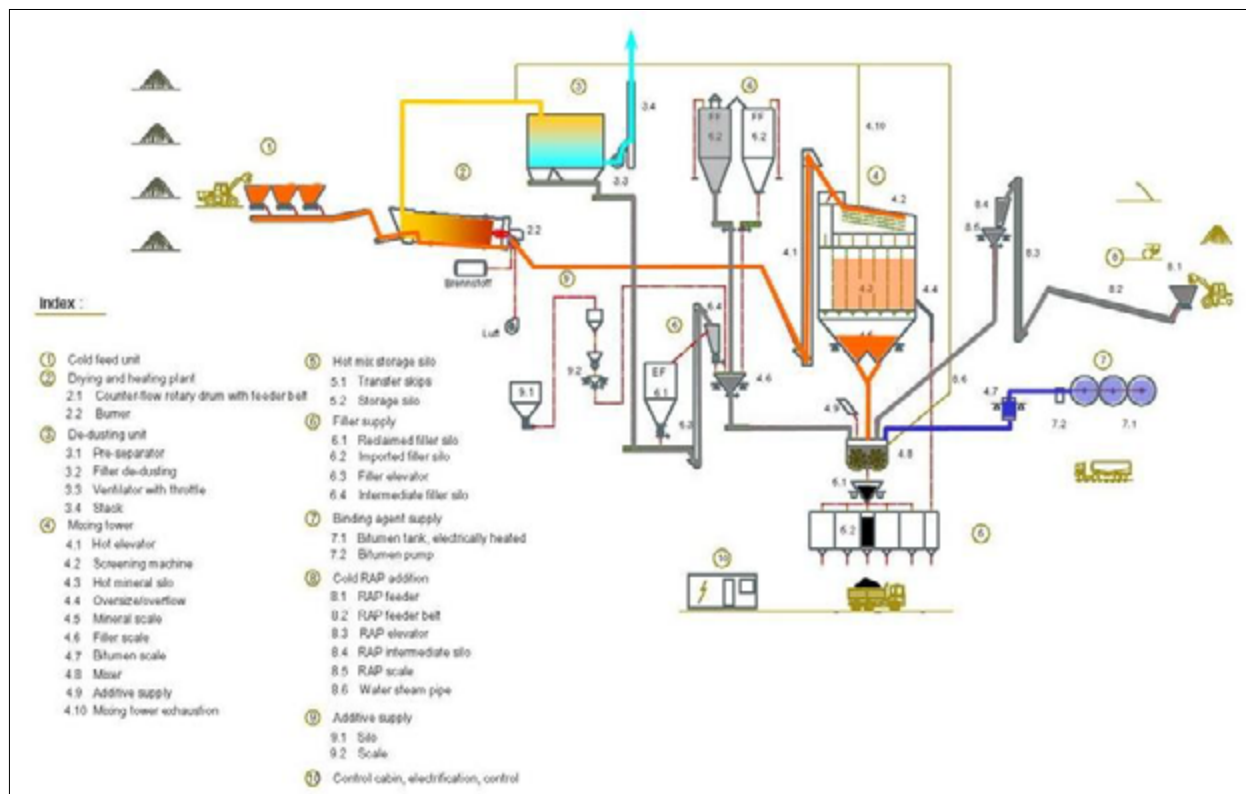
W przedstawionej na rys. 1 instalacji istnieje kilka możliwości zwiększenia efektywności energetycznej, które dalej w artykule zostaną opisane.

Efektywność energetyczna instalacji podczas jej eksploatacji w warunkach ustalonych oraz nieustalonych

Eksploatacja instalacji odbywa się w dwóch trybach pracy. Pierwszy tryb

to tryb rozruchu lub zmiany eksploatacyjne nastaw procesu podgrzewania, dla którego jest wymagany duży dostarczany strumień ciepła. Drugi tryb to długotrwała praca w warunkach nominalnych, gdzie wymagany jest tylko strumień ciepła podtrzymujący parametry procesu oraz niwelujący straty ciepła do otoczenia.

Proces produkcji mieszaniny mineralno-asfaltowej wymaga zarówno ogrzewania, jak i podtrzymania jej wysokiej temperatury. Brak ciągłości produkcji wymuszony przez bieżące zapotrzebowanie rynkowe wymusza przestoje, któ-



Rys. 1. Schemat instalacji WMA; 1. System doprowadzania kruszywa; 2. Suszarnia bębnowa (2.2 palnik wielopaliwowy); 3. System filtrów workowych (3.3. Wentylator wyciągowy, 3.4. Komin); 4. Wieża mieszająca; 5. Silos magazynujący gorącą mieszankę; 6. Instalacja wypełniacza; 7. Instalacja zasilania gorącym bitumieniem (asfalter); 8. System doprowadzania RAP (ang. Reclaimed Asphalt Pavement); 9. Doprowadzanie dodatków do mieszanki mineralno-asfaltowej; 10. System zarządzania

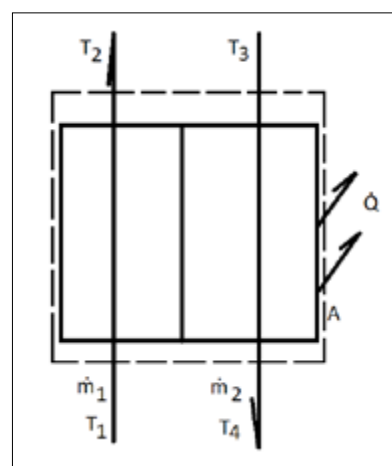
re generują zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz paliwo w przypadku konieczności doprowadzenia instalacji do parametrów nominalnych w dość krótkim czasie. Gdyby proces produkcji był ciągły, gdzie zachowywano by stany ustalone, to utrzymano by zmniejszone zapotrzebowanie na paliwa oraz energię elektryczną. Konieczność szybkiego podgrzania instalacji od parametrów otoczenia do parametrów nominalnych procesu (nawet do 200°C) wymusza dostarczanie w krótkim czasie dużych mocy grzewczych, co przekłada się bezpośrednio na wzrost zużycia paliw wykorzystywanych do grzania. Ilustracja na rys. 2 przedstawia rozptyły strumieni masy i ciepła dla ogrzewanej kolumny w instalacji WMA. Wzrost mocy grzewczej, który towarzyszy ruchowi instalacji od temperatury otoczenia do temperatury nominalnej pro-

cesu, związany jest zgodnie z poniższym równaniem (1) z dodatkowym strumieniem ciepła, który musi być dostarczony wraz z strumieniem masy \dot{m}_1 . Strumień masy medium grzewczego \dot{m}_1 musi podgrzać dostarczany ładunek o wydatku \dot{m}_2 , masę zimnej instalacji M od temperatury otoczenia do parametrów nominalnych procesu oraz zniwelować straty ciepłone do otoczenia $Q \approx kA\Delta t_{log}$.

$$Mcp \frac{dT}{dt} = \dot{m}_1 c_p (T_1 - T_2) + \dot{m}_2 c_p (T_3 - T_4) - kA\Delta t_{log} \quad (1)$$

Każda zmiana temperatury instalacji w czasie wymaga zmiany dostarczonego strumienia ciepła, co związane jest ze strumieniem masy paliwa, czynnika grzewczego lub bezpośrednio mocy grzewczej elektrycznej.

Dla warunków ustalonych wymagany dostarczany strumień ciepła niweluje



Rys. 2. Rozptyły strumieni masy i ciepła w kolumnie produkującej mieszankę mineralno-asfaltową MMA

je tylko straty ciepła do otoczenia oraz podgrzewa kruszywo zgodnie z równaniem (2) bez konieczności zwiększania

strumienia masy medium grzewczego \dot{m}_1 na pokrycie zmiany temperatury instalacji w czasie (człon $Mcp \frac{dT}{dt}$ z równania (1) jest wyeliminowany). W efekcie dla stanu ustalonego z równania (2) wynika, że dostarczany strumień ciepła wraz z masowym wydatkiem czynnika grzewczego niweluje tylko straty do otoczenia $kA\Delta t_{log}$ oraz dostarcza ciepło na podgrzanie strumienia masy mieszaniny mineralno-asfaltowej opisanego zależnością $\dot{m}_2 c_p (T_3 - T_4)$.

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 c_p (T_1 - T_2) &= \\ &= kA\Delta t_{log} - \dot{m}_2 c_p (T_3 - T_4) \end{aligned} \quad (2)$$

Powyżej przedstawione równania w postaci ogólnej w dalszej pracy były uszczegółowione w kodzie numerycznym przygotowanym do celów określania parametrów instalacji WMA z uwagi na możliwość regeneracyjnego podgrzewu powietrza.

Możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji z uwagi na optymalizację procesu technologicznego

W tab. 1 przedstawiono zalecane zakresy temperatury, w których określony typ mieszaniny mineralno-asfaltowej powinien być wytwarzany.

Z tab. 1 wynika, że rozpiętość temperatur, dla których instalacja ma osiągać gotowość produkcyjną jest dość szeroka i waha się od 145°C do 185°C. Z termodynamicznego punktu widzenia tak szeroki zakres temperatur wymagany w procesie technologicznym można uzyskać stosując ogrzewanie elektryczne, ogrzewanie z wykorzystywaniem płomienia lub ogrzewanie z wykorzystaniem medium pośredniczącego. Jednocześnie dość wysoka temperatura procesu (powyżej 150°C) eliminuje możliwości stosowania bardziej ekologicznych systemów grzewczych (np. wysokotemperaturowe pompy ciepła). Proces technologiczny wytwarzania MMA wy-

RECOMMENDED TECHNOLOGY TEMPERATURES			
ROAD BITUMEN	20/30 WMA	35/50 WMA	50/70 WMA
PREPARATION OF TEST SAMPLES			
The procedure of samples handling (heating time and temperature) is defined by EN 12594 standard. Samples heated in containers must then be homogenized by stirring. Avoid repeated heating of samples.			
Temperature of compaction of the asphalt mix samples (warm mix)	140 – 145°C*	130 – 135°C*	120 – 125°C*
Temperature of compaction of the asphalt mix samples (hot mix)	155 – 160°C	140 – 145°C	135 – 140°C
PRODUCTION OF ASPHALT MIX USING WARM MIX ASPHALT TECHNOLOGY			
RECOMMENDED TEMPERATURES AT ASPHALT MIXING PLANTS			
Pumping temperature of the binder	160 – 185°C	155 – 180°C	150 – 170°C
Temperature during the production of asphalt mix	150 – 170°C**	140 – 160°C**	130 – 150°C**
RECOMMENDED TEMPERATURES OF 'WARM' MIX ASPHALT PAVING			
Recommended temperature at the start of compaction	min. 140°C**	min. 130°C**	min. 120°C**
INDUSTRIAL PRODUCTION OF 'HOT' MIX ASPHALT MIX ASPHALT PLACED IN DIFFICULT CLIMATIC CONDITIONS OR TRANSPORTED OVER LONG DISTANCES APPLICATION OF RAP MATERIAL			
RECOMMENDED TEMPERATURE AT THE ASPHALT PLANT			
Pumping temperature of the binder	170 – 185°C	170 – 180°C	160 – 170°C
Temperature during the production of asphalt mix	170 – 185°C	160 – 170°C	155 – 165°C
RECOMMENDED TEMPERATURE OF PLACING ASPHALT MIX 'ON HOT'			
Recommended temperature at the start of compaction	160 – 170°C***	145 – 155°C***	145 – 155°C***

Tab. 1. Zestawienie wymaganych parametrów termicznych dla wytwarzania mieszaniny mineralno- asfaltowej (1)

maga podtrzymania wysokiej temperatury dostarczanego asfaltu, jak również suszenia kruszywa, które jest mieszane z asfaltem w wieży mieszającej. Asfalt dostarczany do zbiorników wymaga podgrzewania, które najczęściej realizowane jest elektrycznie. Najczęściej elektrycznie jest również podgrzewana kolumna mieszająca. Dodatkowo w realizowanym procesie technologicznym

wymagany jest proces osuszania i podgrzewania kruszywa, który realizowany jest w suszarni bębnowej opalanej palnikami kopalnymi z wykorzystaniem palnika wielopaliwowego (w tym obszarze stosowany jest olej opałowy w początkowym etapie rozgrzewania suszarni oraz w dalszym etapie już pył węglowy, jako paliwo podtrzymujące proces spalania w celu suszenia kruszywa).

Obecne koszty ogrzewania elektrycznego są przez producentów MMA akceptowalne z uwagi na fakt wysokiej elastyczności oraz mniejszych problemów eksploatacyjnych takiej instalacji. W dłuższej perspektywie czasowej jednak przekładać to się może na zwiększenie całkowitych kosztów eksploatacji, zwłaszcza w przypadku częstych zmian nastaw parametrów procesu oraz konieczności rozruchu instalacji od temperatury otoczenia do temperatury nominalnej. Rosnące koszty paliw kopalnych takich jak węgiel, olej opałowy, czy też gaz - może wymusić poszukiwanie alternatywnych metod zasilania instalacji ciepłem. Dla procesu technologicznego produkcji MMA, w celu zwiększenia efektywności energetycznej instalacji - najlepszą praktyką było by utrzymanie temperatury procesu w dolnym dopuszczalnym zakresie temperatur. Temperatury procesu w górnym zakresie dopuszczalnym wymuszają stosowanie znacznie wyższych dostarczanych strumieni ciepła (co przekłada się na zwiększenie masowego wydatku paliwa lub większe zużycie prądu elektrycznego). Obszar dopuszczalnych zakresów zalecanej temperatury waha się nawet w obszarze 15°C. Tak zdefiniowany duży zakres dopuszczalnej temperatury procesu nie wymusza zastosowania automatyki i systemów akwizycji danych o wysokiej precyzji. Automatyka np. oparta na ciągłych regulatorach PID, wraz z dokładniejszymi o klasę pomiarową systemami akwizycji temperatury, może umożliwić precyzyjną regulację temperatury procesu w tzw. punkt pracy. W efekcie możliwe jest precyzyjne ustalenie optymalnego z punktu widzenia efektywności energetycznej temperatury procesu technologicznego. W tym wypadku zachodzi konieczność zastosowania systemów wykonawczych, wyposażonych w falowniki elektryczne (dla pomp i wentylatorów) oraz silniki krokowe dla zaworów regulacyjnych. Konieczna byłaby również rezygnacja ze sterowania procesem z wykorzystaniem dwustanowego PLC, na sterowanie ciąg-

łe PID lub FuzzyLogic z precyzyjnym monitoringiem realizowanego procesu mieszania MMA oraz suszenia kruszywa.

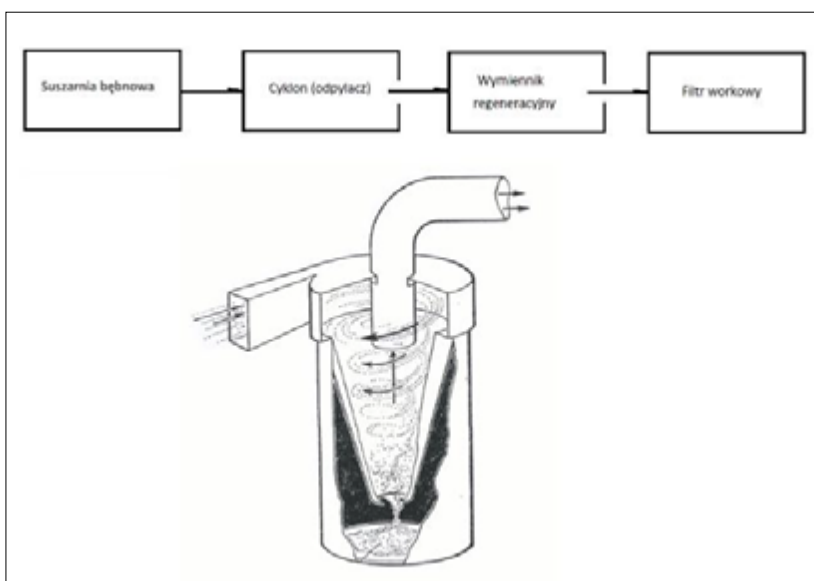
Możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji z uwagi na optymalizację konstrukcji kluczowych elementów grzewczych

Istniejące systemy zasilania w ciepło instalacji WMA z reguły są przewymiarowane. Możliwe jest zaistnienie takiej sytuacji, że palnik o mocy nominalnej 2 MW pracuje w warunkach nieopty-

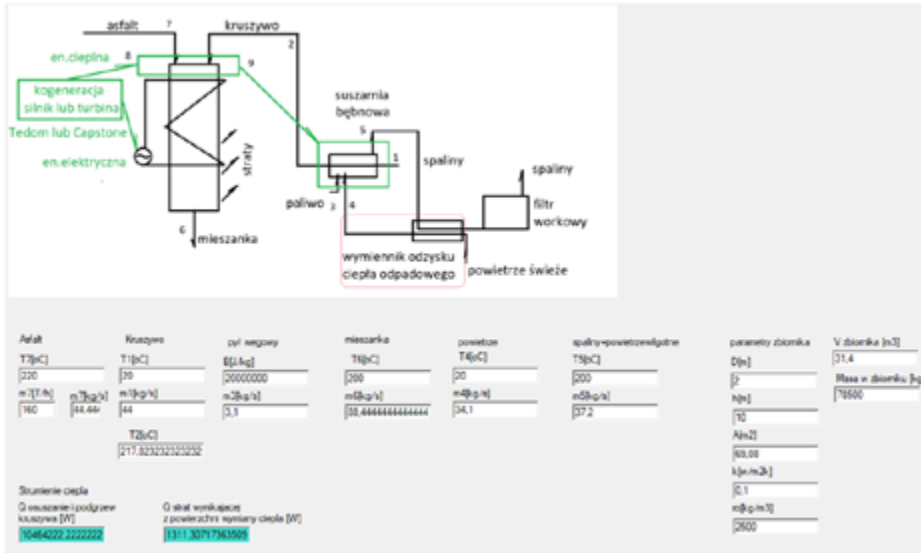
malnych z uwagi na masowe strumienie suszonego kruszywa, które tylko wymagają dostarczenia np. 500 kW. Może to przyczyniać się to do spalania paliwa przy wysokim nadmiarze powietrza lub jego spalaniu niepełnym. W efekcie może to powodować szkodliwą emisję NO_x i SO_x podczas spalania pyłu węglowego przy dużym nadmiarze powietrza lub nadmierne zapylenie i emisję CO, w przypadku gdy pył węglowy spalany jest niepełnie. Aktualnie eksploatowane instalacje są pozbawione monitoringu procesu spalania. Proces suszenia kruszywa odbywa się przy kontakcie bezpośrednim z generowanym płomieniem (rys. 3). W efekcie spaliny generowane podczas tego procesu mają jeszcze wysoką wartość energetyczną. Wyższe parametry termiczne ciepła odpadowego mogły by być zagospodarowane. Z uwagi na nadmierne zapylenie wynikające z przedmuchu kruszywa i porywanie pyłu, który znacząco degraduje powierzchnie kanałów spalinowych proces odzysku ciepła jest utrudniony. Chcąc poprawić efektywność energetyczną takiej instalacji wymagana by była przebudowa instalacji suszarni bębnowej w taki sposób, by spaliny odprowadza-



Rys. 3. Proces suszenia kruszywa w suszarni bębnowej



Rys. 4. Umiejscowienie odpylacza w instalacji WMA z regeneracyjnym podgrzewem powietrza



Rys. 5. Proponowane modernizacje w instalacji WMA z uwagi na efektywność energetyczną

ogrzewania kruszywa w suszarni bębnowej. Inną opcją mogło być zastosowanie separatora dużych cząstek pyłu w postaci niewielkiego cyklonu, co mogłoby umożliwić pracę regeneracyjnego wymiennika ciepła w obszarze dopuszczalnych warunkami technicznymi degradacji materiałowej (rys. 4).

Na rys. 5 przedstawiono oprogramowanie wykonane do celu określenia możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji WMA z uwagi na możliwość zastosowania wymiennika regeneracyjnego. Zastosowanie wymiennika regeneracyjnego w układzie jest możliwe pod warunkiem zapewnienia wysokiej czystości odprowadzonych spalin. Pył generowany podczas suszenia kruszywa nie umożliwia zastosowa-

Parametr kluczowy dla procesu produkcji WMA	Układ bez regeneracyjnego odzysku ciepła	Układ z regeneracyjnym odzyskiem ciepła
Asfalt - temperatura T_7 [°C]	220	220
Asfalt - masowe natężenie przepływu \dot{m}_7 $\left[\frac{kg}{s}\right]$	44	44
Kruszywo - temperatura T_1 [°C]	20	20
Kruszywo - masowe natężenie przepływu \dot{m}_1 $\left[\frac{kg}{s}\right]$	44	44
Pył węglowy - wartość opałowa B $\left[\frac{J}{kg}\right]$	20000000	20000000
Pył węglowy - masowe natężenie przepływu \dot{m}_3 $\left[\frac{kg}{s}\right]$	3,1	2,45895
Spaliny - temperatura T_5 [°C]	200	200
Spaliny - masowe natężenie przepływu \dot{m}_5 $\left[\frac{kg}{s}\right]$	37,2	29,5
Gotowa mieszanka WMA - temperatura T_6 [°C]	200	200
Gotowa mieszanka WMA - masowe natężenie przepływu \dot{m}_6 $\left[\frac{kg}{s}\right]$	88,4	88,4
Powietrze dla procesu spalania - masowe natężenie powietrza \dot{m}_4 $\left[\frac{kg}{s}\right]$	34,1	27,04
Powietrze dla procesu spalania na wylocie z podgrzewacza regeneracyjnego - temperatura T_4 [°C]	-	100
Powietrze dostarczane do palnika z otoczenia bez podgrzewacza regeneracyjnego - temperatura T_4 [°C]	20	-
Temperatura otoczenia T_0 [°C]	20	20
Temperatura kruszywa po podgrzaniu T_2 [°C]	217,8	217,8
Strumień ciepła dostarczany przez palnik Q [W]	10464222	10464222

Tab. 2. Zestawienie termicznych parametrów obiegu

ne z jej przestrzeni wraz z odparowaną wodą z kruszywa nie niósł z sobą pyłu pochodzącego z kruszywa. Pył ten posiada znaczący degradujący wpływ na materiały stosowane w układzie kanałów rozprowadzających i w układzie filtra workowego. Jedną z opcji przebudowy było by wprowadzenie w miejsce ukła-

du filtra workowego systemu elektrofiltrów, które charakteryzują się mniejszym spadkiem temperatury przepływających spalin oraz wymiennika regeneracyjnego powietrza. Powietrze atmosferyczne po podgrzaniu dostarczane mogłoby być na palnik, w efekcie czego możliwa byłaby redukcja zużycia paliwa stosowanego do

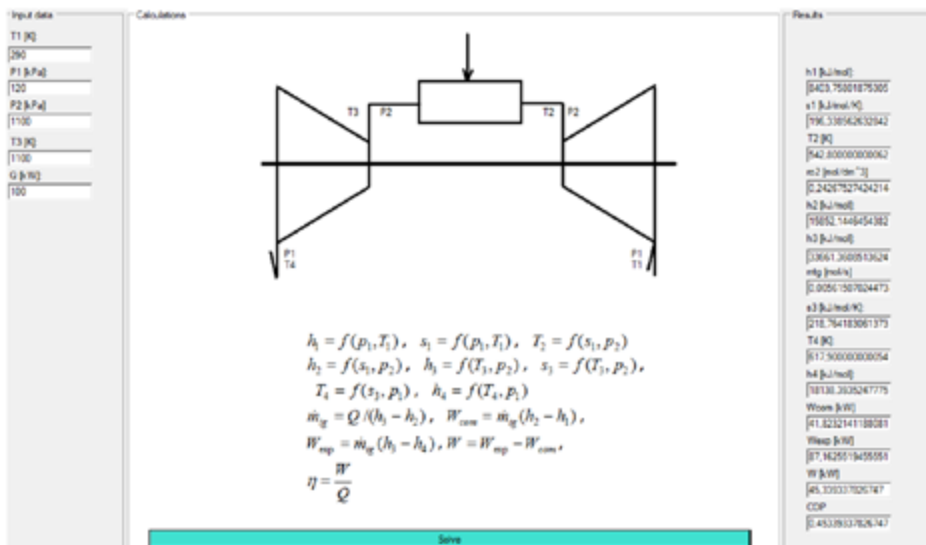
nia wymiennika regeneracyjnego bez dodatkowych systemów odpylania z uwagi na możliwą jego szybką degradację. W tab. 2 przedstawiono również wyniki obliczeń dla zastosowanego systemu regeneracji jak na rys. 5. W przypadku zastosowania układu regeneracji spada zużycie pyłu węglowego przy zachowaniu

strumienia ciepła dostarczanego do suszarni bębnowej. Również mniejsza jest ilość spalin generowana w suszarni bębnowej, co przekłada się na mniejsze zużycie układu filtrów workowych, mniejszą pracę wentylatora wyciągowego powietrza z układu filtracyjnego oraz mniejszą pracę wentylatora dostarczającego powietrze do palnika.

Poprawa efektywności energetycznej instalacji WMA nie musi wiązać się z bezpośrednią ingerencją w istniejące w niej systemy energetyczne. Efektywność energetyczną tej instalacji może również poprawić zwiększenie grubości izolacji wysokotemperaturowych podsystemów, co w efekcie zmniejszy straty ciepła do otoczenia. Można również zastosować bardziej efektywne systemy energetyczne, lub wprowadzić można odnawialne źródła energii elektrycznej (np. panele PV), w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej zakupywanej u dystrybutora.

Kogeneracyjne systemy grzewcze

W celu poprawy efektywności energetycznej instalacji WMA przy założeniu ciągłej jej eksploatacji, można zaproponować z uwagi na konieczność dostarczania zarówno energii elektrycznej oraz ciepła system kogeneracyjny oparty na turbinie gazowej. Ciepło odpadowe z tej turbiny (spaliny o temperaturze powyżej 200°C) można wykorzystać do osuszenia i podgrzania kruszywa, natomiast prąd elektryczny można wykorzystać od podtrzymania temperatury kolumn mieszającej i magazynujących z wykorzystaniem ogrzewania elektrycznego. Wyprodukowany prąd elektryczny i ciepło można również spożytkować na cele własne (np. ogrzewanie budynków). Można też te produkty sprzedać. Turbina gazowa teoretycznie posiada możliwość uzyskiwania temperatury na



Rys. 6. Obieg termodynamiczny turbiny gazowej

wylocie, która pozwala pozyskiwać parametry termiczne umożliwiające realizację procesu technologicznego na instalacji WMA. Przy wysokiej jej elastyczności pracy (elastyczność w zakresie od 30% do 100% mocy nominalnej) jest możliwe takie dobranie parametrów eksploatacyjnych, by możliwe było zapewnienie ciągłości dostaw, z uwagi na zmienne zapotrzebowanie na moc cieplną i elektryczną procesu produkcji MMA. Obieg turbiny gazowej przedstawiony na rys. 6 umożliwia wygenerowanie gorącego czynnika na poziomie 344°C. W przypadku zaimplementowania turbiny gazowej jako systemu grzewczego umożliwiającego produkcję MMA otrzymuje się obieg energetyczny poligeneracyjny, w którym możliwe jest pozyskiwanie kilku produktów jednocześnie z zachowaniem wysokiej efektywności energetycznej.

Obiegi kogeneracyjne oparte na komercyjnych silnikach kogeneracyjnych tłokowych, nie mogą być aktualnie stosowane z uwagi na wysokie temperatury, które są niezbędne podczas realizowanego procesu technologicznego w produkcji MMA. Możliwe jest jednak, że po

modyfikacjach tych silników z uwagi na możliwość pozyskiwania wysokiej temperatury, ich aplikacja w systemie WMA będzie możliwa.

Wnioski

Aktualnie efektywność energetyczna produkcji MMA (mieszanki mineralno-asfaltowej) w instalacjach WMA jest dość niska i są znaczące problemy technologiczne oraz materiałowe, by tą efektywność energetyczną podnieść. W artykule spróbowano przeanalizować możliwości zwiększenia efektywności energetycznej instalacji produkującej mieszaninę mineralno-asfaltową. Przeanalizowano możliwości ograniczenia strat ciepłych do otoczenia, przedstawiono możliwości wynikające z zastosowania nowych systemów sterowania z uwagi na zwiększenie efektywności energetycznej. Przedstawiono system regeneracyjnego podgrzewu powietrza oraz zaproponowano modernizację instalacji WMA w układ poligeneracyjny. □