

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY



**Optymalizacja mieszania mialu węgla
kamiennego z biomasą przy użyciu
mieszalnika statycznego**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Andrzej Rezwiakow

Promotor: Prof. dr hab. inż. Marek Tukiendorf

Opole 2012

Spis treści

Podstawowe oznaczenia.....	4
1. Część teoretyczna.....	6
1.1. Wstęp.....	6
1.2. Odnawialne źródła energii.....	6
1.3. Węgiel kamienny.....	7
1.4. Biomasa.....	10
1.5. Zagadnienia logistyczne.....	16
1.6. Wybrane urządzenia do przygotowania mieszanek paliw.....	18
1.7. Aktualny stan prawny.....	23
2. Mieszanie materiałów ziarnistych.....	25
2.1. Przegląd historyczny.....	25
2.2. Urządzenia do mieszania materiałów ziarnistych.....	26
2.2.1. Mieszalniki do pracy ciągłej.....	26
2.2.2. Mieszalniki statyczne.....	28
3. Podstawy procesu mieszania materiałów ziarnistych.....	33
3.1. Podstawowe parametry.....	33
3.2. Charakterystyka materiałów ziarnistych.....	34
3.3. Mieszanie i segregacja.....	35
3.4. Mechanizmy mieszania.....	37
3.5. Mieszanie układów niejednorodnych.....	38
3.6. Testy statystyczne.....	39
3.7. Stopień zmieszania.....	40
3.8. Pobieranie i analizowanie próbek.....	42
3.9. Komputerowa analiza obrazu.....	44
3.9.1. Podział obrazu.....	44
3.9.2. Analiza obrazu.....	45
3.9.3. Akwizycja obrazu.....	45
3.9.4. Binaryzacja.....	46
3.9.5. Segmentacja obrazu.....	47
3.9.6. Pole powierzchni.....	47
4. Część doświadczalna.....	49
4.1. Cel pracy.....	49
4.2. Mieszanie w warunkach laboratoryjnych. Opis stanowiska badawczego.....	49

4.3. Mieszanie w warunkach przemysłowych. Opis stanowiska badawczego	50
4.4. Charakterystyka zastosowanych materiałów.....	54
4.5. Badania z wykorzystaniem mieszalnika laboratoryjnego.....	56
4.6. Badania z wykorzystaniem mieszalnika przemysłowego.....	56
5. Opis wyników.....	58
5.1. Wyniki badań z wykorzystaniem mieszalnika laboratoryjnego.....	58
5.2. Wyniki badań z wykorzystaniem mieszalnika przemysłowego.....	59
5.2.1. Wpływ ułożenia składników przez mieszaniem.....	59
5.2.2. Optymalizacja liczby elementów mieszających.....	62
5.2.3. Mieszanie na drodze przesypu grawitacyjnego.....	63
5.2.4. Mieszanie na drodze wysypu kominowego.....	63
5.2.5. Mieszanie przy użyciu trzech elementów mieszających.....	63
5.2.6. Mieszanie przy użyciu pięciu elementów mieszających.....	64
5.2.7. Mieszanie przy użyciu dziesięciu elementów mieszających.....	64
5.3. Analiza wpływu liczby elementów mieszających.....	71
5.4. Analiza mieszania przy przesypie grawitacyjnym i wysypie kominowym (funnel-flow).....	75
6. Model procesu mieszania węgla z biomasą w mieszalniku statycznym.....	81
7. Wnioski końcowe.....	100
8. Literatura.....	101
9. Spis rysunków.....	107
10. Spis tabel.....	110
11. Spis załączników	111

Podstawowe oznaczenia

a_1, a_2	-	średnice oczek sita [mm],
β	-	kąt naturalnego usypu [$^\circ$],
d_z	-	średnica zastępcza ziarna [mm],
d_A	-	średnica ziaren [mm],
F	-	powierzchnia ziarna [mm ²],
M	-	stopień mieszania,
M_p	-	masa badanej partii materiału [Mg],
m_z	-	masa ziarna [kg],
N	-	liczba ziaren w próbce,
n	-	liczba próbek,
p	-	prawdopodobieństwo występowania składnika kluczowego,
ρ	-	koncentracja traseru
RI	-	liczba Rogi (spiekalność węgla),
s	-	odchylenie standardowe szacowane z próby,
s^2	-	wariancja szacowana z próby,
t	-	czas [s],
τ_m	-	czas mieszania [s],
τ_{opt}	-	czas optymalny mieszania [s],
τ_s	-	czas segregacji [s],
\bar{V}	-	średnia objętość ziarna [m ³],
V	-	całkowita objętość złoża ziarnistego [m ³],
V_p	-	objętość przestrzeni pomiędzy ziarnami [m ³],
V_s	-	całkowita objętość złoża ziarnistego [m ³],
W_{tr}	-	wilgotność materiału [%],
X	-	zmienna losowa,
x	-	średni skład z próby,
α	-	poziom istotności,
ε	-	porowatość złoża,
ρ	-	gęstość materiału [kg/m ³],
ρ_m	-	średnia gęstość mieszaniny [kg/m ³],

- ρ_n - gęstość nasypowa [kg/m^3],
- σ - odchylenie standardowe,
- σ_o^2 - wariancja w stanie segregacji pierwotnej,
- σ_r^2 - wariancja w stanie randomowym,
- φ - sferyczność,
- Φ - potencjał segregacji,
- \bar{x} - średnia arytmetyczna,
- \bar{y} - średnia ze wszystkich obserwacji,
- z_i - koncentracja traseru w segmencie kasyety odbierającej.

1. Część teoretyczna

1.1. Wstęp

Niniejsza praca dotyczy możliwości mieszania węgla z biomasą przy użyciu mieszalnika statycznego, co związane jest z potrzebą rozwiązania problemu zastosowania prostych i tanich metod produkcji mieszanek paliw dla ciepłowni, wyposażonych w kotły rusztowe o mocach od 3 do 50 MW. Jako składniki paliwa używane będą przede wszystkim miał węgla kamiennego i różnego rodzaju biomasa, a w szczególności trociny, zrębki i pellety. W celu przygotowania mieszanek paliwa o wymaganej jakości wykorzystywane mogą być także wysuszone osady z oczyszczalni ścieków oraz mieszaniny miału węgla kamiennego o różnych parametrach jakościowych.

1.2. Odnawialne źródła energii

W ostatnich latach szczególną uwagę zwraca się na odnawialne źródła energii, które nie przyczyniają się do zwiększenia emisji CO₂, jak i innych tzw. gazów cieplarnianych, w odróżnieniu od energii pozyskiwanej ze spalania paliw kopalnych.

Do odnawialnych źródeł energii zaliczamy tę pochodzącą z:

- promieniowania Słońca,
- wiatru,
- wody – energię kinetyczną i potencjalną,
- geotermii,
- spalania biomasy lub biogazu (zerowy wpływ na poziom CO₂ w atmosferze).

W warunkach polskich mamy możliwość korzystania z energii odnawialnych w ograniczonym zakresie. W ostatnich latach dynamicznie rozwija się jedynie energetyka wiatrowa. Geotermia także po kilku nieudanych projektach [42, 43] nie rozwija się na taką skalę, jaką jeszcze kilka lat temu przewidywano. Energetyka wodna, z uwagi na znaczną kapitałochłonność i czas zwrotu inwestycji, będzie w najbliższych latach rozwijała się raczej w oparciu o małe elektrownie wodne, należące do indywidualnych inwestorów. W tej sytuacji najkorzystniejszym sposobem pozyskiwania energii wydaje się być współspalanie biomasy z węglem w eksploatowanych aktualnie kotłowniach.

Współspalanie może być realizowane poprzez [27, 35, 64]:

- spalanie mieszanki mialu węglowego z biomasą przygotowywaną przed podaniem jej na ruszt,
- oddzielne podawanie na ruszt mialu węglowego i biomasy,
- spalanie biomasy w postaci pyłu lub pelletu w specjalnych palnikach zainstalowanych w istniejących kotłach na paliwo stałe,
- zgazowanie biomasy w instalacji przykotłowej i spalanie powstałego gazu w kotle opalanym paliwem stałym,
- spalanie biomasy w oddzielnym kotle.

Nie jest dotychczas znany wpływ upraw energetycznych na otaczające środowisko, a szczególnie na erozję gleb. Prowadzone dotychczas badania tego zagadnienia, z uwagi na ograniczone ramy czasowe i zasięg, nie dają jednoznacznej odpowiedzi. Nie brakuje także sceptycznych opinii dotyczących celowości spalania biopaliw na dużą skalę [54].

W przypadku biomasy nie można mówić także o zerowym jej wpływie na poziom CO₂ w atmosferze. Zużycie energii związane z ich uprawą (zabiegi agrotechniczne, nawożenie, zbiór mechaniczny) pociąga za sobą zużycie paliw ciekłych, co powoduje znaczną emisję CO₂ i jest ona tym większa, im intensywniej prowadzona jest uprawa roślin przeznaczonych na biomasę. Autorzy różnych publikacji [41] szacują zwiększenie emisji CO₂ od 5 do 10%.

1.3. Węgiel kamienny

Węgiel kamienny jest jednym z podstawowych surowców energetycznych na świecie. Pomimo ograniczania, z uwagi na znaczną emisję gazów „cieplarnianych”, wykorzystywania go w energetyce, w wielu krajach świata pozostaje podstawowym surowcem energetycznym. Wydobycie węgla wciąż wzrasta i w 2010 roku wyniosło 6,5 mld ton. Największymi producentami węgla od lat są Chiny (3,5 mld ton), USA (1 mld ton), Rosja (245 mln ton), Australia i RPA. W trzech ostatnich krajach spora jego część wydobywana jest w kopalniach odkrywkowych. Przekłada się to na jego niską cenę pozwalającą, pomimo kosztów transportu, na konkurowanie z europejskimi węglami produkowanymi w kopalniach głębinowych.

Biorąc pod uwagę nasze krajowe uwarunkowania węgiel kamienny i brunatny pozostaną jeszcze na wiele lat podstawowym paliwem do wytwarzania energii elektrycznej

i ciepłej [46, 89]. Według danych PSE Operator [103] w 2010 roku w Polsce struktura produkcji energii elektrycznej kształtowała się następująco: 57,05% z węgla kamiennego, 31,64% z węgla brunatnego, 5,71% z elektrowni przemysłowych opalanych węglem, 2,67% z elektrowni wodnych, 2,09% z gazu i 0,84% z wiatru.

W celu poprawy efektywności wykorzystania węgla kamiennego należy dążyć do produkcji energii elektrycznej i ciepła w wysokosprawnym skojarzeniu (kogeneracji) [69]. Sprawność skojarzonej produkcji prądu i ciepła daje wykorzystanie energii chemicznej paliwa dochodzące do 60%, kiedy dla produkcji rozdzielonej energii elektrycznej jest to ok. 36%. [5, 14].

Oprócz zastosowania w energetyce węgiel kamienny wykorzystywany jest do produkcji koksu i gazu koksowniczego, smoły, benzolu, a w procesach upłynniania można otrzymać z niego benzyny oraz oleje smarowe i opałowe.

Skład chemiczny węgla kamiennego to: węgiel, tlen, wodór, a w mniejszych ilościach siarka, azot oraz niepalne substancje mineralne, które po spaleniu tworzą popiół. W zależności od zawartości pierwiastka C węgle można podzielić na cztery podstawowe gatunki: torf, węgiel brunatny, węgiel kamienny i antracyt.

Spalaniu węgla towarzyszy emisja wielu substancji, także toksycznych; uwalniana jest również duża ilość CO₂ (ok. 2 ton z każdej tony węgla), co przyczynia się do globalnego ocieplenia Ziemi. Z tego też powodu w wielu krajach odchodzi się od spalania węgla do celów energetycznych na rzecz gazu, energii jądrowej lub odnawialnej. Z punktu widzenia spalania energetycznego w skali przemysłowej najważniejszymi parametrami, charakteryzującymi węgiel kamienny energetyczny w postaci miazgi węglowej, są:

- wartość opałowa 18 000 – 25 000 kJ/kg,
- zawartość popiołu 5 – 30%,
- zawartość siarki całkowitej 0,20 – 1,6%,
- zawartość wilgoci całkowitej 5 – 20%,
- zawartość części lotnych 10 – 45%,
- spiekalność 5 – 45 RI,
- granulacja 0 – 20 mm.

Węgłe z kopalń głębinowych, będące węglami starszymi pod względem okresu powstania, zawierają mniej wilgoci analitycznej (do 3%). Węgłe młode, pochodzące przeważnie z kopalń odkrywkowych, zawierają powyżej 6% wilgoci analitycznej i są bardziej podatne na kruszenie się pod wpływem warunków atmosferycznych.

Skład miazgu węgla kamiennego jako materiału ziarnistego nie jest parametrem stałym. Zależy ona głównie od przeróbki mechanicznej w danej kopalni. Średnice ziaren miazgu węgla kamiennego M II od 0 do 20 mm według analizy sitowej przeprowadzonej dla miazgów z kopalni krajowych, przedstawia tabela nr 1.

Tab. 1. Analiza sitowa miazgu węglowego. Badania własne

Klasa ziarnowa (sitowa) [mm]	Udział [%] Kopalnia Jankowice	Udział [%] Kopalnia Bobrek- Centrum (próbka nr 1)	Udział [%] Kopalnia Bobrek- Centrum (próbka nr 2)
powyżej 20	2,2	0,4	4,1
16 ÷ 20	6,8	4,7	8,7
8 ÷ 16	11,2	31,0	32,1
6,3 ÷ 8	8,2	12,5	13,4
3,2 ÷ 6,3	18,1	16,1	19
poniżej 3,2	53,5	35,3	22,7

Przedstawione w powyższej tabeli klasy ziarnowe różnią się nie tylko z uwagi na źródło pochodzenia, ale występują tu różnice także w obrębie produkcji węgla z tej samej kopalni.

Aktualnie w warunkach polskich mamy do czynienia z wyczerpującymi się zasobami węgla o niskiej zawartości siarki całkowitej, tj. do 0,60%, odpowiednio wysokiej wartości opałowej i związanej z nią niskiej zawartości popiołu w węglu. Rosnący z roku na rok import węgla już nie tylko z Federacji Rosyjskiej czy Ukrainy, ale także z RPA, Kolumbii czy Indonezji łagodzi jego brak w Polsce, jednak zasoby krajowe na długo jeszcze pozostaną podstawowym źródłem zaopatrzenia. Szczególnie dotyczy to Polski południowo-zachodniej i jest związane z niewielką odległością kopalń od miejsca zużycia węgla.

Obowiązujące aktualnie normy emisji dwutlenku siarki i pyłu są na tyle ostre, że aby je zachować należy spalać węgiel kamienny o niskiej zawartości siarki lub oczyszczać spaliny w instalacjach odsiarczania spalin (IOS). Instalacje takie pracują w wielu obiektach energetyki zawodowej i znakomicie spełniają swoje zadanie. Uboczny produkt spalania CaSO₃/SO₄ znajduje po odpowiednim przygotowaniu zastosowanie w budownictwie. Tym

niemniej koszty budowy, jak i późniejszej eksploatacji IOS są znaczne i instalacja ich w większości ciepłowni i elektrociepłowni komunalnych czy przemysłowych nie ma ekonomicznego uzasadnienia. Najprostszym rozwiązaniem tego problemu wydaje się spalanie mieszanek węgla kamiennego z paliwem o bardzo małej lub wręcz zerowej zawartości siarki (np. z biomasą) lub mieszanie węgla krajowych z węglami importowanym z Republiki Czeskiej (południe Polski), Rosji (północ i wschód Polski) lub od dostawców z Azji czy Afryki. W tym ostatnim przypadku węgiel transportowany jest drogą morską przeważnie z portów ARA (Amsterdam, Rotterdam, Antwerpia).

1.4. Biomasa

Biomasa jest paliwem pochodzenia roślinnego. Głównie są to odpady leśne pozyskiwane przy wyrębie lasów i powstające przy pielęgnacji drzew. Źródłem odpadów drzewnych może być także przemysł meblarski i płyt wiórowych, jednak do spalania nadają się tylko czyste odpady drzewne pozbawione farb, lakierów czy klejów. Innym źródłem biomasy mogą być osady z oczyszczalni ścieków lub odpady poprodukcyjne przemysłu spożywczego. Ponieważ jednak zawartość wilgoci w tych odpadach może dochodzić do 80%, wymagane jest ich długotrwałe odsączenie i suszenie. Warto zaznaczyć, że współspalanie takich paliw może być najtańszym sposobem ich utylizacji, oczywiście przy zachowaniu wszelkich wymogów dotyczących emisji do atmosfery produktów ich spalania.

Biomasę do celów energetycznych pozyskuje się także ze specjalnie uprawianych na plantacjach roślin, np. z najpopularniejszej obecnie w Polsce wierzby energetycznej, czy innych roślin wieloletnich [67], takich jak miskantus olbrzymi, miskantus cukrowy, ślaziowiec pensylwański, rdest japoński czy rdest sachaliński.

Cechami, którymi biomasa wyróżnia się spośród innych paliw są:

- odnawialność,
- śladowa zawartość siarki,
- dodatkowe dochody z działalności rolniczej,
- wykorzystanie przy jej produkcji odpadów poprodukcyjnych.

Biomasa do spalania w kotłach energetycznych przygotowywana jest przez zrębkowanie w rębakach, z których otrzymuje się zrębkę o wymiarach handlowych od 5 do 50 mm. Należy mieć na uwadze, że zrębkowanie biomasy jest procesem energochłonnym.

Autorzy publikacji [26] w toku przeprowadzonych badań wykazali, że największą energochłonnością charakteryzowały się zrębki o długości 35 mm i zastosowanie w rębaku sita o wymiarach oczka 4 mm. Natomiast zwiększenie oczek sita z 4 do 15 mm spowodowało kilkukrotne obniżenie zużycia energii wykorzystywanej do zrębkowania.

Parametry niektórych rodzajów biomasy używanej do celów energetycznych przedstawia tab. 2.

Tab. 2. Parametry biomasy krajowej [49]

Rodzaj biomasy	Wilgoć [%]	Popiół [%]	Wartość opałowa [MJ/kg]	Siarka S [%]	Węgiel C [%]	Ilość prób
Zrębki drzewne	33,70	0,50	11,03	0,01	30,70	83
Pellet drzewny	6,20	0,70	16,54	0,01	-----	1
Brykiet drzewny	12,90	0,70	15,66	0,02	-----	1
Zrębki wierzby	23,2	1,10	13,18	0,03	38,6	26

Powyższe dane wskazują, że mała zawartość popiołu i siarki korzystnie wpływa na współspalanie z węglem kamiennym, natomiast niska wartość opałowa zrębek (częściowo wynikająca z dużej wilgotności) przyczyniać się będzie do pogorszenia parametrów spalanych mieszanek węgla z biomasą. Z odwrotną sytuacją będziemy mieli do czynienia w przypadku współspalania z węglem brunatnym, kiedy to biomasa będzie podwyższać parametry takiej mieszanki [89]. Zastosowanie mieszanek biomasy z węglem wpływa na obniżenie emisji do atmosfery tlenu siarki, NO_x oraz pyłów.

W okresie ostatnich kilku lat obserwuje się napływ do kraju biomasy „rolniczej” pochodzącej z importu. Niektóre jej parametry przedstawia tab. 3. Jak wynika z zestawionych parametrów biomasa z importu jest o wyższej wartości opałowej i niższej zawartości wilgoci w porównaniu do biomasy pochodzenia krajowego. Jest to korzystne z uwagi na transport ponieważ uzyskuje się niższe koszty przewozu w stosunku do wartości opałowej biomasy.

Tab. 3. Parametry biomasy z importu [22]

Rodzaj biomasy	Wilgoć [%]	Popiół [%]	Ciepło spalania [MJ/kg]	Siarka S [%]	Węgiel C [%]	Azot N [%]	Części lotne [%]
Łupiny orzechów laskowych	9,2	3,5	19,253	-----	52,9	1,4	60,1
Łuski ryżu	9,96	20,61	13,524	-----	34,9	0,11	54,68
Pestki brzoskwiń	----	1,03	20,820	0,05	53,0	0,32	----
Łuski migdałów	----	4,81	19,380	0,01	44,98	1,16	-----
Pestki oliwek	-----	3,16	21,390	0,02	48,81	0,36	-----

Ujemną cechą paliw pochodzenia roślinnego (np. świerzych zrębek) jest ich wilgotność, która w większości przypadków zawiera się w przedziale od 50 do 60%. Tak duża zawartość wilgoci ujemnie wpływa na walory energetyczne takiego paliwa, szczególnie na wartość opałową, która przy takiej wilgotności nie przekracza 10 000 kJ/kg. W efekcie przekłada się to także na koszty transportu w odniesieniu do wartości opałowej biomasy. Zmniejszenie zawartości wilgoci zawartej w biomase osiąga się poprzez suszenie wilgotnej biomasy np. poprzez składowanie jej na wolnym powietrzu. Biorąc jednak pod uwagę znaczną ilość i mały ciężar usypowy, wymaga dużej powierzchni składowisk, co w istniejących lokalizacjach źródeł spalania (elektrownie, ciepłownie) nie zawsze jest możliwe.

Szczególnie interesującym paliwem jest przetworzona biomasa do tak zwanych brykietów lub pelletów, czyli sprasowanych drobnych cząstek lub pyłu biomasy w postaci walców o średnicy od 5 do 100 mm średnicy i długości od kilku milimetrów do kilkunastu centymetrów. Do jej produkcji mogą służyć odpady dotychczas nieprzetworzone np. pył drzewny, drobne trociny, słoma itp. Wartość opałowa takiego paliwa dochodzi do 17 000 kJ/kg przy wilgotności do 15%. Przydatność takiego paliwa bez odpowiednich warunków składowania jest bardzo ograniczona, ponieważ pod wpływem wilgoci i opadów atmosferycznych pellety w większości przypadków ulegają rozwarstwieniu i degradacji do materiału wyjściowego.

Ciekawą alternatywą dla kotłów domowych lub pieców kuchennych są brykiety wytwarzane ze sprasowanego miazgu węglowego i biomasy [55], dlatego prowadzone są badania z zastosowaniem różnego procentowego udziału biomasy w brykietach (od 0% do 100%) oraz dodatku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jako reagenta do wiązania siarki. Paliwo takie charakteryzuje się co prawda nieco gorszymi parametrami od brykietów węglowych, ale pozwala na jednoczesne spalanie obu tych paliw bez konieczności przygotowywania odpowiednich mieszanek.

Zastosowanie biomasy do opalania kotłów energetycznych niesie jednak ze sobą także niebezpieczeństwa. Z uwagi na zwiększone właściwości wybuchowe pyłu drzewnego w stosunku do pyłu węgla kamiennego [88], istnieje możliwość eksplozji biomasy w pomieszczeniach zamkniętych, a także potencjalne niebezpieczeństwo dla środowiska pracy, związane z zarodnikami grzybów i bakterii, znajdujących się w biomacie. Dotyczy to importowanych z Afryki i Azji łupin orzechów kokosowych, pestek, itp.

Tab. 4. Produkty spalania nośników energii [86]

Gaz	Słoma [g/GJ]	Drewno odpadowe [g/GJ]	Węgiel kamienny [g/GJ]
CO_2^*	0	0	95 000
SO_2	11	12	420
NO_2	70	80	137
CO	38	42	990

*- przy założeniu zamkniętego obiegu CO_2 w cyklu wzrostu roślin i późniejszego ich spalania.

Zdaniem autorów [50] powinno się w większym stopniu wykorzystywać lokalnie pozyskiwaną biomasę do spalania w małych ciepłowniach, niż w dużych elektrowniach zawodowych. Daje to możliwość zużywania paliw, które można pozyskać w najbliższym otoczeniu, w tym także, co bardzo istotne, wykorzystywania paliw odpadowych, np. osadów z oczyszczalni ścieków czy odpadów komunalnych [37, 79]. Najważniejsze są tu niskie koszty transportu związane z miejscem ich pozyskania, co przy małym ciężarze usypowym takich paliw ma spore znaczenie.

Dla prawidłowego spalania mieszanek węgla z biomasą należy brać pod uwagę:

- rodzaj biomasy i źródło jej pochodzenia,
- granulację biomasy, najkorzystniejszą do współspalania z miazgą węgla kamiennego w kotłach oraz jej wpływ na efektywność prowadzenia ruchu kotła,

- proporcje stosowanej biomasy do węgla,
- wilgotność biomasy,
- sposób składowania biomasy i zabezpieczenie przed jej samozapłonem.

W niektórych badaniach [22] podkreśla się, że spalanie biomasy nie powoduje „zerowego” efektu emisji CO₂. Im bardziej przetworzona jest biomasa, tym więcej potrzeba energii na jej przygotowanie (np. transport, zrębkowanie, pelletyzacja), przy czym najwięcej energii jest zużywane do wyprodukowania biomasy z upraw rolniczych, gdzie dochodzi całość prac polowych, takich jak przygotowanie pola, sadzenie, pielęgnacja, nawożenie i ścinka. Autorzy publikacji [7] szacują, że od kilku do ponad 10 % emisji NO_x, CO, CO₂ związanych jest z tymi pracami.

Doświadczenia eksploatacyjne oraz przeprowadzone badania wskazują na spadek sprawności kotłów zasilanych mieszanką węgla i biomasy. Spadek sprawności jest tym większy im biomasa jest bardziej wilgotna i im większy jest jej udział w strumieniu paliwa wprowadzanego do kotła. Z jednej strony wynika to z faktu zmniejszenia wartości opałowej mieszanki, w której jeden ze składników jest o znacznej wilgotności, co powoduje konieczność odparowania wody w czasie spalania, a z drugiej strony wymaga większego zużycia energii elektrycznej na potrzeby własne. W przypadku kotłów pyłowych efekt spalania biomasy powyżej 9-10% wagowo w wielu przypadkach pociąga za sobą konieczność uruchomienia dodatkowych młynów węglowych, co wiąże się ze zwiększonym zużyciem energii elektrycznej [46]. Badania prowadzone dla kotłów rusztowych wykazały z jednej strony możliwość poprawnego spalania nawet do 60% biomasy w stosunku do węgla kamiennego [32, 52], a z drugiej strony istotny wpływ rozmiarów geometrycznych pojedynczych elementów biomasy (np. zrębków) na spadek sprawności spalania [59]. Spadek sprawności jest efektem szybszego wypalania się na ruszcie dużych kawałków biomasy niż węgla, co powoduje powstanie kanałów, którymi powietrze podmuchowe trafia bezpośrednio do paleniska. Jest to bezpośrednią przyczyną wzrostu straty kominowej i niedopalenia węgla w tych miejscach.

Chcąc uzyskać jak najlepsze efekty spalania mieszanek należy dążyć do zmniejszenia wilgotności biomasy. Jednym z najprostszych sposobów jest jej składowanie z ograniczeniem wpływu warunków atmosferycznych (deszcz, śnieg), połączone z przewietrzaniem. Przeprowadzone badania wykazały, że składowanie biomasy pod zadaszeniem i przewietrzanie zimnym powietrzem (artificial cold air drying) przez okres trzech miesięcy letnich lub sześciu zimowych spowodowało spadek wilgotności względnej zrębek do ok. 23% [70].

W przypadku energetyki zawodowej składowanie z podsuszaniem, może być znacznie utrudnione, z uwagi na znaczną ilość spalanej biomasy. Jednakże w kotłowniach komunalnych czy przemysłowych, które w okresie letnim pracują z minimalnym obciążeniem lub nie pracują wcale, istnieje realna możliwość zgromadzenia większej ilości biomasy, połączonej z jej podsuszeniem. Należy mieć jednak na uwadze, że efekt ten może zostać zniwelowany w trakcie mieszania podsuszanej biomasy z np. bardzo wilgotnym miałem węglowym, co ma miejsce po intensywnych opadach deszczu lub w czasie topnienia śniegu.

Przy składowaniu znacznej ilości biomasy należy zachować szczególne warunki i przestrzegać zasad zapobiegających możliwości jej samozapłonu [88].

Biomasa w postaci pelletów będzie ulegała także mechanicznemu rozdrobnieniu w czasie składowania np. w silosach jak i transportu [30]. Efektem tego będzie inny skład frakcji ziarnowej pelletów niż przyjęty w trakcie przeprowadzanych badań.

1.5. Zagadnienia logistyczne

Spalanie węgla kamiennego w energetyce pociąga za sobą konieczność transportu znacznej ilości tego paliwa oraz kosztów późniejszej utylizacji żużli i popiołów. Wydatki na transport stanowią istotną pozycję każdego przedsiębiorstwa wytwarzającego energię z węgla. Z tego też powodu dąży się do spalania jak najlepszych jakościowo węgli tj. o najwyższej wartości opałowej, jak i uzyskania jak najmniejszej ilości popiołu pozostającego po spalaniu. Biomasa o relatywnie niskiej wartości opałowej i małym ciężarze nasypowym pogarsza wskaźniki ekonomiczne procesu spalania z powodu wyższych kosztów transportu. Wynikają one głównie z niepełnego wykorzystania środków transportu. Aktualnie próbuje się temu zaradzić poprzez budowę naczep samochodowych o zwiększonej pojemności lub specjalnych kontenerów (rys. 1) do przewozu biomasy transportem kolejowym [100].



Rys. 1. Kontenery do przewozu materiałów sypkich np. zrębek, pellet (zdjęcie własne)

Odrębnym zagadnieniem jest skrócenie drogi przewozu biomasy od producentów do odbiorców finalnych, jakimi są elektrownie lub ciepłownie, w większości oddalone w Polsce od źródeł jej pozyskania. Krajowa biomasa transportowana jest często na odległość ponad 100 km, przy czym przy coraz częstszym obecnie imporcie odległości te znacznie wzrastają, co przyczynia się do zmniejszenia efektu „zerowości” wpływu spalania biomasy na stężenie CO₂ w powietrzu.

Badania prowadzone w Szwecji na początku lat 90. [7] wskazały, że biomasa nie powinna być zwożona do miejsc jej spalania z odległości większej, niż 30-42 km. Ponadto należy mieć na uwadze, że rodzaj zastosowanych środków transportu do przewozu biomasy wpływa także na emisję CO₂, która wynosi dla [7]:

- transportu ciągnikami rolniczymi – 52 g/CO₂/km/Mg,
- transportu samochodowego – 22 g/CO₂/km/Mg,
- transportu kolejowego – 14 g/CO₂/km/Mg,
- transportu morskiego – 6,4 g/CO₂/km/Mg.

Prowadzone badania [24] wskazują na celowość organizacji tzw. „centrów dystrybucji”, z których biomasa będzie mogła być odbierana od lokalnych wytwórców, częściowo przetwarzana (np. zrębkowana lub mieszana z węglem i oferowana w postaci gotowych już mieszanek), magazynowana, a następnie dostarczana w dużej ilości do odbiorców końcowych. Lokalizacja takich miejsc pod względem najkrótszej drogi łączącej wybrane punkty może być obliczana na przykład za pomocą teorii grafów [23].

Umiejscowienie takich „centrów” na konkretnych obszarach (np. w powiatach lub mniejszych województwach) wymaga analizy rozmieszczenia producentów, sieci dróg kołowych i kolejowych, lokalnego rynku pracy i kosztów funkcjonowania takiego przedsięwzięcia. Realizacja tego zamierzenia jest tym istotniejsza, że udział „rolniczej” biomasy musi się z roku na rok zwiększać. Konieczne jest także odejście od dotychczasowych źródeł jej pozyskania, takich jak lasy czy tartaki, i skierowanie zainteresowania na produkcję rozproszonego rolnictwa.

Nie należy zapominać o rosnącej z roku na rok roli importu biomasy realizowanego transportem morskim. Z oczywistych powodów w tym przypadku centra dystrybucji biomasy lokalizuje się w portach morskich lub najbliższym ich otoczeniu.

Osobnym zagadnieniem jest lokalizacja wytwórni przetwarzających biomasę na gotowe wyroby przeznaczone do spalania, takie jak np. pellety czy brykiety. W takich przypadkach ich umiejscowienie musi być powiązane z odpowiednio dużą kontraktacją surowców: słomy rzepakowej czy pochodzącej z upraw zbóż konsumpcyjnych. Zakłady przetwórcze do ich produkcji mogą używać także różnego rodzaju trocin, zrębek czy innych, nie zanieczyszczonych farbami lub klejami, odpadów przemysłu drzewnego czy meblarskiego.

1.6. Wybrane urządzenia do przygotowania mieszanek paliw

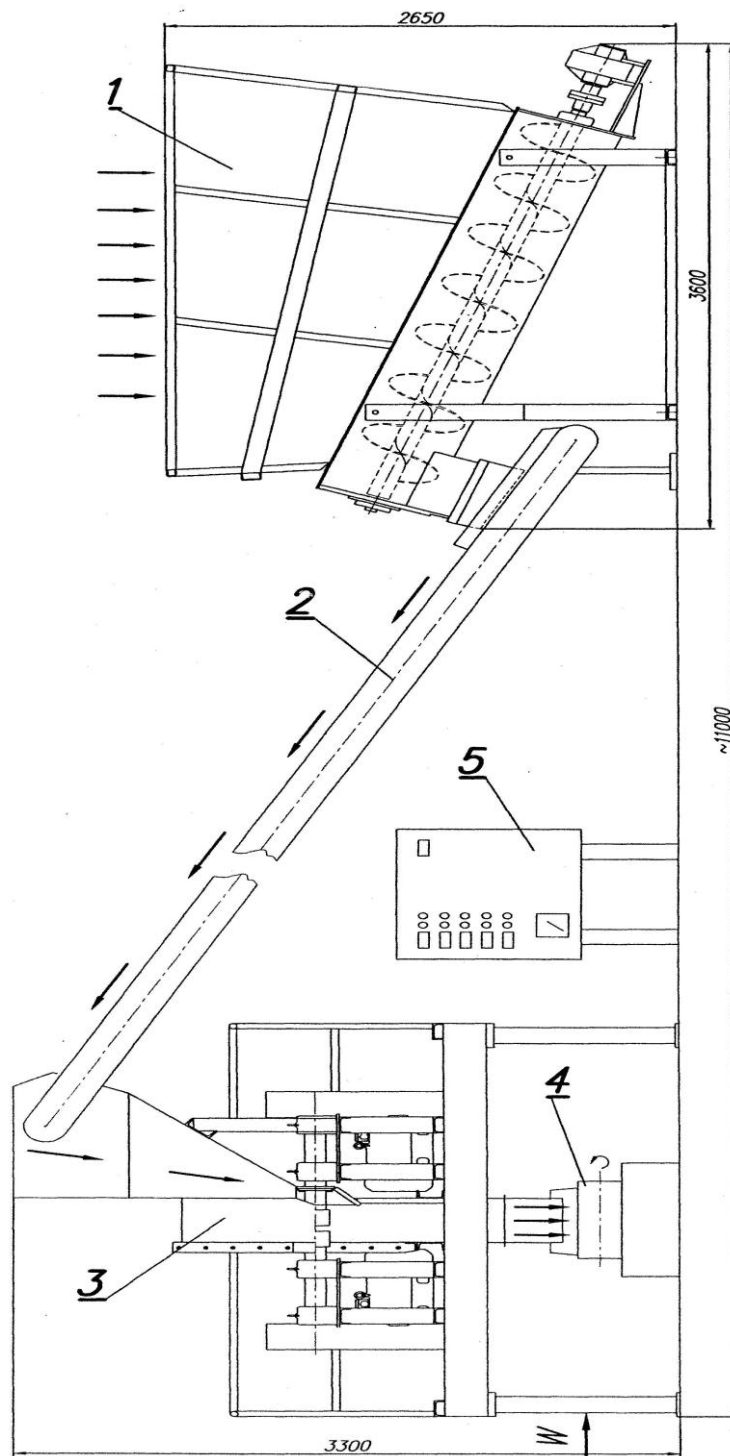
Mieszanie paliw stałych z biomasą może odbywać się na składowisku ciepłowni lub elektrowni. Węgiel i biomasa są podawane do ciągu nawęglania oddzielnie, a mieszanie odbywa się tuż przed kotłem np. w młynach węglowych. Ten sposób mieszania może mieć jednak zastosowanie tylko w kotłach pyłowych i dlatego powszechnie jest stosowany w energetyce zawodowej.

Przygotowanie mieszanek w kotłowniach małej i średniej mocy odbywa się za pomocą ładowarek łyżkowych lub suwnic bramowych z chwytakiem czerpakowym. Taki sposób mieszania jest uciążliwy i nie skutkuje właściwym stopniem zmieszania, co powoduje szybsze wypalanie się skupisk źle wymieszanej biomasy na ruszcie. Odsłonięcie fragmentów powierzchni pokładu rusztowego powoduje niekontrolowane wdmuchiwanie świeżego powietrza do komory spalania, powodując spadek sprawności kotła. Ponadto, tak jak w przypadku zasilania kotła miałem węglowym, na ruszcie zachodzić może dodatkowa segregacja ziaren, co w przypadku spalania jest zjawiskiem niekorzystnym [63]. Większe ziarna węgla i biomasy staczają się na krawędzie rusztu, gdzie podlegają szybszemu spalaniu związanemu z większą porowatością warstwy. Drobne ziarna skupiają się natomiast w środkowej części rusztu, gdzie spalanie trwa dłużej, co jest wynikiem słabszej penetracji powietrza podmuchowego przez warstwę paliwa o drobnych ziarnach.

Właściwy stopień wymieszania paliw można osiągnąć stosując specjalnie zaprojektowane i wykonane mieszalniki. W ostatnim czasie powstało wiele nowych konstrukcji takich maszyn, bowiem rynek firm produkujących urządzenia dla energetyki upatruje w tym zakresie źródło swoich przychodów. Na rys. 2 i 3 [102] przedstawiono stację mieszania MWD-2, służącą do mieszania i rozdrabniania biopaliwa na składach paliw przy kotłowniach. Układy technologiczne takich urządzeń mogą być różne np. mogą być wyposażone w dwa, trzy lub cztery leje zasypowe. Ich liczba zależy od ilości składników, które podlegają mieszaniu.

Stacja mieszania typ MWD

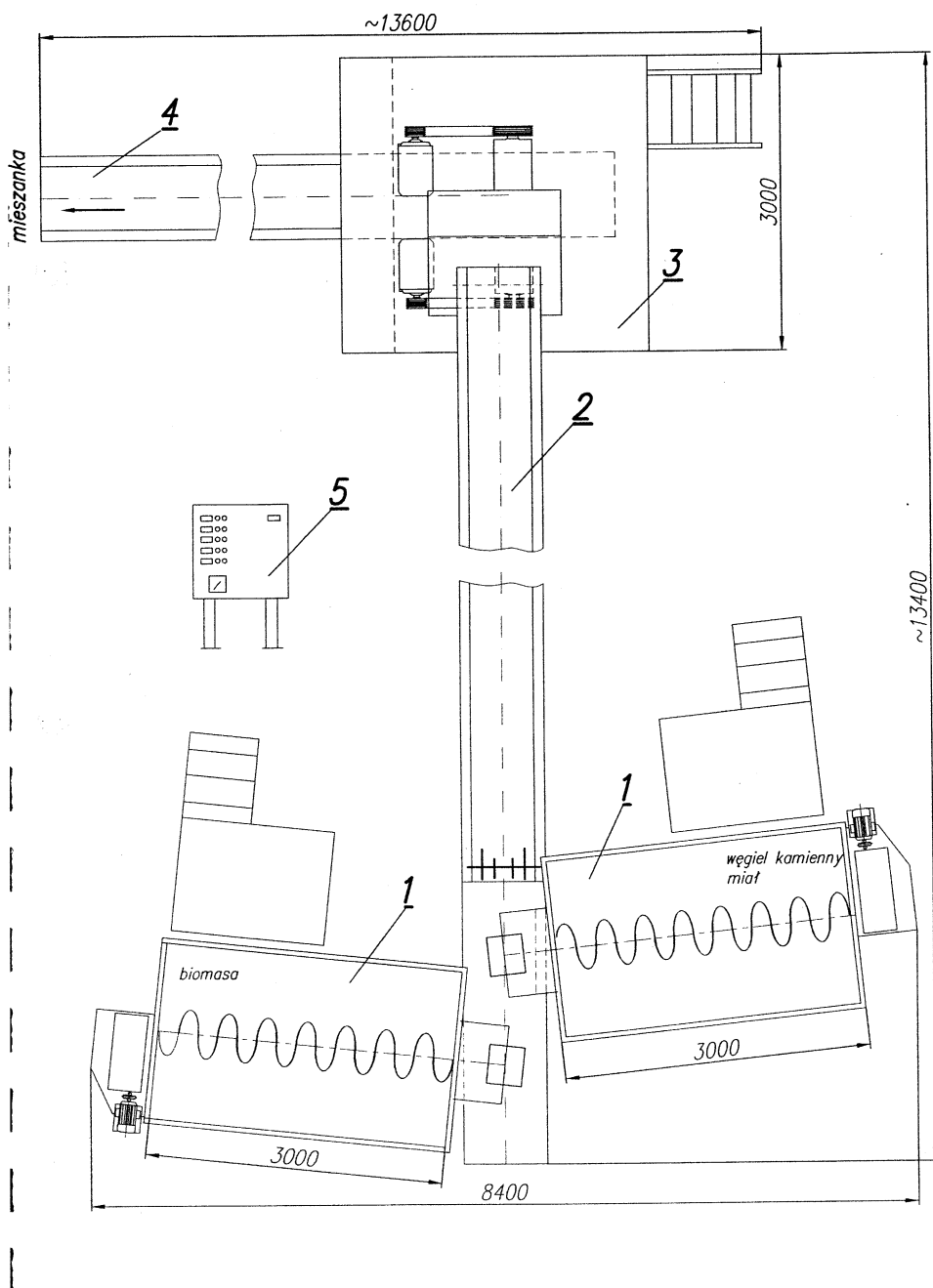
1. Kosz wstępnego mieszania
2. Taśmociąg I
3. Mikser
4. Taśmociąg II
5. Szafa sterownicza



Rys. 2. Stacja mieszania MWD

Stacja mieszania typ MWD-2

1. Kosz wstępnego mieszania
2. Taśmociąg I
3. Mikser
4. Taśmociąg II
5. Szafa sterownicza



Rys. 3. Stacja mieszania MWD-2



Rys. 4. Stacja mieszania MWD-2 (zdjęcie własne)



Rys. 5. Kocioł rusztowy WR-15 (zdjęcie własne)

Prowadzone ostatnio badania spalania tzw. paliwa wtórnego [90], czyli np. mieszanki biomasy z paliwem stałym, która jest wytwarzana poza przedsiębiorstwem, wykazały przewagę takiego rozwiązania nad rozdzielnym podawaniem węgla i biomasy do kotła np. za pomocą taśmociągów. Wykonane badania spalania tak przygotowanych mieszanek pokazały, że spadek sprawności brutto kotła w stosunku do opalanego wyłącznie węglem wynosił 0,2% przy spalaniu paliwa wtórnego, a 0,8% przy spalaniu węgla i biomasy podawanych oddzielnie do kotła [73].

Należy wspomnieć, że możliwe jest także spalanie w kotłach rusztowych za pomocą specjalnie skonstruowanych palników biomasy w postaci pyłu [28].

Wdrożenie do stosowania mieszalników statycznych przyczyni się do zainteresowania branży ciepłowniczej spalaniem biomasy, ponieważ zostanie zaproponowana prosta, skuteczna i niedroga w eksploatacji metoda wytwarzania mieszanek paliw stałych. Obniżenie energochłonności mieszania [84] przy użyciu mieszalnika statycznego przyczyni się do obniżenia kosztów zużycia energii elektrycznej u potencjalnych odbiorców tych urządzeń – ciepłowni o małej i średniej mocy, wyposażonych w kotły rusztowe.

1.7. Aktualny stan prawny

Obowiązujące aktualnie przepisy tj. Prawo energetyczne [93] i wydane do niego rozporządzenia wykonawcze nakładają na przedsiębiorstwa, zajmujące się wytwarzaniem energii elektrycznej lub jej obrotem, obowiązek zakupu energii elektrycznej, wytworzonej w odnawialnych źródłach energii (OZE). Dla przykładu w 2011 roku udział energii elektrycznej wytworzonej w OZE w stosunku do ilości energii elektrycznej sprzedawanej odbiorcom miał wynieść 10,4%, a w 2017 r. już 12,9 %.

Rozliczenie tego obowiązku jest realizowane poprzez uzyskanie i przedstawienie do umorzenia świadectw pochodzenia energii ze źródeł odnawialnych lub uiszczenia opłaty zastępczej. Prawa majątkowe związane ze świadectwami są zbywalne poprzez obrót na Towarowej Giełdzie Energii [92] i wygasają z chwilą ich umorzenia przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Wytwórcy, którzy na koniec każdego roku nie wykażą się realizacją powyższych zasad, muszą uiścić opłaty określone w Prawie energetycznym.

Obecnie ciepłownictwo, jako producent energii cieplnej, nie jest jeszcze objęte tym obowiązkiem, nie można jednak wykluczyć, że w niedalekiej przyszłości także ono będzie musiało sprostać podobnym wymaganiom.

Dotychczas część większych ciepłowni, tj. o mocy zainstalowanej powyżej 10 MW, objęta jest tzw. handlem emisjami CO₂ (ETS), który stanowi jeden z filarów polityki proekologicznej Unii Europejskiej (UE). Związane jest to z coraz większą emisją CO₂ do atmosfery, która powoduje nierównowagę w warstwie ozonowej i skutkuje ociepleniem klimatu. W UE podejmowane są nowego rodzaju inicjatywy oraz działania mające temu przeciwdziałać. Jednym z nich jest wprowadzenie ograniczeń wytwarzania CO₂ poprzez przyznawanie tzw. uprawnień do emisji. Podmioty gospodarcze, przede wszystkim elektrownie i ciepłownie, których emisja tego gazu jest większa od przyznanego limitu muszą ograniczyć jego emisję (np. poprzez modernizacje, wprowadzenie nowych technologii lub zmianę paliwa) lub zakupić na wolnym rynku brakujące uprawnienia.

Limity tych uprawnień dotychczas przyznawane są nieodpłatnie, stopniowo jednak - od 2012 roku - część z nich będzie musiała być zakupiona, a od 2016 roku całość będzie nabywana odpłatnie. Już teraz przyznawane limity są z roku na rok mniejsze i nie zaspokajają zapotrzebowania wszystkich branż. W Polsce szczególnie dotyczy to hutnictwa oraz przemysłu cementowego.

W krajowej energetyce używano do tej pory głównie biomasy pochodzenia leśnego. W związku z ograniczonością jej zasobów następuje zwrot w kierunku biomasy tzw. rolniczej, czyli pozyskiwanej z upraw roślin energetycznych. Ma to także ścisły związek

z uregulowaniami prawnymi [82, 91], które w coraz większym stopniu na producentach energii wymuszają stosowanie biomasy z upraw. Zgodnie z polskim prawem energia będzie uznawana jako pochodząca z odnawialnych źródeł energii, jeżeli udział wagowy biomasy („pozależnej”) w jej produkcji będzie wynosił w kolejnych latach:

- 2011 r. - 40% 2013 r. – 70%
- 2012 r. - 55% 2014 r. – 85%
- 2015 r.– 100%

Jednocześnie nałożony jest obowiązek uzyskania i przedstawienia Prezesowi URE do umorzenia świadectw pochodzenia lub uiszczenia opłaty zastępczej, jeżeli w roku udział ilościowy sumy energii elektrycznej, wynikającej ze świadectw pochodzenia w stosunku do całkowitej wyprodukowanej energii elektrycznej, wynosi:

- 2011 r. – 10,4% 2015 r. – 11,9%
- 2012 r. – 10,4% 2016 r. – 12,4%
- 2013 r. – 10,9% 2017 r. – 12,9%
- 2014 r. – 11,4%

Powyższe wielkości wskazują na to, że otwiera się u nas bardzo duży rynek producentów i dostawców biopaliw. Najczęściej w naszym kraju podejmowane są uprawy wierzby energetycznej, miskantusa olbrzymiego czy ślazuowca pensylwańskiego. Wtórą sprawą są ceny biomasy dostarczanej głównie do elektroenergetyki, które dotychczas ustaliły się średnio na poziomie dwukrotnej ceny mialu węglowego w przeliczeniu na wartość opałowu paliwa. Należy spodziewać się, że wprowadzenie na rynek coraz większej ilości biomasy rolniczej, wymagającej większych nakładów przy uprawie, spowoduje dalszy wzrost jej ceny. Dodatkowy wpływ będzie miał także światowy wzrost cen podstawowych surowców energetycznych, czyli ropy naftowej, gazu oraz węgla, co będzie można odczuć w polskiej gospodarce.

W gospodarce światowej, a szczególnie w przypadku krajów rozwijających się, uprawy roślin energetycznych stanowią konkurencję dla tradycyjnych upraw żywności, przyczyniając się w znacznym stopniu do ograniczenia produkcji, wzrostu jej cen i erozji gleb. W krajach wysoko rozwiniętych możliwe jest uprawianie roślin energetycznych na obszarach wyłączonych z upraw bądź na nieużytkach [58].

2. Mieszanie materiałów ziarnistych

2.1. Przegląd historyczny

Mieszanie materiałów ziarnistych jest procesem powszechnie stosowanym w praktyce w różnych gałęziach przemysłu, głównie w chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym, materiałów budowlanych i górnictwie. Zasadniczym celem mieszania w warunkach przemysłowych jest uzyskanie jednorodnej mieszaniny dwóch lub więcej składników. Im bardziej składniki te różnią się właściwościami fizycznymi (np. gęstość, wielkość, kształt), tym proces mieszania napotyka na więcej różnego rodzaju problemów, np. następuje segregacja składników, a mieszanina wykazuje niższy stopień zmieszania.

Badania naukowe procesu mieszania materiałów ziarnistych na dużą skalę rozwinęły się w latach 70. ubiegłego wieku. Dały temu początek opracowania i badania prowadzone w latach 50. i 60. przez Lacey'a, Weidebauma, Danckwertsa, Buslika, Browna, Rosemana, Stange'a i innych [13, 61, 62, 65, 75, 85]. Naukowcy ci wnieśli podstawy teoretyczne oraz rozwinęli badania praktyczne. Znaczny wkład do podstaw naukowych w tym okresie wnieśli także Polacy: Budryk, Iżykowski, Chudzikiewicz, Stręk, Włodarski [17, 18, 19, 68].

Rozwój badań w latach 70. i późniejszych w znacznym stopniu był wspomagany zapotrzebowaniem szybko rozwijającego się przemysłu oraz rozwinięciem warsztatu badawczego, do którego w szerokim zakresie zaczęto wykorzystywać obliczeniowe techniki komputerowe, trasery radioaktywne oraz optyczne metody oceny mieszaniny.

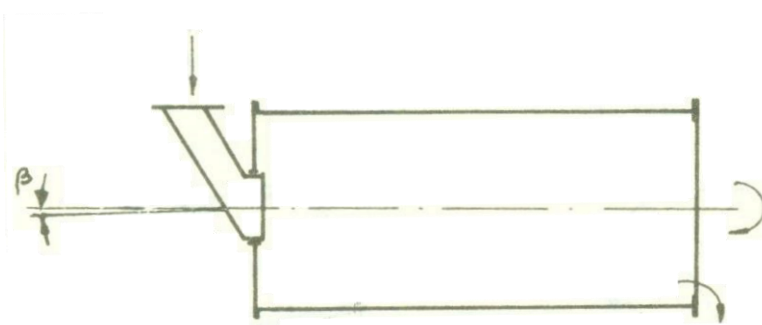
Istotny wkład w rozwój teorii i praktyki mieszania materiałów ziarnistych wniósł zespół pod kierunkiem prof. Janusza Bossa w ówczesnej Wyższej Szkole Inżynierskiej, a później w Politechnice Opolskiej [9, 10, 11, 12, 34, 77, 78, 80]. Całkowicie nowe spojrzenie na badanie efektów procesu mieszania dało wprowadzenie komputerowej analizy obrazu oraz sieci neuronowych. Komputerowa analiza obrazu zastąpiła w znacznym zakresie stosowane wcześniej analizy sitowe i wagowe, co przyczyniło się do przyspieszenia i obniżenia kosztów realizacji badań.

2.2. Urządzenia do mieszania materiałów ziarnistych

2.2.1. Mieszalniki do pracy ciągłej

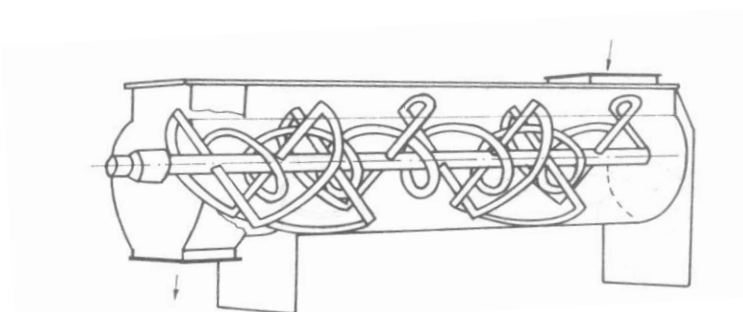
Wśród mieszalników osobną grupę stanowią mieszalniki do pracy ciągłej. Mogą to być przystosowane do pracy ciągłej mieszalniki okresowe lub konstrukcje specjalnie zaprojektowane do tego celu.

Najprostszą z takich konstrukcji jest mieszalnik bębnowy poziomy (rys.6). Ciągła praca uzyskiwana jest dzięki odpowiedniemu nachyleniu osi bębna w kierunku wysypu materiałów (β ok. 4°). Dzięki zmianie tego kąta można regulować czas przebywania materiału w bębnie (czas mieszania).



Rys. 6. Mieszalnik bębnowy [9]

Inną grupą mieszalników są mieszalniki z komorą nieruchomą. W takim przypadku mieszanie odbywa się dzięki ruchowi mieszadeł o różnym kształcie np. wstęgowym, łopatkowym, palczastym czy też pługowym (rys.7), co, jak wykazały przeprowadzone badania, ma decydujący wpływ na uzyskiwane efekty końcowe mieszania, takie jak stopień, czas czy też moc mieszania.



Rys. 7. Mieszalnik z komorą nieruchomą [9]

Do mieszania ciągłego mogą być też stosowane młyny czy rozdrabniacze, dzięki którym efekt mieszania uzyskuje się równocześnie z rozdrabnianiem materiałów ziarnistych. Kolejną grupą mieszalników przystosowanych do pracy ciągłej są mieszalniki statyczne, w których można osiągnąć wydajność nieosiągalną dla pozostałych typów mieszalników.

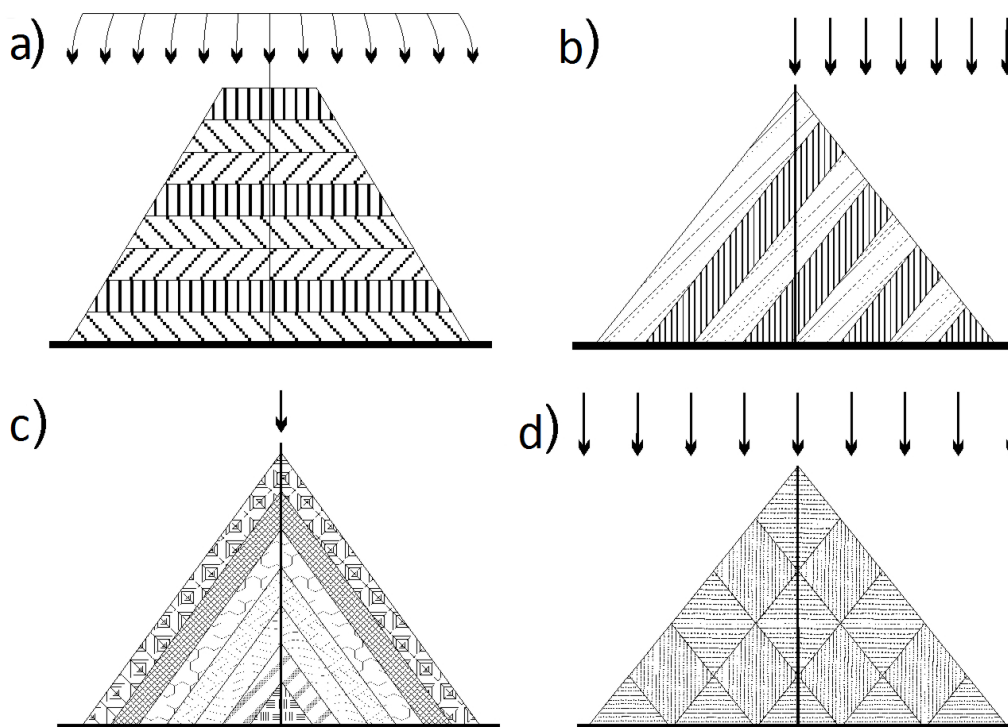
Do mieszania dużej objętości materiałów ziarnistych np. kruszyw lub węgla można zastosować mieszanie w dużych zbiornikach, czyli ze swobodnym wysypem ze zbiornika (system funnel - flow) lub poprzez przesypywanie w hałdach.

Dla uzyskania odpowiednich parametrów jakościowych miału węglowego można zastosować mieszanie dostaw poprzez odpowiednie ich hałdowanie. Literatura [9] podaje kilka sposobów (rys.8), które mogą mieć zastosowanie w większości ciepłowni. Jednak rozmiary placu składowego mogą stanowić ograniczenie tej metody. Inne ograniczenie, to posiadane urządzenia do załadunku i wyładunku miału węglowego.

Przymywanie opału poprzez formowanie hałdy warstwami (rys.8a) z jednoczesnym ich zagęszczaniem można zrealizować nawet w przypadku posiadania najprostszycy maszyn, np. spycharki czy ładowarki łyżkowej.

Pierwszy z przedstawionych rysunków przedstawia system, w którym mieszany miał węglowy jest składowany i zagęszczany warstwami. Budując w ten sposób hałdę otrzymujemy naprzemiennie składowane poziome warstwy różnych węgla.

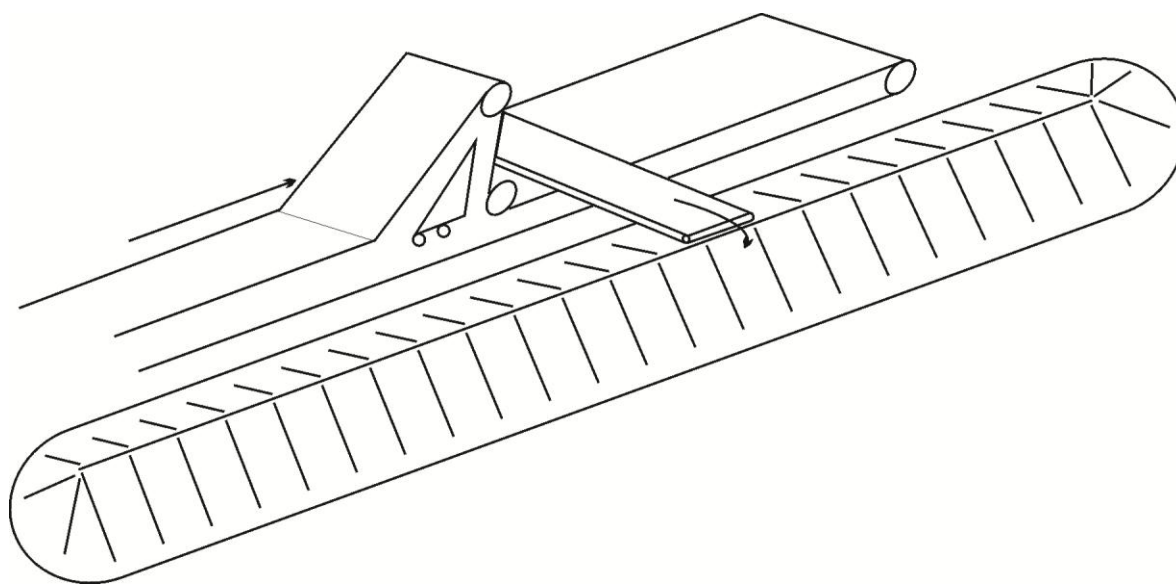
W drugim przypadku budowę hałdy rozpoczyna się od przyzmy o niewielkiej wysokości, a kolejne warstwy usypuje się tylko z jednej strony. W kolejnej metodzie, zwanej daszkową, miał węglowy usypuje się następującymi po sobie warstwami stożkowymi. System rzędowy polega na układaniu kolejnych równoległych przyzmy i wypełnianiu powstałych przestrzeni między nimi następnymi warstwami materiału ziarnistego.



Rys. 8. Usypywanie hałdy [9], system : a) warstwowy, b) podłużny, c) daszkowy, d) rzędowy

Rozbieranie hałdy w każdym z opisanych przypadków należy prowadzić w kierunku prostopadłym w stosunku do jej usypywania. Przyczynia się to do dodatkowego ujednorodnienia mieszanki paliwa. Przy braku urządzeń do mechanicznego pobierania miazła ze składu, rozbieranie hałdy może być realizowane przez nagarnianie miazła węglowego spycharką, poruszającą się w kierunku prostopadłym do pierwotnie układanych warstw.

W najlepszej sytuacji pod względem zastosowania odpowiednio usypanych hałd są ciepłownie posiadające w pełni zmechanizowane place składowe, które wyposażone są w zwałowarko-ładowarki. W takich przypadkach istnieje bowiem możliwość szerszego wyboru spośród prezentowanych metod.



Rys. 9. Podłużne usypywanie hałdy [9]

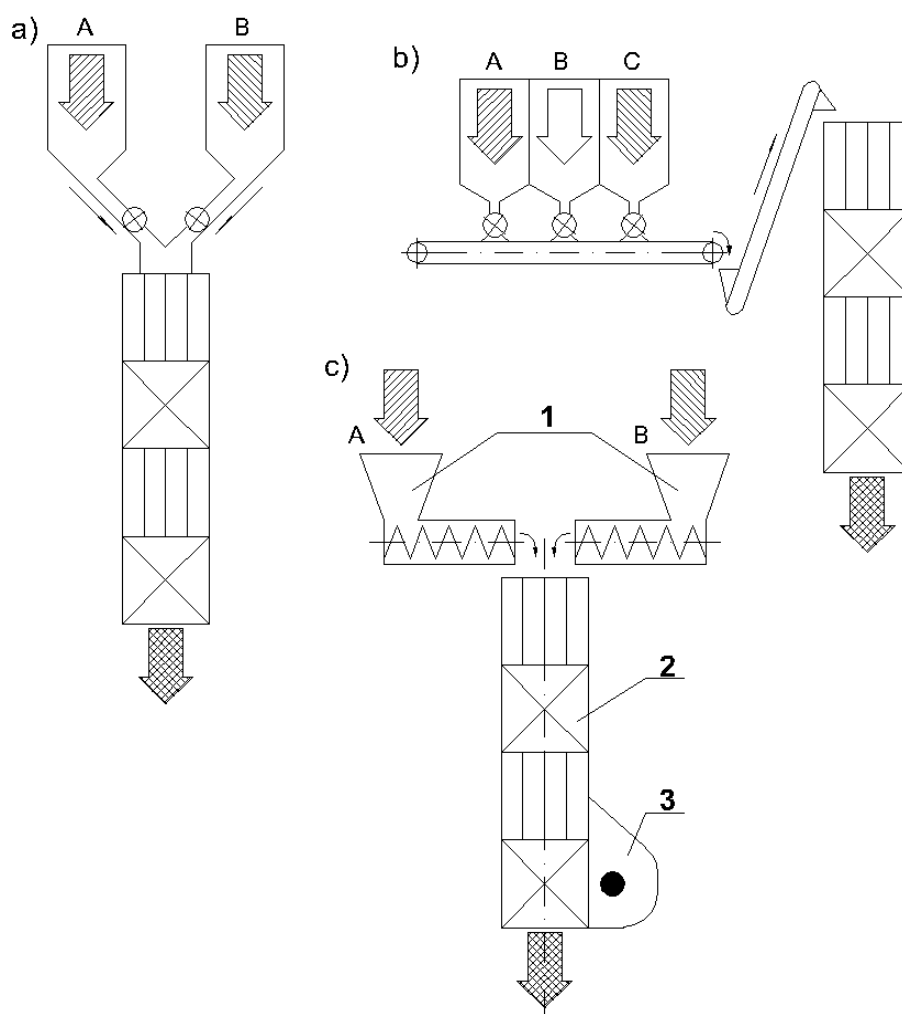
2.2.2. Mieszalniki statyczne

Mieszalniki statyczne są urządzeniami służącymi do ujednorodniania materiałów sypkich lub cieczy. Na skutek ruchu grawitacyjnego lub ciśnienia cząstki materiału ziarnistego ulegają mieszaniu na odpowiednio ukształtowanych wypełnieniach rurociągów lub kolumn przesypowych. Mieszalniki statyczne są urządzeniami do pracy ciągłej z możliwością pracy okresowej. Prowadzone dotychczas badania wykazały ich skuteczność oraz dużą wydajność. Dla mieszalników statycznych o średnicy 0,1 m szacuje się, że wydajność mieszania w zależności od właściwości materiału sypkiego jest rzędu od 0,5 do 1 kg/s. Wraz ze wzrostem wymiaru liniowego wydajność ta rośnie do czwartej potęgi, a więc w praktyce są to bardzo duże wydajności [9].

Proces mieszania w mieszalniku statycznym odbywa się poprzez grawitacyjny ruch ziaren mieszanych materiałów, które na drodze swojego ruchu napotykają elementy

mieszające. Struga materiału ziarnistego zostaje na nich kilkakrotnie rozdzielona i następnie łączona. W wyniku krzyżowania się mniejszych strug materiału następuje ujednorodnienie mieszanych składników. Utrudnieniem procesu mieszania materiałów ziarnistych w mieszalniku statycznym może być zbyt wysoka wilgotność, spoistość lub zdolność do zbrylania się, co w niektórych przypadkach może doprowadzić do zablokowania przesypu i konieczności wyłączenia mieszalnika z pracy w celu jego oczyszczenia.

Na skutek tarcia materiału ziarnistego, elementy mieszające ulegają erozyjnemu zużyciu. Dla zapewnienia ciągłości pracy mieszalników konieczne jest utrzymywanie zapasu takich elementów, tak aby czas przestoju mieszalnika, związany z ich wymianą, był jak najkrótszy.



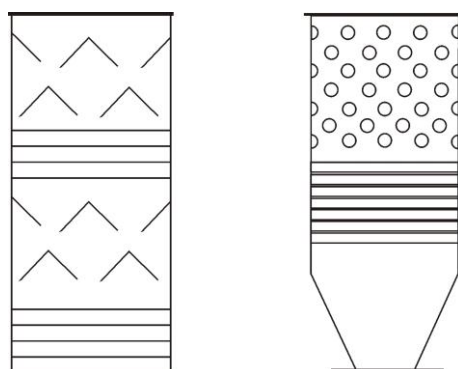
Mieszalniki styczne w linii technologicznej a) zasilanie bezpośrednie, b) zasilanie pośrednie, c) układ minerałów o dużej spójności; 1 - dozowniki ślimakowe, 2 - mieszalnik statyczny, 3 - wibrator

Rys. 10. Umiejscowienie mieszalników statycznych w linii technologicznej [9]

Niewątpliwą zaletą mieszalników statycznych jest brak elementów ruchomych, dzięki czemu nie stwarzają one problemów eksploatacyjnych i remontowych. W porównaniu do mieszalników o napędzie mechanicznym zużywanie się takich elementów będzie znacznie wolniejsze, a ewentualna ich wymiana nie będzie kosztowna. Mieszalniki statyczne można stosować także w przypadkach, kiedy ważne jest ograniczenie rozdrabniania mieszanych materiałów.

Niedogodnością, wynikającą z konieczności uzyskania ruchu grawitacyjnego ziaren jest transport materiału sypkiego na wysokość związaną z wymiarami wzdłużnymi mieszalnika. Można ją częściowo zniwelować poprzez wkomponowanie mieszalnika w ciąg technologiczny mieszania (rys.10), co jednak nie zawsze może być zrealizowane. W takich przypadkach należy liczyć się z dodatkowym zużyciem energii elektrycznej, zużywanej do transportu materiałów na wymaganą wysokość przy użyciu taśmociągów lub transportu pneumatycznego [83].

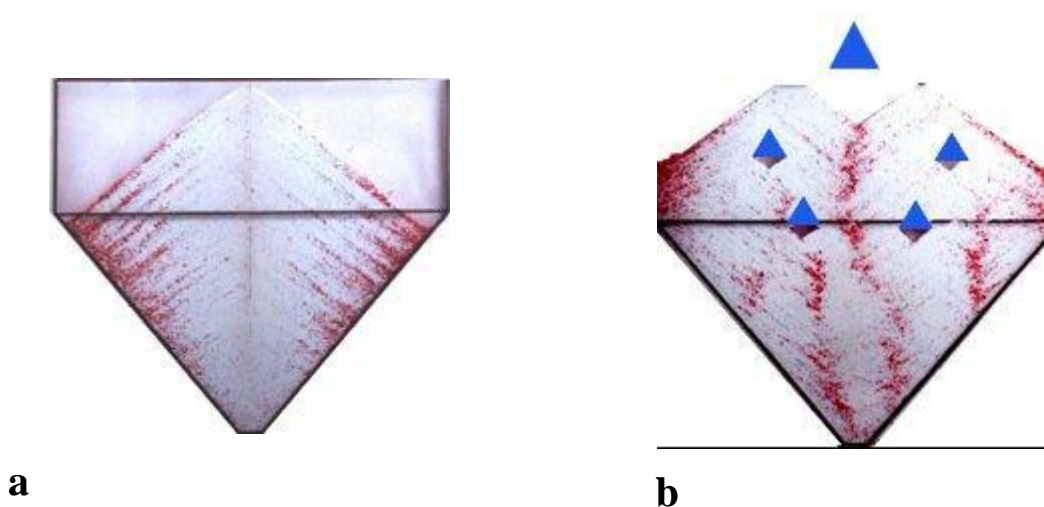
Pierwotnie konstrukcje mieszalników statycznych były projektowane dla potrzeb mieszania płynów [56], a wykorzystywanie ich do mieszania materiałów ziarnistych nie w każdym przypadku przynosiło spodziewane efekty. Dlatego też oddzielną drogą poszedł rozwój konstrukcji mieszalników statycznych do mieszania materiałów ziarnistych. Wśród najczęściej stosowanych wypełnień (elementów) mieszalników są Kenics, Komax, płytkowy, daszkowy czy prętowy (rys.11). Nie jest to katalog konstrukcji zamknięty ponieważ ciągle opracowywane są nowe ich typy dostosowywane indywidualnie do rodzaju mieszanych materiałów. Materiały konstrukcyjne używane do ich budowy muszą być odpowiednio dobrane do mieszanych materiałów, szczególnie pod względem ich erozyjnego zużycia.



Rys. 11. Mieszalniki statyczne o przekroju kwadratowym: daszkowy i prętowy [9]

Prowadzone dotychczas badania wykazują, że skuteczność działania mieszalników jest różna. Przy tej samej ilości kroków mieszania, przez które rozumie się przesyp przez cały mieszalnik, uzyskuje się różne stopnie zmieszania. Wyniki mieszania uzyskane w warunkach laboratoryjnych będą się różniły od tych prowadzonych w warunkach rzeczywistych. Różnica może być tym większa, im warunki mieszania np. wilgotność czy rodzaj, kształt i wymiary mieszanych materiałów będą odbiegać od tych użytych w skali laboratoryjnej. Badania potwierdziły, że lepsze efekty mieszania uzyskuje się w przypadku mieszalników statycznych o przekrojach kwadratowych niż okrągłych [9].

Zaproponowane rozwiązanie konstrukcji silosów w pracy [76] oddaje istotę zastosowania elementów mieszających (przegród) w mieszalnikach statycznych. Proces mieszania przebiega dodatkowo dzięki poślizgowi ziaren na daszkowych elementach mieszających (rys.12), które przeciwdziałają segregacji wtórnej mieszaniny. Związana jest ona z grawitacyjnym toceniem największych ziaren po zewnętrznej powierzchni stożka nasypowego. Rozdzielenie pojedynczej strugi materiału ziarnistego na kilka mniejszych powoduje, że ziarna o większej średnicy zajmują położenie także w środku objętości materiału, przyczyniając się dodatkowo do jej ujednorodnienia.



Rys. 12. Układ ziaren w silosie a - segregacja wtórna w silosie, b - wkładki stożkowe rozdzielające strugę materiału [76]

Do wymiernych efektów użycia mieszalników statycznych do przygotowania mieszanek węgla i biomasy można zaliczyć:

- poprawę jakości uzyskiwanych mieszanek w stosunku do tych wykonywanych przy użyciu maszyn budowlanych (spycharek, ładowarek),

- mniejsze zużycie energii elektrycznej w procesie mieszania (o ok. 30 - 60 %) w stosunku do linii technologicznych mieszania, wyposażonych w mieszalniki mechaniczne,
- możliwość obniżenia emisji CO₂ z uwagi na spalanie paliw odnawialnych (o zamkniętym obiegu CO₂),
- rozwój i rozszerzenie działalności przez podmioty produkujące np. konstrukcje stalowe lub kiedy stanowi ona działalność uboczną przedsiębiorstw energetyki cieplnej.

3. Podstawy procesu mieszania materiałów ziarnistych

3.1. Podstawowe parametry

Średnica zastępcza ziarna d_z jest wymiarem liniowym, który charakteryzuje ziarna nieregularne tzn. mające kształt różny od kulistego.

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}}, \quad (1)$$

gdzie m – masa ziarna, ρ – gęstość ziarna.

W przypadku kiedy mamy do czynienia z frakcjami sitowymi odsianymi pomiędzy sitami o wymiarach oczek a_1 i a_2 , średnica zastępcza ziarna jest zdefiniowana jako średnica geometryczna.

$$d_z = \sqrt{a_1 a_2}. \quad (2)$$

Średnią średnicę z kilku frakcji sitowych oblicza się jako średnią ważoną.

Porowatość materiału ziarnistego (złoża) wynika z tego, że ziarna zajmują większą objętość niż materiał jednolity. Przyczyną tego są wolne przestrzenie pomiędzy poszczególnymi ziarnami.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{V_s}{V}, \quad (3)$$

gdzie: V – całkowita objętość ładunku, V_s – objętość ziaren w złożu, V_p – objętość przestrzeni między ziarnami.

Porowatość może zmieniać się w szerokim zakresie w zależności od kształtu i wymiarów ziaren.

Kształt ziarna zdefiniowany jest poprzez czynnik kształtu, czyli stosunek powierzchni ziarna F do powierzchni kuli o tej samej objętości v co ziarno.

$$\varphi = 0,2068 \frac{F}{v^{2/3}}. \quad (4)$$

Dla kształtów innych niż kula $\varphi > 1$.

Gęstość nasypowa ρ_n jest to masa luźno usypanego materiału. Pomiedzy gęstością nasypowa a porowatością złoża zachodzi związek:

$$\rho_n = \frac{m}{V} = \rho(1 - \varepsilon). \quad (5)$$

Kąt naturalnego usypu β jest to kąt stożka materiału ziarnistego, który jest luźno usypany. Dla materiałów w stanie suchym takich jak węgiel, piasek czy cement kąt naturalnego usypu β wynosi od 29° do 33°.

Wilgotność materiału W_{tr} [%] jest to zawartość wilgoci w materiale ziarnistym. Jeżeli woda zawarta jest wewnątrz materiału (woda krystalizacyjna lub kapilarna) nie ma to większego wpływu na proces mieszania. W przypadku wody zwilżającej powierzchnię ziaren może dochodzić do zbrylania, co jest zjawiskiem niekorzystnym.

3.2. Charakterystyka materiałów ziarnistych

Materiały ziarniste powszechnie występują w przemyśle, rolnictwie i przetwórstwie, budownictwie. W zdecydowanej większości procesów technologicznych są one ze sobą mieszane, co prowadzi do powstawania różnego rodzaju mieszanek np. w rolnictwie (pasze), w przemysłach wydobywczych, spożywczych, farmaceutycznym lub energetyce. Biorąc pod uwagę różne parametry tych materiałów dużo uwagi poświęca się doborowi odpowiednich urządzeń mieszających i minimalizacji późniejszych kosztów oraz problemów eksploatacyjnych.

Materiałami ziarnistymi nazywa się cząstki ciał stałych, które są luźno usypane, a w procesie mieszania ich ruch jest chaotyczny i przypadkowy. Mogą to być ziarna o kształtach i wymiarach zbliżonych do siebie, jak ma to miejsce w przypadku ziaren roślin, lub całkowicie różniących się od siebie, kiedy mamy do czynienia z materiałami rozdrabnianymi mechanicznie - skałami, węglem lub zrębkami drzewnymi.

Najważniejsze parametry materiałów ziarnistych [6, 9]:

- rozkład wymiarów ziaren,
- kształt i charakterystyka powierzchni ziaren,
- gęstość właściwa i nasypowa,
- zawartość wilgoci,
- współczynnik tarcia wewnętrznego,
- współczynnik tarcia materiału o ścianki zbiornika,
- kąt naturalnego usypu,

- kruchość lub łamliwość,
- skłonność do zbrylania się,
- tendencję do wiązania się z innymi materiałami (kohezja).

Wszystkie te cechy wpływają na możliwość i efekty procesu mieszania, dobór urządzeń, moc mieszania, możliwość tworzenia się pyłu, zużycie elementów mieszających.

Materiały ziarniste pod względem zawartości wilgoci można podzielić na [6]:

- suche, czyli zawierające ewentualnie wodę krystalizacyjną,
- powietrzno-suche, które zawierają dodatkowo wodę higroskopijną,
- wilgotne, zawierające wodę w stanie wolnym.

Proces mieszania materiałów ziarnistych odbiega znacząco od mieszania cieczy. Pojawia się w tym przypadku kwestia właściwego poboru próbek do oceny mieszania, ich ilości i reprezentatywności. W przypadku niektórych materiałów opracowano stosowne normy np. dla węgla kamiennego [95], którymi można posługiwać się w przypadku innych materiałów ziarnistych o zbliżonych cechach fizycznych.

3.3. Mieszanie i segregacja

Efektem mieszania dwóch lub kilku składników ziarnistych będzie mieszanina, której struktura odbiega od stanu początkowego, zwanego stanem pierwotnej segregacji, kiedy składniki były rozdzielone. W literaturze [25, 60] wyróżnia się podstawowe stany mieszaniny:

1. Stan mieszaniny doskonałej (stan uporządkowany) – w każdym miejscu mieszaniny mamy identyczny skład.
2. Stan randomowy (stan losowy) – w każdym miejscu mieszaniny prawdopodobieństwo znalezienia określonej cząstki jest jednakowe.
3. Stan pierwotnej segregacji – składniki są rozdzielone przed rozpoczęciem mieszania.
4. Stan wtórnej segregacji – w trakcie mieszania składniki ulegają częściowemu rozdzielaniu pod wpływem różnych czynników.

Pierwszy z wymienionych stanów mieszaniny poprzez mieszanie mechaniczne jest praktycznie nieosiągalny. Natomiast z drugim możemy mieć do czynienia po dostatecznie długim okresie mieszania składników pod warunkiem, że nie nastąpi ich wtórna

segregacja. Do takiego stanu porównuje się efekty mieszania składników w trakcie prowadzonych badań.

Mieszając dwa składniki jeden z nich nazywany jest traserem A (przeważnie ten o mniejszym udziale masowym), a drugi fazą rozpraszającą B. Udział masowy traseru A oblicza się z zależności:

$$x = \frac{m_A}{m_A + m_B} . \quad (6)$$

natomiast fazy rozpraszającej:

$$y = 1 - x .$$

Dla segregacji pierwotnej przed zmieszaniem współczynnik x będzie przybierał wartość 0 lub 1.

Średni skład materiału \bar{x} jest średnią arytmetyczną udziału składnika mieszaniny:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (7)$$

Wariancja określa stopień rozproszenia kluczowego składnika:

$$\text{Var}(x) = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 . \quad (8)$$

gdzie n – liczba prób.

Koncentracja p jest to udział traseru (biomasy) w poszczególnych segmentach kasyety odbierającej do sumy jej udziałów:

$$p = \frac{z_i}{\sum_{n=1}^{10} z_i} \quad (9)$$

gdzie: z_i – koncentracja traseru w i -tym segmencie

3.4. Mechanizmy mieszania

Od strony teoretycznej podczas procesu mieszania materiałów ziarnistych wyróżnia się następujące procesy [25, 45, 62]:

- mieszanie ścinające – powstające w mieszaninie płaszczyzny przesuwały się między sobą,
- mieszanie konwekcyjne – grupy ziaren przechodzą z jednego do drugiego położenia,
- mieszanie dyfuzyjne – pojedyncze ziarna wymieniają się miejscami,
- mieszanie dyfuzyjno – konwekcyjne, będące kompilacją dwóch poprzednich,
- mieszanie zderzeniowe – ziarna rozpraszają się pod wpływem wzajemnego zderzania się,
- mieszanie przez rozdrabnianie – rozcieranie i odkształcanie ziaren.

Z najprostszym przypadkiem mamy do czynienia, gdy zachodzi mieszanie dwóch składników o zbliżonych parametrach fizycznych (kształt, wymiar, gęstość), kiedy składniki przechodzą od całkowitej segregacji do stanu randomowego zmieszania. Głównym parametrem, od którego zależy zmiana stanu, jest czas mieszania.

Nieco inaczej zachodzi proces z udziałem składników niejednorodnych. W tym przypadku najpierw występuje intensywne mieszanie, a potem składniki o podobnych właściwościach fizycznych grupują się w różnych miejscach w mieszaninie. Według wielu badań największy wpływ mają na to zróżnicowanie wymiarów (średnic) i gęstość materiału [34, 77, 80].

W praktyce przemysłowej opisane mechanizmy mieszania w różnego rodzaju mieszalnikach mogą mieć decydujący wpływ na procesy w nim zachodzące, co należy brać pod uwagę w przypadku doboru określonego typu mieszalnika do konkretnego procesu mieszania.

Tab. 5. Mechanizmy mieszania w różnych mieszalnikach [29]

Typ mieszalnika	Mechanizm dyfuzyjny	Mechanizm ścinający	Mechanizm konwekcyjny
Mieszalnik bębnowy z komorą sześcienną	decydujący	nieznaczący	-----
Mieszalnik typu V	decydujący	nieznaczący	-----
Mieszarka typu Nauta	-----	nieznaczący	decydujący
Mieszarka z mieszadłem wstęgowym	-----	decydujący	nieznaczący

3.5. Mieszanie układów niejednorodnych

Przykładem mieszania dwóch niejednorodnych materiałów ziarnistych jest mieszanie węgla z biomasą. Niejednorodność związana jest przede wszystkim z różnicą kształtu ziaren i ich gęstości: zrębek lub pelletu wobec ziaren węgla kamiennego. Niejednorodność materiału ziarnistego może dotyczyć także kształtów ziaren, wilgotności, współczynników tarcia wewnętrznego i inne, jednak te cechy wpływają w mniejszym stopniu na skład, niż kształt i gęstość ziaren.

Dla materiałów mieszanych, których gęstości są takie same lub zbliżone, do oceny składu używa się udziałów masowych, a w przeciwnym przypadku udziałów objętościowych:

$$x = \frac{V_A}{V_A + V_B} . \quad (10)$$

gdzie: V_A i V_B objętości mieszanych składników A i B.

Wyznaczenie wariancji stanu randomowego mieszanin niejednorodnych opiera się na wielu wzorach wyprowadzonych, a następnie modyfikowanych np. przez Buslika [15], Stange'a czy Poola. Dla ziaren o różnych wymiarach i gęstości wariancji stanu randomowego:

$$\sigma_r^2 = \frac{x_v(1-x_v)\bar{V}_A + x_v^2(\bar{V} - \bar{V}_A)}{V} . \quad (11)$$

gdzie: \bar{V}_A lub \bar{V} oznacza średnią objętość ziarna A lub przeciętnej ziarna mieszaniny, V – objętość próbki.

Z mieszaniem układów niejednorodnych związana jest segregacja, która objawia się tym wyraźniej, im większe są różnice średnicy ziaren, natomiast mniejszy wpływ ma różnica gęstości. Segregacja objawia się gromadzeniem ziaren o podobnych cechach w pewnych określonych miejscach mieszanin.

W mieszalnikach mechanicznych zjawisko segregacji jest niepożądane, ponieważ efektowi mieszania przeciwstawia się postępujący rozdział ziaren. Zjawisko to występuje przeważnie po pewnym czasie mieszania, kiedy po początkowym gwałtownym wzroście stopnia zmieszania następuje jego spadek i osiągnięcie pewnego stanu równowagi. Segregacji można częściowo zapobiegać ograniczając czas mieszania. Dla niektórych materiałów ziarnistych wyznaczono taki optymalny czas mieszania [2]:

$$\tau_{opt} = \frac{\tau_s \tau_m}{\tau_s + \tau_m}, \quad (12)$$

gdzie: τ_{opt} - optymalny czas mieszania, τ_s - czas segregacji, τ_m - czas mieszania.

W skrajnym przypadku znacznej różnicy średnic zachodzi zjawisko perkolacji [3], z którą mamy do czynienia, kiedy drobne ziarna przemieszczają się przez wolne przestrzenie pomiędzy ziarnami grubszymi. Z teoretycznie kulistych kształtów ziaren można wyprowadzić zależność:

$$\frac{d_A}{d_B} \geq 6,46, \quad (13)$$

gdzie: d_A, d_B – średnice dużych i małych ziaren.

Perkolacji będzie przeciwdziałać wilgotność składników (drobniejsze ziarna będą oklejać się na powierzchni dużych ziaren).

Podobny wpływ będą miały wysokie współczynniki tarcia wewnętrznego składników mieszaniny, które będą wyhamowywać przesypywanie się drobnych ziaren w dół złoża.

3.6. Testy statystyczne

Testy statystyczne wykorzystywane są do weryfikacji stanu mieszaniny ziarnistej. W każdym z przypadków formułowana jest hipoteza zerowa, która porównywana jest z wartością danego testu odczytanego z tablic przy założonym poziomie istotności α . Dla mieszania zwykle przyjmowane jest $\alpha = 0,05$ i $n-1$ stopni swobody.

Najczęściej stosowanymi testami są test istotności dla średniej (test t Studenta), test wariancji (analiza wariancji – test Fishera-Snedecora), test wielu wariancji (test Bartleta), czy test zgodności Kołmogorowa [33, 53].

Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystywano także analizę wariancji ANOVA (analysis of variance), czyli test istotności różnic wielu średnich [68]. Hipotezą zerową jest równość wariancji wobec hipotezy alternatywnej: średnie różnią się między sobą $\alpha = 0,05$. Zastosowanie tego testu wymaga, aby analizowany parametr charakteryzował się rozkładem normalnym, a wariancje analizowanych obiektów zbytnio się nie różniły.

Tab. 6. Analiza wariancji

Źródło zmienności	Stopnie swobody	Sumy kwadratów (SS)	Średnie kwadraty	Statystyka F
Między obiektami	$\nu_1 = t-1$	SS_t	MS_t	$F=MS_t/MS_e$
Wewnątrz obiektów	$\nu_2 = n-t$	SS_e	MS_e	

gdzie: n - suma wszystkich obserwacji,

t – ilość obiektów, \bar{y}_i - wartość średnia i-tego obiektu, \bar{y} - średnia ze wszystkich obserwacji

$$SS_t = \sum_{i=1}^t (\bar{y}_i - \bar{y})^2 n_i, \quad SS_e = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2. \quad (14)$$

Hipotezę zerową weryfikuje się testem F. Obliczoną powyżej wartość F porównuje się z wartością F dla określonych stopni swobody ν_1, ν_2 oraz $\alpha = 0,05$.

3.7. Stopień zmieszania

Miarą jednorodności mieszaniny jest stopień zmieszania M. W toku badań prowadzonych na przestrzeni kilkudziesięciu ostatnich lat poszczególni autorzy opracowali wiele własnych definicji stopnia zmieszania (np. Stange, Danckwerts, Rose). Zdecydowana większość opiera się na analizie średniego odchylenia standardowego/wariancji dla składników po zmieszaniu do odchylenia standardowego lub wariancji przed zmieszaniami.

W tab. 7 zestawiono kilka przykładowych definicji stopnia zmieszania.

Uważa się, że definicja Rose'a najlepiej opisuje stan mieszaniny, gdyż spełnia jednocześnie kilka kryteriów: stopień zmieszania jest niezależny od wzajemnych proporcji składników i liczebności próbek, przedział liczbowy M jest obustronnie zamknięty, a wartość M rośnie wraz z postępem mieszania [61].

Analizując wzór Rose'a

$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (15)$$

Tab. 7. Niektóre definicje stopnia zmieszania

nr	Autor	Zależność
1.	Stange [65]	$M_1 = \sigma^2$
2.	Danckwerts [21]	$M_2 = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$
3.	Rose [61]	$M_3 = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}$
4.	Lacey [42]	$M_4 = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2}$
5.	Chudzikiewicz [19]	$M_5 = \frac{\sigma}{x}$

można zauważyć, że przed zmieszaniem, gdy $\sigma = \sigma_0$ stopień zmieszania $M = 0$. W miarę postępu mieszania całe wyrażenie $\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \rightarrow 0$, a stopień zmieszania M dąży do 1.

Oznacza to, że idealne mieszaniny będą miały stopień zmieszania $M = 1$, natomiast dla mieszanin stochastycznych $M < 1$.

3.8. Pobieranie i analizowanie próbek

W przypadku materiałów ziarnistych prawie zawsze mamy do czynienia z niejednorodnością złoża. Podczas pobieraniu próbek do badań należy przyjmować generalną zasadę, że mamy możliwość pobrania ziarna z każdego miejsca z danej partii materiału oraz że dowolne ziarno można pobrać z takim samym prawdopodobieństwem. Pierwszorzędno znaczenia nabiera tu staranność i reprezentatywność pobieranych próbek, gdyż błąd pomiaru związany z poborem próbki jest wielokrotnie większy niż błąd późniejszej analizy laboratoryjnej składu samej próbki. Czynność poboru próbek ułatwiają różnego rodzaju znormalizowane próbobierze czy odpowiednie narzędzia.

Przykłady takich urządzeń i narzędzi znajdują się w stosownych normach [95, 96]. Ich zastosowanie i ścisłe przestrzeganie procedur opisanych w normach przyczynia się do ograniczenia błędów przy pobieraniu prób, a w efekcie do otrzymania wiarygodnych wyników prowadzonych analiz.

Dla pewnego rodzaju materiałów ziarnistych opracowano stosowne przepisy i normy, których celem jest ujednoczenie zasad, metod i narzędzi do ich poboru, co ma ogromne znaczenie przy obrocie handlowym dużych partii towarów ziarnistych, takich jak zboża, pasze czy węgle kamienne i brunatne. Niestety, najsłabszym ogniwem tego procesu jest próbkobiorca, od którego zaangażowania i staranności wykonania pracy w dużej mierze zależy poprawność otrzymanych wyników, więc aby ograniczyć do minimum ludzką pracę dąży się do mechanizacji i automatyzacji tej czynności. Służą do tego próbobierze automatyczne, pobierające np. porcje materiału do badań z przenośników taśmowych, podzielniki próbek, sondy czy węgelniki.

Dla określenia poboru wyjściowej ilości próbek z dużej objętości (powyżej 1000 ton) węgla wzbogaconego należy posługiwać się wzorem:

$$n_i = 16\sqrt{\frac{M_p}{1000}}, \quad (16)$$

gdzie: M_p - masa badanej partii węgla.

Ujednoczanie norm krajowych z normami Unii Europejskiej prowadzi do przyjmowania rozwiązań nieco odmiennych od dotychczas stosowanych w Polsce. Przykładem tego może być istnienie dwóch norm dotyczących pobierania próbek węgla [95, 96]. Druga z tych norm szerzej ujmuje sprawy szacowania niepewności pomiarów, określa precyzję wyników oraz posługuje się bardziej rozbudowanym aparatem matematycznym. Z praktycznego punktu widzenia wyklucza jednak pobór próbek

opalowych z hałdy miału węglowego (partii nieruchomych), gdyż brak jest możliwości poboru próbki z wnętrza hałdy, czyli ze znacznej głębokości.

Kolejnymi momentami, gdzie mogą powstać błędy jest pomniejszanie pobranych próbek do wielkości próbki laboratoryjnej oraz późniejsze niewłaściwe przechowywanie próbek. Muszą być one przechowywane w szczelnie zamykanych pojemnikach (workach) i w odpowiedniej temperaturze - zbliżonej do tej, w jakiej próbka została pobrana. Działania te mają na celu ochronę próbki przed utratą wilgoci, co ma istotne znaczenie np. dla późniejszych wyników analiz jakościowych węgla kamiennego. Najwłaściwszym tokiem postępowania z próbką byłoby jej natychmiastowe przekazanie do laboratorium wykonującego oznaczenia, co nie zawsze jest możliwe, gdyż miejsca ich pobierania mogą znajdować się w znacznej odległości od laboratoriów. Z takimi przypadkami mamy do czynienia np. przy przeładunku towarów na granicach lub w portach morskich.

Osobnym zagadnieniem jest ciągły pomiar parametrów produkowanej mieszaniny ziarnistej. W przypadku węgla kamiennego i podstawowych jego parametrów, czyli wartości opalowej, zawartości popiołu i siarki oraz wilgoci, producenci (kopalnie) od dawna stosują ciągły pomiar składu realizowany za pomocą popiołomierzy. Umieszczony nad taśmociągiem popiołomierz w sposób ciągły dostarcza danych dotyczących zawartości popiołu w węglu i zawartości wilgoci, a poprzez odpowiednie przeliczenia i porównanie z charakterystykami węgla z danej kopalni wylicza wartość opalową i zawartość siarki.

Działanie popiołomierzy najnowszej generacji oparte jest na pomiarze naturalnego promieniowania gamma. Wcześniejsze konstrukcje opierały wykonywanie pomiarów na prześwietlaniu próbki przez promieniowanie gamma z własnego źródła oraz wiązki wysokoenergetycznej mikrofal. Popiół zawarty w węglu, jako część niepalna, osłabia promieniowanie gamma, a mikrofałe pochłaniane są przez masę węgla np. na taśmociągu. Zliczanie tego promieniowania pozwala wyliczyć zawartość popiołu i wilgoci w strudze węgla.

Opracowane ostatnio urządzenia przenośne w postaci sondy, którą wbija się w węgiel na hałdzie lub w wagonie pozwalają na wstępne i szybkie oszacowanie jakości dostarczanego węgla.

Powyższe metody można stosować jedynie do szacunkowego określania parametrów paliwa, ponieważ nie są one dopuszczone do rozliczeń handlowych. W odmiennych przypadkach, jak i do oznaczania innych parametrów, np. zawartości części lotnych, zawartości chloru, azotu czy innych pierwiastków, do dyspozycji pozostają klasyczne analizy laboratoryjne i okresowe pobieranie próbek.

3.9. Komputerowa analiza obrazu

Komputerowa (cyfrowa, wizualna) analiza obrazu [8, 39, 47, 74] jest narzędziem przydatnym w różnego rodzaju badaniach porównawczych, ponieważ daje powtarzalność wyników (przy zachowaniu identycznych warunków analizy). Umożliwia analizę kilku cech jednocześnie i nie pozwala na ingerencję w strukturę badanych materiałów. Podstawą do analizy jest zdjęcie cyfrowe analizowanego przedmiotu np. mieszaniny dwuskładnikowej materiałów ziarnistych, następnie zamiana w skali RGB (Red, Green, Blue) 256 ich rzeczywistych kolorów na czarny i biały oraz wyznaczenie między nimi granicy. Końcowym działaniem jest binaryzacja, czyli przyporządkowanie kolorowi białemu wartości 0, a czarnemu 1.

Zaletami komputerowej analizy obrazów są [40]:

- nieinwazyjność,
- obiektywizm,
- szybkość przetwarzania,
- dostępność narzędzi,
- niski koszt pomiarów,
- bardzo duża ilość informacji.

3.9.1. Podział obrazu

Podstawowym kryterium podziału obrazów jest podział według formatów [74], czyli na:

- binarne (1 bpp bits per pixel). Format podstawowy i zarazem najprostszy,
- monochromatyczne (8 bpp), gdzie mamy do czynienia z powiązaniem wartości ze względną jasnością obrazu; odpowiada temu skala 256 stopni szarości,
- kolorowe (24 albo 32 bpp). 8 kolejnych bitów przyporządkowanych jest jednej z trzech podstawowych barw RGB (kolory: red, green, blue). Format ten umożliwia odwzorowanie największej ilości kolorów, wymaga jednak znacznej pamięci komputerów.

Stanowisko do przetwarzania obrazów [74] składa się z czterech podstawowych elementów:

- urządzenia rejestrującego które wprowadza obraz do systemu (kamera, cyfrowy aparat fotograficzny, skaner),
- urządzenia przetwarzającego obraz (karta graficzna),
- oprogramowania do analizy obrazu wraz z komputerem,
- urządzenia archiwizującego (dysk twardy, karty pamięci).

Etapy analizy:

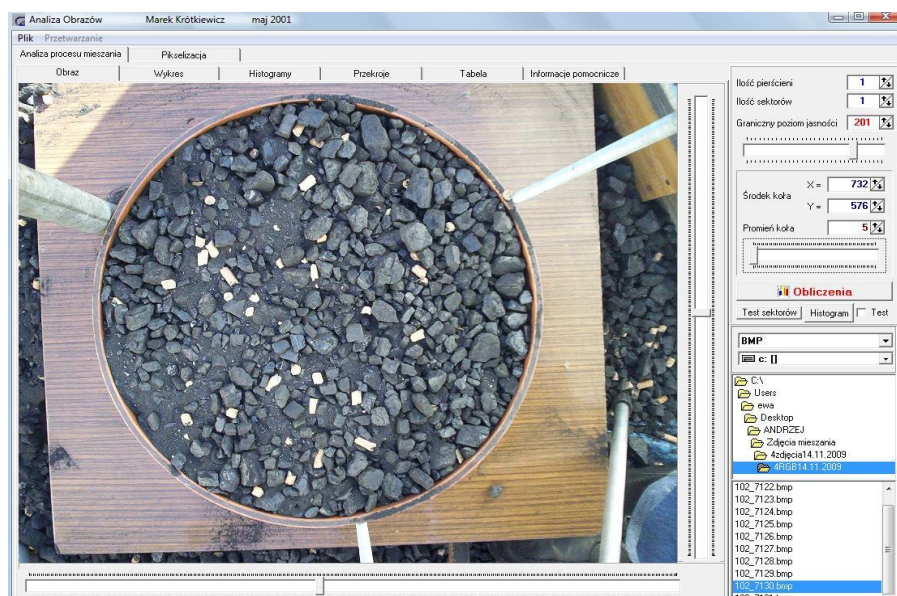
- analiza wstępna - polega na przetworzeniu obrazu i wyeliminowaniu z niego informacji, które są zbędne,
- pomiar zasadniczy - pozwala otrzymać wielkości mierzone z analizowanego obrazu,
- interpretacja wyników .

3.9.2. Analiza obrazu

Każdy obraz, z którym mamy do czynienia, niesie ze sobą wiele informacji nieprzydatnych pod kątem prowadzonej analizy. Analiza obrazów wymaga wyselekcjonowania niezbędnych bitów obrazu, co pozwala także na wielokrotne przyspieszenie obróbki danego obrazu [20].

3.9.3. Akwizycja obrazu

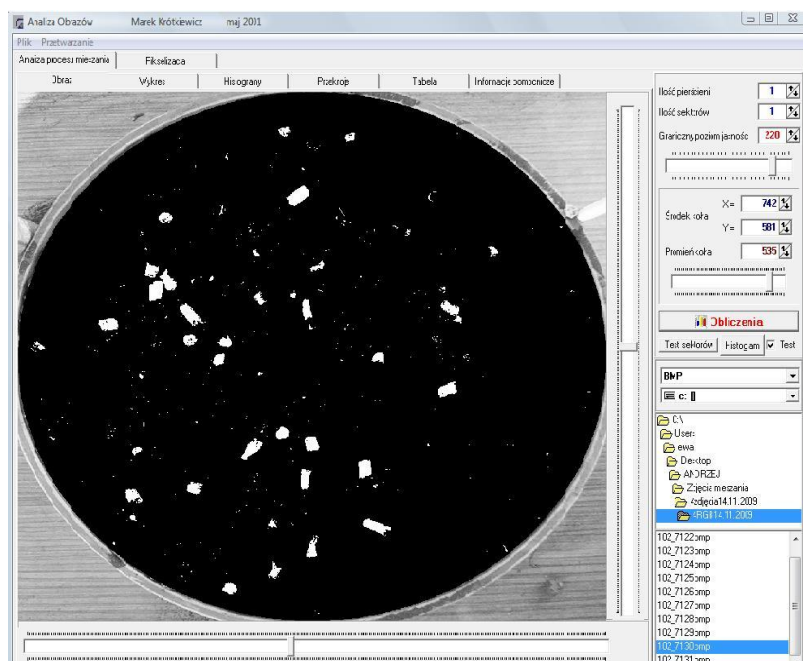
Akwizycja obrazu [47] to przetworzenie obrazu pozyskanego z otoczenia lub z nośnika „papierowego” – zdjęcia, mapy, planu – na nośnik cyfrowy, którym może być film cyfrowy wysokiej rozdzielczości lub zdjęcie cyfrowe. Im więcej informacji niesie pozyskany obraz, tym jego przetworzenie będzie bardziej przydatne do dalszej analizy. Dla pozyskania obrazu, który jest podstawą do wykonania prawidłowej analizy, konieczne jest zachowanie powtarzalnych warunków wykonywania zdjęć. Najlepsze w tym przypadku są specjalne stanowiska, odpowiednio doświetlone i zapewniające izolację od wpływu warunków zewnętrznych. Takie wymagania da się spełnić w przypadku małych obiektów. W innych przypadkach np. przy wykonywaniu zdjęć na zewnątrz budynków można zastosować ekrany rozpraszające światło słoneczne.



Rys. 13. Zdjęcie cyfrowe mieszaniny w formacie bmp (zdjęcie własne)

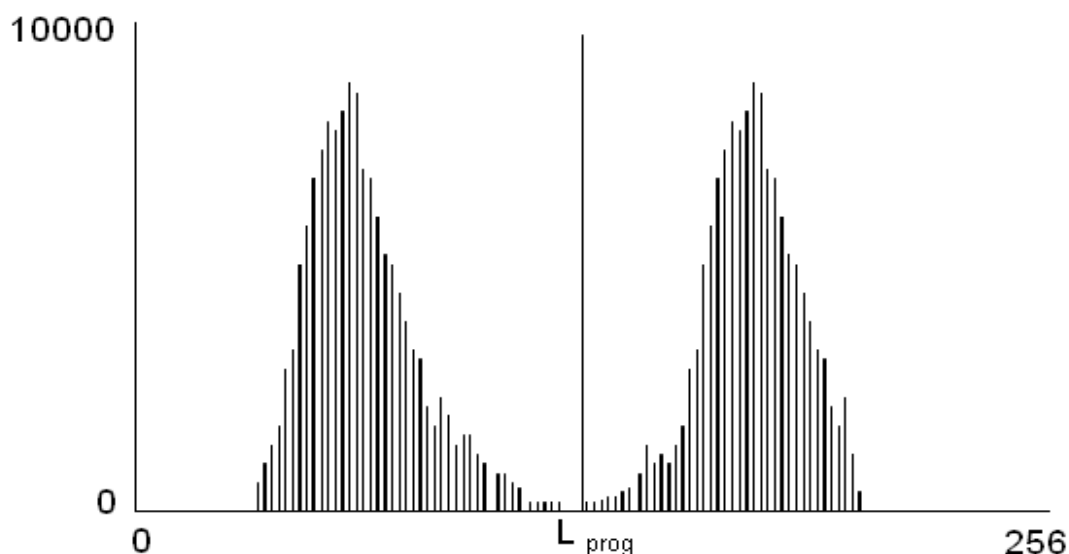
3.9.4. Binarystacja

Aby zmniejszyć ilość informacji zawartych w danym obrazie cyfrowym, które nie są konieczne, należy przeprowadzić binaryzację tzn. należy obraz z szeroką skalą szarości zamienić na obraz, którego piksele odwzorowują tylko wartości 1 i 0 (np. traser 1).



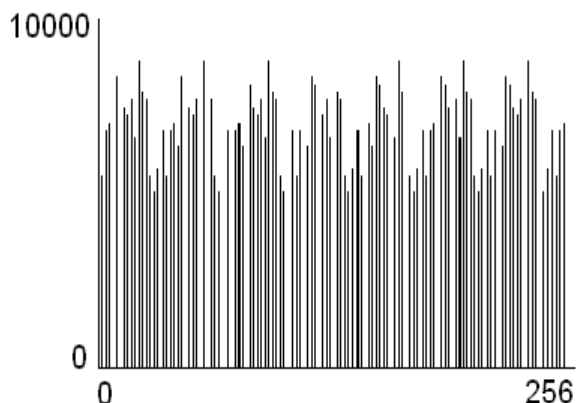
Rys. 14. Zdjęcie mieszaniny po binaryzacji (zdjęcie własne)

Istotny jest w tym przypadku właściwy próg binaryzacji. Do jego znalezienia pomocne są histogramy. W przypadku histogramu, którego kształtem są dwa wzniesienia i rozdzielająca je dolina, progiem binaryzacji jest najniższy punkt tej doliny [74]. Taki kształt histogramu otrzymujemy w przypadku, gdy na zdjęciu, które poddajemy analizie dają się wyróżnić dwa rodzaje punktów: jasne i ciemne (np. czarny węgiel i jasna biomasa), co ściśle związane jest z ich poziomem szarości.

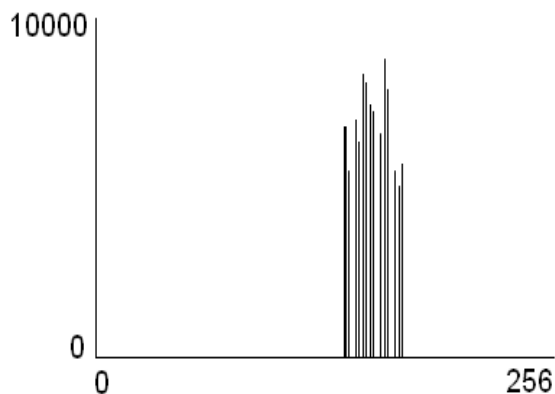


Rys. 15. Próg binaryzacji L_{prog} – „dolina” widoczna na histogramie [74]

W przypadku analizy materiałów ziarnistych, których barwy są zbliżone np. zboża, składniki można celowo zabarwić na kontrastowe kolory.



Rys. 16. Obraz o wysokim kontraście [74]



Rys. 17. Obraz o niskim kontraście [74]

3.9.5. Segmentacja

Każdy obraz możemy poddać segmentacji [74], czyli podzielić go na części przyporządkowujące poszczególne obiekty umieszczone na obrazie. W praktyce polega to na przyporządkowaniu odpowiednich znaczników do pikseli. Różne znaczniki związane ściśle z każdym obiektem pozwalają na ich wyróżnienie pod kątem wymaganych wspólnych cech od tła obrazu, które nie jest poddawane analizie.

Inną metodą segmentacji jest segmentacja przez podział obrazu. W tej metodzie ustalana jest warstwa progowa, a elementy dzieli się na dwie kategorie, w zależności od tego czy przekraczają warstwę progową, czy też nie. Kryterium podziału ustalane jest na podstawie histogramu. Jeśli mamy do czynienia z histogramem, na którym nie ma wyraźnych kształtów pojawia się problem wyboru progu, co może być przyczyną przyporządkowania obiektów do innej warstwy. Prowadzi to do zafałszowania otrzymanych wyników analizy.

3.9.6. Pole powierzchni

Pole powierzchni [74] jest jednym z podstawowych parametrów obrazu do wyznaczenia. Powstaje poprzez zsumowanie punktów obrazu, które podlegają analizie. Tak jak przy innych parametrach binaryzacja ma tu zasadniczy wpływ na poprawność otrzymanego wyniku.

Program komputerowej analizy obrazu użyty dla potrzeb tych badań wykorzystuje do obliczeń koncentracji składnika kluczowego, jakim jest biomasa, płaskie pole powierzchni w poszczególnych przekrojach mieszaniny tj. segmentu kasety odbierającej. Dla uzyskania powtarzalności warunków, w jakich wykonywane są zdjęcia cyfrowe, konieczne jest

zapewnienie w miarę równomiernego oświetlenia, z wyłączeniem bezpośredniego padania promieni słonecznych na warstwę węgla z biomasą. Konieczne jest także zdmuchiwanie pyłu węglowego z powierzchni poszczególnych ziaren zrębek lub pelletu, aby właściwie zostały zakwalifikować badane ziarna: do trasera lub fazy rozpraszącej.

4. Część doświadczalna

4.1. Cel pracy

Celem pracy jest zaproponowanie modelu mieszania przy użyciu mieszalnika do prostego i skutecznego przygotowania mieszanek paliwa miału węgla kamiennego oraz różnego rodzaju biomasy.

4.2. Mieszanie w warunkach laboratoryjnych. Opis stanowiska badawczego

Do badań wykorzystano istniejący model daszkowego mieszalnika statycznego o przekroju kwadratowym $0,01 \text{ m}^2$ (rys. 11 i 18) według patentu PRL nr 130 961 [94].

Konstrukcja mieszalnika została wykonana ze szkła organicznego, natomiast daszkowe elementy mieszające były drewniane. Mechanizm otwierania kasety zasilającej oraz segmenty kasety odbierającej wykonano z cienkiej blachy stalowej. Mieszalnik miał konstrukcję modułową, co dawało możliwość prowadzenia badań przy użyciu różnej liczby elementów mieszających. Każdy z modułów składał się z dwóch elementów mieszających.



Rys. 18. Model mieszalnika statycznego (zdjęcie własne)

Dla powtarzalności badań i uniknięcia błędów związanych z opóźnieniem się otwarcia kasety zasilającej spowodowanej niewielką masą materiału ziarnistego zastosowano sprężynowy układ otwierający. Przed zasypem kasety mechanizm był blokowany w położeniu zamkniętym za pomocą sworzni, który przed wysypem usuwano. Dzięki

zastosowanemu mechanizmowi sprężynowemu uzyskiwano bardzo szybkie i pewne otwarcie kasety zasilającej.

Kaseta odbierająca składała się z czterech segmentów, których zawartość po przesypie poddawano analizie wagowej.

4.3. Mieszanie w warunkach przemysłowych. Opis stanowiska badawczego

Dla celów aplikacyjnych (praktycznych) stanowisko zostało wykonane we własnym zakresie. Zbudowany został przemysłowy model statycznego mieszalnika daszkowego [94] o całkowitej wysokości 3,5 m.

Kaseta zasilająca

Mieszalnik statyczny

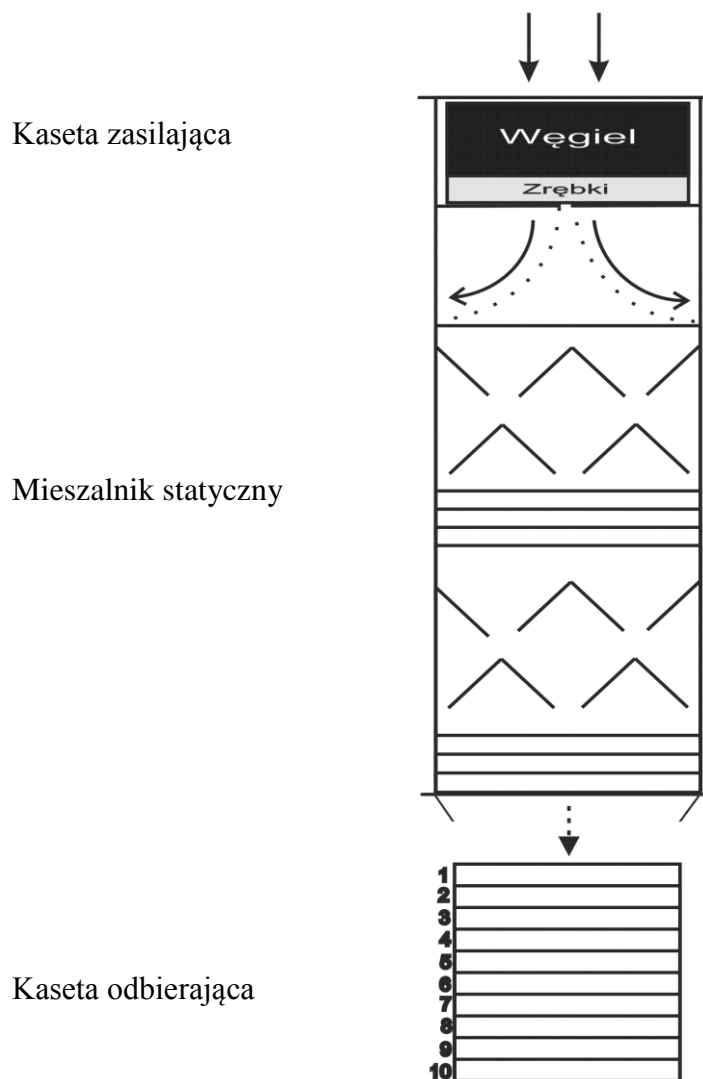
Kaseta odbierająca



Rys. 19. Widok mieszalnika przemysłowego

Stanowisko składało się z trzech zasadniczych elementów:

- kasety zasilającej w postaci sześcianu o wymiarach 0,5 x 0,5 x 0,5 m,
- mieszalnika statycznego o wymiarach 0,5 x 0,5 x 2 m z lejem wysypowym,
- kasety odbierającej o wymiarach 0,36 x 0,35 x 0,52 m z wózkiem transportowym.



Rys. 20. Schemat stanowiska badawczego

Wymiary mieszalnika statycznego wynikały z celu badań tj. możliwości zastąpienia dotychczasowego mieszalnika mechanicznego w rozpatrywanej stacji mieszającej MWD-2. Wysokość pomiędzy górną krawędzią taśmociągu zasilającego istniejący mieszalnik mechaniczny, a jego podstawą wynosiła ok. 2,8 metra. Ograniczało to konstrukcyjnie wysokość mieszalnika statycznego do 2 metrów. Pozostałą wolną przestrzeń przeznaczono na konstrukcję wsporczą mieszalnika, którą będzie można ustawić nad lejem zasypowym taśmociągu nawęglania kotłowni. Lej taki jest przeważnie usytuowany na poziomie zewnętrznego składu opału lub nieco powyżej, co zapobiega spływaniu wody z jego otoczenia. W takim przypadku produkowana mieszanina węgla i biomasy kierowana jest bezpośrednio do leja przykotłowego.

Dolna krawędź mieszalnika na wysokości 80 cm nad poziomem gruntu pozwala także na montaż przenośnika taśmowego pod mieszalnikiem, dzięki czemu możliwa będzie

produkcja mieszanki paliwowej i kierowanie jej bezpośrednio na plac składowy. Pozwala to na jej magazynowanie w celu późniejszego wykorzystania.

Kaseta zasilająca wykonana została z płyty OSB (wiórowej) o grubości 12,5 mm ze wzmocnieniem narożnym w postaci kątowników metalowych. W połowie wysokości kasety wewnątrz zamontowano otwieraną przegrodę dwuskrzydłową z blachy, która może być blokowana w położeniu zamkniętym. Całość zabezpieczono przed wpływem wilgoci pochodzącej z opadów atmosferycznych i mieszanych materiałów ziarnistych farbą ftalową.

Mieszalnik statyczny jest konstrukcją metalową spawano-skręcaną. Składa się ze stojaka wraz z ramą szkieletową, do której wkładane są pojedyncze elementy mieszające (rys. 21). Każdy element mieszający stanowi samodzielną całość o wymiarach 0,5 x 0,5 x 0,2 m, na który składa się zewnętrzna obudowa wypełniona dwoma rzędami przegród daszkowych (kątownika) o krawędzi 80 mm. W pierwszym rzędzie znajdują się dwa pełne daszki, a w drugim jeden pełny i dwa półkowe.

Elementy mieszające były umieszczane w ramie stojaka naprzemiennie z obrotem każdego o kąt 90°. Wskutek tego powstała „krata”, na której struga mieszanego materiału ulegała rozdzieleniu.



Rys. 21. Pojedynczy element mieszający

Przy umieszczeniu wszystkich 10 elementów w ramie stojaka nie było konieczności obudowania ich zewnętrzną blachą, ponieważ poszczególne elementy mieszające były na tyle wzajemnie dopasowane, że mieszane materiały nie wysypywały się na zewnątrz. W przypadku prowadzenia badań z mniejszą liczbą elementów mieszających (np. 3 lub 5), które można układać w dowolnej konfiguracji, zachodziła konieczność montażu blach

osłonowych, zapobiegających wysypywaniu się mieszanych materiałów poza mieszalnik. W dolnej części konstrukcji mieszalnika został umieszczony mały lej wysypowy o wymiarze otworu 0,35 x 0,35 m. Jego montaż podyktowany był mniejszymi od mieszalnika wymiarami poprzecznymi kasety odbierającej.

Zastosowana konstrukcja mieszalnika jest bardzo prosta w wykonaniu ponieważ głównymi czynnościami technologicznymi było cięcie arkusza blachy, zaginanie pod kątem prostym i spawanie. Nie zachodziła konieczność wyoblania elementów. Od strony zużycia materiałowej wykonanie 10 elementów mieszających wymagało jedynie dwóch standardowych arkuszy blachy stalowej.

Kaseta odbierająca (rys. 22) składała się z 10 oddzielnych ramek o wysokości 40 mm (podwójny wymiar największych ziaren miazgu węglowego), ramki „startowej” oraz „końcowej” o wysokości 60 mm. Ramki wykonane były z płyty OSB i montowane na wózku transportowym za pomocą trzech śrub ściągających. Celem zastosowania tych dwóch ramek było wyeliminowanie początkowych i końcowych porcji mieszaniny, które nie są właściwie wymieszane z uwagi na zapoczątkowanie/zakończenie mieszania.

Modułowa konstrukcja stanowiska badawczego została zaprojektowana w ten sposób, aby była możliwość montażu dowolnego rodzaju i liczby elementów mieszających o wymiarach poprzecznych 0,5 x 0,5 m, co daje możliwość prowadzenia dalszych badań przy zastosowaniu innych elementów mieszających np. rurowych czy płytkowych.



Rys. 22. Kaseta odbierająca

Do celów transportu wszystkie trzy podstawowe elementy składowe (rama, elementy mieszające i blachy osłonowe) można zdemontować. Dodatkowo, dla celów dłuższego przechowywania, można odkręcić nogi stojaka, co zmniejsza wysokość największego elementu do 2 metrów.

4.4. Charakterystyka zastosowanych materiałów

W przeprowadzonych badaniach jako materiały ziarniste zastosowano węgiel kamienny i biomasę drzewną.

Zrębki drzewne jest to drewno pocięte przeważnie za pomocą rębaka na kawałki o długości do 50 mm i wymiarze poprzecznym do ok. 30 mm. Jako surowiec do produkcji zrębek służą odpady z produkcji leśnej, przemysłu drzewnego lub rośliny z tzw. upraw energetycznych.

Pellety są to sprasowane pod wysokim ciśnieniem odpady drzewne albo pochodzące z innego rodzaju biomasy (np. roślin uprawianych do celów energetycznych). Po przetworzeniu są one w postaci walców o średnicy od 5 do 10 mm średnicy i długości od kilku milimetrów do kilku centymetrów. Do jej produkcji mogą służyć odpady dotychczas nieprzetworzone np. pył drzewny, drobne trociny, słoma itp.



Rys. 23. Pellety



Rys. 24. Zrębki

W badaniach z wykorzystaniem mieszalnika laboratoryjnego używano:

- przesianego miazgu węglowego o granulacji od 2,5 do 4,0 mm,
- cząstek drewna o średnicy ok. 3 mm i długości 3 ÷ 5 mm.

W badaniach z wykorzystaniem mieszalnika przemysłowego używano:

- zrębek drewna iglastego o rozmiarze do 50 mm [99],
- pellety o średnicy 6 mm i długości od 5 do 30 mm,
- węgla kamiennego o wymiarze ziarna od 0 do 25 mm.

Określone doświadczalnie parametry użytych do badań materiałów zestawiono w tab. 8.

Tab. 8. Parametry użytych materiałów ziarnistych do mieszania w mieszalniku przemysłowym

Parametr/ materiał	Gęstość nasypowa ρ [kg/m ³]	Średnica zastępcza d_z [mm]
Węgiel	700	8,25
Zrębki	180	13,44
Pellet	580	10,35

Stosunek średnicy (węgiel/zrębki) $d_{z1}/d_{z2} = 0,67$

Stosunek gęstości (węgiel/zrębki) $\rho_1/\rho_2 = 3,9$

Stosunek średnicy (węgiel/pellet) $d_1/d_3 = 0,87$

Stosunek gęstości (węgiel/pellet) $\rho_1/\rho_3 = 1,2$.

Mając na uwadze technologię procesu mieszania w stacji MWD 2, czyli:

- napełnienie lejów zasypowych,
- podawanie składników mieszanki na wspólny taśmociąg,
- mieszanie i rozdrobnienie w mikserze,
- odbiór gotowej mieszanki z miksera i jej transport na plac składowy,

mieszanie w mieszalniku statycznym może odbywać się tylko z jednokrotnym przesypem tj. po jednym kroku mieszania. Układ technologiczny stacji MWD 2 wyklucza cyrkulację mieszanki. W warunkach rzeczywistych proces mieszania dodatkowo będzie wspomagany poprzez transport materiału ziarnistego na taśmociągu [16, 57].

4.5. Badania z wykorzystaniem mieszalnika laboratoryjnego

Przed przystąpieniem do badań przemysłowych, a w szczególności wyboru daszkowego mieszalnika statycznego przeprowadzono wstępne badania laboratoryjne. Były one prowadzone na modelu daszkowego mieszalnika statycznego o wymiarach poprzecznych 0,1 x 0,1 m.

W górnej kasecie zasilającej mieszalnika umieszczano węgiel i zrębki w dwóch rozdzielonych segmentach. Składniki, przesypując się przez elementy mieszające, spadały do dolnej kasety odbierającej podzielonej na cztery segmenty, których zawartość ręcznie rozdzielano, a następnie poddawano analizie wagowej. Z uwagi na małe wymiary modelu mieszalnika proces mieszania prowadzono przy użyciu 80 g węgla i 35 g zrębków, czyli dla przeciętnej proporcji objętościowej 1:1. Niska wilgotność (poniżej 5 %) użytych składników w warunkach laboratoryjnych znacznie ułatwiała proces mieszania.

4.6. Badania z wykorzystaniem mieszalnika przemysłowego

Badania przy użyciu mieszalnika o wymiarach przemysłowych prowadzone były w ten sposób, że miał węglowy i biomasa były oddzielnie ważone i wsypywane do kasety zasilającej mieszalnik w proporcji wagowej 1 : 10 (biomasa : węgiel). Składniki były ważone na wadze elektronicznej typu WLC/R/12/30C1/R o parametrach [101]:

- obciążenie maksymalne 30 kg,
- dokładność odczytu 5 g,
- zakres tary 30 kg.



Rys. 25. Waga elektroniczna WLC/R/12/30C1/R

Badania prowadzono dla dwóch rodzajów biomasy. Jako traser używano zrębek drzew iglastych na przemian z cząstkami pelletów oraz miału węgla kamiennego jako fazy rozpraszającej. Dla zapewnienia porównywalności otrzymywanych wyników proces mieszania prowadzono przy zachowaniu tej samej ilości składników o porównywalnych parametrach wielkości ziaren oraz wilgotności. Każda seria badawcza była powtarzana czterokrotnie.

5. Opis wyników

5.1. Wyniki badań z wykorzystaniem mieszalnika laboratoryjnego

Przykładowe wyniki badania koncentracji biomasy przedstawiono w tab. 9. Badania prowadzono z użyciem 4 i 6 elementów mieszających.

Tab. 9. Koncentracja biomasy

Liczba użytych elementów mieszających (udział wagowy 80/35 g)	Koncentracja biomasy w segmencie nr 1.	Koncentracja biomasy w segmencie nr 2.	Koncentracja biomasy w segmencie nr 3.	Koncentracja biomasy w segmencie nr 4.
4	0,286	0,257	0,200	0,257
4	0,286	0,229	0,229	0,257
6	0,257	0,229	0,229	0,286
6	0,229	0,257	0,257	0,257

Przeprowadzone wyniki badań pozwoliły na wstępną pozytywną ocenę możliwości użycia mieszalnika statycznego do mieszania węgla z biomasą. Nieco wyższą koncentrację uzyskano dla większej liczby zastosowanych elementów mieszających, co jest zgodne z innymi przeprowadzonymi dotychczas badaniami [81].

Na tej podstawie zdecydowano o budowie mieszalnika przemysłowego o większym przekroju poprzecznym. Mieszane materiały musiały mieć większą masę i rzeczywiste kształty i wymiary. Należało do badań użyć także mieszaniny zawierającej do 10% wagowo biomasy, czyli takiej, jaka jest stosowana powszechnie w energetyce do opalania kotłów nieprzystosowanych do spalania biomasy.

Całość dalszych badań była prowadzona już tylko przy użyciu mieszalnika przemysłowego.

5.2. Wyniki badań z wykorzystaniem mieszalnika przemysłowego

5.2.1. Wpływ ułożenia składników przed mieszaniem

W pierwszym etapie badano wpływ umieszczenia składników w kasecie zasilającej na stopień zmieszania. Badania prowadzono z użyciem pełnej liczby elementów mieszających (tj. 10 szt.) w mieszalniku i proporcji wagowej 1/10 biomasy i węgla.

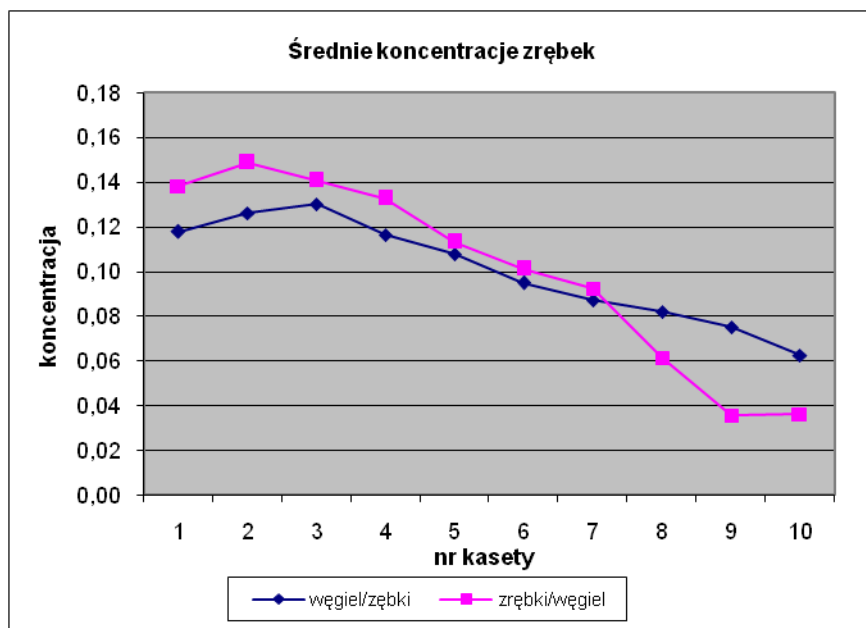
W kasecie zasilającej jako pierwszą warstwę w kierunku wylotu wsypywano biomasę, a następnie miał węglowy. W drugim wariantcie badań warstwy składników były ułożone odwrotnie. Z praktycznego punktu widzenia miało to na celu także sprawdzenie w jakiej kolejności składniki powinny być podawane z zasobników stacji mieszającej MWD-2 na taśmociąg zasilający mieszalnik.

Po jednokrotnym przesypie badany materiał wsypywany był do kasy odbierającej, następnie były wykonywane zdjęcia mieszaniny (przy użyciu cyfrowego aparatu fotograficznego o rozdzielczości 5 Mega pikseli) w każdym z pojedynczych segmentów kasy odbierającej. Podczas wykonywania zdjęć aparat był umieszczony na statywie. Uzyskane zdjęcia poddawano komputerowej analizie obrazu przy użyciu programu PATAN, z którego uzyskiwano informacje o udziale ilościowym (%) traseru, czyli biomasy w każdym z segmentów kasy [71]. Etap ten miał także na celu sprawdzenie poprawności konstrukcji mieszalnika oraz kasy zasilającej i odbierającej.

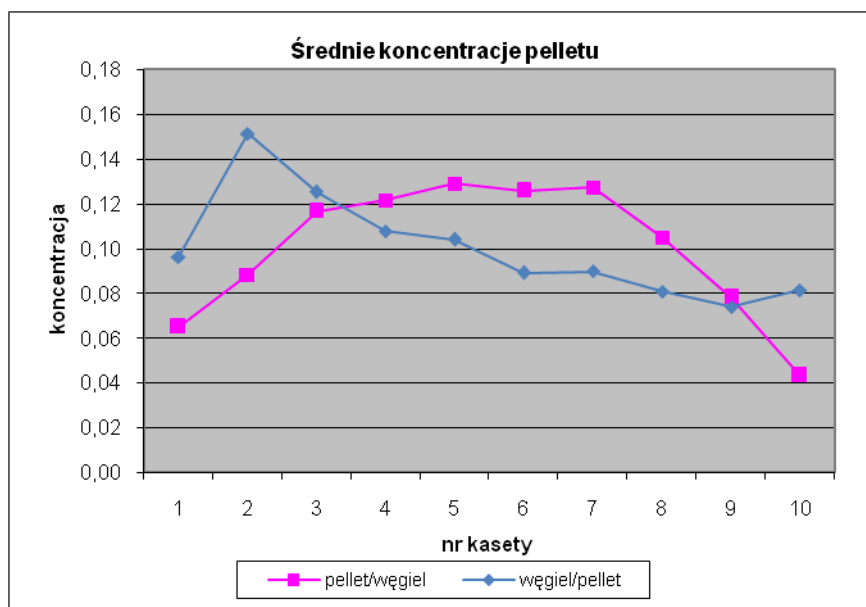
Interpretacja graficzna uzyskanych wyników wskazuje na różnice w koncentracji traseru (zrębki, pellet) w poszczególnych segmentach kasy odbierającej. W przypadku mieszania układu pellet z węglem można zauważyć inny przebieg krzywej w zależności od pozycji (górze/dół) traseru przed rozpoczęciem przesypu w mieszalniku przemysłowym (rys. 25). Umieszczenie pelletu w dolnej części kasy zasilającej wydaje się być korzystniejszym rozwiązaniem, ponieważ powoduje większą stabilizację koncentracji traseru w poszczególnych przekrojach kasy odbierającej.

W przypadku mieszania układu zrębki - węgiel pozycja traseru przed rozpoczęciem przesypu (górze/dół) nie wpływa na efekt końcowy mieszaniny (rys. 24). Warto zauważyć dużą koncentrację zrębek w górnej części kasy odbierającej oraz niską w dolnej. Zjawisko to wynika między innymi z różnicy gęstości mieszanych składników oraz różnych wielkości i kształtów zrębków. Pokrywa się to z obserwacjami w badaniach przeprowadzonych przez Zulfiquara [87]. Zwraca się tam uwagę na fakt, że mieszanka węgla ze zrębkami ma większą skłonność do blokowania przepływu niż mieszanka węgla z pyłem drzewnym. Jest to związane z innymi kątami i współczynnikami tarcia, a także zależy od materiału, z którego wykonane są rurociągi czy zbiornik/silosy.

Z praktycznego punktu widzenia taki układ składników na taśmociągu zasilającym mieszalnik (biomasa przysypana węglem), zapobiega zdmuchiowaniu przy silnym wietrze stosunkowo lekkiej biomasy z taśmociągu.



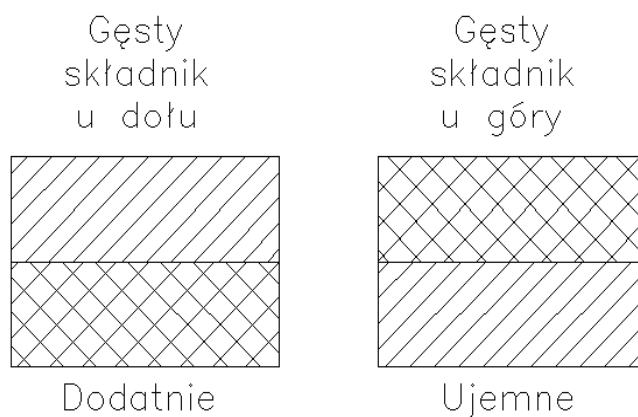
Rys. 26. Koncentracja pelletu w poszczególnych segmentach kasety odbierającej dla układu w kasecie zasilającej: węgiel/zrębki i zrębki/węgiel



Rys. 27. Koncentracja zrębek w poszczególnych segmentach kasety odbierającej dla układu w kasecie zasilającej pellet/węgiel i węgiel/pellet

Nie zaobserwowano w tych przypadkach znacznego wpływu potencjału segregacji, czyli wstępnego położenia składników w mieszalniku na efekt mieszania.

Z badań Rose'a [59] wynika, że gdy mamy do czynienia z ujemnym potencjałem segregacji, czyli gęstszy składnik jest u góry (rys. 26), to zachodzi dodatkowy efekt mieszania.



Rys. 28 Znak potencjału segregacji Φ [9]

Z tego etapu badań mieszania wyciągnięto wstępne wnioski:

- mieszalnik statyczny może być używany do przygotowywania mieszanek mialu węglowego z biomasą,
- układ początkowy składników przed zmieszaniem ma nieznaczny wpływ na obserwowaną koncentrację biomasy po zmieszaniu,
- koncentracja biomasy po zmieszaniu zależy od jej wymiarów poprzecznych oraz gęstości. W przypadku mieszania pelletu jego koncentracja jest bardziej równomierna,
- koncentracja biomasy w początkowej i końcowej fazie przesypu wskazuje na konieczność powtórnego mieszania tych porcji mieszanki,
- uzyskane wyniki skłaniały do prowadzenia dalszych badań wpływu zmian konstrukcyjnych mieszalnika na wymieszanie składników.

5.2.2. Optymalizacja liczby elementów mieszających

Dalsze etapy badań związane były z optymalizacją liczby zastosowanych elementów mieszających. Miało to na celu znalezienie optymalnej liczby elementów mieszających, zapewniającej właściwe wymieszanie składników, co uprości konstrukcję samego mieszalnika, a tym samym obniży nakłady na jego budowę. Ponieważ na zużycie erozyjne i korozyjne narażona będzie mniejsza liczba elementów mieszających zmniejszeniu ulegną także koszty późniejszej eksploatacji. Wszystkie badania przeprowadzono tylko dla kolejności podawania składników biomasa/węgiel dla poniższych układów mieszalnika:

1. Mieszanie na drodze przesypu bez wypełnień, czyli z mieszalnika zostały usunięte wszystkie elementy mieszające (jako materiał porównawczy),
2. Mieszanie na drodze przesypu bez wypełnień, ale z przewężonym otworem wylotowym – wysyp kominowy (mieszanie funnel-flow).
3. Mieszanie przy użyciu trzech elementów mieszających – w mieszalniku pozostawiono dwa skrajne elementy oraz jeden środkowy.
4. Mieszanie przy użyciu pięciu elementów mieszających – usunięty został co drugi element.

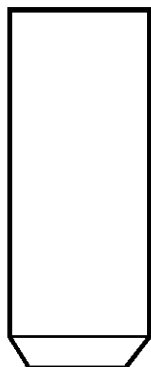
Dla pkt. 3 i 4, pomimo usunięcia niektórych elementów mieszających, zachowano zasadę, że następujące po sobie elementy obrócone są względem siebie o 90° .

We wszystkich przypadkach badań można wyróżnić trzy fazy:

- fazę rozruchową – gdzie koncentracja traseira jest najmniejsza w dolnych elementach kasety odbierającej,
- fazę stabilizacji w środkowych segmentach kasety, gdzie koncentracja wykazuje najmniejsze odchylenie od średniej,
- fazę końcową – przeważnie, w dwóch górnych segmentach kasety, kiedy to koncentracja fazy rozpraszającej jest najwyższa.

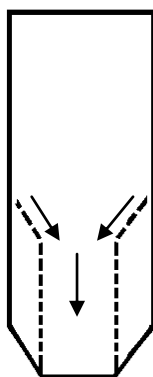
Z punktu widzenia rzeczywistej (przemysłowej) pracy takiego mieszalnika może to oznaczać, że w początkowej i w końcowej fazie pracy mieszalnika statycznego jakość mieszaniny biomasy z węglem będzie niezadowolająca i będzie należało w takich przypadkach skierować ją do powtórnego mieszania. Nie będzie to jednak stanowiło problemu, ponieważ początkową lub końcową porcję mieszaniny można za pomocą ładowarki łyżkowej zeszkładować osobno, a następnie załadować nią kosz zasypowy mieszalnika.

5.2.3. Mieszanie na drodze przesypu grawitacyjnego (bez elementów mieszających)



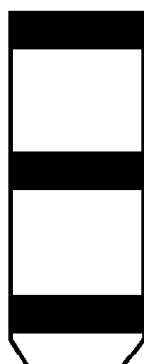
Otrzymane obrazy próbek z kolejnych segmentów kasety odbierającej wskazują na znaczne przemieszczenie się trasera (biomasa) ku bocznym krawędziom kasety. Ponieważ dwa wyraźne jej skupiska są widoczne w następujących po sobie segmentach kasety, można to uznać, że mieszanina nie jest jednorodna. Tym niemniej należy zauważyć, że w tym przypadku kształt skupisk i ich rozmieszczenie nie jest przypadkowe. Jest ono bowiem wynikiem konstrukcji mechanizmu otwarcia kasety zasilającej tzn. dwóch klap, które otwierają się w dół w przeciwnych kierunkach (rys. 29).

5.2.4. Mieszanie na drodze wysypu kominowego (funnel-flow)



W tego typu mieszalnikach można uzyskać dodatkowy efekt mieszania poprzez odpowiednią konstrukcję otworu wysypowego, tak aby otrzymać efekt wysypu kominowego [75], co może poprawić jednorodność mieszaniny. W tym etapie badań uzyskano wymieszanie składników podczas wysypu. Polega to na tym, że ruch wysypujących się ku dołowi ziaren tworzy „komin” w środku zbiornika. Do niego kierują się ziarna z bocznych części zbiornika, a także z różnych warstw, co przyczynia się do efektu mieszania. Konstrukcja mieszalnika ze znacznym przewężeniem wylotu może być wykorzystywana do mieszania bardzo sypkich i suchych materiałów ziarnistych, które nie spowodują zatkania otworu wysypowego, co w efekcie skutkuje zatrzymaniem pracy mieszalnika (rys. 33, 34)

5.2.5. Mieszanie przy użyciu trzech elementów mieszających



Usunięcie aż siedmiu elementów mieszających spowodowało ograniczenie możliwości zatkania się mieszalnika, a także uzyskanie nieco innego rozkładu koncentracji trasera w poszczególnych elementach kasety odbierającej. Taki układ elementów mieszających, które znajdują się w znacznej odległości od siebie powoduje, że mamy do czynienia także z mieszaniem w przesypie – mieszanie częściowo zachodzi przy użyciu elementów mieszających, a częściowo odbywa się w strudze. Wobec przypadku mieszania w przesypie bez elementów mieszających

widać znaczącą poprawę rozkładu koncentracji w poszczególnych segmentach kasety odbierającej. Widoczne poprzednio dwa wyraźne skupiska niewymieszanej biomasy nie są tu zauważalne, a w początkowych i końcowych segmentach biomasa jest już rozproszona na całej powierzchni segmentu (rys. 31).

5.2.6. Mieszanie przy użyciu pięciu elementów mieszających

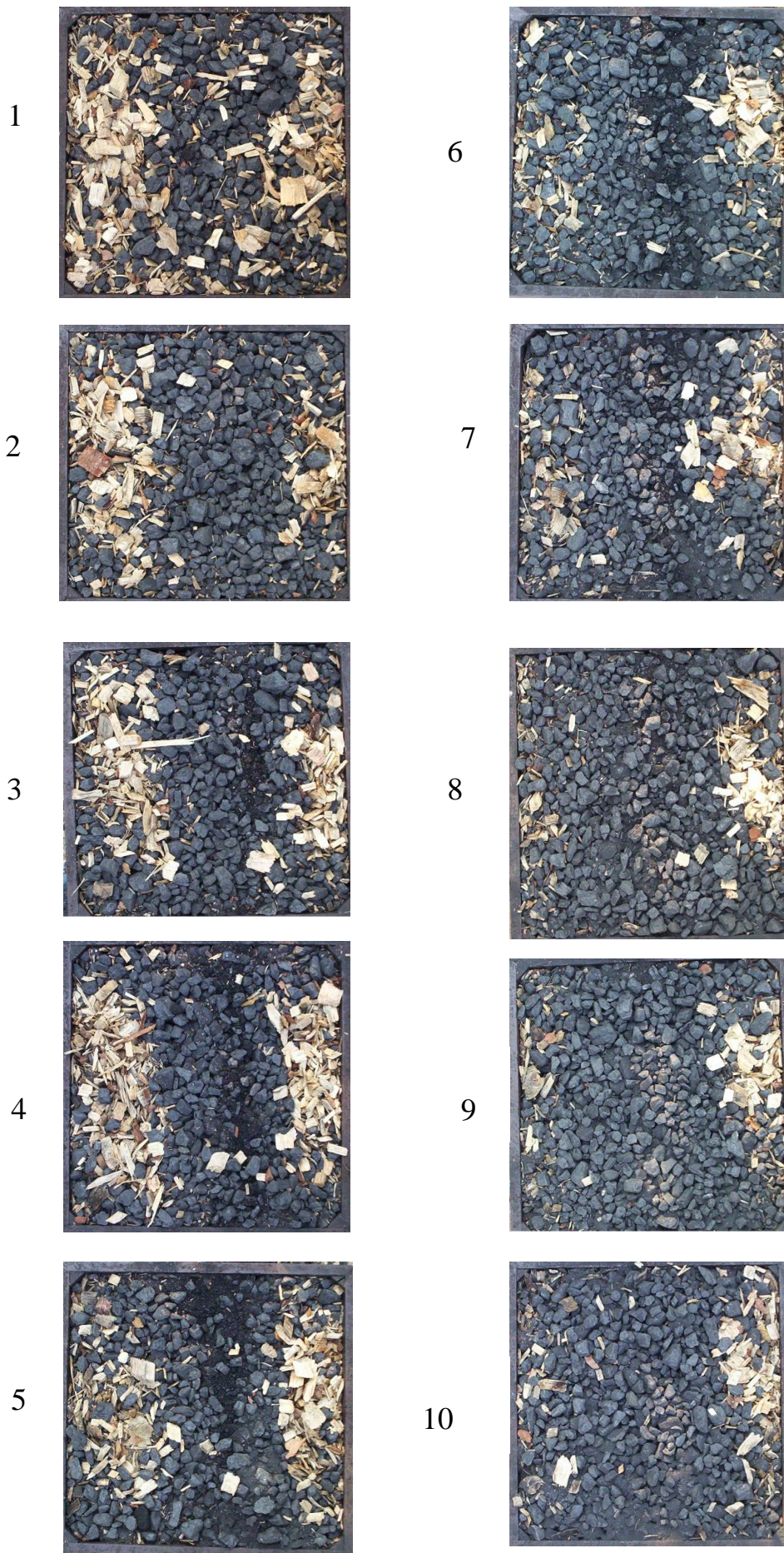


Zastosowanie pięciu elementów mieszających nie spowodowało istotnych zmian w stosunku do podstawowego układu z 10 elementami. W poszczególnych segmentach kasety odbierającej biomasa jest wymieszana z węglem. Większa koncentracja biomasy obserwowana jest w początkowych oraz końcowych segmentach. Ponieważ materiał ziarnisty na swojej drodze napotyka mniejszy opór, jaki stawiają poszczególne elementy mieszające, układ taki sprzyja zwiększeniu prędkości przesypu, a co za tym idzie i wydajności. Mniejsza ilość elementów mieszających powinna ułatwić mieszanie bardziej wilgotnych składników. Sama konstrukcja mieszalnika będzie też lżejsza o ok. $\frac{1}{4}$ (rys. 32).

5.2.7. Mieszanie przy użyciu dziesięciu elementów mieszających



Mieszalnik z dziesięcioma elementami mieszającymi był podstawowym układem, w którym badano proces mieszania węgla z biomasą (rys. 30). Koncentracja trasera po zmieszaniu przedstawiona jest na rys. 26 i rys. 27. Zaobserwowano wpływ wymiarów poprzecznych biomasy na jej koncentrację. Jest ona bardziej równomierna w przypadku mieszania pelletu. Na koncentrację biomasy po zmieszaniu nieznaczny wpływ ma układ początkowy składników przed zmieszaniem (ułożenie w kasiecie zasilającej: węgiel/biomasa lub biomasa/węgiel).



Rys. 29. Przesyp bez elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej)

1



6



2



7



1

3



8



4



9



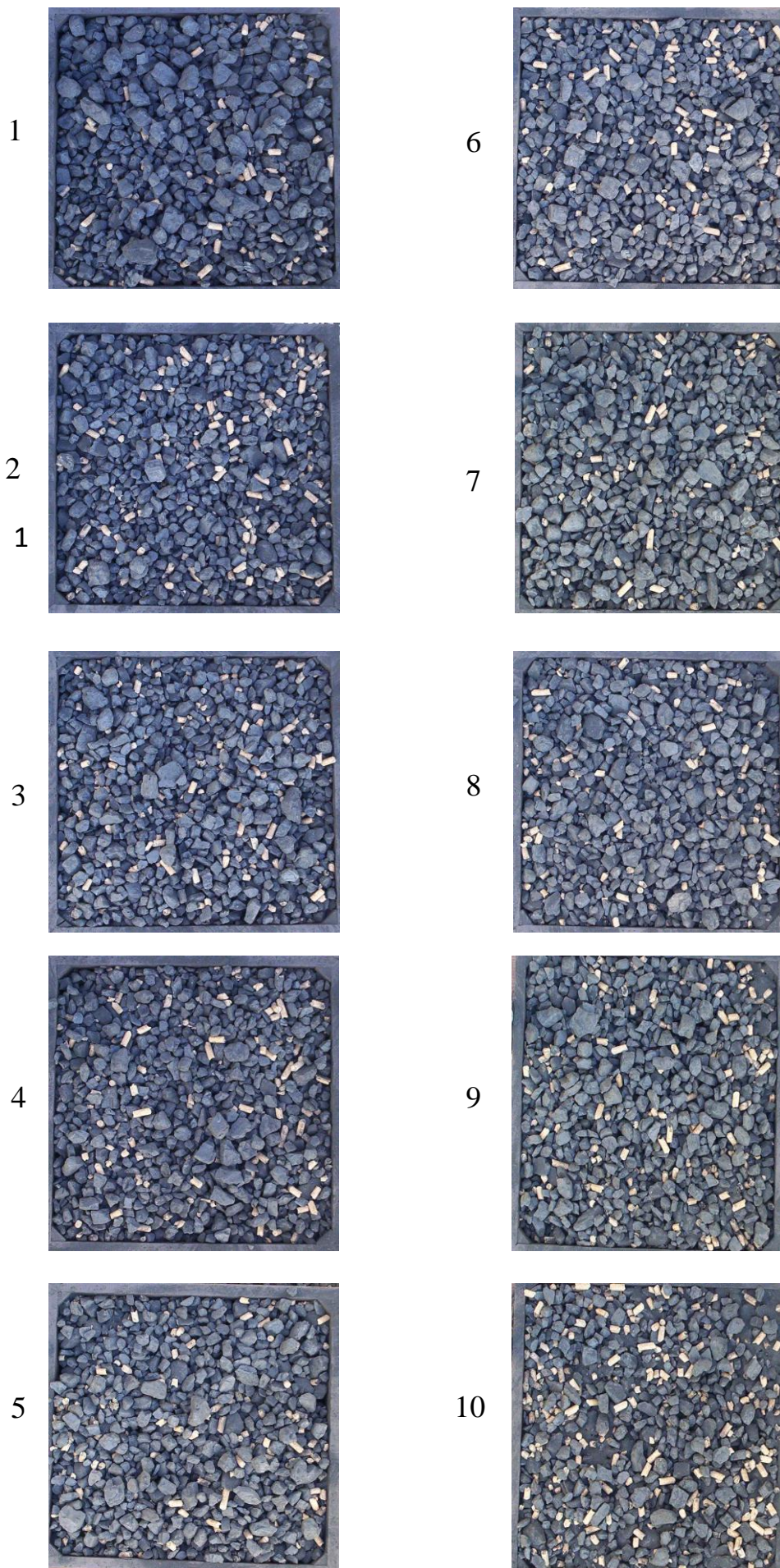
5



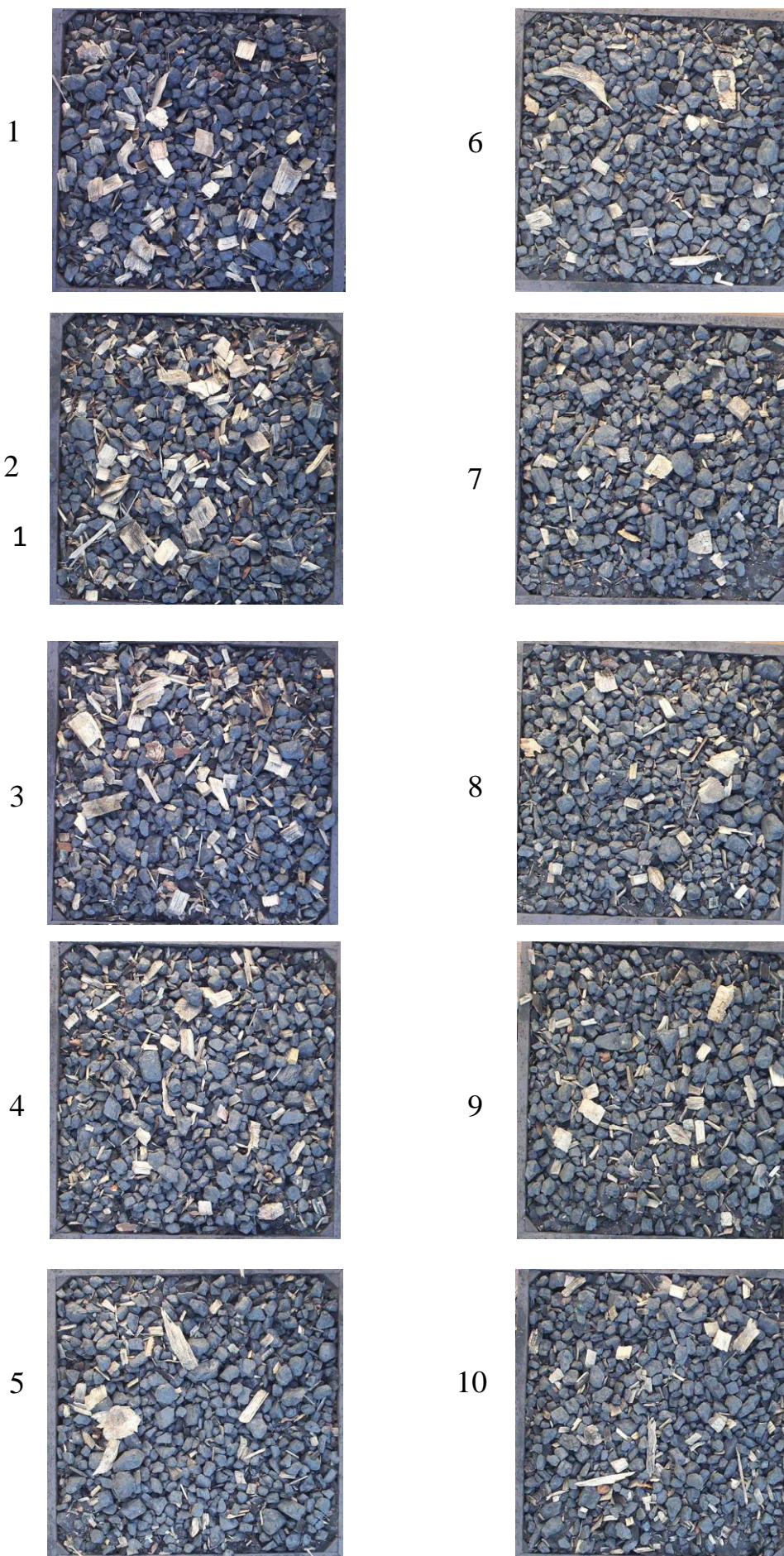
10



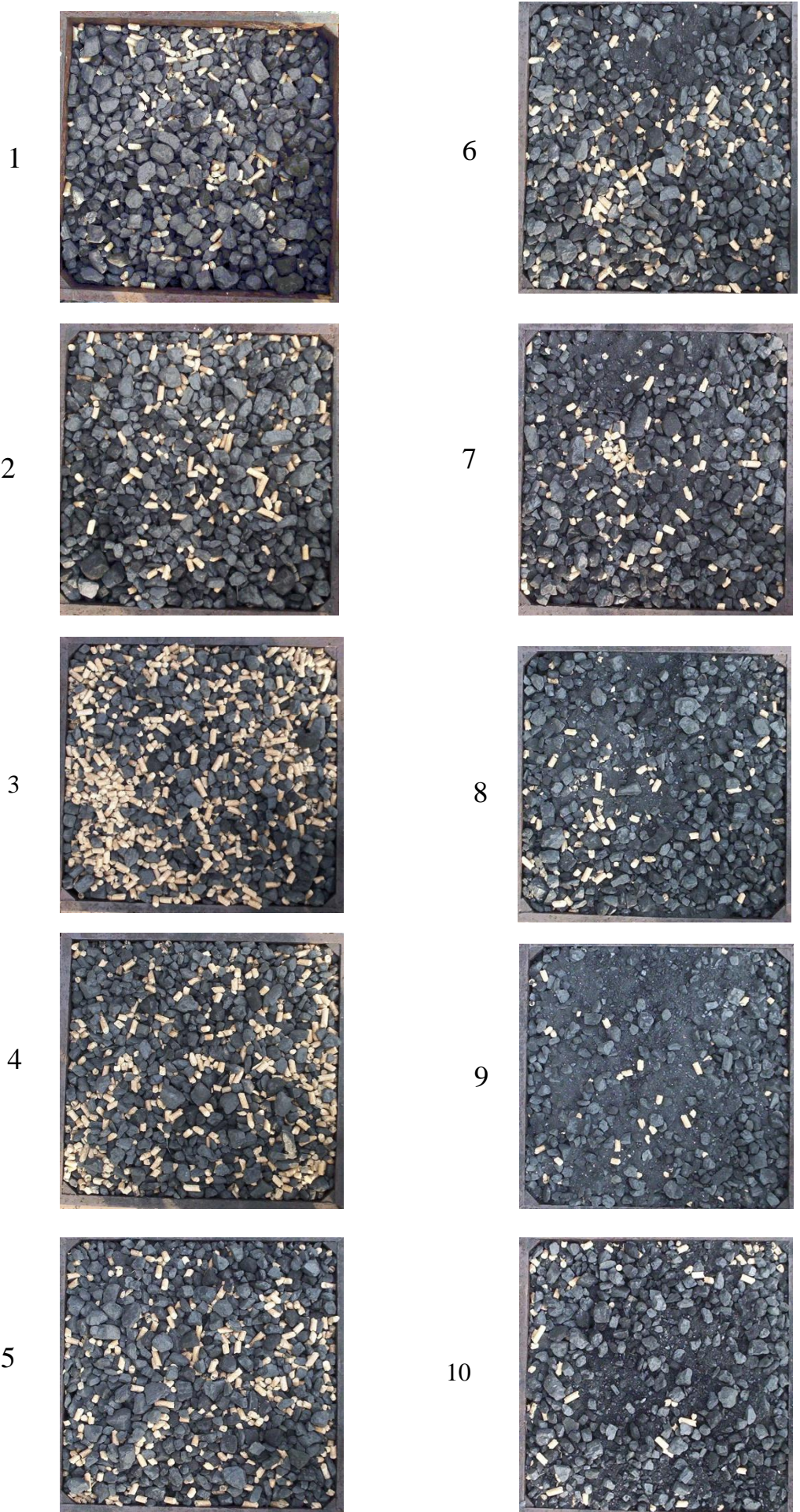
Rys. 30. Przesyp z użyciem 10 elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej)



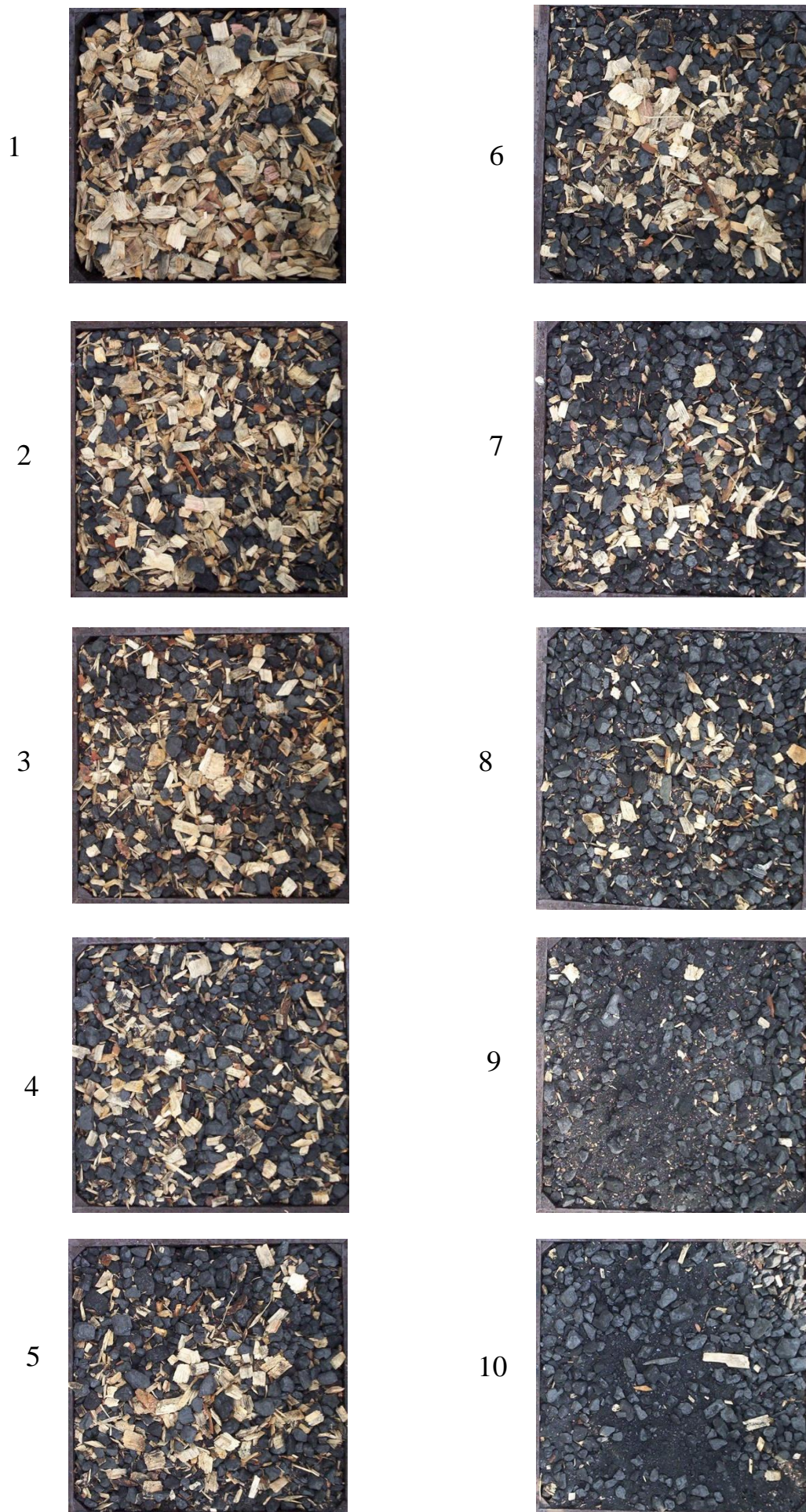
Rys. 31. Przesyp z użyciem 3 elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej)



Rys. 32. Przesyp z użyciem 5 elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej)



Rys. 33. Wysyp kominowy – pellet (numer segmentu kasety odbierającej)



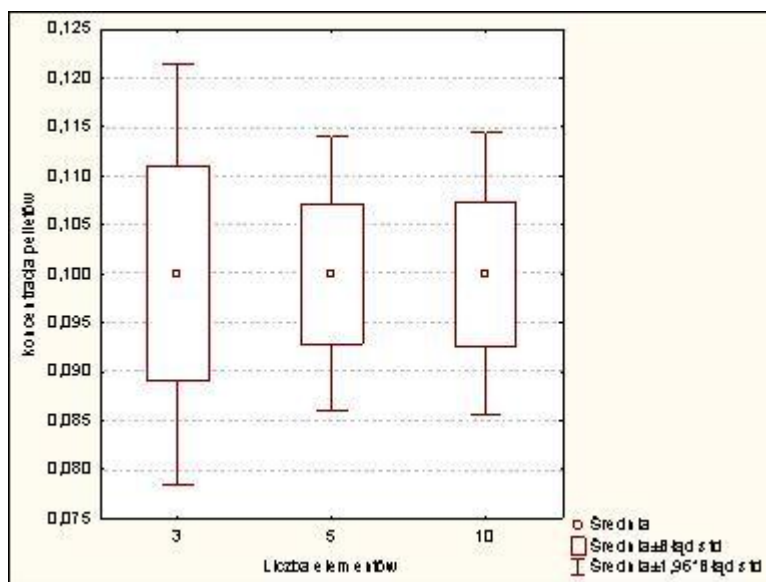
Rys. 34. Wysyp kominowy – zrębki (numer segmentu kasety odbierającej)

5.3. Analiza wpływu liczby elementów mieszających

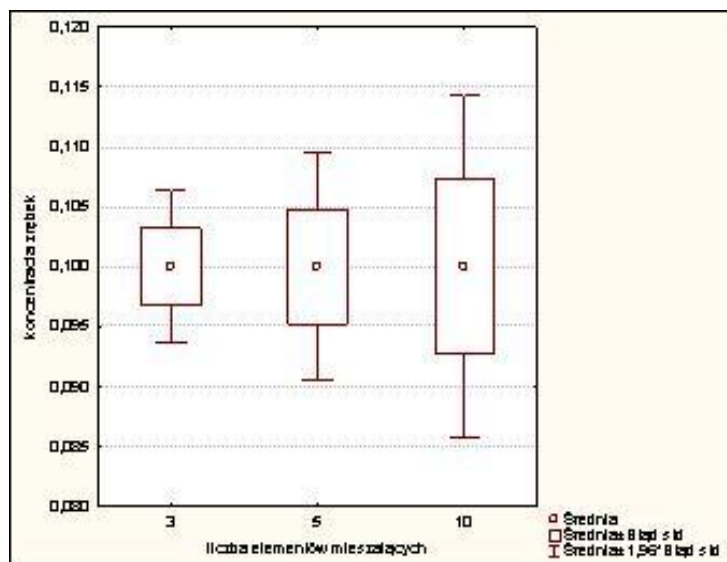
Dla sprawdzenia wpływu liczby elementów mieszających na efekty mieszania zastosowano analizę wariancji (ANOVA). Jako hipotezę zerową przyjęto, że średnie koncentracje nie różnią się wobec hipotezy alternatywnej: średnie koncentracje różnią się. Obliczenia przeprowadzono w programie STATISTICA wersja 9.1 oddzielnie dla przypadku mieszania pelletu, oddzielnie dla zrębek. We wszystkich przypadkach analiza wariancji wykazała, że średnie koncentracje nie różnią się istotnie pod względem statystycznym, czyli że $F_{obl} < F_{0,05}$ (tabela 10). Wyniki obliczeń zaprezentowano na wykresach (rys. 35, 36). Oznacza to, że dla mieszania biomasy i węgla w badanym mieszalniku liczba elementów mieszających nie ma istotnego w sensie statystycznym wpływu na koncentrację biomasy po zmieszaniu.

Tabela 10. Wyniki porównawczego testu Fishera (F) dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ (p)

Materiał ziarnisty	F_{obl}	p	$F_{0,05}$
węgiel/pellet	1,28E-30	1,00	3,35
węgiel/zrębki	6,67E-30	1,00	3,35



Rys. 35. Interpretacja graficzna porównawczej analizy statystycznej koncentracji pelletów w zależności od liczby elementów mieszających



Rys. 36. Interpretacja graficzna porównawczej analizy statystycznej koncentracji zrzębek w zależności od liczby elementów mieszających

Na podstawie tych obserwacji można wyciągnąć wniosek, że dla uzyskania mieszaniny węgla i biomasy można stosować mieszalnik wyposażony w:

- 5 elementów mieszających – dla węgla i pelletu,
- 3 elementy mieszające – dla węgla i zrzębek,

Z eksploatacyjnego punktu widzenia liczba pięciu elementów mieszających wydaje się najkorzystniejsza z uwagi na uzyskiwane wyniki i uniwersalność mieszalnika do pelletu i zrzębek.

W analizowanych przypadkach mieszania węgla i pelletu widoczne są jednak różnicowania w poszczególnych segmentach kasety odbierającej. W celu zobrazowania tej różnicy podjęto próbę podziału segmentów na pewnego rodzaju sekcje o zbliżonych wartościach koncentracji. Analizę wariancji wykonano oddzielnie dla poszczególnych sekcji:

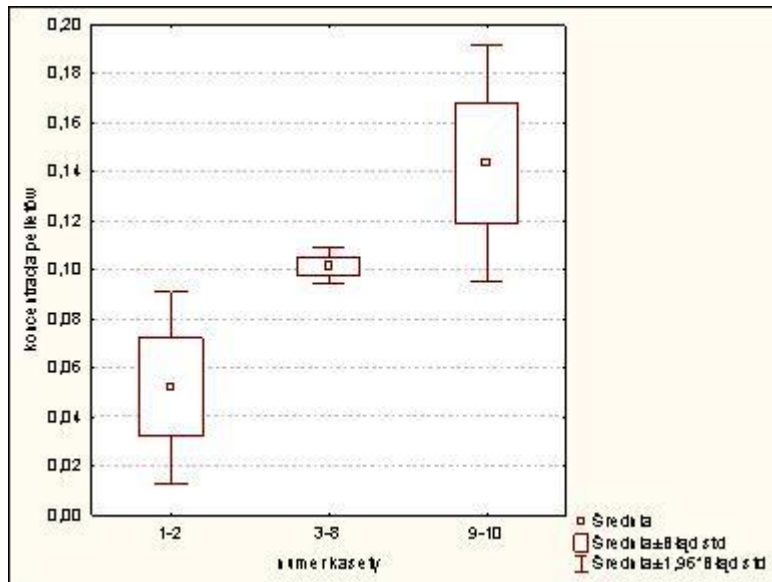
- 3 sekcje (segmenty 1-2; 3-8 i 9-10) dla mieszania z użyciem trzech elementów mieszających (rys. 37),
- 2 sekcje (segmenty 1-2 i 3-10) dla mieszania z użyciem pięciu elementów mieszających (rys. 38),
- 2 sekcje (segmenty 1-3 i 4-10) dla mieszania z użyciem dziesięciu elementów mieszających (rys. 39).

W przypadku stosowania 3 i 5 elementów mieszających koncentracja biomasy przedstawia się odmiennie niż przy stosowaniu 10 elementów. Różnica polega na tym, że w dwóch pierwszych przypadkach koncentracja wzrasta od 1 do 10 segmentu kasety odbierającej, czyli od dolnej do górnej części kasety odbierającej. Natomiast przy zastosowaniu 10 elementów sytuacja jest dokładnie odwrotna. Dla pierwszego przypadku wykonano analizę wariancji ANOVA, natomiast dla dwóch pozostałych test t-Studenta dla poziomu istotności $\alpha=0,05$. Wyniki przedstawione w tabeli 11 wskazują na występowanie statystycznych różnic pomiędzy poszczególnymi wyodrębnionymi sekcjami dla każdego z analizowanych przypadków. Zatem rezultatem mieszania pelletów z węglem jest mieszanina charakteryzująca się znaczną zmiennością w poszczególnych partiach złoża, szczególnie dla wykorzystania mieszalnika wyposażonego w 3 elementy mieszające.

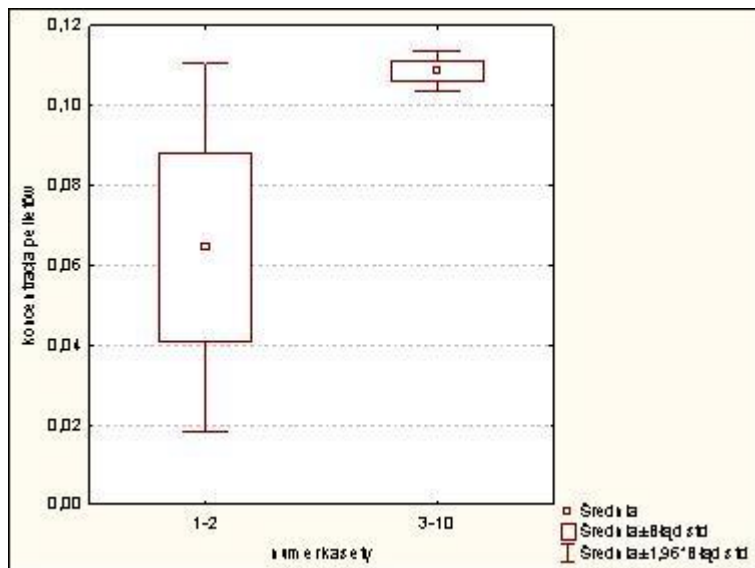
Tabela 11. Wyniki porównawczego testu Fishera (F) i testu t-Studenta (T) dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ (p)

Seria	F_{obl}	p	$F_{0,05}$
3 elementy mieszające	12,13	0,005	3,35
	T_{obl}	p	$t_{0,05}$
5 elementów mieszających	4,15	0,003	1,86
10 elementów mieszających	2,85	0,021	1,86

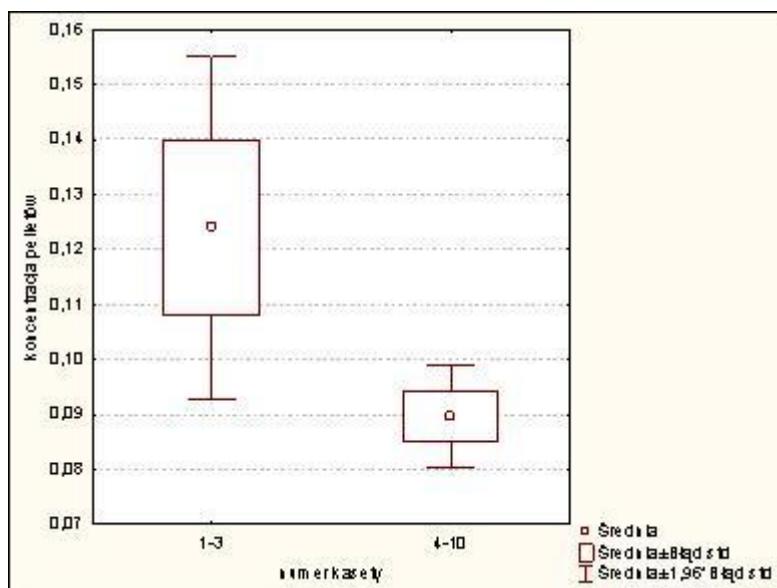
W przypadku mieszania zrębek z węglem nie zaobserwowano znaczącej zmienności koncentracji w poszczególnych segmentach, która pozwoliłaby na wyodrębnienie sekcji o większych wartościach koncentracji, jak ma to miejsce w przypadku mieszania węgla z pelletami. Mieszanina zrębków z węglem charakteryzuje się zatem większą równomiernością koncentracji biomasy w poszczególnych partiach złoża.



Rys. 37. Porównanie wewnątrz serii dla 3 elementów mieszających



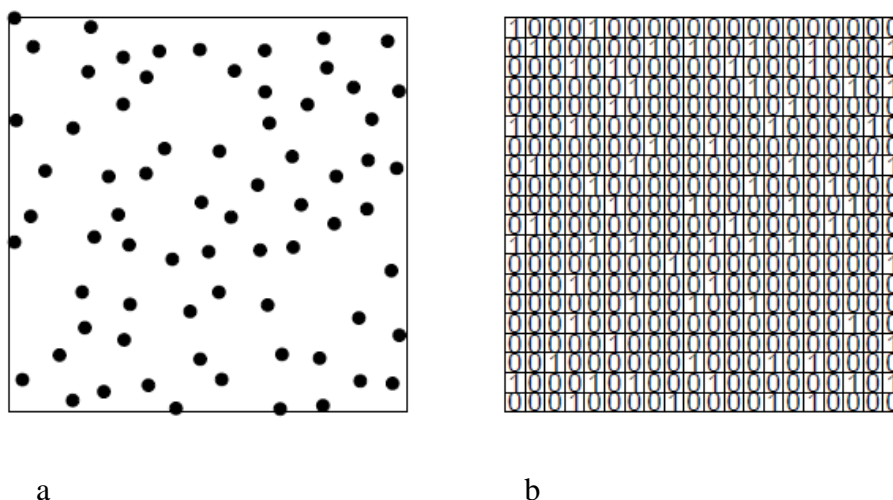
Rys. 38. Porównanie wewnątrz serii dla 5 elementów mieszających



Rys. 39. Porównanie wewnątrz serii dla 10 elementów mieszających

5.4. Analiza mieszania przy przesypie grawitacyjnym i wysypie kominowym (funnel-flow).

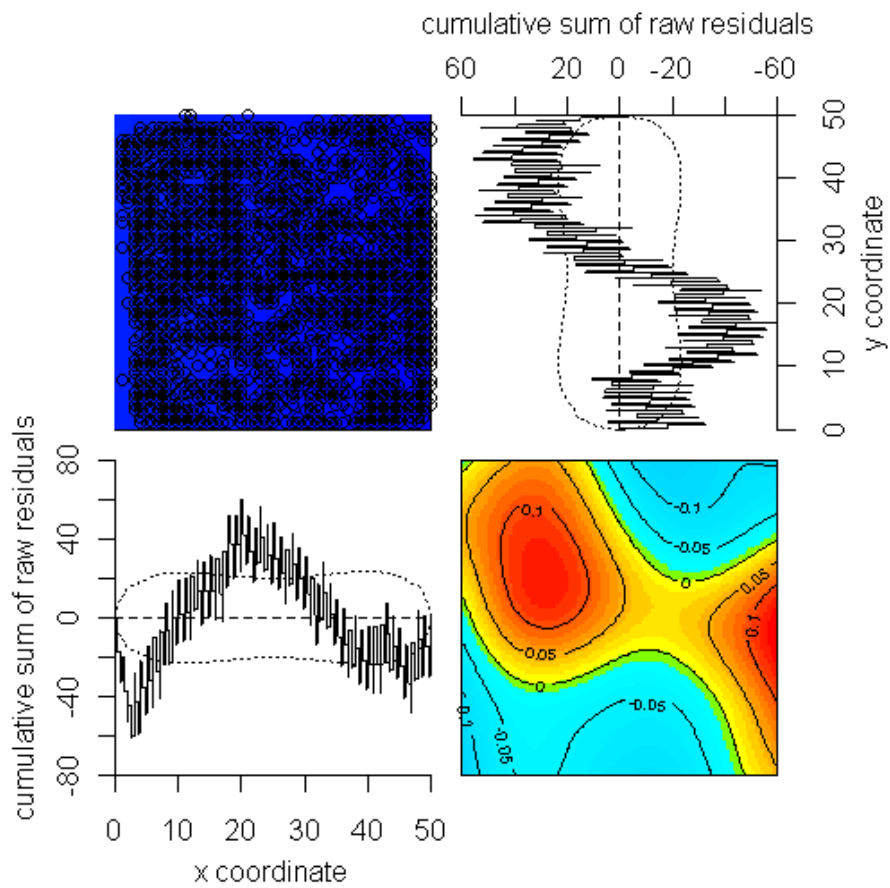
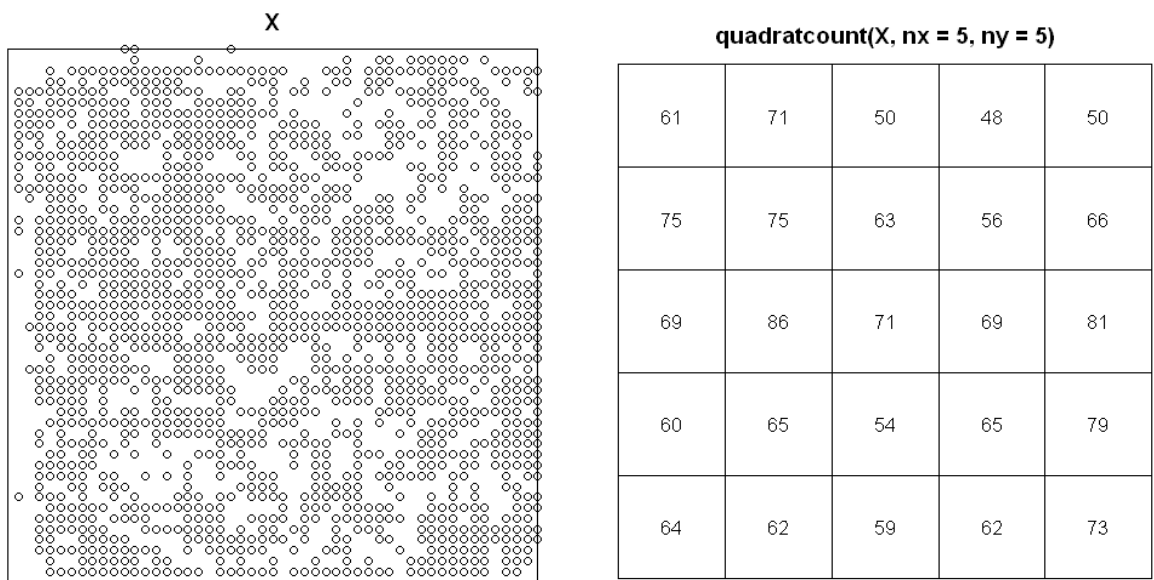
Dodatkowo poddano ocenie statystycznej zaobserwowane różnice koncentracji traserów, którym były zrębki i pellety podczas przesypu grawitacyjnego oraz wysypu kominowego. Analiza obrazów była prowadzona osobno dla każdego z traserów i rodzaju wysypu. Zdjęcia, tak jak poprzednio, poddawano pikselizacji i binaryzacji, a następnie komputerowej analizie obrazu. Ziarnom traserów przyporządkowywano wartość 1, a fazie rozpraszającej 0. Przykładowy schemat przedstawiono na rys. 40.



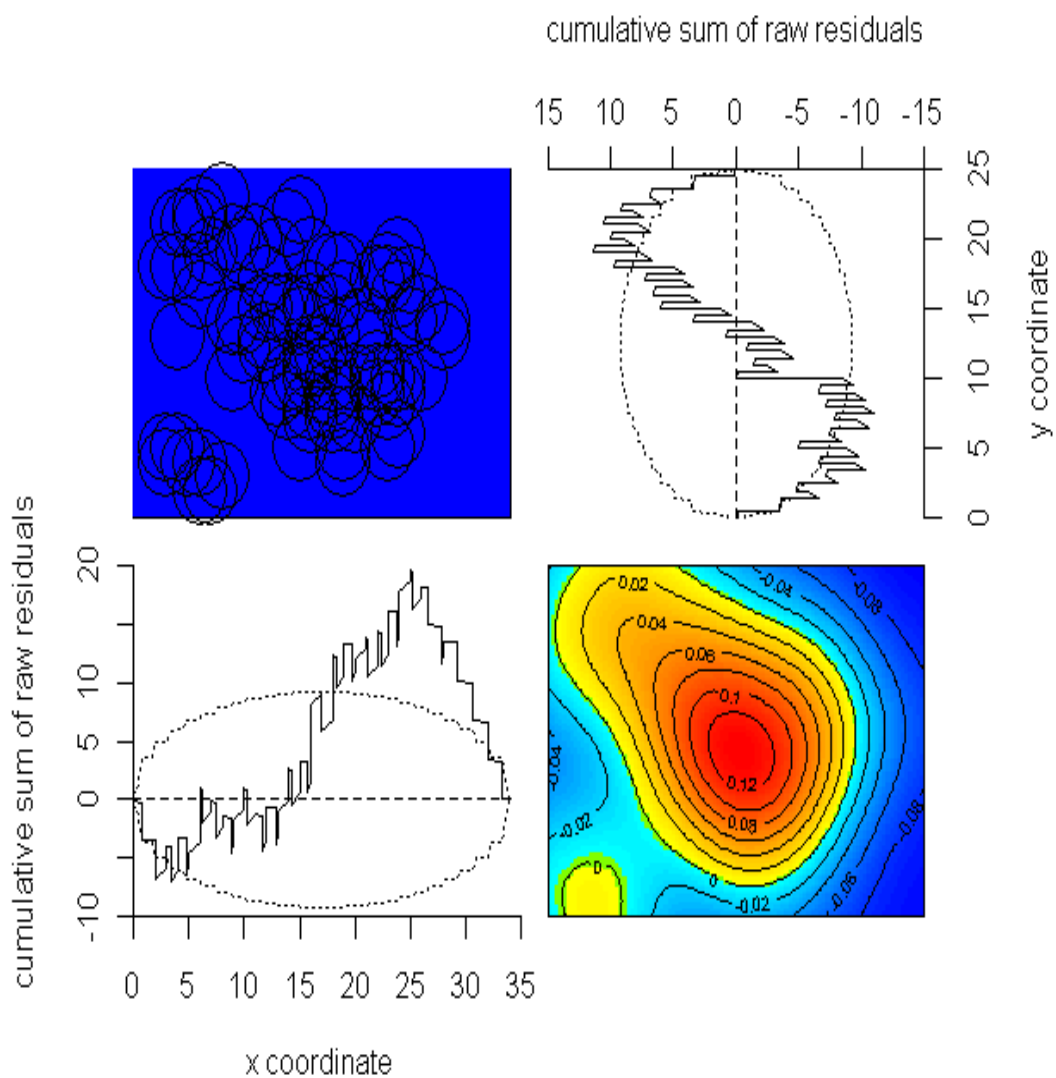
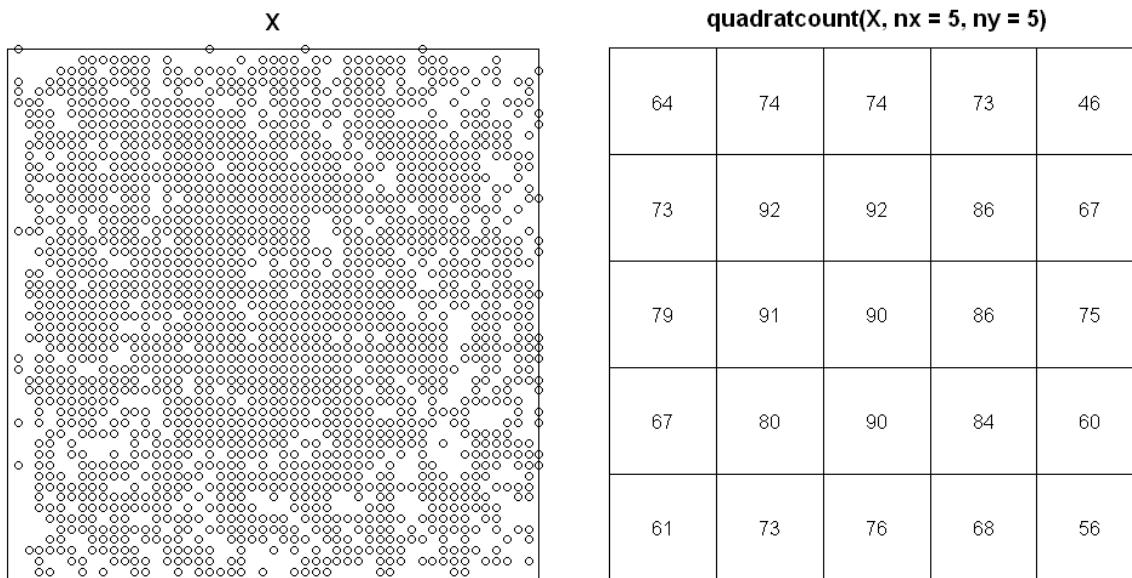
Rys. 40. Rozkład traserów: a - na obrazie binarnym, b – wynik binaryzacji na polach siatki [4]

Zdjęcia poszczególnych segmentów kasety odbierającej nałożono na siebie, otrzymując w efekcie „uśredniony obraz”. Do analizy rozkładu traserów wykorzystano aplikację R [4].

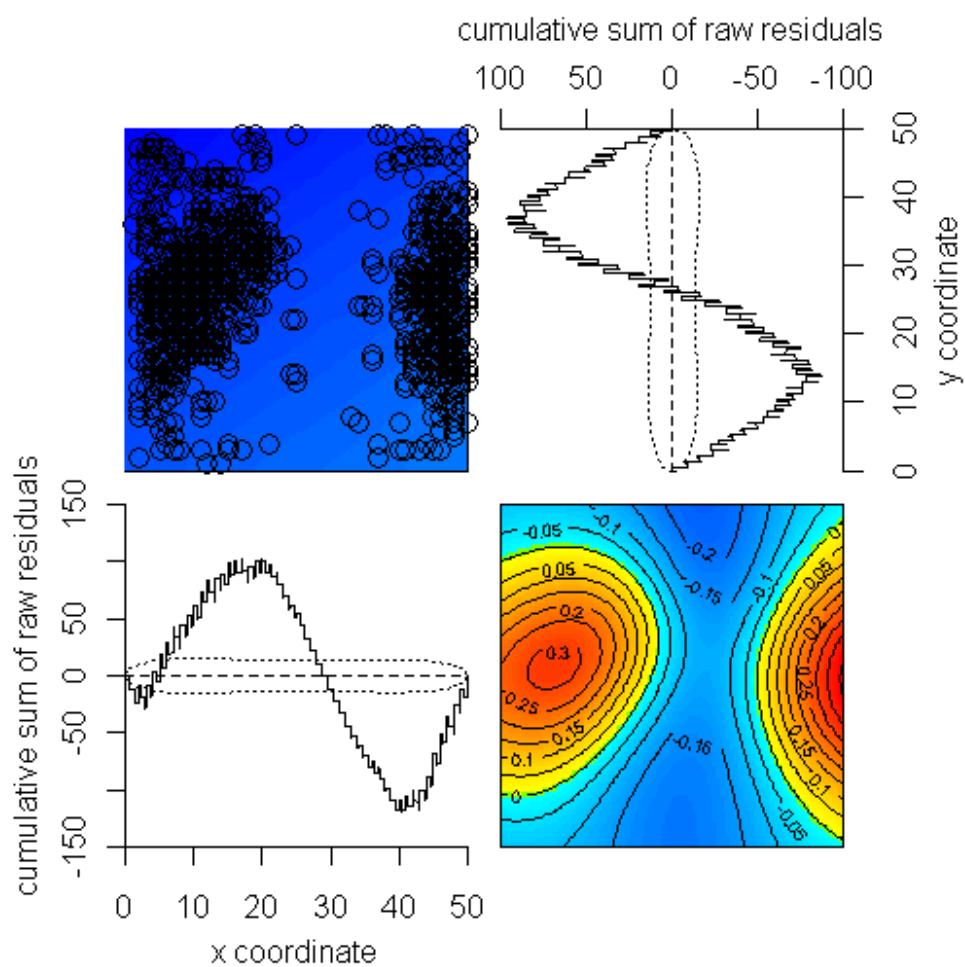
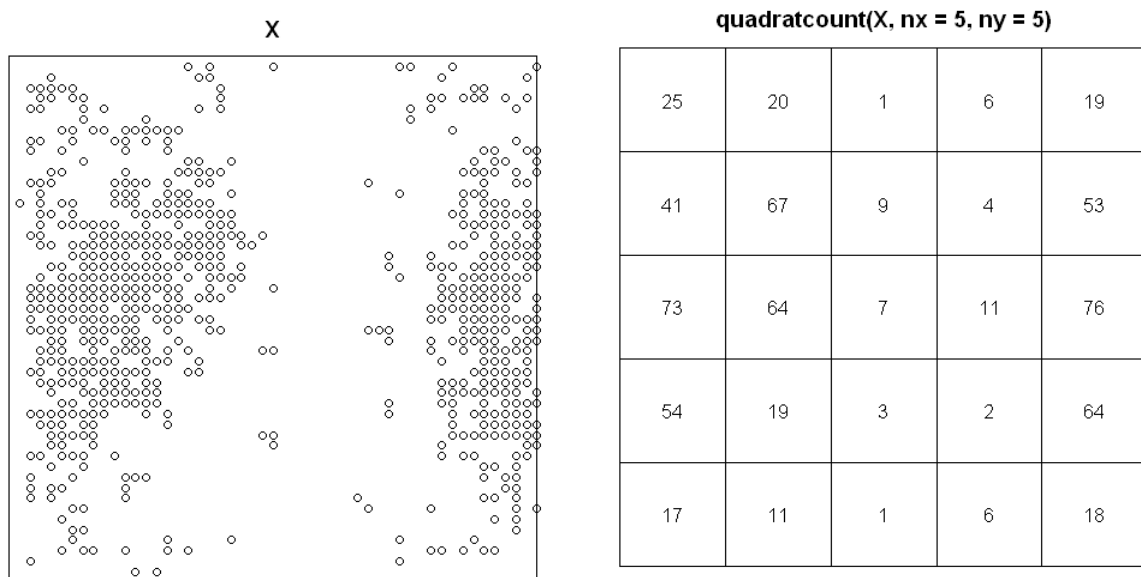
Obraz rozkładu traserów na takich „uśrednionych” zdjęciach przedstawiają rysunki numer 41, 42, 43, 44. Wyniki binaryzacji zestawiono także w postaci zliczeń w podobszarach kwadratowych na które podzielono zdjęcia. Na każdym z 25 obszarów piksele zostały zsumowane. Efekty analizy przedstawiono na wykresach rozkładu traserów wzdłuż osi X i Y oraz kolorowych obrazach. Intensywność barw wskazuje na większe lub mniejsze występowanie skupień biomasy w danych obszarach. Barwa pomarańczowa do czerwonej wskazuje na występowanie w tych miejscach traserów (biomasy), a niebieska o dużej ilości fazy rozpraszającej (węgla) przy niewielkiej ilości traserów.



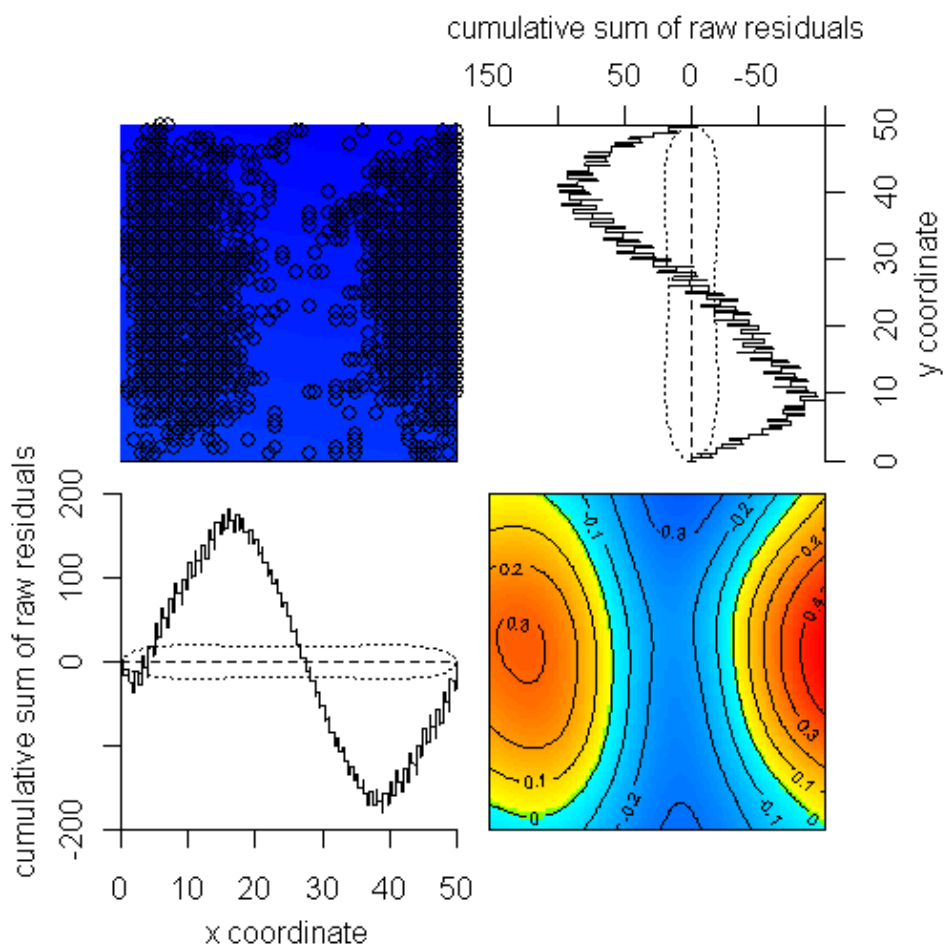
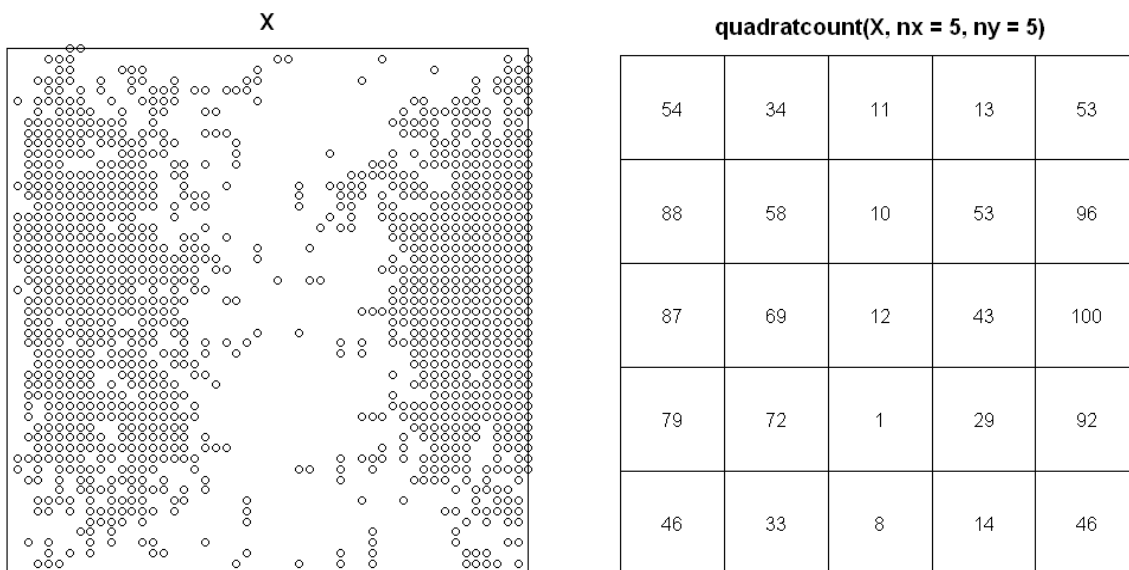
Rys. 41. Ocena intensywności wzorców punktowych dla wysypu kominowego pelletu.



Rys. 42. Ocena intensywności wzorców punktowych dla wysypu kominowego zrębek.



Rys. 43. Ocena intensywności wzorców punktowych dla przesypu grawitacyjnego pelletu



Rys. 44. Ocena intensywności wzorców punktowych dla przesypu grawitacyjnego zrębek

Dla wysypu kominowego, zarówno pelletu jak i zrębek, rozkład traseru jest w miarę równomierny na całej powierzchni obrazu. Świadczy to o występującym efekcie mieszania pomimo braku zastosowania elementów mieszających. Mieszanie odbywa się wyłącznie na zasadzie wysypu kominowego. Daje się zaobserwować różnicę efektu mieszania wynikającą z różnicy gęstości i wymiarów poprzecznych pomiędzy pelletem a zrębkami.

W przypadku wysypu grawitacyjnego wyraźnie widoczne są skupiska traseru przy bocznych (lewych i prawych) krawędziach mieszalnika. Jest to wynikiem konstrukcji mechanizmu otwierania kasety zasilającej i „rozepchania” w trakcie ruchu w dół przez składnik o większej gęstości (węgiel) ziaren biomasy o mniejszej gęstości. W środku widoczny jest węgiel, a po jego obu stronach biomasa.

Szczegółowa analiza tych przypadków wymaga przeprowadzenia dalszych badań, które wykraczają poza zakres niniejszej pracy.

6. Model procesu mieszania węgla z biomasa w mieszalniku statycznym

Biorąc pod uwagę hipotezę badawczą, że

„Proces mieszania badanych paliw w mieszalniku statycznym da się opisać funkcją potęgową trzeciego stopnia”,

zaproponowano następujący model procesu mieszania:

$$p = b_0 + b_1 \cdot v_i + b_2 \cdot v_i^2 + b_3 \cdot v_i^3 \quad (17)$$

gdzie:

p - koncentracja

b_0, b_1, b_2, b_3 - współczynniki,

v_i - numer segmentu w kasecie.

Do analizy danych otrzymanych z badań zastosowano klasyczny model regresji nieliniowej oraz metodę najmniejszych kwadratów.

Celem dopasowania linii regresji do danych otrzymanych z badań jest uzyskanie najmniejszej odległości pomiędzy wartościami empirycznymi, a uzyskanymi z modelu, czyli minimalnej sumy kwadratów reszt. Dzięki temu uzyskujemy oszacowanie, w którym obliczony model opisuje najlepiej dane otrzymane z badań.

Obliczenia matematyczne przeprowadzono przy użyciu programu STATISTICA wersja 10. Na rysunkach nr 45÷65 przedstawiono przykładowe krzywe regresji wraz z funkcją. W tabelach nr 13÷18 przedstawiono odpowiadające im współczynniki funkcji wraz ze współczynnikiem regresji wielorakiej R^2 .

Dla oceny dopasowania zaproponowanego modelu do uzyskanych danych empirycznych wykorzystano współczynnik determinacji R^2 zwany także współczynnikiem korelacji wielorakiej ($R = \sqrt{R^2}$).

$$R^2 = \frac{SSe}{SS_t} \quad (18)$$

lub

$$R^2 = 1 - \frac{SSr}{SS_t} \quad (19)$$

gdzie:

y_i - wartość wynikowa pomiaru, y - wartość przewidywana z oszacowania,

$$SS_t = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{- całkowita suma kwadratów,}$$

$$SSe = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{\bar{y}})^2 - \text{wyjaśniona suma kwadratów,}$$

$$SSr = \sum_{i=1}^N e_i^2 - \text{suma kwadratów reszt.}$$

Interpretacja współczynnika R^2 jest następująca [1]:

R^2 powyżej 0,90 dopasowanie bardzo dobre,

R^2 od 0,80 do 0,90 dopasowanie dobre,

R^2 powyżej 0,60 dopasowanie zadowalające.

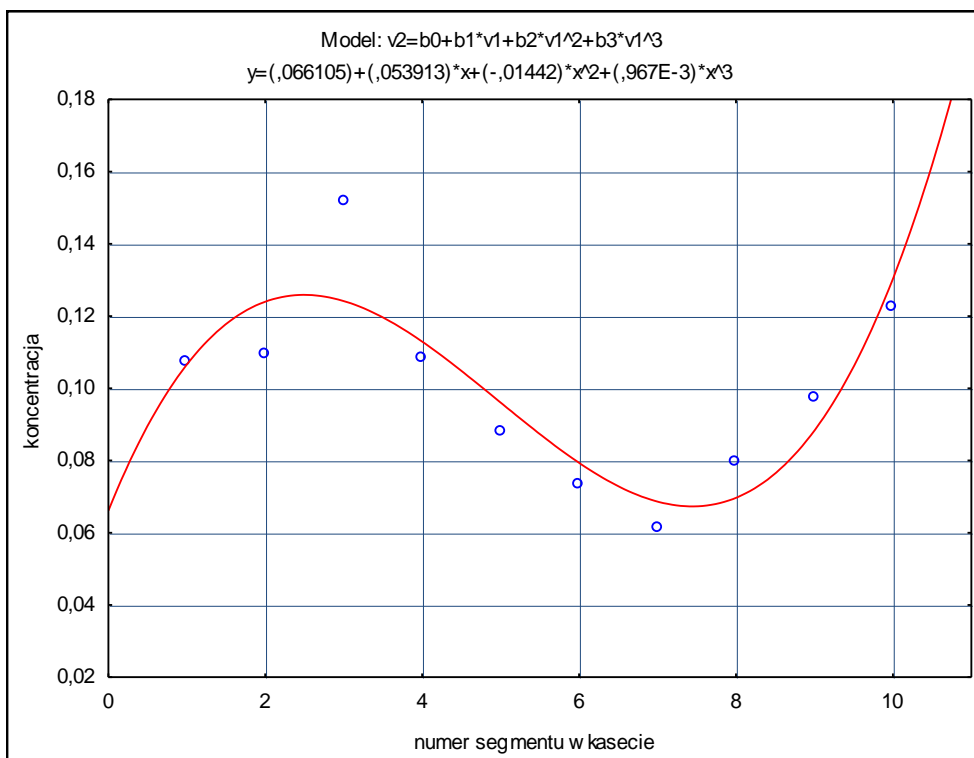
Uzyskane wartości współczynnika R^2 (Tab. 12÷18) wskazują na zadowalające (w niektórych przypadkach), dobre i bardzo dobre dopasowanie modelu do danych empirycznych ($R^2_{\min}=0,626$ i $R^2_{\max}=0,976$). Oznacza to, że model dobrze odwzorowuje dane rzeczywiste.

Wartość R^2 jest większa od 0,80 prawie w większości przedstawionych przypadków, co oznacza, że model w ponad 80% odwzorowuje dane empiryczne.

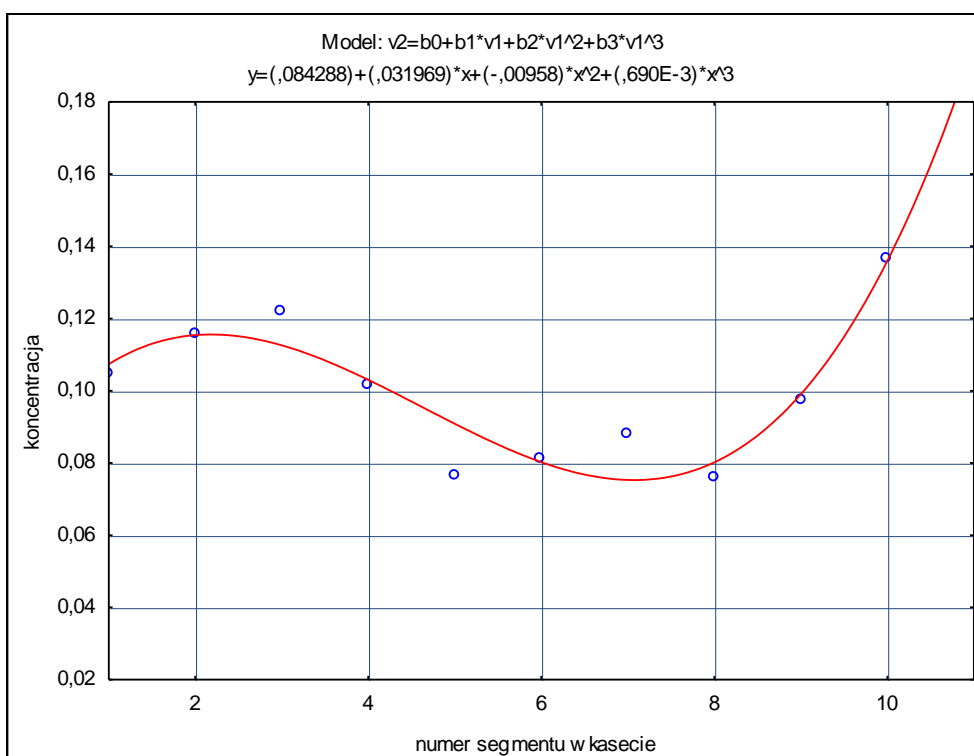
Tabela 12. Funkcje potęgowe trzeciego stopnia dla różnej liczby elementów mieszających

Liczba elementów	Traser	Funkcja	R^2
3	zrębki	$p=0,085144+0,025355x-0,00683x^2+0,457E^{-3}x^3$	0,958
3	pellet	$p=-0,04455+0,088498x-0,01666x^2+0,989E^{-3}x^3$	0,949
5	zrębki	$p=0,07193+0,027081x-0,00569x^2+0,324E^{-3}x^3$	0,721
5	pellet	$p=-0,03061+0,088173x-0,01688x^2+0,991E^{-3}x^3$	0,931
10	zrębki	$p=0,110088+0,014835x-0,00403x^2+0,210E^{-3}x^3$	0,976
10	pellet	$p=0,082678+0,036371x-0,00888x^2+0,527E^{-3}x^3$	0,755

Analizę statystyczną dotyczącą rozkładu koncentracji traseru w zależności od liczby zastosowanych elementów mieszających oraz w poszczególnych segmentach kasety odbierającej opisano w Rozdziale 5.3.



Rys. 45. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 1



Rys. 46. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 2

Tabela 13. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/zrębki i 3 elementów mieszających

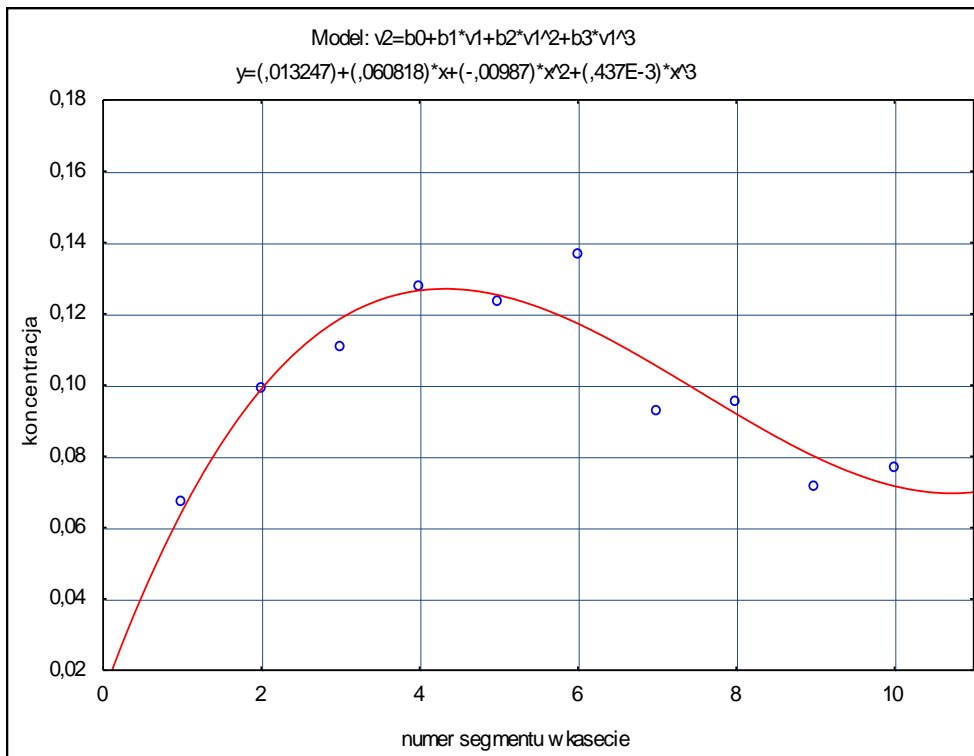
Mieszanie węgiel/zrębki, 3 elementy 1 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,066105	2,22804	0,067447	0,773	0,8791
b1	0,053913	2,42429	0,051561		
b2	-0,014419	-3,14330	0,019984		
b3	0,000967	3,51518	0,012592		

Mieszanie węgiel/zrębki, 3 elementy 2 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,084288	4,76788	0,003101	0,867	0,9309
b1	0,031969	2,41260	0,052388		
b2	-0,009582	-3,50562	0,012739		
b3	0,000690	4,21093	0,005617		

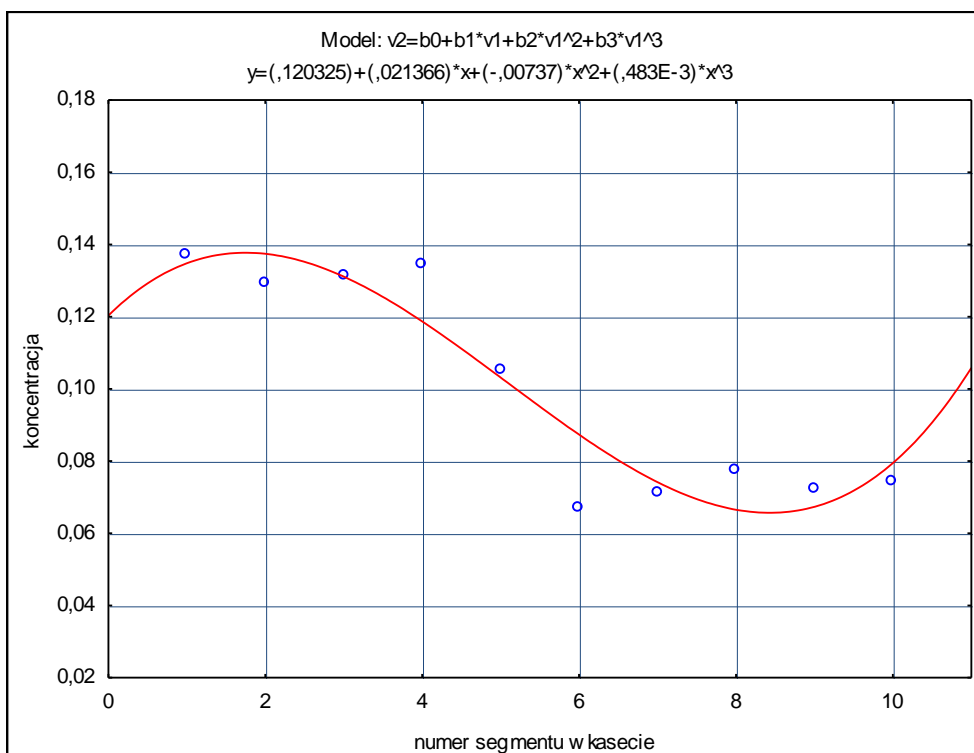
Mieszanie węgiel/zrębki, 3 elementy 3 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,140276	5,282944	0,001860	0,626	0,7914
b1	-0,012755	-0,640856	0,545300		
b2	0,000003	0,000620	0,999525		
b3	0,000098	0,399859	0,703106		

Mieszanie węgiel/zrębki, 3 elementy 4 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,049909	1,776922	0,001860	0,657	0,8108
b1	0,028292	1,343869	0,545300		
b2	-0,003304	-0,760860	0,999525		
b3	0,000072	0,275343	0,703106		

Mieszanie węgiel/zrębki, 3 elementy - średnia z prób					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,085144	15,19617	0,000005	0,957	0,978
b1	0,025355	6,03724	0,000934		
b2	-0,006825	-7,87913	0,000221		
b3	0,000457	8,79382	0,000120		



Rys. 47. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 1



Rys. 48. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 2

Tabela 14. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/zrębki i 5 elementów mieszających

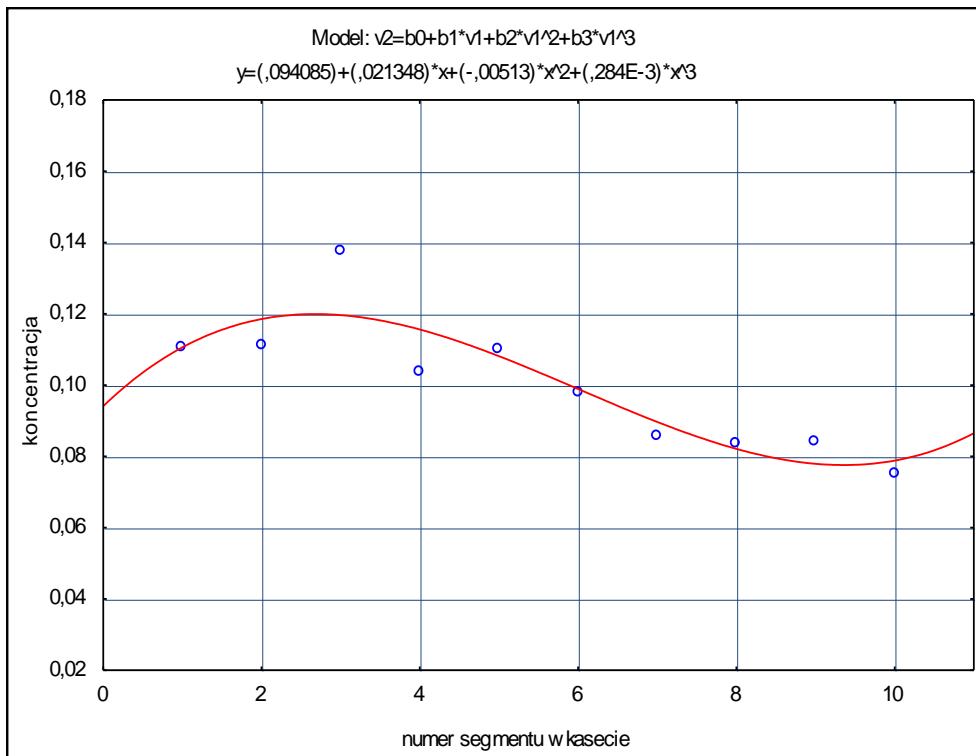
Mieszanie węgiel/zrębki, 5 elementów 1 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,013247	0,62605	0,554334	0,864	0,9296
b1	0,060818	3,83474	0,008612		
b2	-0,009872	-3,01776	0,023465		
b3	0,000437	2,23002	0,067264		

Mieszanie węgiel/zrębki, 5 elementów 2 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,120325	5,01841	0,002408	0,89	0,9432
b1	0,021366	1,18888	0,279403		
b2	-0,007375	-1,98946	0,093786		
b3	0,000483	2,17263	0,072798		

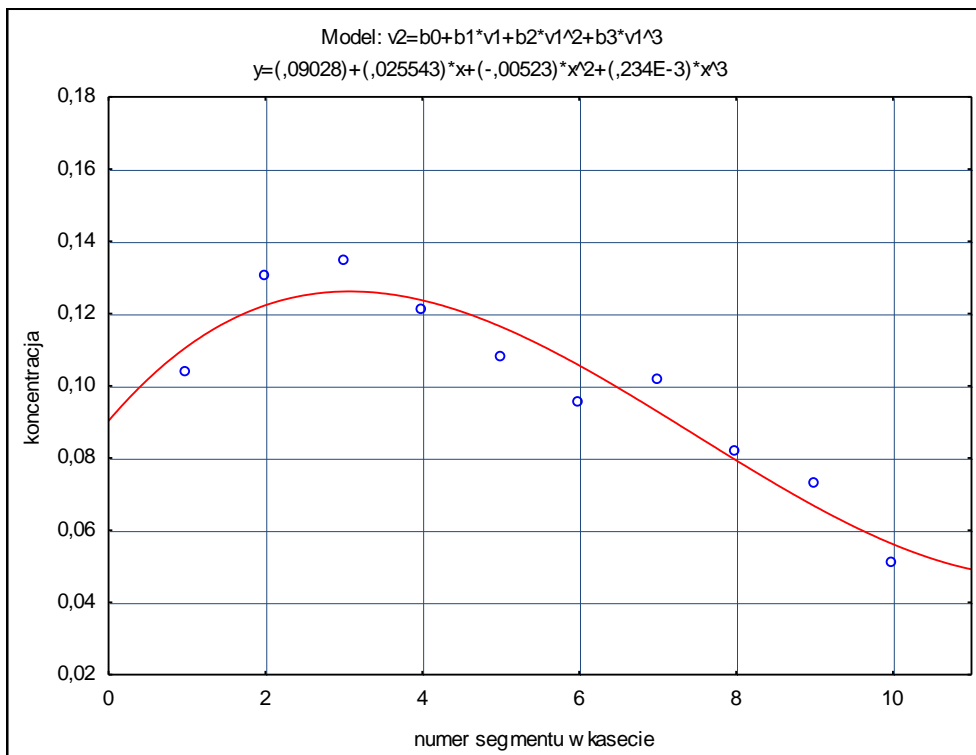
Mieszanie węgiel/zrębki, 5 elementów 3 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,093690	6,07823	0,000901	0,721	0,849
b1	-0,018433	-1,59544	0,161726		
b2	0,006849	2,87386	0,028284		
b3	-0,000516	-3,60836	0,011253		

Mieszanie węgiel/zrębki, 5 elementów 4 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,040891	1,53467	0,175766	0,791	0,8895
b1	0,035107	1,75782	0,129285		
b2	-0,004125	-1,00141	0,355288		
b3	0,000082	0,33250	0,750820		

Mieszanie węgiel/zrębki, 5 elementów - średnia z prób					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,071930	6,37158	0,000702	0,721	0,849
b1	0,027081	3,20039	0,018591		
b2	-0,005689	-3,25934	0,017263		
b3	0,000324	3,09986	0,021120		



Rys. 49. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 1



Rys. 50. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 2

Tabela 15. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgla/zrębki i 10 elementów mieszających

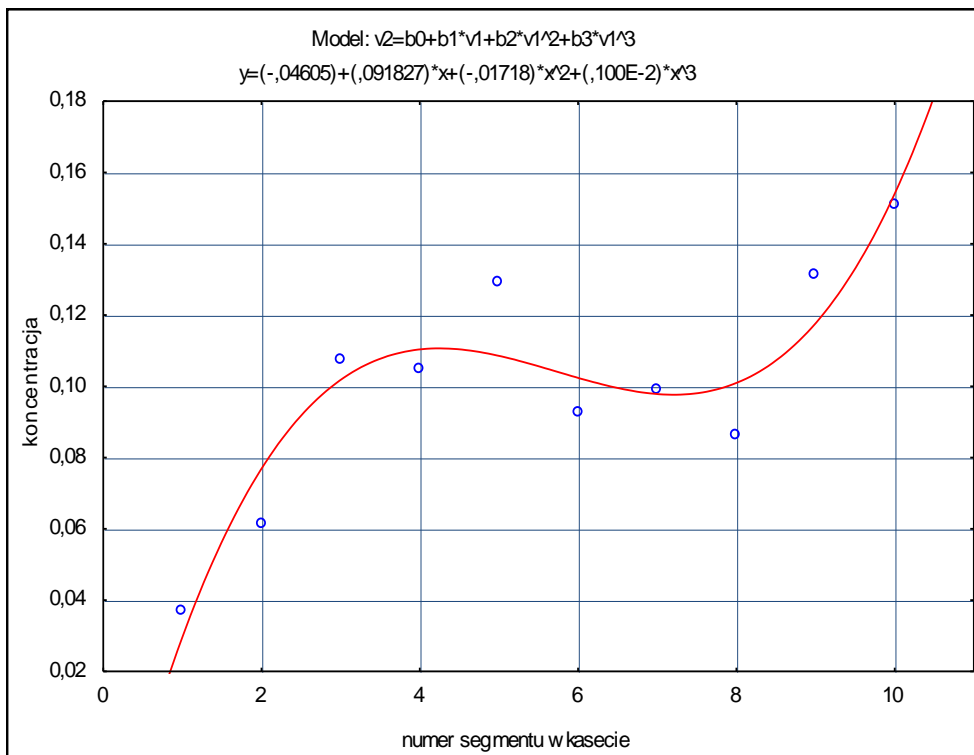
Mieszanie węgiel/zrębki, 10 elementów 1 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,094085	4,88586	0,002750	0,81	0,8999
b1	0,021348	1,47905	0,189613		
b2	-0,005128	-1,72248	0,135758		
b3	0,000284	1,59124	0,162660		

Mieszanie węgiel/zrębki, 10 elementów 2 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,090280	5,02452	0,002393	0,917	0,9575
b1	0,025543	1,89663	0,106668		
b2	-0,005233	-1,88377	0,108586		
b3	0,000234	1,40310	0,210161		

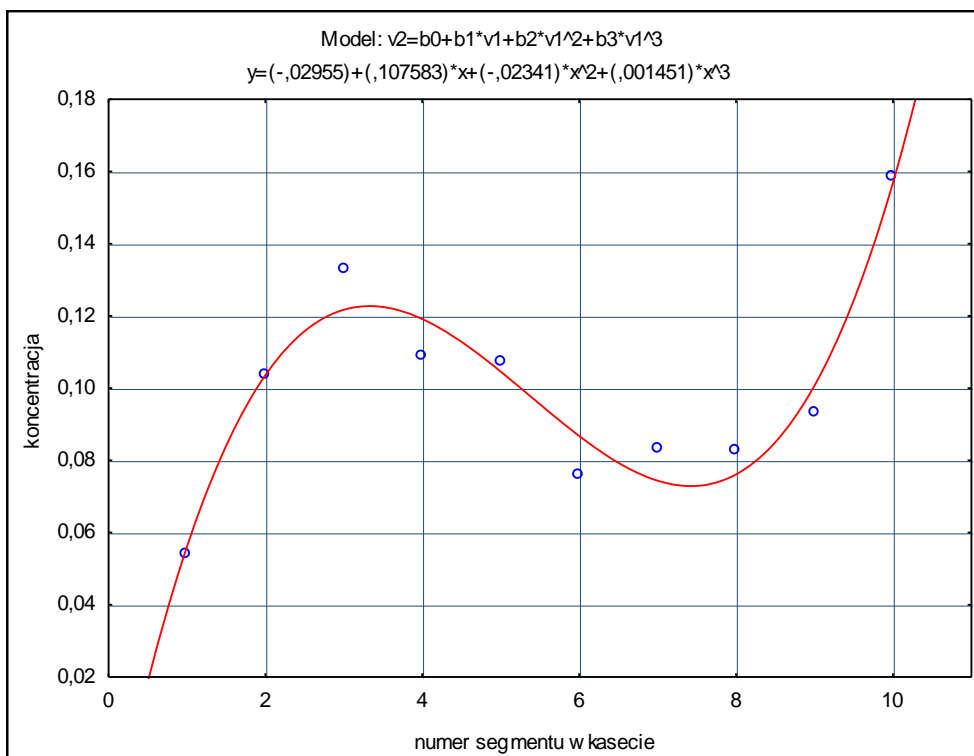
Mieszanie węgiel/zrębki, 10 elementów 3 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,143089	6,325120	0,000730	0,854	0,9241
b1	-0,014697	-0,866725	0,419399		
b2	0,002411	0,689320	0,516379		
b3	-0,000182	-0,868142	0,418681		

Mieszanie węgiel/zrębki, 10 elementów 4 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,112901	7,89289	0,000219	0,936	0,9814
b1	0,027144	2,53169	0,044578		
b2	-0,008159	-3,68948	0,010215		
b3	0,000502	3,78761	0,009099		

Mieszanie węgiel/zrębki, 10 elementów - średnia z prób					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,110088	12,65990	0,000015	0,976	0,988
b1	0,014835	2,27597	0,063148		
b2	-0,004027	-2,99560	0,024145		
b3	0,000210	2,59870	0,040734		



Rys. 51. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 1



Rys. 52. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 2

Tabela 16. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/pellet i 3 elementów mieszających

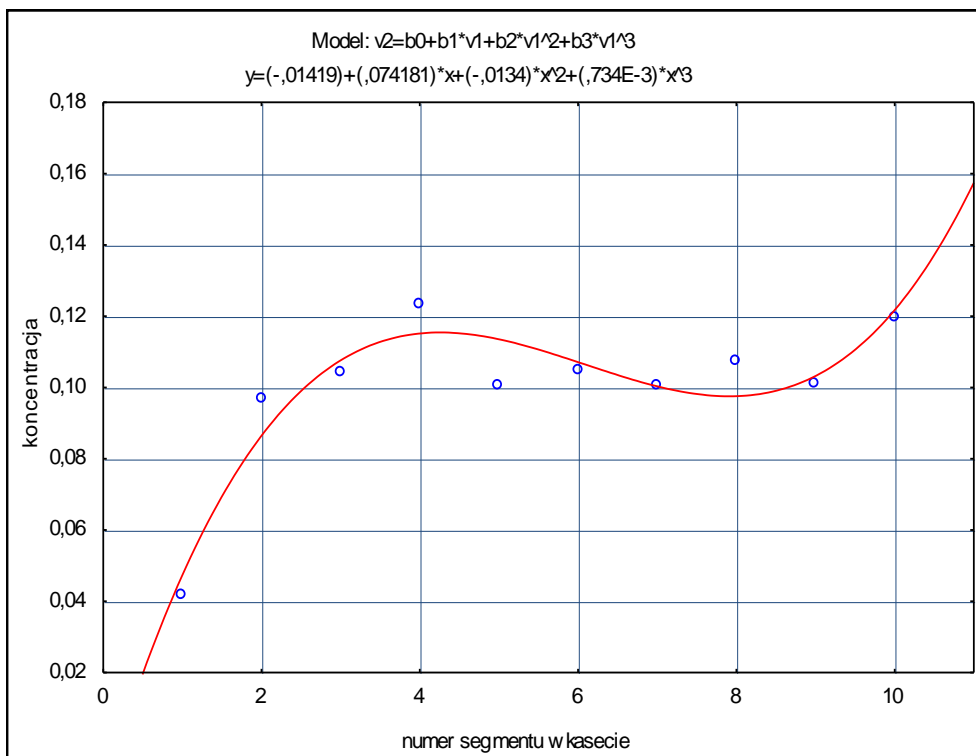
Mieszanie węgiel/pellet, 3 elementy 1 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,046052	-1,62429	0,155441	0,874	0,9351
b1	0,091827	4,32100	0,004977		
b2	-0,017180	-3,91940	0,007807		
b3	0,001000	3,80376	0,008928		

Mieszanie węgiel/pellet, 3 elementy 2 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,029547	-1,60627	0,159338	0,932	0,9656
b1	0,107583	7,80293	0,000234		
b2	-0,023408	-8,23107	0,000174		
b3	0,001451	8,51107	0,000144		

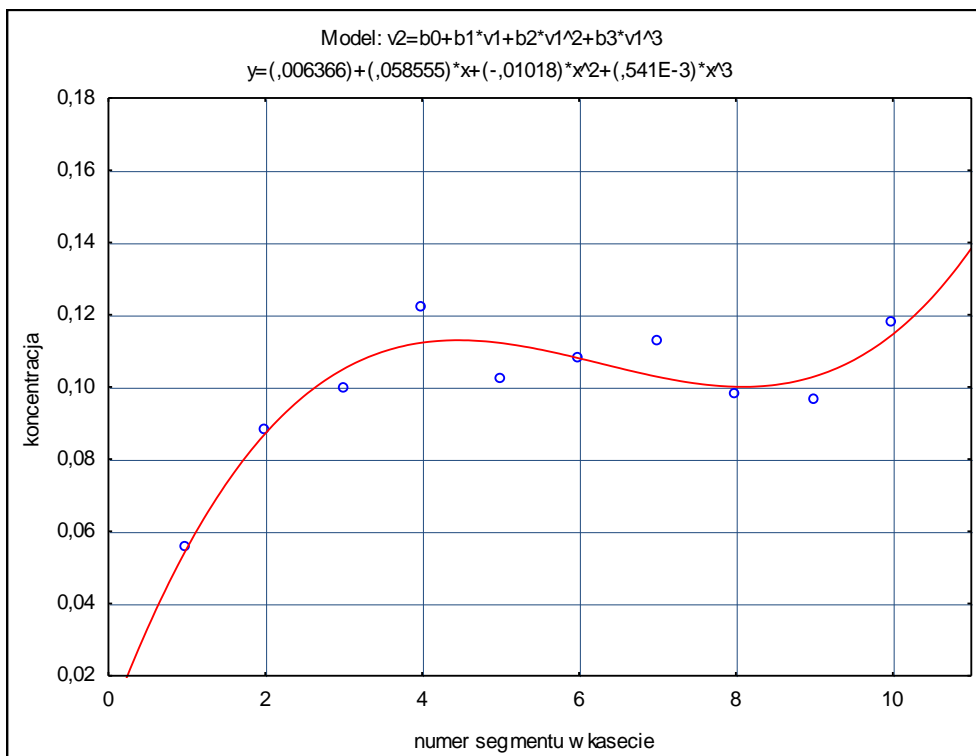
Mieszanie węgiel/pellet, 3 elementy 3 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,045827	-1,10925	0,309792	0,807	0,8986
b1	0,098900	3,19380	0,018746		
b2	-0,020158	-3,15591	0,019667		
b3	0,001249	3,26205	0,017205		

Mieszanie węgiel/pellet, 3 elementy 4 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,056774	-1,46987	0,191992	0,922	0,96
b1	0,055683	1,92333	0,102790		
b2	-0,005904	-0,98867	0,361003		
b3	0,000257	0,71842	0,499503		

Mieszanie węgiel/pellet, 3 elementy - średnia z prób					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,044550	-2,35931	0,056337	0,949	0,974
b1	0,088498	6,25282	0,000776		
b2	-0,016663	-5,70763	0,001252		
b3	0,000989	5,65228	0,001316		



Rys. 53. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 1



Rys. 54. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 2

Tabela 17. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/pellet i 5 elementów mieszających

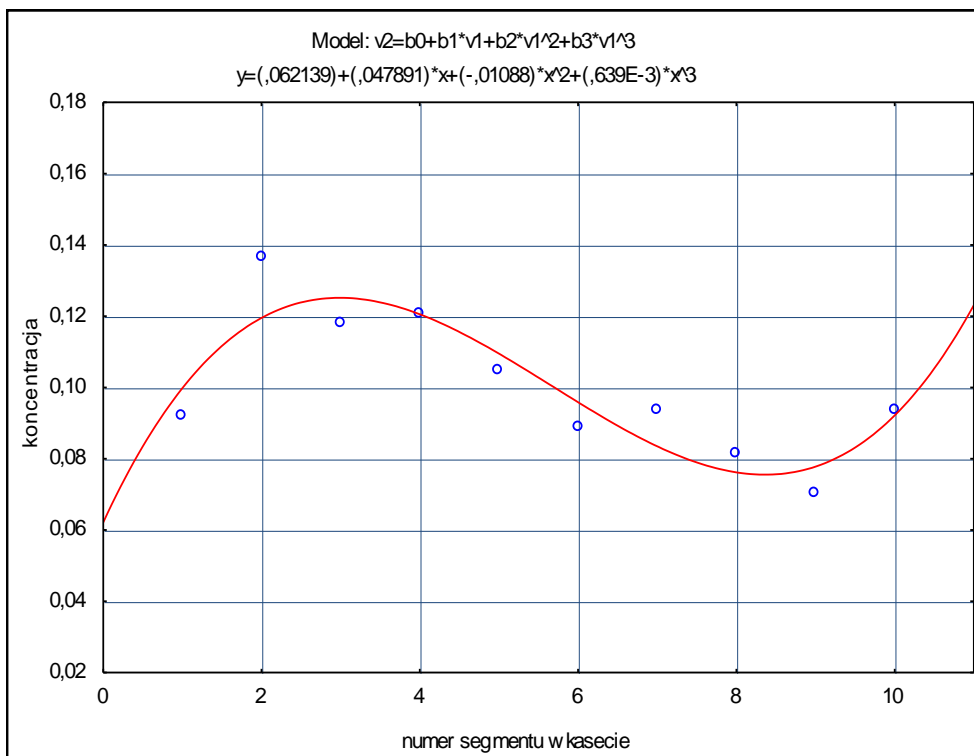
Mieszanie węgiel/pellet, 5 elementów 1 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,014190	-0,81093	0,448369	0,891	0,9437
b1	0,074181	5,65588	0,001312		
b2	-0,013396	-4,95184	0,002573		
b3	0,000734	4,52291	0,004005		

Mieszanie węgiel/pellet, 5 elementów 2 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,006366	0,41032	0,695824	0,879	0,9375
b1	0,058555	5,03486	0,002369		
b2	-0,010184	-4,24553	0,005407		
b3	0,000541	3,76157	0,009381		

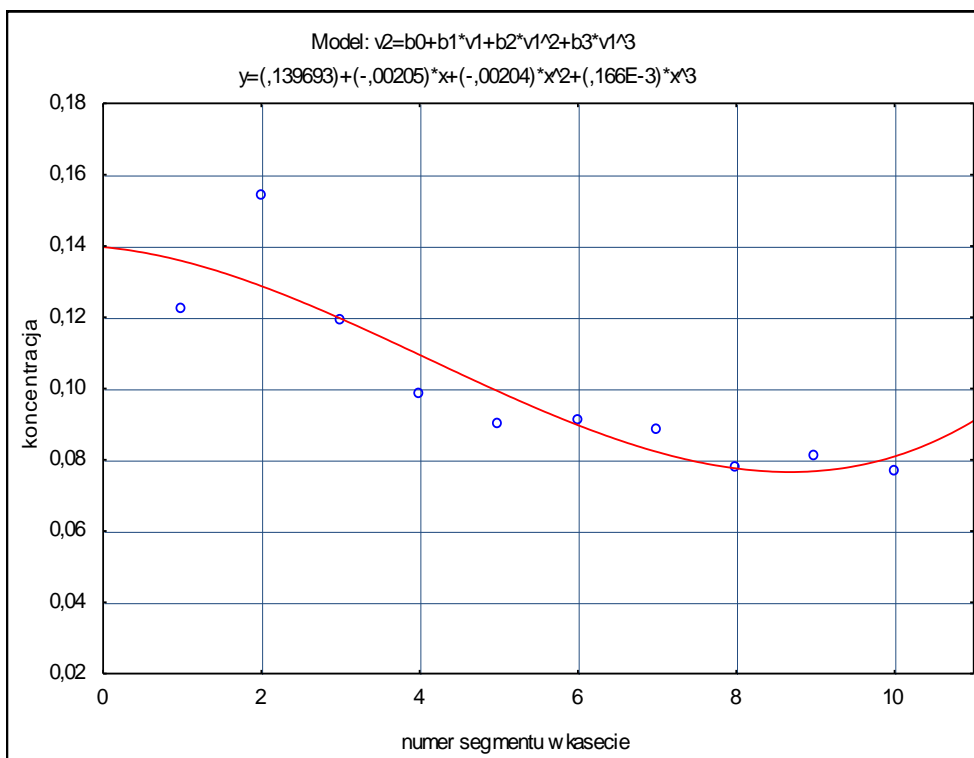
Mieszanie węgiel/pellet, 5 elementów 3 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,019188	-0,86705	0,419235	0,843	0,9181
b1	0,077728	4,68593	0,003375		
b2	-0,013653	-3,99040	0,007197		
b3	0,000718	3,50162	0,012801		

Mieszanie węgiel/pellet, 5 elementów 4 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,027833	-2,23607	0,066706	0,967	0,9832
b1	0,070359	7,54135	0,000282		
b2	-0,011386	-5,91671	0,001038		
b3	0,000592	5,13430	0,002148		

Mieszanie węgiel/pellet, 5 elementów - średnia z prób					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	-0,030605	-1,67331	0,145292	0,931	0,965
b1	0,088173	6,43162	0,000668		
b2	-0,016881	-5,96960	0,000991		
b3	0,000991	5,84434	0,001107		



Rys. 55. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 1



Rys. 56. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 10 elementów mieszających – próba 2

Tabela 18. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgla/pellet i 10 elementów mieszających

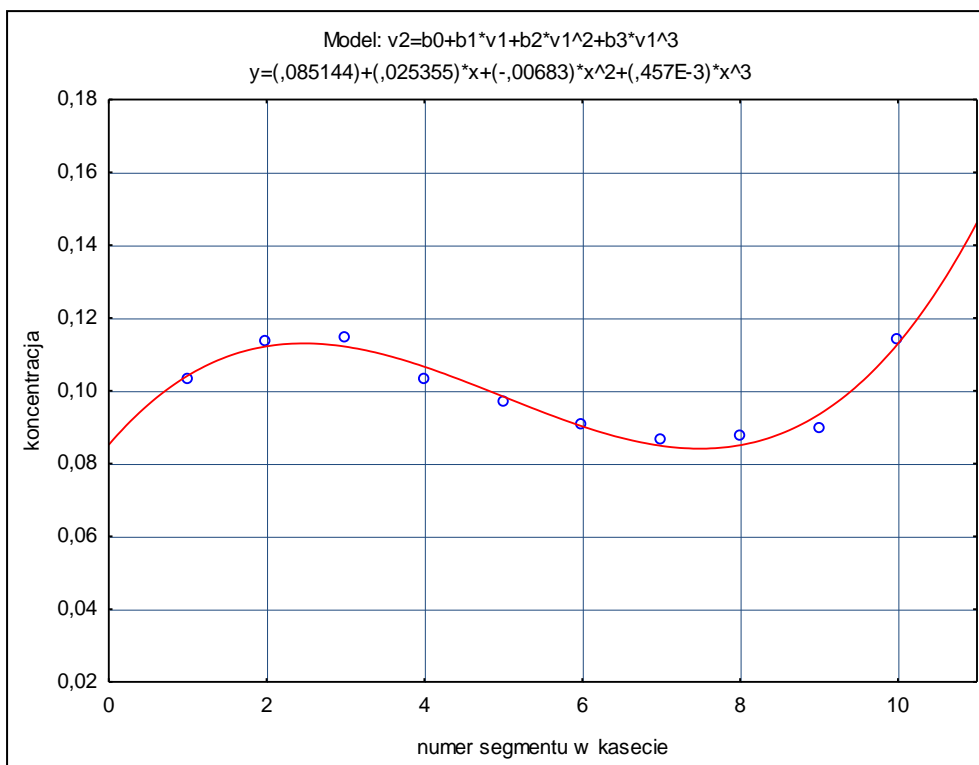
Mieszanie węgiel/pellet, 10 elementów 1 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,062139	3,03611	0,022917	0,815	0,9027
b1	0,047891	3,12181	0,020537		
b2	-0,010879	-3,43790	0,013837		
b3	0,000639	3,36736	0,015092		

Mieszanie węgiel/pellet, 10 elementów 2 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,139693	5,291248	0,001845	0,799	0,8938
b1	-0,002051	-0,103638	0,920834		
b2	-0,002042	-0,500234	0,634724		
b3	0,000166	0,677967	0,523063		

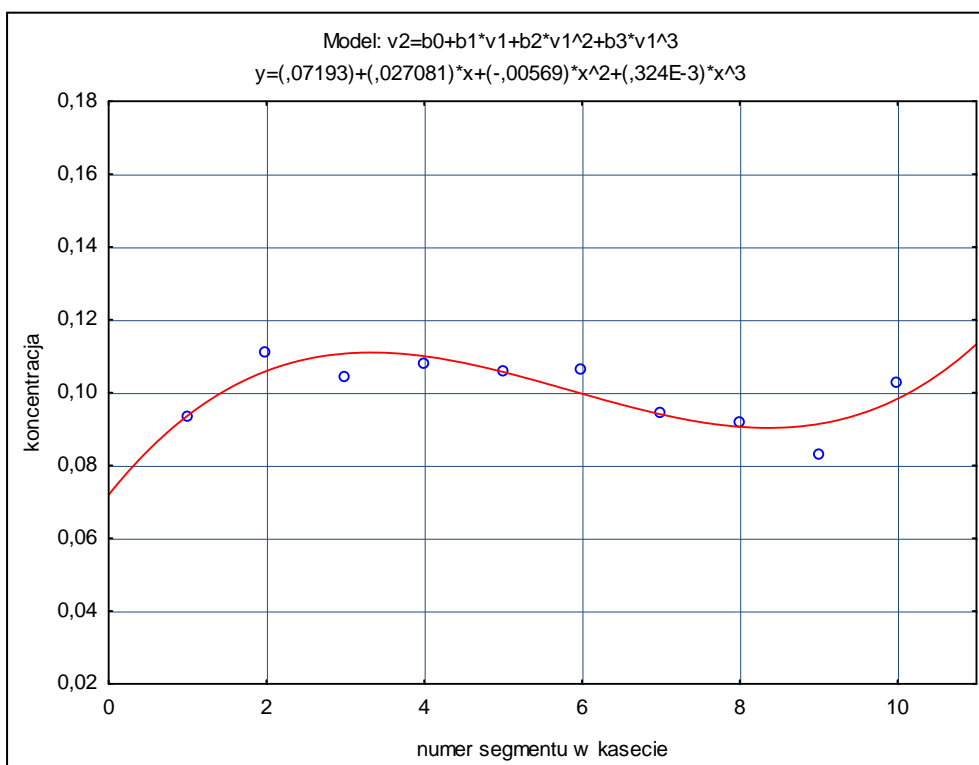
Mieszanie węgiel/pellet, 10 elementów 3 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,046873	1,12730	0,302669	0,659	0,8116
b1	0,062747	2,01329	0,090739		
b2	-0,013637	-2,12132	0,078141		
b3	0,000770	1,99849	0,092620		

Mieszanie węgiel/pellet, 10 elementów 4 próba					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,082006	2,94480	0,025786	0,751	0,8667
b1	0,036895	1,76760	0,127547		
b2	-0,008979	-2,08561	0,082096		
b3	0,000531	2,05865	0,085215		

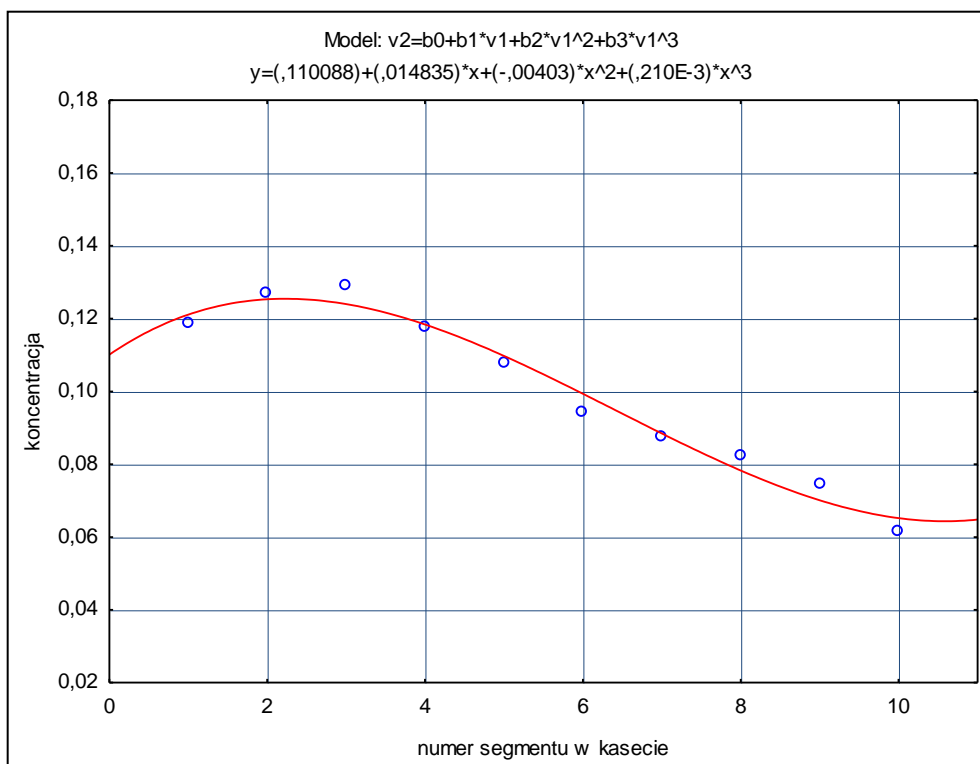
Mieszanie węgiel/pellet, 10 elementów - średnia z prób					
Parametry	funkcji	Wartość t	Poziom p	R ²	R
b0	0,082678	3,01096	0,023671	0,754	0,869
b1	0,036371	1,76712	0,127631		
b2	-0,008884	-2,09269	0,081295		
b3	0,000527	2,06894	0,084011		



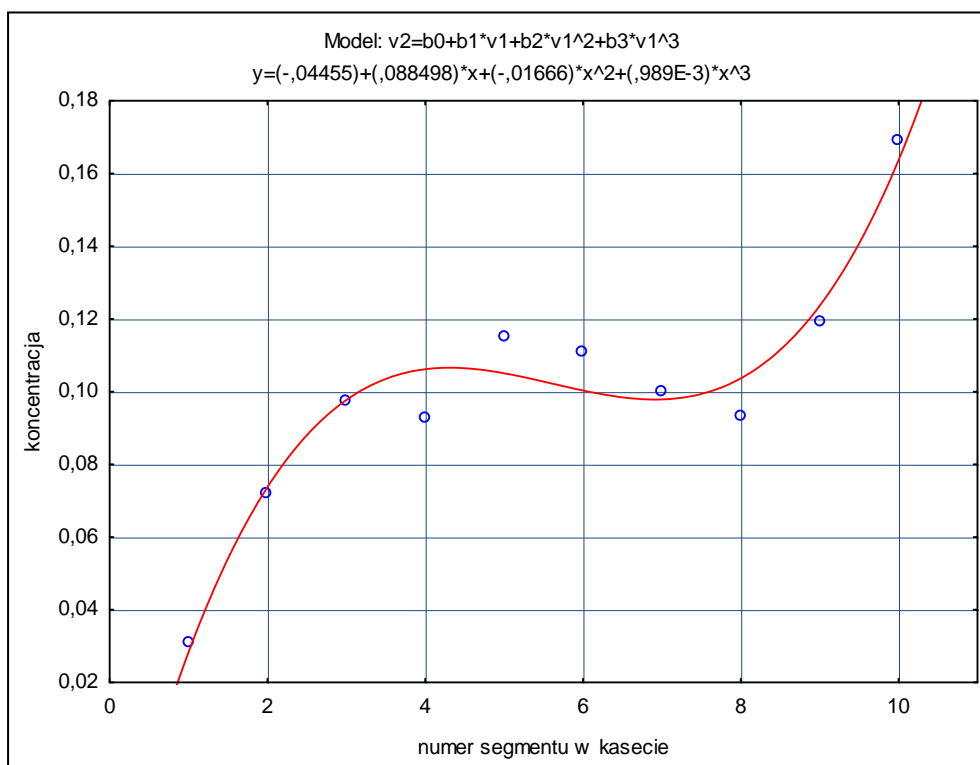
Rys. 57. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 3 elementów mieszających – wartości uśrednione



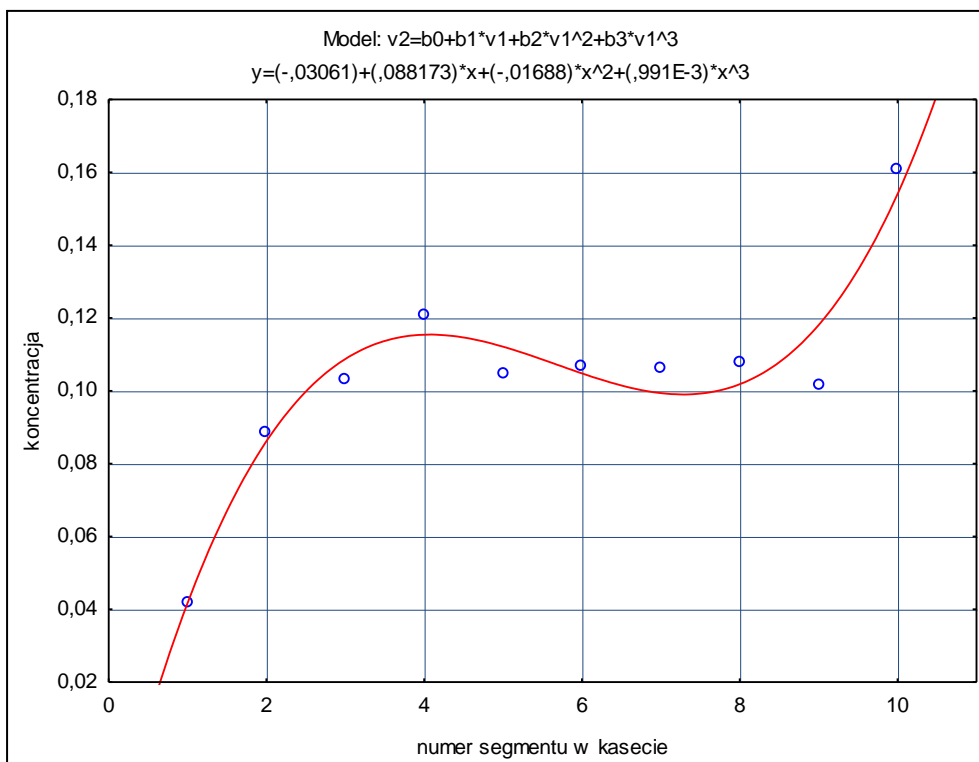
Rys. 58. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 5 elementów mieszających – wartości uśrednione



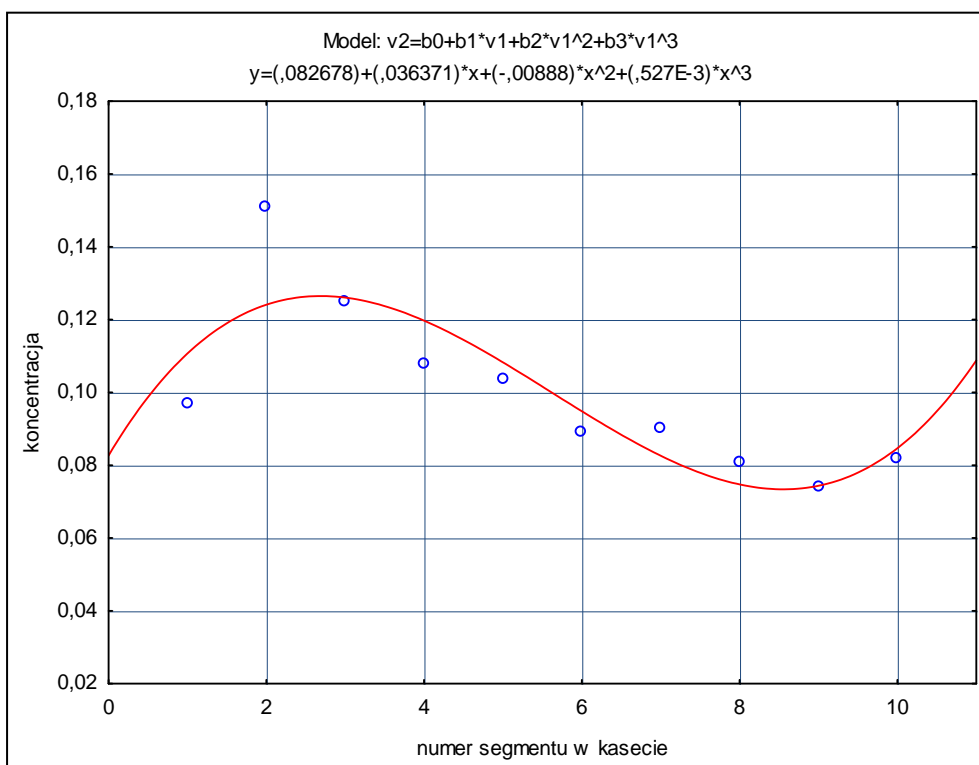
Rys. 59. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 10 elementów mieszających – wartości uśrednione



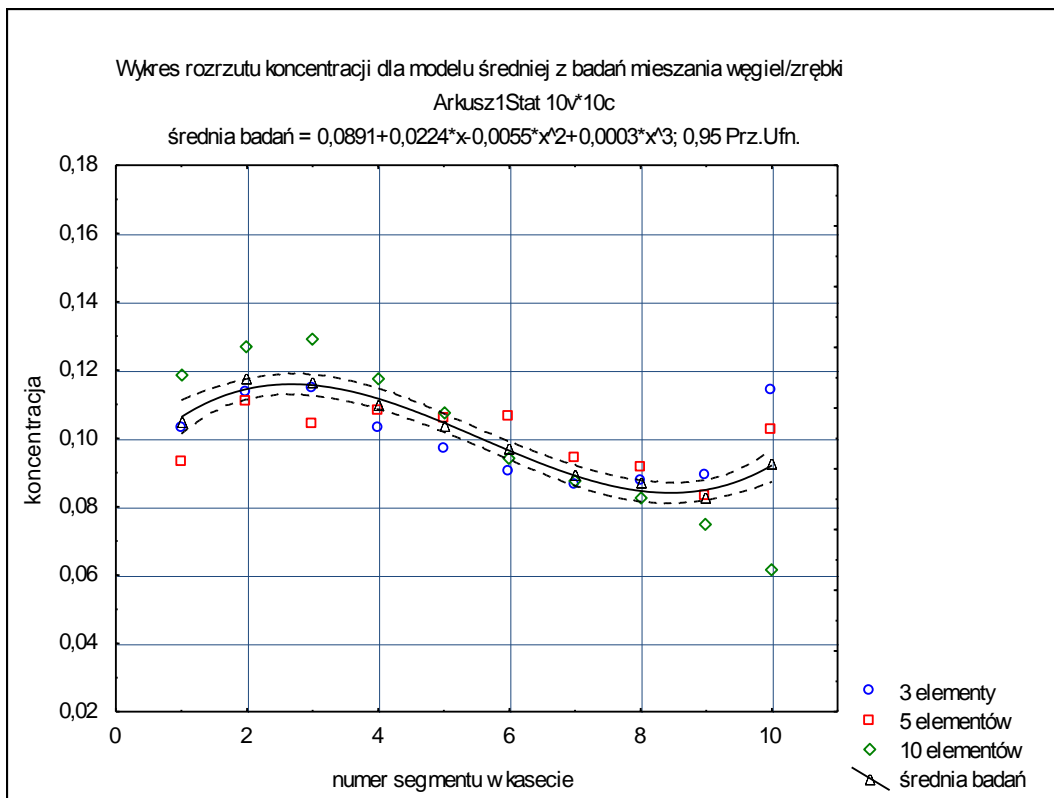
Rys. 60. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z peletem przy użyciu 3 elementów mieszających – wartości uśrednione



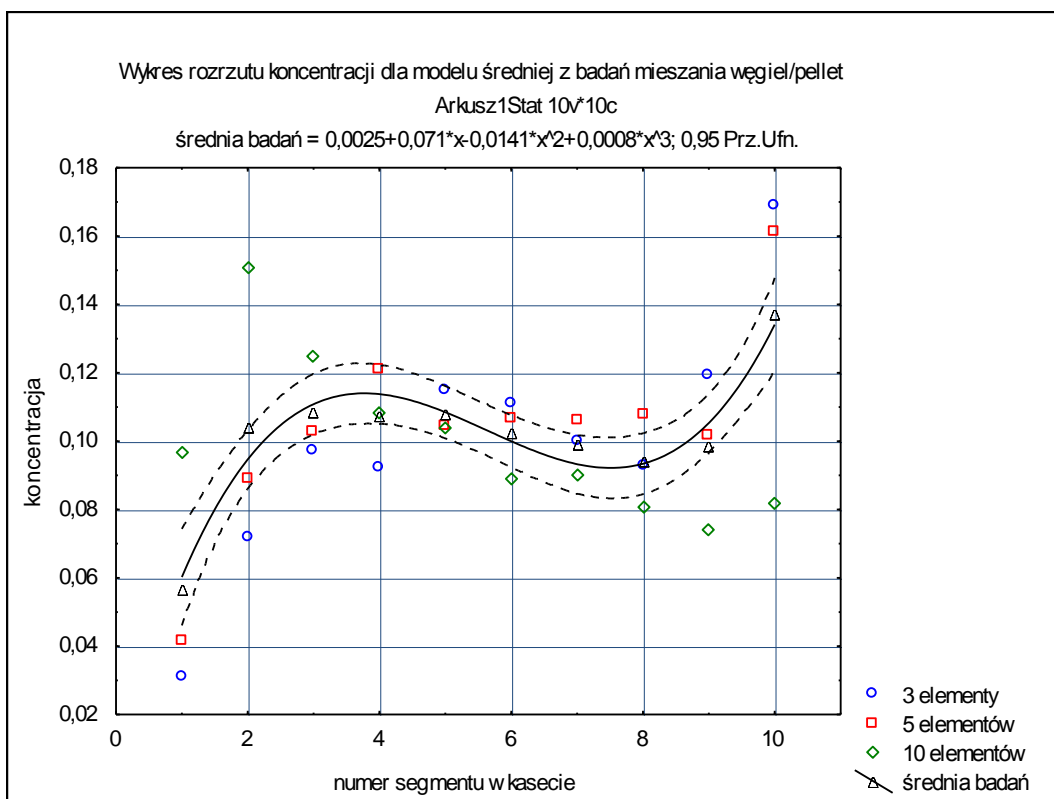
Rys. 61. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 5 elementów mieszających – wartości uśrednione



Rys.62. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 10 elementów mieszających – wartości uśrednione



Rys. 63. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami – średnia z badań



Rys. 64. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem – średnia z badań

Z analizy załączonych wykresów wynika, że funkcja potęgowa (wykładnicza) dobrze opisuje koncentrację traseru (biomasy) podczas procesu mieszania. Dotyczy to zarówno mieszania zrębek z węglem jak i pelletu z węglem. Zaproponowany model może zatem posłużyć do prognozowania zmian koncentracji traseru podczas mieszania w mieszalniku statycznym.

Zmiana koncentracji traseru odzwierciedlona jest w przekroju wszystkich segmentów kasety odbierającej.

Badania przeprowadzone w mieszalniku o skali przemysłowej potwierdzają możliwość zastosowania mieszalnika statycznego do produkcji mieszanek biomasy i węgla. Podczas mieszania składników rzeczywistych należy używać biomasy o wielkościach ziaren porównywalnych z ziarnami węgla, co przyczyni się do uzyskania odpowiedniej koncentracji biomasy w mieszaninie.

7. Wnioski końcowe

1. Mieszalnik statyczny można stosować do mieszania węgla z biomasą w postaci zrębek lub pelletów.
2. Konstrukcja mieszalnika wyklucza mieszanie składników bardzo wilgotnych, zbrylających się.
3. Zadowalającą koncentrację biomasy obserwuje się w środkowych segmentach kasety odbierającej, natomiast początkowe i końcowe segmenty zawierają biomasę o koncentracji odbiegającej od średniej.
4. Podczas pracy mieszalnika statycznego w warunkach przemysłowych może zachodzić konieczność powtórnego zmieszania początkowej i końcowej porcji mieszaniny.
5. Badana liczba elementów mieszających praktycznie nie ma wpływu na koncentrację biomasy po mieszanii. Rekomendowane jest zastosowanie co najmniej pięciu elementów mieszających. W przypadku mieszania węgla i zrębek możliwe jest zastosowanie trzech elementów mieszających.
6. Zaproponowany model procesu mieszania w postaci funkcji potęgowej (wykładniczej) dobrze odwzorowuje rzeczywisty proces mieszania.
7. W warunkach mieszania na skalę przemysłową w mieszalniku statycznym należy dążyć do tego, aby mieszane składniki zbyt nie różniły się wielkością. W przypadku mieszania miazu węgla kamiennego maksymalna wielkość ziaren biomasy nie powinna być większa niż 20 mm, czyli nie przekraczać maksymalnej wielkości ziaren węgla.

8. Literatura

1. Aczel A.D.: Statystyka w zarządzaniu. PWN Warszawa 2005.
2. Amara Ai Aissa, Duchesne C., Denis Rodrigue D.: Longitudinal segregation of polymer powder in a rotating cylinder. *Powder Technology* 207/2011 p. 324-334.
3. Anjani K. Jha, Virendra M. Puri J.: Percolation segregation of multisize and multi-component particle materials. *Powder Technology* 197/2010 p. 274-282.
4. Baddeley A.: Analyzing spatial point patterns in R. *Workshop Notes*. CSIRO 2008.
5. Bartnik R., Duczkowska-Kądział A.: Analiza porównawcza skojarzonej pracy bloku 370 MW w układzie gazowo-parowym dwupaliwowym z jednopaliwową elektrociepłownią gazowo-parową o takiej samej mocy cieplnej. *Energetyka* 8/2011. s. 467-473.
6. Błasiński H, Młodziński B.: Aparatura przemysłu chemicznego. WNT Warszawa 1983.
7. Borjesson P, Gustavsson L.: Regional production and utilization of biomass in Sweden. *Energy* Vol. 21 , No 29 p. 747-764.
8. Borowski G.: Zastosowanie komputerowej analizy obrazu do badań struktury brykietów z materiałów drobnoziarnistych. *Postępy Nauki i Techniki* 1/2007.
9. Boss J.: Mieszanie materiałów ziarnistych. PWN Warszawa 1987.
10. Boss J.: Czas mieszania materiałów ziarnistych. WSI Opolo 1991, *Studia i monografie WSI w Opolu* z. 33.
11. Boss J.: Węgrzyn M. Równowagowy stopień zmieszania niejednorodnych materiałów ziarnistych w daszkowym mieszalniku statycznym. *Inż. Chem. Proc.* 1991, T. 12 nr 3. S. 473-484.
12. Boss J., Krótkiewicz M., Tukiendorf M.: Porównanie metod oceny jakości stanu mieszaniny ziarnistej podczas mieszania w przesypie. *Inżynieria Rolnicza* nr 4(37)/2002 s. 27-32.
13. Bridgewater J.: Fundament Powder Mixing Mechanism. *Powder Technology* 15/1976 p. 215-236.
14. Buryń Z.: Dobór optymalnych struktur technologicznych przystosowujących zawodowe elektrownie węglowe do pracy skojarzonej. Praca doktorska. Politechnika Opolska. Wydział Mechaniczny 2010.
15. Buslik D.: Mixing and Sampling with Special Reference to Multi Size Granular Material, *ASTM Bulletin* (1950) 165, April, 66-73.
16. Cante J. Riera M.D., Oliver J.: Prado J.M., Isturiz A., Gonzales C.: Flow regime analyses during the fillings stage in powder metallurgy processes: experimental study and numerical modeling. *Granular Matter* 13/2011 p.79-92.

17. Chudzikiewicz R.: Współczynniki wariancji jako miara stopnia zmieszania mas formierskich, *Przegl. Odlewn. z. 7-8/1960* s. 212-218.
18. Chudzikiewicz R.: Statystyczna kontrola stopnia zmieszania mas sypkich. *Pomiary Automatyka Kontrola z. 5/1960* s. 185-187.
19. Chudzikiewicz R.: Mierzenie stopnia zmieszania mas formierskich, *Przegl. Odlewn. z. 5/1961* s. 141-146.
20. Dal Grande F, Santomaso A., Canu P.: Improving local measurements of binary mixtures by image analysis. *Powder Technology 187/2008* p. 205-213.
21. Danckwerts P.V.: The Definition and Measurement of Some Characteristic of Mixtures. *Appl. Sci. Res. No A3/1952* p. 279-296.
22. Demirbas A.: Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion & Management. 44 (2003)* p. 1465-1479.
23. Duczkowska-Kądział A.: Teoria grafów w procesie szacowania potencjału energetycznego biomasy. *Zeszyty Naukowe Politechnika Op. Mechanika nr 96. s.19-20.*
24. Duczkowska-Kądział A., Tańczuk M.: Możliwość wykorzystania grafów w procedurze szacowania potencjału energetycznego biomasy. *Zeszyty Naukowe Politechnika Op. Nr 331/2009.*
25. Fan L.T., Chen Yi-Ming, Lai. F.S.: Recent Developments in Solid Mixing. *Powder Technology 61/1990* p. 255-287.
26. Frączek J., Mudryk K., Wróbel M.: Nakłady energetyczne w procesie mielenia zrębków wierzby *Salix viminalis*. *Inżynieria Rolnicza. Nr 4/2010 (122).* s. 43-49.
27. Granada E., Lareo G., Miguez J., Moran J., Porteiro J., Ortiz L.: Feasibility study of forest residue use as fuel through co-firing with pellet. *Biomass and Bioenergy 30 (2006)* p. 238-246.
28. Golec T., Remiszewski K., Świątkowski B., Teszrowski M.: Palniki pyłowe na biomasę. *Energetyka 5/2007* s. 375-382.
29. Harnby N.: A Comparison of the Performance of Industrial Solids Mixers Using Segregating Materials. *Powder Technology 1/1967* p. 94-102.
30. Haydar A., Gokhan B., Stein S.: Analysis of the influence of crushing on the behavior of granular materials under shear. *Granular Matter 11/2009* p. 87-97.
31. Hughes E.: Biomass cofiring: economics, policy and opportunities. *Biomass & Bioenergy, 19/2000* p. 457-465.
32. Karcz H., Kantorek M., Krzysztof M., Folga K., Kubiak J., Szczepaniak S.: Wpływ sposobu podawania biomasy na sprawność termiczną kotła rusztowego. *Zeszyty*

- Naukowe. Ciepne maszyny przepływowe. Politechnika Łódzka nr 132/2007, s. 111-122.
33. Klonecki W.: Statystyka dla inżynierów. PWN Warszawa 1999.
 34. Knapik A.: Analiza procesu mieszania niejednorodnych materiałów ziarnistych w mieszalnikach statycznych. Rozprawa doktorska. Opole 1985.
 35. Kotowicz J., Bartela J.: Energetyczne wykorzystanie biomasy drzewnej – przegląd technologii. Rynek Energii 6/2007.
 36. Kotowski W., Konopka E.: Miejsce biomasy drzewnej w procesie pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. Energetyka 7/2006 s. 532-536.
 37. Kotowski W.: Odpady zastąpią biomasę. Energia Gigawat 06/2009.
 38. Kranz M., Zhang H., Zhu J.: Characterization of power flow: Static and dynamic testing. Powder Technology 194/2009 p. 239-245.
 39. Krótkiewicz M., Tukiendorf M.: Metoda analizy obrazów w klasyfikacji mieszanin wielofazowych. Inżynieria Rolnicza nr 12(54)/2003 s. 177-184.
 40. Krótkiewicz M.: Materiały Seminarium pt. Transfer nowoczesnych technologii informatycznych. Politechnika Opolska 2011.
 41. Kruczek H., Miller R., Tatarek A.: Spalanie i współspalanie biomasy – korzyści i zagrożenia. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 3/2003, s. 13-19
 42. Kubski P.: Ciepłownia geotermalna w Stargardzie Szczecińskim i jej upadek. Instal 2/2008.
 43. Kwinta W.: Geotermia bez większych perspektyw. Polska Energia 9/2009.
 44. Lacey P.M.C.: The Mixing of Solid Particles. Trans. Inst. Chem. Engrs. Nr. 21/1943. p. 53-59.
 45. Lacey P.M.C.: Developments in the Theory of Particle Mixing. J. Appl. Chem. 4 May 1954. p. 257-268.
 46. Liszka M., Majchrzak H.: Analiza efektów ekologicznych w procesie współspalania węgla i biomasy na przykładzie Elektrowni Opole. Energetyka 3/2005, s. 133-140.
 47. Malina W., Ablameyko S., Pawlak W.: Podstawy cyfrowego przetwarzania obrazów. WPT Kraków 1997.
 48. Mańkowski S., Chorzelski M.: Węgiel w ciepłownictwie – paliwo przeszłości czy przyszłości. Przegląd Energetyczny nr 3/2007. s. 40-42.
 49. Miller U.: Praktyczne aspekty spalania biomasy w kotłach rusztowych. Doświadczenia eksploatacyjne na przykładzie współspalania biomasy w kotle WR-10 w ciepłowni DPM w Koszalinie. www.wbis.tu.koszalin.pl.
 50. Moryń-Kucharczyk E., Gnatowska R.: Wykorzystanie lokalnych zasobów energii odnawialnej a rozwój społeczno-gospodarczy gminy. Energetyka 12/211. s 848-852.

51. Muereza S., Berthiaux H., Massol-Chadeur S., Thomas G.: A dynamic study of static mixing using on line image analysis. *Powder Technology* 128/2002 p. 195-204.
52. Narayanan K.V., Natarajan E.: Cofiring of Coal and Biomass In a Travelling Grate Boiler In India. *Journal of Applied Sciences* 6 (9): 1924-1928, 2006.
53. Nowak R.: *Statystyka dla fizyków*. PWN Warszawa 2002.
54. Olszowiec P.: Wykorzystanie biopaliw, spalanie biomasy bardziej szkodzi niż pomaga. *Energia Gigawat* 07/2007.
55. Onuegba T.U., Ogbu J.M., Ilochi N.O., Ekponobi E., Ogbuangu A.S.: Enhancing the Properties of Coal Briquette Rusing Spear Grass (*Imperata Cylindrica*). *Leonardo Journal of Science*. No. 17, July-December 2010. p. 43-57.
56. Owczarek W.: Ocena modeli matematycznych stopnia zmieszania cieczy w mieszalnikach statycznych. *Rozprawa doktorska IICH Politechniki Łódzkiej* 1982.
57. Perng A.T.H., Capart H., Chon H.T.: Granular configuration, motions and correlation in slow uniform flows driven by an inclined conveyor belt. *Granular Matter* 8/2006 p. 5-17.
58. Perrin R., Vogel K., Schmerr M., Mitchell R.: Farm Scale Production Costs of Switchgrass for Biomass. *Bioenergy Res.* (2008) p. 91-97.
59. Poskrobko S., Łach J.: Efektywność pracy kotła rusztowego opalanego biomasą. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Konferencje 2003*, z 27 s. 289-300.
60. Poux M, Fayolle P., Bertrand J., Bridoux D., Bousquet J.: Powder mixing: some practical rules applied to agitated systems. *Powder Technology* 68/1991 p. 213-234.
61. Rose H.E.: A Suggested Equation Relating to the Mixing of Powders and Its Application to the Study of the Performance of Certain Types of Machine. *Trans. Inst. Chem. Engrs.* Nr. 37/1943 s. 47-64.
62. Roseman B.: Mixing of Solids. *Ind. Chem* (1963) 39, Febr. 84-89.
63. Róg L.: Wpływ parametrów jakościowych węgla na efektywność jego spalania. *Materiały Konferencji GIG Katowice 2010*.
64. Sondreal E., Benson S., Hurley J., Mann J., Pavlish J., Swanson M., Weber G., Zygarlicke Ch.: Review of advances in combustion technology and biomass cofiring. *Fuel Processing Technology* 71 (2001). p. 7-38.
65. Stange K.: Beurteilung von Mischgeraeten mit Hilfe statischen Verfahren, *Chem.-Ing.-Tech.* (1954) 26, No 3, 150-155.
66. Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki w oparciu o program STATISTICA PL na przykładach z medycyny*. StatSoft Polska Kraków 2001.
67. Stolarski M, Szczukowski S., Tworowski J.: Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych. *Energetyka* 01/2008. s. 77-80

68. Stręć F.: Mieszanie i mieszalniki. WNT Warszawa 1981.
69. Szargut J.: Teoria procesów cieplnych. PWN 1973.
70. Sztyber J. Przechowywanie zrębków drzewnych w stosach. *Czysta energia* 3/2005. s. 29-31.
71. Szwedziak K., Biłos Ł.: Ocena mieszaniny niejednorodnej z biomasą za pomocą komputerowej akwizycji obrazu. *Inżynieria Rolnicza* nr 6(104)/2008. s. 145-201.
72. Szymanowicz R.: Wytwarzanie energii odnawialnej w procesie wspólnego spalania biomasy i węgla. Warunki pracy kotłów w świetle wyników badań. *Energetyka*, 10/2007. s. 64-71.
73. Szymanowicz R.: Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych w procesie spalania mieszanego paliwa wtórnego zawierającego biomasę. *Energetyka* 5/2011. s. 298-305.
74. Tadeusiewicz R., Korohoda P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów. WPT Kraków 1997.
75. Too J.R., Robinson, Fan L.T., Lai F.S.: Studies on Multicomponent Solid Mixing and Mixtures. II Estimation of Mixing Index and Contact Number by Spot Sampling of Multicomponent Mixture in an Incompletely Mixed State. *Powder Technology* 23/1979. p. 99-113.
76. Tukiendorf M, Węgrzyn M.: Badania segregacji zachodzącej w silosie magazynowym proszku gotowego. Praca niepublikowana 2000 r.
77. Tukiendorf M.: Zagadnienie rozkładu koncentracji składników niejednorodnej mieszaniny ziarnistej podczas mieszania w przesypie. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* nr 4/2002. s. 139-140.
78. Tukiendorf M., Boss J., Krótkiewicz M.: An application of picture analysis as a method of evaluation of granular blend's quality". *Polish journal of Food and Nutrition Sciences*. Vol 12/53. No. 2 2003 p. 27-30.
79. Wandrasz A.J., Wandrasz J.W.: Paliwa formowane jako odnawialne źródła energii. *Instal* nr 6/2009.
80. Węgrzyn M.: Maksymalny równowagowy stopień zmieszania niejednorodnych materiałów ziarnistych w mieszalniku statycznym. Rozprawa doktorska. Opole 1987.
81. Węgrzyn M.: Analiza procesu ciągłego mieszania w wybranych mieszalnikach statycznych. *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1/2005. s. 75-80.
82. Wiszniewski A., Bonder L., Mirosz M.: Prawne, organizacyjne i ekonomiczne aspekty wykorzystania biopaliw stałych w ciepłownictwie. *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja* nr 4/2008. s. 10-13.
83. Witczak S., Jósko E.: Analiza systemów transportu pneumatycznego materiałów sypkich. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2010 nr 2. s. 30-31.

84. Wycisk A., Klimanek K., Robak J., Robak Z.: Efektywność prototypowego mieszalnika paliw stałych. KARBO 4/2006. s. 241-248.
85. Yano T, Aratani T, Tereshita K.: Computer simulation of mixers and mechanism. Monte Carlo simulation of the degree of mixedness in a conical screw mixers and separation phenomena in the mixing process. Dechema Monogr. 66 (1977) 177.
86. Zamorska –Woyda D., Hołtra A., Sitarska M.: Pozyskiwanie energii z fitomasy - teoria a polska rzeczywistość. Energetyka 09/2011. s. 579-584.
87. Zulfigar M., Moghtadei B., Wall T.: Flow properties of biomass and coal blends. Fuel Processing Technology. 87 (2006). p. 281-288.
88. Zuwała J.: Zagrożenie pożarowe towarzyszące spalaniu i współspalaniu biomasy w energetyce. www.wnp.pl.
89. Zuwała J.: Wpływ współspalania biomasy z paliwami konwencjonalnymi na parametry eksploatacyjne pracy bloków energetycznych. Energetyka 2/2010. s. 108-114.
90. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14.08.2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczania opłaty zastępczej oraz zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzenia danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii. (Dz.U. nr 156, poz. 969 z 2008r, Dz.U. nr 34, poz.182 z 2010r.).
91. Polityka energetyczna Polski do 2030 r. Załącznik do uchwały nr 2002/2009 Rady Ministrów z 10.11.2009 r.
92. Ustawa z dnia 26.10.2011 o giełdach towarowych. Dz.U. 2000. nr 103 poz. 1099 z późniejszymi zmianami.
93. Ustawa z dnia 10.04.1997 Prawo energetyczne. Dz.U. 1997. nr 57 poz. 348 z późniejszymi zmianami.
94. Patent PRL 130 961.
95. PN-90/G-04502.
96. PN-ISO 18283.
97. PN-80/C-045321. Oznaczanie gęstości nasypowej.
98. PN-71/C-04501. Analiza sitowa – wytyczne wykonywania.
99. PN-91/D/95009. Surowiec drzewny – zrębki leśne.
100. www.innofreight.com.
101. www.radwag.pl.
102. www.zamer.com.pl.
103. www.pse-operator.pl. Raport roczny 2010r.

9. Spis rysunków

Rys. 1. Kontenery do przewozu materiałów sypkich np. zrębki, pellet (zdj. własne).....	16
Rys. 2. Stacja mieszania MWD.....	19
Rys. 3. Stacja mieszania MWD-2.....	20
Rys. 4. Stacja mieszania MWD-2.....	21
Rys. 5. Kocioł rusztowy WR-15.....	21
Rys. 6. Mieszalnik bębnowy [9].....	26
Rys. 7. Mieszalnik z komorą nieruchomą [9].....	26
Rys. 8. Usypywanie hałdy [9], system : a) warstwowy, b) podłużny, c) daszkowy, d) rzędowy.....	27
Rys. 9. Podłużne usypywanie hałdy [9].....	28
Rys. 10. Umieszczenie mieszalników statycznych w linii technologicznej [9].....	29
Rys. 11. Mieszalniki statyczne o przekroju kwadratowym: daszkowy i prętowy.....	30
Rys. 12. Układ ziaren w silosie a - segregacja wtórna w silosie, b - wkładki stożkowe rozdzielające strugę materiału	31
Rys. 13. Zdjęcie cyfrowe mieszaniny w formacie bmp.....	45
Rys. 14. Zdjęcie mieszaniny po binaryzacji.....	46
Rys. 15. Próg binaryzacji – „dolina” widoczna na histogramie.....	46
Rys. 16. Obraz o wysokim kontraście.....	47
Rys. 17. Obraz o niskim kontraście.....	47
Rys. 18. Model mieszalnika statycznego.....	49
Rys. 19. Widok mieszalnika przemysłowego.....	50
Rys. 20. Schemat stanowiska badawczego.....	51
Rys. 21. Pojedynczy element mieszający.....	52
Rys. 22. Kaseta odbierająca.....	53
Rys. 23. Pellety.....	54
Rys. 24. Zrębki.....	54
Rys. 25. Waga elektroniczna WLC/R/12/30C1/R.....	56
Rys. 26. Koncentracja pelletu w poszczególnych segmentach kasety odbierającej dla układu węgiel/zrębki i zrębki/węgiel.....	60
Rys. 27. Koncentracja zrębek w poszczególnych segmentach kasety odbierającej dla układu pellet/węgiel i zrębki/węgiel/pellet.....	60
Rys. 28. Znak potencjału segregacji Φ	61

Rys. 29. Przesyp bez elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej).....	65
Rys. 30. Przesyp z użyciem 10 elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej).....	66
Rys. 31. Przesyp z użyciem 3 elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej).....	67
Rys. 32. Przesyp z użyciem 5 elementów mieszających (numer segmentu kasety odbierającej).....	68
Rys. 33. Wysyp kominowy – pellet (numer segmentu kasety odbierającej).....	69
Rys. 34 Wysyp kominowy – zrębki (numer segmentu kasety odbierającej).....	70
Rys. 35. Interpretacja graficzna porównawczej analizy statystycznej koncentracji pelletów w zależności od liczby elementów mieszających.....	71
Rys. 36. Interpretacja graficzna porównawczej analizy statystycznej koncentracji zrębek w zależności od liczby elementów mieszających.....	72
Rys. 37. Porównanie wewnątrz serii dla 3 elementów mieszających.....	74
Rys. 38. Porównanie wewnątrz serii dla 5 elementów mieszających.....	74
Rys. 39. Porównanie wewnątrz serii dla 10 elementów mieszających.....	74
Rys. 40. Rozkład trasera: a - na obrazie binarnym, b – wynik binaryzacji na polach siatki.....	75
Rys. 41. Ocena intensywności wzorców punktowych dla wysypu kominowego pelletu.	76
Rys. 42. Ocena intensywności wzorców punktowych dla wysypu kominowego zrębek..	77
Rys. 43. Ocena intensywności wzorców punktowych dla przesypu grawitacyjnego pelletu.....	78
Rys. 44. Ocena intensywności wzorców punktowych dla przesypu grawitacyjnego zrębek.....	79
Rys. 45. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 1.....	83
Rys. 46. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 2.....	83
Rys. 47. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 1.....	85
Rys. 48. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 2.....	85
Rys. 49. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 1.....	87

Rys. 50. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 2.....	87
Rys. 51. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 1.....	89
Rys. 52. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 3 elementów mieszających – próba nr 2.....	89
Rys. 53. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 1.....	91
Rys. 54. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 5 elementów mieszających – próba nr 2.....	91
Rys. 55. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 1.....	93
Rys. 56. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 10 elementów mieszających – próba nr 2.....	93
Rys. 57. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 3 elementów mieszających – wartości uśrednione.....	95
Rys. 58. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 5 elementów mieszających – wartości uśrednione.....	95
Rys. 59. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami przy użyciu 10 elementów mieszających – wartości uśrednione.....	96
Rys. 60. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 3 elementów mieszających – wartości uśrednione.....	96
Rys. 61. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 5 elementów mieszających – wartości uśrednione.....	97
Rys. 62. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem przy użyciu 10 elementów mieszających – wartości uśrednione.....	97
Rys. 63. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla ze zrębkami – średnia z badań.....	98
Rys. 64. Przebieg funkcji otrzymanej w wyniku modelowania dla mieszania węgla z pelletem – średnia z badań.....	98

10.Spis tabel

Tab. 1. Analiza sitowa mialu węglowego. Badania własne.....	9
Tab. 2. Parametry biomasy [49].....	11
Tab. 3. Parametry biomasy [22].....	12
Tab. 4. Produkty spalania nośników energii [86].....	13
Tab. 5. Mechanizmy mieszania w różnych mieszalnikach [29].....	37
Tab. 6. Analiza wariancji.....	40
Tab. 7. Niektóre definicje stopnia zmieszania.....	41
Tab. 8. Parametry użytych materiałów ziarnistych.....	55
Tab. 9. Koncentracja biomasy.....	58
Tab. 10. Wyniki porównawczego testu Fishera (F) dla poziomu istotności $\alpha=0,05$	71
Tab. 11. Wyniki porównawczego testu Fishera (F) i testu t-Studenta (T) dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ (p).....	73
Tab. 12. Funkcje potęgowe trzeciego stopnia dla różnej liczby elementów mieszających	82
Tab. 13. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/zrębki i 3 elementów mieszających	84
Tab. 14. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/zrębki i 5 elementów mieszających	86
Tab. 15. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/zrębki i 10 elementów mieszających	88
Tab. 16. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/pellet i 3 elementów mieszających	90
Tab. 17. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/pellet i 5 elementów mieszających	92
Tab. 18. Parametry funkcji $v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2+b_3*v_1^3$ dla mieszania węgiel/pellet i 10 elementów mieszających	94

11. Spis załączników

Zał. 1. Koncentracje rzeczywiste i obliczone za pomocą modelu.....	112
Zał. 2. Koncentracje zrębek dla mieszania przy użyciu 3, 5 i 10 elementów mieszających.....	115
Zał. 3. Koncentracje pelletu dla mieszania przy użyciu 3, 5 i 10 elementów mieszających.....	116
Zał. 4. Koncentracje zrębek i pelletu dla wysypu bez użycia elementów mieszających.....	117
Zał. 5. Koncentracje zrębek i pelletu przy wysypie kominowym.....	117
Zał. 6. Koncentracje zrębek i pelletu przy mieszaniu zrębki/węgiel i pellet/węgiel...	118
Zał. 7. Koncentracje zrębek przy dwukrotnym przesypie.....	118

Zal. 1. Koncentracje rzeczywiste i obliczone za pomocą modelu

liczba el.	próba	pierścien	Dane(węgiel/zr.)	Model(węgiel/zr.)	Dane(węgiel/pel.)	Model(węgiel/pel.)
3	1	1	0,1070969085	0,1065661130	0,0370150015	0,0295942881
3	1	2	0,1094146138	0,1239917626	0,0613233607	0,0768788366
3	1	3	0,1520130927	0,1241831141	0,1071990141	0,1018006062
3	1	4	0,1083740114	0,1129415981	0,1048616718	0,1103585774
3	1	5	0,0880728043	0,0960686450	0,1291275339	0,1085517308
3	1	6	0,0733813902	0,0793656854	0,0928349836	0,1023790468
3	1	7	0,0615658228	0,0686341497	0,0990183163	0,0978395057
3	1	8	0,0798804253	0,0696754685	0,0863966682	0,1009320882
3	1	9	0,0974382261	0,0882910722	0,1313373847	0,1176557747
3	1	10	0,1227627048	0,1302823914	0,1508860652	0,1540095456
3	2	1	0,1049344727	0,1073656952	0,0538227649	0,0560799653
3	2	2	0,1159414441	0,1154210459	0,1038203129	0,1035983015
3	2	3	0,1221561961	0,1125952183	0,1329262910	0,1217171264
3	2	4	0,1014235414	0,1030291346	0,1087244373	0,1191450902
3	2	5	0,0763829336	0,0908637170	0,1073022412	0,1045908435
3	2	6	0,0813668419	0,0802398877	0,0761120102	0,0867630365
3	2	7	0,0881566602	0,0752985689	0,0831249080	0,0743703198
3	2	8	0,0759087561	0,0801806828	0,0826099750	0,0761213437
3	2	9	0,0973173660	0,0990271516	0,0931293218	0,1007247586
3	2	10	0,1364117879	0,1359788976	0,1584277377	0,1568892149
3	3	1	0,1208131187	0,1276217577	0,0303193205	0,0341649079
3	3	2	0,1322947415	0,1155634227	0,1000430061	0,0813376331
3	3	3	0,0965182654	0,1046914939	0,0893452317	0,1031880242
3	3	4	0,0951400981	0,0955966285	0,0878668960	0,1072125498
3	3	5	0,0804365438	0,0888694840	0,1010912805	0,1009076781
3	3	6	0,0883982531	0,0851007176	0,1297978712	0,0917698777
3	3	7	0,0861820112	0,0848809867	0,0802870659	0,0872956171
3	3	8	0,1045637821	0,0888009486	0,0815772498	0,0949813646
3	3	9	0,0783786049	0,0974512607	0,1150682722	0,1223235886
3	3	10	0,1172745812	0,1114225802	0,1846038060	0,1768187576
3	4	1	0,0792911837	0,0749686878	0,0030995419	-0,0067375886
3	4	2	0,0967359890	0,0938506728	0,0232054201	0,0330341468
3	4	3	0,0882072520	0,1069850205	0,0596593247	0,0640850339
3	4	4	0,1082144028	0,1148019226	0,0687110843	0,0879586423
3	4	5	0,1432604356	0,1177315711	0,1222536138	0,1061985413
3	4	6	0,1186574502	0,1162041575	0,1448555833	0,1203483004
3	4	7	0,1098531121	0,1106498737	0,1373124503	0,1319514890
3	4	8	0,0906280726	0,1014989115	0,1215953041	0,1425516765
3	4	9	0,0848404493	0,0891814626	0,1377787531	0,1536924324
3	4	10	0,0803116527	0,0741277187	0,1815289245	0,1669173259
5	1	1	0,0673011776	0,0646302050	0,0415253113	0,0473287239
5	1	2	0,0987336667	0,0988941553	0,0967155014	0,0864568996
5	1	3	0,1107194709	0,1186633330	0,1044671455	0,1075970636
5	1	4	0,1273269882	0,1265624662	0,1231544833	0,1151516266
5	1	5	0,1235118568	0,1252162830	0,1007903266	0,1135229995
5	1	6	0,1365139539	0,1172495115	0,1045619089	0,1071135928

5	1	7	0,0926439748	0,1052868796	0,1003544150	0,1003258175
5	1	8	0,0950314567	0,0919531154	0,1074806209	0,0975620843
5	1	9	0,0713744152	0,0798729470	0,1012262381	0,1032248038
5	1	10	0,0768430392	0,0716711024	0,1197240490	0,1217163869
5	2	1	0,1369636724	0,1347993859	0,0555964465	0,0552781364
5	2	2	0,1294099668	0,1374216665	0,0880847640	0,0870675672
5	2	3	0,1314985155	0,1310896714	0,0995874771	0,1049812862
5	2	4	0,1345549281	0,1187010989	0,1220451550	0,1122658633
5	2	5	0,1051260406	0,1031536468	0,1022406326	0,1121678682
5	2	6	0,0670154858	0,0873450132	0,1076325294	0,1079338707
5	2	7	0,0712362461	0,0741728961	0,1127847863	0,1028104408
5	2	8	0,0776183268	0,0665349935	0,0978415296	0,1000441483
5	2	9	0,0720585667	0,0673290036	0,0962838705	0,1028815629
5	2	10	0,0745182511	0,0794526242	0,1179028089	0,1145692545
5	3	1	0,0809233634	0,0815897933	0,0368356134	0,0456056024
5	3	2	0,0835599642	0,0800933889	0,1019286836	0,0874036862
5	3	3	0,0797156896	0,0861065934	0,1090210810	0,1105169580
5	3	4	0,1027905562	0,0965355364	0,1233880915	0,1192559305
5	3	5	0,1002922386	0,1082863473	0,1125392465	0,1179311161
5	3	6	0,1301982982	0,1182651556	0,0981722359	0,1108530273
5	3	7	0,1160196547	0,1233780908	0,0999663602	0,1023321768
5	3	8	0,1182598435	0,1205312824	0,1122308814	0,0966790770
5	3	9	0,1109584874	0,1066308598	0,1002887419	0,0982042406
5	3	10	0,0772819043	0,0785829527	0,1056290648	0,1112181800
5	4	1	0,0814729898	0,1073656952	0,0329164282	0,0317322919
5	4	2	0,0710047866	0,1154210459	0,0684487316	0,0720799293
5	4	3	0,1226620007	0,1125952183	0,0989672743	0,0967650907
5	4	4	0,1280419130	0,1030291346	0,1150303823	0,1093426834
5	4	5	0,1304050521	0,0908637170	0,1029183356	0,1133676146
5	4	6	0,1070652830	0,0802398877	0,1165154364	0,1123947914
5	4	7	0,1107457463	0,0752985689	0,1110384479	0,1099791212
5	4	8	0,1051345481	0,0801806828	0,1137496935	0,1096755110
5	4	9	0,0822271831	0,0990271516	0,1083272024	0,1150388681
5	4	10	0,0612404972	0,1359788976	0,1320880678	0,1296240997
10	1	1	0,1108359863	0,1073656952	0,0921510849	0,0997911270
10	1	2	0,1110718076	0,1154210459	0,1366193410	0,1195194125
10	1	3	0,1373658767	0,1125952183	0,1178676668	0,1251580282
10	1	4	0,1037613489	0,1030291346	0,1208143584	0,1205406704
10	1	5	0,1103053885	0,0908637170	0,1047414948	0,1095010358
10	1	6	0,0981016390	0,0802398877	0,0886686311	0,0958728209
10	1	7	0,0854852022	0,0752985689	0,0937583713	0,0834897221
10	1	8	0,0837165429	0,0801806828	0,0814358425	0,0761854360
10	1	9	0,0843060960	0,0990271516	0,0704527190	0,0777936590
10	1	10	0,0750501120	0,1359788976	0,0934904902	0,0921480878
10	2	1	0,1037834604	0,1108236300	0,1224436966	0,1357660675
10	2	2	0,1305518170	0,1223040010	0,1542842351	0,1287513422
10	2	3	0,1345895020	0,1261231225	0,1193373026	0,1196442636
10	2	4	0,1211305518	0,1236833609	0,0983691432	0,1094404716
10	2	5	0,1080454613	0,1163870827	0,0900854258	0,0991356059

10	2	6	0,0954090025	0,1056366541	0,0911208905	0,0897253062
10	2	7	0,1013907582	0,0928344416	0,0885322288	0,0822052125
10	2	8	0,0815014207	0,0793828116	0,0779187160	0,0775709644
10	2	9	0,0728278750	0,0666841305	0,0810251100	0,0768182018
10	2	10	0,0507701510	0,0561407646	0,0768832514	0,0809425645
10	3	1	0,1285783600	0,1306208446	0,0763232514	0,0967530101
10	3	2	0,1254245512	0,1218825056	0,1613894140	0,1239814536
10	3	3	0,1103024422	0,1157811071	0,1370510397	0,1331807061
10	3	4	0,1206534045	0,1112241917	0,1051512287	0,1289731146
10	3	5	0,1129710497	0,1071193019	0,1160207940	0,1159810261
10	3	6	0,0822416303	0,1023739806	0,0879017013	0,0988267874
10	3	7	0,0942907973	0,0958957703	0,0876654064	0,0821327455
10	3	8	0,1016496846	0,0865922135	0,0831758034	0,0705212473
10	3	9	0,0711628659	0,0733708531	0,0706521739	0,0686146397
10	3	10	0,0527252143	0,0551392315	0,0746691871	0,0810352697
10	4	1	0,1307160384	0,1323873072	0,0963814677	0,1104534436
10	4	2	0,1411257343	0,1385691715	0,1512512682	0,1241310377
10	4	3	0,1350286267	0,1344598905	0,1252113629	0,1262277190
10	4	4	0,1242471559	0,1230731807	0,1078796077	0,1199324559
10	4	5	0,0991151758	0,1074227587	0,1039905309	0,1084342167
10	4	6	0,1015688899	0,0905223409	0,0891951302	0,0949219700
10	4	7	0,0681091531	0,0753856440	0,0898714914	0,0825846842
10	4	8	0,0626812402	0,0650263844	0,0809097058	0,0746113277
10	4	9	0,0698936724	0,0624582787	0,0739770037	0,0741908688
10	4	10	0,0675143133	0,0706950434	0,0813324315	0,0845122762

Zal. 2. Koncentracje zrębek dla mieszania przy użyciu 3, 5 i 10 elementów mieszających

3 elementy mieszające

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	11,321	11,566	16,069	11,456	9,310	7,757	6,508	8,444	10,300	12,977
1	Koncentracja zrębek	0,107	0,109	0,152	0,108	0,088	0,073	0,062	0,080	0,097	0,123
2	Udział zrębek [%]	10,401	11,492	12,108	10,053	7,571	8,065	8,738	7,524	9,646	13,521
2	Koncentracja zrębek	0,105	0,116	0,122	0,101	0,076	0,081	0,088	0,076	0,097	0,136
3	Udział zrębek [%]	12,974	14,207	10,365	10,217	8,638	9,493	9,255	11,229	8,417	12,594
3	Koncentracja zrębek	0,121	0,132	0,097	0,095	0,080	0,088	0,086	0,105	0,078	0,117
4	Udział zrębek [%]	10,645	12,987	11,842	14,528	19,233	15,930	14,748	12,167	11,390	10,782
4	Koncentracja zrębek	0,079	0,097	0,088	0,108	0,143	0,119	0,110	0,091	0,085	0,080

5 elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	8,344	12,241	13,727	15,786	15,313	16,925	11,486	11,782	8,849	9,527
1	Koncentracja zrębek	0,067	0,099	0,111	0,127	0,124	0,137	0,093	0,095	0,071	0,077
2	Udział zrębek [%]	18,821	17,783	18,070	18,490	14,446	9,209	9,789	10,666	9,902	10,240
2	Koncentracja zrębek	0,137	0,129	0,131	0,135	0,105	0,067	0,071	0,078	0,072	0,075
3	Udział zrębek [%]	8,778	9,064	8,647	11,150	10,879	14,123	12,585	12,828	12,036	8,383
3	Koncentracja zrębek	0,081	0,084	0,080	0,103	0,100	0,130	0,116	0,118	0,111	0,077
4	Udział zrębek [%]	8,102	7,061	12,198	12,733	12,968	10,647	11,013	10,455	8,177	6,090
4	Koncentracja zrębek	0,081	0,071	0,123	0,128	0,130	0,107	0,111	0,105	0,082	0,061

10 elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	18,800	18,840	23,300	17,600	18,710	16,640	14,500	14,200	14,300	12,730
1	Koncentracja zrębek	0,111	0,111	0,137	0,104	0,110	0,098	0,085	0,084	0,084	0,075
2	Udział zrębek [%]	13,880	17,460	18,000	16,200	14,450	12,760	13,560	10,900	9,740	6,790
2	Koncentracja zrębek	0,104	0,131	0,135	0,121	0,108	0,095	0,101	0,082	0,073	0,051
3	Udział zrębek [%]	15,900	15,510	13,640	14,920	13,970	10,170	11,660	12,570	8,800	6,520
3	Koncentracja zrębek	0,129	0,125	0,110	0,121	0,113	0,082	0,094	0,102	0,071	0,053
4	Udział zrębek [%]	17,580	18,980	18,160	16,710	13,330	13,660	9,160	8,430	9,400	9,080
4	Koncentracja zrębek	0,131	0,141	0,135	0,124	0,099	0,102	0,068	0,063	0,070	0,068

Zał. 3. Koncentracje pelletu dla mieszania przy użyciu 3, 5 i 10 elementów mieszających

3 elementy mieszające

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział pelletu [%]	1,742	2,886	5,045	4,935	6,077	4,369	4,660	4,066	6,181	7,101
1	Koncentracja pelletu	0,037	0,061	0,107	0,105	0,129	0,093	0,099	0,086	0,131	0,151
2	Udział pelletu [%]	2,195	4,234	5,421	4,434	4,376	3,104	3,390	3,369	3,798	6,461
2	Koncentracja pelletu	0,054	0,104	0,133	0,109	0,107	0,076	0,083	0,083	0,093	0,158
3	Udział pelletu [%]	1,128	3,722	3,324	3,269	3,761	4,829	2,987	3,035	4,281	6,868
3	Koncentracja pelletu	0,030	0,100	0,089	0,088	0,101	0,130	0,080	0,082	0,115	0,185
4	Udział pelletu [%]	0,113	0,846	2,175	2,505	4,457	5,281	5,006	4,433	5,023	6,618
4	Koncentracja pelletu	0,003	0,023	0,060	0,069	0,122	0,145	0,137	0,122	0,138	0,182

5 elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział pelletu [%]	2,191	5,103	5,512	6,498	5,318	5,517	5,295	5,671	5,341	6,317
1	Koncentracja pelletu	0,042	0,097	0,104	0,123	0,101	0,105	0,100	0,107	0,101	0,120
2	Udział pelletu [%]	3,248	5,146	5,818	7,130	5,973	6,288	6,589	5,716	5,625	6,888
2	Koncentracja pelletu	0,056	0,088	0,100	0,122	0,102	0,108	0,113	0,098	0,096	0,118
3	Udział pelletu [%]	2,628	7,272	7,778	8,803	8,029	7,004	7,132	8,007	7,155	7,536
3	Koncentracja pelletu	0,037	0,102	0,109	0,123	0,113	0,098	0,100	0,112	0,100	0,106
4	Udział pelletu [%]	2,416	5,024	7,264	8,443	7,554	8,552	8,150	8,349	7,951	9,695
4	Koncentracja pelletu	0,033	0,068	0,099	0,115	0,103	0,117	0,111	0,114	0,108	0,132

10 elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział pelletu [%]	3,440	5,100	4,400	4,510	3,910	3,310	3,500	3,040	2,630	3,490
1	Koncentracja pelletu	0,092	0,137	0,118	0,121	0,105	0,089	0,094	0,081	0,070	0,093
2	Udział pelletu [%]	4,730	5,960	4,610	3,800	3,480	3,520	3,420	3,010	3,130	2,970
2	Koncentracja pelletu	0,122	0,154	0,119	0,098	0,090	0,091	0,089	0,078	0,081	0,077
3	Udział pelletu [%]	3,230	6,830	5,800	4,450	4,910	3,720	3,710	3,520	2,990	3,160
3	Koncentracja pelletu	0,076	0,161	0,137	0,105	0,116	0,088	0,088	0,083	0,071	0,075
4	Udział pelletu [%]	3,800	5,963	4,936	4,253	4,100	3,516	3,543	3,190	2,916	3,206
4	Koncentracja pelletu	0,096	0,151	0,125	0,108	0,104	0,089	0,090	0,081	0,074	0,081

Zal. 4. Koncentracje zrębek i pelletu dla wysypu bez użycia elementów mieszających

WĘGIEL/ZRĘBKI

Bez elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	15,153	12,809	15,642	15,093	12,470	9,593	9,412	8,034	7,189	7,390
1	Koncentracja zrębek	0,134	0,114	0,139	0,134	0,111	0,085	0,083	0,071	0,064	0,066
2	Udział zrębek [%]	12,740	12,033	11,554	12,564	9,241	6,667	8,153	7,212	5,248	6,050
2	Koncentracja zrębek	0,139	0,132	0,126	0,137	0,101	0,073	0,089	0,079	0,057	0,066

WĘGIEL/PELLET

Bez elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział pelletu [%]	7,093	7,056	6,843	6,334	8,371	10,198	7,476	2,712	2,093	1,012
1	Koncentracja pelletu	0,120	0,119	0,116	0,107	0,141	0,172	0,126	0,046	0,035	0,017
2	Udział pelletu [%]	5,911	5,607	3,998	5,373	5,286	2,611	2,021	0,725	0,801	0,731
2	Koncentracja pelletu	0,179	0,170	0,121	0,163	0,160	0,079	0,061	0,022	0,024	0,022

Zal. 5. Koncentracje zrębek i pelletu przy wysypie kominowym

WĘGIEL/ZRĘBKI

Wysp kominowy

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	7,300	11,350	10,600	11,700	10,960	10,380	12,160	8,150	2,600	2,030
1	Koncentracja zrębek	0,084	0,130	0,122	0,134	0,126	0,119	0,139	0,093	0,030	0,023

WĘGIEL/PELLET

Wysp kominowy

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział pelletu [%]	5,220	6,850	12,560	8,820	9,620	6,730	6,060	4,280	2,260	3,520
1	Koncentracja pelletu	0,079	0,104	0,191	0,134	0,146	0,102	0,092	0,065	0,034	0,053

Zal. 6 Koncentracje zrębek i pelletu przy mieszaniu zrębki/węgiel i pellet/węgiel

ZRĘBKI/WĘGIEL

10 elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	17,590	20,460	17,660	18,370	13,450	13,060	12,200	10,940	3,370	3,400
1	Koncentracja zrębek	0,135	0,157	0,135	0,141	0,103	0,100	0,093	0,084	0,026	0,026
2	Udział zrębek [%]	17,680	16,950	18,750	14,130	13,110	13,570	11,080	4,760	2,940	2,870
2	Koncentracja zrębek	0,153	0,146	0,162	0,122	0,113	0,117	0,096	0,041	0,025	0,025
3	Udział zrębek [%]	19,110	21,170	18,980	19,730	17,990	13,220	13,110	8,470	7,740	7,930
3	Koncentracja zrębek	0,130	0,144	0,129	0,134	0,122	0,090	0,089	0,057	0,052	0,054

PELLET/WĘGIEL

10 elementów mieszających

Nr próby	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział pelletu [%]	2,530	3,610	5,380	5,540	5,680	5,780	4,020	4,040	2,750	1,830
1	Koncentracja pelletu	0,061	0,088	0,131	0,135	0,138	0,140	0,098	0,098	0,067	0,044
2	Udział pelletu [%]	2,150	3,570	5,840	5,940	7,180	6,050	6,770	5,190	4,560	2,190
2	Koncentracja pelletu	0,043	0,072	0,118	0,120	0,145	0,122	0,137	0,105	0,092	0,044
3	Udział pelletu [%]	3,950	4,530	4,270	4,630	4,260	4,870	6,100	4,690	3,060	1,730
3	Koncentracja pelletu	0,094	0,108	0,101	0,110	0,101	0,116	0,145	0,111	0,073	0,041

Zal. 7 Koncentracje zrębek przy dwukrotnym przesypie

ZRĘBKI/WĘGIEL –DWUKROTNY PRZESYP

10 elementów mieszających – próba nr 1

Krok nr	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	17,590	20,460	17,660	18,370	13,450	13,060	12,200	10,940	3,370	3,400
1	Koncentracja zrębek	0,135	0,157	0,135	0,141	0,103	0,100	0,093	0,084	0,026	0,026
2	Udział zrębek [%]	15,830	16,640	13,580	15,590	13,803	15,609	13,120	13,170	11,820	9,970
2	Koncentracja zrębek	0,114	0,120	0,098	0,112	0,099	0,112	0,094	0,095	0,085	0,072

10 elementów mieszających – próba nr 2

Krok nr	Nr kasety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Udział zrębek [%]	17,680	16,950	18,750	14,130	13,110	13,570	11,080	4,760	2,940	2,870
1	Koncentracja zrębek	0,153	0,146	0,162	0,122	0,113	0,117	0,096	0,041	0,025	0,025
2	Udział zrębek [%]	16,234	17,231	16,112	14,274	13,451	14,284	12,849	14,493	11,341	8,756
2	Koncentracja zrębek	0,117	0,124	0,116	0,103	0,097	0,103	0,092	0,104	0,082	0,063