



Analiza porównawcza mobilnych i stacjonarnych układów technologicznych przesiewania i kruszenia

Tomasz Gawenda
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

1. Wstęp

Porównywanie układów technologicznych produkujących kruszywa mineralne, również z odpadów mineralnych może odbywać się za pomocą oceny efektów końcowych produktów [1], a także wskaźników (technicznych, technologicznych, energetycznych, ekonomicznych) charakteryzujących pracę urządzeń w danym układzie, które mogą być zależne od siebie. Piecuch T. i zespół [11] zrealizowali pracę badawczą, gdzie w wyniku dokonania prób przemysłowych pracy maszyn przeróbczych pod pełnym obciążeniem udowodniono, że nawet w momencie rozruchu zainstalowane moce są i tak 3 do 4 razy większe od koniecznych. To zawiżyło poważne koszty inwestycyjne nowych zakładów przeróbczych i to nie tylko w przeróbce węgla. W ramach tych badań opracowano wytyczne do oszczędnego projektowania dla nowo budowanych zakładów przeróbki mechanicznej, które zostały przyjęte i zaakceptowane przez biura projektów SEPARATOR oraz POL MAG Katowice. Nie obliczono w tej pracy np. w skali Resortu Górnictwa i Energetyki wymiernych korzyści w złotówkach, jako sprawę trudną do ustalenia. Stwierdzono natomiast, że koszt nowych instalacji elektrycznych w nowo budowanych zakładach przeróbki mechanicznej węgla po uwzględnieniu tych wyników badań musiałby obniżyć się o około 50% w stosunku do uprzednich kosztów.

Energochłonność procesu rozdrabniania zależy od wydajności maszyn, która zależna jest od parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych urządzeń oraz właściwości fizyko-mechanicznych surowca [5, 6,

8, 10, 13, 15], podobnie jak energochłonność i sprawność procesu przesiewania [16]. Przy określaniu wydajności maszyny należy brać pod uwagę stopień rozdrobnienia uzyskany przy danym przerobie, a przy energochłonności ilość zużytej energii pozwalającą doprowadzić określoną jednostkę masy materiału do pożądanego uziarnienia w określonym czasie [11, 13, 15]. Za pomocą takich wskaźników można porównywać ze sobą układy technologiczne rozdrabniania, ale przy wyborze właściwych urządzeń należy kierować się jeszcze kolejnym bardzo ważnym wskaźnikiem, jakim jest żywotność elementów roboczych, czyli ogólnie rzecz biorąc, koszty eksploatacyjne [4, 7].

Dokonanie dokładnego porównania układów mobilnych i stacjonarnych w praktyce jest bardzo trudne, gdyż wymaga rzetelnego zbierania przez odpowiedni okres czasu szczegółowych informacji na temat pracy układu technologicznego w danym zakładzie, dotyczących przerobu, zużycia energii elektrycznej czy oleju napędowego oraz innych czynników związanych z kosztami. Kolejnym ważnym wymogiem jest porównywanie układów przerabiających te same surowce mineralne o znanych składach granulometrycznych nadawy jak i produktów, tak aby można było określić podstawowe wskaźniki procesów technologicznych [2, 3]. Zestawienie takich danych nie jest łatwe, ponieważ większość zakładów nie prowadzi ewidencji energetycznej dla poszczególnych maszyn, które w większości nie posiadają liczników pomiarowych albo też niechętnie udziela takich informacji. Przytoczone w opracowaniu oceny pracy efektywnej instalacji układów technologicznych są wynikiem zebranych informacji oraz analiz na podstawie przeprowadzonych wywiadów oraz udostępnionych danych.

Uznano także, że najwłaściwszą formą porównania energochłonności różnie zasilanych mediami instalacji przerobczych jest przedstawienie wyników zużycia energii w dżulach, uwzględniając znane zależności, że 1 kWh energii elektrycznej to 3,6 MJ, a kaloryczność (wartość opałowa) 1 litra oleju napędowego wynosi ok. 38 MJ. Dla obliczenia kosztów przyjęto kurs 1€ równy 4,16 zł oraz cenę 1 litra ON równą 5,81 zł.

Celem artykułu jest porównanie różnych układów mobilnych i stacjonarnych z zawrotem (zamkniętych) lub bez (otwartych) produkujących różnego rodzaju kruszywa mineralne. Do oceny brano pod uwagę wskaźniki, takie jak koszty zużycia paliwa lub energii elektrycznej, jednostkowe zużycie energii, maksymalne stopnie rozdrobnienia, oraz

wskaźnik będący ilorazem zużycia energii i maksymalnego stopnia rozdrobnienia przy jednokrotnym pomniejszeniu nadawy o masie 1 tony.

2. Przegląd wybranych układów instalacji produkcji kruszyw

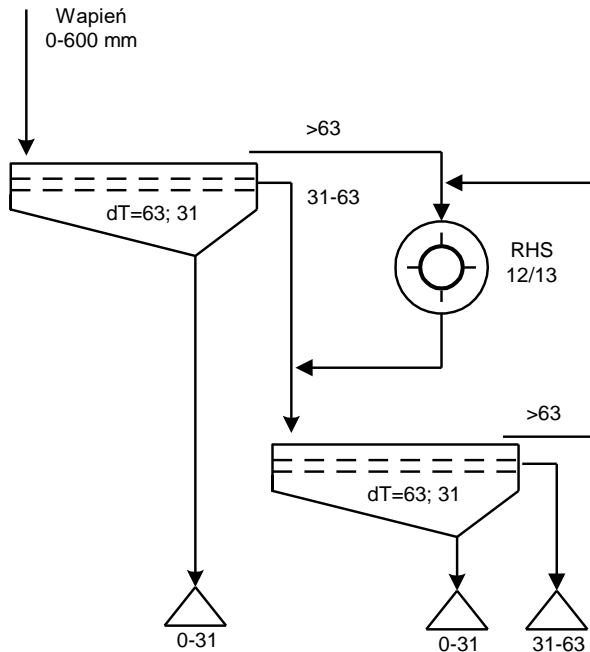
2.1. Produkcja kruszyw wapiennych w układzie mobilnym z kruszarką udarową Remax 1348

Zaprezentowany na rysunku 1 schemat technologiczny układu mobilnego Remax 1348 firmy SBM Mineral Processing został zaprojektowany do produkcji kruszyw wapiennych karbońskich bezpośrednio w wyrobisku. Maksymalne uziarnienie nadawy wynosi 600 mm, a uziarnienie produktu 0–63 mm, który podlega rozklasyfikowaniu na 3 frakcje kruszyw. Wydajność układu wynosi ponad 220 Mg/h, przy czym ilość materiału podlegającego rozdrobnieniu w kruszarce wynosi ok. 200 Mg/h.

Omawiany układ składa się z kruszarki udarowej wirnikowej RHS12/13 o średnicy wirnika 1200 mm, prędkości liniowej elementów udarowych 30 m/s i mocy silnika 160 kW zasilanego agregatem Diesla 300 kVA. Nadawa odsiewana jest wstępnie na wibracyjnym podajniku rusztowym na dwie frakcje, tj. <31 mm zawierającą zanieczyszczenia i 31–63 mm kierowaną na przesiewacz dwupokładowy wibracyjny KQ 14/38-2. Surowiec gruboziarnisty (>63 mm) jest rozdrabniany w kruszarce i następnie przesiewany. W przesiewaczu dwupokładowym produkowane jest kruszywo w dwóch klasach ziarnowych 0–31 i 31–63 mm; produkt nadsitowy kierowany jest w zawrocie do ponownego dokruszenia w kruszarce. Cały układ (tabela 1) zużywa ok. 28 l ON/h, co przy przerobie 200 Mg/h generuje koszty 39,2 €/h (163,07 zł/h), a zużycie paliwa 0,14 l/Mg. Maksymalny stopień rozdrobnienia dla układu wynosi 9,5.

Tabela 1. Wskaźniki pracy układu mobilnego z kruszarką udarową Remax
Table 1. Work indices for the mobile circuit with an impact crusher Remax

Zużycie paliwa na godz, l/h	Przerób, Mg/h	Zużycie paliwa na tonę, l/Mg	Koszt zużycia paliwa zł/Mg	Zużycie energii na tonę, MJ/Mg
28	200	0,14	0,81	5,32

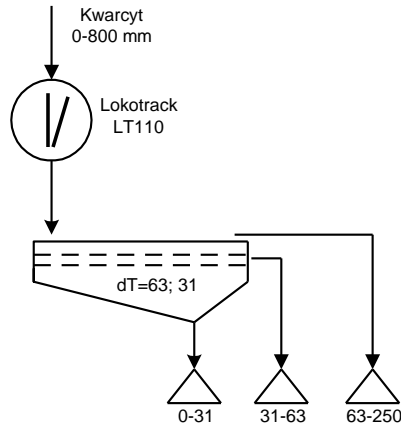


Rys. 1. Schemat mobilnej instalacji produkcji kruszyw wapiennych Remax
Fig. 1. Scheme of a mobile circuit of lime aggregate production Remax

2.2. Produkcja kruszyw kwarcytowych w układzie mobilnym z kruszarką szczękową Lokotrack LT110 współpracującym z układem stacjonarnym trójstadiowym

Układ mobilny produkcji kruszyw kwarcytowych składa się z mobilnej kruszarki szczękowej Lokotrack LT110 Metso Minerals i przesiewacza mobilnego Powerscreen Warrior 1800 (rys. 2). Wydajność układu technologicznego wynosi 300 Mg/h. Maksymalna wielkość uziarnienia nadawy dochodzi do 800 mm a produktu 250 mm. Maksymalny stopień rozdrobnienia wynosi 3,2. Uzyskiwane produkty rozdrabniania są rozsiewane na trzy frakcje: 0–31,5; 31,5–63 i 63–250 mm.

W tabeli 2 zestawiono przeroby i zużycie paliwa w wybranym okresie dla kruszarki oraz przesiewacza. Ilość zużytego paliwa dla obu maszyn w tym okresie wyniosła 22 769 litrów a przerób 113 845 Mg, co daje wskaźnik zużycia paliwa 0,2 l/Mg. Zużycie energii wynosi 7,6 MJ/Mg.



Rys. 2. Schemat mobilnej instalacji produkcji kruszyw kwarcytowych z kruszarką szczękową Lokotrack LT110

Fig. 2. Scheme of mobile circuit for quartz aggregate production with the Lokotrack LT110 jaw crusher

Tabela 2. Wskaźniki pracy układu mobilnego z kruszarką szczękową Lokotrack LT 110

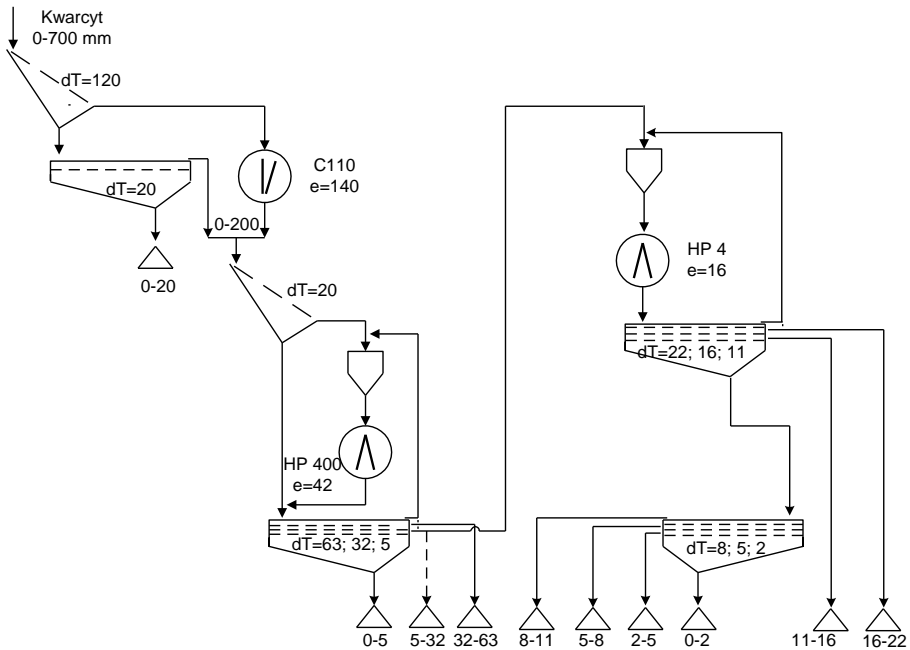
Table 2. Work indices for the mobile circuit with jaw crusher Lokotrack LT110

Ilość zużytego paliwa, l	Przerób, Mg	Zużycie paliwa na tonę, l/Mg	Koszt zużycia paliwa zł/Mg	Zużycie energii na tonę, MJ/Mg
22769	113845	0,20	1,16	7,6

W zależności od warunków złożowych, jeśli materiał nie jest zanieczyszczony, to frakcje 31,5–63 i 63–250 mm są kierowane do zbiornika międzyoperacyjnego i do zakładu stacjonarnego (rys. 3). Z materiału zanieczyszczonego produkuje się mieszankę 0–63 mm, a frakcja 63–250 mm jest kierowana do układu stacjonarnego. W ten sposób układ mobilny współpracujący z układem stacjonarnym stanowi jego uzupełnienie.

Do stacjonarnego zakładu kierowana jest nadawa o uziarnieniu 0–700 mm w ilości ok. 400 Mg/h wraz z materiałem pochodzącym z mobilnego zestawu. Uproszczony schemat układu stacjonarnego przedstawiono na rysunku 3. Surowiec odsiewany jest wstępnie na wibracyjnym podajniku rusztowym i materiał powyżej 120 mm kruszony jest w kruszarce szczękowej C110 Metso Minerals do maksymalnego uziarnienia produktów 200 mm. Produkty przekruszone oraz częściowo wcześniej odsia-

ne (20–120 mm) są wspólnie gromadzone a następnie zasilają zbiornik buforowy przed podajnikiem i kruszarką stożkową HP400 Nordberg pracującą na drugim stadium. W dalszej kolejności rozdrobniony materiał wraz z drobnym odsianym materiałem w podajniku jest przesiewany na przesiewaczu wibracyjnym trójpokładowym TS403 Nordberg. Produkt nadsitowy >63 mm jest zawracany do drugiego stadium kruszenia. Produkty 32–63 i 5–32 mm mogą tworzyć gotowe sortymenty lub opcjonalnie są kierowane do trzeciego stadium rozdrabniania w granulatorze stożkowym HP4 Nordberg. Po rozdrobnieniu produkty są klasyfikowane w dwóch przesiewaczach trójpokładowych TS403 Nordberg. W ten sposób cały układ zapewnia produkcję kruszyw w 9 różnych sortymentach handlowych. Całkowity stopień rozdrobnienia dla układu wynosi 16,1.



Rys. 3. Stacjonarny trójstadialny układ technologiczny produkcji kruszyw kwarcytowych

Fig. 3. Fixed three-stage circuit for quartz aggregate production

Roczne zużycie energii elektrycznej wyniosło 2 604,13 MWh przy przerobie 761 316 Mg. Jednostkowe zużycie energii elektrycznej dla całego układu wyniosło 3,42 kWh/Mg (12,3 MJ/Mg). Koszt energii elektrycznej wynosi 1,22 zł/Mg przy cenie 0,36 zł/kWh (tab. 3).

Tabela 3. Wskaźniki pracy układu stacjonarnego trójstadijalnego produkcji kruszyw kwarcytowych

Table 3. Work indices for the fixed three-stage circuit producing quartz aggregates

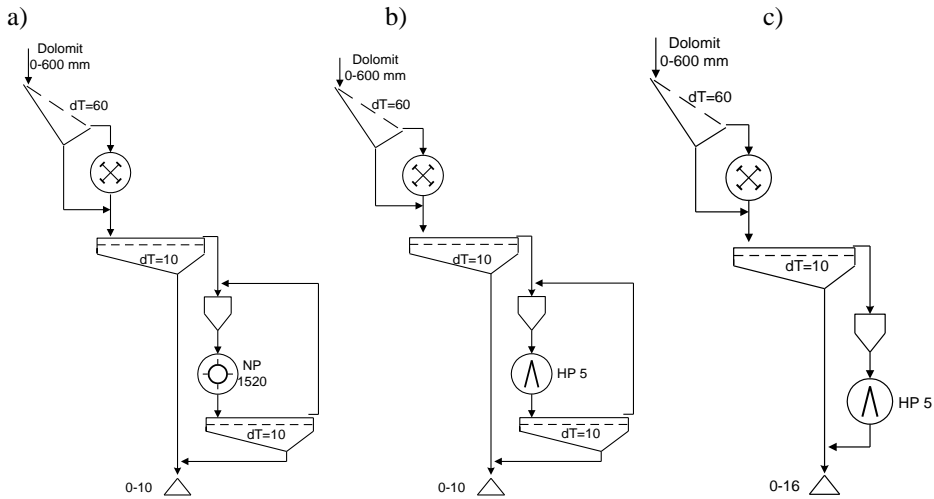
Ilość zużytej energii elektr., MWh	Koszt energii elektr., zł	Przerób, Mg	Zużycie energii elektr., kWh/Mg	Koszt energii zł/kWh,	Koszt zużycia energii elektr., zł/Mg	Zużycie energii na tonę, MJ/Mg
2 604,13	926 433,57	761 316,00	3,42	0,36	1,22	12,3

2.3. Produkcja kruszyw dolomitowych w układzie stacjonarnym dwustadijalnym z kruszarkami udarowymi i stożkowymi

Na rysunku 4 zaprezentowano dwustadijalne stacjonarne układy rozdrabniające dolomity. Pierwsze stadium układu technologicznego składa się z 4 równolegle pracujących kruszarek udarowych wirnikowych 40.99 firmy Makrum o wydajności każdej po 500 Mg/h i czterech przesiewaczy wibracyjnych typu PZ odsiewających drobny materiał z nadawy. Wskaźnik zużycia energii dla kruszarek wynosi 0,47 kWh/Mg a dla przesiewaczy 0,05 kWh/Mg. Maksymalne uziarnienie nadawy wynosi 600 mm a uziarnienie produktu dochodzi do 50 mm. Maksymalny stopień rozdrobnienia dla pierwszego stadium wynosi 12.

Drugie stadium rozdrabniania surowca, które zostało przedstawione na rysunku 4 w trzech różnych wariantach jest przykładem koncepcyjnego opracowania przez firmę Metso Minerals układów otwartych i zamkniętych produkujących kruszywa mineralne o uziarnieniu 0–10 mm lub 0–16.

Produkt uzyskany po kruszarkach z pierwszego stadium o uziarnieniu 0–50 mm cechuje się wysokim udziałem klasy drobnej (<10 mm; ok. 60%), dlatego układy technologiczne przewidują odsiewanie materiału przed zainstalowanymi kruszarkami drugiego stadium rozdrabniania.



Rys. 4. Dwustadialne układy stacjonarne produkcji kruszyw dolomitowych:
 (a) z kruszarkami stożkowymi w zamkniętym układzie – produkt <10 mm,
 (b) z kruszarkami stożkowymi w otwartym układzie – produkt <16 mm,
 (c) z kruszarkami udarowymi w zamkniętym układzie – produkt <10 mm

Fig. 4. Two-stage fixed circuits producing dolomite aggregates:
 (a) with cone crushers in closed circuit (product <10 mm),
 (b) with cone crushers in open circuit (product <16 mm),
 (c) with impact crushers in closed circuit (product <10 mm)

Instalacja pierwsza składa się z czterech granulatorów stożkowych typu Nordberg H5 z zawrotem, dwóch przesiewaczy typu MF 3,6x8,5 SD zastosowanych przed układem kruszenia oraz dwóch przesiewaczy typu MF 3,0x7,3 SD w zamkniętym układzie kruszenia (rys. 4a). Druga instalacja składa się z dwóch kruszarek tego samego typu bez zawrotu materiału oraz dwóch przesiewaczy typu MF 3,6x8,5 SD zastosowanych przed układem kruszenia (rys. 4b). W skład trzeciego układu zamkniętego wchodzi 3 kruszarki udarowe listowe NP1520, 2 przesiewacze typu MF 3,6x8,5 SD przed układem kruszenia i 2 przesiewacze typu MF 3,0x7,3 SD w zamkniętym układzie kruszenia (rys. 4c). Dodatkowo instalacje wyposażone są w zbiorniki buforowe zapewniające ciągłe podawanie nadawy oraz układy podające i obierające produkty. W układzie z zawrotem materiału uzyskać można produkt do 10 mm ze względu na zastosowane w nich przesiewacze jednopokładowe. W układzie bez zawrotu przewiduje się uziarnienie kruszywa poniżej 16 mm.

W tabeli 4 zestawiono dwa rodzaje kruszarek firmy Metso Minerals zastosowanych w układach zamkniętych i otwartych. Zaprezentowane wartości parametrów, to maksymalna wydajność, maksymalne uziarnienie nadawy i moc. W nawiasach podano prognozowane wydajności maszyn oraz wyliczone na tej podstawie zużycia energii kWh/Mg przy przyjętym wskaźniku mocy rzeczywiście pobieranej do mocy znamionowej silnika wynoszącej 0,6. Na podstawie krzywych składu ziarnowego nadawy i produktów obliczono stopnie rozdrobnienia.

Tabela 4. Parametry techniczno-technologiczne kruszarek firmy Metso Minerals uwzględnionych w stacjonarnych układach technologicznych drugiego stadium kruszenia

Table 4. Technical and technological parameters of Metso Minerals crushers applied in fixed circuits on the second crushing stage

Nazwa i typ kruszarki	Parametry techniczno-technologiczne						
	Wydajność max (prog), Mg/h	Max nadawa, mm	Moc, kW	Produkt, mm	Stopień rozdr., S_{max}	Liczba maszyn	Zużycie energii, kWh/Mg
stożkowa Nordberg HP5 układ zamknięty	- (214)	330	450	0-10	5,0	4	1,26
stożkowa Nordberg HP5 układ otwarty	- (307)	330	450	0-16	3,3	2	0,88
udarowa listwowa NP 1520 układ zamknięty	350 (285)	200	400	0-10	5,0	3	0,84

Analizując wskaźniki pracy kruszarek stożkowych i udarowych listowych w drugim stadium układu zamkniętego należy podkreślić, że proces rozdrabniania jest mniej energochłonny w kruszarkach udarowych (0,84 kWh/Mg) w stosunku do stożkowych (1,26 kWh/Mg) (tab. 4). Kruszarki udarowe mają zainstalowaną mniejszą moc o 50 kW od kruszarek stożkowych, oraz produkt uzyskany w kruszarkach udarowych jest znacznie grubszy niż po granulacjach stożkowych, co odznacza się niższym stopniem rozdrobnienia. W takiej sytuacji układ zamknięty z kruszarkami udarowymi wymaga większej krotności obiegu materiału, aby rozdrobnić i rozklasyfikować kruszywo do uziarnienia poniżej 10 mm.

W tabeli 5 przedstawiono bilans wskaźników energetycznych stacjonarnych dwustadialnych układów produkcji kruszyw dolomitowych. Całkowity maksymalny stopień rozdrobnienia dla układów zamkniętych wynosi 60 a dla układu otwartego 40. Przyjęty i oszacowany koszt zużycia energii elektrycznej przez zakład wyniósł 0,36 zł/kWh. Proces dwustadialnego rozdrabniania w układzie zamkniętym z kruszarką udarową jest najmniej energochłonny w stosunku do pozostałych układów, gdyż przy maksymalnym stopniu rozdrobnienia surowca równym 60 zużywa się energię 5,3 MJ/Mg.

Tabela 5. Bilans energetyczny stacjonarnych dwustadialnych układów produkcji kruszyw dolomitowych zaprezentowanych na rys. 4

Table 5. Energy balance for fixed two-stage circuits presented in Fig. 4

Rodzaj urządzenia	Układ A, kWh/Mg	Układ B, kWh/Mg	Układ C, kWh/Mg
Kr. udarowa młotkowa 40.99 Makrum	0,47	0,47	0,47
Przesiewacz PZ	0,05	0,05	0,05
Przesiewacz MF 3,6 x8,5 SD	0,055	-	0,055
Przesiewacz MF 3,0 x7,3 SD	-	0,073	-
Kr. stożkowa HP5	1,26	0,88	-
Kr. udarowa listowa NP1520	-	-	0,84
Przesiewacz MF 3,6 x8,5 SD	0,055	-	0,055
Wskaźniki			
Zużycie energii elektrycznej, kWh/Mg	1,89	1,47	1,47
Koszt zużycia energii elektrycznej, zł/Mg	0,68	0,52	0,52
Zużycie energii, MJ/Mg	6,8	5,3	5,3
Stopień rozdrobnienia, S_{\max}	60	40	60

3. Analiza pracy wybranych układów mobilnych i stacjonarnych

W ocenie poprawności funkcjonowania instalacji przeróbczej oraz porównywania jej z innymi służą wskaźniki techniczno-technologiczne i ekonomiczne. Należy tu zaznaczyć, że uzyskane wyniki wpływające na interpretację analityczną omawianych układów są w głównej mierze uzależnione od rzetelności odczytywania czy zbierania danych w zakładach przeróbczych i mogą być obciążone pewnymi błędami.

W tabeli 6 zestawiono porównanie wskaźników z dziewięciu wybranych układów mobilnych i stacjonarnych produkujących różne kruszy-

wa. Dla układów mobilnych obliczono wskaźniki zużycia oleju napędowego, a dla stacjonarnych zużycie energii elektrycznej na tonę rozdrabnianego surowca. Zużycie paliwa w układach mobilnych wynosi od 0,14–0,25 l/Mg rozdrabnianego surowca, natomiast zużycie energii elektrycznej w stacjonarnych układach wynosi od 1,47–3,42 kWh/Mg w zależności od rodzaju rozdrabnianego surowca oraz kruszarki. Ponieważ układy rozdrabniają surowce o różnych zakresach wielkości uziarnienia oraz również produkują zróżnicowane produkty, dlatego do oceny efektywności takich układów zestawiono maksymalne stopnie rozdrobnienia. Instalacje mobilne to układy jednostadialne, a więc stopnie rozdrobnienia nie są wysokie i wahają się od 3,2 do 9,5. W przeciwieństwie do układów stacjonarnych dwu- i trójstadialnych stopnie rozdrobnienia mają większe wartości i wynoszą od 11,1 do 60. Stopień rozdrobnienia jest uzależniony od wielkości uziarnienia nadawy i uzyskiwanych produktów, właściwości fizyko-mechanicznych surowca i parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych maszyny. W przypadku tych branych pod uwagę urządzeń determinującymi parametrami są szczelina wylotowa i prędkość obrotowa wirnika. Również rodzaj układu decyduje o wielkości stopnia rozdrobnienia, a więc w układach zamkniętych (z zawrotem materiału) uzyskano większe stopnie rozdrobnienia niż w układach otwartych [4, 5, 12].

Dla celów porównawczych omawianych układów technologicznych zużycie paliwa oraz energii elektrycznej wyrażono za pomocą wskaźnika energetycznego w dżulach na tonę rozdrobnionego surowca. Na podstawie uzyskanych wyników, Autor wprowadza kolejny wskaźnik dla każdego układu jako iloraz zużycia energii i maksymalnego stopnia rozdrobnienia. Jest to wskaźnik mówiący o tym, jakie jest zapotrzebowanie energetyczne (MJ) na rozdrobnienie 1 tony surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu tej nadawy. Im wartość wskaźnika jest mniejsza tym układ jest bardziej energooszczędny. Dla instalacji wielostadialnej wskaźnik ten jest sumą poszczególnych wskaźników liczonych osobno dla każdego układu kruszarka-przesiewacz.

Tabela 6. Zestawienie wskaźników technologiczne układów mobilnych i stacjonarnych produkcji kruszyw
Table 6. Technological indices of mobile and fixed circuits of aggregate production

Układ	Zużycie paliwa na tonę, l/Mg	Koszt zużycia paliwa, zł/Mg	Zużycie energii elektrycznej, kWh/Mg	Koszt zużycia energii elektrycznej, zł/Mg	Stopień rozdrobnienia, S_{max}	Zużycie energii (E) na tonę, MJ/Mg	Wskaźnik [*] E/S_{max} , MJ/Mg
Mobilny Remax, zamknięty	kruszywa wapienne, kr. udarowa listwowa RHS12/13 oraz przesiewacz (rys. 1)						
	0,14	0,81	(1,48)	-	9,5	5,32	0,56
Mobilny otwarty	kruszywa wapienne, kr. szczękowa MC 120 Kleemann oraz przesiewacz						
	0,14	0,81	(1,48)	-	7	5,32	0,76
Mobilny otwarty	kruszywa dolomitowe, kr. szczękowa Terex Pegson Premiertrak 1100x650 oraz przesiewacz						
	0,25	1,47	(2,64)	-	5,8	9,50	1,64
Mobilny otwarty	kruszywa krzemionkowe, kr. szczękowa Extec C12 oraz przesiewacz						
	0,22	1,28	(2,32)	-	5,4	8,36	1,55
Mobilny otwarty	kruszywa kwarcytowe, kr. szczękowa LT110 oraz przesiewacz (rys. 2)						
	0,20	1,16	(2,11)	-	3,2	7,60	2,38
Stacjonarny 3-stad. zamknięty	kruszywa kwarcytowe, kr. szczękowa C110, stożkowe HP400 i HP4 oraz przesiewacze (rys. 3)						
	-	-	3,42	1,22	16,1	12,3	0,76
Stacjonarny 2-stad. zamknięty	kruszywa dolomitowe, kr. udarowe młotkowe, stożkowe HP5 oraz przesiewacze (rys. 4a)						
	-	-	1,89	0,68	60,0	6,8	0,31
Stacjonarny 2-stad. otwarty	kruszywa dolomitowe, kr. udarowe młotkowe, stożkowe HP5 oraz przesiewacze (rys. 4b)						
	-	-	1,47	0,52	40,0	5,3	0,32
Stacjonarny 2-stad. zamknięty	kruszywa dolomitowe, kr. udarowe młotkowe, udarowe listwowe NP oraz przesiewacze (rys. 4c)						
	-	-	1,47	0,52	60,0	5,3	0,23

Uwagi do tabeli 6:

Wartości podane w nawiasach dotyczą teoretycznego zużycia energii urządzeń zasilanych olejem napędowym po przeliczeniu kaloryczności paliwa ($3,6 \text{ MJ} = 1 \text{ kWh}$). Przyjęty i oszacowany koszt zużycia energii elektrycznej wynosi $0,36 \text{ zł/Mg}$.

^{*)} - Wskaźnik jednostkowego zużycia energii (MJ) potrzebnej na rozdrobnienie 1 tony surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu nadawy

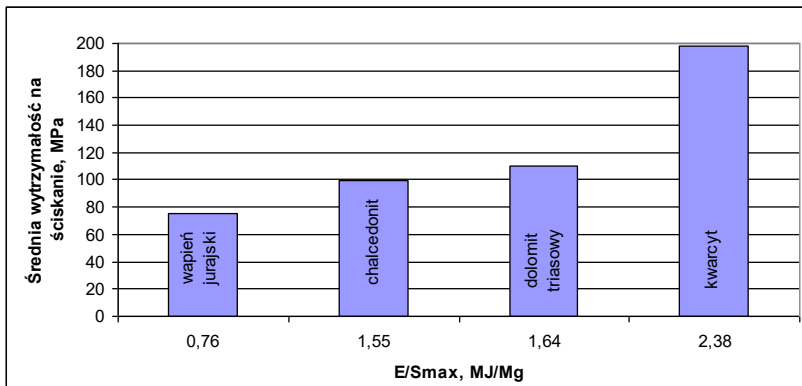
Analizując omawiane układy pod kątem energochłonności można łatwo zauważyć, że korzystniej jest stosować wielostadialne układy rozdrabniania i klasyfikacji. Wskaźnik jednostkowego zużycia energii potrzebnej na jednokrotne pomniejszenie nadawy o wartości $0,23 \text{ MJ/Mg}$ odnotowano dla układu stacjonarnego dwustadialnego składającego się z dwóch kruszarek udarowych produkującego kruszywa dolomitowe. Instalacja tych maszyn tworzy układ zamknięty (z zawrotem materiału).

Warto zauważyć, że spośród rozpatrywanych układów najkorzystniejsze okazały się układy z zawrotami zarówno stacjonarne jak i mobilne. Ciekawostką jest porównanie dwóch układów mobilnych produkujących kruszywa wapienne. Oba układy mają ten sam wskaźnik zużycia paliwa $0,14 \text{ l/Mg}$. Układ zamknięty z kruszarką udarową listwową SBM (rys. 1, tab. 6) rozdrabnia wapień karboński (wytrzymałość na ściskanie dochodzi do 150 MPa) a więc twardszy niż w przypadku wapienia jurajskiego (wytrzymałość na ściskanie poniżej 90 MPa) rozdrabnianego w układzie otwartym z kruszarką szczękową Kleemann. Pomimo, że układ z zawrotem rozdrabnia twardszy surowiec, to stopień rozdrobnienia jest większy, a więc uzyskuje się mniejszy wskaźnik zapotrzebowania energetycznego o $0,20 \text{ MJ/Mg}$. Podobne zależności występują dla układów otwartego i zamkniętego produkujących te same kruszywa dolomitowe (rys. 4a i 4b, tab. 6) składających się z tych samych maszyn. Wskaźnik zużycia energetycznego dla układu zamkniętego wyniósł $0,31 \text{ MJ/Mg}$ a dla otwartego $0,32 \text{ MJ/Mg}$, poza tym zastosowanie zamkniętych układów kruszenia daje możliwości lepszego jakościowo uzyskania produktu w sposób kontrolowany, co stwierdzono w pracach [4, 9].

Również układy rozdrabniające bardzo twarde kwarcyty w tym samym zakładzie przeróbczym (rys. 2 i 3), wskazują jako korzystniejszy układ stacjonarny pod względem zapotrzebowania energetycznego, gdyż wskaźnik ten wynosi $0,76 \text{ MJ/Mg}$ i jest mniejszy w porównaniu z układem mobilnym, który wyniósł $2,38 \text{ MJ/Mg}$.

Porównując trzy rodzaje stosowanych kruszarek, takich jak udarowe, szczękowe i stożkowe należy podkreślić, że najmniejszym jednostkowym zużyciem energii charakteryzują się kruszarki udarowe.

Na przykładzie zestawionych wskaźników dla układów mobilnych z kruszarkami szczękowymi można wyznaczyć także zależności dotyczące zapotrzebowania jednostkowego energii i stopnia rozdrobnienia w odniesieniu do właściwości fizyko-mechanicznych surowca (rys. 5). Do opisu właściwości rozdrabnianych surowców przyjęto średnie wytrzymałości na ściskanie (MPa). Z zależności wynika, że im twardszy materiał tym większe zużycie energii w celu uzyskania produktu o podobnym uziarnieniu.



Rys. 5. Wpływ wytrzymałości surowców na wskaźnik zużycia energii w układach mobilnych z kruszarkami szczękowymi

Fig. 5. An influence of minerals durability on the energy consumption in mobile circuits with jaw crusher application

4. Podsumowanie

Analizując procesy produkcji kruszyw mineralnych w wybranych układach mobilnych i stacjonarnych należy podkreślić, że najkorzystniej jest stosować wielostadialne układy rozdrabniania i klasyfikacji zwłaszcza z zawrotami materiału ze względu na niższą energochłonność. Również wykorzystywanie układów z zawrotem pozwala kontrolować przebieg procesu rozdrabniania poprzez dokruszanie produktu nadsitowego, a to w efekcie prowadzi do uzyskania lepszej jakości kruszyw (pożądane uziarnienie, mniejsza zawartość ziaren nieforemnych, mniejsza podat-

ność na rozdrabnianie). Najmniejszym jednostkowym zużyciem energii charakteryzują się kruszarki udarowe w stosunku do kruszarek szczękowych i stożkowych.

Jednostki mobilne zazwyczaj zabudowywane są pojedynczymi kruszarkami tworzące układy jednostadialne otwarte. Są najczęściej stosowane w zakładach o małych przerobach lub współpracują z większymi zakładami stacjonarnymi. Ich zwiększone zapotrzebowanie energetyczne rekompensowane jest ich uniwersalnością, łatwym dopasowaniem się do zmiennych warunków eksploatacyjno-produkcyjnych, co znacznie usprawnia organizację produkcji [14].

Układy wielostadialne zabudowywane są w instalacjach stacjonarnych, w których jednostkowe zużycie energetyczne jest najmniejsze. Jeśli stosowane są w zakładach o dużych wydajnościach, to wymagają one jednak zabudowy stosunkowo większej liczby urządzeń, czasami równolegle instalowanych, a więc także większych kosztów inwestycyjnych. Zaletą takich układów jest brak przestojów produkcyjnych w przypadku awarii jednego urządzenia.

Zagadnienia analizy w szerszym aspekcie ekonomicznym ujmujące porównanie kosztów eksploatacyjnych i żywotności elementów roboczych kruszarek oraz przesiewaczy w omawianych układach będą tematem kolejnych rozważań.

*Artykuł jest wynikiem realizacji
projektu badawczego MNiSW nr N N524 466139*

Literatura

1. **Eloranta J.:** *Sposoby wpływania na jakość kruszyw*. Prezentacja badań firmy Metso Minerals na nośniku CD, VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość”, OWPW Wrocław-Szklarska Poręba 2006.
2. **Gawenda T., Saramak D., Tumidański T.:** *Modele regresyjne rozdrabniania surowców skalnych w kruszarce szczękowej*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 7. 659–670 (2005).
3. **Gawenda T.:** *Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi Polska Akademia Nauk. Komitet Gospodarki Surowcami Mineralnymi; Kraków 2013 (przyjęty do druku).

4. **Gawenda T.:** *Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych*, Górnictwo i Geoinżynieria, Polski Kongres Górniczy 2010, IX krajowy zjazd górnictwa odkrywkowego: 34 z. 4 195–209. Kraków 2010.
5. **Gawenda T.:** *Kruszarki wirnikowe udarowe w produkcji kruszyw mineralnych*. Surowce i Maszyny Budowlane; Wyd. Branżowy Magazyn Przemysłowy, nr 4. 66–71. Racibórz 2010.
6. **Gawenda T.:** *Identyfikacja modelowych układów technologicznych i ich wskaźników przeróbki mechanicznej kruszyw*. Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych (nr POIG.01.03.01-00-001/09), praca realizowana w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, niepublikowane, 2011.
7. **Gawenda T.:** *Analiza zależności energochłonności od wydajności dla wybranych układów przerobczych*. Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych (nr POIG.01.03.01-00-001/09), praca realizowana w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, niepublikowane, 2011.
8. **Naziemiec Z., Gawenda T.:** *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*. VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość”, 83–94. OWPW Wrocław-Szklarska Poręba 2006.
9. **Naziemiec Z., Gawenda T.:** *Badanie procesu kruszenia z zamkniętym obiegiem*. Kruszywa mineralne: surowce – rynek – technologie – jakość, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej; nr 119. 107–116, Wrocław-Szklarska Poręba 2007.
10. **Pahl M. H.:** *Praxiswissen Verfahrenstechnik – Zerkleinerungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig/Verlag TÜV Rheinland, Köln 1993.
11. **Piecuch T. i zespół.:** *Określenie energochłonności maszyn i procesów technologicznych celem obniżenia zużycia energii na przykładzie KWK Manifest Lipcowy*. NB-510/404/RG-1/5/5RG-5/10/10/1975. Instytut Przeróbki Mechanicznej Kopalni. Politechnika Śląska.
12. **Saramak D., Tumidajski T., Brożek B., Gawenda T., Naziemiec Z.:** *Aspekty projektowania układów rozdrabniania w przeróbce surowców mineralnych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. Wydawnictwo IGSMiE PAN; t. 26 z. 4. 59–69. Kraków 2010.
13. **Saramak D., Tumidajski T., Gawenda T., Naziemiec Z., Brożek M.:** *Aspects of comminution flowsheets design in processing of mineral raw materials*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management. Vol. 26 Issue: 4 59–69. Kraków 2010.

14. **Stefanicka M.:** *Mobilne i stacjonarne układy przeróbcze na przykładzie kopalni „Piława Górna”* Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Górnictwo i Geologia XV. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Nr 132. Studia i Materiały nr 39. Wrocław 2011.
15. **Tumidajski T., Kasińska-Pilut E, Gawenda T., Naziemiec Z., Pilut R.:** *Badania energochłonności procesu mielenia oraz podatności na rozdrabnianie składników litologicznych polskich rud miedzi.* Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Polska Akademia Nauk. Komitet Zrównoważonej Gospodarki Surowcami Mineralnymi; Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią; t. 26 z. 1. 61–72, Kraków 2010.
16. **Wodziński P., Modrzewski R.:** *Dobór parametrów konstrukcyjnych przesiewacza dwuczęstościowego do klasyfikacji odpadów mineralnych.* *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 12. 697–722 (2010).

Comparative Analysis of Mobile and Stationary Technological Sets for Screening and Grinding

Abstract

The main aim of the paper was a comparison of various mobile and fixed (stationary) circuits with the material recycle stream (closed) and without it (open circuits) applied in production of mineral aggregates from different rock raw materials.

In the second chapter there was presented a detailed analysis of following chosen circuits: mobile circuit with an impact crusher producing lime aggregates (Fig. 1), mobile circuit with a jaw crusher cooperating with a fixed three-stage circuit applied in quartz aggregate production (Fig. 2 and 3) and fixed two-stage circuits with impact and cone crusher, producing dolomit aggregates (Fig. 4a, b and c). The circuits mentioned the above were characterized with using of simplified schemes.

In Chapter three a work analysis of nine circuits was made on the basis of collected data and calculated indices (Table 6). Following indices were taken into consideration: fuel and energy consumption costs, unit energy consumption, maximum size reduction ratios, and the index which is the product of energy consumption and maximum size reduction ratio at single comminution of 1 tonne of feed. It was concluded that the most appropriate method of comparison of different devices is presentation of energy consumption values in joule units.

When analyzing the mineral aggregates production processes in the above circuits it was concluded (Chapter three and four) that the application of

multi-stage comminution and classification circuits, especially with material recirculation streams, is the most favourable in terms of the energy consumption. The most favourable installation appeared the two-stages closed circuit with shaft impactors and hammer mills with screens (Fig. 4c). It was emphasized that application of circuits with the material recirculation enables the control of comminution process run through re-crushing of the screening oversize product which leads to better quality aggregates. The article also highlighted the advantages and disadvantages of mobile and fixed comminution circuits.