



FARSHAD RAJABIPOUR, *farshad@psu.edu*

Pennsylvania State University

PHILIP OOI, *ooi@eng.hawaii.edu*

University of Hawaii at Manoa

ALEKSANDRA RADLIŃSKA, *aleksandra.radlinska@villanova.edu*

Villanova University

## OCENA USZKODZEŃ NAWIERZCHNI PARKINGOWEJ NA PODBUDOWIE Z KRUSZYWA RECYKLINGOWANEGO

### ANALYSIS OF DISTRESSED PAVEMENT SUPPORTED ON A BASE COURSE CONTAINING RECYCLED AGGREGATE

**Streszczenie** W niniejszej pracy uszkodzona powierzchnia parkingu na wyspie Oahu (Hawaje) poddana została dokładnej analizie w celu ustalenia przyczyn awarii. Na konstrukcję parkingu składały się 51 mm nawierzchnia asfaltowa, 152 mm podbudowa składająca się w 50% z bazaltu, 25% z recyklingowanego asfaltu i w 25% z recyklingowanego betonu, posadowione na dwu metrowej warstwie piasku koralowego. W przeciągu dwóch lat od budowy parkingu zaobserwowano znaczną ilość wybrzuszeń o wysokości 25 mm i średnicy 127 mm. Odkrycie kolejnych warstw odsłoniło białą substancję w miejscach pod wybrzuszeniami. Aby zidentyfikować skład znalezionej substancji, wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) wyposażony w czujnik rozproszonej energii (EDS), użyto techniki dyfrakcji promieni rentgenowskich (XRD) oraz fotoakustycznego spektroskopu ramanowskiego. Badania pokazały, iż awaria nawierzchni spowodowana była powstawaniem bayerytu, niestabilnej formy gibbsytu  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , który był produktem korozji aluminium obecnego w zanieczyszczonym kruszywie recyklingowanym.

**Abstract** This paper presents a forensic investigation on the causes of deterioration of an open parking lot pavement in Oahu, Hawaii. The pavement was composed of a 51-mm-thick asphalt concrete which was supported on a 152-mm-thick base course containing 50% basalt, 25% reclaimed asphalt pavement (RAP) and 25% recycled concrete aggregates (RCA), overlying a 2-m-thick coralline sand layer. A significant number of eruptions (approximately 25 mm high and 127 mm in diameter) had formed within two years after construction. Excavation of pavement in the distressed area revealed formation of a white substance in considerable volumes underneath each eruption and within the base course. To identify its composition, analytical testing of the white substance was performed including scanning electron microscopy (SEM), x-ray energy dispersive spectroscopy (EDS), x-ray diffraction (XRD), and Raman spectroscopy. The results suggested that the cause for distress was the white substance primarily composed of bayerite, a metastable form of gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , which was the result of corrosion of aluminum present in recycled aggregate.

### 1. Wstęp

Wraz ze wzrostem zainteresowania rozwojem zrównoważonym infrastruktury na świecie, wzrasta zainteresowanie ponownym wykorzystaniem kruszywa odzyskanego w procesie recyklingu, jako recyklingowanego kruszywa betonowego; z ang. Recycled Concrete Aggregate, RCA, oraz recyklingowanego kruszywa asfaltowego, z ang. Reclaimed Asphalt Pavement, RAP. Kruszywa te nie tylko pozwalają wykorzystać materiał, który w innym

wypadku zostałyby składowany na wysypisku odpadów, ale także chronią naturalne zasoby materiałów na naszej planecie.

Pierwsze przykłady zainteresowania RCA w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej pojawiły się w latach 70-tych, ale wzmożone zainteresowanie zastosowaniem RCA nastąpiło dopiero w nowym milenium, kiedy to wzmożone zostały naciski organizacji rządowych i pozarządowych na uważne rozpatrzenie możliwości zastosowania betonu odzyskanego, jako kruszywa zastępującego kruszywo naturalne [1, 2]. Falę zainteresowania bardziej powszechnym zastosowaniem RCA przyniósł największy na świecie projekt wykorzystania betonu odzyskanego z rozbioru lotniska w Denver (Stapleton International Airport). Uzyskany w ten sposób materiał posłużył do budowy sąsiedniego osiedla mieszkaniowego (rys. 1).



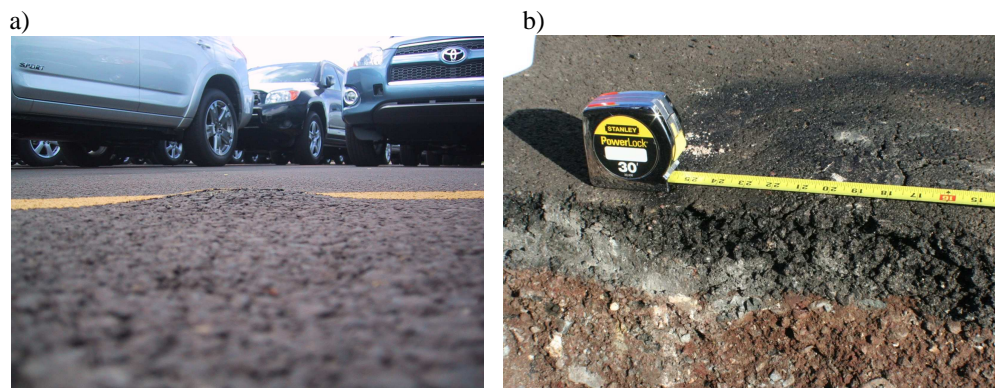
Rys. 1. Nieistniejące już lotnisko w Denver: a) widok betonowego pasa startowego lotniska przed rozbiorą, b) widok osiedla powstałego w bezpośrednim sąsiedztwie byłego lotniska, w którym wykorzystano beton z recyklingowanych betonowych płyt lotniska

Podczas gdy zastosowanie recyklingowanego kruszywa niesie ze sobą wiele zalet natury ekonomicznej i ma pozytywny efekt na środowisko naturalne, niedopatrzania w kontroli jakości tego kruszywa prowadzą do zastosowania zanieczyszczonego materiału, które w konsekwencji może prowadzić do przedwczesnych zniszczeń konstrukcji.

Niniejszy artykuł przedstawia ocenę stanu nawierzchni parkingowej wykonanej z asfaltu o grubości 51 mm, na 152 mm podbudowie złożonej w 50% z bazaltu, 25% z recyklingowanego asfaltu i w 25% z kruszywa uzyskanego z recyklingowanego betonu, RCA, na której odnotowano znaczne zniszczenia już po pierwszym roku od czasu ukończenia konstrukcji.

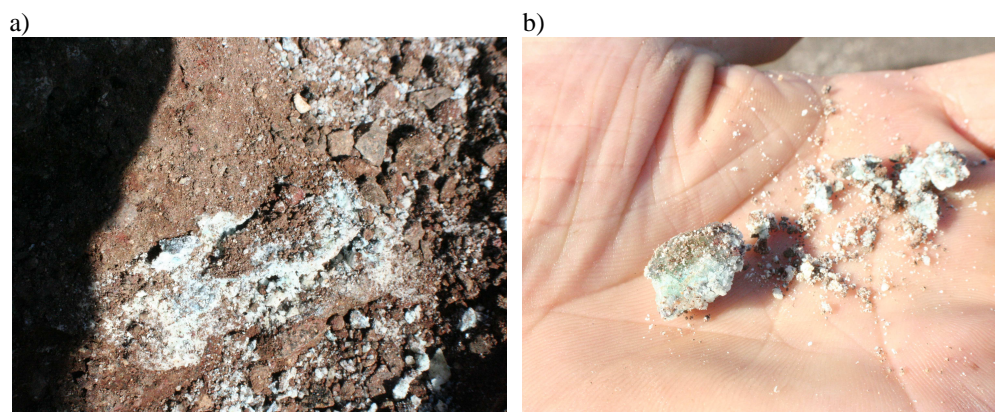
## 2. Ocena nawierzchni w stanie istniejącym

Na powierzchni jednego z parkingów na wyspie Oahu (Hawaje, USA) zaobserwowano powstawanie wybrzuszeń zaledwie rok po wykonaniu nawierzchni. W momencie pierwotnej oceny stanu nawierzchni (po 1-szym roku), odnotowano ponad 30 wybrzuszeń o średnicy 127 mm, wystających ponad 25 mm ponad poziom terenu (rys 2a). Po dwóch latach od wykonania nawierzchni, liczba wybrzuszeń zwiększyła się do ponad 100.



Rys. 2. Przykłady uszkodzenia nawierzchni parkingowej: a) miejscowe wybrzuszenia, b) widok uszkodzonego miejsca po usunięciu warstwy wierzchniej

Aby ocenić przyczynę zmian na powierzchni, usunięto wierzchnią warstwę asfaltu w pobliżu wybrzuszenia (rys. 2b), a następnie ręcznie wybrano materiał znajdujący się poniżej. W czasie odsłaniania warstw pod asfaltem, odnotowano białą substancję ze sporadycznie pojawiającym się niebieskawym nalotem dokładnie w miejscu powstawania wybrzuszeń (rys. 3a). Substancja ta, pokazana na rys. 3b, została pobrana do dalszej analizy laboratoryjnej.



Rys. 3. Biały produkt reakcji zidentyfikowany w podbudowie parkingu tuż pod miejscowym wybrzuszeniem, b) produkt usunięty z podbudowy widoczny na dłoni

### 3. Ocena laboratoryjna pobranej próbki materiału

Aby zidentyfikować przyczynę powstawania wybrzuszeń, pobraną próbkę materiału (produkt zaistniałej reakcji) poddano ocenie laboratoryjnej. W pierwszym etapie badań, skład chemiczny białej substancji został zbadany przy pomocy:

1. Skaningowego Mikroskopu Elektronowego (SEM) wyposażonego w czujnik rozproszonej energii (EDS)
2. Dyfrakcji Promieni Rentgenowskich (XRD)
3. Fotoakustycznego Spektroskopu Ramanowskiego

Następnie odtworzono w środowisku laboratoryjnym naturalne procesy, jakie zachodziły w podbudowie nawierzchni.

Identyfikacja białego osadu została przeprowadzona przy pomocy JEOL JXA-8500F SEM poprzez bombardowanie próbki elektronami. Elektrony te oddziałują na atomy próbki produkując elektrony rozproszone wstecznie (z ang. *Back Scattered Electrons, BSE*), elektrony drugorzędne (z ang. *Secondary Electrons, SE*), i charakterystyczne promienie rentgenowskie. Elektrony rozproszone wstecznie i elektrony drugorzędna tworzą powiększone zdjęcie próbki. Ponieważ energia i długość fal emitowanych promieni rentgenowskich jest charakterystyczna dla danych atomów, z których jest emitowana, czujnik energii rozproszonej może zidentyfikować próbkę pod względem składu chemicznego zarówno jakościowo (obecność pierwiastków), jak i ilościowo (ile pierwiastków jest obecnych).

Tablica 1. Obecność pierwiastków w badanej próbce (wartość średnia), otrzymana za pomocą pomiaru energii rozproszonej (EDS)

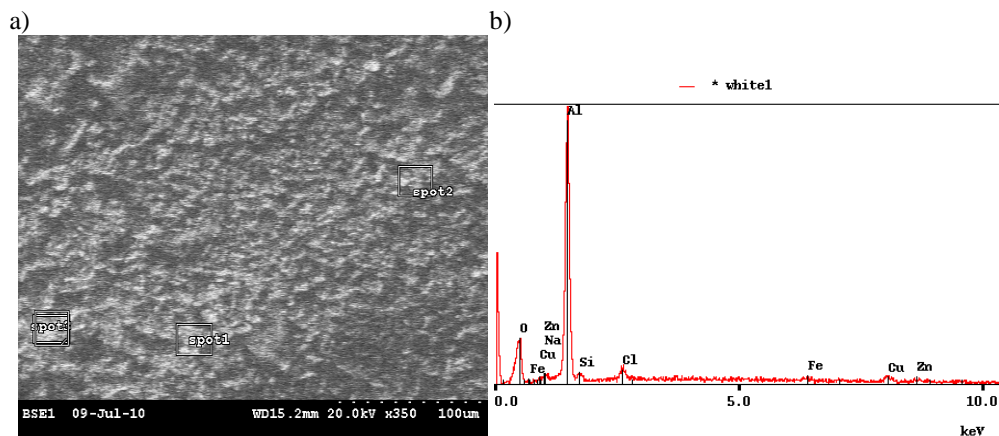
Produkt reakcji	Ca	Si	Al	Fe	S	Na	O	Cu	Zn	Cl
	[%]									
Biała część pobranej próbki	Nie wykryto	6,15	60,60	0,98	Nie wykryto	1,88	22,16	3,41	2,01	2,82
Niebieskawa część próbki	0,86	17,07	50,07	1,85	0,26	Nie wykryto	15,62	9,57	4,27	0,45

Na rys. 4a pokazano 350-krotne powiększony obraz produktu reakcji uzyskany dzięki elektronom drugorzędnym. rys. 4b natomiast, pokazuje spektrum próbki otrzymane w wyniku analizy poszczególnych punktów. Pozwoliło to na zidentyfikowanie obecności aluminium (Al) i tlenu (O) w badanej próbce, oraz śladowych ilości krzemu (Si), miedzi (Cu), chloru (Cl), cynku (Zn), sodu (Na) i żelaza (Fe). Analizując powierzchnię pod każdym pikiem na wykresie, można oszacować relatywne stężenia danego pierwiastka w badanej próbce, co zostało sumarycznie przedstawione w tablicy 1. Należy tutaj zauważyć, iż EDS nie ma możliwości wykrywania pierwiastków lżejszych niż lit, włączając wodór.

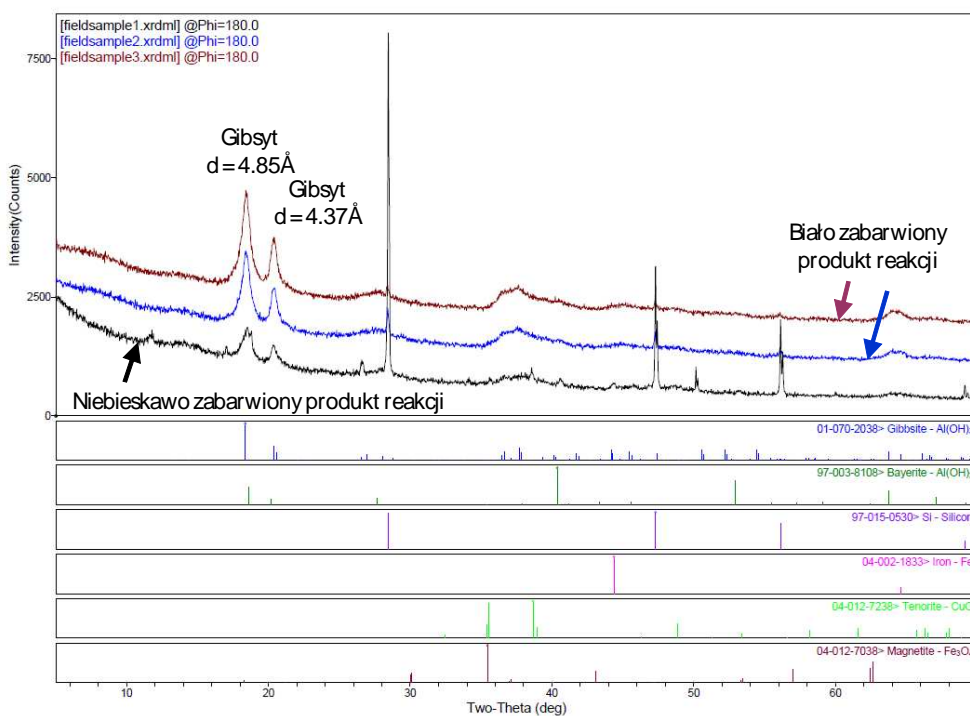
Wyniki otrzymane dla próbki pobranej z uszkodzonej powierzchni parkingu pokazują, iż dominującym pierwiastkiem obecnym w próbce jest glin ( $\geq 50\%$ ) i tlen ( $\geq 15,6\%$ ), podczas gdy próbka z niebieskawym nalotem zawiera także znaczącą ilość krzemu i miedzi.

W następnym etapie badań, obraz dyfrakcji promieni rentgenowskich uzyskany został przy pomocy dyfraktometru PANalytical X'pert Pro MPD. Wyniki analizy przeprowadzonej na dwóch próbkach o białym zabarwieniu i jednej próbce o niebieskawym kolorze zostały przedstawione na rys. 5. Jak można zauważyć, piki lokalne występują dla kątów  $2\theta = 18,3^\circ$  i  $2\theta = 20,3^\circ$  ( $d = 4,85 \text{ \AA}$  and  $d = 4,37 \text{ \AA}$ ), co sugeruje występowanie gibbsytu lub wodorotlenku glinu,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , który jest produktem korozji materiałów aluminiowych [3]. Wyniki te są spójne ze wcześniej przedstawionymi rezultatami uzyskanymi z badań przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego, które wskazywały na obecność glinu i tlenu, jako podstawowych pierwiastków obecnych w produktach reakcji. Kilka pomniejszych maksimum lokalnych związanych jest z występowaniem gibbsytu lub bayerytu (meta-stała forma  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) i występuje na wszystkich trzech wykresach uzyskanych w wyniku analizy XRD. Maksima lokalne dla kątów  $2\theta = 28,5^\circ$ ,  $2\theta = 47,3^\circ$ ,  $2\theta = 56,1^\circ$  ( $d = 1,61 \text{ \AA}$ ,  $d = 1,05 \text{ \AA}$  oraz  $d = 0,93 \text{ \AA}$ ) dało się też wyraźnie zauważyć dla próbki o niebieskawym zabarwieniu. Ich obecność może sugerować obecność krzemu.





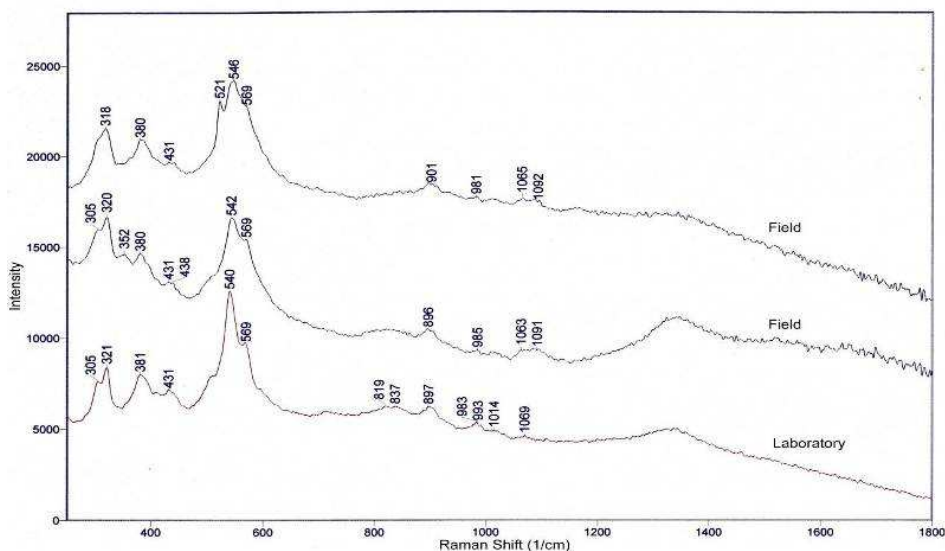
Rys. 4. a) Zdjęcie zidentyfikowanej substancji otrzymane przy pomocy mikroskopu elektronowego, b) Wynik analizy próbki otrzymany dzięki czujnikowi energii rozproszonej, pokazujący udział poszczególnych pierwiastków [4]



Rys. 5. Wyniki uzyskane dzięki wykorzystaniu dyfrakcji rentgenowskiej

Niektóre z mniejszych pików świadczą o obecności żelaza (Fe), tlenku miedzi ( $\text{CuO}$ ) i magnetytu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Połączenie tlenku miedzi i krzemu jest prawdopodobnie odpowiedzialne za niebieskawy odcień. Dokładną informację o odległościach między-atomowych  $d$ , i odpowiadającym im różnym związkom można znaleźć w publikacjach wydanych przez Joint Committee on Powder Diffraction [5, 6].

W kolejnym etapie badań, próbki poddano analizie wykorzystującej fotoakustyczny spektroskop ramanowski [7]. W badaniu tym, biały produkt reakcji pobrany z parkingu oświetlony został wiązką światła z lasera. Światło z próbki zostało następnie poddane obróbce monochromatycznej. Wiadomym jest, że widmie pojawiają się tylko te drgania, w których zmienia się polaryzowalność w taki sposób, że nie ma ona ekstremum (minimum bądź maksimum) w położeniu równowagi [8]. Wyniki spektroskopii Ramana zostały przedstawione na rys. 6 (linie oznaczone na rysunku jako „Field”). Zgodnie z wcześniejszymi badaniami [9] wiadomo, iż numery fal odpowiadające drganiom charakterystycznym dla bayerytu obejmują następujące wartości: 1068 dla  $\alpha(\text{OH})$ , 545, 569, i 899 dla  $\chi(\text{OH})$ , oraz 322, 388 i 435 dla Al-O. Jak można zauważyć na rys. 6, bardzo zbliżone wartości do wymienionych przez Ruana [7] widnieją na otrzymanym spektrum.



Rys. 5. Wyniki spektroskopii Ramana

Warto tutaj zauważyć, że spektrum Ramana nie wykazało istnienia gibbsytu, na istnienie którego wskazywały wyniki badań XRD. Można to wytłumaczyć wiekiem próbek poddanych do badań. Mianowicie, spektra Ramana otrzymane były dla próbek świeżo pobranych z miejsca ekspertyzy, natomiast dyfrakcja promieni rentgenowskich przeprowadzona została na próbkach znacznie starszych. Wiadomo, iż beyeryt nie jest formą stałą i należy sądzić, że po czasie samoczynnie przekształcił się w gibbsyt. Niezależnie od tego faktu, można wywnioskować na podstawie otrzymanych wyników, iż przyczyną uszkodzenia nawierzchni parkingu była korozja aluminium, którego pochodzenie w tym momencie badań nie było jeszcze ani znane, ani udokumentowane.

#### 4. Symulacja warunków naturalnych w środowisku laboratoryjnym

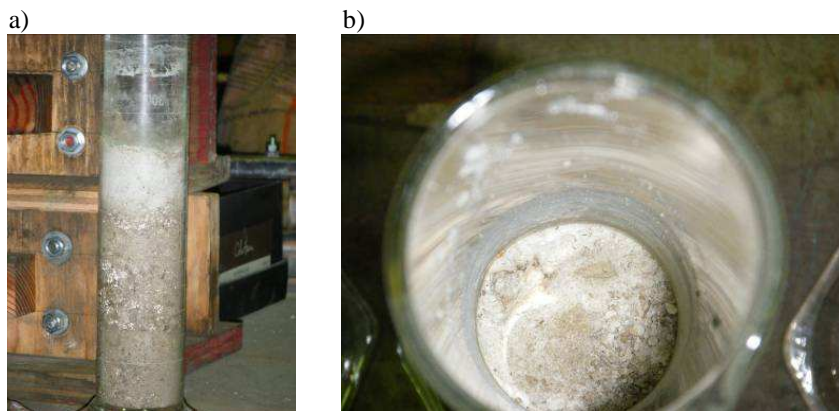
Biorąc pod uwagę opisaną wcześniej analizę laboratoryjną, nie ulega wątpliwości, iż produktem reakcji prowadzącej do wybrzuszeń była obecność  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Powstania  $\text{Al}(\text{OH})_3$  można się spodziewać, kiedy aluminium koroduje w środowisku alkalicznym. Aby zmierzyć pH środowiska, próbki RCA umieszczono w 100 ml destylowanej wody. Już po 3 dniach zaobserwowano, że mierzone pH przekroczyło wartość 12. Ponieważ naturalne ukształtowa-

nie terenu wokół parkingu powodowało drenaż wody poprzez warstwy podbudowy, można było się spodziewać naturalnie występującego wilgotnego środowiska o odczynie silnie zasadowym. Rozważyć należało więc hipotezę, iż recyklingowane kruszywo (asfaltowe lub betonowe) zawierało aluminium pochodzące z rozbiórek. Aluminium to reagowało na skutek silnie zasadowego środowiska spowodowanego obecnością RCA i wody pochodzącej z drenażu.

Aby potwierdzić lub wykluczyć tę hipotezę, reakcje zachodzące w środowisku naturalnym, zostały skopiowane w środowisku laboratoryjnym w następujący sposób:

- 1 gram pyłu aluminiowego umieszczony został w 80 gramach roztworu NaOH (pH = 12,0)
- 1 gram pyłu aluminiowego został zmieszany z 28 gramami świeżego zaczynu cementowego ( $w/c = 0,40$ ). Uzyskana próbka została umieszczona w 72 gramach wody destylowanej (pH po 24 godzinach wynosiło 11,8)

W obu przypadkach zaobserwowano znaczne wydzielanie się gazów w kilka minut po przygotowaniu próbki. Dodatkowo, biały produkt reakcji widziany wcześniej w miejscu ekspertyzy, zaczął się formować na powierzchni RCA już po 24 godzinach (rys. 6). Odnotowano także, iż zachodząca reakcja powoduje pęcznienie. Po trzech dniach produkt reakcji poddany został analizie laboratoryjnej: spektroskopii ramanowskiej oraz dyfrakcji promieni rentgenowskich. Oba testy wykazały obecność bayerytu  $[Al(OH)_3]$  jako głównego produktu reakcji. Dodatkowo, wyniki dla próbki laboratoryjnej (oznaczone jako „Laboratory” na rys. 5) są zgodne z wynikami otrzymanymi dla próbek pobranych z miejsca ekspertyzy.



Rys. 6. Biała substancja pojawiająca się na powierzchni RCA a) Widok z bok, b) Widok z góry

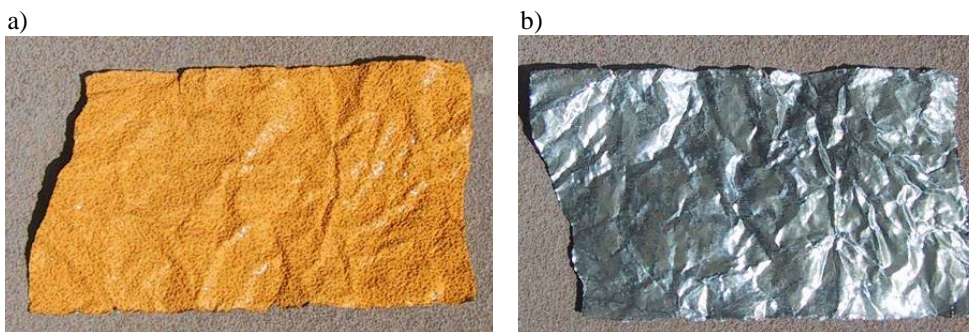
Uzyskane wyniki potwierdziły, iż przyczyną uszkodzeń nawierzchni było powstawanie beyerytu, nietrwałej formy gibbsytu na skutek reakcji śladowych ilości aluminium w środowisku silnie zasadowym.

Po dłuższym dochodzeniu udało się ustalić, iż firma odpowiedzialna za dostawę recyklingowanego kruszywa asfaltowego używała materiału z rozbiórki dróg, na których zamocowane były aluminiowe oznaczenia drogowe (rys. 7).

## 5. Podsumowanie

Recyklingowane kruszywo powstające z przetworzenia istniejącego betonu lub asfaltu jest obiecującą alternatywą dla kruszyw naturalnych. Należy pamiętać jednak, iż kruszywo to jest podatne na pewne reakcje niszczące i należy starannie kontrolować źródło jego pocho-

dzenia. Analiza przedstawiona w tej pracy pozwoliła na ustalenie przyczyn powstawania wybrzuszeń asfaltowej powierzchni parkingowej na posadowieniu z wykorzystaniem recyklingowanego asfaltu i betonu. Dzięki wynikom badań laboratoryjnych i symulacji naturalnych warunków w laboratorium, udowodniono, iż przyczyną uszkodzeń było formowanie się bayerytu, czyli nietrwalej formy gibbsytu, która to reakcja wywołała pęcznienie i liczne wybrzuszenia na powierzchni parkingu. Proces ten był konsekwencją reakcji śladowych ilości aluminium pochodzącego z recyklingowanego asfaltu w środowisku zasadowym, spowodowanej obecnością RCA i dostępem wilgoci.



Rys. 7. Oznaczenia drogowe, które zostały dostały się jako zanieczyszczenia do recyklingowanego asfaltu a) Część górna, b) część dolna zawierająca aluminium

### Literatura

1. FHWA, Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate, FHWA State of the Practice National Review, September 2004.
2. Vancura M.E., Khazanovich L., Tompkins D.M.: 'Reappraisal of Recycled Concrete Aggregate as Coarse Aggregate in Concretes for Rigid Pavements', Journal of the Transportation Research Board, Vol.2113/2010.
3. Zhang J., Klasky M, Letellier B.C.: 'The Aluminum Chemistry and Corrosion in Alkaline Solutions', Journal of Nuclear Materials, Vol.384/2009.
4. Ooi P.S.K., Rajabipour F., Shafaatian A, Joo S.: 'Forensic Investigation of a Distressed Pavement Supported on a Base Course Containing Recycled Concrete Aggregate', accepted for publication in Transportation Research Journal
5. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Selected Powder Diffraction Data for Minerals Data Book, First Edition, Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Swarthmore, PA, 1974.
6. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, 'Powder Diffraction File, Alphabetical Indexes, Inorganic Phases', International Centre for Diffraction Data, PA, 1991.
7. Misra A.K., Sharma S.K., Kamemoto L., Zinin P.V., Yu Q., Hu N., Melnick L.: 'Novel micro-cavity substrates for improving the Raman signal from submicrometer size materials', Applied Spectroscopy, Vol. 63, No. 3/2009.
8. Kęcki A.: 'Podstawy spektroskopii molekularnej', Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
9. Ruan H.D., Frost R.L., Klopogge J.T.: 'Comparison of Raman spectra in characterizing gibbsite, bayerite, diaspore and boehmite', Journal of Raman Spectroscopy, Vol. 32/2001.