

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.5>

Projekt budowy samojezdnego transportera cementu wykorzystywanego w technologii stabilizacji masowej

Krzysztof Nieśpiałowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Piotr Kanty – Menard Sp. z o.o.

Radosław Hanke – Menard Sp. z o.o.

Cezary Oziomek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Zbigniew Szkudlarek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Sebastian Janas – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Rosnąca potrzeba budowy obiektów na bardzo słabych gruntach wymusza stosowanie wzmocnienia podłoża gruntowego. Jedną z nowych technologii na rynku polskim jest stabilizacja masowa. Aby efektywnie wykonywać wzmocnienie podłoża według tej technologii konieczne jest posiadanie specjalistycznego sprzętu. Odpowiedzią na tę potrzebę jest projekt naukowy, w którym jednym z aspektów jest budowa samojezdnego transportera cementu przeznaczonego do zastosowania w tej technologii. Opis wyników współpracy Instytutu Naukowego oraz firmy z sektora przemysłu zawarto w niniejszym rozdziale. Przedstawiono także założenia do projektu wynikające z aspektów geotechnicznych, opisano aspekty innowacyjne oraz badania przeprowadzone w ramach projektu, a także zaprojektowany transporter pod kątem mechanicznym, hydraulicznym, pneumatycznym oraz elektronicznym.

Słowa kluczowe: solidyfikacja, mieszanie gruntu, transport pneumatyczny

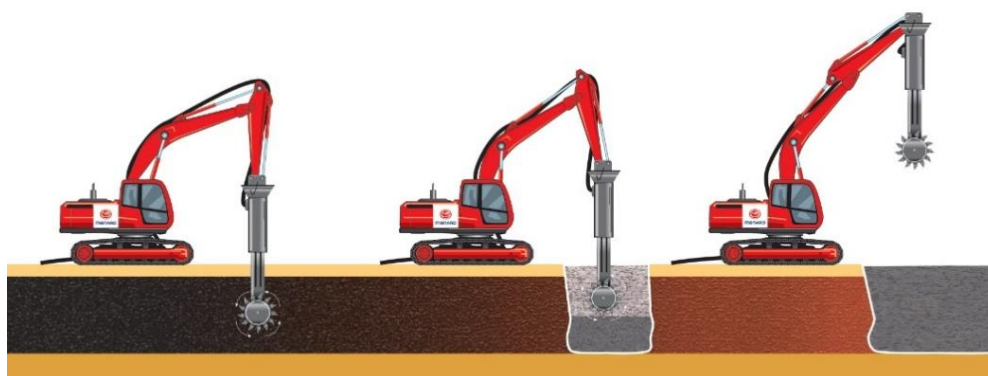
A project to build a self-propelled cement transporter used in mass mixing technology

Abstract: The growing need to build facilities on very weak soils forces the use of ground improvement. One of the new technologies on the Polish market is mass stabilization (mass mixing). In order to effectively perform soil strengthening in this technology, it is necessary to use specialized equipment. The answer to this need is a scientific project, in which one of the aspects is the construction of a self-propelled cement transporter intended for use in this technic. The description of the results of cooperation between the Scientific Institute and Company from the Industry sector is described in this paper. The paper describes the assumptions for the project resulting from geotechnical aspects, describes the innovative aspects and research carried out as part of the project, as well as the designed transporter in terms of mechanical, hydraulic, pneumatic and electronic.

Keywords: mass mixing, soil mixing, pneumatic transport

1. Wprowadzenie

Stabilizacja masowa, nazywana inaczej solidyfikacją, to technologia wzmocniania podłoża gruntowego, która opiera się na poprawie właściwości wytrzymałościowych gruntu poprzez wymieszanie go z czynnikiem wiążącym. Jest to z reguły wzmocnienie typu objętościowego, którego celem jest poprawa parametrów mechanicznych i odkształceniowych gruntu. Metoda polega na wprowadzeniu w podłoże mieszadła o specjalnej konstrukcji, które niszczy strukturę gruntu oraz miesza go z podawaną w tym samym czasie substancją wiążącą (rys. 1) [1].



Rys. 1. Schemat wzmocniania podłoża metodą solidyfikacji [1]

Stabilizację masową należy podzielić na dwa rodzaje, solidyfikację na mokro (wet mixing) oraz solidyfikację na sucho (dry mixing). W niniejszym rozdziale skupiono się na drugim rodzaju.

Solidyfikacja na sucho polega na mieszaniu gruntu z czynnikiem wiążącym (np. cementem, popiołem, mieszaninami cementowo-popiołowymi) bez dodatkowego udziału wody. Taki zabieg jest możliwy, gdyż woda jest obecna w dużej ilości w gruntach podlegających mieszaniu (wilgotność naturalna gruntów mieszanych powinna być większa niż 60%). Zabieg ten pozwala na osuszenie gruntu, wywołanie procesu hydratacji, a następnie związanie spoiwa z gruntem. Technologię stosuje się do wzmocniania gruntów organicznych oraz spoistych o małej (<30 kPa) wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu. Ze strony geotechnicznej technologia ta jest dobrze opisana w Wytycznych [2]. Problematiczna jest strona mechaniczna, gdyż aby efektywnie i na wysokim poziomie jakościowym wzmocnić grunt, wymagane są wyspecjalizowane urządzenia, które wzajemnie współpracują. Należą do nich: głowica mieszająca, koparka z systemem monitorowania parametrów pracy, układ pneumatyczny podający spoiwo, zbiorniki na spoiwo. Firma Menard Sp. z o.o., w ramach rozwoju tej technologii, realizuje projekt badawczy współfinansowany przez NCBiR o numerze POIR.01.01.01-00-1084/19. W ramach tego projektu powstaje układ wspomnianych urządzeń, z których najważniejsze to mobilne zbiorniki na spoiwo z układem pneumatycznym, nazwane samojezdnym transporterem cementu.

2. Założenia do projektu

Bazując na doświadczeniu własnym opisanym m.in. w [3], określono założenia do projektu samojezdnego transportera cementu. Założenia te wynikają z aspektów geotechnicznych, mechanicznych oraz ekonomicznych. Aby innowacyjne urządzenie spełniało swoją rolę, musi charakteryzować się następującymi parametrami:

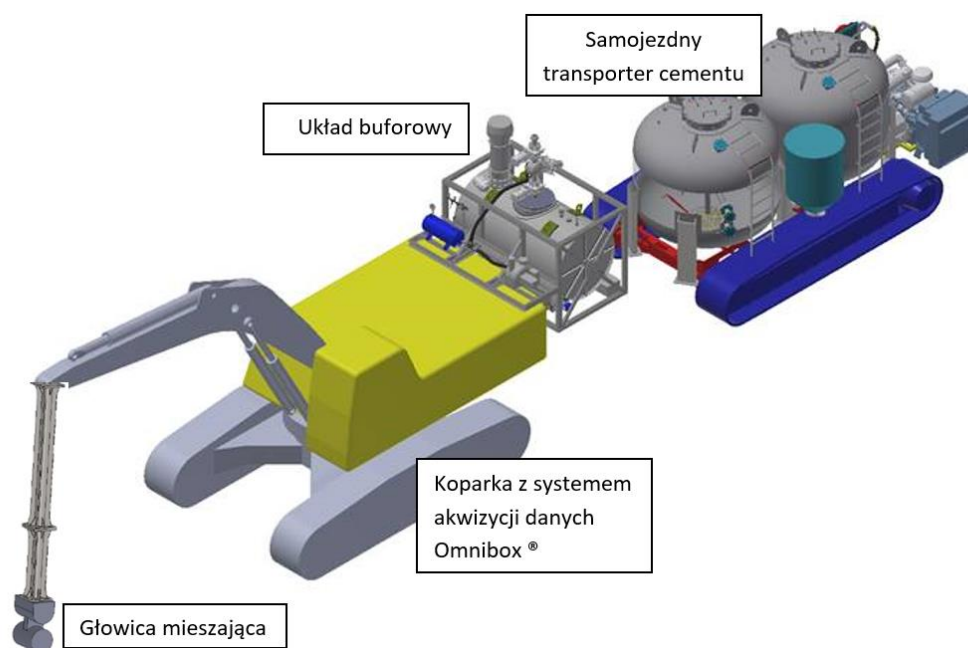
- objętość użyteczna dwóch stalowych zbiorników do składowania spoiw hydraulicznych: około $7 \text{ m}^3/\text{zbiornik}$ (łącznie 14 m^3),
- wydajność transportu pneumatycznego cementu: min. $10 \text{ m}^3/\text{h}$ (wynikająca z zakładanych wydajności pracy, tak aby technologia była ekonomicznie uzasadniona),
- ciśnienie obliczeniowe zbiorników: około $0,8 \text{ MPa}$,
- ciśnienie powietrza transportowego (minimalne ciśnienie pneumatyczne dla transportu na odległość wynoszącą 100 m): $0,2 \text{ MPa}$,

- ciśnienie powietrza transportowego (maksymalne ciśnienie pneumatyczne): 8 bar konieczne dla transportu pneumatycznego na odległości większe niż 50 m,
- konstrukcja podwozia dostosowana do poruszania się z prędkością do 5 km/h,
- konstrukcja podwozia przystosowana do poruszania się po nachyleniach od 0 do 20°,
- możliwość ciągłej pracy – zapewniona poprzez układ buforowy współpracujący z transporterem, który nie jest przedmiotem niniejszego rozdziału.

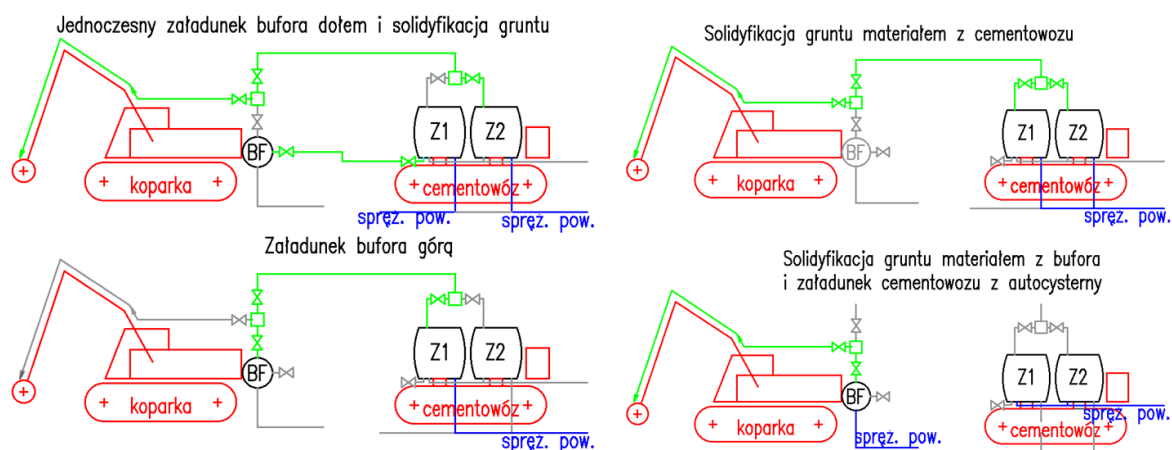
3. Współpraca transportera z innymi urządzeniami

Do wykonywania solidyfikacji wykorzystuje się koparki uzbrojone w głowice mieszające, które (z prędkością obrotową 80-100 min⁻¹) rozdrabniają i mieszają grunt. Koparka zapewnia możliwość stabilnej pracy w każdych warunkach, również na słabym podłożu gruntowym. Obowiązkowym elementem jest system akwizycji i prezentowania danych. W przypadku Menard Sp z o.o. używa się systemu Omnibox® [4]. Aplikacja w tym systemie została też wykonana w ramach ww. projektu do technologii solidyfikacji. Ostatnim elementem są zbiorniki na spoiwo oraz układ pneumatyczny. Wszystkie te urządzenia muszą być sterowane z poziomu kabiny operatora, tak aby on zarządzał całym procesem dozowania spoiwa i mieszania gruntu.

W autorskim rozwiązaniu, powstałym w projekcie, występuje dodatkowy element w postaci zbiornika buforowego na koparce (rys. 2). Zbiornik ten pozwala na zachowanie ciągłości pracy, kiedy zbiorniki samojezdnego transportera cementu są napełniane spoiwem. Taka budowa systemu pozwala na realizację czterech podstawowych scenariuszy pracy przedstawionych na rysunku 3. Stabilizacja masowa będzie mogła być wykonywana poprzez pneumatyczne podawanie spoiwa z cementowozu lub zbiornika buforowego. Ładowanie zbiornika buforowego będzie mogło odbywać się z autocysterny bądź z cementowozu. Ładowanie zbiorników cementowozu będzie możliwe podajnikiem ślimakowym przez właz górny oraz z autocysterny odpowiednim przyłączem. Pełna automatyka oraz opomiarowanie pozwolą na szybką zmianę schematu pracy.



Rys. 2. Elementy innowacyjnego systemu do solidyfikacji

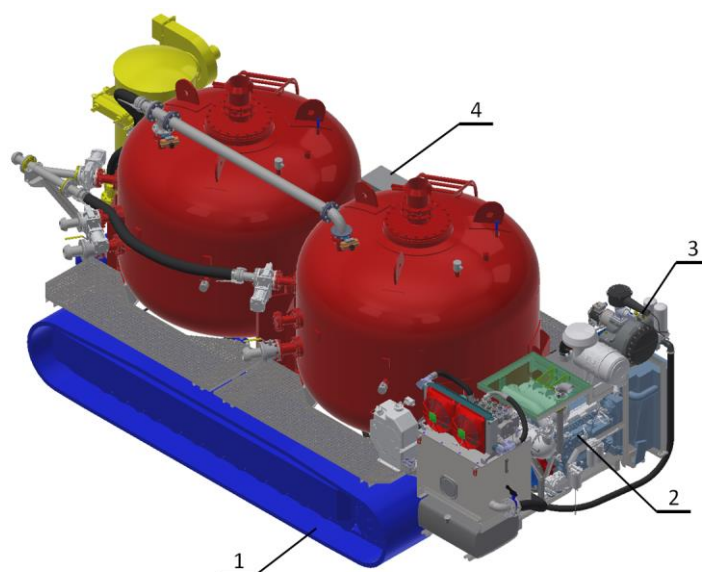


Rys. 3. Możliwe schematy pracy systemu do solidyfikacji

4. Budowa transportera

Transporter cementu jest maszyną samojezdną, umożliwiającą dostarczenie spoiwa w określone miejsce placu budowy. Spalinowo-hydrauliczna jednostka napędowa umożliwia poruszanie się maszynie w trudnym terenie budowy z założoną prędkością. Pneumatyczny system napełniania i opróżniania zbiorników daje sposobność transportu mieszanki cementowo-powietrznej z założoną wydajnością. Dzięki sterowaniu radiowemu, kierowanie maszyną oraz jej obsługa może odbywać się z bezpiecznego dla operatora miejsca z możliwością pełnej kontroli nad jej zachowaniem. Mając na uwadze powyższe, głównymi zespołami samojezdnego transportera cementu (rys. 4) są:

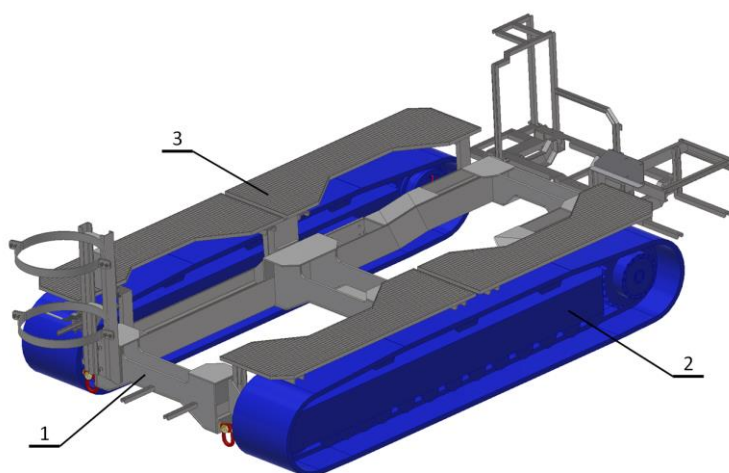
- zespół nośny (poz. 1),
- zespół napędowy (poz. 2),
- zespół pneumatyczny (poz. 3),
- układ sterowania (poz. 4.)



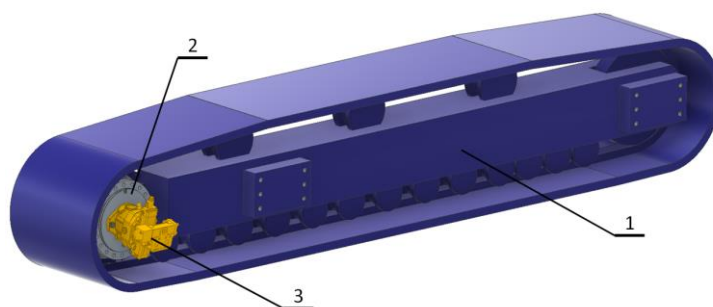
Rys. 4. Samojezdny transporter cementu – model 3D

4.1. Zespół nośny

Zespół nośny (rys. 5) stanowi połączenie stalowej ramy z wózkami gąsienicowymi. Rama jest tworem modułowym, złożonym z części nośnej oraz modułów przeznaczonych do zabudowy poszczególnych podzespołów (zespołu hydraulicznego, silnika spalinowego, sprężarek powietrza). Do części nośnej ramy mocowane są wózki gąsienicowe (rys. 6), które stanowią niezależne jednostki jezdne. Każdy z nich jest wyposażony w napęd hydrostatyczny, składający się z przekładni planetarnej, hamulca wielopłytkowego i silnika hydraulicznego. Hamulce automatycznie blokują gąsienice przy każdorazowym zaniku ciśnienia w hydraulicznym obiegu jazdy ładowarki. Do części nośnej ramy przytwierdzono podesty, umożliwiające bezpieczny dostęp do elementów wyposażenia transportera.



Rys. 5. Zespół nośny – model 3D: 1 - rama, 2 - wózek gąsienicowy, 3 - podest



Rys. 6. Wózek gąsienicowy – model 3D: 1 - wózek, 2 - przekładnia planetarna, 3 - silnik hydrauliczny

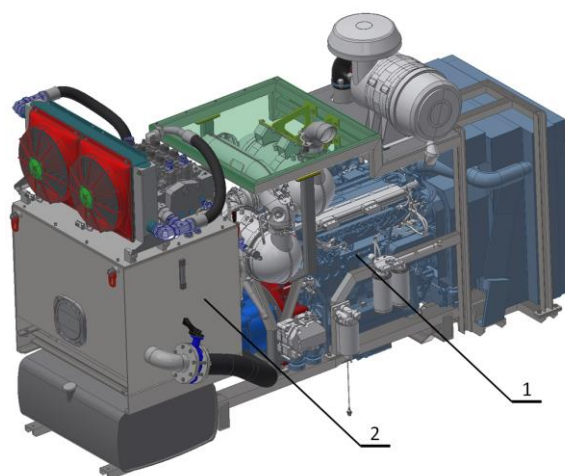
4.2. Zespół napędowy

Zespół napędowy (rys. 7) złożony jest z silnika spalinowego oraz zespołu hydraulicznego.

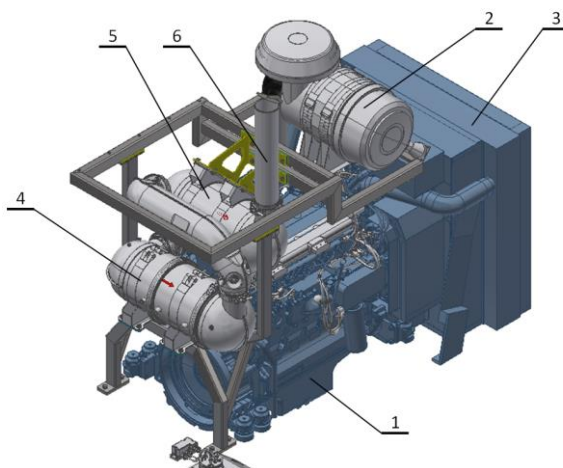
W samojezdnym transporterze cementu do napędu układów zespołu hydraulicznego zastosowano nowoczesny silnik turbodoładowany z zapłonem samoczynnym o mocy 160 kW (rys. 8). Silnik wyposażony jest w układ oczyszczania spalin, spełniający wymagania EU Stage V / US EPA Tier 4. Sterowanie silnikiem realizowane jest elektronicznie, poprzez jednostkę sterowniczą. Zastosowany w silniku układ zasilania typu common rail zapewnia dużą sprawność oraz wymaganą przepisami jakość spalin.

W układzie dolotowym silnika zastosowano dwustopniowy suchy filtr powietrza, zapewniający duży poziom filtracji. Zassane, oczyszczone przez filtr powietrze, zostaje sprężone przez sprężarkę i kierowane jest do chłodnicy, gdzie zostaje schłodzone. W dalszej części układu dolotowego kierowanie jest ono do poszczególnych cylindrów.

Za oczyszczenie i odprowadzenie spalin do atmosfery odpowiedzialny jest układ wylotowy wyposażony w katalityczny reaktor utleniający DOC, filtr cząstek stałych DPF oraz układ selektywnej redukcji katalitycznej SCR. Spaliny z komory spalania w pierwszej kolejności przepływają przez kolektor wylotowy oraz turbosprężarkę. Następnie kierowane są do reaktora DOC/DPF. W dalszej kolejności utlenione i oczyszczone z sadzy spaliny kierowane są do reaktora SCR, gdzie wraz z dozowanym do układu wylotowego wodnym roztworem mocznika (AdBlue) następuje redukcja NO_x.



Rys. 7. Zespół napędowy – model 3D: 1 - silnik spalinowy, 2 - zespół hydrauliczny



Rys. 8. Silnik spalinowy – model 3D: 1 - silnik spalinowy, 2 - filtr powietrza, 3 - chłodnica silnika, 4 – reaktor katalityczny DOC/DPF, 5 - reaktor katalityczny SCR, 6 - komin wylotowy

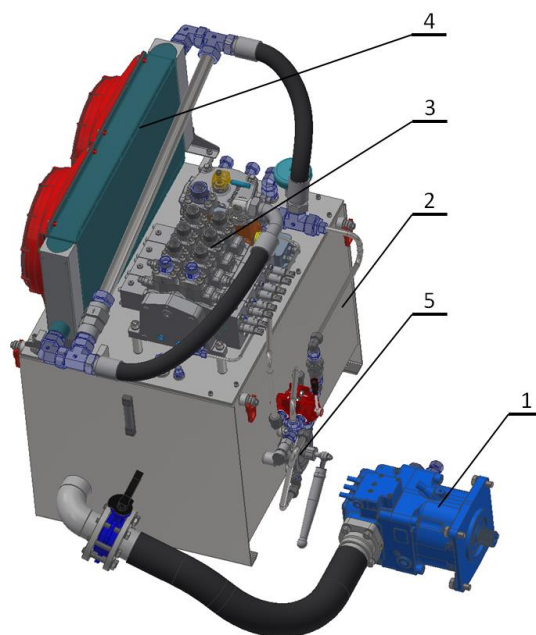
Zespół hydrauliczny (rys. 9) dostarcza medium robocze (olej hydrauliczny) pod wysokim ciśnieniem do odbiorników nim zasilanych. Tymi odbiornikami są silniki hydrauliczne napędów jazdy

oraz sprężarek powietrza. Konfiguracja zespołu umożliwia jednocześnie zasilanie albo silników napędowych układu jezdnego albo silników sprężarek.

Podstawowym komponentem zespołu hydraulicznego jest wielotłoczkowa pompa hydrauliczna zmiennego wydatku, napędzana, poprzez sprzęgło elastyczne, silnikiem spalinowym. W linii ssania wyposażona jest ona w pompę doładowującą, umożliwiającą pracę podczas zwiększonej prędkości obrotowej wału silnika napędowego. Taka kompletacja zapewni większy strumień tłoczonego oleju hydraulicznego. Zastosowane sterowanie LS (load sensing) reguluje wydatek pompy hydraulicznej zgodnie

z zapotrzebowaniem odbiorników, od wartości minimalnej do maksymalnej. Rozwiązanie to pozwoli uniknąć strat wynikających z grzania oleju, którego naddatek musiałby być odprowadzany przez zawory do zbiornika. Zachowanie maksymalnej energooszczędności zespołu hydraulicznego będzie skutkowało zmniejszeniem zużycia paliwa przez silnik spalinowy.

Za utrzymanie właściwej temperatury oleju hydraulicznego odpowiadać będzie chłodnica (rys. 9, poz. 4). Jest to jednostka wyposażona w dwa wentylatory, w którym medium chłodzącym jest powietrze. Zabudowana jest ona na zbiorniku oleju (rys. 9, poz. 2), na którym umieszczono również rozdzielacz hydrauliczny (rys. 9, poz. 3). Rozdzielacz jest dystrybutorem oleju do odbiorników. Na bocznej ścianie zbiornika zamocowana została pompa ręczna (rys. 9, poz. 5), która umożliwia jego zalewanie i opróżnianie bezpośrednio z/do beczki. Takie rozwiązanie uniemożliwia wprowadzanie zanieczyszczeń z otoczenia do układu hydraulicznego. Zanieczyszczenia te mogłyby powodować uszkodzenia komponentów zespołu.



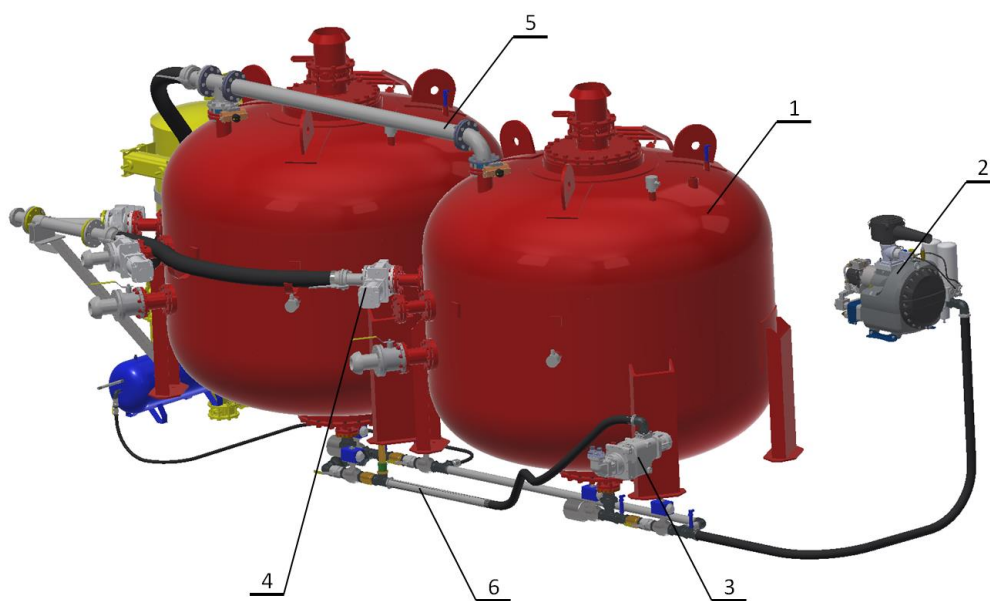
Rys. 9. Zespół hydrauliczny – model 3D: 1 - pompa hydrauliczna, 2 - zbiornik oleju, 3 - rozdzielacz hydrauliczny, 4 - chłodnica, 5 - pompa ręczna

4.3. Zespół pneumatyczny

Transport pneumatyczny jest procesem złożonym, który wymaga uwzględnienia wielu czynników mających wpływ na jego efektywność i trwałość instalacji. Zalicza się do nich prędkość transportu, stopień zagęszczenia transportowanego materiału i jego własności fizyczne. Zastosowanie dużych prędkości przepływu powoduje unoszenie pojedynczych cząsteczek materiału. W literaturze

obcojęzycznej [5, 6, 7, 8, 9] taki rodzaj transportu określany jest jako „dilute phase”, co w tłumaczeniu na j. polski oznacza transport fazy rozcieńczonej. Przytoczona metoda wymaga przepływu strumienia powietrza o dużej prędkości, co może wpływać niekorzystnie zarówno na transportowany materiał, jak i na samą instalację (erozja). Korzystniejszym rozwiązaniem wydawałby się zatem transport w fazie gęstej „dense phase”, z użyciem mniejszej prędkości przepływu gazu. Nie istnieje jednak metoda uniwersalna przy projektowaniu instalacji transportu pneumatycznego. Dlatego też, dla konstruktora najważniejszymi parametrami są opory przepływu oraz zapotrzebowanie powietrza do transportu, ponieważ na podstawie tych wielkości dobiera się urządzenie zasilające [10].

Zespół pneumatyczny transportera (rys. 10) zapewnia magazynowanie i transport materiału wiążącego (cementu) ze zbiorników wprost do dyszy głowicy urabiającej, bądź do zbiornika buforowego zainstalowanego na koparce. Zespół złożony jest z dwóch zbiorników, dwóch niezależnie pracujących kompresorów napędzanych hydraulicznie, układu przewodów pneumatycznych wraz z zaworami, zespołu transportu mieszaniny cementowo-powietrznej oraz zespołu rozprężania zbiorników. Sprężarki zasilają czystym powietrzem zbiorniki, dzięki czemu zespół pneumatyczny może jednocześnie napełniać zbiornik buforowy i podawać mieszanek cementowo-powietrzną do dyszy głowicy mieszającej. Taką pracę można zapewnić poprzez zastosowanie odpowiednio współpracujących ze sobą zaworów, będących na wyposażeniu zbiornika buforowego.



Rys. 10. Zespół pneumatyczny – model 3D: 1 - zbiornik cementu, 2, 3 - sprężarki powietrza, 4 - zespół transportu mieszaniny cementowo-powietrznej, 5 - zespół rozprężania zbiorników, 6 - rurociąg sprężonego powietrza

4.4. Układ sterowania

Układ sterowania nadzoruje prawidłową pracę całej maszyny. Jego sercem jest sterownik PLC (rys. 11), dedykowany do rozwiązań mobilnych. Umieszczony w szafie sterowniczej kontroluje pracę zaworów hydraulicznych odpowiadających za ruch maszyny. Komunikuje się z: odbiornikiem systemu zdalnego sterowania i pilotem przewodowym, ze sterownikiem silnika, panelem sterowniczym (rys. 12), jak również z bliźniaczym sterownikiem PLC, znajdującym się na koparce, odpowiadającym za pracę zaworów transportu pneumatycznego.

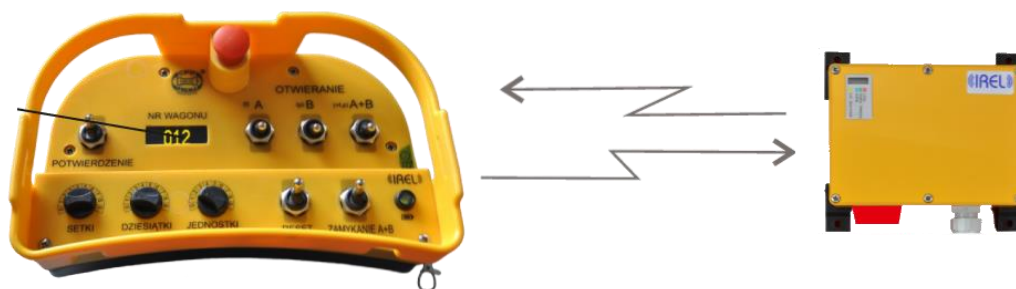


Rys. 11. Sterownik PLC Intercontrol Digsy Fusion G [11]



Rys. 12. Panel Intercontrol HMI 7LE [12]

Samojezdny transporter cementu to maszyna, której ruch jest kontrolowany za pomocą bezprzewodowego systemu zdalnego sterowania (rys. 13). System ten składa się z nadajnika i odbiornika. Komunikacja między nimi możliwa jest do odległości wynoszącej 100 m. Odbiornik, tak jak system sterowania, zasilany jest prądem o napięciu 24V DC oraz komunikuje się ze sterownikiem PLC za pośrednictwem magistrali CAN. Bezprzewodowa transmisja odbywa się w paśmie 433,05 MHz - 434,79 MHz.



Rys. 14. System sterowania radiowego IREL [13]

Nadajnik jest zasilany ze standardowych akumulatorów AA. W przypadku ich rozładowania (lub pracy w trybie serwisowym) możliwa jest kontrola maszyny za pomocą pilota przewodowego. Funkcje pilota są bliźniacze do funkcji radiowego nadajnika bezprzewodowego.

5. Podsumowanie

Rosnące zapotrzebowanie na szybkobieżną infrastrukturę drogową w Polsce i Europie generuje coraz większy popyt na budowę autostrad i dróg ekspresowych. Producenci maszyn drogowych i budowlanych dążą do ciągłej automatyzacji w zakresie budowy dróg, mającej na celu skrócenie czasu, a tym samym kosztów budowy nowych odcinków. Barięra stają się tereny, w których prowadzi się inwestycję. Często charakteryzują się one złożonymi warunkami geotechnicznymi, gdzie grunty cechują się niewielką wytrzymałością na ścinanie i względnie dużą ściśliwością. Metodą poprawy własności takich gruntów jest ich mieszanie z cementem [14, 15], natrykiwanym pneumatycznie za pomocą zagłębionej w gruncie głowicy iniekcyjnej. Wspomniana głowica zabudowana jest na ramieniu koparki. Problem stanowi zaopatrzenie koparki z głowicą w cement przeznaczony do mieszania gruntu. Koparki z głowicą mieszającą pracują często w dużym oddaleniu od zbiorników cementu, a transport kołowy (samochodowy) na placu budowy stanowi często duży problem, szczególnie przy niekorzystnych warunkach pogodowych. Generuje to konieczność gęstszego lokowania stacji zbiorników na cement, co przekłada się negatywnie na ekonomiczny bilans budowy.

Widząc potrzebę generowaną przez rynek maszyn drogowych, zauważono konieczność opracowania pojazdu przeznaczonego do transportu cementu. W związku z powyższym w ramach projektu współfinansowanego przez NCBiR (POIR.01.01.01-00-1084/19), opracowano rozwiązanie konstrukcyjne samojezdnego transportera cementu, przedstawione w niniejszym rozdziale. Przybliżono jego budowę, zwracając szczególną uwagę na główne podzespoły. Zastosowanie nowoczesnego silnika spalinowego spełniającego wymagania EU Stage V / US EPA Tier 4 wraz z energooszczędnym zespołem hydraulicznym wyposażonym w pompę zmiennego wydatku ze sterowaniem LS, zapobiega nadmiernemu zanieczyszczeniu powietrza produktami spalania paliwa. Wykorzystanie wózków gąsienicowych umożliwi pewne poruszenie się maszyny w trudnych warunkach placu budowy. Zastosowany w rozwiązaniu zespół pneumatyczny pozwoli na transport mieszanki cementowo-powietrznej z założoną wydajnością do głowicy mieszającej oraz zbiornika buforowego. Dzięki sterowaniu radiowemu, kierowanie maszyną oraz jej obsługa może odbywać się z bezpiecznego dla operatora miejsca z możliwością pełnej kontroli nad jej zachowaniem.

Literatura

1. <https://www.menard.pl/wp-content/uploads/Stabilizacja-masowa-jako-nowoczesna-metoda-wzmocnienia-gruntu.pdf> (dostęp: 30.09.2021)
2. Euro Soil Stab, 2002, Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for Soft Soil Stabilization. CT97-0351
3. Jendrysik K., Jończyk M., Kanty P.: Mass stabilization as a modern method of substrate strengthening. *Materials Today: Proceedings*, Volume 38, Part 4, 2021, Pages 2068-2072, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.143> (dostęp: 30.09.2021)
4. Bunieski S., Quandalle B.: A Practical Example of Data Exchange and Expert System Applied to Ground Improvement Works. *Materiały konferencyjne 3rd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering*, Sep. 29-02 Oct., 2019, Guimarães, Portugal
5. Wypych P., Hastie D., Yi, J.: Low-Velocity Pneumatic Conveying Technology for Plastic Pellets https://www.researchgate.net/profile/David_Hastie2/publication/273461552_Low-Velocity_Pneumatic_Conveying_Technology_for_Plastic_Pellets/links/5504283c0cf2d60c0e6566ae/Low-Velocity-Pneumatic-Conveying-Technology-for-Plastic-Pellets.pdf (dostęp: 30.09.2021)
6. Arakaki C., Ghaderi A., Datta B., Lie B.: Non-intrusive mass flow measurements in pneumatic transport. https://www.researchgate.net/publication/265302023_Nonintrusive_mass_flow_measurements_in_pneumatic_transport (dostęp: 30.09.2021)
7. Santos S., Tambourgi E., Fernandes F., Moraes D., Moraes M.: Dilute-phase pneumatic conveying of polystyrene particles: pressure drop curve and particle distribution over the pipe cross-section https://www.researchgate.net/publication/262745788_Dilute-phase_pneumatic_conveying_of_polystyrene_particles_Pressure_drop_curve_and_particle_distribution_over_the_pipe_cross-section (dostęp: 30.09.2021)
8. Kumar A., Pal K., Gupta S., Kaushal D.R.: CFD modeling for pressure drop in pneumatic conveying through pipe bend https://www.researchgate.net/publication/325091790_CFD_MODELING_FOR_PRESSURE_DROP_IN_PNEUMATIC_CONVEYING_THROUGH_PIPE_BEND (dostęp: 30.09.2021)
9. Datta K., Ratnayaka C., Saasen A., Bastesen Y.: A new design approach for pneumatic conveying https://www.researchgate.net/publication/329371083_A_New_Design_Approach_for_Pneumatic_Conveying_Systems (dostęp: 30.09.2021)

10. Włodarczyk K., Gierz Ł.: Transport ziarna rurociągiem pneumatycznym z wykorzystaniem wielostopniowych osiowych wzmacniaczy strumienia powietrza
http://www.pimr.poznan.pl/trol4_2015/KW4_2015.pdf (dostęp: 30.09.2021)
11. <https://www.intercontrol.de/en/off-highway-electronics/products/controller/mobile-controller-fusion-g/> (dostęp: 30.09.2021)
12. <https://www.intercontrol.de/tr/mobileelektronik/ueruenler/ekranlar/digsy-hmi-7-le/> (dostęp: 30.09.2021)
13. <https://irel.pl/pl/oferta/nadajniki-z-manipulatorami.html> (dostęp: 30.09.2021)
14. Masłowski E., Spiżewska D.: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych. Warszawa 2010
15. Łęcki P., Różański M.: Wzmacnianie podłoża gruntowego budowli drogowych. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2015, nr 2, s. 47–54